

# TABLA DE CONTENIDO

<b>Tabla de contenido .....</b>	<b>v</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1. Contexto general .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>13</b>
1.2.1. Objetivos generales.....	13
1.2.2. Objetivos específicos .....	13
<b>2. Metodología.....</b>	<b>14</b>
<b>3. Revisión Bibliográfica.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1. Comportamiento Cíclico no drenado de suelos no cohesivos.....</b>	<b>15</b>
3.1.1. Movilidad Cíclica y Falla de flujo .....	15
3.1.2. Resistencia cíclica .....	17
3.1.3. Efecto de los finos plásticos.....	19
3.1.4. Efecto del corte estático inicial en la resistencia cíclica .....	20
3.1.5. Factor $K\alpha$ .....	30
<b>4. Programa Experimental.....</b>	<b>36</b>
<b>4.1. Introducción .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2. Descripción de los suelos.....</b>	<b>36</b>
<b>4.3. Equipo utilizado .....</b>	<b>38</b>
<b>4.4. Metodología de ensayos .....</b>	<b>39</b>
4.4.1. Preparación de probetas.....	40
4.4.2. Saturación .....	40
4.4.3. Consolidación .....	41
4.4.4. Evaluación del índice de vacíos final .....	42
<b>4.5. Recopilación de trabajos anteriores.....</b>	<b>44</b>
4.5.1. Introducción.....	44
4.5.2. Efecto del esfuerzo de corte estático inicial en la resistencia cíclica de arenas, Corral 2008.....	44

4.5.3. Efecto del esfuerzo de corte estático inicial en la resistencia cíclica en una arena de relaves, Asenjo (2010).....	46
<b>5. Presentación y Análisis de resultados .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1. Introducción .....</b>	<b>48</b>
<b>5.2. Resultados Experimentales.....</b>	<b>49</b>
5.2.1. Introducción a los ensayos triaxiales cíclicos .....	49
5.2.2. Resultados de ensayos triaxiales cíclicos isótropos y anisótropos.....	52
5.2.3. Desarrollo del Exceso de Presión de poros.....	59
5.2.4. Deformación.....	66
<b>5.3. Análisis y Discusiones generales.....</b>	<b>71</b>
5.3.1. Comportamiento cíclico de esta arena de relaves.....	71
5.3.2. Desarrollo del exceso de presión de poros .....	78
5.3.3. Deformación.....	97
<b>6. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>104</b>
<b>6.1. Conclusión general.....</b>	<b>104</b>
<b>6.2. Recomendaciones para futuros trabajos .....</b>	<b>106</b>
<b>7. Bibliografía .....</b>	<b>107</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>111</b>

## Índice de Figuras

Figura 3-1. Esquema falla de flujo y Movilidad Cíclica (Asenjo 2010) .....	16
Figura 3-2. Registro de sollicitación de corte en el tiempo (H B Seed and Idriss 1971)....	18
Figura 3-3. Numero de ciclos uniformes equivalentes, para diferentes magnitudes de sismos. (Seed, H.B, Idriss I.M, Lee K 1975).....	18
Figura 3-4. Incremento de la resistencia cíclica con respecto al incremento del índice de plasticidad. (Ishihara and Koseki 1989).....	20
Figura 3-5. Elementos de suelo bajo: (a) Terraplén, (b) Estructura (V. Pillai 1991) .....	21
Figura 3-6. Estado tensional in situ de un elemento de suelo sujeto a esfuerzo de corte estático inicial y esfuerzo de corte cíclico. (Ishibashi, Kawamura, and Bhatia 1985).....	21
Figura 3-7. Interpretación grafica del termino R para cuantificar la reversibilidad de esfuerzos (Yoshimi and Oh-oka 1975).....	23
Figura 3-8. Efecto del corte estático inicial en la razón de esfuerzo de corte dinámico que define la licuación (Yoshimi & Oh-Oka, 1975).....	24
Figura 3-9. Esfuerzo de corte cíclico dividido por la tensión efectiva requerida para generar probetas con $DR = 50\%$ 1y $DR = 68\%$ (2): (a) 2% de deformación de corte, (b) 5 % de deformación de corte, (c) 10 % de deformación de corte (Vaid and Finn 1979). .....	25
Figura 3-10. Comportamiento cíclico de muestras de densidades sueltas (1) medias (2) y densas (3), de arena de Ottawa: (a) Exceso de presión de poros, (b) Deformación axial (Vaid and Chern 1983).....	26
Figura 3-11. Esquema del efecto del corte estático inicial en muestras contractivas de arenas: (a) Con reversibilidad de esfuerzos y $\tau_p < S_{us}$ , (b) Con reversibilidad de esfuerzos y $\tau_p > S_{us}$ , (c) Sinreversibilidad de esfuerzos y $\tau_p > S_{us}$ (Mohamad and Dobry 1986) ...	28
Figura 3-12. Curvas de resistencia cíclica versus el número de ciclos para muestras de arena de Toyura con densidades: (a) Sueltas, (b) Densas (Hosono, Yoshimene, and Yoshimine 2004).....	29
Figura 3-13. Variación del factor de corrección, $K\alpha$ versus $\alpha$ (Seed, 1983).....	31
Figura 3-14. Variación del factor de corrección, $K\alpha$ versus $\alpha$ para arenas con distintas densidades relativas ((Rollins and Seed 1990) .....	32
Figura 3-15. Variación del factor de corrección, $K\alpha$ versus $\alpha$ para arenas con distintas densidades relativas (R. B. Seed and Harder 1990) .....	32

Figura 3-16. Relación entre el factor de corrección $K\alpha$ respecto al corte estático inicial, al arena del rio Fraser a distintas densidades relativas y a presión de confinamiento de 100 (a), 200 (b) y 400 (c) kPa (Modificado de Seed y Harden 1990) .....	33
Figura 3-17. Recopilación de curvas de $K\alpha$ respecto al corte estático inicial para DR = 20 ~ 45 % (Yoshimine and Hosono 2000).....	34
Figura 3-18. Comparación de curvas de $K\alpha$ respecto al corte estático inicial para ensayos cíclicos triaxiales y corte simple a un DR = 39 ~ 42 % (Yoshimine and Hosono 2000) ....	35
Figura 3-19. Recopilación de curvas de $K\alpha$ respecto al corte estático inicial para DR = 20 ~ 45 % (Yoshimine and Hosono 2000).....	35
Figura 4-1. Curva granulométrica del arena del tranque de relaves el Torito. ....	37
Figura 4-2. Imagen microscópica de la arena de relaves el Torito .....	37
Figura 4-3. Marco triaxial cíclico, MECESUP, Universidad de Chile.....	39
Figura 4-4. Esquema de consolidación Isotrópica y Anisótropa .....	42
Figura 4-5. Resistencia cíclica versus $\alpha$ , para arena suelta y densa. Corral (2008). ....	45
Figura 4-6. Comparación de algunos valores de k en compresión, con los obtenidos por Seed & Harder, 1990. Asenjo (2008) .....	45
Figura 4-7. Comparación de curvas de resistencia cíclica para $\eta = 0.2$ y $0.55$ .....	46
Figura 4-8. Gráfico de $K\alpha$ versus $\alpha$ . Asenjo (2010). .....	47
Figura 5-1. (a) Variación del esfuerzo desviador versus la presión media efectiva, (b) Presión de poros normalizada por el confinamiento efectivo inicial versus el número de ciclos, (c) desviador de esfuerzos versus el número de ciclos y (d) porcentaje de deformación axial versus el número de ciclos. ....	50
Figura 5-2. (a) Variación del esfuerzo desviador versus la presión media efectiva, (b) Presión de poros normalizada por el confinamiento efectivo inicial versus el número de ciclos, (c) desviador de esfuerzos versus el número de ciclos y (d) porcentaje de deformación axial versus el número de ciclos. ....	51
Figura 5-4. Curvas de resistencia cíclica de arenas para confinamientos de 1, 2 y 3 kg/cm <sup>2</sup> : a) criterio de 100% <sub>pp</sub> , b) criterio de 5% <sub>DA</sub> y c) criterio de 10% <sub>DA</sub> .....	53
Figura 5-4. Curvas de resistencia cíclica en muestras con corte estático igual a $k_c=0$ , $k_c=1.75$ y $k_c=2.29$ . ( $k_c = \sigma_1' / \sigma_3'$ ) .....	55
Figura 5-5. (a) Curva de CSR <sub>20</sub> y (b) Curva del factor de corrección $K\alpha$ versus parámetro $\alpha$ .....	57
Figura 5-6. (a) Resistencia cíclica necesaria para alcanzar en 20 ciclos el 5% de deformación axial en doble amplitud versus la presión media efectiva y (b) Factor de	

corrección por confinamiento $K\sigma$ según criterio de 5% de deformación axial en doble amplitud en 20 ciclos. ....	58
Figura 5-7. Exceso de presión de poros durante la carga cíclica para un confinamiento inicial de 1, 2 y 3 $kg/cm^2$ (a, b y c respectivamente). ....	60
Figura 5-9. Desarrollo del exceso de presión de poros ( $\Delta u/\sigma_c$ ) versus el número de ciclos normalizado ( $N_c/N_{5\%DA}$ ), para confinamientos de 1, 2 y 3 $kg/cm^2$ (a, b y c respectivamente). ....	62
Figura 5-9. Presión media efectiva y parámetro $\alpha$ de presas de relaves estudiadas por Verdugo 2011: (a) Presa 4:1, (b) Presa 3:1, Vargas (2015). ....	64
Figura 5-10. Comportamiento del exceso de presión de poros ( $\Delta u/\sigma_c$ ) ante la presencia de corte estático ( $k_c=1,75$ y $k_c=2.29$ ) a una presión de confinamiento de 1 $kg/cm^2$ .....	65
Figura 5-12. Desarrollo de la deformación axial versus el número de ciclos para una presión de confinamiento de: (a) 1 $kg/cm^2$ , (b) 2 $kg/cm^2$ , (c) 3 $kg/cm^2$ . ....	67
Figura 5-12. Desarrollo de la deformación axial versus el número de ciclos normalizado ( $N_c/N_{5\%DA}$ ) para una presión de confinamiento de: (a) 1 $kg/cm^2$ , (b) 2 $kg/cm^2$ , (c) 3 $kg/cm^2$ . ....	68
Figura 5-14. Desarrollo de la deformación axial versus el número de ciclos ( $N_c$ ) y versus el número de normalizado ( $N_c/N_{5\%DA}$ ) para ensayos consolidados anisótricamente a 1 $kg/cm^2$ con $k_c = 1.75$ y $k_c = 2.29$ .....	70
Figura 5-14. Curvas de resistencia cíclica de arenas para confinamientos de 1, 2 y 3 $kg/cm^2$ : a) criterio de 100% $_{opp}$ , b) criterio de 5% $_{DA}$ y c) criterio de 10% $_{DA}$ .....	72
Figura 5-16. Comparación entre el número de ciclos para lograr el 100% de presión poros versus el 5% de deformación en doble amplitud para una presión de confinamiento de 1,2 y 3 $kg/cm^2$ (a, b y c respectivamente) .....	73
Figura 5-17. Comparación de factores de corrección por confinamiento $K\sigma$ , con los obtenidos por Hynes & Olsen (1998) mostrados por Idriss & Boulanger, (2004).....	74
Figura 5-18. Comparación de los factores de corrección por corte estático inicial $k\alpha$ con los obtenidos por R. B. Seed & Harder (1990) y Vaid et al. (2001) .....	76
Figura 5-19. Comparación de los factores de corrección por corte estático inicial $k\alpha$ con la recopilación de este parámetro en arenas naturales sueltas, realizada por Yoshimine & Hosono, (2000).....	76
Figura 5-20. Comparación de los factores de corrección por corte estático inicial $k\alpha$ , con el estudio realizado por, realizada por Boulanger & Idriss (1997) .....	77

Figura 5-21. Exceso de presión de poros durante la carga cíclica para un confinamiento inicial de 1, 2 y 3 kg/cm <sup>2</sup> (a, b y c respectivamente). .....	79
Figura 5-22. Desarrollo del exceso de presión de poros ( $\Delta u/\sigma_c$ ) versus el número de ciclos normalizado ( $N_c/N_{5\%DA}$ ), para confinamientos de 1, 2 y 3 kg/cm <sup>2</sup> (a, b y c respectivamente). .....	80
Figura 5-23. Exceso de presión de poros normalizada versus $N_c/N_{5\%DA}$ , para confinamientos de 1,2 y 3 kg/cm <sup>2</sup> . .....	81
Figura 5-24. CSR versus (a) $N_i$ , (b) $N_g$ , (c) $\Delta U_m$ , (d) $(\Delta u/\sigma_c)_i$ . .....	84
Figura 5-25. Desarrollo del exceso de presión de poros versus en número de ciclos normalizado ( $N_c/N_{5\%DA}$ ) según el modelo propuesto para una presión de confinamiento de: (a) 1 kg/cm <sup>2</sup> , (b) 2 kg/cm <sup>2</sup> y (c) 3 kg/cm <sup>2</sup> .....	87
Figura 5-26. Exceso de presiones de poros calculado a partir del modelo propuesto para: (a) 1 kg/cm <sup>2</sup> , (b) 2kg/cm <sup>2</sup> y (c) 3 kg/cm <sup>2</sup> . .....	88
Figura 5-27. Disipación de energía por unidad de volumen para una muestra de suelo en ensayo triaxial cíclico, Green et al. (2000). .....	90
Figura 5-28. Grafico que ilustra como determinar el parámetro PEC a partir de los resultados de un ensayo cíclico, Green et al. (2000). .....	90
Figura 5-29. Desarrollo del exceso de presión de poros versus en número de ciclos normalizado ( $N_c/N_{5\%DA}$ ) según el modelo GMP para una presión de confinamiento de: (a) 1 kg/cm <sup>2</sup> , (b) 2 kg/cm <sup>2</sup> y (c) 3 kg/cm <sup>2</sup> . .....	92
Figura 5-30. Comportamiento cíclico de muestras de densidades sueltas (1) medias (2) y densas (3), de arena de Ottawa: (a) Exceso de presión de poros, (b) Deformación axial (Vaid and Chern 1983). .....	93
Figura 5-31. $\Delta u/\sigma_c$ y deformación axial versus $N_c$ y $N_c/N_{5\%DA}$ . .....	95
Figura 5-32. Comparación entre el valor residual de la presión de poros medido con el valor calculado mediante el me método de Vaid & Chern (1983). .....	96
Figura 5-33. Tipos de deformaciones en ensayos cíclicos: (a) Deformación en doble amplitud, (b) Deformación Acumulada y (c) Deformación acumulada peak. (Vargas 2015) .....	97
Figura 5-34. Desarrollo de la deformación axial versus el número de ciclos para una presión de confinamiento de: (a) 1 kg/cm <sup>2</sup> , (b) 2 kg/cm <sup>2</sup> , (c) 3 kg/cm <sup>2</sup> . .....	99
Figura 5-35. Resultados de la deformación axial versus el número de ciclos para Arena Natural con 18% de finos no plásticos (Swamy, Boominathan, and Rajagopal 2010). .....	99

Figura 5-36. Resultado de la deformación axial versus el número de ciclos para un ensayo triaxial cíclico no drenado en arena de Ottawa con 1% de Laponita (Ochoa, 2016).....	99
Figura 5-37. Desarrollo de la deformación axial versus el número de ciclos normalizado ( $N_c/N_{5\%DA}$ ) para una presión de confinamiento de: (a) 1 kg/cm <sup>2</sup> , (b) 2 kg/cm <sup>2</sup> , (c) 3 kg/cm <sup>2</sup> . .....	100
Figura 5-38. Desarrollo de la deformación axial versus el número de ciclos ( $N_c$ ) y versus el número de normalizado ( $N_c/N_{5\%DA}$ ) para ensayos consolidados anisótricamente a 1 kg/cm <sup>2</sup> con $k_c = 1.75$ y $k_c = 2.29$ .....	101
Figura 5-39. Trabajo acumulado versus el número de ciclos normalizado para una presión de confinamiento de 1, 2 y 3 kg/cm <sup>2</sup> (a, b y c respectivamente).....	102
Figura 5-40. Carga cíclica aplicada (CSR) versus el trabajo acumulado al 90% del ensayo para las 3 presiones de confinamiento.....	103