



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Caracterización de tres muestras diferentes de arenas mediante el ensayo de consolidación unidimensional a altas presiones

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar por el título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR:	Jhoanna A. González C. Julmarie C. Longa D.
PROFESOR GUÍA	Heriberto Echezuría.
FECHA	25 de noviembre de 2013.



Dedicado a nuestro querido amigo:

Eudomar Henríquez.

Quien en tan poco tiempo nos enseñó lo que no sabíamos y nos despertó a lo que ya sabíamos.

A usted, mil gracias.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a **Dios**, a mi **Virgen del Valle “Mi Vallita”**, **San judas Tadeo** y a **todos mis santos**, ya que en ustedes me refugie en mis momentos de ahogo y a los que me aferre para seguir adelante.

Mami, gracias por tu apoyo y confianza, por la amistad incondicional, por permitir que mis sueños no se apaguen y por la dulzura de tus palabras. Gracias por tomar mi mano y enseñarme desde cero a vivir.

Papi, mi héroe, mi apoyo y modelo a seguir. Gracias por hacerme ver que en la vida se lucha por lo que se quiere; gracias por mantener mis pies en la tierra, por confiar en mí, por cada consejo y por hacer mi lucha menos pesada.

Hermano, gracias por todo, son miles de recuerdos, palabras, lecciones, peleas y risas. A ti también te debo esta meta cumplida.

Mathias Adrián, desde el aviso de tu llegada me brindaste aliento, muchos de mis pensamientos para seguir adelante fueron por ti. Mi sobrino, mi chino, mi bello, Dios te Bendiga siempre.

Los amo con el alma y en conjunto gracias por ser la familia que somos. Por ustedes estoy aquí y les dedico este logro.

A **mis familiares**, quienes han puesto un granito de arena para que siga adelante, a cada uno de ustedes muchísimas gracias por haber estado en cada momento de mi vida y por darme todo su cariño.

A **mi Biatri**, quien con todo su esfuerzo y sin tener ningún tipo de nexo sanguíneo se dedicó a formarme como una hija más; a ti mi Bea, muchísimas gracias y nunca me cansare de decirte “Mucho de lo que soy ahora es gracias a tus enseñanzas”.

Jexica Caballero (Caraota) gracias por todo el apoyo brindado, esta etapa no la podía culminar si tu toque artístico. Gracias por escucharme y ser ese hombro de apoyo cuando más lo he necesitado.

Dennison, mi amigo fiel, gracias por hacer que mi vida diera un vuelco de 180°, gracias por cada palabra y por siempre estar allí; Seguimos demostramos que siempre *“llegaremos a tiempo”*.

A mis amigas del colegio, **mis chik's**, quienes son mi escape, ustedes me dan ese aire necesario para seguir con mí andar, gracias por estar a mi lado, las quiero y adoro.

A mis amigos de la universidad, **mi grupete**, ustedes pintaron todos los momentos inolvidables de mi etapa universitaria, los quiero muchísimo y los recordare siempre.

Julmarie, amiga, gracias por acompañarme en este camino tan rudo pero tan gratificante a la vez, son tantas cosas compartidas en tan poco tiempo, pero HA VALIDO LA PENA. Miles de gracias por saber cuándo necesito expresarme, por darme aliento, por brindarme tu amistad sincera y por ayudarme a cumplir esta meta, cuenta conmigo siempre.

Al **Ing. Heriberto Echezuría** quien nos condujo y ayudo en todo este proceso, gracias por la paciencia, la dedicación y todas las enseñanzas entregadas. De nuevo muchísimas Gracias.

Ahora no puedo cerrar, sin darle gracias a todo el equipo del **Laboratorio de Suelos de la UCAB**, quienes nos brindaron todo su apoyo. Gracias **Carmen, Anthony, Elías, Sr. Pedro** y muy especialmente al **Sr. Eudomar** quien fue nuestro guía y maestro durante toda la ejecución de este T.E.G. Siempre los tendré presente y recordare todo el cariño que nos brindaron.

Jhoanna A. González C.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a **Dios** por permitirme llegar hasta aquí, a **Mi Coromotico** que me protegió en los momentos más difíciles que, junto con **Mi Familia** son los pilares de mi fortaleza.

Gracias **FAMILIA**, por estar siempre ahí alentándome. Cada uno de ustedes tuvo y tendrá un papel importante en cada proyecto o meta que me proponga alcanzar.

A **mi Padre** que con su manera de ser muy singular me enseñó a tomármela con calma, tener mente fría y esforzarme al máximo para alcanzar todas mis metas.

A mi **Julius**, mi hermano, mi amigo y compañero, que a pesar de su corta edad, me ha sabido escuchar y comprender.

A ti **Mamá**, que a tu manera, siempre trataste de transmitirme todas tus experiencias y consejos. A ti debo mi carácter y tenacidad ante la vida, esa determinación de valerme por mi misma y no depender de nadie.

Muchachas, a todas mis amigas de la infancia, con ustedes crecí y aprendí a desenvolverme, ser más independiente y saber reconocer una verdadera amistad. A ustedes que sin importar el tiempo sin hablarnos salen al rescate.

Mi **súper grupo de la universidad**, Ana, Yane, Sami y Tomi desde el principio nos apoyamos para cada parcial, cada trabajo. Gracias por nuestra manera única de celebrar los viernes de shawarman y permitirme llegar a conocerlos y decir que más que compañeros de clases, son mis amigos. Los quiero chicos y gracias por todo su apoyo. Los estaré esperando. Este logro es de los 5.

A ti **Juanita**, mi compañera de tesis, amiga incondicional, que a pesar de nuestros encuentros cercanos con la tecnología logramos nuestros objetivos y buenas anécdotas. Tú me diste la alegría de conocer a una de las personas que desde ese primer día me ha brindado un apoyo gigantesco, no solo con la carrera sino con la vida.

A ti **mi VIEJO** te agradezco todo lo que hemos aprendido juntos. Solo dios nos permitirá seguir creciendo.

Al **Sr. Eudomar** que sin su apoyo y experiencia no hubiésemos concluido este T.E.G. gracias por todas las enseñanzas y el cariño que nos dio.

A los muchachos del laboratorio de suelos. **Carmen, Anthony, Elías y el Sr. Pedro** gracias por todo el apoyo brindado.

Al **Ing. Heriberto Echezuría** que nos dio la oportunidad de realizar este T.E.G, y así acercarnos aún más a la meta final.

A **Jexica Caballero**, que sin tu toque artístico seríamos unas más del montón.

Julmarie C. Longa D

ÍNDICE

Dedicado a nuestro querido amigo:	1
AGRADECIMIENTOS	2
AGRADECIMIENTOS	4
ÍNDICE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	11
SINOPSIS	17
INTRODUCCIÓN	18
Capítulo I	19
1.1. Planteamiento del problema:	19
1.2. Objetivos	20
1.3. Alcance y limitaciones.....	21
Capítulo II	22
MARCO TEÓRICO	22
2.1 Arenas Limpias.	22
2.2 Consolidación.	31
2.3 Las arenas y explotación de yacimientos por el método de compactación - acuíferos profundos. Aplicabilidad en campo.	36
Capítulo III.....	40
MARCO METODOLÓGICO.....	40
3.1. Equipos	40
3.2. Calibración del equipo:	43
3.3. Preparación de la muestra:	43

3.4. Determinaciones previas al ensayo:.....	46
3.5. Procedimiento para la ejecución del ensayo de consolidación unidimensional.	49
Capítulo IV	50
RESULTADOS	50
4.1. Muestra Original	50
4.2. Muestra Pasante tamiz #4 Retenido tamiz #10 (P#4 R#10)	55
4.3. Muestra Pasante tamiz #10 Retenido tamiz #40 (P#10 R#40)	64
4.4. Muestra Pasante tamiz #40 (Pasante #40)	73
CAPITULO V	78
ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
5.1. Muestra Original.	79
5.2. Muestra Pasante tamiz #4 Retenido tamiz #10 (P#4R#10)	87
5.3. Muestra Pasante #10 – Retenido #40.....	99
5.4. Muestra Pasante tamiz #40 (P#40), ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$	110
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES.....	122
BIBLIOGRAFÍA	123
ANEXOS – CÁLCULOS	124
Ensayo de consolidación unidimensional y relación de vacíos	124
Ensayo Granulométrico:	127
Estimación de la Conductividad Hidráulica.	128
Cálculo del Cambio Relativo:.....	130
Diferencia % pasante:	131

ÍNDICE FIGURAS

Figura N° 1: (a) Elemento de suelo en estado natural. (b) Elemento de suelo de tres fases. Fundamentals of Geotechnical Engineering. 3 ^{ra} Edition. Braja M Das.	23
Figura N° 2: Curva Granulométrica Especificada por la norma Covenin 277 y ASTM C33. Manual del concreto estructural. Tercera edición 2009.	27
Figura N° 3: Curvas granulométricas de cada muestra. Fuente propia.....	28
Figura N° 4: Curva granulométrica para la muestra en condición original. Fuente Propia.....	30
Figura N° 5: Curva de Calibración del equipo. Fuente propia.....	34
Figura N° 6: Estructura de yacimiento.....	37
Figura N° 7: Extracción del crudo por diferencial de presiones. Fuente propia.....	38
Figura N° 8: Proceso de fracturamiento y reacomodo al disminuir las presiones de explotación. Fuente propia .38	
Figura N° 9: Esquema de arrastre de crudo remanente por el agua inyectada.....	39
Figura N° 10: Fracturamiento generado por la inyección de agua a presión. Formación de meniscos entre las partículas.....	39
Figura N° 11: Equipo de consolidación: a) descargado, b) cargado. Fuente propia.....	41
Figura N° 12: a) Juego de masas. b) equipo de consolidación. Fuente propia.....	41
Figura N° 13: Proceso de consolidación con la muestra inundada. Fuente propia.....	42
Figura N° 14: a) Proceso de carga en la calibración. b) Ajuste del equipo. Fuente propia.....	42
Figura N° 15: a) Muestra original, b) Muestra P#4-R#10.....	45
Figura N°16: a) Muestra P#10-R#40, b) Muestra P#40.....	45
Figura N° 17: a) Equipos para el ensayo, b) Extracción de aire a la muestra, c) Bomba. Fuente propia.	46

Figura N° 18: a) Balanza, carga máx. 350 gr, b) Horno. Fuente propia.....	48
Figura N° 19: a) Balanza, b) Tamices, cuchara y muestra tamizada (fondo). Fuente propia.....	48
Figura N° 20: a) Muestras tamizadas, b) Tamices disponibles en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica Andrés Bello. Fuente propia.....	48
Figura N° 21: Curva granulométrica muestra original. Fuente propia.....	80
Figura N° 22: Curva % Deformación vs Esfuerzo. Muestra original. Fuente propia.....	81
Figura N° 23: curvas granulométricas. Muestra Original ensayadas. Fuente propia.....	83
Figura N° 24: Relación de Vacíos. Muestra Original. Fuente propia.....	84
Figura N° 25: Conductividad Hidráulica. Muestra original. Fuente propia.....	86
Figura N 26: Curva granulométrica. P#4-R#10. Fuente propia.....	87
Figura N° 27: % Deformación. P#4-R#10. Ensayo a 56,6 kg/cm2. Fuente propia.....	88
Figura N° 28: Curva Granulométrica. P#4-R#10. Ensayo a 56,6 kg/cm2. Fuente propia.....	90
Figura N° 29: Relación de Vacíos. P#4-R#10. Ensayo a 56,6 kg/cm2. Fuente propia.....	91
Figura N° 30: Conductividad Hidráulica. P#4-R#10. Ensayo a 56,6 kg/cm2. Fuente propia.....	92
Figura N° 31: % Deformación. P#4-R#10. Ensayo a 127,3 kg/cm2. Fuente propia.....	93
Figura N° 32: Curva Granulométrica. P#4-R#10. (Ensayo a 56,6 kg/cm2 y 127,3 kg/cm2. Fuente propia.....	95
Figura N° 33: Relación de Vacíos. P#4-R#10. Ensayo a 127,3 kg/cm2... Fuente Propia.....	96
Figura N° 34: Conductividad Hidráulica. P#4-R#10. Ensayo a 127,3 kg/cm2 Fuente propia.....	97
Figura N 35: Curva resumen de las granulometrías para la muestra Pasante #4 Retenido #10. Sin ensayar y las ensayadas a 0%, 3%, 6% e inundada con $W_o=3\%$. Mitad de Ensayo y Ensayo Completo Fuente propia.....	98
Figura N° 36: Curva Granulométrica. P#10-R#40. Ensayo a 56,6 kg/cm2. Fuente propia.....	99
Figura N° 37: % Deformación. P#10-R#40. Ensayo a 56,6 kg/cm2. Fuente propia.....	100

Figura N° 38: Curva Granulométrica. P#10-R#40. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente propia.....	102
Figura N° 39: Relación de Vacíos. P#10-R#40. Ensayo a 56,6 kg/cm ² ... Fuente Propia.....	103
Figura N° 40: Conductividad Hidráulica. P#10-R#40. Ensayo a 56,6 kg/cm ² Fuente propia.....	104
Figura N° 41: % Deformación. P#10-R#40. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente propia.....	105
Figura N° 42: Curva granulométricas. Fuente propia.....	107
Figura N° 43 Relación de vacíos. P#10-R#40. Fuente propia.....	108
Figura N° 44: Conductividad Hidráulica. P#10-R#40. Fuente propia.....	109
Figura N° 45: Curva granulométrica, P#40. Sin ensayar. Fuente Propia.....	110
Figura N° 46: % Deformación. P#40. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente propia.....	111
Figura N° 47: Curvas Granulométricas. P#40. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente propia.....	113
Figura N° 48 Relación de vacíos. Pasante #40. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente propia.....	114
Figura N °49: Conductividad Hidráulica. Pasante #40. Fuente propia.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: valores típicos de Conductividad Hidráulica para suelos saturados. Fundamentals of Geotechnical Engineering, 3 ^{ra} Edition. Braja M Das	25
Tabla N° 2: Tamaño del grano. Fundamentals of Geotechnical Engineering, 3 ^{ra} Edition. Braja M Das.....	28
Tabla N° 3: Porcentaje Retenido para cada tamiz. Fuente propia.....	30
Tabla N° 4. Granulometría Muestra Original. W= 0%. Sin Ensayar. Fuente Propia.....	50
Tabla N° 5. Granulometría Muestra Original. W= 0%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	51
Tabla N° 6. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Original. W=0%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	51
Tabla N° 7. Granulometría Muestra Original. W= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	52
Tabla N° 8. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Original. W=3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	52
Tabla N° 9. Granulometría Muestra Original. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	53
Tabla N° 10. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Original. W=6%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	53
Tabla N° 11. Granulometría Muestra Original. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.	54
Tabla N° 12. Granulometría Muestra Original. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.	54
Tabla N° 13. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 0%. Sin Ensayar. Fuente Propia.....	55
Tabla N° 14. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 0%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	56
Tabla N° 15. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W=0%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	56
Tabla N° 16. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 3%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	57
Tabla N° 17. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W=3%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	57

Tabla N° 18. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 6%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	58
Tabla N° 19. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W=6%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	58
Tabla N° 20. Granulometría Muestra P#4 R#10. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia. 59	
Tabla N° 21. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	59
Tabla N° 22. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 0%. Ensayo a 127,3 kg/ cm ² . Fuente Propia.....	60
Tabla N° 23. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W= 0%. Ensayo a 127,3 kg/ cm ² . Fuente Propia.....	60
Tabla N° 24. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 3%. Ensayo a 127,3 kg/ cm ² . Fuente Propia.....	61
Tabla N° 25. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W=3%. Ensayo a 127,3 kg/ cm ² . Fuente Propia.....	61
Tabla N° 26. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/ cm ² . Fuente Propia.....	62
Tabla N° 27. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W=6%. Ensayo a 127,3 kg/ cm ² . Fuente Propia.....	62
Tabla N° 28. Granulometría Muestra P#4 R#10. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 127,3 kg/ cm ² . Fuente Propia.....	63
Tabla N° 29. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 127,3 kg/ cm ² . Fuente Propia.....	63
Tabla N° 30. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 0%. Sin Ensayar. Fuente Propia.....	64
Tabla N° 31. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 0%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	65
Tabla N° 32. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=0%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	65
Tabla N° 33. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 3%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	66

Tabla N° 34. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=3%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	66
Tabla N° 35. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 6%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	67
Tabla N° 36. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=6%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	67
Tabla N° 37. Granulometría Muestra P#10 R#40. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	68
Tabla N° 38. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	68
Tabla N° 39. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 0%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	69
Tabla N° 40. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=0%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	69
Tabla N° 41. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	70
Tabla N° 42. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	70
Tabla N° 43. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	71
Tabla N° 44. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=6%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	71
Tabla N° 45. Granulometría Muestra P#10 R#40. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	72
Tabla N° 46. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	72
Tabla N° 47. Granulometría Muestra Pasante #40. W=0%. Sin Ensayar. Fuente Propia.....	73
Tabla N° 48. Granulometría Muestra Pasante #40. W= 0%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	74

Tabla N° 49. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Pasante #40. W= 0%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	74
Tabla N° 50. Granulometría Muestra Pasante #40. W= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	75
Tabla N° 51. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Pasante #40. W=3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	75
Tabla N° 52. Granulometría Muestra Pasante #40. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	76
Tabla N° 53. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Pasante #40. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	76
Tabla N° 54. Granulometría Muestra Pasante #40. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	77
Tabla N° 55. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Pasante #40. Inundada con Wo= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	77
Tabla N° 56: Cambio relativo de %deformación. Fuente propia.....	81
Tabla N° 57: Diferencias en porcentajes pasantes, para la muestra original ensayada. Fuente propia.....	82
Tabla N° 58: Cambio relativo de la relación de vacíos. Muestra Original. Fuente propia.....	84
Tabla N° 59: Cambio relativo en la Conductividad Hidráulica. Muestra original. Fuente propia.....	86
Tabla N° 60. Cambio relativo de Deformación para la muestra P#4R#10. Mitad de Ensayo. Fuente Propia.....	88
Tabla N° 61 .Diferencia %Pasante respecto a la Muestra P#4-R#10 Sin Ensayar. A 56,6 kg/cm ² . Fuente Propia.....	89
Tabla N° 62. Cambio relativo de Relación de vacíos para la muestra P#4R#10. Mitad de Ensayo. Fuente Propia.....	91
Tabla N° 63. Cambio relativo de Conductividad Hidráulica para la muestra P#4R#10. Mitad de Ensayo. Fuente Propia.....	92
Tabla N° 64. Cambio relativo de Deformación para la muestra P#4R#10. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	93

Tabla N° 65. Diferencia %Pasante respecto a la Muestra P#4-R#10 Sin Ensayar. Ensayo a 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	94
Tabla N°66. Cambio relativo de Relación de vacíos para la muestra P#4R#10. Ensayo 127,3 kg/cm ² . Fuente Propia.....	96
Tabla N° 67 Cambio relativo de Conductividad Hidráulica. Muestra P#4R#10. Ensayo. 127,3 kg/cm ² Fuente Propia.....	97
Tabla N° 68: Cambio relativo en la deformación. Muestra P#10-R#40. Fuente propia.....	100
Tabla N° 69: Diferencias en porcentajes pasantes, para la muestra original ensayada. Fuente propia.....	101
Tabla N° 70: Cambio Relativo. Relación de Vacíos. P#10-R#40.....	103
Tabla N° 71: Cambio Relativo. Conductividad Hidráulica. P#10-R#40. Fuente propia.....	104
Tabla N° 72: Cambio relativo. % Deformación. P#10-R#40. Fuente propia.....	105
Tabla N° 73: Diferencias en porcentajes pasantes, para la muestra original ensayada. Fuente propia.....	106
Tabla N° 74: Cambio Relativo. Relación de Vacíos. P#10-R#40.....	108
Tabla N° 75: Cambio relativo. Conductividad Hidráulica. P#10-R#40.....	109
Tabla N° 76. Cambio relativo de Deformación para la muestra P#4R#10. Mitad de Ensayo. Fuente Propia ..	111
Tabla N° 77. Diferencia %Pasante respecto a la Muestra P#40 Sin Ensayar. Ensayo Completo. Fuente Propia	112
Tabla N° 78. Cambio relativo de Relación de vacíos para la muestra P#40. Ensayo Completo. Fuente Propia	113
Tabla N° 79. Cambio relativo de Conductividad Hidráulica para la muestra P#40. Ensayo Completo. Fuente Propia.....	115
Tabla N° 80: Datos del ensayo de consolidación para la muestra original a 0%.....	125
Tabla N° 81: Características de la muestra original a 0%.....	125
Tabla N° 82: Datos del ensayo de consolidación para la muestra original inundada con $W_o=3\%$, al final de los 14,147 kg/cm ²	126

Tabla N° 83: Características de la muestra original a 0%.....	127
Tabla N° 84: Cálculo de la granulometría para la muestra original sin ensayar.....	128
Tabla N° 85: Datos de granulometría para la muestra original al 0%.....	129
Tabla N° 86: Tabla N° 86: Resumen de la granulometría y relación entre tamaño de grano.....	129
Tabla N° 87: Resultados del ensayo de consolidación unidimensional, Muestra P#10-R#40.....	130
Tabla N° 88: Diferencia %pasante respecto a la Muestra P#10-R#40 sin ensayar. Fuente propia.....	131

SINOPSIS

Sometiendo muestras de arenas limpias con gradaciones específicas que representen la fracción gruesa (Pasante tamiz #4-Retenido tamiz #10), fracción media (Pasante tamiz #10-Retenido tamiz #40) y fracción fina (Pasante tamiz #40) a ensayos de consolidación unidimensional a altas presiones. Caracterizaremos las respuestas de las misas, mediante la medición del fracturamiento del grano luego del ensayo, al realizarle un ensayo granulométrico a cada muestra ensayada. Adicionalmente se determinó el cambio en la relación de vacíos generado por la pérdida volumétrica de la muestra para la misma condición de carga. Con estos resultados se estimó la variación en la conductividad hidráulica para cada una. Determinando que el fracturamiento sufrido, junto con la reducción de la relación de volumen afecta directamente la conductividad hidráulica. Sabiendo que estas variaciones de esfuerzos suceden de manera similar en los yacimientos, el tipo de gradación que tenga el suelo presente en conjunto con su variación en el contenido de humedad afectaran los procesos de explotación, ya sea por diferencia de presiones o por inyección de agua a presión en aquellos yacimientos que ya se ha cumplido su periodo de explotación pero se desea extraer el remanente adherido a las partículas. Este proceso genera una condición de esfuerzos completamente distintos en las partículas ya fracturadas.

Palabras clave:

- Consolidación Unidimensional
- Altas presiones
- Arenas Limpias
- Fracturamiento

INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Especial de Grado fue orientado al estudio de las características de las arenas que determinan su comportamiento a altas presiones mediante el ensayo de consolidación unidimensional, el cual se realizara a presiones de $56,6 \text{ kg/cm}^2$ y $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Las características estudiadas fueron, primeramente, el tamaño del grano y la humedad inicial de la muestra. Esto se logró al dividir una muestra de arena limpia mediante un ensayo granulométrico para obtener las fracciones representativas de arenas de grano grueso, medio y fino. Según la norma Covenin 277 y ASTM C-33, el material pasante del tamiz #4 y retenido en el tamiz #10, corresponde a la fracción gruesa, cuyo tamaño de grano ira desde 4,76 mm a 2 mm; la fracción de arena media será la pasante del tamiz #10 retenido en el #40, con tamaños de grano desde 2 mm a 0,42 mm y por último la fracción fina que corresponderá al material pasante por el tamiz #40, que tendrán un tamaño de grano dentro del rango de 0,42 mm a 0,038 mm para el tamiz #400. Se mantendrá fija la variable del tamaño de grano para variar el contenido de humedad y determinar la influencia de esta en el comportamiento de la muestra según el tamaño del grano. Adicionalmente, se estudió el fracturamiento experimentado por los granos de las distintas fracciones de la arena y de la muestra inalterada bajo las condiciones de carga antes mencionadas. Basándonos en el nivel de fracturamiento y la variación volumétrica que experimentó la muestra, se estudió la variación de la superficie específica y como esta afecta la capacidad de conducción hidráulica del suelo, ya que este es un parámetro fundamental en el estudio de los yacimientos para determinar el nivel de producción, ya sea por explotación mediante diferencial de presiones o por compactación. El concepto básico que soporta esta investigación expresa que la reducción de la presión de poros por la extracción del fluido del yacimiento incrementará el esfuerzo efectivo en el suelo. En consecuencia, la motivación para la investigación se basa en conocer la respuesta de arenas con distintas gradaciones ante este tipo de solicitudes. Adicionalmente, considerando que al progresar la producción queda fluido adherido a los granos producto de la fuerza capilar generada por la viscosidad del fluido, surgió la interrogante con relación a la potencial variación en la fracturabilidad de los granos con distintos contenidos de humedad.

Capítulo I

1.1.Planteamiento del problema:

A lo largo de los años, se ha estudiado poco el comportamiento de los suelos arenosos bajo el efecto de la consolidación. Este estudio se ha enfocado en analizar el comportamiento de suelos cohesivos, caracterizándolo según el tipo de partícula que lo conforme, contenido de humedad que tenga y las presiones que sea capaz de soportar, determinando si es un suelo arcilloso normalmente consolidado o sobre consolidado. Ahora bien en los suelos no cohesivos, se asume que la estructuración de los granos y la condición inicial de la muestra no influirán en la respuesta.

Un suelo al estar sometido a altas presiones presenta características particulares, debido al estado de esfuerzos en el cual se encuentran. Los granos son capaces de absorber grandes cargas y sufrir deformaciones importantes. Estas deformaciones dependerán de la formación geológica que tengan dichos suelos (capas de suelo y roca) y de los esfuerzos efectivos a los cuales se sometan. Un ejemplo de estas condiciones son los yacimientos, los cuales gracias a su formación geológica permiten el almacenamiento de gas, crudo o agua de formación (acuíferos profundos), a altas presiones y profundidades. Estos en condición imperturbada se encuentran en equilibrio, pero cuando estos esfuerzos efectivos se incrementan debido a la pérdida de presión interna por extracción, se produce el fracturamiento de los granos, que generara a su vez variación de la conductividad hidráulica del suelo a lo largo de todo el proceso de producción.

Adicionalmente, durante el proceso de producción del yacimiento, el fluido es extraído de los espacios porosos del suelo arenoso, quedando un porcentaje de impregnación adherido a los granos. Ese porcentaje de impregnación genera fuerzas capilares, cuyo efecto no está completamente entendido, particularmente en la fracturabilidad de los granos.

Considerando la importancia de los efectos del incremento de esfuerzos en los suelos granulares junto con la variación de los tamaños de granos que lo conformen, es conveniente entonces, determinar cómo será el comportamiento de los mismos a grandes esfuerzos mediante ensayos de consolidación.

Ahora bien, considerando que los granos quedan impregnados de fluido, se ha orientado la investigación a evaluar indirectamente la influencia de las fuerzas capilares al utilizar como variable el contenido de humedad. Así, se determinará si la misma tiene influencia en varios parámetros del suelo como la deformación y la relación de vacíos y en otros relacionados directamente con los granos como el fracturamiento y la superficie específica la cual está íntimamente ligada con la conductividad hidráulica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general.

Caracterización de tres muestras diferentes de arena mediante el ensayo de consolidación unidimensional a altas presiones.

1.2.2. Objetivos específicos.

1.2.2.1. Evaluar el porcentaje de fracturamiento en las muestras de arenas a ser ensayadas por consolidación unidimensional a una presión de $56,6 \text{ kg/cm}^2$ y $127,3 \text{ kg/cm}^2$.

1.2.2.2. Estimación de la variación de la superficie específica y su efecto en la conductividad hidráulica.

1.2.2.3. Determinar la variación de la conductividad hidráulica (k) para cada muestra de arena.

1.2.2.4. Comparación de la respuesta obtenida por cada arena ensayada respecto a la variación de la humedad y relación de vacíos.

1.2.2.5. Comparación del esfuerzo vs deformación a altas presiones con el estándar.

1.3. Alcance y limitaciones.

La caracterización de las arenas limpias mediante el ensayo de consolidación unidimensional a altas presiones permitirá establecer si existe algún tipo de influencia en la respuesta del suelo según su contenido de humedad y variabilidad en el tamaño del grano.

Estas características van enfocadas hacia el estudio de la variación de la conductividad hidráulica, relación de vacíos, superficie específica y fracturamiento del grano según el contenido de humedad y gradación de las muestras, directamente relacionado con los incrementos de carga. Al tener como variable el agua, se debe destacar que se pretende determinar el grado de influencia, pero no determinar el porqué de existir dicha influencia en el comportamiento, ya que se trata de un fenómeno, cuyo grado de complejidad es mayor y requeriría de ensayos especiales que están fuera del alcance de este Trabajo Especial de Grado.

Pretendiendo mediante el ensayo de consolidación simular el proceso de extracción de crudo en yacimientos o agua para acuíferos profundos, al generar incrementos de carga que originará variación del esfuerzo efectivo al igual que ocurre durante la explotación, dirigido al fracturamiento del grano para una estimación de la conductividad hidráulica.

Enfocándonos en determinar la necesidad de definir el tipo de suelo granular con el cual se está trabajando, ya que existe gran variabilidad en el tamaño de grano, rugosidad de su superficie y que esto influye en su comportamiento.

En la actualidad la determinación de dichas características pueden influir directamente en la toma de decisiones en un proyecto, haciéndolo más viable y eficaz, en cuanto a ejecución, tiempo y economía, ya sea para proyectos de fundaciones, extracción de petróleo (costa afuera y tierra firme), inyección de pozos, entre otros.

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

2.1 Arenas Limpias.

Las arenas limpias son aquellas cuyo contenido de finos es del 5% o menos, ya que éstas han pasado por un proceso de lavado, entendiéndose como finos partículas cuyo tamaño sea menor de 0,075mm. Permitiendo así un mejor reacomodo de las partículas y una interacción grano a grano, generando variaciones volumétricas importantes que afectaran parámetros que dependen de ésta como los son la relación de vacíos, superficie específica y la conductividad hidráulica. Algunas de estas propiedades se estudiarán una vez se hayan ensayado las muestras con pruebas de consolidación unidimensional a altas presiones.

Las propiedades físicas que definen el comportamiento de ésta arena serán descritas a continuación, así como el ensayo de consolidación unidimensional, mediante el cual caracterizaremos a la misma según las variaciones que éste genere en las condiciones iniciales de cada muestra, en conjunto con los cambios en el contenido de humedad. Enfocándonos en las modificaciones a la relación de vacíos, granulometría (variación del tamaño del grano) y conductividad hidráulica en función de la variación de la superficie específica.

2.1.1. Propiedades Físicas:

Las propiedades físicas de cualquier suelo se pueden representar en un diagrama de fases, en el cual se distinguen: sólida, líquida y gaseosa. Donde las fases líquida y gaseosa están comprendidas en el volumen de vacíos y la fase sólida en el volumen de sólidos.

El número de fases dependerá del contenido de agua que el suelo tenga, ya que para suelos secos se tendrán dos fases (sólida y gaseosa) y para un suelo saturado se tendrán

también dos fases pero esta vez son: sólida y líquida, ya que el agua desplaza al aire atrapado. Este arreglo generalmente trifásico se realiza para poder determinar las propiedades volumétricas y gravimétricas; porque en condición natural el suelo se encuentra mezclado en una sola, como se muestra a continuación:

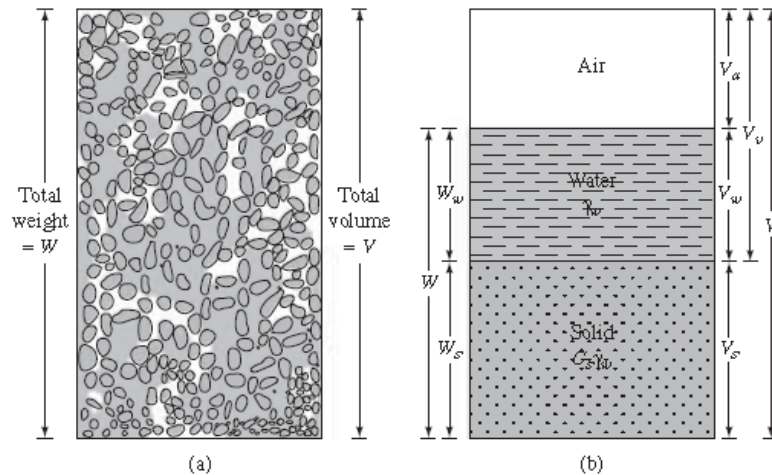


Figura N° 1: (a) Elemento de suelo en estado natural. (b) Elemento de suelo de tres fases. Fundamentals of Geotechnical Engineering, 3ra Edition, Braja M Das.

A partir de la figura anterior se establecen las relaciones volumétricas y gravimétricas necesarias para la aplicación de las teorías de mecánica de los suelos. Algunas de las relaciones se explican brevemente a continuación.

2.1.1.1. Gravedad Específica:

Definida como la relación entre el peso específico de las partículas del suelo y peso específico del agua.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (1)$$

2.1.1.2. Peso Unitario:

Relación entre el peso de una muestra de suelo y el volumen que esta ocupa. Para efectos de la investigación, consideraremos el peso unitario mínimo que se puede

generar en las condiciones iniciales del ensayo. Adicionalmente se considerara el gamma seco o el húmedo según la humedad de la muestra al inicio del ensayo.

$$\text{Peso Unitario seco: } \gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (2)$$

$$\text{Peso Unitario Húmedo: } \gamma_h = \frac{W_s}{V} \quad (3)$$

2.1.1.3. Contenido de Humedad:

Relaciona el peso del agua con respecto a los sólidos, donde dicha agua es la que se encuentra dentro de los poros de la partícula, en la superficie de esta y en los intersticios. Se expresa en porcentaje de humedad.

$$\%W = \frac{W_w - W_s}{W_s} * 100 \quad (4)$$

2.1.1.4. Relación de Vacíos:

Definida como la relación que existe entre el volumen de vacíos de la muestra y el volumen de los sólidos. Donde los vacíos componen los intersticios entre las partículas y los poros de las mismas.

$$e = \frac{(1+w)*100*G_s}{P_u} - 1 \quad (5)$$

2.1.1.4. Conductividad Hidráulica:

Se define como la facilidad con que el agua fluye a través del suelo. Depende de los siguientes factores: viscosidad del fluido, distribución de la porosidad y relación de vacíos, tamaño de los granos y la rugosidad del mineral que constituye la partícula, pero más aún el grado de saturación inicial que tenga el material, ya que el grado de Conductividad Hidráulica que tenga el suelo disminuye para suelos no saturados y aumenta para los saturados. Algunos valores típicos de Conductividad Hidráulica para diferentes suelos. Ver Tabla N° 1.

Tabla N° 1: valores típicos de Conductividad Hidráulica para suelos saturados. Fundamentals of Geotechnical Engineering. 3^{ra} Edition. Braja M Das.

Soil type	k (cm/sec)
Clean gravel	100–1
Coarse sand	1.0–0.01
Fine sand	0.01–0.001
Silty clay	0.001–0.00001
Clay	<0.000001

La ecuación general para determinar la conductividad hidráulica en función de las propiedades del fluido es la siguiente:

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} \bar{K} \quad (6)$$

También se establecen relaciones empíricas para la conductividad hidráulica en función del tipo de suelo, ya sea granular o cohesivo. Para la investigación aplica suelos granulares, específicamente en arenas uniformes estudiada por diversos investigadores, los cuales desarrollaron varias ecuaciones que permitían estimar la conductividad hidráulica según las características físicas de las arenas, en 1927 Kozeny presenta la siguiente ecuación:

$$k = \frac{1}{C_s S^2 T^2} \frac{\gamma_w}{\eta} \frac{e^3}{1 + e} \quad (7)$$

Donde, C_s , factor de forma en función de la forma de los canales de flujo.

S_s , superficie específica del volumen de partículas.

T , tortuosidad de los canales de flujo.

η , viscosidad del permeable

e , relación de vacíos.

La aplicación de esta ecuación se ve limitada por la cuantificación de la superficie específica del volumen de partículas, por esta razón Carrier en 2003, propuso la modificación de la ecuación anterior, sustituyendo la superficie específica por relaciones granulométricas y gravimétricas que asocian el tamaño de las partículas con su volumen dentro de la muestra, calculando así, de manera indirecta la superficie específica de la misma, quedando de la siguiente forma:

$$k = 1.99 \times 10^4 \left[\frac{100\%}{\sum \frac{f_i}{D_{li}^{0.404} \times D_{si}^{0.595}}} \right]^2 \left(\frac{1}{SF} \right)^2 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad (8)$$

Donde, f_i , fracción de partículas entre dos tamices, en porcentaje. (Nota: tamaño grande l , tamaño pequeño s).

SF , factor de forma, que varía de 6 a 8 según la angulosidad de las partículas.

El factor de forma empleado en los cálculos fue de 7, ya que se eligió un promedio por la irregularidad de los granos que conforman la muestra. Adicionalmente cabe destacar que la aplicación de esta ecuación para la estimación de la conductividad hidráulica está deducida para bajas presiones y en consecuencia bajas modificaciones en la relación de vacíos, para el presente trabajo de investigación se asumió que el comportamiento que arrojen los resultados al aplicar esta fórmula será igual para altas presiones.

2.1.1.5. Granulometría por tamices:

Consiste en la determinación en peso de la cantidad de partículas con un mismo diámetro que conforman la muestra. Se realiza mediante un proceso de tamizado mecánico, donde la muestra se debe encontrar lavada y seca para garantizar la disgregación de los granos en su

paso por los tamices. A partir este análisis se clasifica el suelo, según el tamaño de sus partículas pueden ser gravas, arenas o finos.

La interpretación de la granulometría para cualquier muestra se realiza de forma gráfica en función del porcentaje en peso de las partículas pasantes y el tamaño de tamiz asociado. De aquí se concluye si una muestra es bien o mal gradada, entendiéndose por bien gradada aquella que presenta un porcentaje retenido en cada tamiz y mal gradada la que el conjunto de granos que la constituyen tiende a tener el mismo tamaño.

En la Fig. N° 2 se presentan las curvas granulométricas especificadas por la norma Covenin 277 y la ASTM C33 para arenas homogéneas, con sus límites correspondientes.

Adicionalmente en la Fig. N° 3 se incluyen las granulometrías de la muestra original, la fracción gruesa, media y fina de la arena limpia empleada en el ensayo.

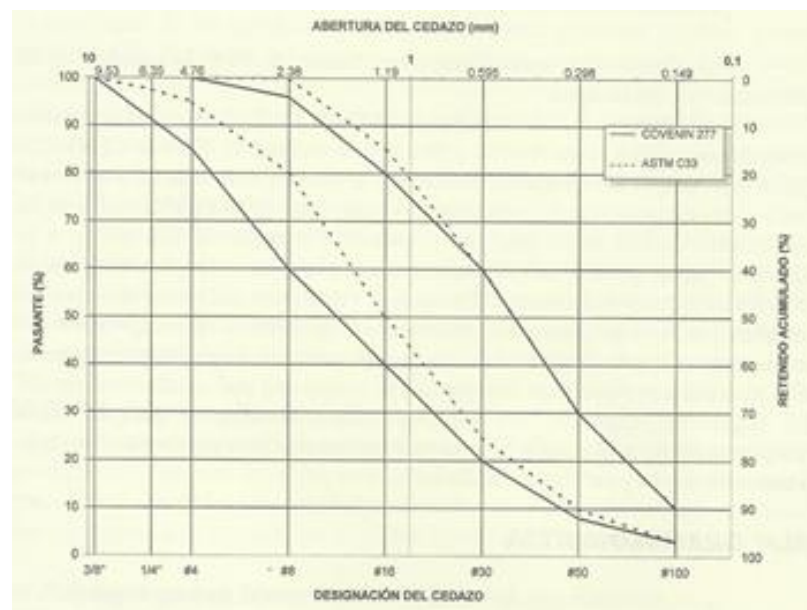


Figura N° 2: Curva Granulométrica Especificada por la norma Covenin 277 y ASTM C33. Manual del concreto estructural. Tercera edición 2009.

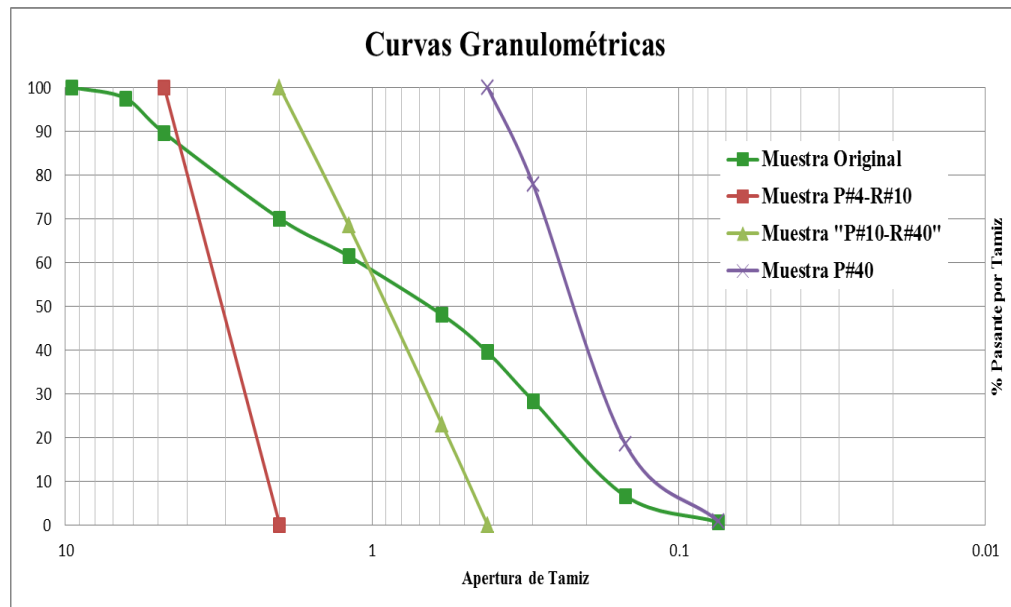


Figura N° 3: Curvas granulométricas de cada muestra. Fuente propia.

Tabla N° 2: Tamaño del grano. Fundamentals of Geotechnical Engineering, 3^{ra} Edition. Braja M Das.

Tamaño de grano (mm)			
Grava	Arena	Limo	Arcilla
>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002

Finos
(i.e., limos y arcillas)
<0.075

2.1.2. Clasificación de la arena. Sistema Unificado de Clasificación de suelos:

La clasificación de los suelos permite estimar el tamaño de grano y tipos de grano, si se trata de un suelo con alto contenido de grava, arena o finos (limos y arcillas); o es como comúnmente se encuentra en el ejercicio diario un suelo heterogéneo, cuya respuesta dependerá de los diferentes materiales que lo constituyan.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S), el cual consiste en una serie de pasos que facilitan la clasificación del suelo, basándonos en un análisis granulométrico,

Siguiendo el procedimiento descrito por el S.U.C.S, la arena empleada en la investigación pertenece a un suelo de partículas gruesas, donde más de la mitad del material es retenido en la malla N°200. (Las partículas de 0.074 mm de diámetro (malla N° 200) son aproximadamente las más pequeñas visibles a la vista). **Porcentaje retenido para la muestra en estudio 99.39%.**

Se trata de arenas cuando más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla N° 4. **Porcentaje pasante para la muestra en estudio 89.52%**

Descritas como **arenas limpias** (poco o nada de partículas finas), Con amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios. Ver curva granulométrica para la muestra en condición original Figura N° 4. A partir de esta descripción se le asigna el nombre de arena bien gradada, arena con grava o nada de finos y el símbolo correspondiente es **SW**.

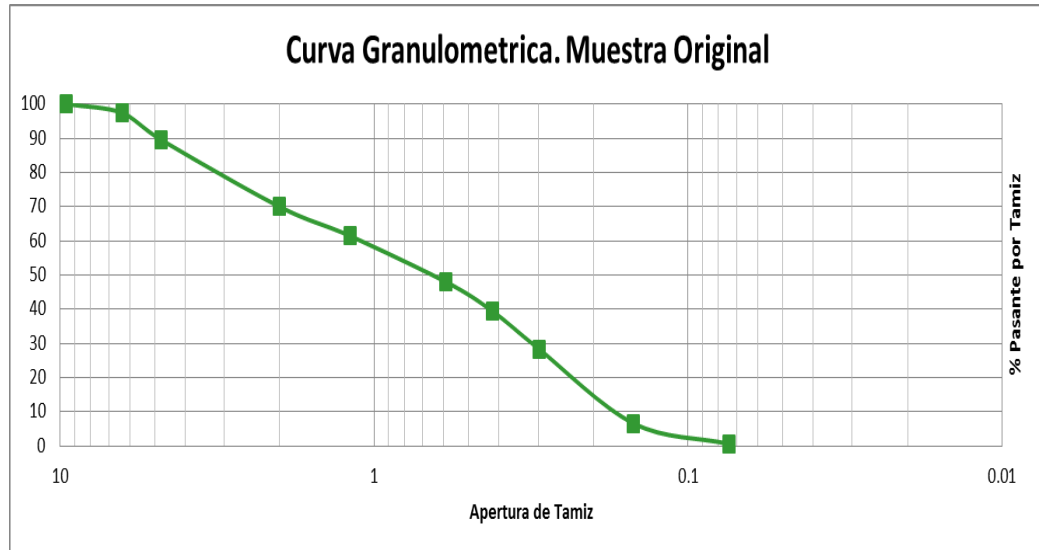


Figura N° 4: Curva granulométrica para la muestra en condición original. Fuente Propia

A partir de la gráfica anterior se extrajeron los siguientes porcentajes de material que definen la composición granulométrica de la muestra original:

Tabla N° 3: Porcentaje Retenido para cada tamiz. Fuente propia.

Porcentaje Retenido (%)	
Grava	7.92
arena Gruesa	19.54
Arena Media	30.56
Arena fina	38.81
Pasante N°200	0.61
Total	99.39

2.2 Consolidación.

La consolidación se puede definir como el proceso mediante el cual el suelo saturado con plasticidad se deforma al aumentar y mantener una carga en el tiempo. Esto es debido a que, al principio la carga es tomada por el agua y cedida gradualmente al suelo a medida que se libera el exceso de presión de poros inducido por la carga aplicada.

En suelos cohesivos los efectos de transferencia de carga a las partículas de suelo se dan a muy baja velocidad, por la baja conductividad hidráulica que los caracteriza, haciendo que la deformación esté en función del tiempo durante el cual se mantiene la carga. Contrariamente, en suelos granulares este proceso se da inmediatamente debido a la alta conductividad hidráulica de las arenas, incrementando instantáneamente la presión de poros acompañada de una reducción volumétrica debido al asentamiento de la muestra.

Ahora bien, para el caso de la extracción de fluidos de un yacimiento petrolero, o en un acuífero profundo, los esfuerzos aumentan en el suelo a medida que disminuye la presión interna del yacimiento, o del acuífero, como producto de la extracción. El proceso se denomina producción por compactación y genera deformación en la superficie del terreno denominada subsidencia. Este mecanismo, aunque no es necesariamente igual al que ocurre en los suelos plásticos, permite utilizar el consolidómetro para estudiar el proceso de carga en los granos del suelo para distintos contenidos de humedad.

2.2.1 Ensayo de consolidación unidimensional

También llamado ensayo edométrico, se realizó con la finalidad de medir las variaciones volumétricas debido a las cargas aplicadas. Las mediciones se realizaron en intervalos de tiempo adecuados al igual que la calibración, la preparación de la muestra así como el tiempo de aplicación para cada carga. A tal efecto, se siguieron los procedimientos descritos en la ASTM D 2435-90, y AASHTO T 216. No obstante, fue necesaria una serie de modificaciones, las cuales serán descritas en el desarrollo de las próximas secciones.

2.2.1.1 Equipo para la prueba

Es realizado en un consolidómetro con un anillo móvil donde se coloca la muestra con una funda que evita el escape del agua si se quiere el medio saturado, un dial lector de deformaciones debido a la aplicación de las cargas y un juego de pesas que se colocaran en el vástago y transmitirá por el brazo a la muestra las presiones deseadas. En los ensayos realizados se empleó un juego de 9 pesas de 10 kg cada una, colocadas en serie a lapsos de tiempo determinados, las cuales en total transmitían a la muestra una presión equivalente a $127,3 \text{ kg/cm}^2$.

El recipiente empleado para contener la muestra fue sustituido por el del ensayo SPT, cuyas dimensiones generan un área de $7,06 \text{ cm}^2$ y al realizar los cálculos de la presión transmitida a la muestra con un brazo de un metro y una carga total de 90 kg en el vástago se transmitió una presión de $127,3 \text{ kg/cm}^2$, en cambio sí se utilizaba el contenedor propio de éste ensayo serían necesarias colocar un total de 12 pesas con una carga total de 120 kg, para que con un área de 9 cm^2 transmitir una presión de una presión de 133 kg/cm^2 sobre la muestra. Con esta carga se comprometería la capacidad estructural del equipo de consolidación unidimensional, prestado por el laboratorio de suelos de la Universidad Católica Andrés Bello para la realización de este Trabajo Especial de grado.

2.2.1.2 Aplicación de la carga

Para el tiempo de colocación y duración de cada carga se utilizó lo establecido en las norma ASTM D 2435-90 y AASHTO T 216, en la cual se indica que cada carga deberá ser aplicada por un lapso de 24 horas, y las mediciones se realizaran en los siguientes intervalos de tiempo: 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15 y 30 minutos y 1; 2; 4; 8 y 24 horas.

Ahora bien, tal como se explica en los objetivos de este Trabajo Especial de Grado, se desea estudiar cómo influye el contenido de humedad en el grado de fracturamiento de los granos, y esto último en las propiedades físicas de los suelos granulares. Para la realización de este trabajo hemos considerado que dicho fracturamiento, se genera muy cerca del instante en el cual es aplicada la carga y esto a su vez, conduce al reacomodo casi inmediato de los granos, tanto de los que sufrieron fracturamiento como los que no. En otras palabras, el suelo se fractura y rápidamente alcanza el equilibrio, el cual se mantiene hasta que se aplica la siguiente carga.

Por esta razón, y para realizar los ensayos rápidamente se aplicaron los incrementos de carga en un lapso total de 4 horas. Las lecturas para cada incremento de carga se realizaron según los siguientes intervalos de tiempo: 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15 y 30 minutos y 1; 2 horas, donde para los primeros 0,76 min se tomaron las lecturas para una misma carga de 10 kg.

Al realizar el ensayo con la metodología de carga descrita anteriormente no se obtiene datos para estudiar la consolidación secundaria que se podría producir en el suelo, pero sí una relación DEFORMACIÓN-CARGA-FRACTURAMIENTO del grano que conforma la muestra, medido por ensayos granulométricos a las muestras ensayadas.

2.2.1.3. Calibración del equipo.

Se realizó la calibración del equipo siguiendo la metodología anterior para el incremento de las cargas y lecturas de las deformaciones. En este caso las deformaciones registradas fueron las de la maquina propiamente, las cuales se emplearon para realizar la corrección correspondientes a las lecturas tomadas para cada ensayo de las muestras.

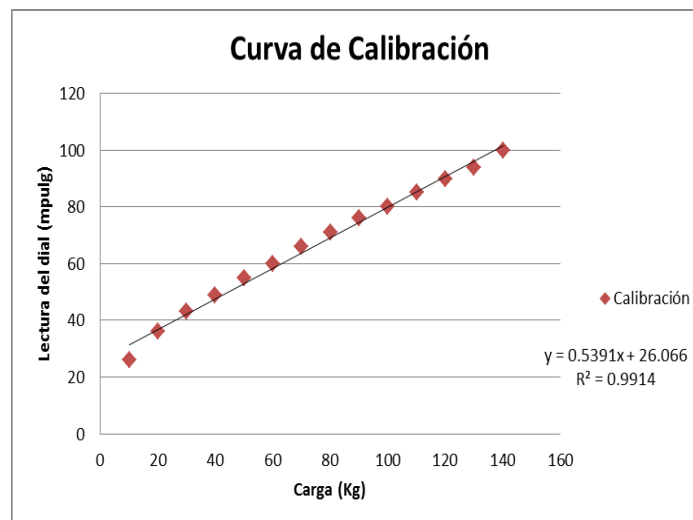


Figura N° 5: Curva de Calibración del equipo. Fuente propia

2.2.1.4. Preparación de la muestra

Las condiciones iniciales de la muestra dependieron de los factores que se deseaba estudiar, asumiendo que el tamaño del grano y la humedad de la muestra influyen directamente en el fracturamiento de los granos de arena ante presiones elevadas, modificando así su capacidad conductiva hidráulica. Por consiguiente se decidió ensayar tres muestras diferentes de arena, aunque provenientes de la misma arena limpia, cada una corresponde a una fracción de la parte gruesa, media y fina, comparando el comportamiento obtenido con el de la arena limpia en estado inicial, que denominaremos homogénea.

Con la finalidad de analizar las diferencias en el fracturamiento se estudiaron además de la muestra homogénea (granulometría de la muestra original) las siguientes fracciones: i) muestra con granos gruesos (pasante #4 – retenido #10), ii) muestra con granos medios (pasante #10 – retenido #40) y iii) muestra con granos finos (pasante #40).

Además de introducir el tamaño del grano como una variable en el ensayo se estudió la influencia del contenido de humedad al inicio del ensayo para cada muestra. Con la finalidad de simular las condiciones del suelo en un yacimiento o acuífero profundo se estudió la muestra para los siguientes contenidos de humedad: i) la muestra a 0% de humedad por ser el contenido de humedad empleado en los estudios convencionales, ii) la muestra a 3% y 6% como puntos intermedios que simulan, los diferentes contenidos de humedad que pueda tener el suelo durante la extracción; iii) la muestra con 3% de humedad inicial e inundada, porque se sabe que hay una influencia de la presión capilar en el comportamiento del grano, evidenciado en los resultados obtenidos en del T.E.G “Aplicabilidad y limitaciones en la compactación hidráulica de Arenas Limpias”. Cantillo y Lira, 2013.

En donde se determinó que para este contenido de humedad la muestra al ser inundada, el peso unitario seco sumergido incrementa considerablemente su valor con respecto al peso unitario seco mínimo. Lo anterior sugiere que el contenido inicial de humedad continúa controlando el reacomodo de las partículas, mejorándolo a tal punto que incrementa el peso de la muestra para el mismo volumen. Tomando este comportamiento como referencia, se estudió el efecto que ocasiona el inundamiento de una muestra que se someterá a un proceso de consolidación unidimensional a altas presiones.

Las muestras antes de ensayar y llevarlas al contenido de humedad deseado fueron secadas al horno por un lapso mínimo de 24, garantizando así la extracción de toda el agua que pudiese encontrarse dentro de los poros de la misma y adheridas a su superficie.

2.3 Las arenas y explotación de yacimientos por el método de compactación - acuíferos profundos. Aplicabilidad en campo.

El suelo del yacimiento se encuentra en equilibrio con el peso del material por encima del mismo. Cuando este equilibrio se perturba debido a la extracción de fluidos del yacimiento los esfuerzos efectivos en el suelo aumentan y se producen deformaciones en el material propias del incremento o decremento de los esfuerzos. Estas deformaciones se traducen en el reacomodo de las partículas para conseguir nuevamente el equilibrio perdido.

El grado de asentamiento que puede sufrir una estructura de suelo está relacionado con las características físicas del suelo portante así como con el nivel de perturbación que recibió, es decir, con la magnitud de la carga aplicada que generó dicha respuesta. Para suelos granulares el asentamiento antes mencionado se divide en dos etapas:

- Fracturamiento inmediato de las partículas al sufrir variación de los esfuerzos, por el aumento - disminución de las presiones internas o incremento de cargas externas. El fracturamiento en si está condicionado por el tamaño de los granos y la forma en la cual estén organizados.
- Reacomodo de los granos, ocupación de los espacios vacíos generados por los granos fracturados, resultando en la variación volumétrica de la muestra y a su vez variación de la relación de vacíos. En mayor o menor relación según el contenido de humedad que tenga la muestra así como el grado de inundación en el cual se encuentre.

Estas variaciones de presiones internas y externas son muy comunes en explotaciones de yacimientos, debido al delta de presiones generadas por la extracción del crudo. La magnitud de este delta dependerá en gran medida de la estructura que tenga el yacimiento. Generalmente está constituida por tres capas, separadas ocasionalmente por lentes de arcillas o arena. Cada

capa corresponde a un volumen de gas, crudo y agua de formación a una presión específica. Como se observa en la Fig. N° 6.

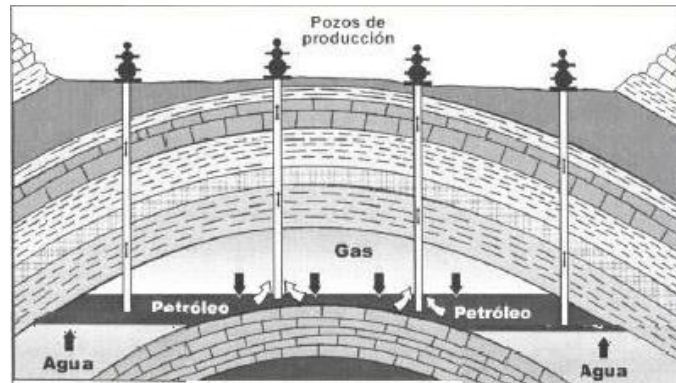


Figura N° 6: Estructura de yacimiento.

En el instante en el cual es perturbado el equilibrio y generado un delta de presiones se produce un flujo entre las partículas, ascendente a presión (mayor a menor presión), del líquido conformado por crudo y expansión potencial del agua de formación. Esta condición hace que disminuya la presión de poros al disminuir el fluido. La ecuación básica del proceso es la siguiente:

$$\sigma_t = \sigma'_v + u \quad (9)$$

Dónde: σ_t es el esfuerzo total por encima del yacimiento, σ'_v es el esfuerzo efectivo vertical del suelo en el yacimiento y u es la presión de los fluidos dentro del yacimiento.

Al disminuir la presión de los fluidos, u , aumenta proporcionalmente el esfuerzo efectivo en el suelo dentro del yacimiento, σ'_v , ya que el esfuerzo debido al peso de los estratos por encima del yacimiento, σ_t , se mantienen constantes y debe mantenerse el equilibrio mostrado en la ecuación (9). Este aumento en los esfuerzos efectivos genera el fracturamiento de los granos de suelo dentro del yacimiento y afecta la conductividad hidráulica del mismo. La conductividad hidráulica está asociada a los espacios entre las partículas y al tamaño de las mismas así como a la relación de vacíos. Luego de que se ha extraído por diferencia de presiones el crudo, existe un remanente del líquido adherido a las

partículas. Para este instante ya se han generado deformaciones importantes en la estructura del suelo, como fracturamiento masivo de los granos más grandes, reacomodo de los fragmentos y granos de menor tamaño así como una pérdida importante de volumen y presión de poros por la compresibilidad de la formación.

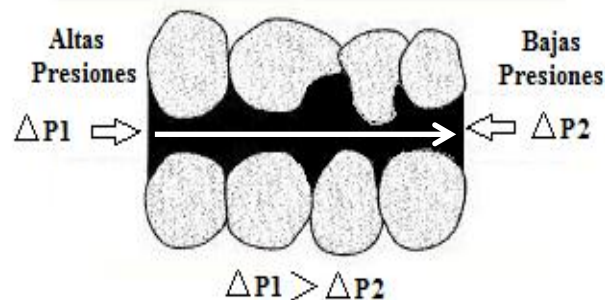


Figura N° 7: Extracción del crudo por diferencial de presiones. Fuente propia

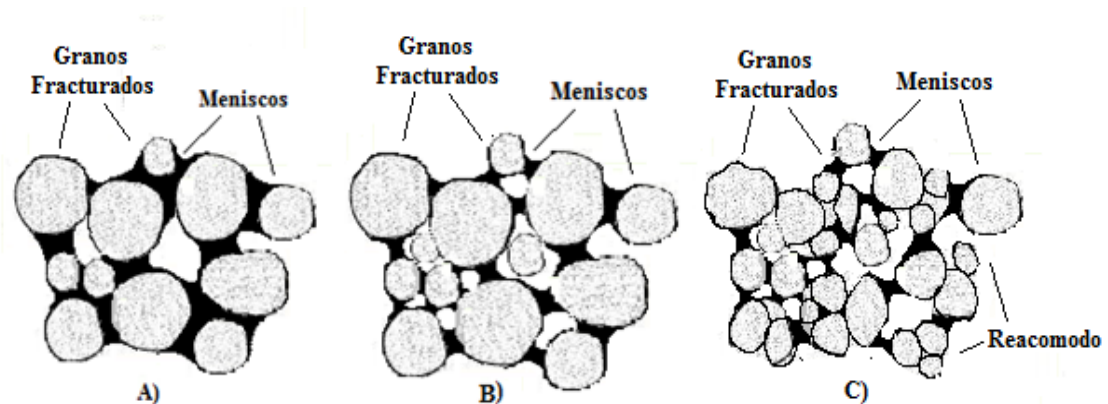


Figura N° 8: Proceso de fracturamiento y reacomodo al disminuir las presiones de explotación. Fuente propia.

En este punto se hace necesaria la aplicación de métodos complementarios para extraer ese remanente entre los intersticios de las partículas (Fig. N° 8C).

El método de inyección de agua a presión para explotación de yacimientos, generar un flujo entre las partículas y arrastrar el crudo que se encuentre, manteniendo así la presión y producción del yacimiento. Como se muestra en la Fig. N° 9.

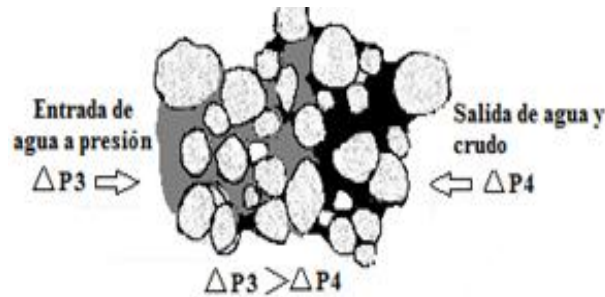


Figura N° 9: Esquema de arrastre de crudo remanente por el agua inyectada.

Al igual que en la extracción por diferencia de presiones, se produce un flujo a través de las partículas, donde el aumento de los esfuerzos generado por la inyección del agua a presión ocasiona un fracturamiento adicional en las partículas de suelo que modifica nuevamente las condiciones de conductividad hidráulica, teniendo en cuenta la influencia de la presión capilar en el reacomodo y fracturamiento de las partículas. En la Fig. N° 10 se muestra el proceso de fracturamiento y la disminución volumétrica así como los meniscos que se forman entre las partículas una vez que se termina la extracción, indicando que el contenido de humedad variara a todo lo largo del proceso.

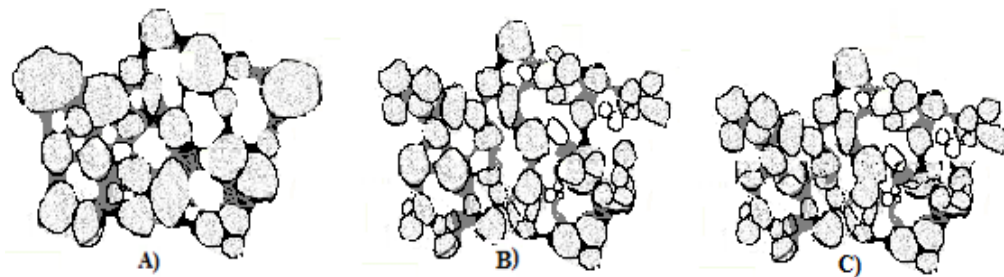


Figura N° 10: Fracturamiento generado por la inyección de agua a presión. Formación de meniscos entre las partículas.

Descrito todo el proceso anterior, salta a la vista que el fracturamiento del grano y las condiciones iniciales del material juegan un papel importante en los procesos de extracción ya sea por diferencia de presiones o por mantenimiento de la presión por métodos complementarios. En este estudio veremos la influencia en el fracturamiento del agua adherida a los granos. Se recomienda estudiar otros fluidos en otros trabajos a fin de comparar la viscosidad.

Capítulo III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Equipos

3.1.1. Equipo de carga, Flexímetro o Brazo de palanca: dispositivo que permite aplicar la carga de forma vertical a la muestra, el mismo debe tener la capacidad de 250 kg, de la misma forma tiene que mantener las cargas establecidas por periodos prolongados con un $\pm 5\%$ de la carga aplicada y debe permitir el incremento de esta. Ver Fig. N° 11.

3.1.2. Dial lector de deformación o Deformímetro: dispositivo con 0,001 mm de precisión, mide los asentamientos de la muestra mientras le son aplicadas las cargas en un tiempo establecido.

3.1.3. Consolidómetro: equipo compuesto por:

3.1.3.1. Funda o caja de consolidación: permite crear el medio para sumergir la muestra cuando sea necesario, con una altura de 5,6 cm y espesor de 1 cm.

3.1.3.2. Aro de fijación: dispositivo que mantiene fijo el anillo de consolidación.

3.1.3.3. Anillo de consolidación: contenedor de la muestra con un diámetro de 3 cm, altura de 2 cm y un espesor de 0,1 cm, el cual corresponde al anillo de SPT pero para fines prácticos reúne todas las características necesarias para este tipo de ensayo.

3.1.3.4. Piedras porosas: piedras con porosidad tal que son capaces de evitar el retardo en el drenaje de la muestra, es por ello que están en contacto directo con la muestra, una en la base (con mayor diámetro que el anillo de consolidación) y una superior (con diámetro menor al anillo). Estas tienen un espesor tal que son capaces de resistir las cargas aplicadas.

3.1.3.5. Distribuidor de presión: ubicado sobre la piedra porosa superior y está encargado de distribuir de manera uniforme la carga en la muestra. Con una altura de 2,9 cm, y de espesor 2,9 cm.

3.1.4. Juego de masas: conjunto de pesas con las que se alcanzas las presiones de ensayo.

3.1.5. Balanza: con capacidad de hasta 8 kg y precisión de 0.1 gr.

3.1.6. Horno de secado: con circulación de aire y temperatura regulable que permite mantener una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ ($230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{F}$).

3.1.7. Equipo misceláneo: espátulas, recipientes mezcladores, cilindro graduado de (250 ml $\pm$ 5 ml), Vernier, cronómetro, agua destilada y bolsas herméticas



a)



b)

Figura N° 11: Equipo de consolidación: a) descargado, b) cargado. Fuente propia.



a)



b)

Figura N° 12: a) Juego de masas. b) equipo de consolidación. Fuente propia



Figura N° 13: Proceso de consolidación con la muestra inundada. Fuente propia



a)



b)

Figura N° 14: a) Proceso de carga en la calibración. b) Ajuste del equipo. Fuente propia.

3.2. Calibración del equipo:

Debido a que para este tipo de ensayos las cargas usualmente usadas estaban entre 40 y 70 kg aproximadamente, fue necesario realizar la calibración del equipo, obteniendo así la deformación propia del aparato para luego restarla de la deformación medida por el dial al momento de su lectura por carga

Para la calibración del equipo se siguen los siguientes pasos:

3.2.1. Se coloca en el lugar donde va la muestra del consolidómetro un disco macizo de cobre o acero duro, que tenga la misma altura del anillo. Sobre y debajo del disco colocar las piedras porosas humedecidas.

3.2.2. Cargar el equipo de la misma forma como se cargaría en el ensayo y tomar anotaciones de las deformaciones en cada lectura.

3.2.3. Realizar una curva de calibración del equipo, que será utilizada para llevar a cabo las correcciones correspondientes a cada toma cuando se esté ensayando la muestra. Se debe hacer la notificación que el disco tiene una deformación, la misma será despreciables para los fines de este ensayo.

3.3. Preparación de la muestra:

Las muestras en cuestión provienen de una muestra representativa de arenas limpias, la cual paso por una serie de procesos para poder determinar su gradación y separar de ella las fracciones que representaran los tipos de gradaciones elegidas para el estudio. Estas se obtuvieron al tamizar la muestra representativa y almacenarlas en bolsas herméticas hasta su utilización.

Para cada ensayo la arena debe llevarse al contenido de humedad que corresponda, para esto se pesaban 100 gramos de la misma (seca) y se le añadían los mililitros de agua necesarios para llevarla al contenido de humedad deseado, posteriormente se dejaba reposar en una bolsa hermética para disminuir la pérdida de humedad por exposición al ambiente. Una

vez cumplido el tiempo de reposo se disponía a colocar la muestra dentro del anillo, para esto se colocaba el mismo sobre la piedra porosa en el fondo y con ayuda de una espátula se dejaba caer la muestra dentro del anillo hasta enraizar, para luego colocar la piedra porosa correspondiente, aro de fijación y la funda.

Se pesa el dispositivo con la muestra y por diferencia con el peso del dispositivo solo, obtenemos el peso de la muestra que se empleó para cada ensayo una vez pesado se dispone el dispositivo en el consolidómetro, se fija el brazo nivelándolo y ajuste del distribuidor de presiones para que el deformímetro tenga una lectura inicial de cero (conveniencia de cálculo), una vez realizado esto se procede a realizar los incrementos de cargas.

Las muestras empleadas se deben preparar a cuatro humedades diferentes y una a condición inundada, estas seguirán el procedimiento siguiente:

3.3.1. Muestra seca al horno (0%): la muestra se coloca en el horno durante 24 horas.

3.3.2. Muestras con otras humedades (3% y 6%):

3.3.2.1. Pesar la muestra extraída del horno.

3.3.2.2. Utilizar la formula cuatro (4), de esta despejar la cantidad de agua que sea necesaria para llegar a la humedad correspondiente.

3.3.2.3. Agregar esta cantidad de agua a la muestra.

3.3.2.4. Dejar reposar la muestra por un período de 5 minutos.

3.3.3. Muestra inundada.

3.3.3.1. Preparar la muestra con el 3% de humedad.

3.3.3.2. Colocar la muestra en el equipo de carga y terminar de ensamblarlo.

3.3.3.3. Agregar agua para inundar toda la muestra en la funda del consolidómetro.

3.3.3.4. Dejar reposar la muestra por un período de 5 minutos.



a)



b)

Figura N °15: a) Muestra original, b) Muestra P#4 - R#10.



a)



b)

Figura N °16: a) Muestra P#10 - R#40, b) Muestra P#40.

3.4. Determinaciones previas al ensayo:

Antes de llevar a cabo el ensayo de consolidación es preciso determinar:

3.4.1. Peso específico:

Procedimiento basado en la ASTM D 854-02 y AASHTO T 100

3.4.1.1 Equipos:

3.4.1.1.1. Picnómetro: Matraz de vidrio de capacidad de 250 ml a 20 °C con ± 0.3 ml. Este debe estar calibrado antes de comenzar el ensayo. Figura

3.4.1.1.2. Balanza: con capacidad de hasta (350.00) gr y precisión de 0.01 gr.

3.4.1.1.3. Termómetro: con apreciación de 0.1 °C.

3.4.1.1.4. Bomba de vacíos: capaz de mantener la presión por debajo de 100 mm Hg.

3.4.1.1.5. Equipo Misceláneo: horno, espátula, embudo, pipeta, agua destilada, recipiente mezcladores.

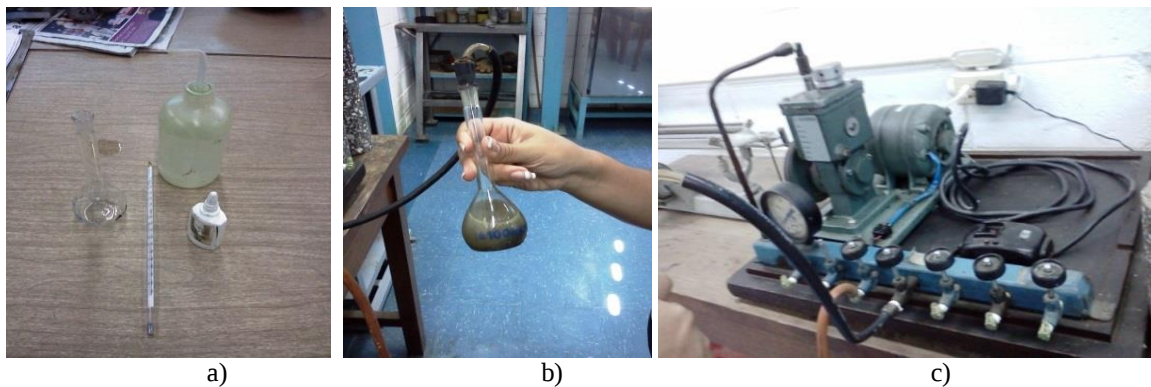


Figura N° 17: a) Equipos para el ensayo, b) Extracción de aire a la muestra, c) Bomba. Fuente propia.

3.4.1.2. Procedimiento:

- 3.4.1.2.1. Pesar 150 gr de suelo pasante #10 y dejar en remojo con agua destilada por lo menos 12 horas.
- 3.4.1.2.2. Limpiar y secar el picnómetro. Pesar.
- 3.4.1.2.3. Llenar el picnómetro con agua destilada, haciendo coincidir el menisco con la línea de aforo. Verter el agua en el interior del picnómetro por las paredes de este, esto evita que se formen burbujas. Pesar.
- 3.4.1.2.4. Secar el matraz en el exterior y en el interior del cuello. Agregar mediante un embudo la muestra ya preparada y llenar con agua destilada hasta la mitad del picnómetro (agregándola por las paredes).
- 3.4.1.2.5. Remover el aire interno en el suelo conectando la bomba de vacío a la boquilla del matraz, hasta que se observe que no hay presencia de burbujas.
- 3.4.1.2.6. Añadir agua destilada hasta que el menisco coincida con la línea del aforo, cuidando de no formar burbujas en el interior.
- 3.4.1.2.7. Limpiar y secar el exterior y el cuello del picnómetro, pesar y tomar la temperatura del interior de este.

3.4.2. Granulometría:

Para la granulometría se siguió con el procedimiento de la norma COVENIN 277 y la ASTM C-33

3.4.1.1 Equipos:

- 3.4.1.1.1. **Cedazos:** Serie de tamices de malla cuadrada, lo cuales deben cumplir con lo especificado en el ASTM E-11.
- 3.4.1.1.2. **Balanza:** con capacidad de hasta (350.00) gr y precisión de 0.01 gr.
- 3.4.1.1.3. **Horno:** se emplea para secar la muestra durante un lapso mínimo de 24 horas. A una temperatura constante de 140 °C.



a)



b)

Figura N° 18: a) Balanza, carga máx. 350 gr, b) Horno. Fuente propia



a)



b)

Figura N° 19: a) Balanza, b) Tamices, cuchara y muestra tamizada (fondo). Fuente propia



a)



b)

Figura N° 20: a) Muestras tamizadas, b) Tamices disponibles en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica Andrés Bello. Fuente propia.

3.4.1.2. Procedimiento:

- 3.4.1.2.1. Secar la muestra en el horno a temperatura constante.
- 3.4.1.2.2. Agregar la muestra a los tamices y agitar durante de 2 min.
- 3.4.1.2.3. Pesar la cantidad de muestra retenida en los tamices.

3.5. Procedimiento para la ejecución del ensayo de consolidación unidimensional.

- 3.5.1. Armar el anillo de consolidación con la muestra y las piedras porosas.
- 3.5.2. Colocar el anillo de consolidación en el equipo de carga, ajustar el brazo de forma que este horizontal (usar nivel), sobre el tornillo del equipo colocar el deformímetro y ajustar la lectura en cero.
- 3.5.3. Colocar una pesa de 10 kg, tomar las lecturas de asentamiento para los 0,1 , 0,25 y 0,50, luego de esto seguir aumentando de 10 kg en 10 kg a medida que se registren las lecturas para 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60 y 120 min.
- 3.5.4. Descargar el equipo y retirar el dispositivo. Pesarlo y extraer la muestra.
- 3.5.5. Secar la muestra durante un lapso no menor de 24 horas para garantizar la pérdida de humedad y luego tamizar.
- 3.5.6. Realizar la granulometría de la muestra ensayada.

Capítulo IV

RESULTADOS

4.1. Muestra Original

4.1.1. Muestra Original. W= 0%. Sin Ensayar.

4.1.1.1. Granulometría

Tabla N° 4. Granulometría Muestra Original. W= 0%. Sin Ensayar. Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53	0	0	1157,6	0,00	100,00
#1/4	6,35	29,65	29,65	1127,95	2,56	97,44
#4	4,76	91,63	121,28	1036,32	7,92	89,52
#10	2	226,19	347,47	810,13	19,54	69,98
#16	1,19	99,61	447,08	710,52	8,60	61,38
#30	0,59	155,44	602,52	555,08	13,43	47,95
#40	0,42	98,7	701,22	456,38	8,53	39,42
#50	0,298	128,69	829,91	327,69	11,12	28,31
#100	0,149	251,6	1081,51	76,09	21,73	6,57
#200	0,074	69	1150,51	7,09	5,96	0,61
Pasante #200	0	7,09	1157,6	0	0,00	0,00
Total		1157,6			99,39	

4.1.2. Muestra Original. Ensayo a 127,3 kg/cm²:

4.1.2.1. Muestra Original. Seca. W= 0%.

4.1.2.1.1. Granulometría

Tabla N° 5. Granulometría Muestra Original. W= 0%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53	0	0	25,34	0,00	100,00
#1/4	6,35	1,7	1,7	23,64	6,71	93,29
#4	4,76	1,23	2,93	22,41	4,85	88,44
#10	2	2,83	5,76	19,58	11,17	77,27
#16	1,19	2,29	8,05	17,29	9,04	68,23
#30	0,59	3,5	11,55	13,79	13,81	54,42
#40	0,42	2,2	13,75	11,59	8,68	45,74
#50	0,298	2,88	16,63	8,71	11,37	34,37
#100	0,149	5,77	22,4	2,94	22,77	11,60
#200	0,074	2,22	24,62	0,72	8,76	2,84
Pasante #200	0	0,72	25,34	0	0,00	0,00
Total		25,34			97,16	

4.1.2.1.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 6. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Original. W=0%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,028956	1,45	0,462526474	0,023613498
28,29421211	0,046736	2,34	0,449524613	0,021872031
42,44131816	0,065278	3,26	0,436086071	0,020155355
56,58842421	0,081534	4,08	0,424413563	0,018732078
70,73553026	0,095504	4,78	0,414464034	0,017568024
84,88263632	0,112014	5,60	0,402787634	0,016258884
99,02974237	0,127000	6,35	0,392276546	0,01513233
113,1768484	0,140462	7,02	0,382905132	0,014168878
127,3239545	0,152146	7,61	0,374826201	0,013368919

4.1.2.2. Muestra original. W= 3%.

4.1.2.2.1. Granulometría

Tabla N° 7. Granulometría Muestra Original. W= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53	0	0	22,9	0,00	100,00
#1/4	6,35	0,94	0,94	21,96	4,10	95,90
#4	4,76	0,31	1,25	21,65	1,35	94,54
#10	2	3,92	5,17	17,73	17,12	77,42
#16	1,19	1,95	7,12	15,78	8,52	68,91
#30	0,59	2,99	10,11	12,79	13,06	55,85
#40	0,42	1,97	12,08	10,82	8,60	47,25
#50	0,298	2,32	14,4	8,5	10,13	37,12
#100	0,149	4,79	19,19	3,71	20,92	16,20
#200	0,074	2,12	21,31	1,59	9,26	6,94
Pasante #200	0	1,59	22,9	0	0,00	0,00
Total		22,9			93,0568	

4.1.2.2.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 8. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Original. W=3%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,1471061	0,149352	7,47	0,519505818	0,021778319
28,2942121	0,207518	10,38	0,47531403	0,017179595
42,4413182	0,251714	12,59	0,442712541	0,014195188
56,5884242	0,285242	14,26	0,418526908	0,012197984
70,7355303	0,338328	16,92	0,380874948	0,009443834
84,8826363	0,361696	18,08	0,364740805	0,008391863
99,0297424	0,381762	19,09	0,351048361	0,007557627
113,176848	0,399796	19,99	0,338865958	0,006859654
127,323954	0,415798	20,79	0,328153691	0,006279702

4.1.2.3. Muestra Original. W= 6%.

4.1.2.3.1. Granulometría

Tabla N° 9. Granulometría Muestra Original. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53	0	0	20,7	0,00	100,00
#1/4	6,35	0,49	0,49	20,21	2,37	97,63
#4	4,76	1,1	1,59	19,11	5,31	92,32
#10	2	2,38	3,97	16,73	11,50	80,82
#16	1,19	1,84	5,81	14,89	8,89	71,93
#30	0,59	2,92	8,73	11,97	14,11	57,83
#40	0,42	1,69	10,42	10,28	8,16	49,66
#50	0,298	2,33	12,75	7,95	11,26	38,41
#100	0,149	4,69	17,44	3,26	22,66	15,75
#200	0,074	2,35	19,79	0,91	11,35	4,40
Pasante #200	0	0,91	20,7	0	0,00	0,00
Total		20,7			95,60	

4.1.2.3.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 10. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Original. W=6%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,147	0,17526	8,76	0,52486888	0,024507944
28,294	0,255524	12,78	0,46367284	0,017602642
42,441	0,284226	14,21	0,44266767	0,015540108
56,588	0,348742	17,44	0,3961301	0,011507329
70,736	0,380492	19,02	0,37396654	0,009838049
84,883	0,407416	20,37	0,3554702	0,008564589
99,030	0,429768	21,49	0,34032146	0,007600566
113,177	0,449326	22,47	0,32721446	0,006822495
127,324	0,465074	23,25	0,31676397	0,006238588

4.1.2.4. Muestra Original. Inundada con $W_o = 3\%$.

4.1.2.4.1. Granulometría

Tabla N° 11. Granulometría Muestra Original. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53	0	0	22,51	0,00	100,00
#1/4	6,35	1,72	1,72	20,79	7,64	92,36
#4	4,76	0,46	2,18	20,33	2,04	90,32
#10	2	4,68	6,86	15,65	20,79	69,52
#16	1,19	2,38	9,24	13,27	10,57	58,95
#30	0,59	2,62	11,86	10,65	11,64	47,31
#40	0,42	1,63	13,49	9,02	7,24	40,07
#50	0,298	1,84	15,33	7,18	8,17	31,90
#100	0,149	3,52	18,85	3,66	15,64	16,26
#200	0,074	1,73	20,58	1,93	7,69	8,57
Pasante #200	0	1,93	22,51	0	0,00	0,00
Total		22,51			91,43	

4.1.2.4.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 12. Granulometría Muestra Original. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,147	0,174752	8,74	0,5246	0,024306365
28,294	0,234188	11,71	0,4793	0,01910469
42,441	0,275082	13,75	0,4491	0,016039202
56,588	0,307594	15,38	0,4255	0,013870711
70,736	0,335026	16,75	0,4060	0,012212629
84,883	0,358902	17,95	0,3892	0,010889586
99,030	0,377952	18,90	0,3759	0,009910574
113,177	0,394716	19,74	0,3644	0,009102446
127,324	0,41021	20,51	0,3538	0,008398171

4.2. Muestra Pasante tamiz #4 Retenido tamiz #10 (P#4 R#10)

4.2.1. Muestra P#4 R#10. W= 0%. Sin Ensayar

4.2.1.1. Granulometría

Tabla N° 13. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 0%. Sin Ensayar. Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0,0	41,81	0,0	100,0
#1/4	6,35		0,0	41,81	0,0	100,0
#4	4,76	0	0,0	41,81	0,0	100,0
#10	2	41,81	41,81	0	100,0	0,0
#16	1,19		0	0	0,0	0,0
#30	0,59		0	0	0,0	0,0
#40	0,42		0	0	0,0	0,0
#50	0,298		0	0	0,0	0,0
#100	0,149		0	0	0,0	0,0
#200	0,074		0	0	0,0	0,0
Pasante #200	0		0	0	0,0	0,0
	Total	41,81			100,0	

4.2.2. Muestra P#4 R#10. Ensayo a 56 kg/cm²:

4.2.2.1. Muestra P#4 R#10. Seca. W= 0%.

4.2.2.1.1. Granulometría

Tabla N° 14. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 0%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	22,61	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	22,61	0,00	100,00
#4	4,76	0	0	22,61	0,00	100,00
#10	2	19,12	19,12	3,49	84,56	15,44
#16	1,19	2,05	21,17	1,44	9,07	6,37
#30	0,59	0,73	21,9	0,71	3,23	3,14
#40	0,42	0,24	22,14	0,47	1,06	2,08
#50	0,298	0,22	22,36	0,25	0,97	1,11
#100	0,149	0,05	22,41	0,2	0,22	0,88
#200	0,074	0,12	22,53	0,08	0,53	0,35
Pasante #200	0	0,08	22,61	0	0,00	0,00
Total		22,61			99,65	

4.2.2.1.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 15. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W=0%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,030226	1,51	0,638060228	1,874759508
28,29421211	0,06096	3,05	0,612888156	1,687445833
42,44131816	0,10414	5,21	0,578065901	1,447095946
56,58842421	0,16129	8,06	0,532972668	1,16753742

4.2.2.2. Muestra P#4 R#10. W= 3%.

4.2.2.2.1. Granulometría

Tabla N° 16. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 3%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53	0	0	19,58	0,00	100,00
#1/4	6,35	0	0	19,58	0,00	100,00
#4	4,76	0	0	19,58	0,00	100,00
#10	2	13,94	13,94	5,64	71,20	28,80
#16	1,19	3,18	17,12	2,46	16,24	12,56
#30	0,59	1,2	18,32	1,26	6,13	6,44
#40	0,42	0,38	18,7	0,88	1,94	4,49
#50	0,298	0,21	18,91	0,67	1,07	3,42
#100	0,149	0,28	19,19	0,39	1,43	1,99
#200	0,074	0,19	19,38	0,2	0,97	1,02
Pasante #200	0	0,2	19,58	0	1,02	0,00
Total		19,58			98,98	

4.2.2.2.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 17. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W=3%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,065278	3,26	0,806230333	1,504529885
28,29421211	0,097536	4,88	0,777097644	1,369342333
42,44131816	0,18034	9,02	0,703522247	1,059942353
56,58842421	0,251968	12,60	0,642512301	0,837398655

4.2.2.3. Muestra P#4 R#10. W= 6%.

4.2.2.3.1. Granulometría

Tabla N° 18. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 6%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53	0	0	18,56	0,00	100,00
#1/4	6,35	0	0	18,56	0,00	100,00
#4	4,76	0	0	18,56	0,00	100,00
#10	2	13,54	13,54	5,02	72,95	27,05
#16	1,19	2,21	15,75	2,81	11,91	15,14
#30	0,59	1,38	17,13	1,43	7,44	7,70
#40	0,42	0,4	17,53	1,03	2,16	5,55
#50	0,298	0,23	17,76	0,8	1,24	4,31
#100	0,149	0,28	18,04	0,52	1,51	2,80
#200	0,074	0,25	18,29	0,27	1,35	1,45
Pasante #200	0	0,27	18,56	0	1,45	0,00
Total		18,56			98,55	

4.2.2.3.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 19. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W=6%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,128016	6,40	0,662628811	0,687961343
28,29421211	0,256286	12,81	0,555996112	0,434265321
42,44131816	0,33401	16,70	0,495526991	0,319857165
56,58842421	0,405384	20,27	0,442156119	0,235647608

4.2.2.4. Muestra P#4 R#10. Inundada con $W_o = 3\%$.

4.2.2.4.1. Granulometría

Tabla N° 20. Granulometría Muestra P#4 R#10. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $56,6 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	22,52	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	22,52	0,00	100,00
#4	4,76	0	0	22,52	0,00	100,00
#10	2	15,96	15,96	6,56	70,87	29,13
#16	1,19	3,17	19,13	3,39	14,08	15,05
#30	0,59	1,55	20,68	1,84	6,88	8,17
#40	0,42	0,45	21,13	1,39	2,00	6,17
#50	0,298	0,45	21,58	0,94	2,00	4,17
#100	0,149	0,36	21,94	0,58	1,60	2,58
#200	0,074	0,25	22,19	0,33	1,11	1,47
Pasante #200	0	0,33	22,52	0	1,47	0,00
	Total	22,52			98,53	

4.2.2.4.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 21. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $56,6 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,053594	2,68	0,6251	0,588692777
28,29421211	0,133096	6,65	0,5605	0,441961203
42,44131816	0,251968	12,60	0,4677	0,273092509
56,58842421	0,366268	18,31	0,3839	0,160092396

4.2.3. Muestra P#4 R#10. Ensayo a 127,3 kg/ cm²:

4.2.3.1. Muestra P#4 R#10. Seca. W= 0%.

4.2.3.1.1. Granulometría

Tabla N° 22. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 0%. Ensayo a 127,3 kg/ cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	20,55	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	20,55	0,00	100,00
#4	4,76	0	0	20,55	0,00	100,00
#10	2	10,73	10,73	9,82	52,21	47,79
#16	1,19	3,53	14,26	6,29	17,18	30,61
#30	0,59	1,81	16,07	4,48	8,81	21,80
#40	0,42	0,52	16,59	3,96	2,53	19,27
#50	0,298	0,39	16,98	3,57	1,90	17,37
#100	0,149	0,42	17,4	3,15	2,04	15,33
#200	0,074	0,31	17,71	2,84	1,51	13,82
Pasante #200	0	2,84	20,55	0	13,82	0,00
Total		20,55			86,18	

4.2.3.1.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 23. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W=0%. Ensayo a 127,3 kg/ cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm2)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,034544	1,73	0,759778707	0,080809243
28,29421211	0,064008	3,20	0,733853647	0,073904976
42,44131816	0,113538	5,68	0,690914762	0,06324256
56,58842421	0,142494	7,12	0,666433698	0,057589134
70,73553026	0,206756	10,34	0,612889517	0,046280677
84,88263632	0,253746	12,69	0,574994677	0,039135431
99,02974237	0,285496	14,27	0,549991637	0,034801394
113,1768484	0,315976	15,80	0,526369764	0,030979242
127,3239545	0,341122	17,06	0,507178717	0,028065711

4.2.3.2. Muestra P#4 R#10. W= 3%.

4.2.3.2.1. Granulometría

Tabla N° 24. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 3%. Ensayo a 127,3 kg/ cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido	Retenido acumulado	Pasante	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53	0	0	20,14	0,00	100,00
#1/4	6,35	0	0	20,14	0,00	100,00
#4	4,76	0	0	20,14	0,00	100,00
#10	2	11,47	11,47	8,67	56,95	43,05
#16	1,19	3,56	15,03	5,11	17,68	25,37
#30	0,59	2,26	17,29	2,85	11,22	14,15
#40	0,42	0,68	17,97	2,17	3,38	10,77
#50	0,298	0,48	18,45	1,69	2,38	8,39
#100	0,149	0,63	19,08	1,06	3,13	5,26
#200	0,074	0,46	19,54	0,6	2,28	2,98
Pasante #200	0	0,6	20,14	0	2,98	0,00
Total		20,14			97,02	

4.2.3.2.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 25. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W=3%. Ensayo a 127,3 kg/ cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,071882	3,59	0,800064928	0,458404588
28,29421211	0,150622	7,53	0,729196372	0,361285564
42,44131816	0,258064	12,90	0,636302213	0,253681158
56,58842421	0,33274	16,64	0,575205961	0,194667843
70,73553026	0,358902	17,95	0,554600692	0,176800624
84,88263632	0,399796	19,99	0,522813772	0,151201357
99,02974237	0,428498	21,42	0,500959871	0,134958786
113,1768484	0,488188	24,41	0,456163724	0,105030022
127,3239545	0,512572	25,63	0,438410176	0,09438882

4.2.3.3. Muestra P#4 R#10. W= 6%.

4.1.3.3.1. Granulometría

Tabla N° 26. Granulometría Muestra P#4 R#10. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/ cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido	Retenido acumulado	Pasante	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53	0	0	21,17	0,00	100,00
#1/4	6,35	0	0	21,17	0,00	100,00
#4	4,76	0	0	21,17	0,00	100,00
#10	2	12,43	12,43	8,74	58,72	41,28
#16	1,19	3,41	15,84	5,33	16,11	25,18
#30	0,59	2,09	17,93	3,24	9,87	15,30
#40	0,42	0,67	18,6	2,57	3,16	12,14
#50	0,298	0,49	19,09	2,08	2,31	9,83
#100	0,149	0,94	20,03	1,14	4,44	5,38
#200	0,074	0,49	20,52	0,65	2,31	3,07
Pasante #200	0	0,65	21,17	0	0,00	0,00
Total		21,17			100,00	

4.2.3.3.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 27. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/ cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm2)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,147	0,083566	4,18	0,702107701	0,304349802
28,294	0,093218	4,66	0,693893329	0,295216706
42,441	0,19304	9,65	0,609349419	0,21042518
56,588	0,25273	12,64	0,561318386	0,169545075
70,736	0,308864	15,44	0,517496863	0,136692351
84,883	0,357632	17,88	0,480494219	0,1121519
99,030	0,384302	19,22	0,460751829	0,100224435
113,177	0,411226	20,56	0,441087188	0,089131645
127,324	0,438658	21,93	0,421321236	0,078758358

4.2.3.4. Muestra P#4 R#10. Inundada con $W_o = 3\%$.

4.1.3.4.1. Granulometría

Tabla N° 28. Granulometría Muestra P#4 R#10. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$.
Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido	Retenido acumulado	Pasante	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	22,55	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	22,55	0,00	100,00
#4	4,76	0	0	22,55	0,00	100,00
#10	2	12,15	12,15	10,4	53,88	46,12
#16	1,19	4,24	16,39	6,16	18,80	27,32
#30	0,59	2,55	18,94	3,61	11,31	16,01
#40	0,42	0,77	19,71	2,84	3,41	12,59
#50	0,298	0,61	20,32	2,23	2,71	9,89
#100	0,149	0,77	21,09	1,46	3,41	6,47
#200	0,074	0,82	21,91	0,64	3,64	2,84
Pasante #200	0	0,64	22,55	0		0,00
	Total	22,55			97,16	

4.2.3.4.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 29. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#4 R#10. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,147	0,078994	3,95	0,599627314	0,185218042
28,294	0,167386	8,37	0,528930185	0,133004177
42,441	0,243078	12,15	0,471066293	0,097649882
56,588	0,317754	15,89	0,41613962	0,069930882
70,736	0,378206	18,91	0,373335384	0,052068939
84,883	0,422656	21,13	0,342813005	0,041230083
99,030	0,460502	23,03	0,317402955	0,03335586
113,177	0,496316	24,82	0,29381222	0,026939913
127,324	0,52578	26,29	0,274751778	0,022359073

4.3. Muestra Pasante tamiz #10 Retenido tamiz #40 (P#10 R#40)

4.3.1. Muestra P#10 R#40. W= 0%. Sin Ensayar.

4.3.1.1. Granulometría

Tabla N° 30. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 0%. Sin Ensayar. Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	100	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	100	0,00	100,00
#4	4,76		0	100	0,00	100,00
#10	2	0	0	100	0,00	100,00
#16	1,19	31,69	31,69	68,31	31,69	68,31
#30	0,59	45,51	77,2	22,8	45,51	22,80
#40	0,42	22,8	100	0	22,80	0,00
#50	0,298		0	0	0,00	0,00
#100	0,149		0	0	0,00	0,00
#200	0,074		0	0	0,00	0,00
Pasante #200	0		0	0	0,00	0,00
	Total	100			100,00	

4.3.2. Muestra P#10 R#40. Ensayo a 56,6 kg/cm²:

4.3.2.1. Muestra P#10 R#40. Seca. W= 0%.

4.3.2.1.1. Granulometría

Tabla N° 31. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 0%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	21,21	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	21,21	0,00	100,00
#4	4,76		0	21,21	0,00	100,00
#10	2	0	0	21,21	0,00	100,00
#16	1,19	4,85	4,85	16,36	22,87	77,13
#30	0,59	9,73	14,58	6,63	45,87	31,26
#40	0,42	5,34	19,92	1,29	25,18	6,08
#50	0,298	0,85	20,77	0,44	4,01	2,07
#100	0,149	0,3	21,07	0,14	1,41	0,66
#200	0,074	0,14	21,21	0	0,66	0,00
Pasante #200	0		21,21	0	0,00	0,00
	Total	21,21			100,00	

4.3.2.1.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 32. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=0%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,09144	4,57	0,695114298	0,350
28,29421211	0,102616	5,13	0,685641999	0,338
42,44131816	0,114808	5,74	0,675366325	0,325
56,58842421	0,185928	9,30	0,615790299	0,256

4.3.2.2. Muestra P#10 R#40. W= 3%.

4.3.2.2.1. Granulometría

Tabla N° 33. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 3%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	20,33	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	20,33	0,00	100,00
#4	4,76		0	20,33	0,00	100,00
#10	2	0	0	20,33	0,00	100,00
#16	1,19	6,81	6,81	13,52	33,50	66,50
#30	0,59	6,71	13,52	6,81	33,01	33,50
#40	0,42	4,02	17,54	2,79	19,77	13,72
#50	0,298	1,19	18,73	1,6	5,85	7,87
#100	0,149	0,6	19,33	1	2,95	4,92
#200	0,074	0,32	19,65	0,68	1,57	3,34
Pasante #200	0	0,68	20,33	0	3,34	0,00
	Total	20,33			96,66	

4.3.2.2.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 34. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=3%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm2)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,14351	7,18	0,716995919	0,179366637
28,29421211	0,198882	9,94	0,66945917	0,150161072
42,44131816	0,28956	14,48	0,593767561	0,10974514
56,58842421	0,318008	15,90	0,571097811	0,099057906

4.3.2.3. Muestra P#10 R#40. W= 6%.

4.3.2.3.1. Granulometría

Tabla N° 35. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 6%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	18,74	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	18,74	0,00	100,00
#4	4,76		0	18,74	0,00	100,00
#10	2	0	0	18,74	0,00	100,00
#16	1,19	4,15	4,15	14,59	22,15	77,85
#30	0,59	6,88	11,03	7,71	36,71	41,14
#40	0,42	5,11	16,14	2,6	27,27	13,87
#50	0,298	1,23	17,37	1,37	6,56	7,31
#100	0,149	0,71	18,08	0,66	3,79	3,52
#200	0,074	0,35	18,43	0,31	1,87	1,65
Pasante #200	0	0,31	18,74	0	1,65	0,00
	Total	18,74			98,35	

4.3.2.3.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 36. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=6%. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,124206	6,21	0,88204318	0,340796264
28,29421211	0,241554	12,08	0,771616178	0,242375772
42,44131816	0,31496	15,75	0,70659255	0,19321115
56,58842421	0,347218	17,36	0,679066918	0,174310916

4.3.2.4. Muestra P#10 R#40. Inundada con $W_o = 3\%$.

4.3.2.4.1. Granulometría

Tabla N° 37. Granulometría Muestra P#10 R#40. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $56,6 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	19,04	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	19,04	0,00	100,00
#4	4,76		0	19,04	0,00	100,00
#10	2	0	0	19,04	0,00	100,00
#16	1,19	4,3	4,3	14,74	22,58	77,42
#30	0,59	6,11	10,41	8,63	32,09	45,33
#40	0,42	3,35	13,76	5,28	17,59	27,73
#50	0,298	1,78	15,54	3,5	9,35	18,38
#100	0,149	1,25	16,79	2,25	6,57	11,82
#200	0,074	1,07	17,86	1,18	5,62	6,20
Pasante #200	0	1,18	19,04	0	6,20	0,00
	Total	19,04			93,80	

4.3.2.4.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 38. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $56,6 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,053086	2,65	0,922621752	0,148852883
28,29421211	0,102362	5,12	0,875252197	0,130292669
42,44131816	0,15494	7,75	0,825953692	0,112449459
56,58842421	0,203708	10,19	0,781429637	0,097607007

4.3.3. Muestra P#10 R#40. Ensayo a 127,3 kg/cm²:

4.3.3.1. Muestra P#10 R#40. Seca. W= 0%.

4.3.3.1.1. Granulometría

Tabla N° 39. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 0%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	21,58	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	21,58	0,00	100,00
#4	4,76		0	21,58	0,00	100,00
#10	2	0	0	21,58	0,00	100,00
#16	1,19	6,45	6,45	15,13	29,89	70,11
#30	0,59	8,79	15,24	6,34	40,73	29,38
#40	0,42	3,42	18,66	2,92	15,85	13,53
#50	0,298	1,2	19,86	1,72	5,56	7,97
#100	0,149	0,88	20,74	0,84	4,08	3,89
#200	0,074	0,38	21,12	0,46	1,76	2,13
Pasante #200	0	0,46			0,00	
Total		21,58			97,87	

4.3.3.1.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 40. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=0%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,048514	2,43	0,700309679	1622,885368
28,29421211	0,074422	3,72	0,678283868	1571,843139
42,44131816	0,100584	5,03	0,656330236	1520,968179
56,58842421	0,129794	6,49	0,632139533	1464,909068
70,73553026	0,158496	7,92	0,608716699	1410,629402
84,88263632	0,192786	9,64	0,581135251	1346,712639
99,02974237	0,225806	11,29	0,555030708	1286,218428
113,1768484	0,259842	12,99	0,528567195	1224,892349
127,3239545	0,291338	14,57	0,504495319	1169,108605

4.3.3.2. Muestra P#10 R#40. W= 3%.

4.3.3.2.1. Granulometría

Tabla N° 41. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	20,33	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	20,33	0,00	100,00
#4	4,76		0	20,33	0,00	100,00
#10	2	0	0	20,33	0,00	100,00
#16	1,19	6,81	6,81	13,52	33,50	66,50
#30	0,59	6,71	13,52	6,81	33,01	33,50
#40	0,42	4,02	17,54	2,79	19,77	13,72
#50	0,298	1,19	18,73	1,6	5,85	7,87
#100	0,149	0,6	19,33	1	2,95	4,92
#200	0,074	0,32	19,65	0,68	1,57	3,34
Pasante #200	0	0,68	20,33	0	3,34	0,00
	Total	20,33			96,66	

4.3.3.2.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 42. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=3%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,168656	8,43	0,693739355	0,164703677
28,29421211	0,236982	11,85	0,635876137	0,131319144
42,44131816	0,306578	15,33	0,57895092	0,102687479
56,58842421	0,35687	17,84	0,53924662	0,085116736
70,73553026	0,399542	19,98	0,506405254	0,072030041
84,88263632	0,434594	21,73	0,480003995	0,062435637
99,02974237	0,488696	24,43	0,439968407	0,049416546
113,1768484	0,51181	25,59	0,423326692	0,044533132
127,3239545	0,533908	26,70	0,407600356	0,040196216

4.3.3.3. Muestra P#10 R#40. W= 6%.

4.2.3.3.1. Granulometría

Tabla N° 43. Granulometría Muestra P#10 R#40. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	18,74	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	18,74	0,00	100,00
#4	4,76		0	18,74	0,00	100,00
#10	2	0	0	18,74	0,00	100,00
#16	1,19	4,15	4,15	14,59	22,15	77,85
#30	0,59	6,88	11,03	7,71	36,71	41,14
#40	0,42	5,11	16,14	2,6	27,27	13,87
#50	0,298	1,23	17,37	1,37	6,56	7,31
#100	0,149	0,71	18,08	0,66	3,79	3,52
#200	0,074	0,35	18,43	0,31	1,87	1,65
Pasante #200	0	0,31	18,74	0	1,65	0,00
	Total	18,74			98,35	

4.3.3.3.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 44. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. W=6%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,147	0,13716	6,86	0,67588146	0,172196044
28,294	0,24384	12,19	0,58648994	0,118850018
42,441	0,287528	14,38	0,55183466	0,101213009
56,588	0,34798	17,40	0,5049289	0,079952045
70,736	0,393954	19,70	0,4703351	0,066139471
84,883	0,397764	19,89	0,46753411	0,065088846
99,030	0,454914	22,75	0,42559932	0,050542903
113,177	0,535432	26,77	0,36820612	0,034101725
127,324	0,660146	33,01	0,28288889	0,016493526

4.3.3.4. Muestra P#10 R#40. Inundada con $W_o = 3\%$.

4.3.3.4.1. Granulometría

Tabla N° 45. Granulometría Muestra P#10 R#40. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	19,04	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	19,04	0,00	100,00
#4	4,76		0	19,04	0,00	100,00
#8	4,76		0	19,04	0,00	100,00
#10	2	0	0	19,04	0,00	100,00
#16	1,19	4,3	4,3	14,74	22,58	77,42
#30	0,59	6,11	10,41	8,63	32,09	45,33
#40	0,42	3,35	13,76	5,28	17,59	27,73
#50	0,298	1,78	15,54	3,5	9,35	18,38
#100	0,149	1,25	16,79	2,25	6,57	11,82
#200	0,074	1,07	17,86	1,18	5,62	6,20
Pasante #200	0	1,18	19,04	0	6,20	0,00
	Total	19,04			93,80	

4.3.3.4.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 46. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra P#10 R#40. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,147	0,144526	7,23	0,832322677	0,11467091
28,294	0,2286	11,43	0,755297329	0,089450586
42,441	0,277622	13,88	0,712273236	0,076903631
56,588	0,337058	16,85	0,6613879	0,063456736
70,736	0,386334	19,32	0,620454625	0,053712237
84,883	0,42418	21,21	0,589790762	0,047025559
99,030	0,45593	22,80	0,564552834	0,041908641
113,177	0,4826	24,13	0,543689522	0,037937872
127,324	0,507746	25,39	0,524280713	0,034451388

Caracterización de tres muestras diferentes de arenas mediante el ensayo de consolidación unidimensional a altas presiones

4.4. Muestra Pasante tamiz #40 (Pasante #40)

4.4.1. Muestra Pasante #40. W= 0%. Sin Ensayar

4.4.1.1. Granulometría

Tabla N° 47. Granulometría Muestra Pasante #40. W=0%. Sin Ensayar. Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	16,17	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	16,17	0,00	100,00
#4	4,76		0	16,17	0,00	100,00
#10	2		0	16,17	0,00	100,00
#16	1,19		0	16,17	0,00	100,00
#30	0,59		0	16,17	0,00	100,00
#40	0,42	0	0	16,17	0,00	100,00
#50	0,298	3,61	3,61	12,56	22,33	77,67
#100	0,149	9,59	13,2	2,97	59,31	18,37
#200	0,074	2,84	16,04	0,13	17,56	0,80
Pasante #200	0	0,13	16,17	0	0,80	0,00
	Total	16,17			99,20	

4.4.2. Muestra Pasante #40. Ensayo a Ensayo Completo:

4.4.2.1. Muestra Pasante #40. Seca. $W = 0\%$.

4.4.2.1.1. Granulometría

Tabla N° 48. Granulometría Muestra Pasante #40. $W = 0\%$. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	18,31	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	18,31	0,00	100,00
#4	4,76		0	18,31	0,00	100,00
#10	2		0	18,31	0,00	100,00
#16	1,19		0	18,31	0,00	100,00
#30	0,59		0	18,31	0,00	100,00
#40	0,42	0	0	18,31	0,00	100,00
#50	0,298	4,54	4,54	13,77	24,80	75,20
#100	0,149	9,47	14,01	4,3	51,72	23,48
#200	0,074	3,21	17,22	1,09	17,53	5,95
Pasante #200	0	1,09	18,31	0	5,95	0,00
Total		18,31			94,05	

4.4.2.1.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 49. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Pasante #40. $W = 0\%$. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,1471061	0,060706	3,04	0,98710864	0,049509472
28,2942121	0,096012	4,80	0,95203022	0,045214809
42,4413182	0,127508	6,38	0,92128964	0,041630417
56,5884242	0,158242	7,91	0,89176519	0,038344171
70,7355303	0,188722	9,44	0,86293468	0,035281837
84,8826363	0,2159	10,80	0,83761926	0,032711426
99,0297424	0,24257	12,13	0,81311461	0,030328091
113,176848	0,267462	13,37	0,79054859	0,028223744
127,323954	0,290322	14,52	0,77008262	0,02638964

4.4.2.2. Muestra Pasante #40. W= 3%.

4.4.2.2.1. Granulometría

Tabla N° 50. Granulometría Muestra Pasante #40. W= 3%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	18,84	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	18,84	0,00	100,00
#4	4,76		0	18,84	0,00	100,00
#10	2		0	18,84	0,00	100,00
#16	1,19		0	18,84	0,00	100,00
#30	0,59		0	18,84	0,00	100,00
#40	0,42	0	0	18,84	0,00	100,00
#50	0,298	2,42	2,42	16,42	12,85	87,15
#100	0,149	7,69	10,11	8,73	40,82	46,34
#200	0,074	3,87	13,98	4,86	20,54	25,80
Pasante #200	0	4,86	18,84	0	25,80	0,00
Total		18,84			74,20	

4.4.2.2.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 51. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Pasante #40. W=3%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,14710605	0,144018	7,20	0,852281073	0,014501753
28,29421211	0,215646	10,78	0,785943478	0,011794651
42,44131816	0,249428	12,47	0,755777107	0,010668189
56,58842421	0,298958	14,95	0,712295287	0,009157574
70,73553026	0,365506	18,28	0,655320374	0,007376627
84,88263632	0,37465	18,73	0,647752249	0,007156715
99,02974237	0,40513	20,26	0,622640504	0,00645459
113,1768484	0,431292	21,56	0,601414744	0,005893825
127,3239545	0,453898	22,69	0,583313953	0,005438998

4.4.2.3. Muestra Pasante #40. W= 6%.

4.4.2.3.1. Granulometría

Tabla N° 52. Granulometría Muestra Pasante #40. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	18,606	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	18,606	0,00	100,00
#4	4,76		0	18,606	0,00	100,00
#10	2		0	18,606	0,00	100,00
#16	1,19		0	18,606	0,00	100,00
#30	0,59		0	18,606	0,00	100,00
#40	0,42	0	0	18,606	0,00	100,00
#50	0,298	2,24	2,24	16,366	12,04	87,96
#100	0,149	7,42	9,66	6,51	39,88	34,99
#200	0,074	3,45	13,11	3,06	18,54	16,45
Pasante #200	0	5,496	18,606	0	29,54	0,00
	Total	18,606			70,46	

4.4.2.3.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 53. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Pasante #40. W= 6%. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm2)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,147	0,131318	6,57	0,888410529	0,02658115
28,294	0,230378	11,52	0,794877555	0,020030647
42,441	0,304546	15,23	0,728316316	0,016001695
56,588	0,36195	18,10	0,678710181	0,013332343
70,736	0,406654	20,33	0,641187651	0,011498106
84,883	0,443484	22,17	0,61096518	0,010134267
99,030	0,474472	23,72	0,586004886	0,009082979
113,177	0,501142	25,06	0,564855511	0,00824455
127,324	0,525526	26,28	0,545776792	0,00752883

4.4.2.4. Muestra Pasante #40. Inundada con $W_o = 3\%$.

4.4.2.4.1. Granulometría

Tabla N° 54. Granulometría Muestra Pasante #40. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53		0	17,8	0,00	100,00
#1/4	6,35		0	17,8	0,00	100,00
#4	4,76		0	17,8	0,00	100,00
#10	2		0	17,8	0,00	100,00
#16	1,19		0	17,8	0,00	100,00
#30	0,59		0	17,8	0,00	100,00
#40	0,42	0	0	17,8	0,00	100,00
#50	0,298	2,79	2,79	15,01	15,67	84,33
#100	0,149	7,97	10,76	7,04	44,78	39,55
#200	0,074	4,4	15,16	2,64	24,72	14,83
Pasante #200	0	2,64	17,8	0	14,83	0,00
	Total	17,8			85,17	

4.4.2.4.2. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica

Tabla N° 55. Ensayo de Consolidación, Relación de Vacíos y Conductividad Hidráulica. Muestra Pasante #40. Inundada con $W_o = 3\%$. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)	Deformación (%)	e	k (cm/seg)
14,147	0,09652	4,83	1,010677153	0,031099945
28,294	0,178816	8,94	0,92794181	0,025103422
42,441	0,242316	12,12	0,866729657	0,021126822
56,588	0,292354	14,62	0,820025948	0,018351427
70,736	0,332994	16,65	0,783043021	0,016310214
84,883	0,366268	18,31	0,753378534	0,014771638
99,030	0,394208	19,71	0,728883836	0,013566686
113,177	0,419608	20,98	0,706927011	0,012536416
127,324	0,440436	22,02	0,689151073	0,011736523

CAPITULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la realización de los ensayos, se subdividió la muestra de arena original en 3 tipos utilizando las siguientes fracciones:

- i) muestras de Grano Grueso pasantes por el tamiz #4 y retenido en el tamiz #10 (P#4R#10),
- ii) muestras de Grano Medio correspondientes al material pasante por el tamiz #10 y retenido en el tamiz #40 (P#10R#40) y
- iii) muestras de Grano Fino pasante por el tamiz #40 (P#40). A los efectos de poder establecer un tamaño nominal de la fracción fina de la arena, la misma se supuso que es retenida en el tamiz 400.

Lo anterior se hizo con el fin de analizar el comportamiento de cada fracción por separado para compararla con el comportamiento de la muestra original, donde los granos de diversos tamaños aportan al proceso de consolidación, caso contrario el que se produce para las muestras con una gradación uniforme.

Para determinar el cambio de volumen y de fracturamiento de los granos debido a la consolidación unidimensional se procedió a realizar dos ensayos para cada fracción controlando las muestras a partir de los 14,14 kg/cm² que corresponden a una carga de 10 kg y en donde se garantiza que las condiciones iniciales sean iguales para todos los ensayos.

En el primer ensayo se cargó la muestra hasta 56,6 kg/cm², condición correspondiente a la mitad de la carga, aquí los granos comienzan a fracturarse y acomodarse. Al alcanzar esta condición se desmonta la muestra y se examina la granulometría para saber cuánto ha variado la distribución de los mismos.

Para el segundo ensayo se monta una muestra similar a la anterior y se carga hasta los $127,3 \text{ kg/cm}^2$, la cual corresponde al ensayo completo. Una vez desmontada la muestra se le realiza la granulometría la cual se compara con la granulometría del ensayo anterior.

Ahora bien, dado que se utilizan humedades de 0%, 3%, 6% e inundada con humedad inicial de 3% se examinan los cambios en el fracturamiento de los granos y en la compresibilidad de las muestras debidos a los cambios en el contenido de humedad. De la misma manera, se examina la influencia que tiene el fracturamiento en la variación de la superficie específica de los granos, en la relación de vacíos y en la conductividad hidráulica de las muestras.

5.1. Muestra Original.

El análisis de esta muestra permitirá realizar una comparación entre el comportamiento de las fracciones gruesa, media y fina con el de la muestra original de la arena limpia. En consecuencia, se cuenta con una muestra adicional para el estudio de las arenas establecidas en el objetivo general del presente Trabajo Especial de Grado. Al realizar la granulometría a la muestra, se determinó que se trata de una arena limpia, de gradación homogénea ya que presenta un porcentaje pasante en cada uno de los tamices indicados en capítulos anteriores. El tamaño máximo de grano es el correspondiente a la apertura del tamiz # 3/8 igual a 9,53 mm. Con un porcentaje pasante de 100%, tal como se muestra en la Fig. N° 21, en la cual se graficó la granulometría de la muestra original.

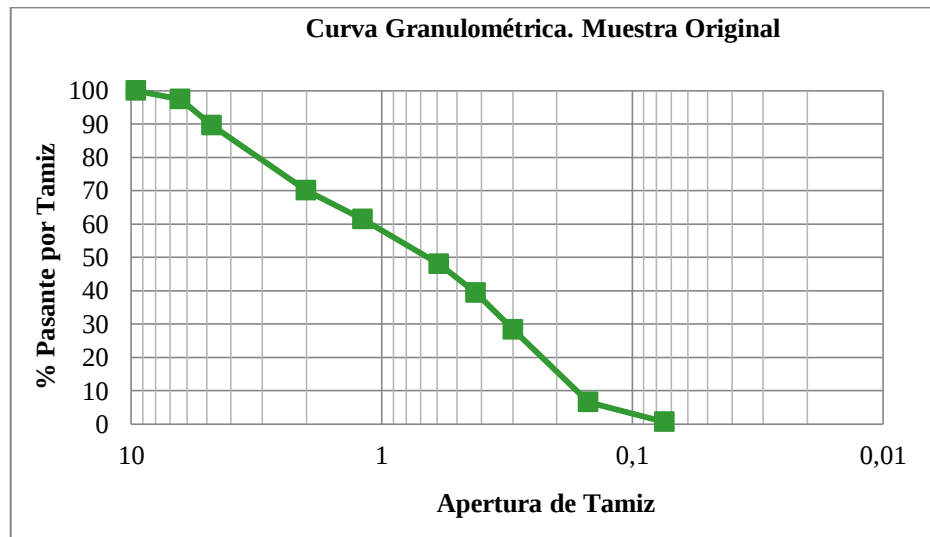


Figura N° 21: Curva granulométrica muestra original. Fuente propia

Se aprecia en la Fig. 21 que los granos predominantes en la muestra son los correspondientes a las fracciones media y fina, debido a un pasante del 69.8 % por el tamiz #10, el cual indica el límite de la arena gruesa (retenido) y arena media a fina (pasante).

Aunque los granos grueso correspondan al 30.02% de la muestra total, tienen gran influencia en el comportamiento durante el ensayo, lo cual se verá más adelante en este trabajo.

5.1.2. Muestras Originales Ensayadas.

Una vez preparada la muestra y colocada en el consolidómetro se realizaron los incrementos de carga hasta 90 kg, que sostenidos en el tiempo generaron que la muestra sufriera una reducción volumétrica importante. Dichos resultados se encuentran resumidos en la siguiente tabla, así como las curvas que reflejan su variación para cada carga, junto con el cambio relativo según el cambio de deformación sufrido por cada muestra al someterlas a esfuerzos de 14.1 kg/cm^2 y 127.3 kg/cm^2 .

Tabla N° 56: Cambio relativo de %deformación. Fuente propia

w %	%Def a 14 kg/cm ²	%Def a 127.3 kg/cm ²	$\Delta\%Def$	Cambio relativo %Def
0	1,4478	7,6073	6,1595	
3	7,4676	20,7899	13,3223	1,16
6	8,763	23,2537	14,4907	1,35
Inund Wo=3%	8,7376	20,5105	11,7729	0,91

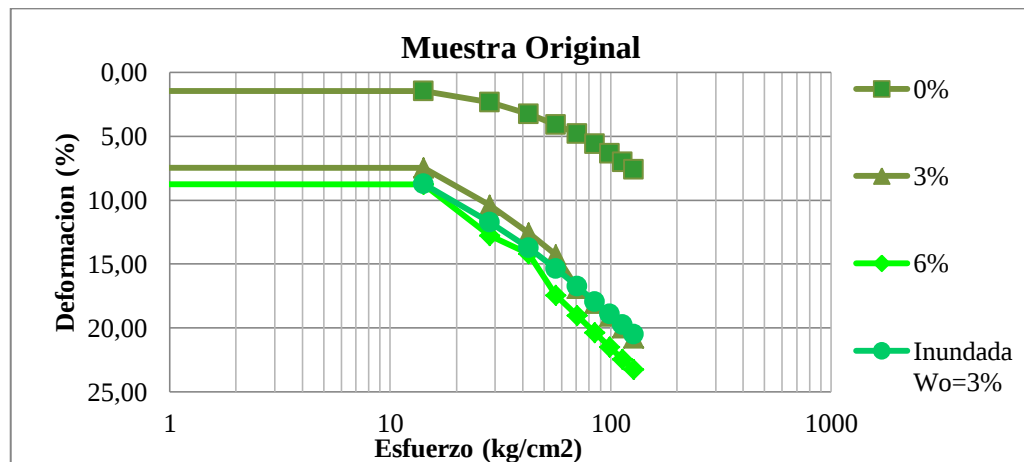


Figura N° 22: Curva % Deformación vs Esfuerzo. Muestra original. Fuente propia

El comportamiento de la muestra original sometida a la variación de esfuerzos varía según el contenido de humedad que tenga al inicio del ensayo. Este contenido de humedad condiciona la deformación que sufra la misma, como se muestra en la Tabla N° 56. Para la arena con humedad 0% se registran las menores deformaciones a lo largo de todo el proceso de carga por lo consiguiente esas tienen el menor cambio de deformación al pasar de 14 kg/cm² a 127,3 kg/cm², este resulta de 6,31%, el cual representa casi la mitad de los cambios de deformación para las muestras húmedas e inundada.

Según, las deformaciones registradas para las muestras con contenido de humedad de 3% y 6%, las mismas se encuentran dentro de un rango de 11% a 14.5%. Ver Tabla N° 56, esto genera una similitud en el comportamiento de las mismas, cuya diferencia está en el aumento del contenido de humedad, es decir, para una humedad de 6% la muestra sufre 135% más deformación que a 0%; mientras que con 3% de humedad se tiene un aumento del 116%

de deformación. Aunque la muestra inundada es la que mayor contenido de agua tiene presenta la menor deformación del grupo de muestras húmedas. Esto sugiere que el agua que ocupa los espacios vacíos entre los granos no logra romper todos los meniscos y todavía existe una fuerza capilar relacionada con la humedad inicial con la cual la arena fue colocada que sigue controlando la deformación y el reacomodo de las partículas.

Las deformaciones que sufrieron las muestras son producto de la disminución volumétrica por las cargas aplicadas, esta reducción se traduce en un fracturamiento de las partículas y posterior reacomodo de los granos (fracturados y no fracturados) hasta alcanzar el equilibrio. Dicho fracturamiento se midió mediante ensayos de granulometría a cada muestra al desmontar cada ensayo. Antes de realizar la granulometría las muestras, se colocaron en el horno para garantizar que perdieran toda el agua que pudiesen tener y mejorar la disgregabilidad de los granos al pasarla por los tamices correspondientes.

En la Tabla N° 57 se presentan la diferencia de porcentajes pasantes de las muestras ensayadas en comparación con la original sin ensayar para establecer la magnitud del fracturamiento del grano según el contenido de humedad debido a las deformaciones anteriores.

Tabla N° 57: Diferencias en porcentajes pasantes, para la muestra original ensayada. Fuente propia

Tamiz	Apertura (mm)	Diferencia %pasante respecto a la Muestra Original sin ensayar			
		0%	3%	6%	Inundada
#3/8	9,53	0	0	0	0
#1/4	6,35	4,15	1,54	0,19	5,08
#4	4,76	1,09	5,02	2,80	0,79
#10	2	7,29	7,44	10,84	0,46
#16	1,19	6,85	7,53	10,55	2,43
#30	0,59	6,47	7,90	9,88	0,64
#40	0,42	6,31	7,82	10,24	0,65
#50	0,298	6,06	8,81	10,10	3,59
#100	0,149	5,03	9,63	9,18	9,69
#200	0,074	2,23	6,33	3,78	7,96

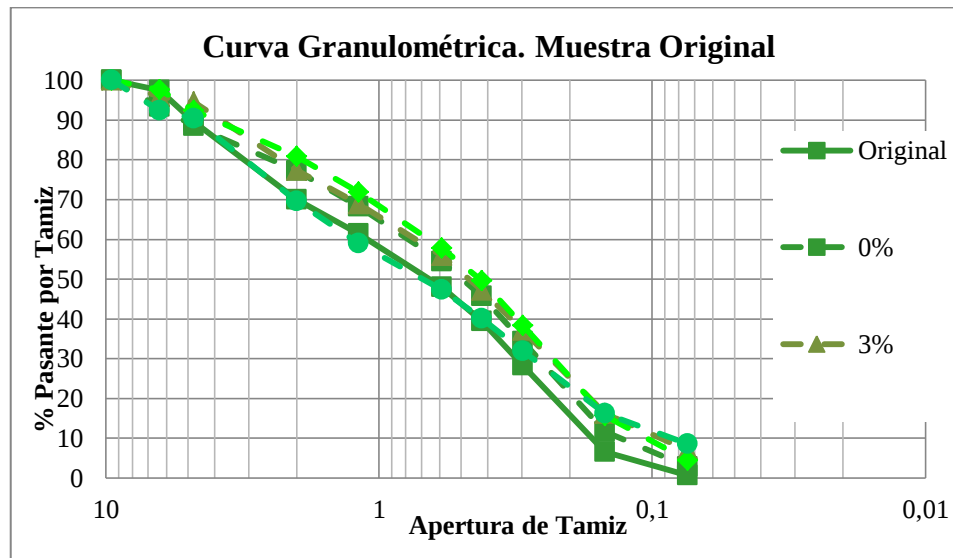


Figura N° 23: curvas granulométricas. Muestra Original ensayadas. Fuente propia

Habiendo ya identificado las muestras con mayor deformación, establecemos si esa pérdida de volumen se tradujo en un fracturamiento de las partículas, para esto se realizó la comparación de la granulometría de las muestras ensayadas según su contenido de humedad con la de la muestra original sin ensayar en el consolidómetro y se obtuvo que para la muestra con 6% de humedad, la deformación que sufrió ocasiono un fracturamiento de los granos correspondientes a la fracción gruesa y parte de la media (tamices #1/4, #4 y #10) incrementando el porcentaje de pasante en cada tamiz en casi 11%, esto incremento la fracción fina de la arena.

De las muestras restantes, la de 0% de humedad es la que presenta el menor fracturamiento de los granos en consonancia con el poco porcentaje de deformación que tuvo durante la carga, dicho fracturamiento se produjo en el tamiz #10 (granos de 2 mm), incrementando el porcentaje pasante para el resto de los tamices en 7%. Por su parte la muestra con 3% de humedad también registró un incremento en su porcentaje pasante del 7%, con un fracturamiento de los granos grandes y medios. Es importante resaltar que el grado de fracturamiento para esta condición produjo el mayor incremento en pasante de partículas menores a 0,074 mm, siguiendo esta misma idea, la muestra inundada a pesar de ser la que

menos deformación sufrió es la que presenta mayor incremento de pasante en el tamiz #200, pero si se observa la tabla anterior, es la que menor fracturamiento sufrió para el resto de los tamices.

Entonces, de acuerdo con lo anterior, el aumento de los granos finos se debe a que durante el proceso de deformación generado por los incrementos de carga, la muestra sufrió un reacomodo especial, es decir, debido a la presencia de agua y a los espacios que esta genero entre los granos más grandes, los de menor tamaño se reordenaron de tal manera que recibieron más carga y por lo tanto se fracturaron más.

Ahora bien, al fracturarse la muestra por los incrementos de carga se originó una variación en la relación de vacíos, la cual según la Tabla N° 58 depende de la gradación de la muestra y el contenido de humedad que esta tenga.

Tabla N° 58: Cambio relativo de la relación de vacíos. Muestra Original. Fuente propia.

w - %	e a 14 kg/cm ²	e a 127,3 kg/cm ²	Δe	Cambio Relativo
0	0,4625	0,3748	0,0877	
3	0,5195	0,3282	0,1914	1,18
6	0,5249	0,3168	0,2081	1,37
Inund. Wo=3%	0,5246	0,3538	0,1708	0,95

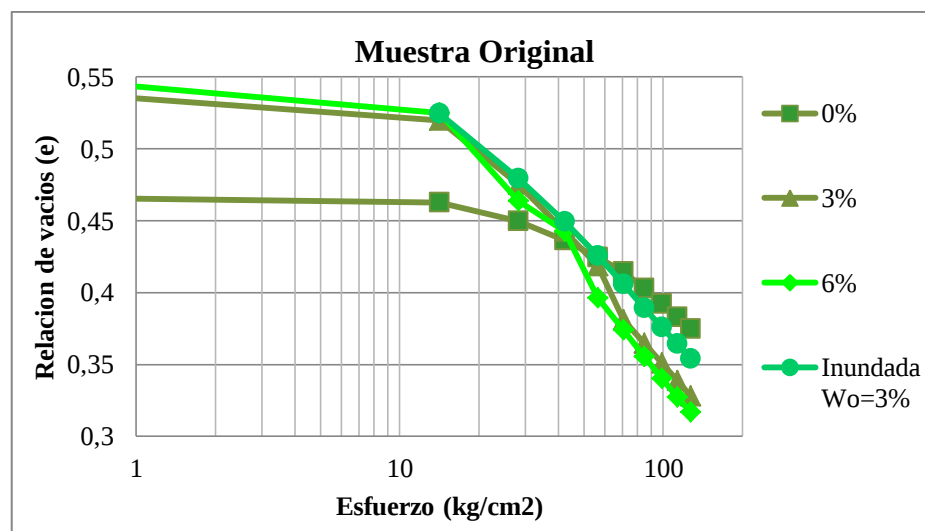


Figura N° 24: Relación de Vacíos. Muestra Original. Fuente propia

Las deformaciones ya descritas generaron una reducción en el volumen de la muestra, la cual afecta directamente la relación de vacíos de cada una. A medida que se carga la muestra y reduce su volumen lo hace también la relación de vacíos, pero no de manera lineal. De la tabla anterior se observa que las muestras tienen una relación de vacíos al final de la carga de 14 kg/cm^2 que es muy similar, es decir, se mantiene prácticamente constante a este nivel de carga.

La muestra a 0% de humedad al culminar el ensayo es la que presenta menor cambio en la relación de vacíos con respecto a la inicial, con 0,0877, debido a la poca deformación que sufrió, porque al estar seca se produjo mayor interacción entre los granos pudiéndose distribuir mejor la carga y disminuir los efectos de esta en la muestra.

Contrariamente, las muestras a 3% y 6%, fueron las que disminuyeron más los vacíos entre sus partículas con un cambio de 0,1914 y 0,2081, respectivamente. Esto se traduce en un 118% y 137% más de reducción de vacíos en comparación con la muestra seca. Como ya comentamos las muestras con contenidos de humedad de 3% y 6% por acción del agua son las que sufrieron mayor cambio en las propiedades. Ahora bien, para la muestra inundada se tiene un cambio relativo de la relación de vacíos con respecto a la seca del 95%, es la menor variación para las muestras con contenido de humedad, ya que el agua libre destruyó parte de los meniscos formados entre los granos lo cual redujo la deformación y la pérdida de volumen en la muestra.

Los cambios causados en las muestras por el ensayo de consolidación unidimensional a altas presiones, afectan directamente la conductividad hidráulica del suelo, ya que esta está relacionada con la gradación que tenga el mismo, así como con la relación de vacíos, debido a que facilitara o disminuirá el paso del agua a través de los espacios vacíos entre los granos de arena. Al introducir la variación del tamaño del grano debido al fracturamiento y la reducción de la relación de vacíos, en la estimación de la conductividad hidráulica para la muestra según su contenido de humedad, obtenemos los resultados expresados en la Tabla N° 59, abajo.

En dicha tabla se resume el comportamiento de las muestras y el cambio total de la conductividad hidráulica para cada contenido de humedad, además del cambio relativo para cada muestra con humedades de 3%, 6% e inundada respecto a la seca:

Tabla N° 59: Cambio relativo en la Conductividad Hidráulica. Muestra original. Fuente propia

w a %	k a 14 kg/cm2	k a 125 kg/cm2	Δk	Cambio Relativo
0	0,0236	0,0134	0,0102	
3	0,0218	0,0063	0,0155	0,5129
6	0,0245	0,0062	0,0183	0,7833
Inund Wo=3%	0,0243	0,0084	0,0159	0,5528

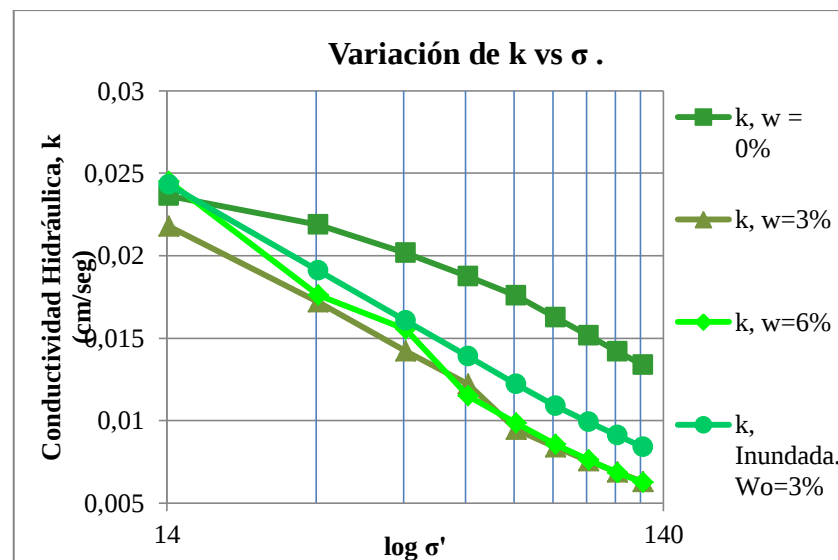


Figura N° 25: Conductividad Hidráulica. Muestra original. Fuente propia

El comportamiento obtenido en la conductividad hidráulica, indica que la muestra a 0% de humedad para la carga de 14.14 kg/cm2 y 127,3 kg/cm2, presenta las conductividades más altas con 0,0236 cm/seg y 0,0134 cm/seg respectivamente. Este comportamiento se debe a que durante la carga se produjo poca variación de volumen debido a la distribución de las cargas en la estructura de la muestra generada por la interacción de los granos.

A medida que se reduce la relación de vacíos y aumenta el fracturamiento de las partículas junto con la superficie específica, en las muestras con humedades de 3%, 6% e inundada se reduce la conductividad hidráulica. Estas inician con valores similares a la seca,

véase la Tabla 59, pero al final del ensayo la reducción en la relación de vacíos y el fracturamiento generado, aumentaron significativamente la superficie específica y al mismo tiempo disminuyen el espacio entre las partículas que funciona como canales para el flujo, con lo cual generan una reducción de alrededor de 50% y 70%, respectivamente, de la conductividad hidráulica.

Adicionalmente si observamos la Figura N° 25, observamos que la conductividad hidráulica para 3% y 6% tienden a comportarse de la misma manera a partir de los 56 kg/cm². Este comportamiento indica que para mayores contenidos de humedad los granos tienen una respuesta inusual debido a la influencia del agua. Reflejado en el comportamiento de la muestra inundada, ya que sufre una reducción del 52% en la capacidad de conductividad hidráulica, si se observa la misma Figura mencionada anterior esta muestra la variación a lo largo de los incrementos de carga

5.2. Muestra Pasante tamiz #4 Retenido tamiz #10 (P#4R#10)

Este tipo de muestra presenta una granulometría del tipo uniforme, donde el tamaño de sus granos están entre 4.76 mm y 2 mm correspondientes a los tamices #4 y #10, tamaño que corresponde a la clasificación de granos gruesos de este tipo de suelo. En la Fig. N° 26 se muestra su granulometría.

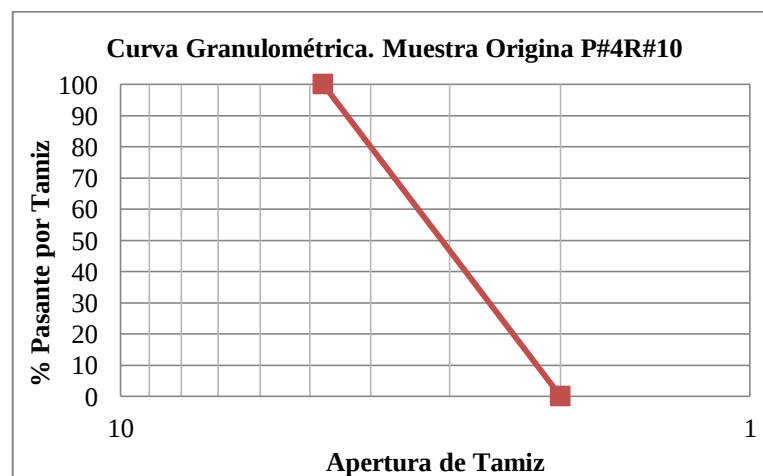


Figura N 26: Curva granulométrica. P#4-R#10. Fuente propia

5.2.1. Muestra Pasante tamiz #4 Retenido tamiz #10 (P#4R#10), Ensayo a 56 kg/cm²

Luego de la granulometría se procede a ensayar la muestra hasta 56,6 kg/cm² donde se obtienen los siguientes resultados

Tabla N° 60. Cambio relativo de Deformación para la muestra P#4R#10. Mitad de Ensayo. Fuente Propia.

w%	%Def a 14 kg/cm ²	%Def a 56,6 kg/cm ²	Δ%Def	Cambio relativo
0	1,5113	8,0645	-6,5532	
3	3,2639	12,5984	-9,3345	-89,01
6	6,4008	20,2692	-13,8684	-131,76
inund	2,6797	18,3134	-15,6337	-148,40

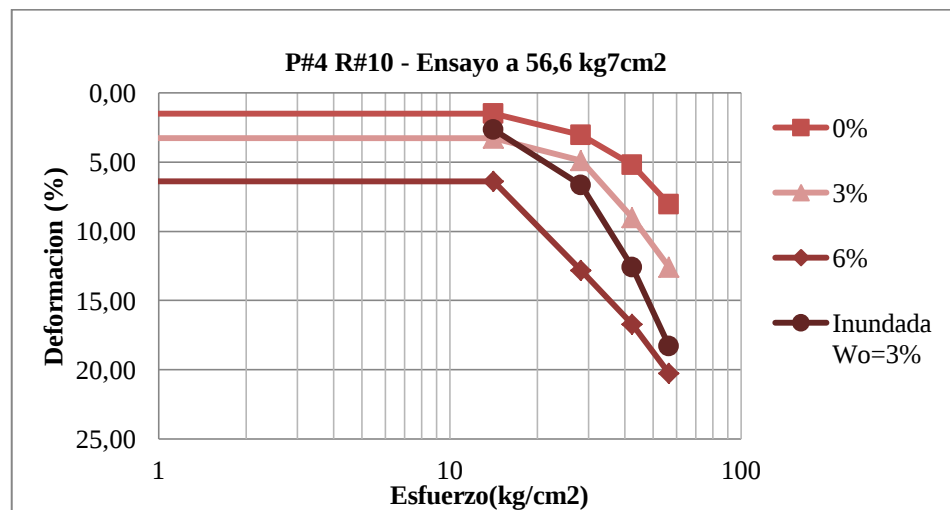


Figura N° 27: % Deformación. P#4-R#10. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente propia.

La Tabla N° 60 señala las deformaciones de la muestra P#4R#10, según su contenido de humedad, cuando está bajo un esfuerzo de 14 kg/cm² (al comienzo del ensayo) y cuando está a 56,6 kg/cm² (finalizando el ensayo); además indica la deformación total dependiendo de la humedad y su deformación respecto a la muestra seca.

Aquí observamos que la muestra seca es la que tiene menor deformación durante el ensayo, ya que la deformación total es de aproximadamente 7%. Pero, si observamos la muestra para un 3% de humedad, la deformación que presenta es de 42% más que la seca. Ahora, la muestra de 6% de humedad presenta las deformaciones mayores para las cargas

aplicadas, y para su deformación total, tiene 112% de deformación sobre la muestra de 0% de humedad. Por otra parte, cuando observamos la muestra inundada, notamos quien tiene la mayor deformación total con 16% y una deformación de 139% más que la seca.

Ahora si detallamos el comportamiento de esta muestras se determina que para una muestra P#4 - R#10 el contenido de humedad afecta en su deformación, ya que si aumentamos la humedad, existirá una reducción en el volumen durante el proceso de carga.

Luego de ensayar la muestra hasta llegar a un esfuerzo de $56,6 \text{ kg/cm}^2$ se realizó la granulometría para determinar los cambios en la superficie específica o tamaño del grano. Es necesario acotar que aquellas muestras húmedas, siendo estas las de 3%, 6% e inundada, se secaron al horno por un periodo de 24 horas y luego se procedió realizar el ensayo granulométrico.

Los resultados obtenidos son los siguientes, así como las curvas granulométricas obtenidas:

Tabla N° 61 .Diferencia %Pasante respecto a la Muestra P#4-R#10 Sin Ensayar. A $56,6 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia

	Diferencia %pasante respecto a la Muestra P#4-R#10 sin ensayar			
Tamiz	0%	3%	6%	Inundada
#3/8	0	0	0	0
#1/4	0,00	0,00	0,00	0,00
#4	0,00	0,00	0,00	0,00
#10	15,44	28,80	27,05	29,13
#16	6,37	12,56	15,14	15,05
#30	3,14	6,44	7,70	8,17
#40	2,08	4,49	5,55	6,17
#50	1,11	3,42	4,31	4,17
#100	0,88	1,99	2,80	2,58
#200	0,35	1,02	1,45	1,47

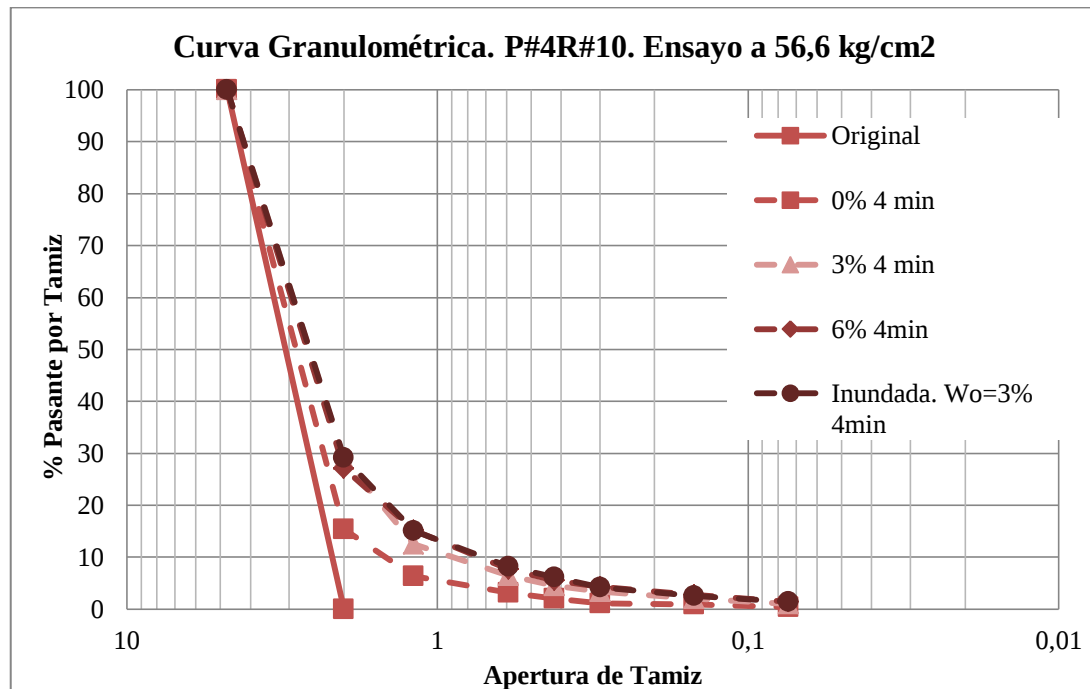


Figura N° 28: Curva Granulométrica. P#4-R#10. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente propia

En la Tabla N° 61 .se señala la diferencia entre los % pasantes de la muestra para cada humedad con respecto a la muestra sin ensayar. Aquí se observa que existe un cambio en la granulometría del material, en particular para el tamiz de 2 mm (#10) y 1,19 mm (#16) para los cuales se observan las mayores desviaciones con respecto a la granulometría original.-Si se analiza la tabla anterior tenemos que la muestra seca es la que presenta menor cambio con respecto al tamaño de sus partículas y que mientras mayor sea la humedad de la muestra, las partículas tienden a reducir su tamaño. Esto se debe a que en condiciones secas la muestra tiene una mayor capacidad de soporte al tener un mejor arreglo de partículas, lo que hace que cada una al estar muy cerca de otra creen un área de soporte mayor reduciendo el esfuerzo al que están sometidos.

Situación contraria la que se tiene con las muestras húmedas, ya que tienen en su contenido agua, lo que hace que las partículas se alejen unas de otras, por ende tienen menos puntos de contacto que soportar un mayor esfuerzo, fracturándose aún más. Razón por la cual la muestra inundada es la que presenta un mayor fracturamiento de partículas.

Para analizar los cambios en cuanto a relación de vacíos, tenemos los siguientes resultados:

Tabla N° 62. Cambio relativo de Relación de vacíos para la muestra P#4R#10. Mitad de Ensayo. Fuente Propia.

w - %	e a 14 kg/cm ²	e a 127.3 kg/cm ²	Δe	Cambio Relativo
0	0,638	0,532	0,106	
3	0,806	0,642	0,164	0,55
6	0,660	0,440	0,220	1,07
inund	0,625	0,384	0,241	1,27

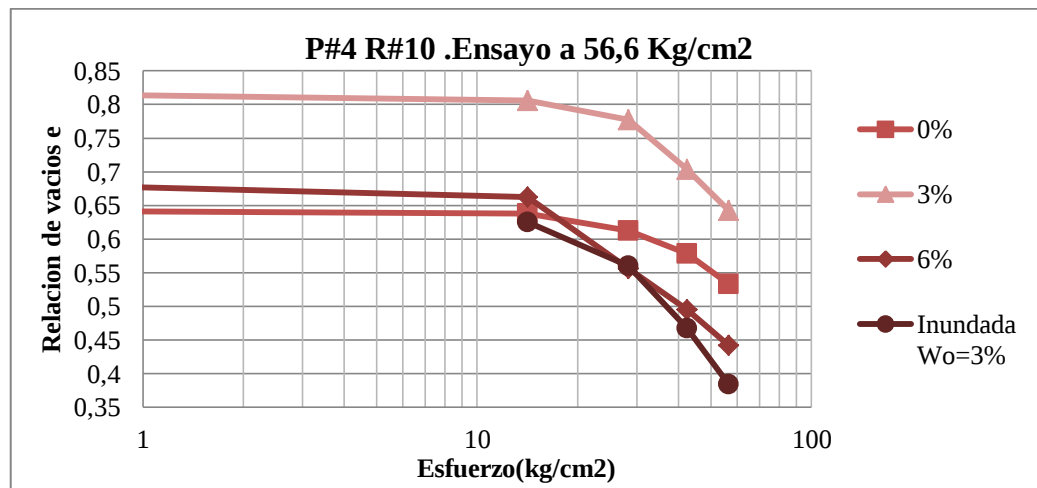


Figura N° 29: Relación de Vacíos. P#4-R#10. Ensayo a 56,6 kg/cm²

La Tabla N° 62. Señala la variación en la relación de vacíos para la muestra según la carga aplicada teniendo en cuenta la variación de humedad. En la misma se observa que la muestra con 3% de humedad es la que presenta la mayor relación de vacíos cuando se le aplica la carga de 14 kg/cm², pero si analizamos la diferencia entre la relación de vacíos inicial y final resulta ser la menor de las muestras húmedas, ya que la muestra inundada es la que tiene mayor cambio de vacíos y con respecto a la muestra seca, es 127% mayor, esto es importante ya que ratifica lo indicado en los párrafos anteriores, y es que para este rango de esfuerzo está ocurriendo un proceso de fracturamiento de granos en la muestra y por ende un reacomodo de los mismos donde influencia el contenido de humedad y afecta directamente el volumen de vacíos y al volumen de sólidos de la muestra.

Tabla N° 63. Cambio relativo de Conductividad Hidráulica para la muestra P#4R#10. Mitad de Ensayo. Fuente Propia.

w a %	k a 14 kg/cm2	k a 56.6 kg/cm2	Δk	Cambio Relativo
0	1,875	1,168	0,707	
3	1,5045	0,8373	0,6672	-0,056
6	0,6879	0,2356	0,4523	-0,3603
inund	0,5886	0,16	0,4286	-0,3938

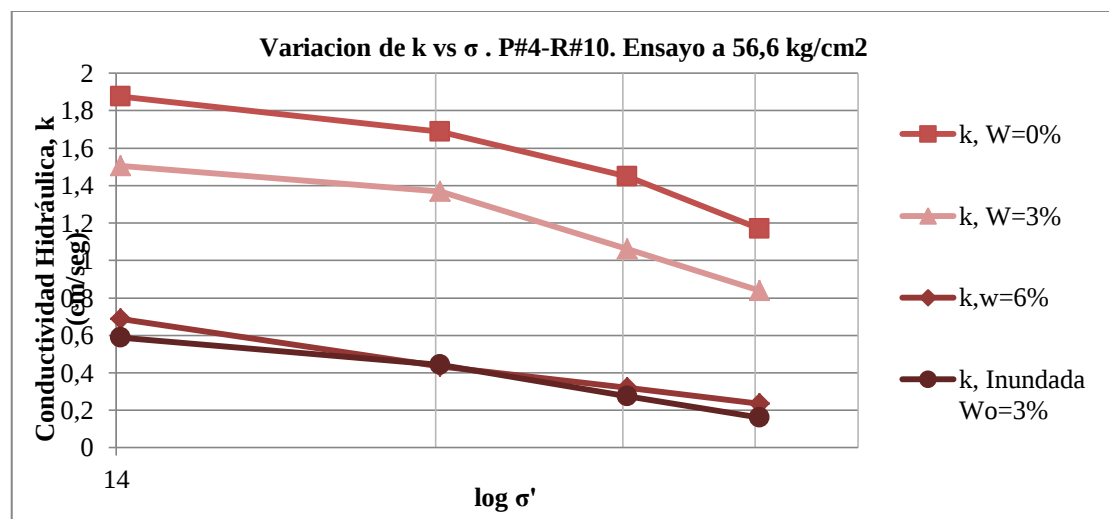


Figura N° 30: Conductividad Hidráulica. P#4-R#10. Ensayo a 56,6 kg/cm2. Fuente propia

En la Tabla N° 63 se aprecia que la muestra que tiene mayor variación en la conductividad hidráulica es la muestra seca. La muestra con 3% de humedad tuvo un 5,6% menos de cambio en conductividad hidráulica mientras que las muestras con 6% y la inundada mostraron entre 36% y 39% menos de cambio en conductividad que la muestra con 0% de humedad. Esto sugiere que las fuerzas capilares causadas por los meniscos en arenas gruesas son importantes ya que controlan el fracturamiento de los granos y por ende la conductividad hidráulica.

5.2.2. Muestra Pasante tamiz #4 Retenido tamiz #10 (P#4R#10), Ensayo a 127,3 kg/cm²

Para este ensayo se procedió a preparar muestras con humedades iguales a las utilizadas en el ensayo anterior y se culminó el ensayo cuando el esfuerzo sobre la muestra fue de 127.3 kg/cm².

Del ensayo de consolidación tenemos los resultados mostrados en la Tabla 64 y Figura N° 31:

Tabla N° 64. Cambio relativo de Deformación para la muestra P#4R#10. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente Propia.

w%	%Def a 14 kg/cm ²	%Def a 127,3 kg/cm ²	Δ%Def	Cambio relativo
0	1,7272	17,0561	-15,3289	
3	3,5941	25,6286	-22,0345	-88,23
6	4,1783	21,9329	-17,7546	-71,29
inund	3,9497	26,289	-22,3393	-89,44

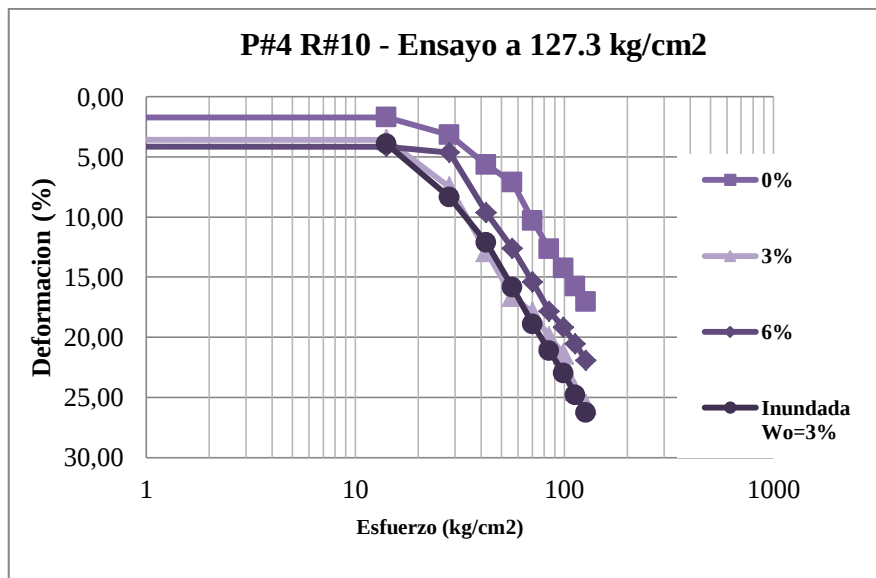


Figura N° 31: % Deformación. P#4-R#10. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente propia.

Se observa que la muestra con menor deformación es la muestra seca, y cuando analizamos las muestras húmedas tenemos que la de 3% e inundada tienen un comportamiento similar, las deformaciones que presentan cuando le son aplicadas las cargas están muy

próximas a 22% y al finalizar tienen una deformación cerca del 45% superior a la seca que a su vez resulta en la menor deformación de las muestras estudiadas

Si hacemos la comparación de estos resultados con el ensayo hasta $56,6 \text{ kg/cm}^2$ podemos observar que para cuando el esfuerzo es de $127,3 \text{ kg/cm}^2$ las partículas cambian su proceso de reacomodo, por ende la muestra de 3% deja de ser la que menos se deforma respecto a la seca y termina siendo con la inundada una de las que más se deforma del grupo de las muestras húmedas.

En ambos casos la muestra que menos se deforma es la muestra con 0% de humedad y la que más se deforma es la muestra inundada, aunque no se debe olvidar que para un ensayo realizado a un esfuerzo mayor las deformaciones de la muestra con 3% de humedad termina con un comportamiento similar a la que se inunda. El ensayo granulométrico de la muestra y las curvas se presentan en la Tabla 65:

Tabla N° 65. Diferencia %Pasante respecto a la Muestra P#4-R#10 Sin Ensayar. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia

		Diferencia %pasante respecto a la Muestra P#4-R#10 sin ensayar			
Tamiz	Apertura (mm)	0%	3%	6%	Inundada
#3/8	9,53	0	0	0	0
#1/4	6,35	0,00	0,00	0,00	0,00
#4	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00
#10	2	47,79	43,05	41,28	46,12
#16	1,19	30,61	25,37	25,18	27,32
#30	0,59	21,80	14,15	15,30	16,01
#40	0,42	19,27	10,77	12,14	12,59
#50	0,298	17,37	8,39	9,83	9,89
#100	0,149	15,33	5,26	5,38	6,47
#200	0,074	13,82	2,98	3,07	2,84

La Tabla N° 65 indica que la muestra con mayor fracturamiento es la muestra seca, esta presenta los mayores porcentajes pasantes al compararla con el resto de las muestras, este es un aspecto diferente al obtenido cuando se hizo el ensayo hasta los $56,6 \text{ kg/cm}^2$, ya que en ese tipo ensayo este tipo de muestra fue la que menos se fracturo.

Al observar los valores de las granulometrías para las humedades restantes se denota que los fracturamientos de partículas son muy parecidos entre sí, esto quiere decir que al incrementar los esfuerzos en la muestra, las partículas se comportan de forma parecida independientemente del contenido de humedad, ya que distribuyen los esfuerzos de la misma manera, debido a que las fuerzas entre las partículas son mayores. En la siguiente figura se ilustran las curvas granulométricas correspondientes.

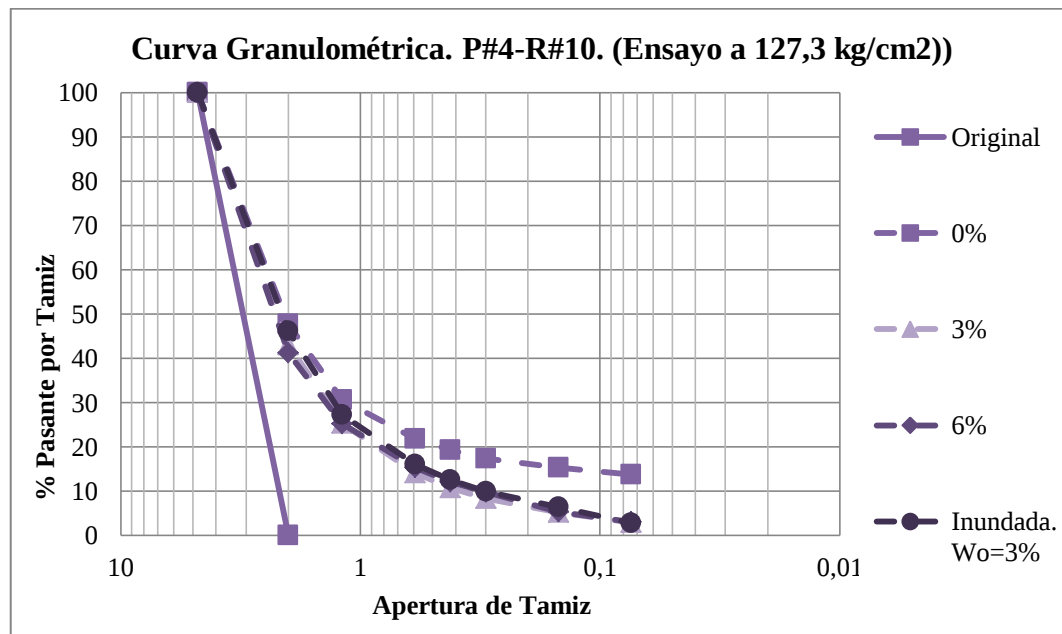


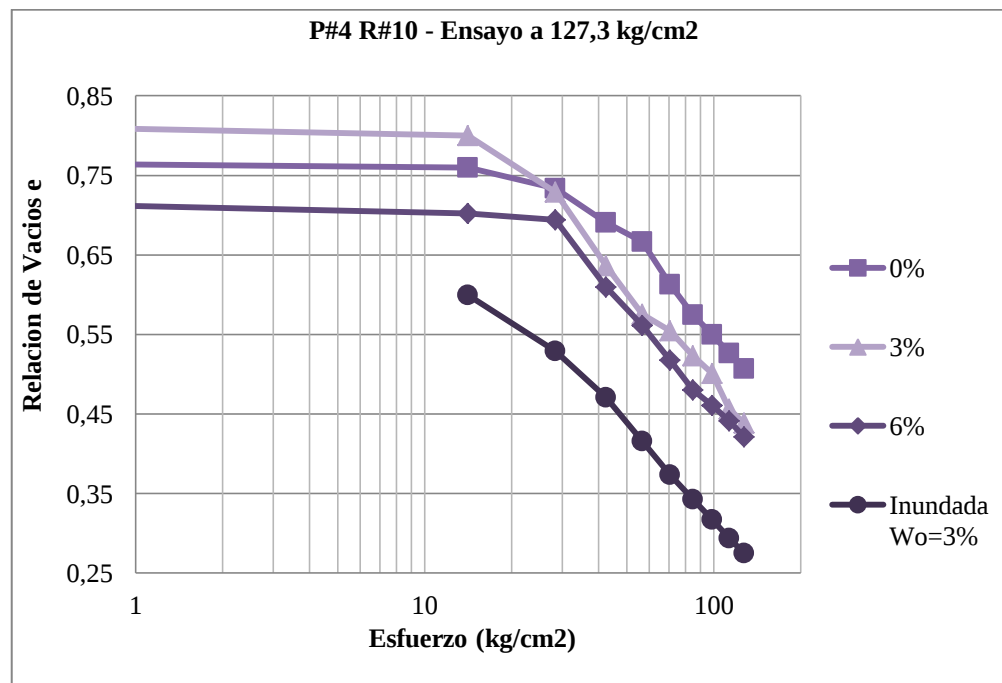
Figura N° 32: Curva Granulométrica. P#4-R#10. (Ensayo a $56,6 \text{ kg/cm}^2$ y $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente propia)

En la Tabla 66, abajo, encontramos que la muestra con menor relación de vacíos para las cargas a la que estuvo sometida es la muestra inundada, aunque presenta una de las mayores diferencias entre su relación de vacíos inicial y final, caso contrario el que sucede con la muestra seca que tiene una diferencia de 0.2526 entre la relación de vacíos a los 14 kg/cm^2

y a los 127.3 kg/cm^2 , la muestra seca es la que presenta menor relación de vacíos al final del ensayo.

Tabla N° 66. Cambio relativo de Relación de vacíos para la muestra P#4R#10. Ensayo $127,3 \text{ kg/cm}^2$. Fuente Propia

w - %	e a 14 kg/cm^2	e a 127.3 kg/cm^2	Δe	Cambio Relativo
0	0,760	0,507	0,253	
3	0,800	0,438	0,362	0,43
6	0,702	0,421	0,281	0,11
inund	0,600	0,275	0,325	0,29



33: Relación de Vacíos. P#4-R#10. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$

Ahora, la muestra que comienza con la mayor relación de vacíos es la de 3% de humedad, lo que se reduce a lo largo del ensayo y termina con valores muy cercanos a los de 6%.

Al comparar estos resultados con los del ensayo realizado hasta $56,6 \text{ kg/cm}^2$, tenemos que al aumentar las cargas, y comparar su relación de vacíos con la muestra seca la variación con respecto a esta se incrementa para las muestras húmedas.

Tabla N° 67 Cambio relativo de Conductividad Hidráulica. Muestra P#4R#10. Ensayo. $127,3 \text{ kg/cm}^2$ Fuente Propia.

w a %	k a 14 kg/cm^2	k a $127,3 \text{ kg/cm}^2$	Δk	Cambio Relativo
0	0,0808	0,0281	0,0527	
3	0,4584	0,0944	0,3640	5,902
6	0,3043	0,0788	0,2256	3,2771
Inund	0,1852	0,0224	0,1629	2,0878

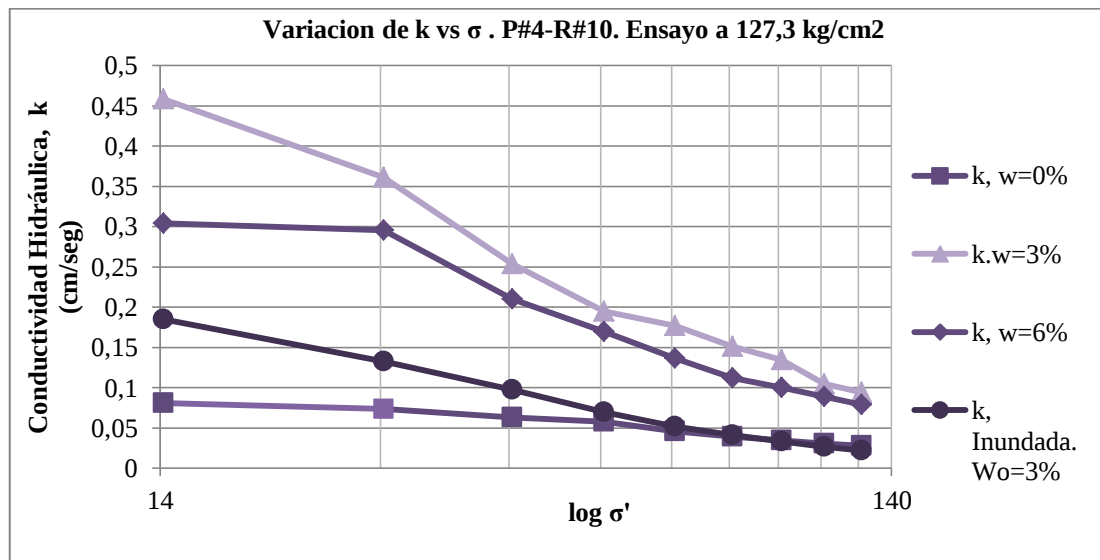


Figura N° 34: Conductividad Hidráulica. P#4-R#10. Ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$ Fuente propia

Se observa que la muestra a 0% de humedad en para esta gradación es la que presenta la menor conductividad hidráulica seguida de la inundada con el menor cambio respecto a ella de 20%, esto es de esperar ya que fueron las que sufrieron mayor variación en su superficie específica debido al fracturamiento. Para las muestras con 3% y 6%, se obtienen las conductividades más altas de 0.36 y 0.22, pero también el cambio relativo a la muestra seca es mayor con 59% y 33% más conductividad hidráulica. Este comportamiento se sale de las convenciones encontradas, ya que hasta los momentos la muestra seca es la que resultaba con

mayor conductividad. Se puede decir que la gradación de las partículas en esta muestra genero un fracturamiento cuya proporción condicionó la variabilidad de la conductividad a lo largo del proceso de carga.

Por ultimo para esta fracción de granos (gruesos) se señala la comparación entre sus granulometrías en la Fig., N° 35. En la misma se observan los efectos al llevar la muestra hasta los dos niveles de carga estudiados.

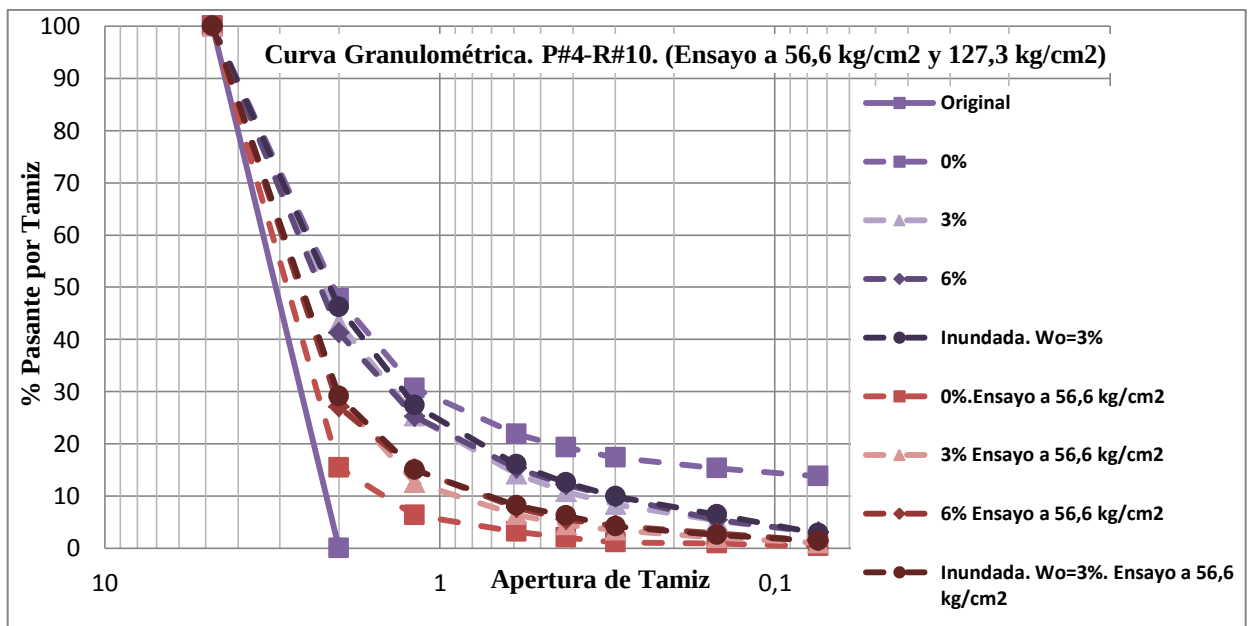


Figura N° 35: Curva resumen de las granulometrías para la muestra Pasante #4 Retenido #10. Sin ensayar y las ensayadas a 0%, 3%, 6% e inundada con $W_o=3\%$. Mitad de Ensayo y Ensayo Completo Fuente propia.

Se observa que la muestra seca es la que presenta una mayor diferencia en fracturamiento cuando se pasa de la carga de 56 a 127,3 kg/cm².

De este análisis podemos indicar que para muestras de arena de grano grueso el contenido de humedad afecta la distribución de contactos entre las partículas y por ende las fuerzas resultantes entre ellas frente a un incremento del esfuerzo. Por ende el fracturamiento será mayor para condiciones extremas en contenido de humedad, es decir, para 0% e inundad; ya que en ambas las partículas recibirán mayor carga en los puntos de contacto.

5.3. Muestra Pasante #10 – Retenido #40.

Esta muestra en particular tiene una gradación uniforme, es decir, los granos corresponden a un rango de tamaños los cuales van desde hasta 0.42 mm, correspondientes a los tamices #10 y 40, representativos de la arena media

Esta muestra por tener una gradación uniforme, se le realizaran dos ensayos de consolidación unidimensional, el primero hasta alcanzar $56,6 \text{ kg/cm}^2$, luego se desmontara la muestra para medir la variabilidad del grano y lo que esta genera en la relación de vacíos así como en la estimación de la conductividad hidráulica, esto mismo se estudiará para las muestras ensayadas a $127,3 \text{ kg/cm}^2$.

5.3.1. Muestra P#10 – R#40. Ensayo a 56 kg/cm^2

Como ya se indicó en el inciso anterior se someterá la muestra hasta 56 kg/cm^2 y en este punto se desmontara, para estudiar la fracturabilidad del grano y como esto afecta la relación de vacuos y la conductividad hidráulica. Esta fracción de arena presenta una gradación uniforme de la siguiente manera. Fig. N° 36

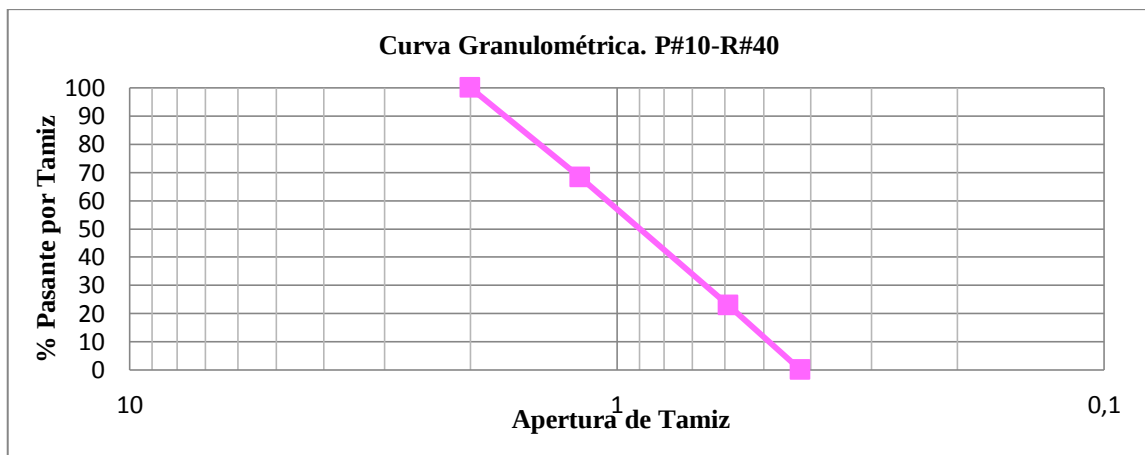


Figura N° 36: Curva Granulométrica. P#10-R#40. Ensayo a $56,6 \text{ kg/cm}^2$. Fuente propia

Realizado el ensayo se registraron deformaciones en la muestra según su contenido de humedad, estas se resumen en la siguiente tabla. Ver Tabla N° 68, adicionalmente se presenta el cambio relativo de las muestras con % de humedad e inundada respecto a la seca.

Tabla N° 68: Cambio relativo en la deformación. Muestra P#10-R#40. Fuente propia

w%	%Def a 14 kg/cm ²	%Def a 56.6 kg/cm ²	$\Delta\%def$	Cambio relativo
0	4,572	9,296	4,724	
3	7,176	15,900	8,725	0,85
6	6,210	17,361	11,151	1,36
Inund Wo=3%	2,654	10,185	7,531	0,59

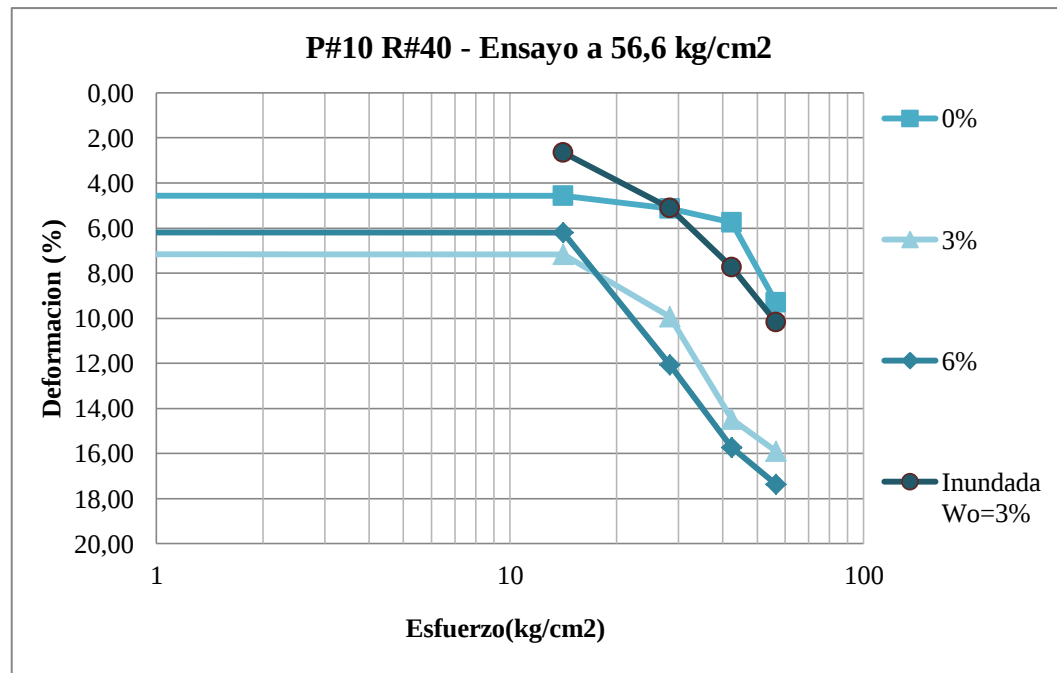


Figura N° 37: % Deformación. P#10-R#40. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente propia

De la tabla anterior se obtiene que la muestra para un contenido de humedad de 6%, arroja la mayor deformación final con un 11,15%, esta es la que presenta el mayor cambio relativo con respecto a la seca, ya que se deformó 136% más. Por su parte la muestra con 3% de humedad se deformó 85% y la inundada con 59% más que la seca. Destaca en el comportamiento de las muestras, que el agua influye en cómo estas reciben la carga y la transmiten entre los granos que conforman la estructura del suelo, esta acción se incrementa a medida que aumenta el contenido de agua.

Las muestras con los contenidos de humedad extremos (0% e inundada con $W_o=3\%$), presentan un comportamiento similar al tener porcentajes de deformación iniciales relativamente pequeños en comparación con las muestras anteriores. Estos fueron de 2.65% para la condición inundada y 4,57% para humedad al 0%. La muestra inundada presenta un aumento en su deformación a medida que se incrementó la carga hasta llegar a 10.19% de deformación total. En cambio la muestra seca se deforma, en menor proporción con el aumento de carga ya que luego de tres incrementos su deformación se mantiene prácticamente constante y luego a los 42,44 kg/cm² se deforma de tal manera que iguala el porcentaje de deformación de la muestra inundada.

Producto de estos incrementos de carga, se generaron modificaciones en las partículas que conforman la muestra ensayada, convirtiendo una muestra de gradación uniforme a una con diversidad de tamaños menores, para determinar la magnitud del cambio, analizaremos la Tabla N° 69, que presenta las granulométricas para las muestras ensayadas y la Fig. N° 38 con las curvas respectivas:

Tabla N° 69: Diferencias en porcentajes pasantes, para la muestra original ensayada. Fuente propia

Tamiz	Apertura (mm)	Diferencia %pasante respecto a la Muestra P#10-R#40 sin ensayar			
		0%	3%	6%	Inundada
#3/8	9,53	0	0	0	0
#1/4	6,35	0,00	0,00	0,00	0,00
#4	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00
#10	2	0,00	0,00	0,00	0,00
#16	1,19	8,82	1,81	9,54	9,11
#30	0,59	8,46	10,70	18,34	22,53
#40	0,42	6,08	13,72	13,87	27,73
#50	0,298	2,07	7,87	7,31	18,38
#100	0,149	0,66	4,92	3,52	11,82
#200	0,074	0,00	3,34	1,65	6,20

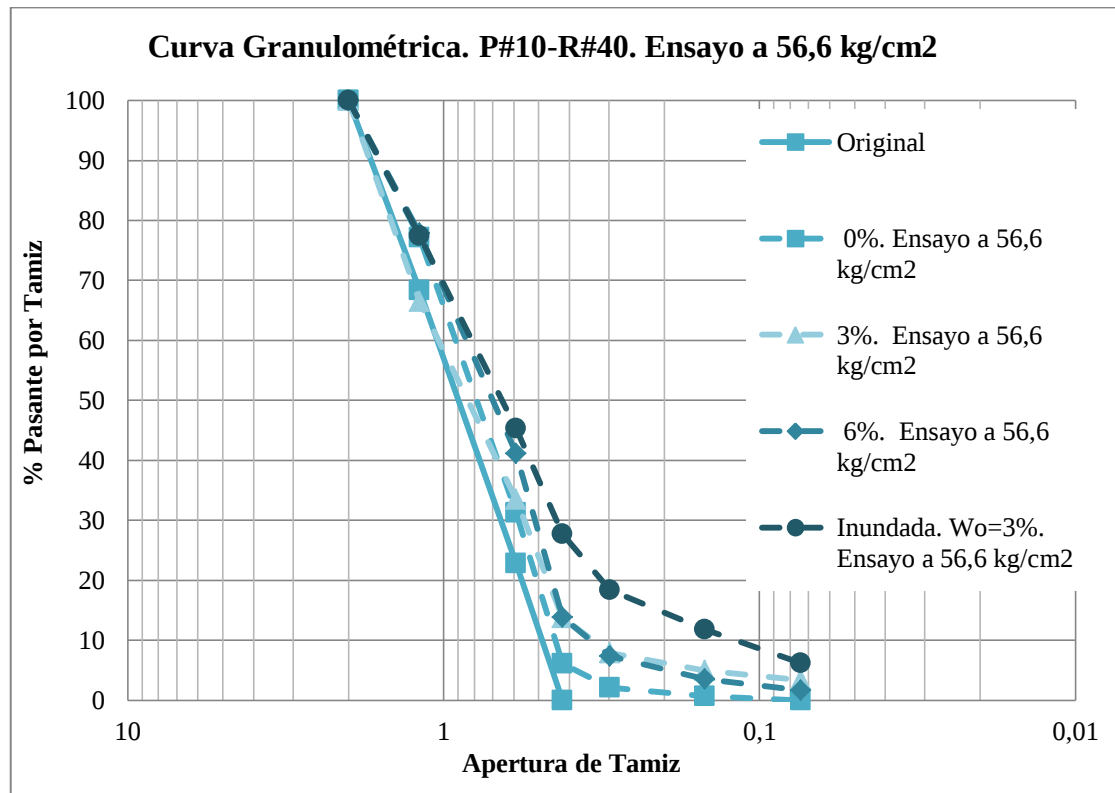


Figura N° 38: Curva Granulométrica. P#10-R#40. Ensayo a 56,6 kg/cm². Fuente propia

Se observa que inicialmente los granos para las humedades de 6%, 0% e inundada presentan fracturamiento similares entre ellas, exceptuando la de 3% que inicia su fracturamiento para los granos de 0.59 mm. A partir de este tamiz, las muestras a 3% y 6% tienen un porcentaje de fracturamiento similar, mayor que la de 0%. La muestra inundada es la que se sale de este patrón ya que presenta el mayor fracturamiento de todas con un incremento de 28% pasante en el tamiz #40, pero lo que destaca aún más es el incremento en 6,20% en pasante tamiz #200. Este comportamiento se reflejó también en la muestra original inundada.

Se corrobora que el agua al ocupar espacios entre los granos disminuye la superficie específica sobre la cual se aplicara la carga, haciendo que los esfuerzos entre las partículas aumenten, generando un incremento del fracturamiento de los granos, aumentando la fracción fina de la muestra. Además en las muestras con predominación de finos estos se fracturaran en intervendrán más en el reacomodo de la partícula, reduciendo el porcentaje de deformación.

Siguiendo la secuencia de afectaciones, mediremos el cambio en la relación de vacíos para estas muestras, generado por los incrementos de carga. Esto se presenta en la siguiente tabla. Ver Tabla N° 70.

Tabla N° 70: Cambio Relativo. Relación de Vacíos. P#10-R#40

w %	e a 14 kg/cm ²	e a 56.6 kg/cm ²	Δe	Cambio Relativo
0	0,695	0,616	0,079	
3	0,717	0,571	0,146	0,84
6	0,882	0,679	0,203	1,56
Inund Wo=3%	0,923	0,781	0,141	0,78

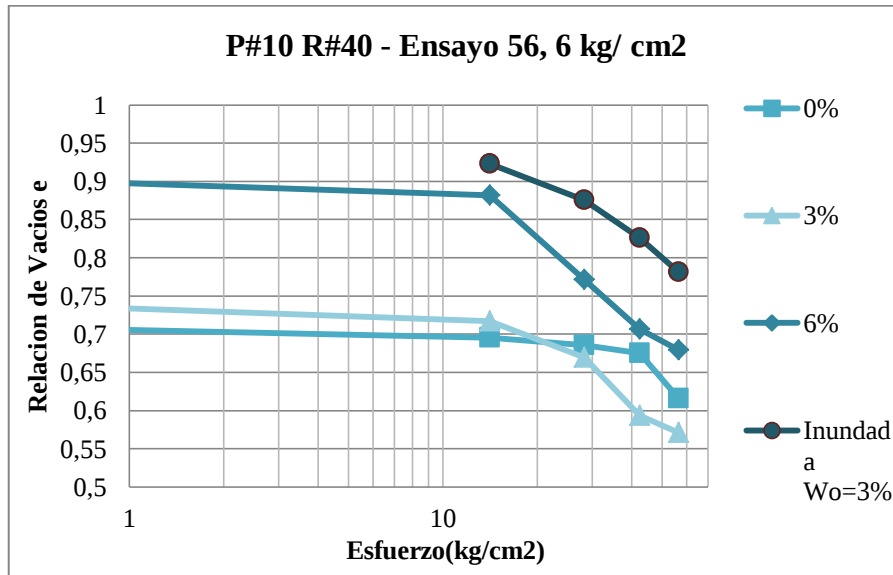


Figura N° 39: Relación de Vacíos. P#10-R#40. Ensayo a 56,6 kg/cm²

Donde la muestra a 0% de humedad es la que menos cambio tuvo en la relación de vacíos, con una variación total de 0,079, ocasionado por el porcentaje tan bajo de deformación y poco fracturamiento de los granos, en definitiva por la poca disminución volumétrica que sufrió durante el proceso de carga. En cambio las muestras con 3% y 6% si sufrieron una reducción sustancial en la relación de vacíos, con 84% y 156% más que la muestra seca. Por su parte la muestra inundada a pesar de sufrir el mayor fracturamiento de los granos finos, el reacomodo de estos junto con la influencia de las fuerzas capilares impidieron que ésta

sufriera una variación volumétrica como la de 3% o 6%, por esta razón fue la que sufrió menor cambio en la relación de vacíos, respecto a la seca, este fue de 78%.

Tal como se estableció en el análisis anterior se determinó la influencia de la variación en el tamaño del grano y la relación de vacíos en la conductividad hidráulica. En la Tabla N° 71 están los resultados de la conductividad hidráulica para cada muestra según su contenido de humedad.

Tabla N° 71: Cambio Relativo. Conductividad Hidráulica. P#10-R#40. Fuente propia

w a %	k a 14 kg/cm2	k a 56.6 kg/cm2	Δk	Cambio Relativo
0	0,350	0,256	0,095	
3	0,305	0,156	0,149	0,569
6	0,341	0,174	0,166	0,755
Inund Wo=3%	0,149	0,098	0,051	0,460

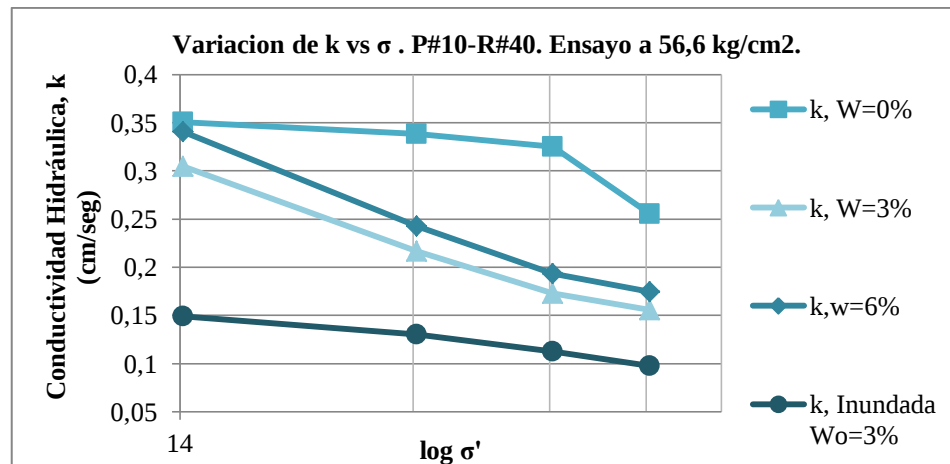


Figura N° 40: Conductividad Hidráulica. P#10-R#40. Ensayo a 56,6 kg/cm2 Fuente propia

En la tabla anterior se observa que la muestra para 0% de humedad presenta la mayor conductividad hidráulica de todas, con menor variación en la misma de 0.095, las muestras a 3% y 6% son las que presentan la mayor disminución de la conductividad hidráulica, con 60% y 75,5% respectivamente. Para este análisis también se encuentra que la muestra inundada tiene un comportamiento especial, el cual está atado a las condiciones anteriores, ésta por

presentar el mayor porcentaje de finos producto del fracturamiento, posee la conductividad hidráulica más baja de todas, con 40% menos variación respecto a la seca.

5.3.2. Muestra P#10 – R#40. Ensayo a 127 kg/cm²

Para analizar el comportamiento de los granos a presiones más elevadas se realizó a una muestra similar con la gradación de P#10-R#40, el ensayo de consolidación unidimensional a una presión de 127 kg/cm². Esto produjo las siguientes deformaciones. Ver Tabla N° 72.

Tabla N° 72: Cambio relativo. % Deformación. P#10-R#40. Fuente propia.

w%	%Def a 14 kg/cm ²	%Def a 127 kg/cm ²	Δ%Def	Cambio relativo
0	2,4257	14,5669	12,1412	
3	8,4328	26,6954	18,2626	0,50
6	6,858	33,0073	26,1493	1,15
Inund Wo=3%	7,2263	25,3873	18,1610	0,50

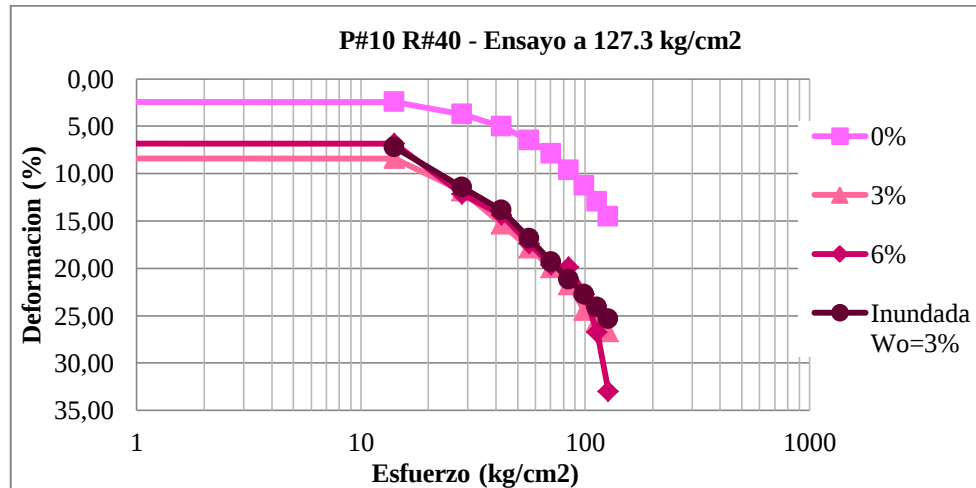


Figura N° 41: % Deformación. P#10-R#40. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente propia.

Para la condición de carga hasta 127 kg/cm², tenemos para 0% de humedad la muestra sufre una deformación de 12,14%, para los granos medios es la mayor deformación obtenida, esto indica que a pesar de que los granos tengan mayor contacto entre sí para la distribución de la carga, al ser uniformes disminuye la trabazón entre ellos, permitiendo la pérdida de

volumen en la muestra. Ahora para las muestras con 3% e inundada se encuentra que el cambio que estas sufrieron en comparación con 0% fue igual al 50% más de deformación y, donde la de 6% fue la que sufrió el mayor incremento en deformación con 115%. Estos aumentos en la deformación están influenciados por la uniformidad del grano y el contenido de humedad, porque al compararlos con los resultados obtenidos para una muestra similar a ésta con una presión de 56 kg/cm², obtenemos que interviene más el contenido de agua que ellos tengan a el tamaño de grano, pero al incrementar la carga aplicada a los distintos contenidos de humedad, el agua junto con la gradación determinan el comportamiento que tendrá ese suelo.

Para el análisis de la magnitud del fracturamiento, se le relazó el análisis granulométrico a cada muestra ensayada, al compararlas con la original P#10-R#40, se determinó el porcentaje pasante adicional que corresponde al porcentaje fracturado de los granos.

Tabla N° 73: Diferencias en porcentajes pasantes, para la muestra original ensayada. Fuente propia

		Diferencia %pasante respecto a la Muestra P#10-R#40 sin ensayar			
Tamiz	Apertura (mm)	0%	3%	6%	Inundada
#3/8	9,53	0	0	0	0
#1/4	6,35	0,00	0,00	0,00	0,00
#4	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00
#10	2	0,00	0,00	0,00	0,00
#16	1,19	1,80	1,81	9,54	9,11
#30	0,59	6,58	10,70	18,34	22,53
#40	0,42	13,53	13,72	13,87	27,73
#50	0,298	7,97	7,87	7,31	18,38
#100	0,149	3,89	4,92	3,52	11,82
#200	0,074	2,13	3,34	1,65	6,20

De las granulometrías se obtiene que la muestra para 0%, se produce el menor fracturamiento de las partículas, pero esa cantidad de material que se fracturo produjo pasantes

#200, es decir trozos de grano con menos de 0,074 mm, y a medida que se aumenta la humedad aumenta la deformación de la muestra y con esta el fracturamiento de la partícula, donde la muestra que más se fractura es la inundada, le sigue en menor proporción la de 6% y por última la de 3%. Observamos que se repite el mismo comportamiento para la muestra inundada a nivel de fracturamiento del grano, tanto para presiones de 56 kg/cm² como para 127,3 kg/cm², ya que para esta condición aumenta el pasante fino, ambos con un 6%.

En la siguiente figura se compara la granulometría de las muestras a sus humedades respectivas, sometidas a presiones de 56,6 kg/cm² y 127,3 kg/cm².

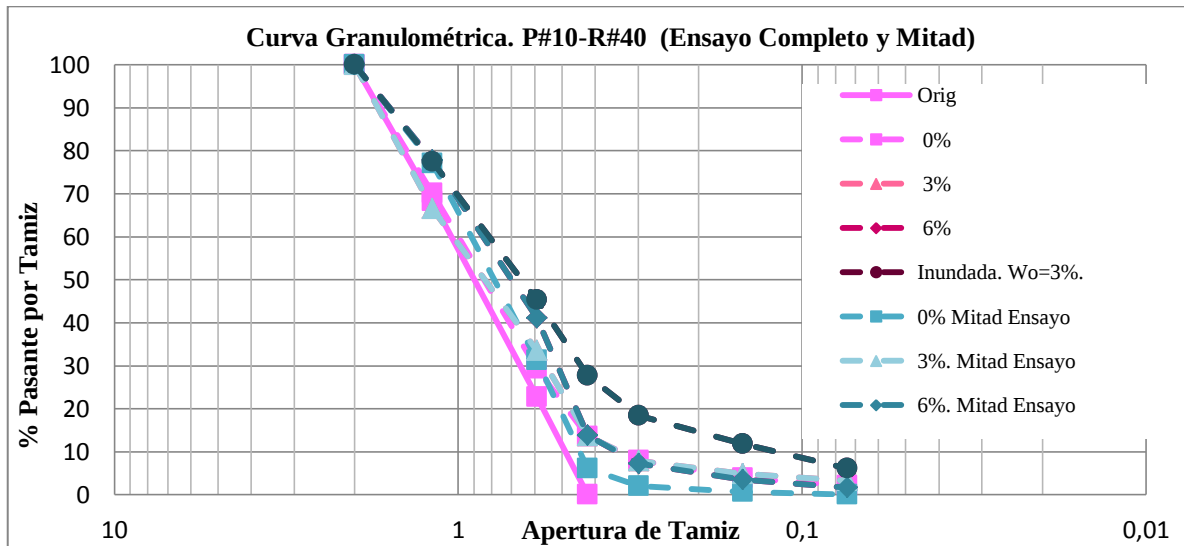


Figura N 42: Curva granulométricas. Fuente propia

De esta se observa que la superposición de las curvas, indicando que para el ensayo a 127,3 kg/cm² se sigue la tendencia en fracturado, y que al inicio los granos sufren la mayor deformación debido al reacomodo instantáneo generado por los primeros incrementos de carga.

La variación volumétrica ocasionada por las cargas genera cambios en la relación de vacíos, esta se calculó para cada muestra y se comparó su variación con la condición de 0% de humedad.

Tabla N° 74: Cambio Relativo. Relación de Vacíos. P#10-R#40

w %	e a 14 kg/cm ²	e a 127,3 kg/cm ²	Δe	Cambio Relativo
0	0,700	0,504	0,196	
3	0,694	0,408	0,286	0,46
6	0,676	0,283	0,393	1,01
Inund W	0,832	0,524	0,308	0,57

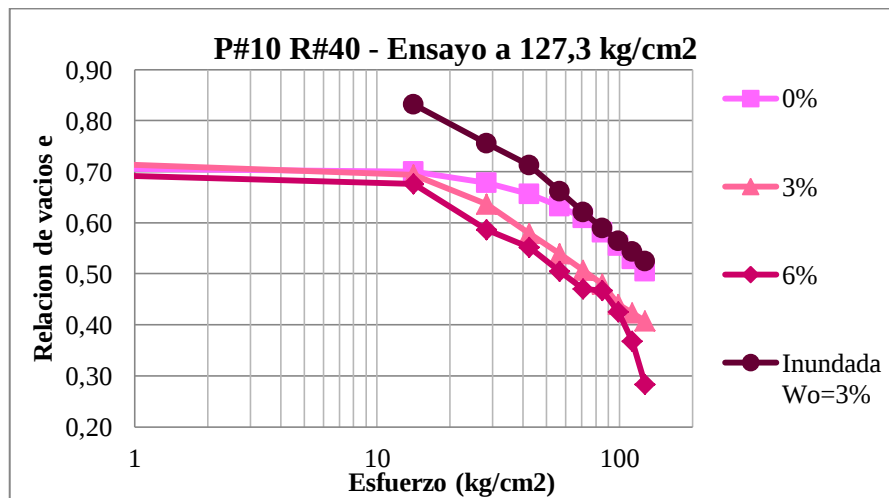


Figura N° 43 Relación de vacíos. P#10-R#40. Fuente propia

La muestra a 0% es la que presenta la mayor relación de vacíos en conjunto con la muestra inundada, ya que si se observa la Fig. N° 43 en los resultados, la curva que define la variación de la relación para ambas están superpuestas y al determinar la variación relativa respecto a la muestra seca, se obtiene que la muestra inundada pierde 57% en su relación de vacíos, disminuyendo directamente el volumen de la muestra. Es importante resaltar que a pesar de que la muestra inundada haya sufrido un fracturamiento importante de los granos finos, estos junto con la presencia del agua actúan como de amortiguador para la deformación de la muestras debido a las cargas por las fuerzas generadas entre las partículas.

Esta pérdida en la relación de vacíos y fracturamiento del grano, afectan la conductividad hidráulica del suelo, En la Tabla N 75 se tiene las variaciones de la conductividad hidráulica, para cada muestra. Al igual que las muestras anteriores la que presenta mayor conductividad hidráulica es la muestra seca, ya que esta presenta la mayor relación de vacíos y por consiguiente el menor fracturamiento, teniendo así más espacio entre los granos para que le agua fluya con facilidad a través de él.

Tabla N° 75: Cambio relativo. Conductividad Hidráulica. P#10-R#40

w a %	k a 14 kg/cm ²	k a 127,3 kg/cm ²	Δk	Cambio Relativo
0	0,0495	0,0264	0,0231	
3	0,0145	0,0054	0,0091	0,608
6	0,0266	0,0075	0,0191	0,176
inund	0,0311	0,0117	0,0194	0,162

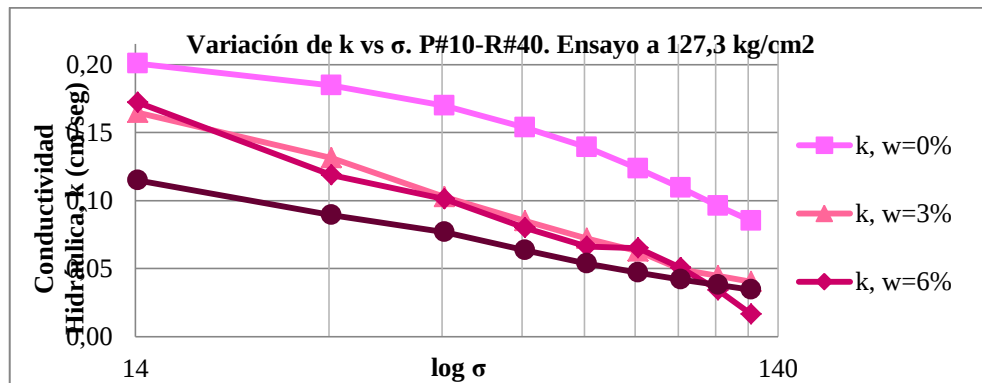


Figura N° 44: Conductividad Hidráulica. P#10-R#40. Fuente propia

Para la conductividad hidráulica se ha determinado que al igual que para la muestra P#10-R#40 al 0% ensayada hasta 56 kg/cm², es la que presenta mayor conductividad, debido al poco fracturamiento de la muestra, así como la menor disminución en la relación de vacíos. Adicionalmente la muestra que sufrió mayor cambio en comparación con la seca fue la de 3%, con una disminución de la conductividad hidráulica del 60,8%, en cambio las muestras inundada y 6% reflejaron similitud en el cambio con respecto a la de 0%

De esta fracción de arena evaluada para diferentes humedades la que presenta el comportamiento más errático es la inundada, la influencia del agua, genera gran interés y es

conveniente realizar un estudio detallado para determinar hasta qué punto y de qué manera ocurre esta influencia

5.4. Muestra Pasante tamiz #40 (P#40), ensayo a $127,3 \text{ kg/cm}^2$.

Este tipo de muestra presenta una granulometría del tipo uniforme, donde el tamaño de sus granos están entre 0.42 mm para el tamiz #40 y 0.074 mm para el tamiz #200, los cuales clasifican a la muestra dentro de los granos finos de arena. En la Fig. N° 45 se muestra su granulometría.

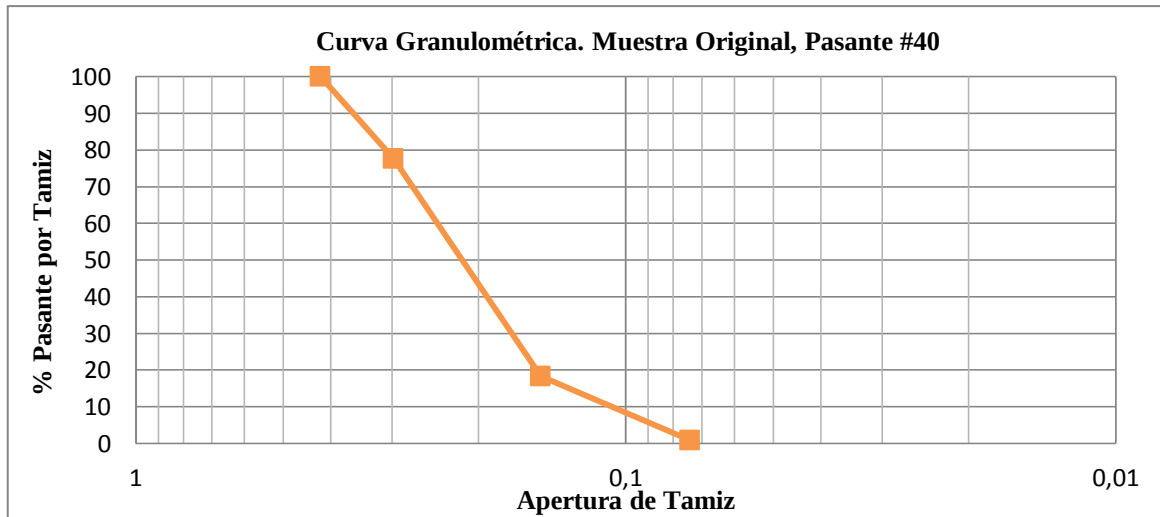


Figura N° 45: Curva granulométrica, P#40. Sin ensayar.

Se debe recordar que para la clasificación de suelos, las partículas pasantes de tamiz #200 no son consideradas como arenas, pero esta muestra al ser una arena limpia, su porción de finos es de origen arenoso y en ella no existen rastros de arcillas que puedan alterar el resultado. Por ende, no se remueve de la muestra la porción fina luego del pasante #200 y se asume que los granos más pequeños son retenidos en un tamiz #400 a los fines de poder asignarles un tamaño nominal y determinar el cambio en la conductividad hidráulica.

Para realizar el ensayo de esta muestra se llevó a cabo la consolidación unidimensional hasta llegar a un esfuerzo de $127,324 \text{ kg/cm}^2$ variando los contenidos de humedad en 0%, 3%,

6%, e inundando la muestra cuando su humedad inicial es de 3%. Dando los siguientes resultados:

Tabla N° 76. Cambio relativo de Deformación para la muestra P#4R#10. Mitad de Ensayo. Fuente Propia.

w%	%Def a 14 kg/cm ²	%Def a 127 kg/cm ²	$\Delta\%Def$	Cambio relativo
0	3,035	14,516	-11,481	
3	7,201	22,695	-15,494	-72,39
6	6,566	26,276	-19,710	-91,82
inund	4,826	22,022	-17,196	-80,23

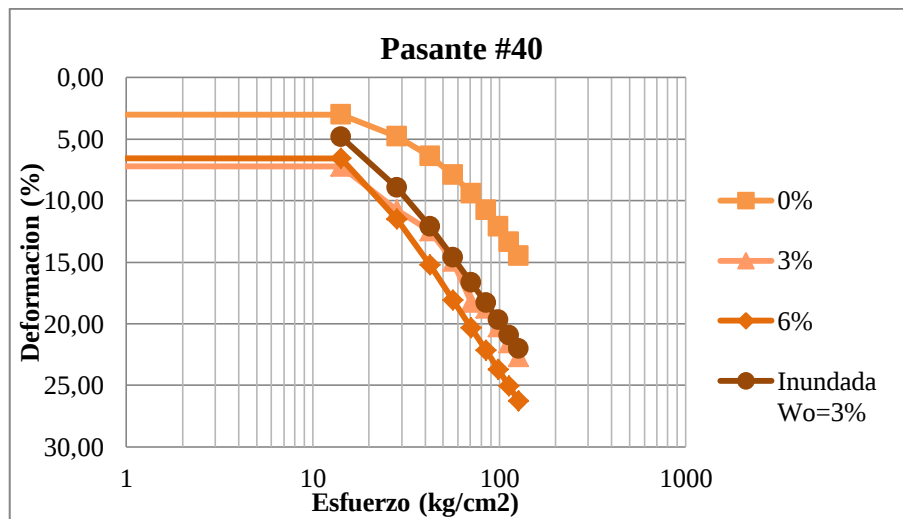


Figura N° 46: % Deformación. P#40. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente propia

En Tabla N° 76 se observa que la muestra con menor deformación es la de 0% de humedad, tanto para las deformaciones por cargas como para la deformación total de la muestra. Ahora, la muestra que tiene mayor deformación es la de 6%, la cual está 71,7% más deformada que la seca. Cuando analizamos las muestras con 3% de humedad e inundada determinamos que tienen un comportamiento similar, esto se nota al observar las deformaciones totales, que están en 15% para la de 3% húmeda y 17% para la inundada.

Al analizar la muestras de 3% humedad e inundada tenemos que sus deformaciones terminan siendo 35% y 17% mayores que la seca, la muestra con la misma humedad inicial, para este caso 3%, cuando se inunda se disminuye su capacidad inicial para resistir los esfuerzos, pero al culminar el ensayo su comportamiento es igual a la muestra que no fue inundada.

Luego de ensayar la muestra hasta llegar a un esfuerzo de $127,3 \text{ kg/cm}^2$ se procedió a realizar la granulometría. Es necesario acotar que aquellas muestras que presentaban una humedad, léase 3%, 6% e inundada, se secaron al horno por un periodo de 24 horas y luego se procedió realizar el ensayo granulométrico.

Los tamices utilizados para esta muestra fueron #40, #50, #100, #200 y pasante #200, y los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla N° 77. Diferencia %Pasante respecto a la Muestra P#40 Sin Ensayar. Ensayo Completo. Fuente Propia

Tamiz	Apertura (mm)	Diferencia %pasante respecto a la Muestra P#40 sin ensayar			
		0%	3%	6%	Inundada
#3/8	9.53	0	0	0	0
#1/4	6.35	0	0	0	0
#4	4.76	0	0	0	0
#10	2	0	0	0	0
#16	1.19	0	0	0	0
#30	0.59	0	0	0	0
#40	0.42	0	0	0	0
#50	0.298	2.47	9.48	10.29	6.65
#100	0.149	5.12	27.97	16.62	21.18
#200	0.074	5.15	24.99	15.64	14.03

Se observa en la Tabla N° 77 que la muestra que más se fractura es la de 3% de humedad, donde encontramos más partículas de 0.149 mm en 28% más que la cantidad de pasante en la muestra original, se recuerda que la granulometría de este tipo de muestra es

uniforme, y aunque el tamaño máximo de estas es de 0.298 mm, al someterlas a los esfuerzos se fracturaron y reacomodaron hasta alcanzar el equilibrio. Esto aumentará el pasante por el tamiz #200, este aumento de partículas más finas condicionará el comportamiento de la muestra ante los incrementos de carga.

En la muestra de 0% de humedad observamos que existe un déficit de 2,47% menos del pasante original, esto se debe a que los granos de 0.298 mm se fracturaron y formaron 5 % más granos de 0,1479 mm y 0,074 mm comparados con la muestra sin ensayar.

Ahora la muestra inundada presenta un comportamiento donde se fracturan las partículas de 0,298 mm y forman el mayor porcentaje pasante para el tamiz 100 cuando se comparan todas las muestras. A continuación se muestra la granulometría de las muestras luego de ser ensayadas.

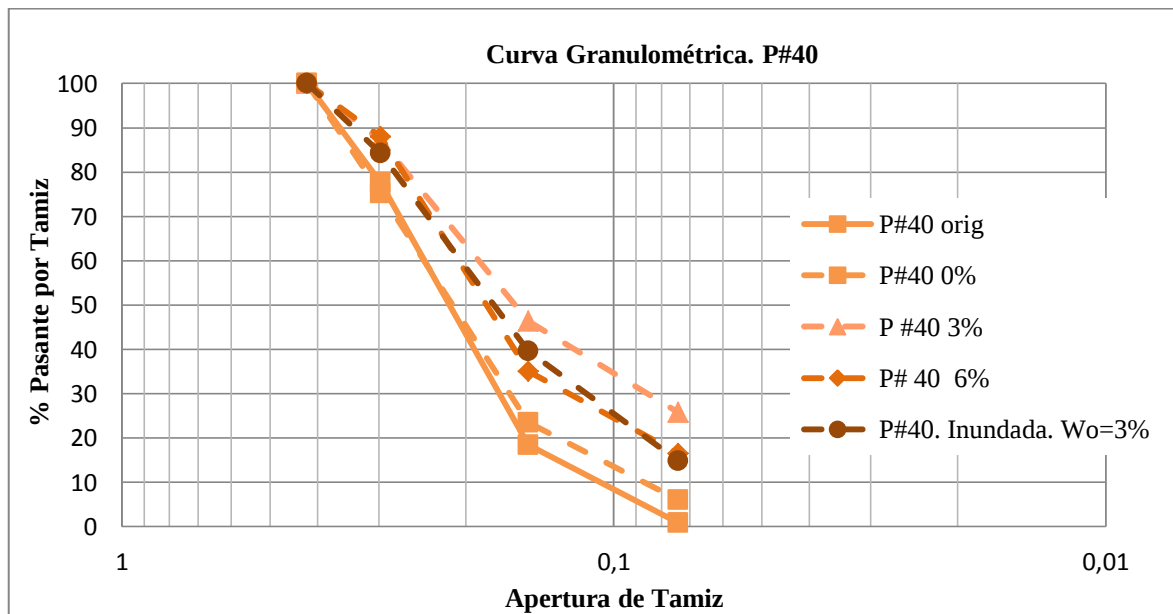


Figura N° 47: Curvas Granulométricas. P#40. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente propia

Ahora bien la relación de vacíos de la muestra se presenta de la siguiente forma:

Tabla N° 78. Cambio relativo de Relación de vacíos para la muestra P#40. Ensayo Completo. Fuente Propia

w%	e a 14 kg/cm ²	e a 56 kg/cm ²	Δe	Cambio Relativo
0	0,9871	0,7701	0,2170	
3	0,8523	0,5833	0,2690	0,2393
6	0,8884	0,5458	0,3426	0,5788
Inund Wo=3	1,0107	0,6892	0,3215	0,4815

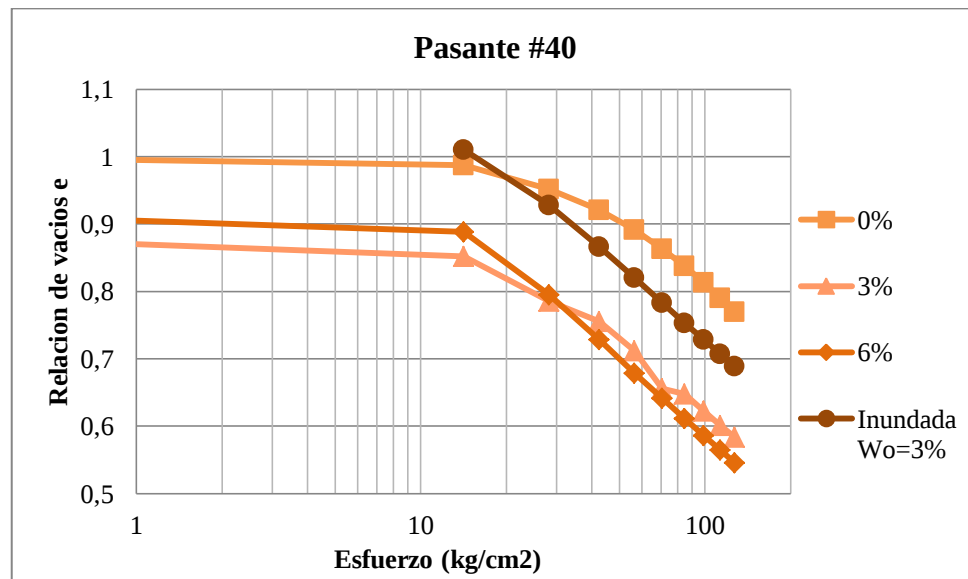


Figura N° 48 Relación de vacíos. Pasante #40. Ensayo a 127,3 kg/cm². Fuente propia.

En este caso las muestras de 3% y 6% presentan la menor relación de vacíos (ver figura 48), las cuales se superponen en comportamiento durante toda la aplicación de la carga.

Si enlazamos todos los efectos tenemos que la muestra de 3% de humedad al presentar el mayor porcentaje de fracturas, tiene a su vez la menor relación de vacíos, por la pérdida volumétrica que sufrió. Pero al analizar la muestra inundada se determina que su relación de vacíos es 24 veces mayor que la muestra seca, siendo esta una muestra donde su contenido de vacíos casi equipara al volumen de sólidos de la muestra. Con la muestra de 6%, está sucediendo un fracturamiento considerable, a lo cual se le agrega que es la muestra que más se deforma, por ende se disminuye su relación de vacíos.

La muestra seca es un caso contrario, presenta la menor deformación volumétrica y a su vez es la que menos se fractura, esta es la razón por la cual su diferencia en relación de vacíos es la menor de todas las muestras, esto sucede ya que, como en casos anteriores, el arreglo de las partículas ayuda a que se distribuyan mejor el esfuerzo al que están sometidas por la proximidad entre ellas, lo que implica que soportan más y por ende su deformación resulta ser la menor.

Se procede a evaluar la conductividad hidráulica, los resultados son los siguientes:

Tabla N° 79. Cambio relativo de Conductividad Hidráulica para la muestra P#40. Ensayo Completo. Fuente Propia.

w a %	k a 14 kg/cm ²	k a 125 kg/cm ²	Δk	Cambio Relativo
0	0,0495	0,0264	0,0231	
3	0,0145	0,0054	0,0091	0,608
6	0,0266	0,0075	0,0191	0,176
inund	0,0311	0,0117	0,0194	0,162

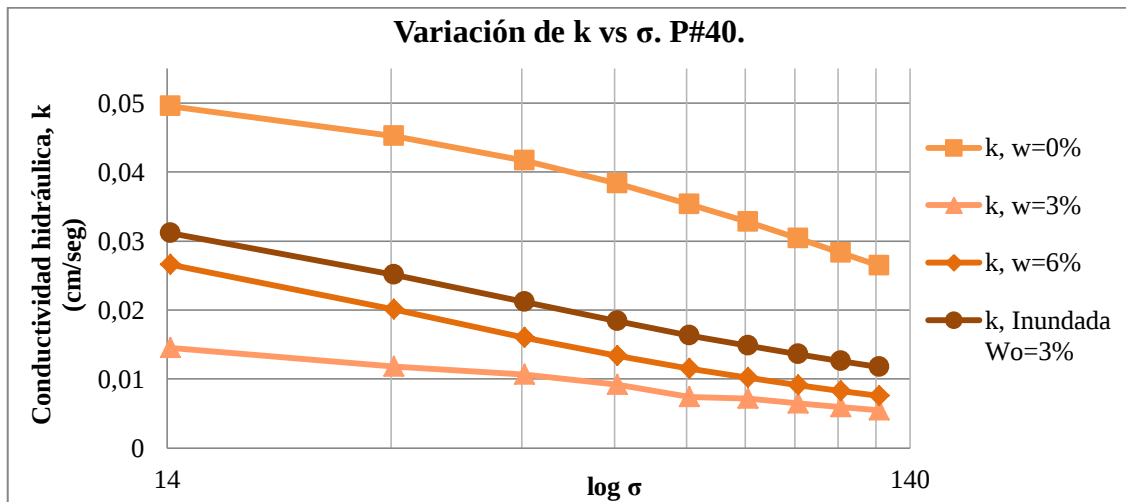


Figura N°49: Conductividad Hidráulica. Pasante #40. Fuente propia

En la Tabla N° 78 .se observa que una muestra al tener el menor fracturamiento, el cambio de volumen es menor e incide directamente en la conductividad hidráulica, todo esto se evidencia en la muestra de 0% de humedad, que presenta la menor deformación, la menor cantidad de pasante y en donde su conductividad es el mayor valor comparado con el resto de

las muestras. En este tipo de muestra resultara más fácil que el agua fluya entre ellas, ya que su relación de vacíos resulta ser la mayor.

En cuanto a la muestra de 3% de humedad, se observa que posee la menor conductividad hidráulica, esto se debe a que tiene el mayor fracturamiento de muestra y su deformación esta entre una de las menores.

Ahora la muestra con 6% de humedad e inundada tienen un comportamiento similar entre si al observar que su diferencia entre conductividad está cercano a 0,019 cm/ seg, esto similitud está dada para 6% por el grado de deformación que sufrió, fracturando las partículas y para la muestra inundada por el fracturamiento de los granos debido a la redistribución de las presiones transmitidas.

Una vez realizado el análisis para cada muestra según su gradación y contenido de humedad, cabe resaltar que esta última característica es determinante en el comportamiento resultante de un suelo al ser perturbado su equilibrio por la variación de esfuerzos. Ya que influenciara en la forma como este sufre el reacomodo de las partículas según la distribución de la presión entre ellas. Adicionalmente tenemos que estar consiente que la gradación de la arena tendrá participación en esa respuesta obtenida, esta participación será en mayor o menor mediada según la gradación que se tenga. Según los resultados obtenidos las muestras de arena dejando a un lado el contenido de humedad, presentan una proporción mayor de granos finos, a partir del tamiz #40 presentara un comportamiento con una tendencia que dependerá del contenido de humedad. En cambio las muestras donde predominen los granos grueso y medios el comportamiento será errático y estará enlazado con el contenido de humedad que este tenga así como la carga a la cual este sometido.

CONCLUSIONES

Se caracterizaron tres muestras de arenas limpias mediante el ensayo de consolidación unidimensional a altas presiones, enfocando el estudio hacia el cambio en la relación de vacíos y conductividad hidráulica de cada una de las muestras estudiadas.

Luego de realizar el ensayo a las muestras y analizar el comportamiento obtenido para cada una, podemos concluir lo siguiente:

1. Se evaluó el porcentaje de fracturamiento en las muestras de arenas mediante el ensayo de consolidación unidimensional a una presión de $56,6 \text{ kg/cm}^2$, donde:
 - Para los granos gruesos (P#4R#10)
 - A una presión de $56,6 \text{ kg/cm}^2$ se observa que la muestra seca es la que tiene menor cambio con respecto al tamaño de sus partículas y que mientras mayor sea la humedad de la muestra, las partículas tienden a reducir su tamaño, por ende, existirá una reducción en el volumen de la muestra durante el proceso de carga. Donde la de 0% de humedad se deforma un 6,5% y la muestra inundada tiene un 148% más de deformación que la primera. Ver Figura N° 28
 - Para cuando el esfuerzo es de $127,3 \text{ kg/cm}^2$ nuevamente la muestra seca es la que tiene un menor cambio en el tamaño de sus partículas y si se aumenta la humedad de la muestra, las partículas tienden a reducir su tamaño. Esto se debe a que en condiciones con 0% de humedad se incrementa la capacidad de soporte al tener un mejor arreglo de partículas, creando un área de soporte mayor, reduciendo el esfuerzo al que están sometidas. Ver Figura N° 32

La comparación de estos resultados indica, que las partículas de muestras secas presentan un menor fracturamiento para ambos esfuerzos y que para las condiciones inundadas tienen mayores cambios de volumen. Esto sugiere que las fuerzas capilares causadas por los meniscos en arenas gruesas son

importantes ya que controlan el fracturamiento de los granos y por ende la conductividad hidráulica.

- Para los granos medios (P#10 R#40)
 - A una presión de $56,6 \text{ kg/cm}^2$ al igual que para los granos gruesos a medida que aumenta el contenido de agua en el suelo, el agua influye en la manera cómo responden ante la carga. Pero en este caso será la muestra con 6% de humedad, ya que se deforma 136% más que la seca.
 - Para cuando el esfuerzo es de $127,3 \text{ kg/cm}^2$ la muestra que menos se deforma es la de 0% de humedad, sufriendo una deformación de 12,14%, de nuevo se observa que los granos tienen un mayor contacto entre sí para la distribución de la carga, y al ser uniformes disminuye la trabazón entre ellos, permitiendo la pérdida de volumen en la muestra

De la comparación entre ellos obtenemos que para los granos medios, el agua junto con la gradación determinan el comportamiento que tendrá el suelo.
- Para los granos finos (P#40):
 - La muestra con menor deformación es la de 0% de humedad, tanto para las deformaciones por cargas como para la deformación total de la muestra. Ahora, la muestra que tiene mayor deformación es la de 6%, la cual está 71,7% más deformada que la seca.
 - La muestra que más se fractura es la de 3% de humedad, donde encontramos más partículas de 0,149 mm en 28% más que la cantidad de pasante en la muestra original, se recuerda que la granulometría de este tipo de muestra es uniforme, y aunque el tamaño máximo de estas es de 0,298 mm, al someterlas a los esfuerzos se fracturaran y reacomodaran hasta alcanzar el equilibrio. Esto aumentara el pasante por el tamiz #200, este aumento de partículas más finas condicionará el comportamiento de la muestra ante los incrementos de carga.

- Para la muestra original
 - Para una humedad de 6% la muestra sufre 135% más deformación que a 0%; mientras que con 3% de humedad se tiene un aumento del 116% de deformación. Aunque la muestra inundada es la que mayor contenido de agua tiene presenta la menor deformación, lo que implica que el agua que ocupa los espacios vacíos entre los granos no logra romper todos los meniscos y todavía existe una fuerza capilar relacionada con la humedad inicial con la cual la arena fue colocada que sigue controlando la deformación y el reacomodo de las partículas.
 - La muestra de 0% de humedad es la que presento el menor fracturamiento de los granos en consonancia con el poco porcentaje de deformación que tuvo durante la carga incrementando el porcentaje pasante para el resto de los tamices en 7%.

- 2. Se determinó que el fracturamiento de la afecta la superficie específica y por ende disminuye o incrementa la conductividad hidráulica, más sin embargo depende del tamaño de grano de la muestra:
 - Para muestras gruesas (P#4R#10)
 - A una presión de 56.6 kg/cm^2
 - La muestra con 3% de humedad tuvo un 5,6% menos de cambio en conductividad hidráulica.
 - Esto sugiere que las fuerzas capilares causadas por los meniscos en arenas gruesas son importantes ya que controlan el fracturamiento de los granos y por ende la conductividad hidráulica.
 - Para cuando el esfuerzo es de 127.3 kg/cm^2
 - La muestra con 0% de humedad presenta la menor conductividad hidráulica seguida de la inundada con el menor

cambio respecto a ella de 20%, esto es de esperar ya que fueron las que sufrieron mayor variación en su superficie específica debido al fracturamiento de sus partículas.

- Para muestras de granos medios (P#10 R#40)
 - A una presión de 56.6 kg/cm^2
 - La muestra para 0% de humedad presenta la mayor conductividad hidráulica, con menor variación en la misma de 0,095, las muestras a 3% y 6% son las que presentan la mayor disminución de la conductividad hidráulica, con 60% y 75,5% respectivamente.
 - La muestra inundada presentar el mayor porcentaje de finos producto del fracturamiento por ende posee la conductividad hidráulica más baja de todas, con 40% menos variación respecto a la seca.
 - Para cuando el esfuerzo es de $127,3 \text{ kg/cm}^2$
 - La muestra para 0% de humedad presenta la mayor conductividad hidráulica debido al poco fracturamiento de la muestra, así como la menor disminución en la relación de vacíos. Caso contrario a lo que sucede con la muestra de 3% de humedad.
- Para los granos finos (P#40):
 - La muestra seca es la que tiene mayor conductividad ya que tiene el menor fracturamiento y el menor cambio de volumen
- Para la muestra original
 - La muestra de 0% de humedad presenta las conductividades más altas con $0,0236 \text{ cm/seg}$ y $0,0134 \text{ cm/seg}$ respectivamente. Este comportamiento se debe a que durante la carga se produjo poca

variación de volumen debido a la distribución de las cargas en la estructura de la muestra generada por la interacción de los granos.

- A medida que se reduce la relación de vacíos y aumenta el fracturamiento de las partículas junto con la superficie específica, en las muestras con humedades de 3%, 6% e inundada se reduce la conductividad hidráulica
 - En la Figura N° 25, nos damos cuenta que la conductividad hidráulica para 3% y 6% tienden a comportarse de la misma manera a partir de los 56 kg/cm². Este comportamiento indica que para mayores contenidos de humedad los granos tienen una respuesta inusual debido a la influencia del agua.
3. El contenido de humedad en una muestra es determinante en el comportamiento resultante de un suelo al ser perturbado su equilibrio por la variación de esfuerzos. Debido a que afecta la forma como este sufre el reacomodo de las partículas según la distribución de la presión.
 4. Las muestras que presentan una proporción mayor de granos finos, a partir del tamiz #40 dependen del contenido de humedad que tengan.
 5. Las muestras donde predominen los granos gruesos y medios, el comportamiento será errático y estará enlazado con el contenido de humedad y la carga a la cual este sometido.

RECOMENDACIONES

Luego de analizar los resultados obtenidos, se emiten las siguientes recomendaciones a fin de profundizar en los factores que intervinieron en el comportamiento obtenido al caracterizar la arena limpia mediante el ensayo de consolidación unidimensional.

- Cambiar el tipo de fluido utilizado en el ensayo, para simular las condiciones en un yacimiento y determinar si la viscosidad del mismo influye en el comportamiento del suelo.
- Realizar un ensayo de la conductividad hidráulica en las arenas limpias a las presiones de $56,88 \text{ kg/cm}^2$ y $127,324 \text{ kg/cm}^2$, manteniendo la misma gradación empleada en este T.E.G para cada muestra y compara los resultados que se obtengan con los obtenidos en el presente, estimados con la fórmula de Carrier 2003, para bajas presiones.
- Al determinar que el agua influye en el comportamiento del suelo por los resultados obtenidos, se recomienda variar los contenidos de humedad empleados, así como realizar el ensayo con la muestra inundada para contenidos de humedad iniciales diferentes a 3%, generando una simulación de los flujos dentro del yacimiento.
- Igualmente realizar ensayos a $56,88 \text{ kg/cm}^2$ y ensayos a $127,324 \text{ kg/cm}^2$ de las siguientes muestras: Muestra original (homogénea) y Pasante #40. Para obtener un análisis más detallado en el fracturamiento del grano y si influencia en los parámetros estudiados.
- Variar el material empleado para muestra por arenas provenientes de yacimientos o acuíferos profundos, y hacer correlaciones con los resultados obtenidos para las arenas limpias. Pudiéndose caracterizar según el tipo de suelo que conforme la estructura del yacimiento o acuíferos que se desean explotar.

BIBLIOGRAFÍA

- Lambe T. William y Whitman Robert V. 1974. “*Soil Mechancis*”, Editorial Limusa. México. 582 páginas.
- Das, Braja M. “*Fundamentals of Geotechnical Engineering*”, Third Edition. 608 páginas.
- Badillo, Juarez y Rodríguez, Rico. Tomo I. 1989. “Fundamentos de la Mecánica de Suelos”. Tercera edición. Editorial Limusa. 641 páginas.
- Perez, A. Hugo. 2012. “Laboratorio Completo”. 181 páginas.

ANEXOS – CÁLCULOS

Con los datos obtenidos de los ensayos de consolidación unidimensional y granulometría se procedió a calcular las variaciones en la relación de vacíos, el % deformación y la estimación de la conductividad hidráulica. A continuación se presentan las formulas empleadas, así como las consideraciones especiales que se tomaron para el análisis de cada muestra.

Ensayo de consolidación unidimensional y relación de vacíos

Fórmulas empleadas.

- Presión (kg/cm²):

$$P = \frac{\text{Carga} * \text{Brazo}}{\text{Area muestra}}$$

- Asentamiento (cm):

$$\text{Asentamiento} = (\text{lectura dial} - \text{calibración}) * 0.0001 * 2,54$$

- %Deformación:

$$\%Deformación = \frac{\text{Asentamiento}}{h} * 100$$

- Relación de vacíos (e):

- Condición inicial:

$$e = \frac{G_s}{\gamma_{seco}} - 1$$

- Al final de cada carga:

$$e_f = e_o - \left(\frac{\%Deformación}{100} \right) * (1 + e_o)$$

Este conjunto de relaciones se emplearon para las cuatro muestras de arena con contenidos de humedad de 0%,3% y 6%. Para la muestra que se llevó a un contenido de humedad inicial de 3% y luego se inundó, se realizaron modificaciones en el cálculo de la relación de vacíos. Esta muestra antes de ensayarla en el consolidómetro se inundó y esto generó una deformación

inicial que no se pudo medir por las condiciones del ensayo. Teniendo en cuenta que esta deformación debe considerarse dentro de los cálculos, la relación de vacíos inicial que variará según los incrementos de carga se calcula cuando ya la muestra ha recibido un esfuerzo de 14.147 kg/cm^2 ; para este momento se tiene una lectura del dial, dicha lectura contiene la deformación por inundamiento más la deformación por carga. De la siguiente manera:

- Se calculó el peso unitario seco de la muestra al final de los $14,147 \text{ kg/cm}^2$:

$$\gamma_{seco}(\text{kg/cm}^3) = \frac{W_{seco}}{\text{Area} * \left(h - \text{Asentamiento}_{\frac{14.14 \text{ kg}}{\text{cm}^2}} \right)} * 1000$$

- Relación de vacíos al final de los $14,147 \text{ kg/cm}^2$:

$$e_o = \frac{G_s}{\gamma_{seco}} - 1$$

A continuación se presenta un ejemplo de los cálculos realizados a la muestra original con 0% humedad, estos se repiten para todas las muestras con 0%, 3% y 6%:

Datos del ensayo de consolidación unidimensional:

Tabla N° 80: Datos del ensayo de consolidación para la muestra original a 0%

Fecha	Hora	Tiempo (min)	Carga (kg)	Presión (kg/cm ²)	Calibración (μpulg)	Lectura del dial (μpulg)
09/09/2013	10:14	0	0	0.000	0	0
09/09/2013	10:14	0.1	10	14.147	26	135

Tabla N° 81: Características de la muestra original a 0%

Características de la muestra	
D (cm)	3
h (cm)	2
A (cm ²)	7.069
V (cm ³)	14.137
Wseco (gr)	25.34
G _s	2.66
γ _{seco} (gr/cm ³)	1792.438

Presión:

$$P = \frac{Carga * Brazo}{Area muestra} = \frac{10 * 10}{7,069} = 14,147 \frac{kg}{cm^2}$$

Asentamiento:

$$Asentamiento = (135 - 26) * 0,0001 * 2,54 = 0,0277 \text{ cm}$$

%Deformación:

$$\%Deformación = \frac{0,0277}{2} * 100 = 1,384\%$$

Relación de vacíos (e):

- Condición inicial:

$$e = \frac{2,66}{1792,438} * 1000 - 1 = 0,4840$$

- Al final de cada carga:

$$e_f = 0,4840 - \left(\frac{1,384}{100} \right) * (1 + 0,4840) = 0,4625$$

Cálculo de la relación de vacíos para las muestras inundadas con $W_o=3\%$:

Tabla N° 82: Datos del ensayo de consolidación para la muestra original inundada con $W_o=3\%$, al final de los $14,147 \text{ kg/cm}^2$

Fecha	Hora	Tiempo (min)	Carga (kg)	Presión (kg/cm ²)	Calibración (μpulg)	Lectura del dial (μpulg)
09/12/2013	9:42	0	0	0	0	0
09/12/2013	9:43	0.5	10	14.147	26	714

Tabla N° 83: Características de la muestra original a 0%

Características de la muestra	
D (cm)	3
h (cm)	2
A (cm ²)	7.069
V (cm ³)	14.137
Wseco (gr)	22.51
G _s	2.66
γ _{seco} (gr/cm ³)	1592.257

Asentamiento:

$$Asentamiento = (714 - 26) * 0,0001 * 2,54 = 0,1748 \text{ cm}$$

Peso unitario seco de la muestra al final de los 14,147 kg/cm²:

$$\gamma_{seco}(\text{kg/cm}^3) = \frac{22,51}{7,069 * (2 - 0,1748)} * 1000 = 1744,645 \text{ kg/cm}^2$$

Relación de vacíos al final de los 14,147 kg/cm²:

$$e_o = \frac{2,66}{1744,645} - 1 = 0,5246$$

La presión transmitida y las variaciones de en la relación de vacíos se calcula de la manera explicada al principio del ejemplo.

Ensayo Granulométrico:

Fórmulas empleadas:

- Retenido: masa retenida del material en cada tamiz. (gr)
- Retenido acumulado = $\sum_1^n W_s(\text{retenido})$
- Pasante = $W_{s\text{total}} - W_{s\text{retenido acumulado}}$
- %Retenido = $\frac{W_{s\text{retenido}}}{W_{s\text{total}}} * 100$
- %Pasante = $\frac{W_{s\text{pasante}}}{W_{s\text{total}}} * 100$

A continuación se presenta un ejemplo de este ensayo en forma de tabla. Este procedimiento se realiza de la misma manera para todas las muestras ensayadas, destacando que aquellas con algún contenido de humedad se colocaron en el horno a 140 °C durante 24 horas para garantizar su secado y la disgregabilidad de los granos al ser tamizados.

Tabla N° 84: Cálculo de la granulometría para la muestra original sin ensayar.

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	Pasante (gr)	%Retenido	%Pasante
#3/8	9,53	0	0	1157,6	0,00	100,00
#1/4	6,35	29,65	29,65	1127,95	2,56	97,44
#4	4,76	91,63	121,28	1036,32	7,92	89,52
#10	2	226,19	347,47	810,13	19,54	69,98
#16	1,19	99,61	447,08	710,52	8,60	61,38
#30	0,59	155,44	602,52	555,08	13,43	47,95
#40	0,42	98,7	701,22	456,38	8,53	39,42
#50	0,298	128,69	829,91	327,69	11,12	28,31
#100	0,149	251,6	1081,51	76,09	21,73	6,57
#200	0,074	69	1150,51	7,09	5,96	0,61
Pasante #200	0	7,09	1157,6	0	0,00	0,00
	Total	1157,6			99,39	

Estimación de la Conductividad Hidráulica.

Formulas empleadas:

- Conductividad Hidráulica:

$$k = 1,99 \times 10^4 \left[\frac{100\%}{\sum \frac{f_i}{D_{li}^{0,404} \times D_{st}^{0,395}}} \right]^2 \left(\frac{1}{SF} \right)^2 \left(\frac{e^3}{1+e} \right)$$

Para realizar el siguiente ejemplo se utilizaran los resultados obtenidos anteriormente para la muestra original al 0%

Tabla N° 85: Datos de granulometría para la muestra original al 0%

Tamiz	Apertura (mm)	% Retenido
#1/2	12.7	-
#3/8	9.53	0.00
#1/4	6.35	6.71

La estimación se hará a modo de ejemplo para un porcentaje retenido en tamiz. Para las muestras inundadas se tomara la relación de vacíos inicial calculada para la deformación al final del esfuerzo de 14.147 kg/cm².

Tabla N° 86: Resumen de la granulometría y relación entre tamaño de grano

Tamiz	Apertura (mm)	% Retenido	$\frac{f_i}{\frac{0,404}{Dl^i} * \frac{0,595}{Ds^i}}$
#1/2	12.7	-	0.000
#3/8	9.53	0.00	8.963
#1/4	6.35	6.71	9.070
#4	4.76	4.85	39.275
#10	2	11.17	61.442
#16	1.19	9.04	175.826
#30	0.59	13.81	179.622
#40	0.42	8.68	330.853
#50	0.298	11.37	1150.112
#100	0.149	22.77	887.945
#200	0.074	8.76	568.048
#400	0.038	2.84	3411.154
	Total	100.00	

$$k = 1,99 * 10^4 * \left[\frac{100}{3411,154} \right]^2 * \left(\frac{1}{7} \right)^2 * \left(\frac{0,4840^3}{1 + 0,4840} \right) = 0,0267 \text{ cm/seg}$$

Esta ecuación se repite para cada relación de vacíos calculada la final de los incrementos de carga. A cada muestras con el contenido de humedad respectivo.

Cálculo del Cambio Relativo:

Este cálculo se aplicará tanto para determinar el cambio relativo para la deformación que sufra la muestra, como para el cambio en la conductividad hidráulica y relación de vacíos de una muestra a otra. Fijando en ambos casos la muestra con 0% de humedad como punto de comparación.

El siguiente ejemplo se hará para el cambio relativo en Relación de vacíos (e).

$$\text{Cambio relativo}(e) = \frac{\Delta e_2 - \Delta e_1}{\Delta e_1}$$

Para el ejemplo del cálculo emplearemos estos datos obtenidos del ensayo de consolidación unidimensional para la muestras P#10-R#40.

Tabla N° 87: Resultados del ensayo de consolidación unidimensional, Muestra P#10-R#40.

Esfuerzo (kg/cm ²)	e
14,147	0,923
56,588	0,781

$$\text{Cambio relativo}(e) = \frac{0,923 - 0,781}{0,923} = 0,154$$

Diferencia % pasante:

Esto se realizó para determinar cuánto más o menos pasaba por un determinado tamiz en una muestra que se ensayó comparándola con la no ensayada que corresponda a su gradación original.

$$\text{Diferencia \%pasante} = \%pasante_{\text{ensayado}} - \%pasante_{\text{sin ensayar}}$$

Tabla N° 88: Diferencia %pasante respecto a la Muestra P#10-R#40 sin ensayar. Fuente propia

Diferencia %pasante respecto a la Muestra P#10-R#40 sin ensayar				
Tamiz	0%	3%	6%	Inundada
#3/8	0	0	0	0
#1/4	0,00	0,00	0,00	0,00
#4	0,00	0,00	0,00	0,00
#10	0,00	0,00	0,00	0,00
#16	8,82	1,81	9,54	9,11
#30	8,46	10,70	18,34	22,53
#40	6,08	13,72	13,87	27,73
#50	2,07	7,87	7,31	18,38
#100	0,66	4,92	3,52	11,82
#200	0,00	3,34	1,65	6,20