



**UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL**

**DISEÑO SÍSMICO POR DESEMPEÑO DE TALUDES PROYECTADOS EN BASE A  
CRITERIOS DE ESTABILIDAD ESTÁTICA**

**Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil**

**CRISTIAN PABLO OPAZO GUERRA**

Profesor Guía  
JUAN CARLOS TIZNADO AITKEN

SANTIAGO DE CHILE  
MARZO 2016

**DISEÑO SÍSMICO POR DESEMPEÑO DE TALUDES PROYECTADOS EN BASE  
A CRITERIOS DE ESTABILIDAD ESTÁTICA**

## **Dedicatoria**

*Dedicado a la persona más importante en mi vida,  
mi querida abuelita,  
que aún desde el cielo, sigue acompañándome.*

*Gracias Eliana Del Carmen Flores Chincota,  
por criarme y entregarme todo, para hacer de mí un hombre de bien,  
te amo por siempre.*

## **Agradecimientos**

*El autor agradece cordialmente a:*

*Juan Carlos Tiznado Aitken, ingeniero civil y profesor guía del proyecto, por su confianza total en mí y consejos oportunos en todo momento para el avance seguro y cada decisión tomada en la tesis.*

*A mi familia, Opazo-Flores y Opazo-Guerra, por el amor, apoyo continuo en cada paso dado, por el apoyo en momentos de flaqueza y momentos de alegría, sin ellos nada de los logros obtenidos hasta el momento serian posible. En especial a mi padre, Andrés Alfredo Opazo Flores, por el sacrificio extraordinario realizado por tantos años y hasta el día de hoy para tener un buen vivir, sin él nada sería posible, nunca dejaré de agradecer toda tu entrega, te amo viejo.*

*Al amor de mi vida durante 11 años a la fecha, Isidora Fernanda Lara Abarca, por estar en todo momento, por su gran amor incondicional y consejos en cada momento, por enseñarme a valorar muchas cosas que antes no lograba ver y por estar siempre en cada momento que necesite un apoyo para seguir adelante, te amo infinitamente; y a su familia Lara-Abarca por estar en los momentos que presenté problemas, por su apoyo y consejos entregados, y ser parte de alegrías vividas.*

*Muchas Gracias.*

# ÍNDICE GENERAL

Título.....	i
Dedicatoria .....	ii
Agradecimientos.....	iii
Resumen .....	13
Abstract .....	14
1 Introducción.....	15
1.1 Factor de Seguridad.....	17
1.2 Análisis Estático .....	17
1.2.1 Método de las dovelas.....	18
1.2.2 Gráficos de estabilidad para el diseño de taludes homogéneos .....	20
1.3 Análisis Sísmico .....	23
1.3.1 Práctica chilena para la estimación de coeficientes sísmicos.....	24
1.3.2 Métodos para el cálculo de desplazamientos sísmicos en taludes .....	24
1.3.3 Métodos de diseño basados en desempeño .....	26
2 Planteamiento del problema.....	28
3 Metodología.....	29
3.1 Gráficos de diseño para la selección del FS estático deseado .....	29
3.2 Gráficos de diseño para la determinación del coeficiente pseudoestático de aceleración crítico $k_y$ .....	29
3.2.1 Curvas de diseño simplificadas.....	30
3.3 Descripción geométrica y mecánica del talud.....	30
4 Resultados.....	32
4.1 Gráficos de diseño para la selección del FS estático deseado .....	32
4.1.1 Caso estático sin sobrecarga ( $q=0$ ) .....	32
4.1.2 Caso estático con sobrecarga ( $q=20$ kPa).....	41
4.2 Gráficos de diseño para la determinación del coeficiente pseudoestático de aceleración crítico $k_y$ .....	50
4.2.1 Caso sísmico (pseudoestático) sin sobrecarga ( $q=0$ kPa).....	50
4.2.2 Caso sísmico (pseudoestático) con sobrecarga ( $q=20$ kPa) .....	56
4.2.3 Curvas de diseño simplificadas - Caso sin sobrecarga ( $q=0$ ).....	62
4.2.4 Curvas de diseño simplificadas - Caso con sobrecarga ( $q=20$ kPa) .....	80
4.2.5 Resumen curvas de diseño simplificadas .....	98

5	Análisis y discusión de resultados.....	105
5.1	Comentarios generales .....	105
6	Conclusiones .....	110
7	Bibliografía.....	112
8	Anexos.....	115
8.1	Anexo A.....	115

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1, COEFICIENTES DE ACELERACIÓN EFECTIVA MÁXIMA. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	24
TABLA 3-1, VALORES GEOMÉTRICOS DE SECCIONES TRANSVERSALES ESTUDIADAS. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	31
TABLA 4-1, PARÁMETROS ADIMENSIONALES (TAN $\phi$ Y C/YH), PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS $FS_{EST}=1,0$ PARA CADA INCLINACIÓN (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	33
TABLA 4-2, PARÁMETROS ADIMENSIONALES (TAN $\phi$ Y C/YH), PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS $FS_{EST}=1,3$ PARA CADA INCLINACIÓN (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	35
TABLA 4-3, PARÁMETROS ADIMENSIONALES (TAN $\phi$ Y C/YH), PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS $FS_{EST}=1,4$ PARA CADA INCLINACIÓN (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	37
TABLA 4-4, PARÁMETROS ADIMENSIONALES (TAN $\phi$ Y C/YH), PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS $FS_{EST}=1,5$ PARA CADA INCLINACIÓN (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	39
TABLA 4-5, PARÁMETROS ADIMENSIONALES (TAN $\phi$ Y C/YH), PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS $FS_{EST}=1,0$ PARA CADA INCLINACIÓN (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	42
TABLA 4-6, PARÁMETROS ADIMENSIONALES (TAN $\phi$ Y C/YH), PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS $FS_{EST}=1,3$ PARA CADA INCLINACIÓN (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	44
TABLA 4-7, PARÁMETROS ADIMENSIONALES (TAN $\phi$ Y C/YH), PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS $FS_{EST}=1,4$ PARA CADA INCLINACIÓN (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	46
TABLA 4-8, PARÁMETROS ADIMENSIONALES (TAN $\phi$ Y C/YH), PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS $FS_{EST}=1,5$ PARA CADA INCLINACIÓN (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	48
TABLA 4-9, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES ( $K_y$ ) CRÍTICOS PARA TALUDES DE 45° (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	50
TABLA 4-10, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES ( $K_y$ ) CRÍTICOS PARA TALUDES DE 30° (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	52
TABLA 4-11, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES ( $K_y$ ) CRÍTICOS PARA TALUDES DE 15° (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	54
TABLA 4-12, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES ( $K_y$ ) CRÍTICOS PARA TALUDES DE 45° (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	56
TABLA 4-13, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES ( $K_y$ ) CRÍTICOS PARA TALUDES DE 30° (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	58
TABLA 4-14, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES ( $K_y$ ) CRÍTICOS PARA TALUDES DE 15° (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	60
TABLA 4-15, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 1. (ELABORACIÓN PROPIA 2016) .....	62
TABLA 4-16, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 2. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	62
TABLA 4-17, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 3. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	63
TABLA 4-18, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 4. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	63
TABLA 4-19, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 5. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	63
TABLA 4-20, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	64
TABLA 4-21, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	65
TABLA 4-22, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	66
TABLA 4-23, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 1. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	68
TABLA 4-24, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 2. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	68

TABLA 4-25, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 3. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	69
TABLA 4-26, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 4. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	69
TABLA 4-27, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 5. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	69
TABLA 4-28, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	70
TABLA 4-29, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	71
TABLA 4-30, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	72
TABLA 4-31, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 1. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	74
TABLA 4-32, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 2. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	74
TABLA 4-33, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 3. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	75
TABLA 4-34, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 4. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	75
TABLA 4-35, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 5. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	75
TABLA 4-36, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	76
TABLA 4-37, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	77
TABLA 4-38, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	78
TABLA 4-39, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 1. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	80
TABLA 4-40, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 2. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	80
TABLA 4-41, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 3. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	81
TABLA 4-42, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 4. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	81
TABLA 4-43, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 5. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	81
TABLA 4-44, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	82
TABLA 4-45, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	83
TABLA 4-46, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	84
TABLA 4-47, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 1. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	86
TABLA 4-48, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 2. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	86
TABLA 4-49, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 3. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	87
TABLA 4-50, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 4. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	87
TABLA 4-51, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 5. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	87

TABLA 4-52, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	88
TABLA 4-53, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	89
TABLA 4-54, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	90
TABLA 4-55, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 1. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	92
TABLA 4-56, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 2. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	92
TABLA 4-57, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 3. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	93
TABLA 4-58, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 4. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	93
TABLA 4-59, COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS SELECCIONADOS, PARA GRAFICAR EL PUNTO 5. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	93
TABLA 4-60, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	94
TABLA 4-61, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	95
TABLA 4-62, VALORES DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	96
TABLA 4-63, RESUMEN ECUACIONES Y VALORES DE COEFICIENTES PSEUDOESTATICOS CRÍTICOS PARA TALUD DE 45° Y $Q=0$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	99
TABLA 4-64, RESUMEN ECUACIONES Y VALORES DE COEFICIENTES PSEUDOESTATICOS CRÍTICOS PARA TALUD DE 30° Y $Q=0$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	100
TABLA 4-65, RESUMEN ECUACIONES Y VALORES DE COEFICIENTES PSEUDOESTATICOS CRÍTICOS PARA TALUD DE 15° Y $Q=0$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	101
TABLA 4-66, RESUMEN ECUACIONES Y VALORES DE COEFICIENTES PSEUDOESTATICOS CRÍTICOS PARA TALUD DE 45° Y $Q=20$ kPa. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	102
TABLA 4-67, RESUMEN ECUACIONES Y VALORES DE COEFICIENTES PSEUDOESTATICOS CRÍTICOS PARA TALUD DE 30° Y $Q=20$ kPa. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	103
TABLA 4-68, RESUMEN ECUACIONES Y VALORES DE COEFICIENTES PSEUDOESTATICOS CRÍTICOS PARA TALUD DE 15° Y $Q=20$ kPa. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	104
TABLA 5-1, RESUMEN REGISTROS SÍSMICOS MEDIDOS EN SUELOS ARENOSOS. TERREMOTO 03 DE MARZO DE 1985. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	106
TABLA 5-2, RESUMEN REGISTROS SÍSMICOS MEDIDOS EN SUELOS ARENOSOS. TERREMOTO 27 DE FEBRERO DE 2010. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	107
TABLA 5-3, DESPLAZAMIENTOS INDUCIDOS POR TERREMOTO DE 1985 EN TALUD ARENOSO DE 30°, SIN SOBRECARGA ( $Q=0$ ). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	107
TABLA 5-4, DESPLAZAMIENTOS INDUCIDOS POR TERREMOTO DE 1985 EN TALUD ARENOSO DE 30°, CON SOBRECARGA ( $Q=20$ kPa). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	108
TABLA 5-5, DESPLAZAMIENTOS INDUCIDOS POR TERREMOTO DE 2010 EN TALUD ARENOSO DE 30°, SIN SOBRECARGA ( $Q=0$ ). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	108
TABLA 5-6, DESPLAZAMIENTOS INDUCIDOS POR TERREMOTO DE 2010 EN TALUD ARENOSO DE 30°, SIN SOBRECARGA ( $Q=20$ kPa). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1, DERRUMBES PLANARES (O TRASLACIONALES) Y DERRUMBES ROTACIONALES. (MODIFICADO DE GRUPO DE GEOTECNIA (2009), UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO (UCV)).....	15
FIGURA 1-2 DESPRENDIMIENTOS DE CAÍDA LIBRE O FALLA POR VOLCAMIENTO. (MODIFICADO DE GRUPO DE GEOTECNIA (2009), UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO (UCV)).....	16
FIGURA 1-3, FALLA POR FORMACIÓN DE ALUDES O FLUJOS, HÚMEDO Y SECO. (MODIFICADO DE GRUPO DE GEOTECNIA (2009), UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO (UCV)).....	16
FIGURA 1-4, ESQUEMA DE MÉTODO DE LAS DOVELAS. (BAÑÓN BLÁZQUEZ Y BEVIÁ GARCÍA, 2000) .....	18
FIGURA 1-5, CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO. (MODIFICADO DE INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. (1987). MANUAL DE TALUDES. (1ª EDICIÓN). MADRID, ESPAÑA) .....	20
FIGURA 1-6, MÉTODO PARA DETERMINAR EL FACTOR DE SEGURIDAD USANDO EL CONCEPTO DE LA LÍNEA G. (ADAPTADO DE KLAR ET AL., 2011) .....	22
FIGURA 1-7, DISTINTOS CÍRCULOS DE FALLA. FALLA SUPERFICIAL, INTERMEDIA Y PROFUNDA. (MODIFICADO DE SUN Y ZHAO, 2013) .....	23
FIGURA 1-8, ANALOGÍA DE NEWMARK, (A) MASA POTENCIALMENTE DESLIZANTE, (B) BLOQUE RÍGIDO DESLIZANTE. (MODIFICADO DE KRAMER, 1996) .....	25
FIGURA 1-9, ANALOGÍA DEL BLOQUE RÍGIDO DESLIZANTE EN CONDICIONES ESTÁTICAS Y DINÁMICAS. (KRAMER ,1996) .....	25
FIGURA 1-10, DESPLAZAMIENTOS PERMANENTE INDUCIDOS POR EVENTOS SÍSMICOS, MÉTODO DE NEWMARK. (KRAMER, 1996) .....	26
FIGURA 1-11, ENVOLVENTE SUPERIOR DE DESPLAZAMIENTOS SÍSMICOS NORMALIZADOS. (RICHARDS Y ELMS, 1979) .....	28
FIGURA 3-1, PROPIEDADES GEOMÉTRICAS GENERALES DE LOS TALUDES ESTUDIADOS. (GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. (2012) GEOSTUDIO – SLOPE/W (2012), LICENCIA COMPLETA, [PROGRAMA DE COMPUTADOR]. GEOSLOPE, INTERNATIONAL LTD, CALGARY, AB, CANADÁ). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	31
FIGURA 4-1, CURVAS DE FACTORES DE SEGURIDAD ESTÁTICOS ( $FS_{EST}=1,0$ ) PARA CADA INCLINACIÓN ( $Q=0$ ). (ELABORACIÓN PROPIA 2016) .....	34
FIGURA 4-2, CURVAS DE FACTORES DE SEGURIDAD ESTÁTICOS ( $FS_{EST}=1,3$ ) PARA CADA INCLINACIÓN ( $Q=0$ ). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	36
FIGURA 4-3, CURVAS DE FACTORES DE SEGURIDAD ESTÁTICOS ( $FS_{EST}=1,4$ ) PARA CADA INCLINACIÓN ( $Q=0$ ). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	38
FIGURA 4-4, CURVAS DE FACTORES DE SEGURIDAD ESTÁTICOS ( $FS_{EST}=1,5$ ) PARA CADA INCLINACIÓN ( $Q=0$ ). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	40
FIGURA 4-5, CURVAS DE FACTORES DE SEGURIDAD ESTÁTICOS ( $FSEST=1,0$ ) PARA CADA INCLINACIÓN ( $Q=20$ KPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	43
FIGURA 4-6, CURVAS DE FACTORES DE SEGURIDAD ESTÁTICOS ( $FSEST=1,3$ ) PARA CADA INCLINACIÓN ( $Q=20$ KPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	45
FIGURA 4-7, CURVAS DE FACTORES DE SEGURIDAD ESTÁTICOS ( $FSEST=1,4$ ) PARA CADA INCLINACIÓN ( $Q=20$ KPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	47
FIGURA 4-8, CURVAS DE FACTORES DE SEGURIDAD ESTÁTICOS ( $FSEST=1,5$ ) PARA CADA INCLINACIÓN ( $Q=20$ KPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	49
FIGURA 4-9, CURVAS DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS TEÓRICOS PARA TALUDES DE 45° ( $Q=0$ ). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	51
FIGURA 4-10, CURVAS DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS TEÓRICOS PARA TALUDES DE 30° ( $Q=0$ ). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	53
FIGURA 4-11, CURVAS DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS TEÓRICOS PARA TALUDES DE 15° ( $Q=0$ ). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	55
FIGURA 4-12, CURVAS DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS TEÓRICOS PARA TALUDES DE 45° ( $Q=20$ KPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	57
FIGURA 4-13, CURVAS DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS TEÓRICOS PARA TALUDES DE 30° ( $Q=20$ KPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	59

FIGURA 4-14, CURVAS DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS TEÓRICOS PARA TALUDES DE 15° (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	61
FIGURA 4-15, PUNTO 1 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	62
FIGURA 4-16, PUNTO 2 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	62
FIGURA 4-17, PUNTO 3 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	63
FIGURA 4-18, PUNTO 4 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	63
FIGURA 4-19, PUNTO 5 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	63
FIGURA 4-20, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	64
FIGURA 4-21, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	65
FIGURA 4-22, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	66
FIGURA 4-23, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 45° SIN SOBRECARGA (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	67
FIGURA 4-24, PUNTO 1 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	68
FIGURA 4-25, PUNTO 2 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	68
FIGURA 4-26, PUNTO 3 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	69
FIGURA 4-27, PUNTO 4 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	69
FIGURA 4-28, PUNTO 5 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	69
FIGURA 4-29, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	70
FIGURA 4-30, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	71
FIGURA 4-31, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	72
FIGURA 4-32, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 30° SIN SOBRECARGA (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	73
FIGURA 4-33, PUNTO 1 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	74
FIGURA 4-34, PUNTO 2 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	74
FIGURA 4-35, PUNTO 3 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	75
FIGURA 4-36, PUNTO 4 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	75
FIGURA 4-37, PUNTO 5 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	75
FIGURA 4-38, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	76
FIGURA 4-39, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	77
FIGURA 4-40, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	78
FIGURA 4-41, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 15° SIN SOBRECARGA (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	79
FIGURA 4-42, PUNTO 1 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	80
FIGURA 4-43, PUNTO 2 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	80
FIGURA 4-44, PUNTO 3 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	81
FIGURA 4-45, PUNTO 4 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	81
FIGURA 4-46, PUNTO 5 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	81
FIGURA 4-47, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	82
FIGURA 4-48, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	83
FIGURA 4-49, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	84
FIGURA 4-50, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 45° CON SOBRECARGA (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	85

FIGURA 4-51, PUNTO 1 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	86
FIGURA 4-52, PUNTO 2 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	86
FIGURA 4-53 PUNTO 3 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	87
FIGURA 4-54, PUNTO 4 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	87
FIGURA 4-55, PUNTO 5 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	87
FIGURA 4-56, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	88
FIGURA 4-57, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	89
FIGURA 4-58, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	90
FIGURA 4-59, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 30° CON SOBRECARGA (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	91
FIGURA 4-60, PUNTO 1 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	92
FIGURA 4-61, PUNTO 2 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	92
FIGURA 4-62, PUNTO 3 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	93
FIGURA 4-63, PUNTO 4 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	93
FIGURA 4-64, PUNTO 5 REGRESIÓN LINEAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2016).....	93
FIGURA 4-65, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,3$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	94
FIGURA 4-66, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,4$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	95
FIGURA 4-67, CURVA DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA UN $FS_{EST} = 1,5$ . (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	96
FIGURA 4-68, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 15° CON SOBRECARGA (Q=20 kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	97
FIGURA 4-69, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 45° CON SOBRECARGA (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	99
FIGURA 4-70, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 30° CON SOBRECARGA (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	100
FIGURA 4-71, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 15° CON SOBRECARGA (Q=0). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	101
FIGURA 4-72, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 45° CON SOBRECARGA (Q=20kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	102
FIGURA 4-73, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 30° CON SOBRECARGA (Q=20kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	103
FIGURA 4-74, ÁBACO DE COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES CRÍTICOS PARA TALUD DE 15° CON SOBRECARGA (Q=20kPA). (ELABORACIÓN PROPIA, 2016) .....	104

## Resumen

Tradicionalmente, y desde el punto de vista de la práctica de ingeniería, el diseño de taludes bajo la acción de cargas estáticas y/o sísmicas ha sido abordado por medio de criterios de estabilidad. Matemáticamente, lo anterior se expresa en términos de un factor de seguridad (FS), que corresponde al cociente entre las fuerzas solicitantes y resistentes involucradas en el problema.

Para este tipo de análisis, es común utilizar los denominados *métodos de equilibrio límite*. Éstos consideran el balance de fuerzas y/o momentos en una masa de suelo, que se supone rígida–perfectamente plástica, sobre un conjunto de potenciales superficies de falla. De esta forma, se debe garantizar que para todas ellas, el FS sea superior al mínimo definido en las bases de diseño de proyecto.

En particular, la estabilidad sísmica de taludes se suele analizar por medio de métodos pseudoestáticos, en los cuales los efectos de un terremoto dado sobre la estructura son modelados a través de fuerzas horizontales y/o verticales que actúan en el centro de gravedad de la masa de suelo potencialmente inestable. Estas fuerzas se expresan como una fracción del peso de la cuña de suelo analizada por medio de coeficientes sísmicos, y deben poder representar razonablemente las características principales del terremoto de diseño; por lo que en la práctica resulta complejo estimarlas de forma apropiada.

Por este motivo, en lugar de diseñar sobre la base de fuerzas, suele ser preferible diseñar sobre la base de ciertos desplazamientos admisibles que no comprometan la estabilidad global del talud y permitan mantenerlo operativo luego de concluido el sismo. Esta forma de abordar el problema es lo que da origen a los llamados *métodos de diseño por desempeño*.

En este trabajo se propone una metodología simple para abordar el diseño sísmico por desempeño de taludes homogéneos que han sido proyectados bajo criterios de estabilidad estática. Se busca establecer relaciones entre el FS asociado a un determinado diseño estático y el correspondiente coeficiente sísmico crítico  $k_y$  del talud. De esta manera, utilizando procedimientos basados en el denominado *método del bloque deslizante de Newmark*, como por ejemplo el propuesto por Richards y Elms (1979), el proyectista tiene la opción de anticipar el nivel de desempeño de un talud dado, o bien conocer los requerimientos de estabilidad que debe satisfacer un talud para un nivel de desempeño objetivo que se busque satisfacer bajo un sismo de diseño.

A partir de un conjunto de análisis numéricos realizados utilizando el software SLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd.), se presentan soluciones en forma de ábacos de diseño para distintos tipos de suelo, geometrías del talud, y niveles de sobrecarga distribuida uniformemente a nivel de coronamiento.

Palabras clave: *estabilidad de taludes, coeficientes sísmicos, análisis estático, análisis pseudoestático, equilibrio límite, diseño por desempeño.*

## Abstract

Typically, and in the context of engineering practice, the design of slopes under the action of both static and seismic loading has been addressed through stability criteria. Mathematically, this is expressed in terms of a factor of safety (FS), which is the ratio between the driving and resisting forces involved into the problem.

For this type of analyses, it is common to use the so-called *limit equilibrium methods*. They consider the balance of forces and/or moments in a soil mass, which is assumed to behave in a rigid-perfectly plastic way, over a series of potential failure surfaces. In this way, it has to be guaranteed that for all of them, the FS is greater than the minimum value defined in the design criteria of a certain project.

In particular, the seismic stability of slopes is usually analyzed by pseudo-static methods, in which the effects of a given earthquake over the structure are modeled through horizontal and/or vertical forces, which act in the center of gravity of the potentially unstable soil mass. These forces are expressed as a fraction of the weight of the soil wedge analyzed, and they have to properly represent the main design-earthquake characteristics; so in practice, it is complex to estimate them accurately.

For this reason, instead of designing through a force-based approach, it is preferable to do it over the basis of allowable displacements, which do not compromise the overall system stability and allow keeping it operative after the design-earthquake occurrence. This way to approach the seismic design of slopes is known as *performance-based design*.

In this work, a simple methodology is proposed to address the performance-based seismic design of homogeneous slopes that have been designed using static-stability design criteria. It looks for establish relationships between the FS associated to a certain static slope design and the corresponding critical pseudo-static seismic coefficient  $k_y$ . In this way, by using procedures based on the well-known Newmark's *sliding block method*, as proposed for example by Richards and Elms (1979), the engineer has the option to anticipate the level of performance for a given slope. In addition, it is possible to know the stability requirements that a certain slope has to satisfy for some pre-defined target performance level in a design-earthquake scenario.

From a series of analyses performed using the software SLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd.), solutions in the form of design charts are presented for different types of soil, slope geometries, and surcharge loads uniformly distributed over the top surface of the slope.

**Keywords:** *slope stability, seismic coefficients, static analysis, pseudo-static analysis, limit equilibrium, performance-based design.*

## 1 Introducción

La estabilidad de taludes, tanto naturales como artificiales, ha sido problema de estudio extendido por diversas áreas de la ingeniería. El movimiento de taludes es comúnmente conocido como deslizamientos de masas de tierra, las cuales están constituidas por varios tipos de materiales (roca, suelos, rellenos, etc.). Se pueden desarrollar debido a hechos eventuales como lluvias intensas, sismos, erosión del suelo y otros de carácter natural; pero también por la intervención del hombre, por ejemplo, a través de la deforestación y la construcción de terraplenes o grandes estructuras sobre terrenos con un grado potencial de deslizamiento. Los deslizamientos de taludes ocurren de diversas maneras y existe un cierto grado de incertidumbre respecto de su predictibilidad, rapidez de ocurrencia y área afectada. Sin embargo, existen patrones que ayudan a identificar áreas de potenciales deslizamientos, lo que permite dar tratamiento al talud, reduciendo y eventualmente eliminando el riesgo de falla.

Desde el punto de vista del origen del movimiento, los deslizamientos pueden clasificarse en las siguientes categorías (Sáez, 2015):

Derrumbes planares y rotacionales. El planar es un movimiento (que puede ser lento o rápido) de un bloque de material sobre una superficie de falla inclinada. El rotacional, es un movimiento que tiende a ocurrir lentamente, donde el material comienza a fallar por esfuerzo de corte a lo largo de una superficie cilíndrica (forma de cuchara u otro). En la parte superior del talud aparecen grietas y en la inferior ocurren levantamientos del material. Sus principales factores de causa son la inclinación excesiva del talud, y la baja resistencia al corte del material (cohesión y ángulo de fricción interna).

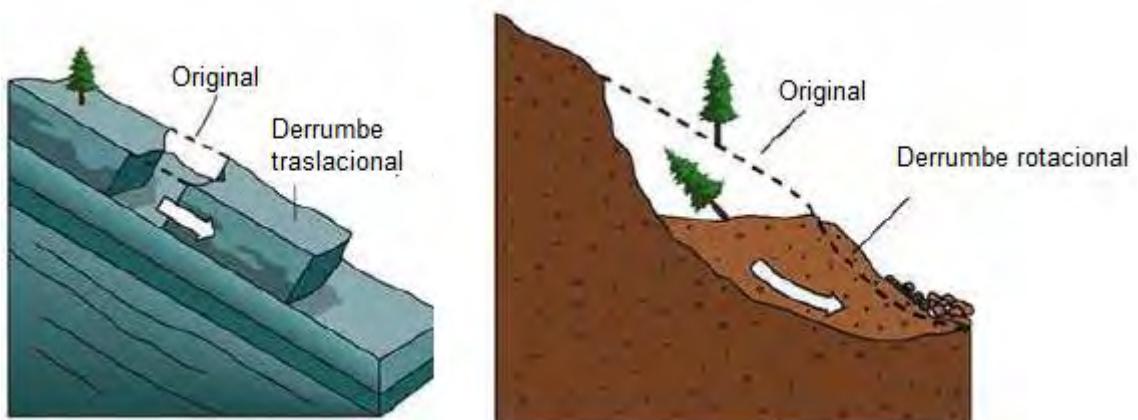


Figura 1-1, Derrumbes planares (o traslacionales) y derrumbes rotacionales. (Modificado de Grupo de geotecnia (2009), Universidad Católica de Valparaíso (UCV))

Desprendimientos de caída libre o volcamiento. El primero es el desprendimiento repentino de uno o más bloques de suelo o roca que descienden en caída libre. La volcadura, es la caída de un bloque de roca o suelo con respecto a un pivote ubicado debajo de su centro de gravedad. Los desprendimientos o caídas son muy relevantes en ingeniería, ya que la ocurrencia podría afectar estructuras cercanas u otros taludes que se encuentren en zonas inferiores, desencadenando importantes daños.



Figura 1-2 Desprendimientos de caída libre o falla por volcamiento. (Modificado de Grupo de geotecnia (2009), Universidad Católica de Valparaíso (UCV))

Este tipo de falla se presenta principalmente en suelos o rocas afectadas por la desintegración o descomposición, actuando en los sectores más débiles.

Aludes. Tienen la apariencia de un flujo viscoso, y pueden ser de dos tipos: seco o húmedo. El flujo seco es común en arenas y limos de textura uniforme, y se presenta por la acción de movimientos sísmicos (u otras cargas dinámicas), acción del viento o por el debilitamiento de alguna sección del talud. El flujo húmedo, es un movimiento generalmente lento, ocurre normalmente en suelos finos y se genera por el exceso de agua. Puede abarcar una gran longitud y terminar muy lejos en relación con el punto de origen. Este tipo de falla se puede originar producto de lluvias intensas, en lugares donde ha sido removida la capa vegetal o bien en zonas agrietadas.

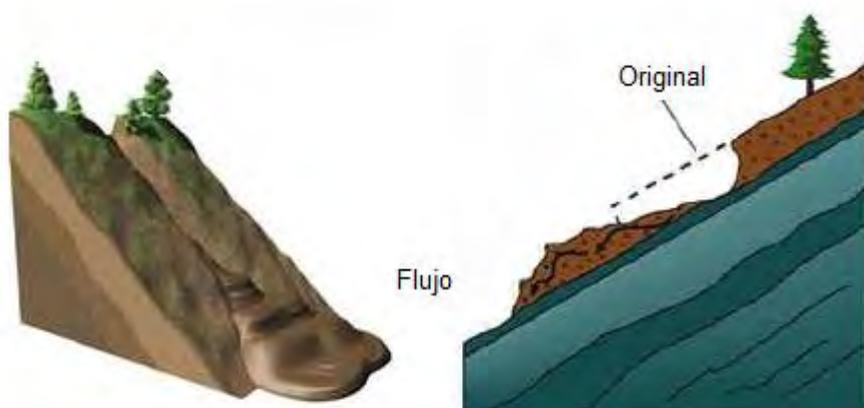


Figura 1-3, Falla por formación de aludes o flujos, húmedo y seco. (Modificado de Grupo de geotecnia (2009), Universidad Católica de Valparaíso (UCV))

En esta memoria se aborda únicamente una parte de la primera de estas categorías, es decir, la falla rotacional de taludes en suelo.

Desde el punto de vista mecánico, un deslizamiento (planar o rotacional) ocurre cuando los esfuerzos de corte originados por las fuerzas motrices (gravedad, sobrecarga, etc.) superan la resistencia del suelo sobre una cierta superficie de rotura. Por el contrario, si la resistencia del material es suficiente para el conjunto de sobrecargas, se dice que el diseño es seguro y que el talud es estable. Este hecho conlleva la necesidad de definir un indicador que permita cuantificar la seguridad con que un cierto talud ha sido diseñado. En ingeniería geotécnica, este indicador se conoce como Factor de Seguridad.

## 1.1 Factor de Seguridad

Se define el Factor de Seguridad (FS) como la relación entre el esfuerzo último resistente o resistencia al corte del suelo  $\tau_{\max}$  y el esfuerzo de corte  $\tau$  que se ejerce sobre la superficie potencial de falla en estudio.

$$FS = \frac{\tau_{\max}}{\tau} \quad (1)$$

La resistencia al corte se define como el máximo esfuerzo de cizalle que el suelo puede resistir, y, en general, está controlado por el esfuerzo efectivo normal ( $\sigma'_n$ ) y los parámetros efectivos de resistencia del material (cohesión  $c'$  y fricción interna  $\varphi'$ ). Una forma de expresar lo anterior es a través del criterio de rotura de Mohr-Coulomb:

$$\tau_{\max} = c' + \sigma'_n * \tan \varphi \quad (2)$$

De esta forma, el esfuerzo de corte solicitante máximo admisible se puede obtener respecto al valor límite de ruptura, en función del FS, según:

$$\tau = \frac{c'}{FS} + \sigma'_n * \frac{\tan \varphi}{FS} \quad (3)$$

El análisis de estabilidad de taludes consiste básicamente en el estudio y búsqueda de la superficie potencial de falla más desfavorable; esto es, aquella que tenga asociada el FS más bajo. Este factor dependerá del tipo de falla, materiales involucrados, peso de la masa potencialmente deslizante, fuerzas horizontales y verticales desarrolladas, y la acción de las presiones ejercidas por el agua (si es que existiese napa freática).

Para efectos de diseño, en general se recomienda un FS mínimo de 1,3 al término de la construcción, de 1,5 para cargas permanentes y de 1,1 a 1,3 para cargas rápidas poco frecuentes (US Army Corps of Engineers, 2003).

## 1.2 Análisis Estático

La estabilidad de taludes es un problema de equilibrio plástico. Cuando la masa de suelo se encuentra en estado de falla inminente, las fuerzas que producen el movimiento han llegado a ser iguales a la resistencia que opone el talud a ser desplazado.

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud pueden clasificarse en dos grandes grupos (Instituto Geológico y Minero de España, 1987):

- Métodos de cálculo de deformaciones. Consideran en conjunto las deformaciones del terreno y las leyes de la estática (relaciones fuerza-deformación). Su aplicación práctica es de alta complejidad y, por consiguiente, el problema debe tratarse aplicando el método de elementos finitos (MEF) u otros métodos numéricos, como por ejemplo, el método de diferencias finitas (MDF).

- Métodos de equilibrio límite (MEL). Se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio del material potencialmente inestable. No consideran las deformaciones del terreno, y suponen que la resistencia al corte del suelo se moviliza únicamente a lo largo de la superficie de deslizamiento y de forma simultánea en todos sus puntos. Se pueden clasificar en dos grupos: (i) métodos exactos, que son aplicables únicamente a casos de geometría sencilla, y (ii) métodos no exactos, en donde dada la geometría de la superficie de falla se tiene un problema hiperestático y deben hacerse simplificaciones que permitan su solución. En este grupo se encuentra el método de estabilidad global (hoy en desuso) y el método de las dovelas; que es el más utilizado en la práctica.

### 1.2.1 Método de las dovelas

Para abordar la resolución de problemas de estabilidad de taludes en el contexto de los MEL, se suele utilizar el denominado *método de las dovelas*.

Este método divide la cuña de suelo potencialmente deslizante en varias fajas o dovelas verticales y evalúa las condiciones de equilibrio para cada una de ellas (Figura 1-4).

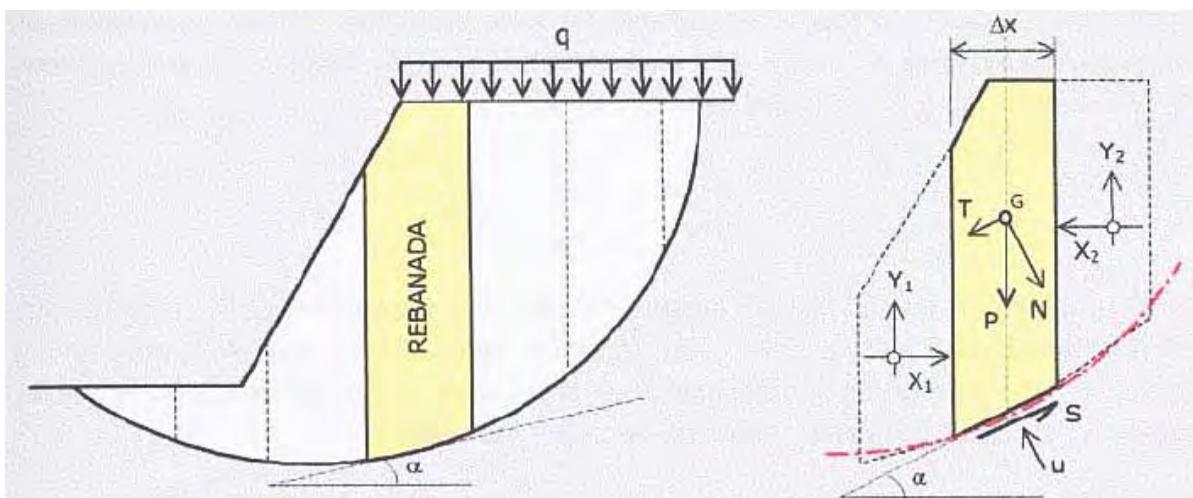


Figura 1-4, Esquema de método de las dovelas. (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000)

El procedimiento de las dovelas permite considerar la acción de presiones intersticiales debidas a la presencia de agua, la existencia de cargas externas, y materiales de diferentes características (pesos y parámetros resistentes). Además, puede ser aplicado a superficies de falla de geometría arbitraria (planas, circulares, compuestas, etc.). Este enfoque permite resolver una gran cantidad de problemas prácticos de ingeniería geotécnica, entregando resultados que equilibran razonablemente exactitud y recursos computacionales.

Siguiendo la idea detrás del procedimiento de las dovelas, se han desarrollado una serie de métodos de análisis, los cuales pueden clasificarse en dos grandes grupos (Instituto Geológico y Minero de España, 1987):

- Métodos Aproximados. No cumplen todas las ecuaciones de la estática. Dentro de este grupo se encuentran los métodos de Fellenius, Bishop simplificado y Janbu.
- Métodos Precisos. Cumplen con todas las ecuaciones de la estática. Destacan dentro de esta categoría los métodos de Morgenstern – Price, Bishop modificado y Spencer.

El método de Fellenius (1927) es aplicable para superficies de falla circulares y sólo satisface el equilibrio de momentos. Se basa en la suposición de que la resultante de las fuerzas laterales en las caras de las rebanadas actúa paralelamente a la base de las mismas.

El método de Janbu (1954) es aplicable para cualquier forma de superficie de deslizamiento, asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales, y solo satisface el equilibrio de fuerza. Generalmente, entrega valores de FS que son más bajos que los calculados con métodos que cumplen con todas las ecuaciones de la estática (es un método conservador).

El método de Bishop simplificado (1955) es aplicable para fallas circulares. Satisface el equilibrio de momentos y de fuerzas verticales, pero no el de fuerzas horizontales. Este método ofrece suficiente precisión para cálculos rápidos, no alejándose significativamente de métodos más precisos.

El método de Morgenstern-Price (1965) es aplicable para cualquier tipo de falla, y satisface tanto el equilibrio de fuerzas como el de momentos. Si bien es un método laborioso para aplicarlo de forma manual, ha sido satisfactoriamente implementado en software computacional, de modo que actualmente se puede utilizar de forma regular en la resolución de casos complejos. Se basa en el supuesto de que la relación entre las fuerzas tangenciales y normales en las caras laterales de las dovelas se ajusta a una función, que es necesario definir de antemano, multiplicada por un parámetro. Esta relación se expresa como:

$$X = E \lambda f(x) \quad (4)$$

donde  $f(x)$  es una función (suele utilizarse una media senoide),  $\lambda$  es el porcentaje de la función utilizada (como decimal),  $E$  la fuerza normal entre dovelas y  $X$  la respectiva fuerza de corte.

El método de Spencer (1967) también es aplicable para cualquier tipo de falla, satisface ambos equilibrios (de fuerzas y momentos), y es muy similar a la metodología de Morgenstern-Price; con la excepción de que en este caso la función  $f(x)$  utilizada es una constante.

La figura 1-5 muestra la clasificación de los métodos de cálculo anteriormente mencionados.

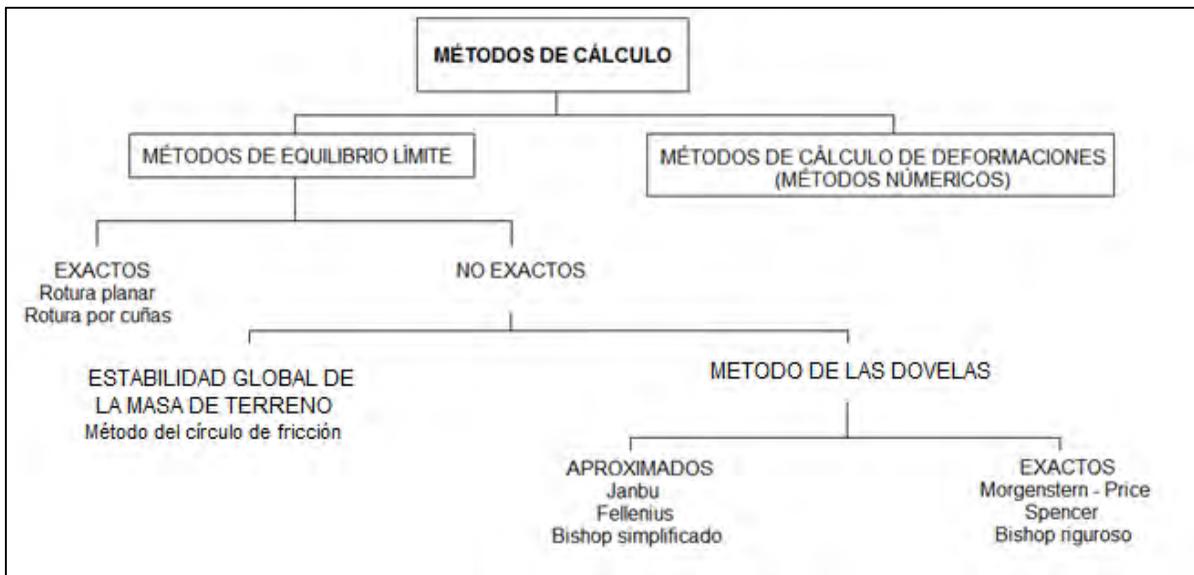


Figura 1-5, Clasificación de los métodos de cálculo. (Modificado de Instituto Geológico y Minero de España. (1987). Manual de Taludes. (1ª Edición). Madrid, España)

## 1.2.2 Gráficos de estabilidad para el diseño de taludes homogéneos

Los gráficos de estabilidad (o *stability charts*) constituyen una de las herramientas clásicas utilizadas en la práctica para realizar una evaluación preliminar de la estabilidad de un talud. Taylor (1937) fue el primer autor que propuso un set de soluciones gráficas para calcular (de forma iterativa) el FS de taludes homogéneos en suelo. Una de las desventajas de los gráficos de Taylor es que no definen la ubicación de la superficie de falla crítica. Por este motivo, sobre la base de este trabajo, una serie de investigadores han desarrollado métodos de diseño mejorados (Michalowski, 2002; Baker, 2003; Steward et al., 2011).

Uno de los problemas asociados al uso de gráficos de estabilidad para calcular el FS de taludes es la cantidad de variables involucradas, como son: la altura del talud  $H$ , el ángulo de inclinación  $\beta$ , los parámetros de resistencia al corte del suelo ( $c$  y  $\varphi$ ), el peso unitario del suelo  $\gamma$ , y la sobrecarga  $q$ . Dado lo anterior, estos ábacos están formulados usualmente en términos de parámetros adimensionales, que ayudan a reducir el número de variables y hacen a las soluciones gráficas más concisas. Los principales parámetros adimensionales utilizados en estabilidad de taludes son: (i)  $\tan\varphi$ , y (ii) el número de estabilidad  $N=c/\gamma H$  (Taylor, 1948).

Combinando  $N$  y  $\tan\varphi$ , Duncan y Wright (1980) definieron otro parámetro adimensional de utilidad,  $\lambda$ , como:

$$\lambda = \frac{\gamma H \tan\varphi}{c} \quad (5)$$

Para un talud dado, Jiang y Yamagami (2006) han demostrado que la posición de la superficie de falla crítica está asociada únicamente con  $\lambda$ , y que ésta se vuelve más superficial en la medida que el valor de  $\lambda$  crece.

Recientemente, Klar et al. (2011) propusieron un nuevo enfoque para la determinación del FS, el cual considera la relación entre  $\tan\varphi$  y  $N$  en un estado límite ( $FS_{est}=1,0$ ), lo que se conoce como línea g o “g-line” (Figura 1-6). De este modo, un talud homogéneo con parámetros adimensionales  $c/\gamma H$  y  $\tan\varphi$  ubicado sobre la línea g es estable. En otras palabras, el FS correspondiente es mayor que 1,0, por cuanto los parámetros característicos del talud son mayores que cualquier otra combinación que pueda estar asociada a falla.

La gráfica 1-6 muestra como una recta cualquiera (OA) cruza la línea g. La intersección entre ambas entrega un punto de coordenadas ( $X_2, Y_2$ ) asociado a un  $FS=1,0$ , mientras que el otro punto ( $X_1, Y_1$ ) corresponde al talud que se desea analizar. De esta forma, bajo el supuesto de que el grado de movilización de la resistencia es igual en la componente cohesiva y friccional del suelo, el FS se puede estimar (sin necesidad de iteraciones) como:

$$FS = \frac{a}{b} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{x_1}{x_2} \quad (6)$$

Esta expresión es idéntica a la definición clásica de FS utilizada en estabilidad de taludes:

$$FS = \frac{c + \sigma \tan\varphi}{c_m + \sigma \tan\varphi_m} = \frac{\tan\varphi}{\tan\varphi_m} = \frac{c}{c_m} \quad (7)$$

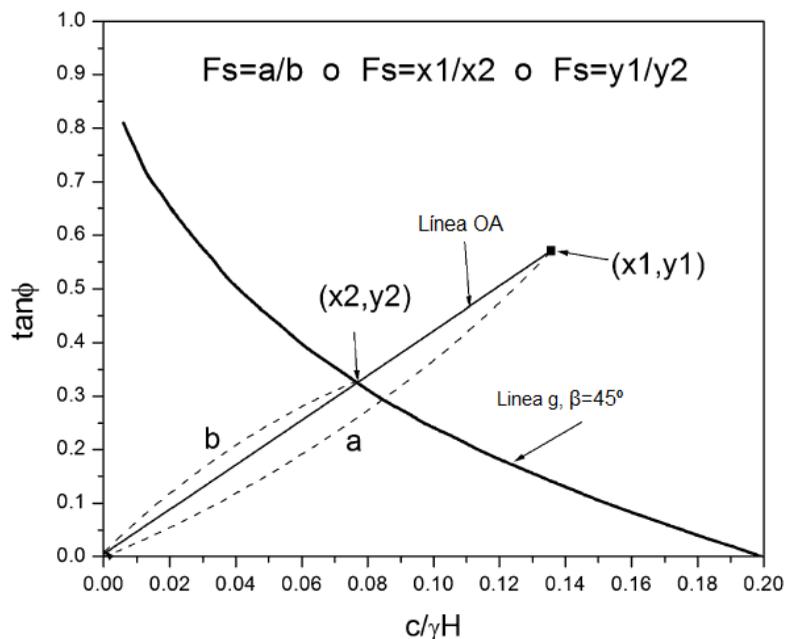


Figura 1-6, Método para determinar el factor de seguridad usando el concepto de la línea g. (Adaptado de Klar et al., 2011)

Una característica interesante del concepto de la línea g es que permite construir, utilizando la expresión (6) curvas correspondientes a cualquier FS deseado; lo cual es particularmente útil para propósitos de diseño.

Por otro lado, la pendiente de la línea OA corresponde al parámetro  $\lambda$ . Así, los puntos sobre esta línea presentan el mismo modo de falla. De acuerdo a Klar et al. (2011), pueden ocurrir tres modos de falla, dependiendo de dónde se ubica la combinación de  $c$  y  $\tan \phi$  del talud respecto de la línea g (Figura 1-7):

- **Falla superficial:** este tipo de falla se encuentra entre el plano inclinado y la horizontal de la base del talud. El círculo de falla se desarrolla desde el pie hasta cualquier punto de la horizontal del coronamiento del talud.
- **Falla Intermedia:** este tipo de falla es similar a la anterior, pero más profunda; extendiéndose bajo la horizontal de la base del talud. El círculo de falla se desarrolla desde el pie hasta cualquier punto de la horizontal del coronamiento del talud.
- **Falla profunda:** como su nombre lo dice, es la más profunda entre las tres identificadas. El círculo de falla se desarrolla entre un punto de la base y cualquier punto de la horizontal del coronamiento del talud.

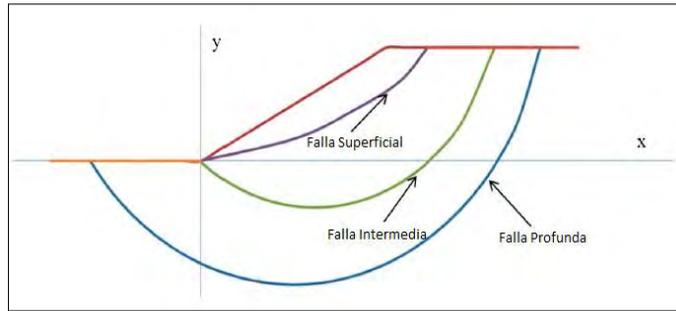


Figura 1-7, Distintos círculos de falla. Falla superficial, intermedia y profunda. (Modificado de Sun y Zhao, 2013)

En este sentido, en la medida que la cohesión  $c$  tiende a cero, se espera un modo de falla más superficial; mientras que en la medida que  $\phi$  se reduce (o que  $H$  se incrementa) el modo de falla se vuelve más profundo.

### 1.3 Análisis Sísmico

Los terremotos pueden causar importantes daños en estructuras de tierra, sobre todo debido a la generación de grandes deslizamientos. Una forma aproximada de incluir los efectos que puede producir un determinado sismo sobre un talud, es considerar que las fuerzas inducidas por este fenómeno son incorporadas al equilibrio como fuerzas horizontales y verticales  $F_H$  y  $F_V$ , respectivamente. La magnitud de estas fuerzas es igual al peso de la masa potencialmente deslizante ( $W$ ) multiplicada por unos coeficientes  $k_h$  y  $k_v$ , que dependen de las características del sismo de diseño. Así, se transforma el problema sísmico en uno pseudoestático equivalente.

Las fuerzas a considerar en el análisis pseudo-estático son (Kramer, 1996):

$$F_h = \frac{\alpha_1 * a_h * W}{g} = K_h * W \quad (8)$$

$$F_v = \frac{\alpha_2 * a_v * W}{g} = K_v * W \quad (9)$$

En donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son constantes menores que 1,0.  $a_h$  y  $a_v$  son las aceleraciones horizontales y verticales representativas del sismo de diseño,  $k_h$  y  $k_v$  los coeficientes pseudo-estáticos adimensionales (o coeficientes sísmicos) y  $W$  es el peso de la masa de suelo susceptible de fallar.

En la práctica, la aceleración vertical suele despreciarse para efectos de un análisis pseudo-estático (Martínez et al., 2011). Esto se debe a que se considera que la ocurrencia de los máximos horizontales y verticales difícilmente ocurrirá en un mismo instante de tiempo.

La elección de las aceleraciones máximas a utilizar en el análisis, y la relación entre éstas y los respectivos coeficientes sísmicos, dependerá del nivel de amenaza considerado para el proyecto. En general, en este tipo de análisis se especifican valores de  $k_h$  cercanos a 0,15 junto con factores de seguridad mínimos del orden de 1,15 (Seed, 1979).

### 1.3.1 Práctica chilena para la estimación de coeficientes sísmicos

Generalmente, el valor de  $k_h$  se obtiene como un porcentaje de la aceleración máxima del suelo ( $a_{\max}$ ). En Chile, el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas (2002) sugiere utilizar como primera aproximación un valor de  $k_h = 0,5 A'_0$ , siendo  $A'_0$  el coeficiente de aceleración efectiva máxima definida por la norma chilena NCh433:1996-mod.2009 de acuerdo a la zonificación sísmica del país.

Zona Sísmica	$A'_0$
1	0,2
2	0,3
3	0,4

Tabla 1-1, Coeficientes de aceleración efectiva máxima. (Elaboración propia, 2016)

Otra alternativa es utilizar las expresiones sugeridas por Saragoni (1993):

$$k_h = \begin{cases} \frac{0,3 * a_{\max}}{g} & , \text{ si } a_{\max} \leq 0,67 * g & (10) \\ 0,22 * \left(\frac{a_{\max}}{g}\right)^{0,33} & , \text{ si } a_{\max} > 0,67 * g & (11) \end{cases}$$

Donde  $a_{\max}$  representa la aceleración máxima horizontal del sismo. Esta proposición entrega coeficientes sísmicos que varían típicamente entre 0.10 y 0.22. Se recomienda el uso de estas ecuaciones cuando se dispone de un estudio de riesgo sísmico que permita determinar apropiadamente el valor de  $a_{\max}$ .

La razón detrás de que  $k_h$  sea una fracción de la aceleración máxima del suelo es porque las fuerzas sísmicas son de corta duración y cambian de dirección muchas veces durante el sismo, por lo cual en un análisis pseudo-estático sería extremadamente conservador suponer la máxima aceleración actuando de forma permanente sobre la estructura en una sola dirección.

### 1.3.2 Métodos para el cálculo de desplazamientos sísmicos en taludes

Newmark (1965) propuso un procedimiento para calcular el desplazamiento de taludes en presencia de eventos sísmicos, denominado *método del bloque deslizante*. Este análisis supone que el movimiento del talud puede asimilarse al de un bloque rígido que se apoya sobre un plano inclinado (Figura 1-8). Se define la aceleración crítica del bloque como aquella que inicia el deslizamiento, lo que equivale en el talud a la aceleración (expresada como función del coeficiente sísmico) para la cual el FS resulta igual a 1,0 en un análisis pseudo-estático.

Cuando las aceleraciones exceden el valor límite el bloque comienza a moverse, lo cual persiste hasta que la velocidad del bloque es nula (momento en que el bloque se detiene). Así el desplazamiento final del bloque corresponderá a la suma de los desplazamientos acumulados en los ciclos de aceleración en los que se supere el umbral de resistencia.

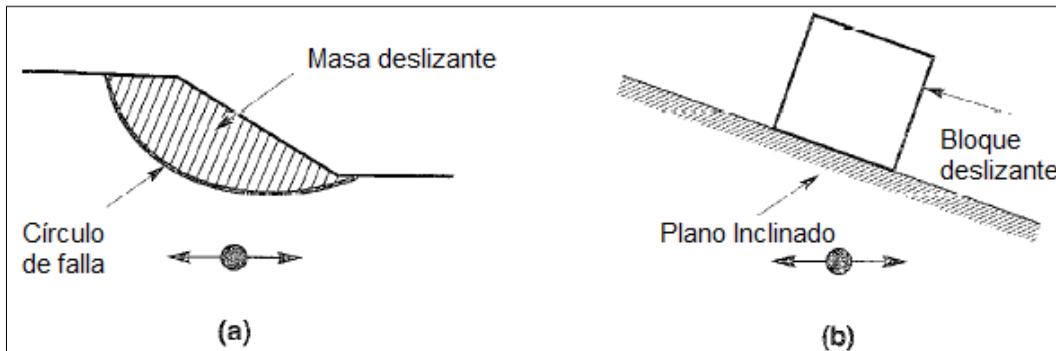


Figura 1-8, Analogía de Newmark, (a) masa potencialmente deslizante, (b) bloque rígido deslizante. (Modificado de Kramer, 1996)

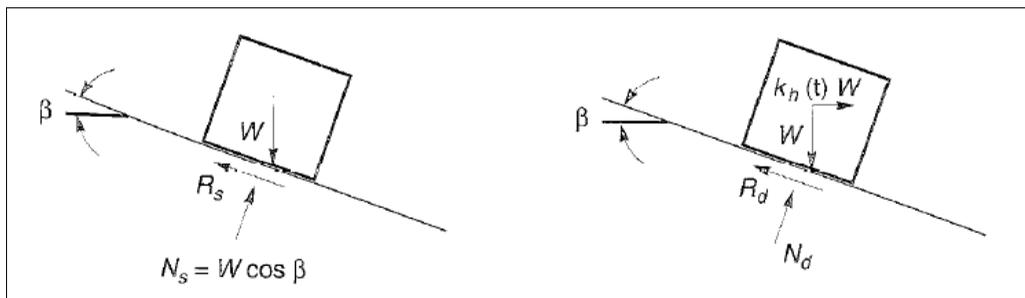


Figura 1-9, Analogía del bloque rígido deslizante en condiciones estáticas y dinámicas. (Kramer, 1996)

La Figura 1-10 ilustra cómo se pueden obtener los desplazamientos permanentes de un talud, para el caso de un registro sísmico real, utilizando el método del bloque deslizante de Newmark. Conociendo el valor de la aceleración crítica o de fluencia  $a_y$  del talud (aquella que produce  $FS=1,0$  en un análisis de estabilidad pseudo-estático), se procede a la doble integración de aquellos pulsos de aceleración en donde los valores del registro son mayores que  $a_y$ . El valor acumulado al final del registro corresponde al desplazamiento sísmico permanente de la masa de suelo.

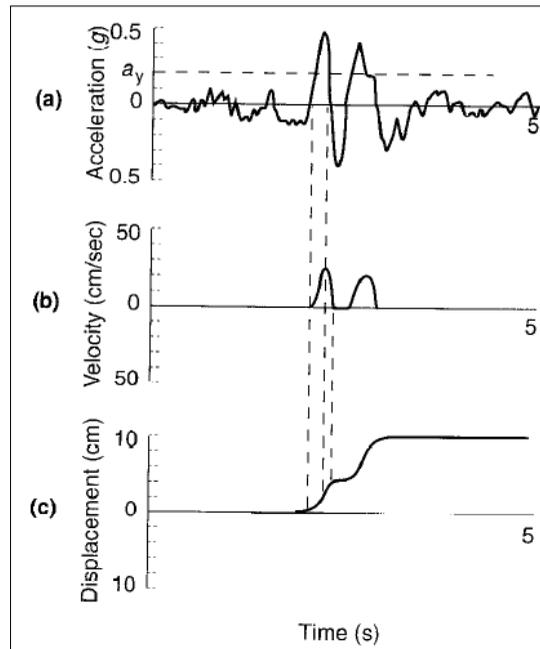


Figura 1-10, Desplazamientos permanente inducidos por eventos sísmicos, método de Newmark. (Kramer, 1996)

En este método se asume que el bloque es rígido y perfectamente plástico, que no existe pérdida de resistencia en el suelo, y que las deformaciones permanentes ocurren solamente si el esfuerzo dinámico supera la resistencia al deslizamiento del mismo. En el caso de suelos, estas suposiciones son razonables solo para desplazamientos relativamente pequeños. Del mismo modo, este método no es aplicable si el suelo es susceptible de sufrir licuación o de experimentar reblandecimiento o *softening* (Day, 2006).

En el apartado 1.3.3, se refleja que en esta memoria no se utiliza directamente el método de Newmark, sino que una proporción basada en una ecuación que permite estimar los desplazamientos sobre la base de las características del sismo y el valor del coeficiente sísmico crítico ( $k_y$ ). Esta ecuación es una envolvente superior de una serie de registros sísmicos a las cuales si se les aplico el método de Newmark.

### 1.3.3 Métodos de diseño basados en desempeño

Ante la ocurrencia de un sismo, es posible que ocurran deslizamientos en los taludes que forman parte de diversas estructuras. Esto se debe a que, por una parte, se produce un aumento de las fuerzas solicitantes debido a la inercia de los materiales y, por otra parte, la resistencia al corte del suelo tiende a disminuir debido a la carga cíclica. Dichos deslizamientos, si son excesivos, pueden provocar importantes pérdidas económicas e incluso cobrar vidas humanas. Para prevenir este tipo de daños catastróficos es fundamental que el eventual desplazamiento sísmico de la masa de suelo sea menor que ciertos límites permisibles; los cuales deben ser tales que permitan mantener el talud estable y operativo una vez concluido el terremoto.

Esta forma de enfrentar el diseño sísmico de taludes se conoce bajo el nombre de diseño por desempeño, y en contraposición a los métodos basados en fuerzas, apunta a controlar las consecuencias que puede llegar a generar el sismo sobre la estructura; definiendo de antemano cuáles son los niveles de daño que se pueden aceptar para un escenario de diseño dado.

A partir de la idea del bloque deslizando de Newmark, se han desarrollado una serie de métodos basados en desempeño para la estimación de desplazamientos sísmicos en taludes (Richards y Elms, 1979; Whitman y Liao (1984); Cai y Bathurst, 1996; Jibson (2007); Rathje y Saygili, 2009; entre otros). Estos procedimientos buscan relacionar la aceleración crítica del talud y los parámetros característicos del sismo de diseño, con los desplazamientos sísmicos esperados para la estructura de tierra.

Uno de los métodos más utilizados en la práctica para el diseño por desempeño de taludes y estructuras afines, y que presenta en general una buena concordancia con los desplazamientos asociados a los registros sísmicos chilenos (Viejo, 2016), es el propuesto por Richards y Elms (1979). Dichos autores desarrollaron una expresión analítica que representa una envolvente superior de los desplazamientos obtenidos por Franklin & Chang (1977) para una serie de registros sísmicos a los cuales se les aplicó la metodología del bloque deslizando de Newmark (1965) (Figura 1-10)

Richards y Elms entregaron una expresión que relaciona los desplazamientos esperados en la estructura, con la aceleración y la velocidad máximas del sismo de diseño para un coeficiente de aceleración crítico ( $k_y$ ) dado:

$$d = 0,087 * \frac{V_{m\acute{a}x}^2}{a_{m\acute{a}x}} * \left( \frac{k_y}{a_{m\acute{a}x}/g} \right)^{-4} \quad (12)$$

De esta manera, el diseñador puede seleccionar un cierto nivel de desplazamientos que desea que no sea superado durante un sismo dado y entonces diseñar el talud de forma tal que el coeficiente pseudoestático crítico  $k_y$  sea mayor o igual al obtenido por medio de la ecuación 12. Así se garantiza (de acuerdo al método) que el desplazamiento máximo no superará el valor de  $d$  escogido al inicio del proceso de diseño.

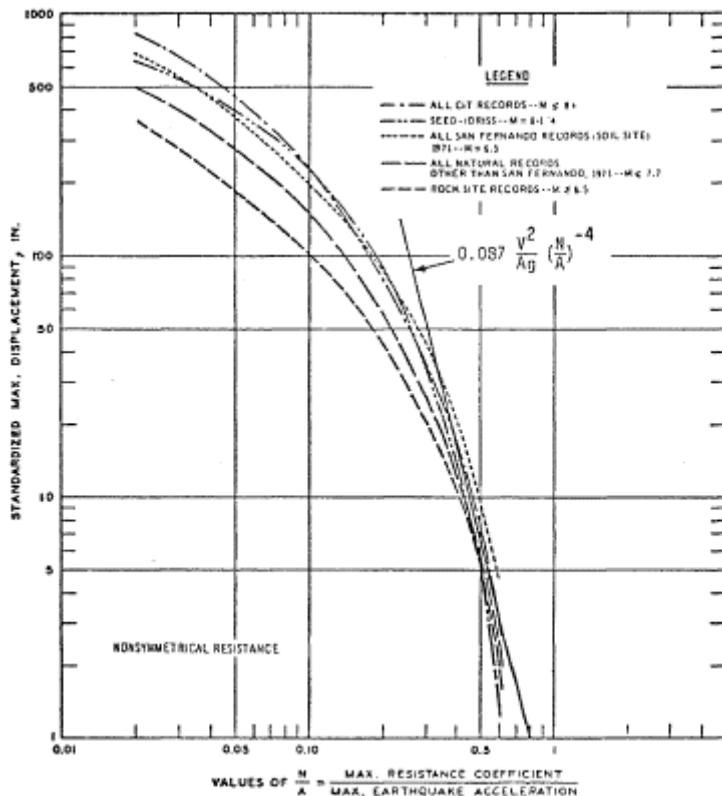


Figura 1-11, Envolvente superior de desplazamientos sísmicos normalizados. (Richards y Elms, 1979)

## 2 Planteamiento del problema

Una de las limitaciones que presentan los métodos de análisis de estabilidad de taludes de tipo pseudo-estáticos, y general los métodos basados únicamente en equilibrio de fuerzas, es que no permiten tener una idea de los desplazamientos que se pueden llegar a inducir en el suelo si es que las fuerzas de diseño son superadas. Por otro lado, las fuerzas utilizadas en el análisis deben estimarse de forma tal de representar razonablemente las características principales del sismo de diseño, lo que en la práctica resulta complejo de llevar a cabo (Duncan, 1996).

Por este motivo, en lugar de diseñar sobre la base de fuerzas, suele ser preferible diseñar utilizando una filosofía de diseño por desempeño; es decir, sobre la base de ciertos desplazamientos admisibles que no comprometan la estabilidad global del talud y permitan mantenerlo operativo luego de concluido el sismo.

En este trabajo se propone una metodología simple para abordar el diseño sísmico por desempeño de taludes homogéneos que han sido proyectados bajo criterios tradicionales de estabilidad estática. Se busca establecer relaciones entre el FS asociado a un determinado diseño estático y el correspondiente coeficiente sísmico crítico  $k_y$  del talud.

De esta manera, utilizando procedimientos como por ejemplo el propuesto por Richards y Elms (1979), el proyectista tiene la opción de anticipar el nivel de desempeño de un talud dado, o bien conocer los requerimientos de estabilidad que debe satisfacer un talud para un nivel de desempeño objetivo que se busque satisfacer bajo un sismo de diseño.

A partir de un conjunto de análisis numéricos realizados utilizando el software SLOPE/W 2012 (GEO-SLOPE International Ltd.), se presentan soluciones en forma de ábacos de diseño para distintos tipos de suelo, geometrías del talud, y niveles de sobrecarga distribuida uniformemente a nivel de coronamiento.

### 3 Metodología

La metodología de diseño propuesta consta de dos etapas fundamentales: (1) selección del FS estático deseado del talud, y (2) determinación del coeficiente pseudoestático de aceleración crítico  $k_y$ . Con esta información, se pueden estimar los desplazamientos sísmicos esperados de la estructura, utilizando el procedimiento descrito en el apartado 1.3.3.

#### 3.1 Gráficos de diseño para la selección del FS estático deseado

Se desarrollan curvas de diseño, en la forma de gráficos de estabilidad, para la selección del FS estático de taludes homogéneos bajo la acción de cargas tanto de peso propio ( $W$ ) como de sobrecarga ( $q$ ) uniformemente distribuida a lo largo del coronamiento del talud. Se considera dos valores para  $q$ : 0 y 20 kPa, y tres ángulos de inclinación del talud: 15°, 30° y 45°.

Utilizando el software SLOPE/W (uno de los módulos del programa GeoStudio 2012) se efectúa una serie de análisis para determinar valores de  $\tan \phi$  y  $N=c/\gamma H$  en estado de equilibrio límite (FS=1,0). Para estos efectos, se utiliza el método de las dovelas, conforme a la formulación de Morgenstern-Price (1965). En todos los análisis realizados, se considera un suelo seco, sin presencia de nivel freático en el sitio.

Sobre la base del concepto de la línea  $g$  (Klar et al., 2011; Sun y Zhao, 2013), y usando la ecuación (6), se presentan gráficos para cada valor de  $q$  y  $\beta$ ; correspondientes a FS=1,3; 1,4; y 1.5.

#### 3.2 Gráficos de diseño para la determinación del coeficiente pseudoestático de aceleración crítico $k_y$

Usando el software SLOPE/W, se efectúa una serie de análisis de tipo pseudoestático (despreciando la fuerzas de inercia verticales) para determinar el valor de  $k_y$  de cada uno de los taludes considerados en el desarrollo de los gráficos de diseño estáticos. Nuevamente, se utiliza la formulación de Morgenstern-Price (1965) y se considera un suelo seco, sin presencia de nivel freático en el sitio.

Dado que cualquier talud homogéneo puede ser completamente definido por tres parámetros:  $\beta$ ,  $q$  y  $\lambda$ ; se presentan gráficos de diseño que relacionan  $\lambda$  y  $k_y$  para los diferentes valores del ángulo de inclinación del talud y sobrecarga considerados en este trabajo.

En particular, los resultados se expresan como función del coeficiente normalizado  $\lambda/\lambda_{ref}$ , en donde  $\lambda_{ref}$  **corresponde a un valor de referencia, que se obtiene de los gráficos de estabilidad estáticos para una cohesión (en kPa) igual al FS de diseño del talud** (con el resto de los parámetros de diseño  $H$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  y  $q$  constantes).

Esto puede expresarse por medio de la relación:

$$\left. \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \right|_{FS} = \frac{\lambda(c, \varphi, \gamma, H, \beta, q)}{\lambda_{ref}(c = FS[kPa], \varphi, \gamma, H, \beta, q)} \quad (13)$$

### 3.2.1 Curvas de diseño simplificadas

Para efectos de uso práctico de los gráficos desarrollados, se proponen curvas de diseño simplificadas. Estas se obtienen por medio de la selección de los puntos de inflexión o “quiebres” más sobresalientes que presenta cada gráfico.

Para los puntos seleccionados se establece una relación entre los coeficientes sísmicos horizontales críticos y los factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}$ ) asociados, por medio de una regresión lineal simple.

La regresión de cada punto entrega una ecuación única, la cual es evaluada con los valores de los  $FS_{est}$ . Finalmente, se obtienen las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos, asociadas a cada  $FS_{est}$  analizado.

Con esto, se construye un ábaco para cada inclinación y para cada valor de la sobrecarga externa.

### 3.3 Descripción geométrica y mecánica del talud

A objeto de estandarizar los modelos computacionales realizados, se analizan tres secciones transversales, todas con la misma altura de talud ( $H=10m$ ). Los largos  $L$  (en metros), por su parte, van desde el pie del talud hasta la proyección vertical del coronamiento del mismo. Los ángulos de inclinación  $\beta$  para cada sección, como ha sido mencionado, son:  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ . En la figura 3-1 se muestra las propiedades geométricas generales de los taludes estudiados, mientras que en la tabla 3-1 se resume los valores que definen la geometría de cada uno de ellos.

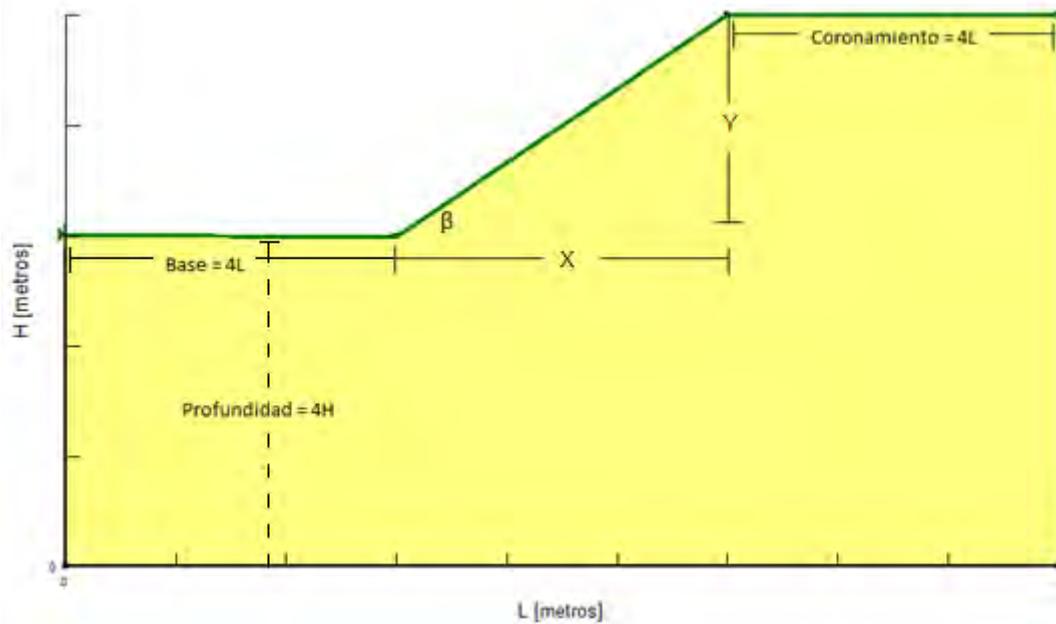


Figura 3-1, Propiedades geométricas generales de los taludes estudiados. (GEO-SLOPE International Ltd. (2012) GeoStudio – Slope/W (2012), licencia completa, [Programa de computador]. GEOSLOPE, International Ltd, Calgary, AB, Canadá). (Elaboración propia, 2016)

Sección	Angulo de inclinación $[\beta]$	L [m]	H [m]
1	15°	37,32	10
2	30°	17,32	10
3	45°	10,00	10

Tabla 3-1, Valores geométricos de secciones transversales estudiadas. (Elaboración propia, 2016)

Un aspecto importante a considerar en el desarrollo de los modelos, tiene que ver con la ubicación de los bordes del dominio. El programa computacional debe tener libertad de búsqueda para así encontrar la superficie de falla más desfavorable para las geometrías dadas. En caso contrario surgen errores, por ejemplo, salida de márgenes especificados, problemas de convergencia, entre otros.

Se encontró que, para los casos de estudio, con una extensión del modelo en vertical de 4H (medida desde la línea del pie del talud) y una extensión en horizontal de 4L, tanto hacia la izquierda del pie del talud como hacia la derecha del coronamiento del mismo, se obtienen resultados satisfactorios (Figura 3-1).

En este estudio se considera un peso unitario promedio de los materiales  $\gamma=18\text{kN/m}^3$ . Este valor representa de forma razonable a la variedad de suelos involucrados en el análisis, a la vez que permite reducir el número de ejecuciones computaciones requeridas para el desarrollo de los gráficos de diseño propuestos.

## 4 Resultados

### 4.1 Gráficos de diseño para la selección del FS estático deseado

#### 4.1.1 Caso estático sin sobrecarga ( $q=0$ )

Con los datos obtenidos de cada modelo, se ordenan los valores en tablas con la descripción de cada parámetro para el posterior análisis. Las tablas 4-1, 4-2, 4-3 y 4-4 presentan los valores de los parámetros adimensionales ( $\tan \phi$  y  $c/\gamma H$ ) que dan origen a las curvas de factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}=1,0$ ;  $FS_{est}=1,3$ ;  $FS_{est}=1,4$  y  $FS_{est}=1,5$ ), las cuales se visualizan en las figuras 4-1, 4-2, 4-3 y 4-4. Los valores entregados son para cada una de las inclinaciones  $\beta$  y con sobrecarga  $q=0$ .

-  $FS_{est} = 1,0$

TALUD 45°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$
1,0	45	0	45,00	1,00	0,00	18	10	0,000
1,0	45	0	39,50	0,82	1,00	18	10	0,006
1,0	45	0	38,85	0,81	1,25	18	10	0,007
1,0	45	0	35,20	0,71	2,50	18	10	0,014
1,0	45	0	30,10	0,58	5,00	18	10	0,028
1,0	45	0	25,70	0,48	7,50	18	10	0,042
1,0	45	0	21,70	0,40	10,00	18	10	0,056
1,0	45	0	18,10	0,33	12,50	18	10	0,069
1,0	45	0	15,00	0,27	15,00	18	10	0,083
1,0	45	0	9,50	0,17	20,00	18	10	0,111
1,0	45	0	4,40	0,08	25,00	18	10	0,139
1,0	45	0	0,00	0,00	31,75	18	10	0,175
TALUD 30°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$
1,0	30	0	30,00	0,58	0,00	18	10	0,000
1,0	30	0	26,00	0,49	1,00	18	10	0,006
1,0	30	0	25,35	0,47	1,25	18	10	0,007
1,0	30	0	22,90	0,42	2,50	18	10	0,014
1,0	30	0	19,00	0,34	5,00	18	10	0,028
1,0	30	0	15,90	0,28	7,50	18	10	0,042
1,0	30	0	13,25	0,24	10,00	18	10	0,056
1,0	30	0	8,45	0,15	15,00	18	10	0,083
1,0	30	0	4,90	0,09	20,00	18	10	0,111
1,0	30	0	2,15	0,04	25,00	18	10	0,139
1,0	30	0	0,00	0,00	32,10	18	10	0,171
TALUD 15°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$
1,0	15	0	15,00	0,27	0,00	18	10	0,000
1,0	15	0	12,85	0,23	1,00	18	10	0,006
1,0	15	0	12,55	0,22	1,25	18	10	0,007
1,0	15	0	11,25	0,20	2,50	18	10	0,014
1,0	15	0	8,90	0,16	5,00	18	10	0,028
1,0	15	0	7,45	0,13	7,50	18	10	0,042
1,0	15	0	6,20	0,11	10,00	18	10	0,056
1,0	15	0	3,95	0,07	15,00	18	10	0,083
1,0	15	0	2,15	0,04	20,00	18	10	0,111
1,0	15	0	1,00	0,02	25,00	18	10	0,139
1,0	15	0	0,00	0,00	29,48	18	10	0,164

Tabla 4-1, Parámetros adimensionales ( $\tan \phi$  y  $c/\gamma H$ ), para la construcción de curvas  $FS_{est}=1,0$  para cada inclinación ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de  $FS_{est}=1,0$  asociadas a cada inclinación. (Figura 4-1)

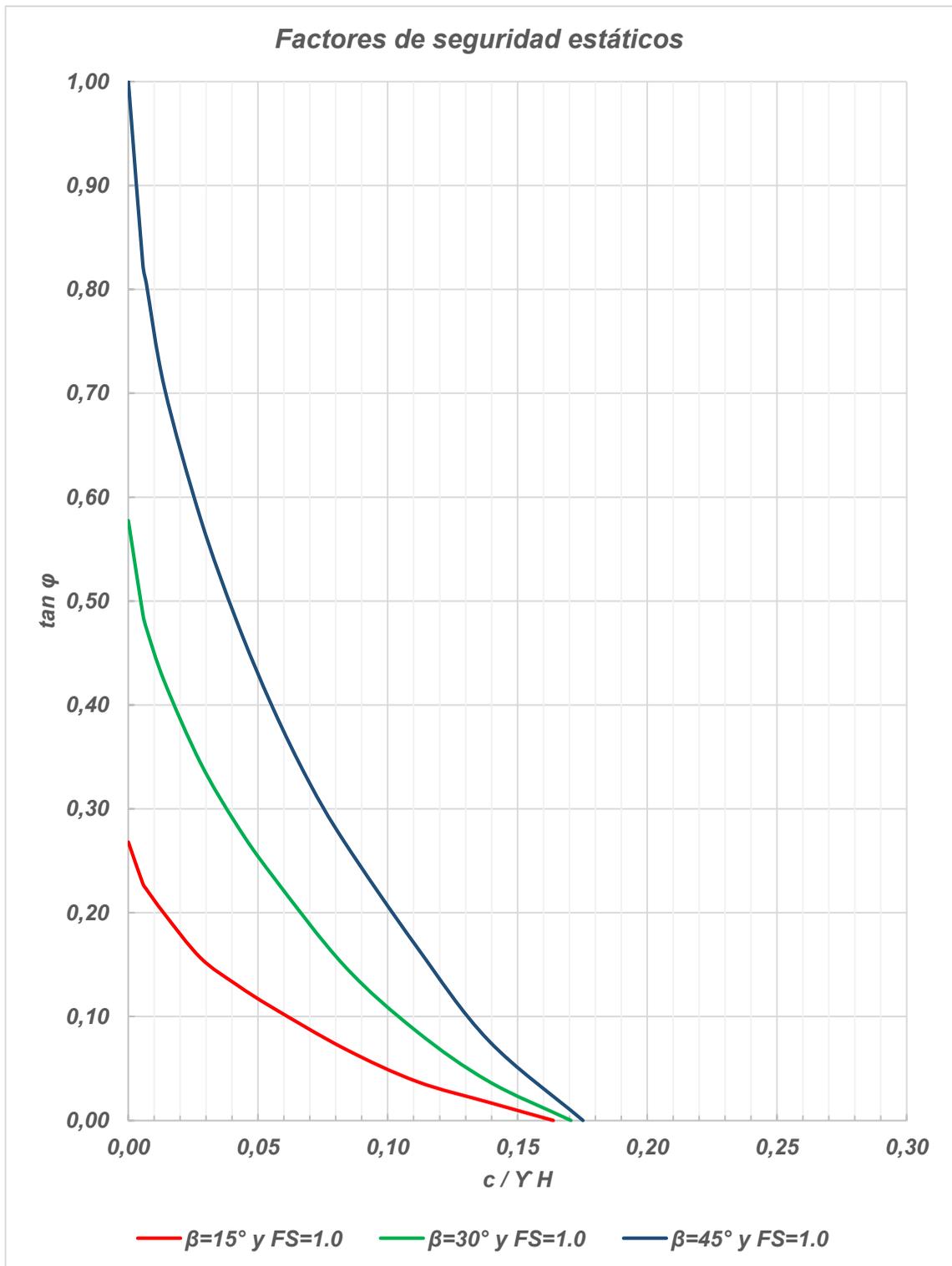


Figura 4-1. Curvas de factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}=1,0$ ) para cada inclinación ( $q=0$ ). (Elaboración propia 2016)

-  $FS_{est}=1,3$

TALUD 45°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m3]	H [m]	c / $\gamma H$
1,3	45	0	52,43	1,30	0,00	18	10	0,000
1,3	45	0	46,98	1,07	1,30	18	10	0,007
1,3	45	0	46,32	1,05	1,63	18	10	0,009
1,3	45	0	42,52	0,92	3,25	18	10	0,018
1,3	45	0	37,00	0,75	6,50	18	10	0,036
1,3	45	0	32,03	0,63	9,75	18	10	0,054
1,3	45	0	27,35	0,52	13,00	18	10	0,072
1,3	45	0	23,02	0,42	16,25	18	10	0,090
1,3	45	0	19,20	0,35	19,50	18	10	0,108
1,3	45	0	12,27	0,22	26,00	18	10	0,144
1,3	45	0	5,71	0,10	32,50	18	10	0,181
1,3	45	0	0,00	0,00	41,02	18	10	0,228
TALUD 30°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m3]	H [m]	c / $\gamma H$
1,3	30	0	36,89	0,75	0,00	18	10	0,000
1,3	30	0	32,38	0,63	1,30	18	10	0,007
1,3	30	0	31,63	0,62	1,63	18	10	0,009
1,3	30	0	28,77	0,55	3,25	18	10	0,018
1,3	30	0	24,11	0,45	6,50	18	10	0,036
1,3	30	0	20,32	0,37	9,75	18	10	0,054
1,3	30	0	17,02	0,31	13,00	18	10	0,072
1,3	30	0	10,93	0,19	19,50	18	10	0,108
1,3	30	0	6,36	0,11	26,00	18	10	0,144
1,3	30	0	2,79	0,05	32,50	18	10	0,181
1,3	30	0	0,00	0,00	39,91	18	10	0,222
TALUD 15°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m3]	H [m]	c / $\gamma H$
1,3	15	0	19,20	0,35	0,00	18	10	0,000
1,3	15	0	16,52	0,30	1,30	18	10	0,007
1,3	15	0	16,14	0,29	1,63	18	10	0,009
1,3	15	0	14,50	0,26	3,25	18	10	0,018
1,3	15	0	11,51	0,20	6,50	18	10	0,036
1,3	15	0	9,65	0,17	9,75	18	10	0,054
1,3	15	0	8,04	0,14	13,00	18	10	0,072
1,3	15	0	5,13	0,09	19,50	18	10	0,108
1,3	15	0	2,79	0,05	26,00	18	10	0,144
1,3	15	0	1,30	0,02	32,50	18	10	0,181
1,3	15	0	0,00	0,00	38,32	18	10	0,213

Tabla 4-2, Parámetros adimensionales ( $\tan \phi$  y  $c/\gamma H$ ), para la construcción de curvas  $FS_{est}=1,3$  para cada inclinación ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de  $FS_{est}=1,3$  asociadas a cada inclinación. (Figura 4-2)

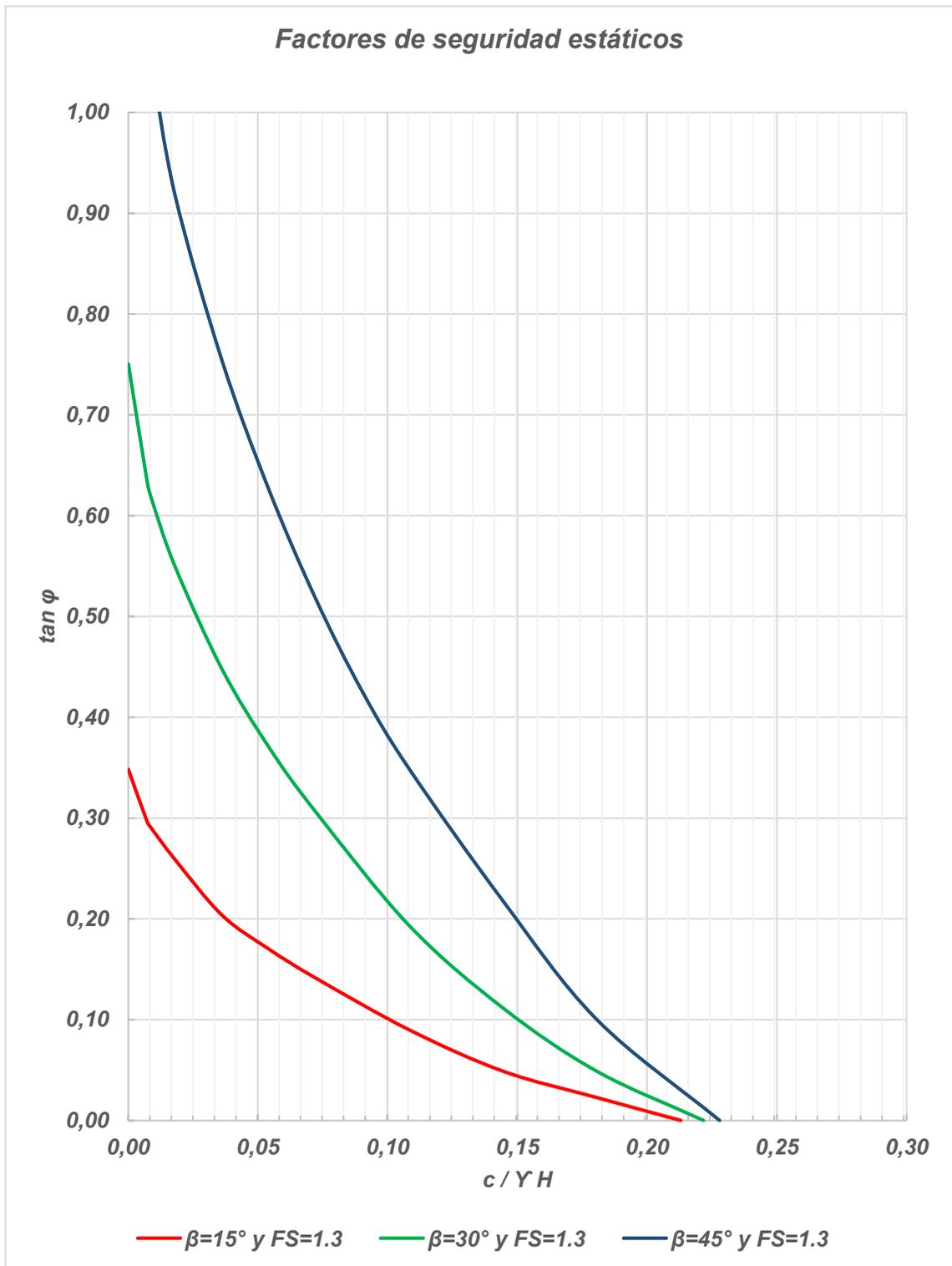


Figura 4-2. Curvas de factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}=1,3$ ) para cada inclinación ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

-  $FS_{est}=1,4$

TALUD 45°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$
1,4	45	0	54,46	1,40	0,00	18	10	0,000
1,4	45	0	49,09	1,15	1,40	18	10	0,008
1,4	45	0	48,43	1,13	1,75	18	10	0,010
1,4	45	0	44,64	0,99	3,50	18	10	0,019
1,4	45	0	39,06	0,81	7,00	18	10	0,039
1,4	45	0	33,97	0,67	10,50	18	10	0,058
1,4	45	0	29,12	0,56	14,00	18	10	0,078
1,4	45	0	24,59	0,46	17,50	18	10	0,097
1,4	45	0	20,56	0,38	21,00	18	10	0,117
1,4	45	0	13,19	0,23	28,00	18	10	0,156
1,4	45	0	6,15	0,11	35,00	18	10	0,194
1,4	45	0	0,00	0,00	44,17	18	10	0,245
TALUD 30°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$
1,4	30	0	38,95	0,81	0,00	18	10	0,000
1,4	30	0	34,33	0,68	1,40	18	10	0,008
1,4	30	0	33,56	0,66	1,75	18	10	0,010
1,4	30	0	30,60	0,59	3,50	18	10	0,019
1,4	30	0	25,74	0,48	7,00	18	10	0,039
1,4	30	0	21,74	0,40	10,50	18	10	0,058
1,4	30	0	18,25	0,33	14,00	18	10	0,078
1,4	30	0	11,75	0,21	21,00	18	10	0,117
1,4	30	0	6,84	0,12	28,00	18	10	0,156
1,4	30	0	3,01	0,05	35,00	18	10	0,194
1,4	30	0	0,00	0,00	42,98	18	10	0,239
TALUD 15°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$
1,4	15	0	20,56	0,38	0,00	18	10	0,000
1,4	15	0	17,71	0,32	1,40	18	10	0,008
1,4	15	0	17,31	0,31	1,75	18	10	0,010
1,4	15	0	15,56	0,28	3,50	18	10	0,019
1,4	15	0	12,37	0,22	7,00	18	10	0,039
1,4	15	0	10,37	0,18	10,50	18	10	0,058
1,4	15	0	8,65	0,15	14,00	18	10	0,078
1,4	15	0	5,52	0,10	21,00	18	10	0,117
1,4	15	0	3,01	0,05	28,00	18	10	0,156
1,4	15	0	1,40	0,02	35,00	18	10	0,194
1,4	15	0	0,00	0,00	41,27	18	10	0,229

Tabla 4-3, Parámetros adimensionales ( $\tan \phi$  y  $c/\gamma H$ ), para la construcción de curvas  $FS_{est}=1,4$  para cada inclinación ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de  $FS_{est}=1,4$  asociadas a cada inclinación. (Figura 4-3)

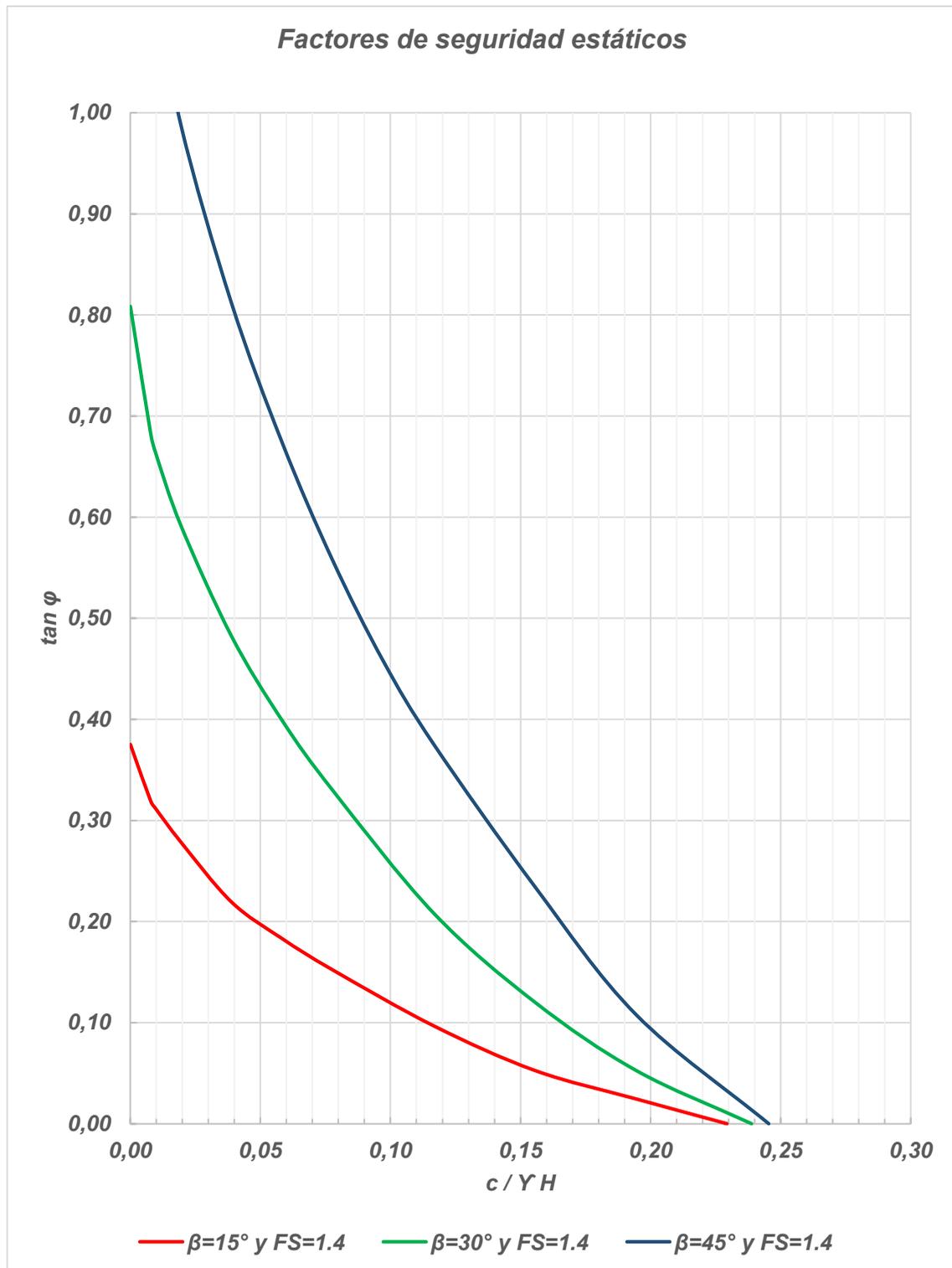


Figura 4-3, Curvas de factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}=1,4$ ) para cada inclinación ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

-  $FS_{est}=1,5$

TALUD 45°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$
1,5	45	0	56,31	1,50	0,00	18	10	0,000
1,5	45	0	51,04	1,24	1,50	18	10	0,008
1,5	45	0	50,39	1,21	1,88	18	10	0,010
1,5	45	0	46,62	1,06	3,75	18	10	0,021
1,5	45	0	41,01	0,87	7,50	18	10	0,042
1,5	45	0	35,83	0,72	11,25	18	10	0,063
1,5	45	0	30,83	0,60	15,00	18	10	0,083
1,5	45	0	26,12	0,49	18,75	18	10	0,104
1,5	45	0	21,90	0,40	22,50	18	10	0,125
1,5	45	0	14,09	0,25	30,00	18	10	0,167
1,5	45	0	6,58	0,12	37,50	18	10	0,208
1,5	45	0	0,00	0,00	47,33	18	10	0,263
TALUD 30°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$
1,5	30	0	40,89	0,87	0,00	18	10	0,000
1,5	30	0	36,19	0,73	1,50	18	10	0,008
1,5	30	0	35,40	0,71	1,88	18	10	0,010
1,5	30	0	32,36	0,63	3,75	18	10	0,021
1,5	30	0	27,32	0,52	7,50	18	10	0,042
1,5	30	0	23,14	0,43	11,25	18	10	0,063
1,5	30	0	19,45	0,35	15,00	18	10	0,083
1,5	30	0	12,56	0,22	22,50	18	10	0,125
1,5	30	0	7,33	0,13	30,00	18	10	0,167
1,5	30	0	3,22	0,06	37,50	18	10	0,208
1,5	30	0	0,00	0,00	46,05	18	10	0,256
TALUD 15°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$
1,5	15	0	21,90	0,40	0,00	18	10	0,000
1,5	15	0	18,89	0,34	1,50	18	10	0,008
1,5	15	0	18,46	0,33	1,88	18	10	0,010
1,5	15	0	16,61	0,30	3,75	18	10	0,021
1,5	15	0	13,22	0,23	7,50	18	10	0,042
1,5	15	0	11,10	0,20	11,25	18	10	0,063
1,5	15	0	9,26	0,16	15,00	18	10	0,083
1,5	15	0	5,91	0,10	22,50	18	10	0,125
1,5	15	0	3,22	0,06	30,00	18	10	0,167
1,5	15	0	1,50	0,03	37,50	18	10	0,208
1,5	15	0	0,00	0,00	44,22	18	10	0,246

Tabla 4-4, Parámetros adimensionales ( $\tan \phi$  y  $c/\gamma H$ ), para la construcción de curvas  $FS_{est}=1,5$  para cada inclinación ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de  $FS_{est}=1,5$  asociadas a cada inclinación. (Figura 4-4)

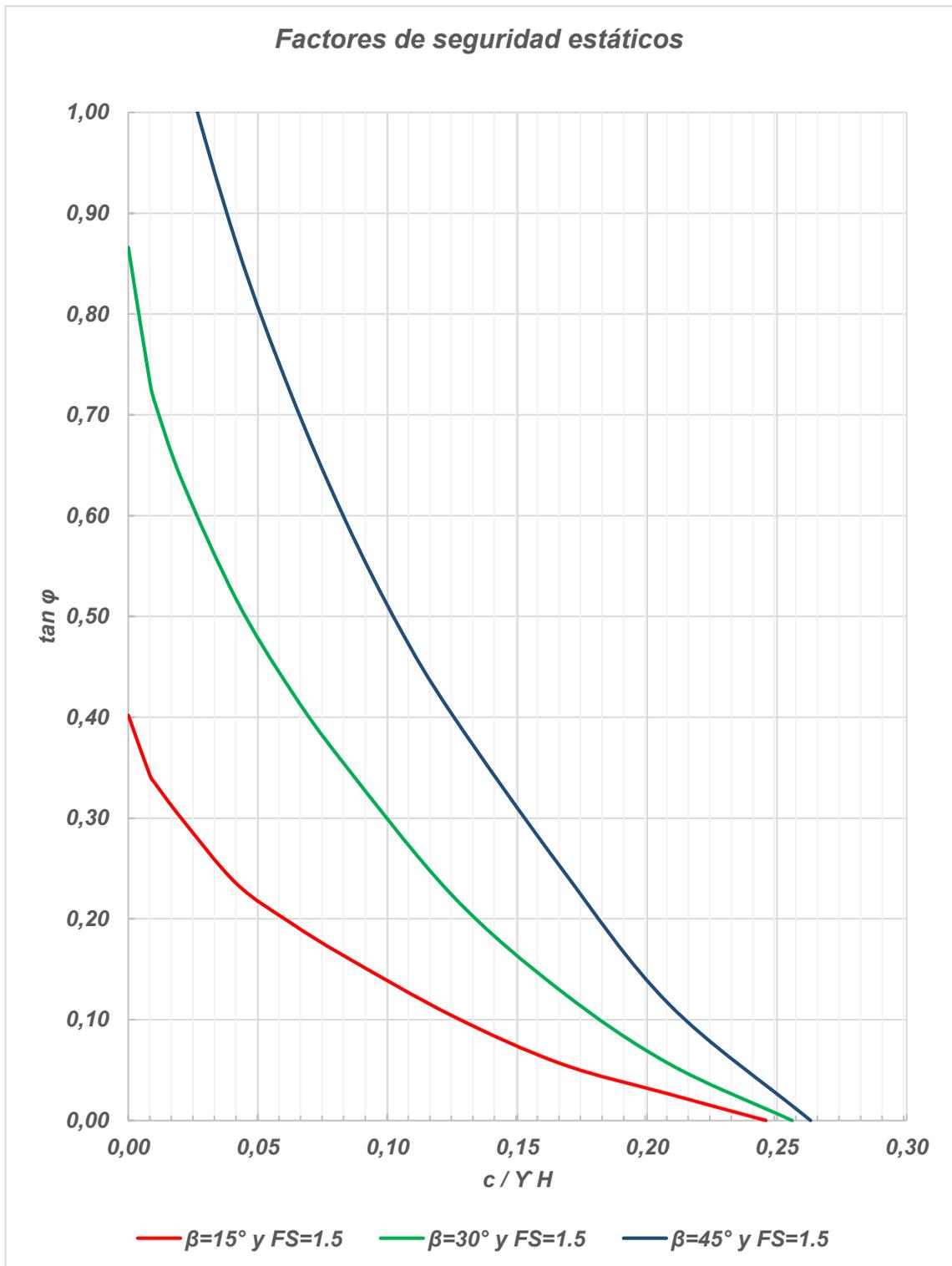


Figura 4-4, Curvas de factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}=1,5$ ) para cada inclinación ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

#### 4.1.2 Caso estático con sobrecarga ( $q=20$ kPa)

Con los datos obtenidos de cada modelo, se ordenan los valores en tablas con la descripción de cada parámetro para el posterior análisis. Las tablas 4-5, 4-6, 4-7 y 4-8 presentan los valores de los parámetros adimensionales ( $\tan \varphi$  y  $c/\gamma H$ ) que dan origen a las curvas de factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}=1,0$ ;  $FS_{est}=1,3$ ;  $FS_{est}=1,4$  y  $FS_{est}=1,5$ ), las cuales se visualizan en las figuras 4-5, 4-6, 4-7 y 4-8. Los valores entregados son para cada una de las inclinaciones  $\beta$  y con sobrecarga  $q=20$  kPa.

-  $FS_{est}=1,0$

TALUD 45°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m3]	H [m]	c / Y H
1,0	45	20	44,95	1,00	0,00	18	10	0,000
1,0	45	20	40,45	0,85	1,00	18	10	0,006
1,0	45	20	39,82	0,83	1,25	18	10	0,007
1,0	45	20	36,50	0,74	2,50	18	10	0,014
1,0	45	20	31,50	0,61	5,00	18	10	0,028
1,0	45	20	27,70	0,53	7,50	18	10	0,042
1,0	45	20	24,20	0,45	10,00	18	10	0,056
1,0	45	20	17,90	0,32	15,00	18	10	0,083
1,0	45	20	12,55	0,22	20,00	18	10	0,111
1,0	45	20	7,90	0,14	25,00	18	10	0,139
1,0	45	20	3,90	0,07	30,00	18	10	0,167
1,0	45	20	0,30	0,01	35,00	18	10	0,194
1,0	45	20	0,00	0,00	35,90	18	10	0,199
TALUD 30°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m3]	H [m]	c / Y H
1,0	30	20	30,00	0,58	0,00	18	10	0,000
1,0	30	20	26,50	0,50	1,00	18	10	0,006
1,0	30	20	26,10	0,49	1,25	18	10	0,007
1,0	30	20	23,90	0,44	2,50	18	10	0,014
1,0	30	20	19,95	0,36	5,00	18	10	0,028
1,0	30	20	17,20	0,31	7,50	18	10	0,042
1,0	30	20	14,80	0,26	10,00	18	10	0,056
1,0	30	20	10,50	0,19	15,00	18	10	0,083
1,0	30	20	6,75	0,12	20,00	18	10	0,111
1,0	30	20	3,80	0,07	25,00	18	10	0,139
1,0	30	20	1,55	0,03	30,00	18	10	0,167
1,0	30	20	0,00	0,00	35,85	18	10	0,199
TALUD 15°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m3]	H [m]	c / Y H
1,0	15	20	15,00	0,27	0,00	18	10	0,000
1,0	15	20	13,10	0,23	1,00	18	10	0,006
1,0	15	20	12,85	0,23	1,25	18	10	0,007
1,0	15	20	11,75	0,21	2,50	18	10	0,014
1,0	15	20	9,70	0,17	5,00	18	10	0,028
1,0	15	20	8,00	0,14	7,50	18	10	0,042
1,0	15	20	6,90	0,12	10,00	18	10	0,056
1,0	15	20	4,80	0,08	15,00	18	10	0,083
1,0	15	20	3,00	0,05	20,00	18	10	0,111
1,0	15	20	1,60	0,03	25,00	18	10	0,139
1,0	15	20	0,00	0,00	35,20	18	10	0,196

Tabla 4-5, Parámetros adimensionales ( $\tan \phi$  y  $c/YH$ ), para la construcción de curvas  $FS_{est}=1,0$  para cada inclinación ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de  $FS_{est}=1,0$  asociadas a cada inclinación. (Figura 4-5)

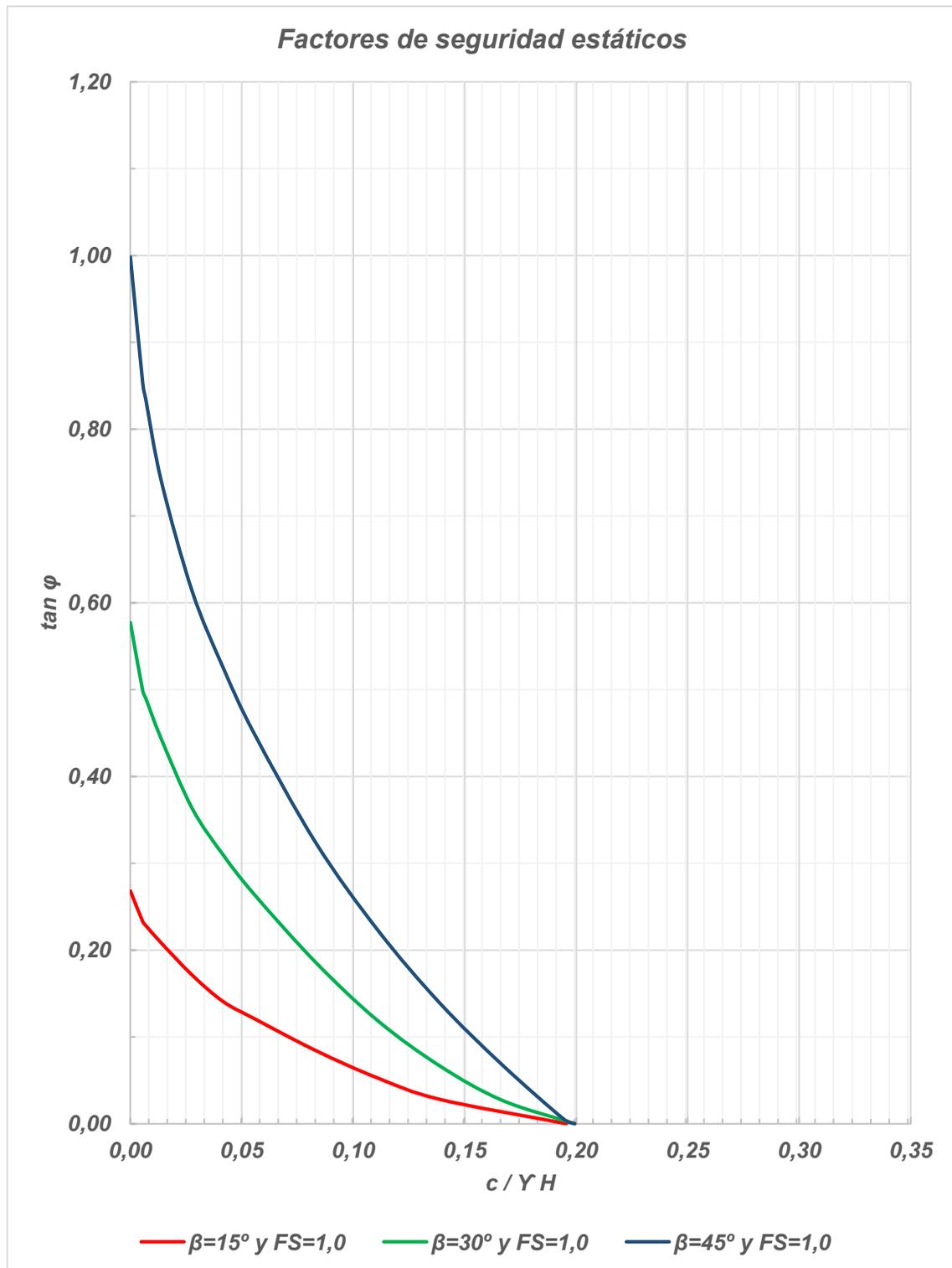


Figura 4-5, Curvas de factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}=1,0$ ) para cada inclinación ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

-  $FS_{est}=1,3$

TALUD 45°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / Y H
1,3	45	20	52,38	1,30	0,00	18	10	0,000
1,3	45	20	47,94	1,11	1,30	18	10	0,007
1,3	45	20	47,31	1,08	1,63	18	10	0,009
1,3	45	20	43,89	0,96	3,25	18	10	0,018
1,3	45	20	38,54	0,80	6,50	18	10	0,036
1,3	45	20	34,31	0,68	9,75	18	10	0,054
1,3	45	20	30,30	0,58	13,00	18	10	0,072
1,3	45	20	22,78	0,42	19,50	18	10	0,108
1,3	45	20	16,14	0,29	26,00	18	10	0,144
1,3	45	20	10,23	0,18	32,50	18	10	0,181
1,3	45	20	5,06	0,09	39,00	18	10	0,217
1,3	45	20	0,39	0,01	45,50	18	10	0,253
1,3	45	20	0,00	0,00	46,67	18	10	0,259
TALUD 30°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / Y H
1,3	30	20	36,89	0,75	0,00	18	10	0,000
1,3	30	20	32,95	0,65	1,30	18	10	0,007
1,3	30	20	32,49	0,64	1,63	18	10	0,009
1,3	30	20	29,95	0,58	3,25	18	10	0,018
1,3	30	20	25,26	0,47	6,50	18	10	0,036
1,3	30	20	21,92	0,40	9,75	18	10	0,054
1,3	30	20	18,96	0,34	13,00	18	10	0,072
1,3	30	20	13,55	0,24	19,50	18	10	0,108
1,3	30	20	8,75	0,15	26,00	18	10	0,144
1,3	30	20	4,94	0,09	32,50	18	10	0,181
1,3	30	20	2,01	0,04	39,00	18	10	0,217
1,3	30	20	0,00	0,00	46,61	18	10	0,259
TALUD 15°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / Y H
1,3	15	20	19,20	0,35	0,00	18	10	0,000
1,3	15	20	16,83	0,30	1,30	18	10	0,007
1,3	15	20	16,52	0,30	1,63	18	10	0,009
1,3	15	20	15,13	0,27	3,25	18	10	0,018
1,3	15	20	12,53	0,22	6,50	18	10	0,036
1,3	15	20	10,35	0,18	9,75	18	10	0,054
1,3	15	20	8,94	0,16	13,00	18	10	0,072
1,3	15	20	6,23	0,11	19,50	18	10	0,108
1,3	15	20	3,90	0,07	26,00	18	10	0,144
1,3	15	20	2,08	0,04	32,50	18	10	0,181
1,3	15	20	0,00	0,00	45,76	18	10	0,254

Tabla 4-6, Parámetros adimensionales ( $\tan \phi$  y  $c/YH$ ), para la construcción de curvas  $FS_{est}=1,3$  para cada inclinación ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de  $FS_{est}=1,3$  asociadas a cada inclinación. (Figura 4-6)

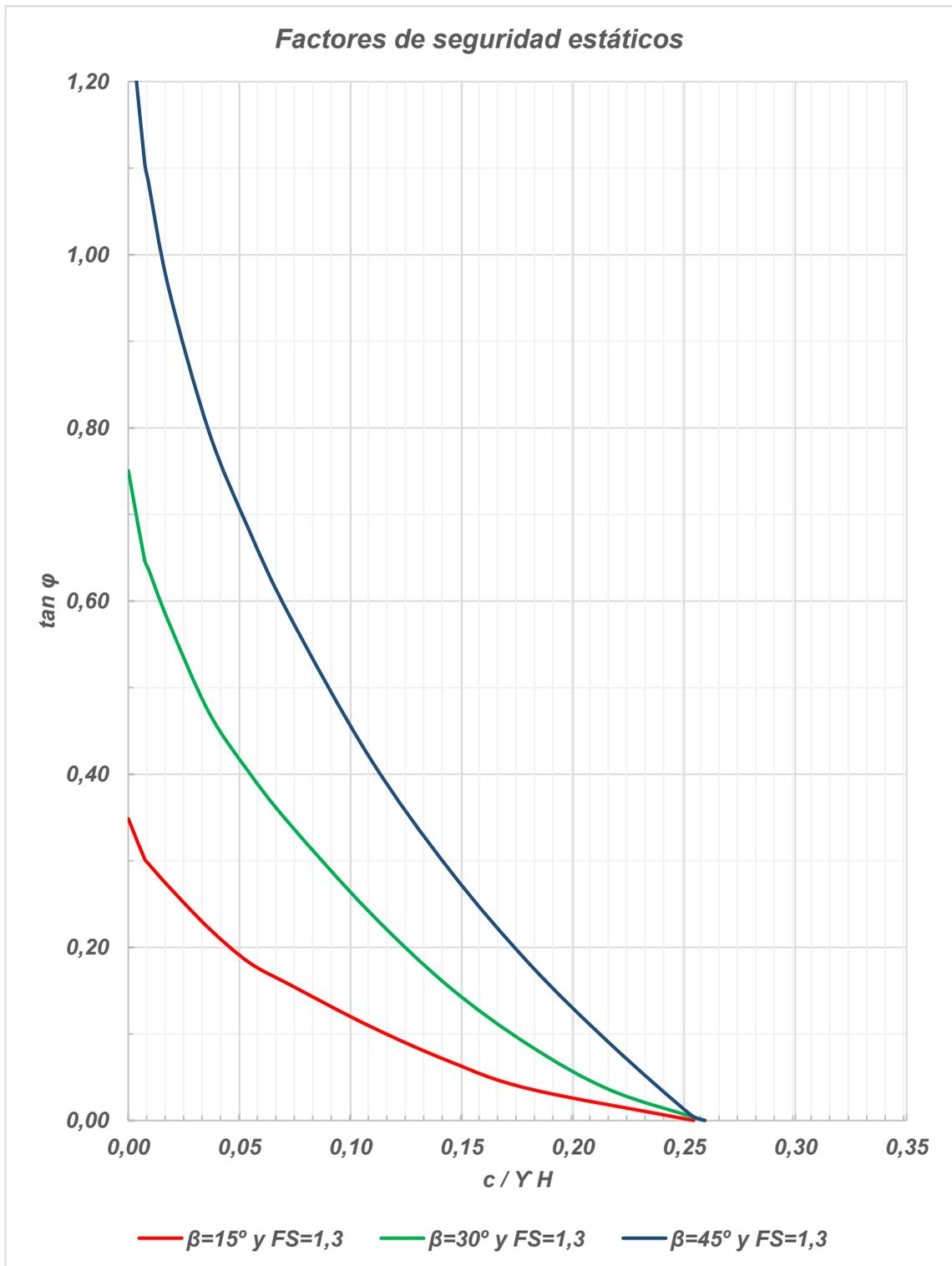


Figura 4-6, Curvas de factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}=1,3$ ) para cada inclinación ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

-  $FS_{est}=1,4$

TALUD 45°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m3]	H [m]	c / Y H
1,4	45	20	54,42	1,40	0,00	18	10	0,000
1,4	45	20	50,04	1,19	1,40	18	10	0,008
1,4	45	20	49,41	1,17	1,75	18	10	0,010
1,4	45	20	46,01	1,04	3,50	18	10	0,019
1,4	45	20	40,63	0,86	7,00	18	10	0,039
1,4	45	20	36,32	0,74	10,50	18	10	0,058
1,4	45	20	32,18	0,63	14,00	18	10	0,078
1,4	45	20	24,33	0,45	21,00	18	10	0,117
1,4	45	20	17,31	0,31	28,00	18	10	0,156
1,4	45	20	10,99	0,19	35,00	18	10	0,194
1,4	45	20	5,45	0,10	42,00	18	10	0,233
1,4	45	20	0,42	0,01	49,00	18	10	0,272
1,4	45	20	0,00	0,00	50,26	18	10	0,279
TALUD 30°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m3]	H [m]	c / Y H
1,4	30	20	38,95	0,81	0,00	18	10	0,000
1,4	30	20	34,92	0,70	1,40	18	10	0,008
1,4	30	20	34,44	0,69	1,75	18	10	0,010
1,4	30	20	31,82	0,62	3,50	18	10	0,019
1,4	30	20	26,94	0,51	7,00	18	10	0,039
1,4	30	20	23,43	0,43	10,50	18	10	0,058
1,4	30	20	20,30	0,37	14,00	18	10	0,078
1,4	30	20	14,55	0,26	21,00	18	10	0,117
1,4	30	20	9,41	0,17	28,00	18	10	0,156
1,4	30	20	5,31	0,09	35,00	18	10	0,194
1,4	30	20	2,17	0,04	42,00	18	10	0,233
1,4	30	20	0,00	0,00	50,19	18	10	0,279
TALUD 15°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m3]	H [m]	c / Y H
1,4	15	20	20,56	0,38	0,00	18	10	0,000
1,4	15	20	18,05	0,33	1,40	18	10	0,008
1,4	15	20	17,71	0,32	1,75	18	10	0,010
1,4	15	20	16,24	0,29	3,50	18	10	0,019
1,4	15	20	13,46	0,24	7,00	18	10	0,039
1,4	15	20	11,13	0,20	10,50	18	10	0,058
1,4	15	20	9,62	0,17	14,00	18	10	0,078
1,4	15	20	6,70	0,12	21,00	18	10	0,117
1,4	15	20	4,20	0,07	28,00	18	10	0,156
1,4	15	20	2,24	0,04	35,00	18	10	0,194
1,4	15	20	0,00	0,00	49,28	18	10	0,274

Tabla 4-7, Parámetros adimensionales ( $\tan \phi$  y  $c/YH$ ), para la construcción de curvas  $FS_{est}=1,4$  para cada inclinación ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de  $FS_{est}=1,4$  asociadas a cada inclinación. (Figura 4-7)

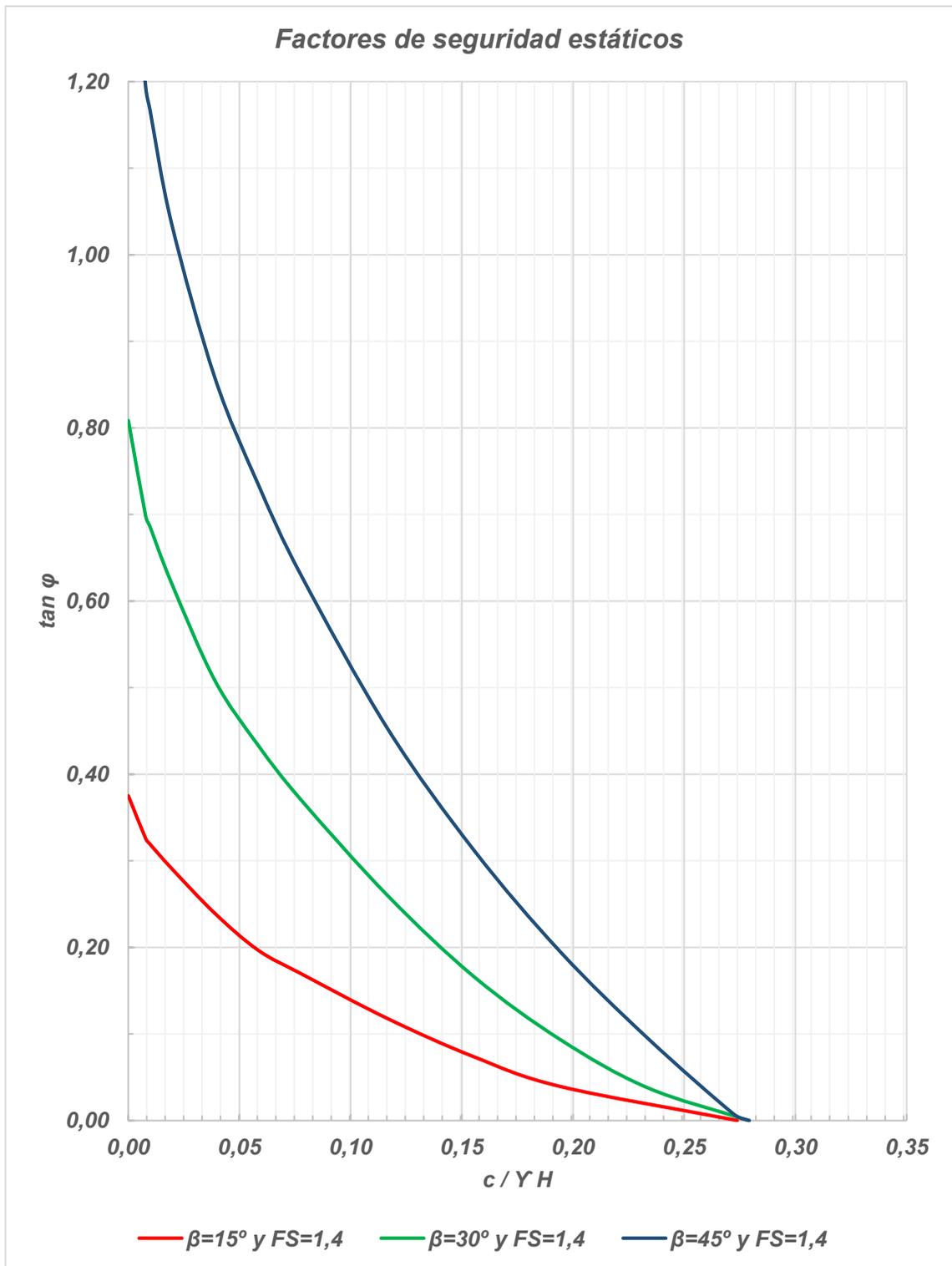


Figura 4-7, Curvas de factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}=1,4$ ) para cada inclinación ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

$FS_{est}=1,5$

TALUD 45°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / Y H
1,5	45	20	56,26	1,50	0,00	18	10	0,000
1,5	45	20	51,98	1,28	1,50	18	10	0,008
1,5	45	20	51,35	1,25	1,88	18	10	0,010
1,5	45	20	47,98	1,11	3,75	18	10	0,021
1,5	45	20	42,59	0,92	7,50	18	10	0,042
1,5	45	20	38,22	0,79	11,25	18	10	0,063
1,5	45	20	33,98	0,67	15,00	18	10	0,083
1,5	45	20	25,85	0,48	22,50	18	10	0,125
1,5	45	20	18,46	0,33	30,00	18	10	0,167
1,5	45	20	11,76	0,21	37,50	18	10	0,208
1,5	45	20	5,84	0,10	45,00	18	10	0,250
1,5	45	20	0,45	0,01	52,50	18	10	0,292
1,5	45	20	0,00	0,00	53,85	18	10	0,299
TALUD 30°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / Y H
1,5	30	20	40,89	0,87	0,00	18	10	0,000
1,5	30	20	36,79	0,75	1,50	18	10	0,008
1,5	30	20	36,31	0,73	1,88	18	10	0,010
1,5	30	20	33,61	0,66	3,75	18	10	0,021
1,5	30	20	28,57	0,54	7,50	18	10	0,042
1,5	30	20	24,91	0,46	11,25	18	10	0,063
1,5	30	20	21,62	0,40	15,00	18	10	0,083
1,5	30	20	15,54	0,28	22,50	18	10	0,125
1,5	30	20	10,07	0,18	30,00	18	10	0,167
1,5	30	20	5,69	0,10	37,50	18	10	0,208
1,5	30	20	2,32	0,04	45,00	18	10	0,250
1,5	30	20	0,00	0,00	53,78	18	10	0,299
TALUD 15°								
FS	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	Y [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / Y H
1,5	15	20	21,90	0,40	0,00	18	10	0,000
1,5	15	20	19,24	0,35	1,50	18	10	0,008
1,5	15	20	18,89	0,34	1,88	18	10	0,010
1,5	15	20	17,33	0,31	3,75	18	10	0,021
1,5	15	20	14,38	0,26	7,50	18	10	0,042
1,5	15	20	11,90	0,21	11,25	18	10	0,063
1,5	15	20	10,29	0,18	15,00	18	10	0,083
1,5	15	20	7,18	0,13	22,50	18	10	0,125
1,5	15	20	4,49	0,08	30,00	18	10	0,167
1,5	15	20	2,40	0,04	37,50	18	10	0,208
1,5	15	20	0,00	0,00	52,80	18	10	0,293

Tabla 4-8, Parámetros adimensionales ( $\tan \phi$  y  $c/YH$ ), para la construcción de curvas  $FS_{est}=1,5$  para cada inclinación ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de  $FS_{est}=1,5$  asociadas a cada inclinación. (Figura 4-8)

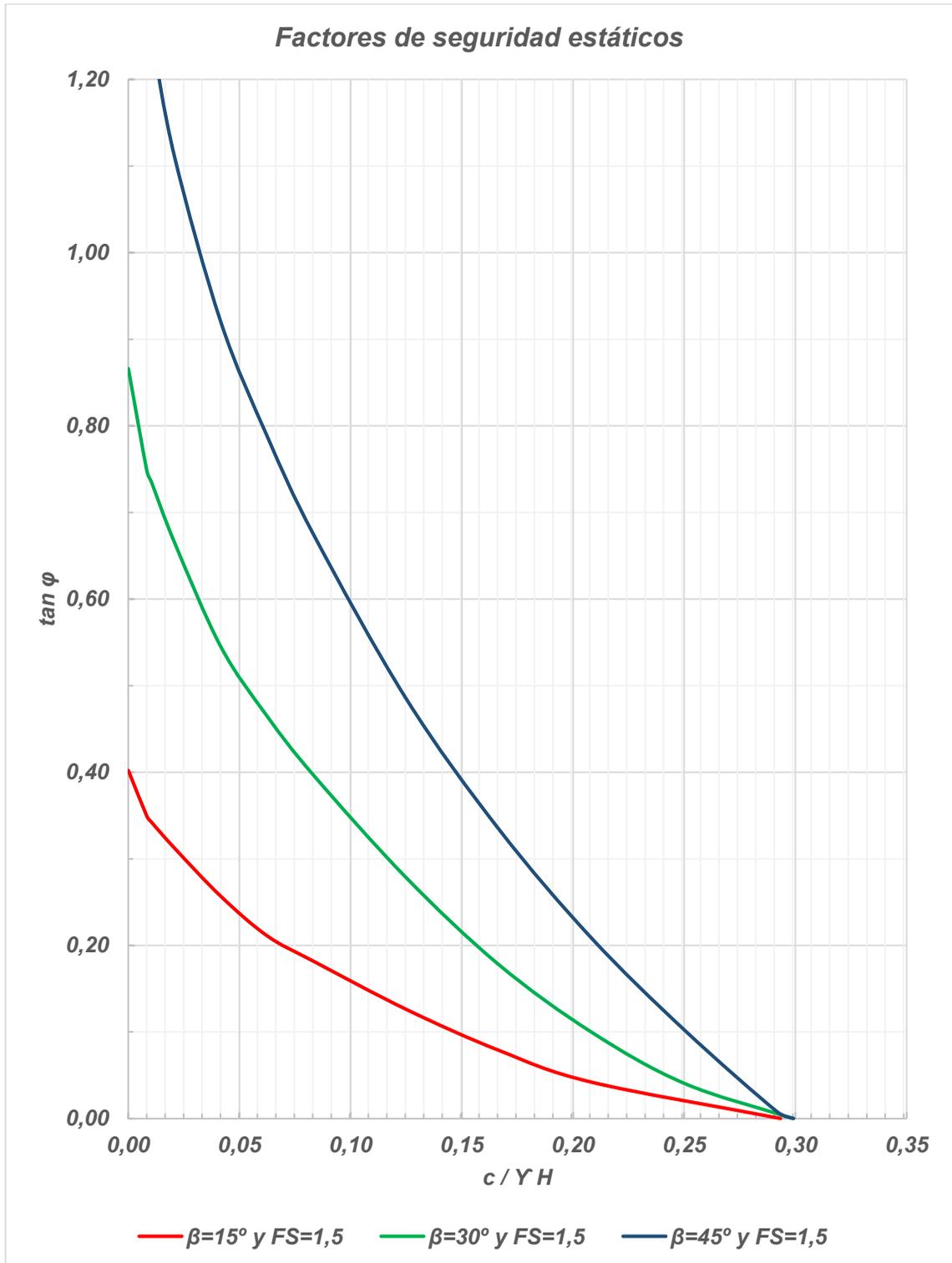


Figura 4-8, Curvas de factores de seguridad estáticos ( $FS_{est}=1,5$ ) para cada inclinación ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

## 4.2 Gráficos de diseño para la determinación del coeficiente pseudoestático de aceleración crítico $k_y$

### 4.2.1 Caso sísmico (pseudoestático) sin sobrecarga ( $q=0$ kPa)

Las tablas 4-9, 4-10 y 4-11 presentan los resultados de los coeficientes sísmicos horizontales críticos ( $K_y$ ) obtenidos utilizando el método pseudoestático, los cuales hacen descender los  $FS_{est}$  obtenidos, hasta llegar a su valor crítico ( $FS_{ps-est} = 1,0$ ). Los valores se entregan para cada inclinación  $\beta$  y sobrecarga  $q=0$ .

#### - Talud 45°

FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,3													
$FS_{est}$	Falla	$\beta$ [°]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$	
1,3	Superficial	45	46,98	1,07	1,30	18	10	0,007	0,1465	148,38	148,38	1,000	
1,3	Superficial	45	46,32	1,05	1,63	18	10	0,009	0,1485	115,99		0,782	
1,3	Superficial	45	42,52	0,92	3,25	18	10	0,018	0,1575	50,79		0,342	
1,3	Superficial	45	37,00	0,75	6,50	18	10	0,036	0,1775	20,87		0,141	
1,3	Superficial	45	32,03	0,63	9,75	18	10	0,054	0,1830	11,55		0,078	
1,3	Superficial	45	27,35	0,52	13,00	18	10	0,072	0,1841	7,16		0,048	
1,3	Superficial	45	23,02	0,42	16,25	18	10	0,090	0,1847	4,71		0,032	
1,3	Superficial	45	19,20	0,35	19,50	18	10	0,108	0,1850	3,22		0,022	
1,3	Superficial	45	12,27	0,22	26,00	18	10	0,144	0,1820	1,51		0,010	
1,3	Profunda	45	5,71	0,10	32,50	18	10	0,181	0,1625	0,55		0,004	
1,3	Profunda	45	0,00	0,00	41,28	18	10	0,229	0,0930	0,00		0,000	
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,4													
$FS_{est}$	Falla	$\beta$ [°]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$	$K_y$	$\lambda$		$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$
1,4	Superficial	45	49,09	1,15	1,400	18	10	0,008	0,1895	148,38		148,38	1,000
1,4	Superficial	45	48,43	1,13	1,750	18	10	0,010	0,1920	115,99	0,782		
1,4	Superficial	45	44,64	0,99	3,500	18	10	0,019	0,2030	50,79	0,342		
1,4	Superficial	45	39,06	0,81	7,000	18	10	0,039	0,2295	20,87	0,141		
1,4	Superficial	45	33,97	0,67	10,500	18	10	0,058	0,2385	11,55	0,078		
1,4	Superficial	45	29,12	0,56	14,000	18	10	0,078	0,2405	7,16	0,048		
1,4	Superficial	45	24,59	0,46	17,500	18	10	0,097	0,2408	4,71	0,032		
1,4	Superficial	45	20,56	0,38	21,000	18	10	0,117	0,2410	3,22	0,022		
1,4	Superficial	45	13,19	0,23	28,000	18	10	0,156	0,2350	1,51	0,010		
1,4	Profunda	45	6,15	0,11	35,000	18	10	0,194	0,2060	0,55	0,004		
1,4	Profunda	45	0,00	0,00	44,450	18	10	0,247	0,1230	0,00	0,000		
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,5													
$FS_{est}$	Falla	$\beta$ [°]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$		$\lambda/\lambda_{ref}$
1,5	Superficial	45	51,04	1,24	1,500	18	10	0,008	0,2290	148,38	148,38		1,000
1,5	Superficial	45	50,39	1,21	1,875	18	10	0,010	0,2325	115,99		0,782	
1,5	Superficial	45	46,62	1,06	3,750	18	10	0,021	0,2470	50,79		0,342	
1,5	Superficial	45	41,01	0,87	7,500	18	10	0,042	0,2790	20,87		0,141	
1,5	Superficial	45	35,83	0,72	11,250	18	10	0,063	0,2925	11,55		0,078	
1,5	Superficial	45	30,83	0,60	15,000	18	10	0,083	0,2955	7,16		0,048	
1,5	Superficial	45	26,12	0,49	18,750	18	10	0,104	0,2955	4,71		0,032	
1,5	Superficial	45	21,90	0,40	22,500	18	10	0,125	0,2955	3,22		0,022	
1,5	Superficial	45	14,09	0,25	30,000	18	10	0,167	0,2865	1,51		0,010	
1,5	Profunda	45	6,58	0,12	37,500	18	10	0,208	0,2425	0,55		0,004	
1,5	Profunda	45	0,00	0,00	47,625	18	10	0,265	0,1538	0,00		0,000	

Tabla 4-9, Valores de coeficientes sísmicos horizontales ( $K_y$ ) críticos para taludes de 45° ( $q=0$ ).  
(Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos ( $K_y$ ) para taludes de  $45^\circ$ . (Figura 4-9)

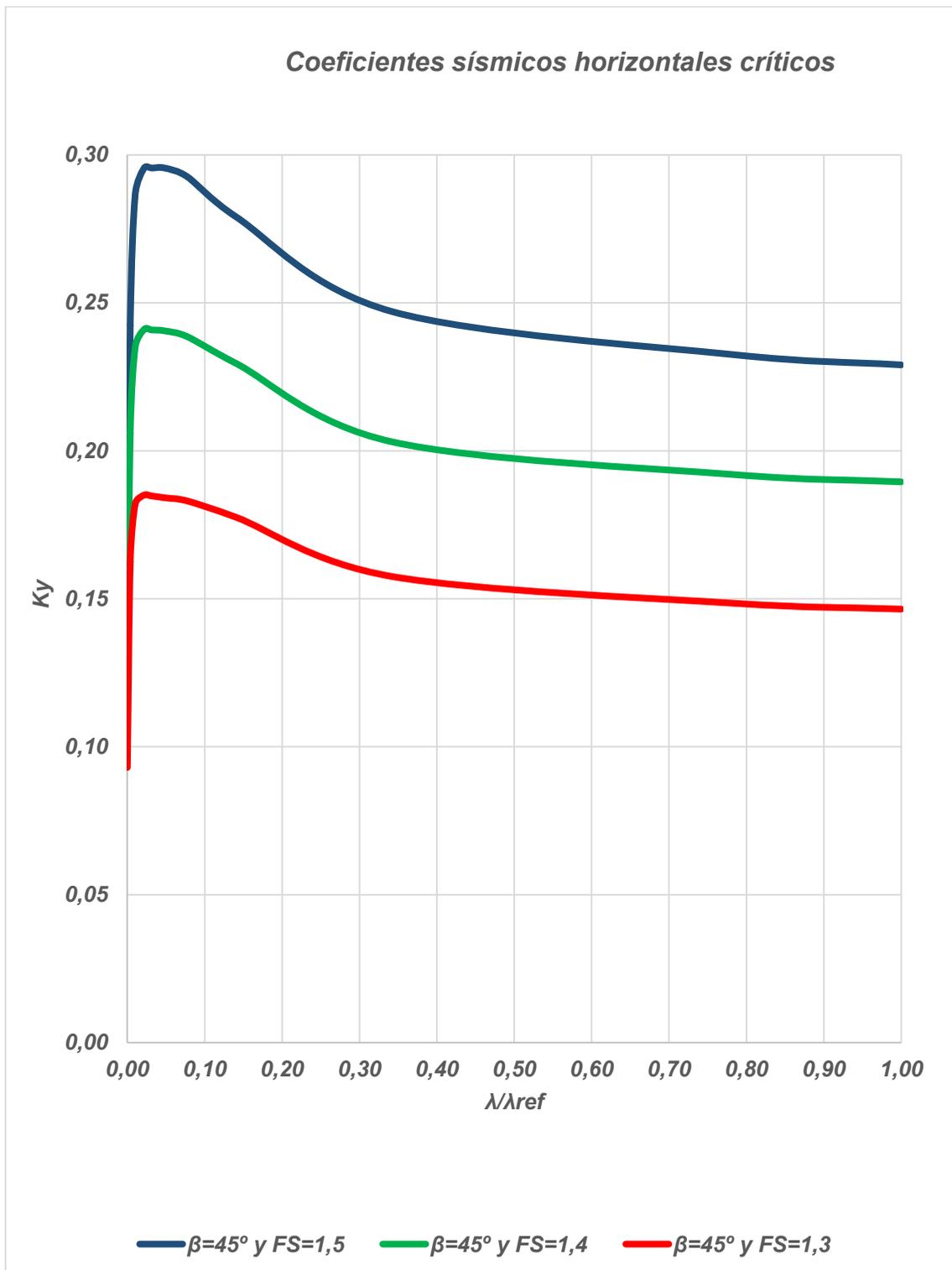


Figura 4-9, Curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos teóricos para taludes de  $45^\circ$  ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

- Talud 30°

FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,3												
FSest	Falla	$\beta$ [°]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma$ H	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$
1,3	Superficial	30	32,38	0,63	1,30	18	10	0,007	0,1270	87,79	87,79	1,000
1,3	Superficial	30	31,63	0,62	1,63	18	10	0,009	0,1274	68,22		0,777
1,3	Superficial	30	28,77	0,55	3,25	18	10	0,018	0,1310	30,41		0,346
1,3	Superficial	30	24,11	0,45	6,50	18	10	0,036	0,1400	12,40		0,141
1,3	Intermedia	30	20,32	0,37	9,75	18	10	0,054	0,1410	6,84		0,078
1,3	Intermedia	30	17,02	0,31	13,00	18	10	0,072	0,1380	4,24		0,048
1,3	Intermedia	30	10,93	0,19	19,50	18	10	0,108	0,1280	1,78		0,020
1,3	Profunda	30	6,36	0,11	26,00	18	10	0,144	0,1130	0,77		0,009
1,3	Profunda	30	2,79	0,05	32,50	18	10	0,181	0,0845	0,27		0,003
1,3	Profunda	30	0,00	0,00	41,73	18	10	0,232	0,0525	0,00		0,000
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,4												
FSest	Falla	$\beta$ [°]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma$ H	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$
1,4	Superficial	30	34,33	0,68	1,400	18	10	0,008	0,1680	87,79	87,79	1,000
1,4	Superficial	30	33,56	0,66	1,750	18	10	0,010	0,1695	68,22		0,777
1,4	Superficial	30	30,60	0,59	3,500	18	10	0,019	0,1715	30,41		0,346
1,4	Superficial	30	25,74	0,48	7,000	18	10	0,039	0,1840	12,40		0,141
1,4	Intermedia	30	21,74	0,40	10,500	18	10	0,058	0,1855	6,84		0,078
1,4	Intermedia	30	18,25	0,33	14,000	18	10	0,078	0,1820	4,24		0,048
1,4	Intermedia	30	11,75	0,21	21,000	18	10	0,117	0,1690	1,78		0,020
1,4	Profunda	30	6,84	0,12	28,000	18	10	0,156	0,1505	0,77		0,009
1,4	Profunda	30	3,01	0,05	35,000	18	10	0,194	0,1045	0,27		0,003
1,4	Profunda	30	0,00	0,00	44,940	18	10	0,250	0,0695	0,00		0,000
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,5												
FSest	Falla	$\beta$ [°]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma$ H	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$
1,5	Superficial	30	36,19	0,73	1,500	18	10	0,008	0,2060	87,79	87,79	1,000
1,5	Superficial	30	35,40	0,71	1,875	18	10	0,010	0,2080	68,22		0,777
1,5	Superficial	30	32,36	0,63	3,750	18	10	0,021	0,2110	30,41		0,346
1,5	Superficial	30	27,32	0,52	7,500	18	10	0,042	0,2250	12,40		0,141
1,5	Intermedia	30	23,14	0,43	11,250	18	10	0,063	0,2270	6,84		0,078
1,5	Intermedia	30	19,45	0,35	15,000	18	10	0,083	0,2245	4,24		0,048
1,5	Intermedia	30	12,56	0,22	22,500	18	10	0,125	0,2085	1,78		0,020
1,5	Profunda	30	7,33	0,13	30,000	18	10	0,167	0,1750	0,77		0,009
1,5	Profunda	30	3,22	0,06	37,500	18	10	0,208	0,1240	0,27		0,003
1,5	Profunda	30	0,00	0,00	48,150	18	10	0,268	0,0865	0,00		0,000

Tabla 4-10, Valores de coeficientes sísmicos horizontales ( $K_y$ ) críticos para taludes de 30° ( $q=0$ ).  
(Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos ( $K_y$ ) para taludes de  $30^\circ$ . (Figura 4-10)

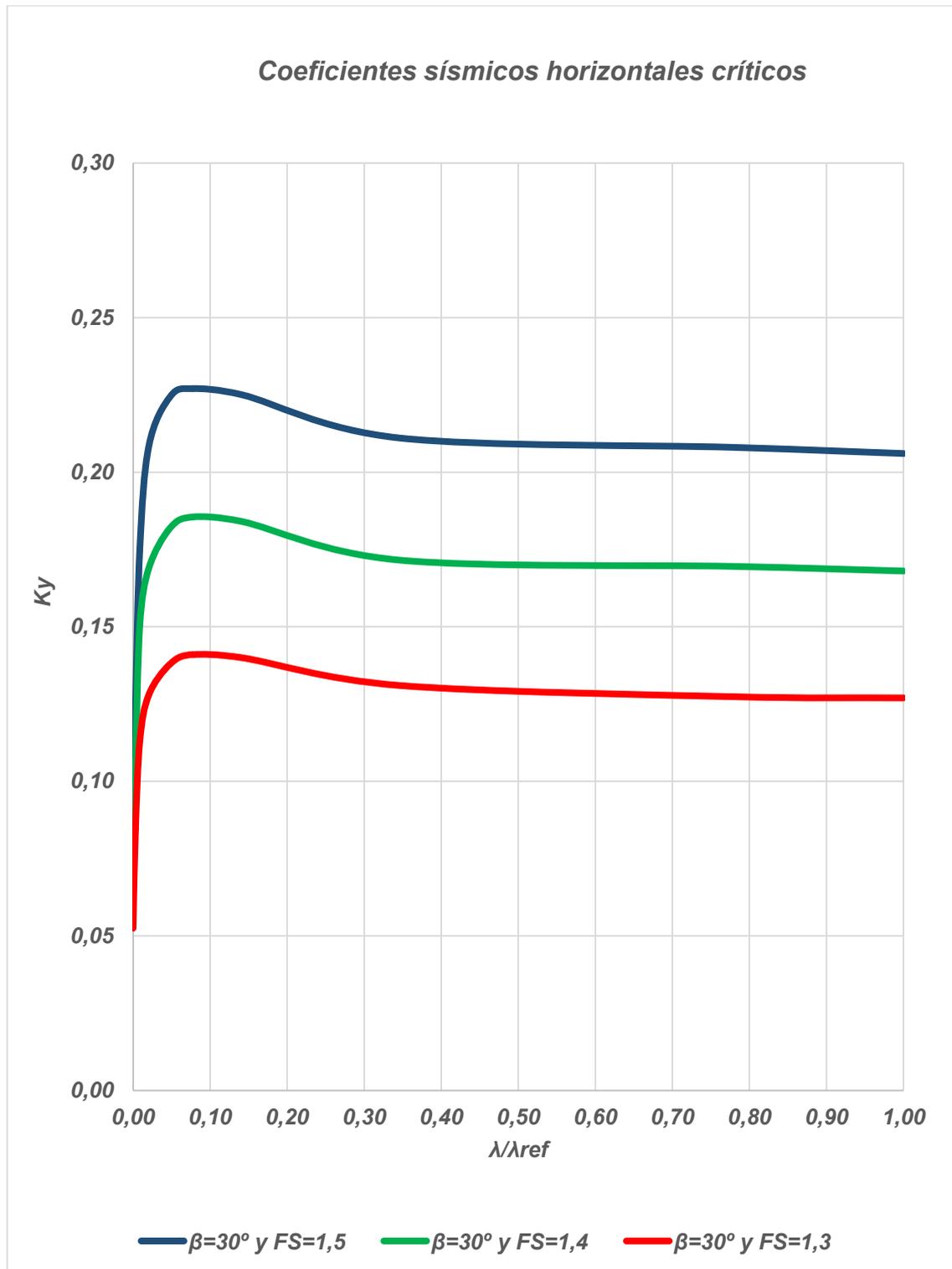


Figura 4-10, Curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos teóricos para taludes de  $30^\circ$  ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

- Talud 15°

FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,3												
FS	Falla	$\beta$ [°]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$
1,3	Intermedia	15	16,37	0,29	1,30	18	10	0,007	0,0735	40,67	40,67	1,000
1,3	Intermedia	15	16,05	0,29	1,63	18	10	0,009	0,0735	31,87		0,784
1,3	Intermedia	15	14,43	0,26	3,25	18	10	0,018	0,0738	14,25		0,350
1,3	Intermedia	15	11,70	0,21	6,50	18	10	0,036	0,0735	5,73		0,141
1,3	Profunda	15	9,75	0,17	9,75	18	10	0,054	0,0734	3,17		0,078
1,3	Profunda	15	8,03	0,14	13,00	18	10	0,072	0,0718	1,95		0,048
1,3	Profunda	15	5,18	0,09	19,50	18	10	0,108	0,0670	0,84		0,021
1,3	Profunda	15	2,95	0,05	26,00	18	10	0,144	0,0560	0,36		0,009
1,3	Profunda	15	1,19	0,02	32,50	18	10	0,181	0,0360	0,11		0,003
1,3	Profunda	15	0,00	0,00	38,33	18	10	0,213	0,0240	0,00		0,000
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,4												
FS	Falla	$\beta$ [°]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$
1,4	Intermedia	15	17,55	0,32	1,400	18	10	0,008	0,0970	40,66	40,66	1,000
1,4	Intermedia	15	17,22	0,31	1,750	18	10	0,010	0,0975	31,88		0,784
1,4	Intermedia	15	15,49	0,28	3,500	18	10	0,019	0,0980	14,25		0,351
1,4	Intermedia	15	12,60	0,22	7,000	18	10	0,039	0,0980	5,75		0,141
1,4	Profunda	15	10,50	0,19	10,500	18	10	0,058	0,0975	3,18		0,078
1,4	Profunda	15	8,64	0,15	14,000	18	10	0,078	0,0950	1,95		0,048
1,4	Profunda	15	5,52	0,10	21,000	18	10	0,117	0,0860	0,83		0,020
1,4	Profunda	15	3,01	0,05	28,000	18	10	0,156	0,0665	0,34		0,008
1,4	Profunda	15	1,40	0,02	35,000	18	10	0,194	0,0468	0,13		0,003
1,4	Profunda	15	0,00	0,00	41,270	18	10	0,229	0,0315	0,00		0,000
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,5												
FS	Falla	$\beta$ [°]	$\phi$ [°]	$\tan \phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c / $\gamma H$	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$
1,5	Intermedia	15	18,72	0,34	1,500	18	10	0,008	0,1215	40,66	40,66	1,000
1,5	Intermedia	15	18,36	0,33	1,875	18	10	0,010	0,1215	31,86		0,783
1,5	Intermedia	15	16,54	0,30	3,750	18	10	0,021	0,1225	14,25		0,351
1,5	Intermedia	15	13,48	0,24	7,500	18	10	0,042	0,1220	5,75		0,141
1,5	Profunda	15	11,23	0,20	11,250	18	10	0,063	0,1210	3,18		0,078
1,5	Profunda	15	9,25	0,16	15,000	18	10	0,083	0,1181	1,95		0,048
1,5	Profunda	15	5,91	0,10	22,500	18	10	0,125	0,1050	0,83		0,020
1,5	Profunda	15	3,22	0,06	30,000	18	10	0,167	0,0775	0,34		0,008
1,5	Profunda	15	1,50	0,03	37,500	18	10	0,208	0,0560	0,13		0,003
1,5	Profunda	15	0,00	0,00	44,220	18	10	0,246	0,0395	0,00		0,000

Tabla 4-11, Valores de coeficientes sísmicos horizontales ( $K_y$ ) críticos para taludes de 15° ( $q=0$ ).  
(Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos ( $K_y$ ) para taludes de  $15^\circ$ . (Figura 4-11)

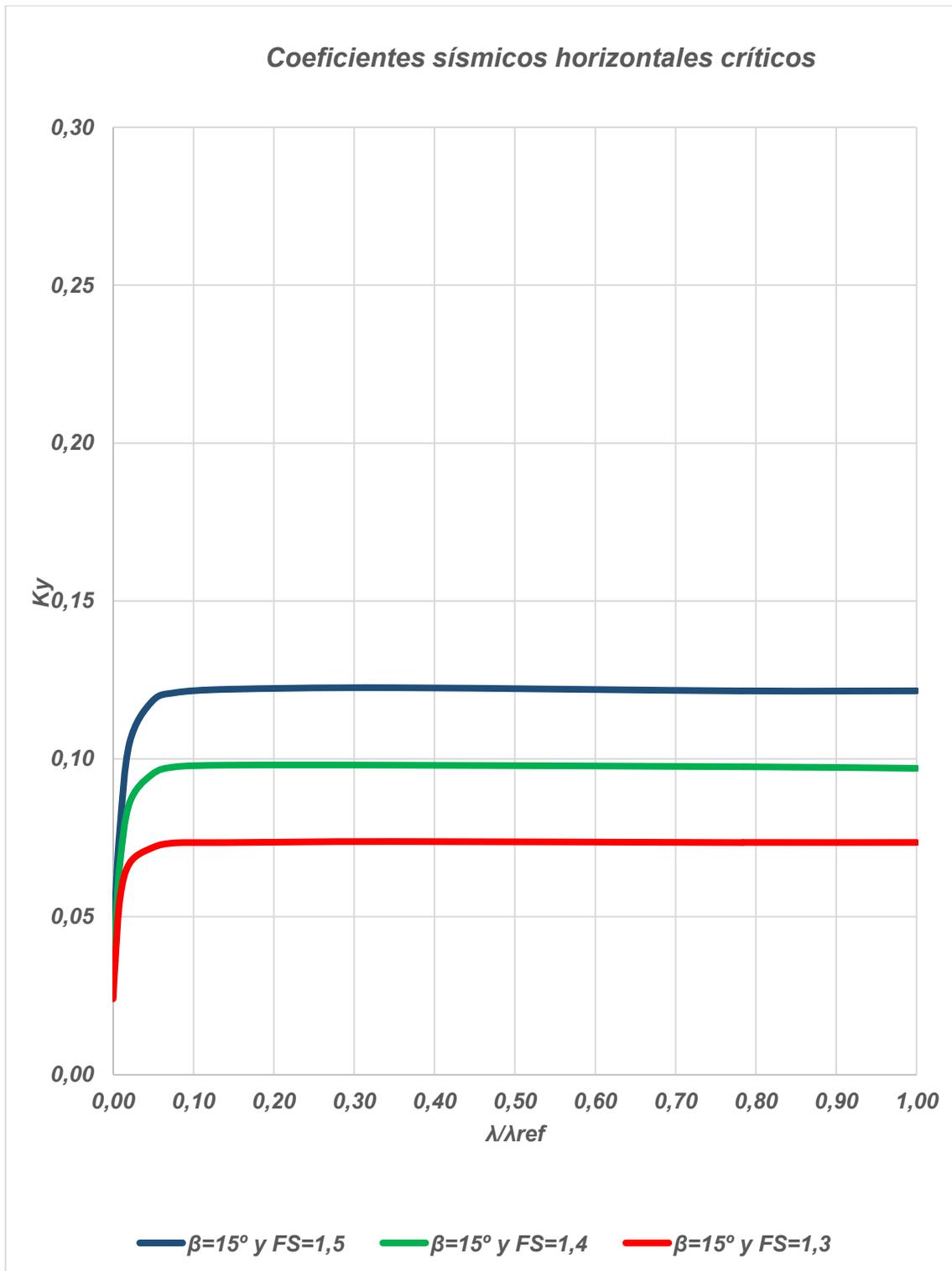


Figura 4-11, Curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos teóricos para taludes de  $15^\circ$  ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

## 4.2.2 Caso sísmico (pseudostático) con sobrecarga ( $q=20$ kPa)

Las tablas 4-12, 4-13 y 4-14 presentan los resultados de los coeficientes sísmicos horizontales críticos ( $K_y$ ) obtenidos utilizando el método pseudostático, los cuales hacen descender a los  $FS_{est}$  obtenidos hasta llegar a su valor crítico ( $FS_{ps-est} = 1,0$ ). Los datos se entregan para cada inclinación  $\beta$  y sobrecarga  $q = 20$  kPa.

### - Talud 45°

FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,3													
F <sub>est</sub>	Falla	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	tan $\phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c/ $\gamma$ H	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$
1,3	Superficial	45	20	47,94	1,11	1,30	18	10	0,007	0,1570	153,46	153,46	1,0000
1,3	Superficial	45	20	47,31	1,08	1,63	18	10	0,009	0,1585	120,06		0,7823
1,3	Superficial	45	20	43,89	0,96	3,25	18	10	0,018	0,1680	53,28		0,3472
1,3	Superficial	45	20	38,54	0,80	6,50	18	10	0,036	0,1860	22,06		0,1438
1,3	Superficial	45	20	34,31	0,68	9,75	18	10	0,054	0,1950	12,60		0,0821
1,3	Superficial	45	20	30,30	0,58	13,00	18	10	0,072	0,2010	8,09		0,0527
1,3	Superficial	45	20	22,78	0,42	19,50	18	10	0,108	0,2030	3,88		0,0253
1,3	Superficial	45	20	16,14	0,29	26,00	18	10	0,144	0,1970	2,00		0,0131
1,3	Superficial	45	20	10,23	0,18	32,50	18	10	0,181	0,1890	1,00		0,0065
1,3	Profunda	45	20	5,06	0,09	39,00	18	10	0,217	0,1790	0,41		0,0027
1,3	Profunda	45	20	0,39	0,01	45,50	18	10	0,253	0,1075	0,03		0,0002
1,3	Profunda	45	20	0,00	0,00	46,67	18	10	0,259	0,1070	0,00		0,0000
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,4													
F <sub>est</sub>	Falla	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	tan $\phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c/ $\gamma$ H	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$
1,4	Superficial	45	20	50,04	1,19	1,40	18	10	0,008	0,2015	153,46	153,46	1,0000
1,4	Superficial	45	20	49,41	1,17	1,75	18	10	0,010	0,2040	120,06		0,7823
1,4	Superficial	45	20	46,01	1,04	3,50	18	10	0,019	0,2160	53,28		0,3472
1,4	Superficial	45	20	40,63	0,86	7,00	18	10	0,039	0,2410	22,06		0,1438
1,4	Superficial	45	20	36,32	0,74	10,50	18	10	0,058	0,2550	12,60		0,0821
1,4	Superficial	45	20	32,18	0,63	14,00	18	10	0,078	0,2620	8,09		0,0527
1,4	Superficial	45	20	24,33	0,45	21,00	18	10	0,117	0,2650	3,88		0,0253
1,4	Superficial	45	20	17,31	0,31	28,00	18	10	0,156	0,2600	2,00		0,0131
1,4	Superficial	45	20	10,99	0,19	35,00	18	10	0,194	0,2475	1,00		0,0065
1,4	Profunda	45	20	5,45	0,10	42,00	18	10	0,233	0,2220	0,41		0,0027
1,4	Profunda	45	20	0,42	0,01	49,00	18	10	0,272	0,1415	0,03		0,0002
1,4	Profunda	45	20	0,00	0,00	50,26	18	10	0,279	0,1415	0,00		0,0000
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,5													
F <sub>est</sub>	Falla	$\beta$ [°]	q [kPa]	$\phi$ [°]	tan $\phi$	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c/ $\gamma$ H	$K_y$	$\lambda$	$\lambda_{ref}$	$\lambda/\lambda_{ref}$
1,5	Superficial	45	20	51,98	1,28	1,50	18	10	0,008	0,2440	153,46	153,46	1,0000
1,5	Superficial	45	20	51,35	1,25	1,88	18	10	0,010	0,2465	120,06		0,7823
1,5	Superficial	45	20	47,98	1,11	3,75	18	10	0,021	0,2615	53,28		0,3472
1,5	Superficial	45	20	42,59	0,92	7,50	18	10	0,042	0,2940	22,06		0,1438
1,5	Superficial	45	20	38,22	0,79	11,25	18	10	0,063	0,3120	12,60		0,0821
1,5	Superficial	45	20	33,98	0,67	15,00	18	10	0,083	0,3215	8,09		0,0527
1,5	Superficial	45	20	25,85	0,48	22,50	18	10	0,125	0,3270	3,88		0,0253
1,5	Superficial	45	20	18,46	0,33	30,00	18	10	0,167	0,3200	2,00		0,0131
1,5	Superficial	45	20	11,76	0,21	37,50	18	10	0,208	0,3040	1,00		0,0065
1,5	Profunda	45	20	5,84	0,10	45,00	18	10	0,250	0,2625	0,41		0,0027
1,5	Profunda	45	20	0,45	0,01	52,50	18	10	0,292	0,1760	0,03		0,0002
1,5	Profunda	45	20	0,00	0,00	53,85	18	10	0,299	0,1760	0,00		0,0000

Tabla 4-12, Valores de coeficientes sísmicos horizontales ( $K_y$ ) críticos para taludes de 45° ( $q=20$  kPa).  
(Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos ( $K_y$ ) para taludes de  $45^\circ$ . (Figura 4-12)

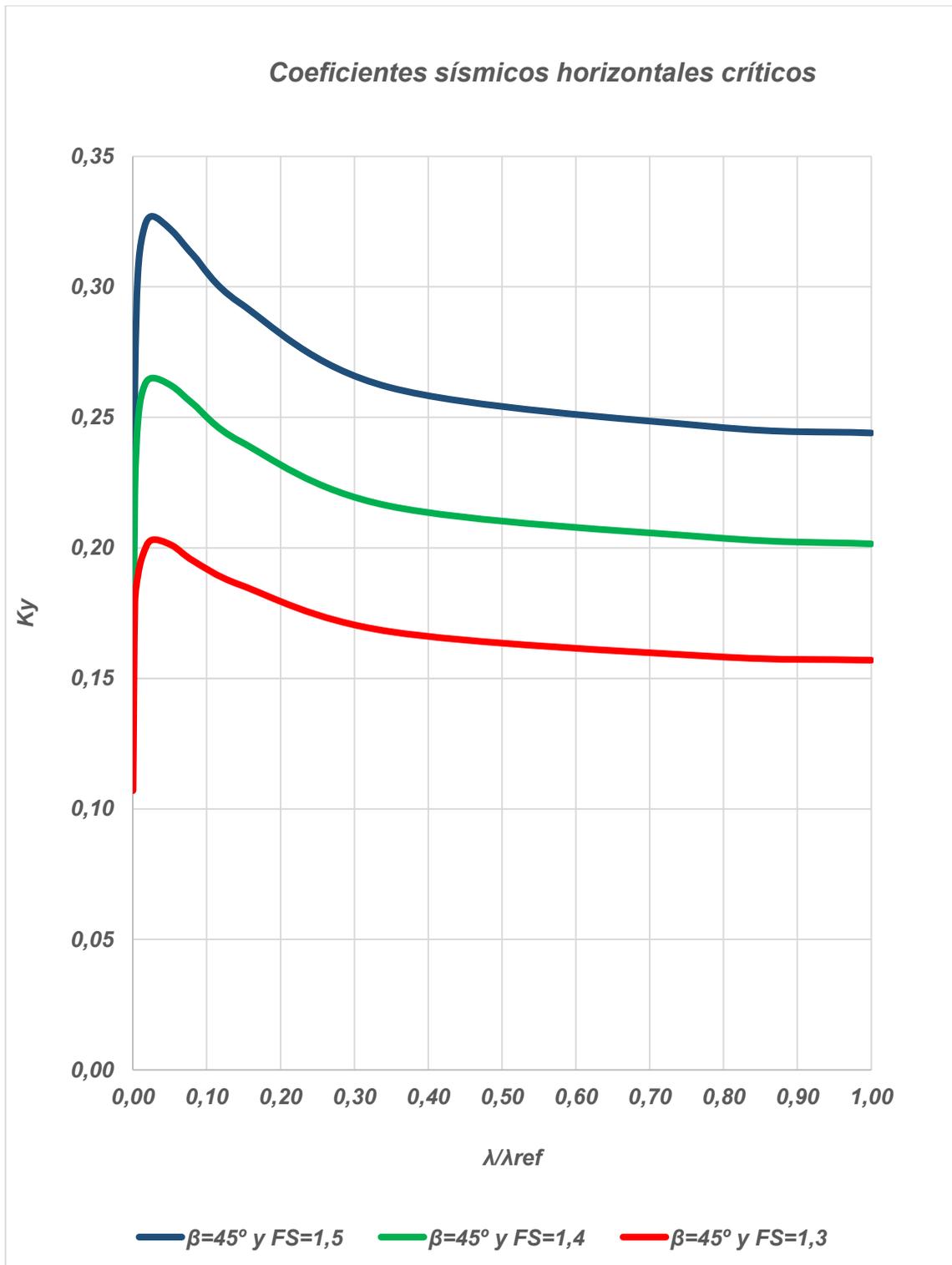


Figura 4-12, Curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos teóricos para taludes de  $45^\circ$  ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

- Talud 30°

FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,3													
F <sub>Sest</sub>	Falla	β [°]	q [kPa]	φ [°]	tan φ	c [kPa]	Y [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c/YH	K <sub>y</sub>	λ	λ <sub>ref</sub>	λ/λ <sub>ref</sub>
1,3	Superficial	30	20	32,95	0,65	1,30	18	10	0,007	0,1340	89,74	89,74	1,0000
1,3	Superficial	30	20	32,49	0,64	1,63	18	10	0,009	0,1355	70,54		0,7861
1,3	Superficial	30	20	29,95	0,58	3,25	18	10	0,018	0,1395	31,91		0,3555
1,3	Superficial	30	20	25,26	0,47	6,50	18	10	0,036	0,1420	13,07		0,1456
1,3	Intermedia	30	20	21,92	0,40	9,75	18	10	0,054	0,1465	7,43		0,0828
1,3	Intermedia	30	20	18,96	0,34	13,00	18	10	0,072	0,1490	4,76		0,0530
1,3	Intermedia	30	20	13,55	0,24	19,50	18	10	0,108	0,1465	2,22		0,0248
1,3	Intermedia	30	20	8,75	0,15	26,00	18	10	0,144	0,1350	1,07		0,0119
1,3	Profunda	30	20	4,94	0,09	32,50	18	10	0,181	0,1160	0,48		0,0053
1,3	Profunda	30	20	2,01	0,04	39,00	18	10	0,217	0,0890	0,16		0,0018
1,3	Profunda	30	20	0,00	0,00	46,61	18	10	0,259	0,0585	0,00	0,0000	
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,4													
F <sub>Sest</sub>	Falla	β [°]	q [kPa]	φ [°]	tan φ	c [kPa]	Y [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c/YH	K <sub>y</sub>	λ	λ <sub>ref</sub>	λ/λ <sub>ref</sub>
1,4	Superficial	30	20	34,92	0,70	1,40	18	10	0,008	0,1765	89,74	89,74	1,0000
1,4	Superficial	30	20	34,44	0,69	1,75	18	10	0,010	0,1780	70,54		0,7861
1,4	Superficial	30	20	31,82	0,62	3,50	18	10	0,019	0,1825	31,91		0,3555
1,4	Superficial	30	20	26,94	0,51	7,00	18	10	0,039	0,1865	13,07		0,1456
1,4	Intermedia	30	20	23,43	0,43	10,50	18	10	0,058	0,1950	7,43		0,0828
1,4	Intermedia	30	20	20,30	0,37	14,00	18	10	0,078	0,1990	4,76		0,0530
1,4	Intermedia	30	20	14,55	0,26	21,00	18	10	0,117	0,1950	2,22		0,0248
1,4	Intermedia	30	20	9,41	0,17	28,00	18	10	0,156	0,1780	1,07		0,0119
1,4	Profunda	30	20	5,31	0,09	35,00	18	10	0,194	0,1400	0,48		0,0053
1,4	Profunda	30	20	2,17	0,04	42,00	18	10	0,233	0,1010	0,16		0,0018
1,4	Profunda	30	20	0,00	0,00	50,19	18	10	0,279	0,0780	0,00	0,0000	
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,5													
F <sub>Sest</sub>	Falla	β [°]	q [kPa]	φ [°]	tan φ	c [kPa]	Y [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c/YH	K <sub>y</sub>	λ	λ <sub>ref</sub>	λ/λ <sub>ref</sub>
1,5	Superficial	30	20	36,79	0,75	1,50	18	10	0,008	0,2165	89,74	89,74	1,0000
1,5	Superficial	30	20	36,31	0,73	1,88	18	10	0,010	0,2185	70,54		0,7861
1,5	Superficial	30	20	33,61	0,66	3,75	18	10	0,021	0,2245	31,91		0,3555
1,5	Superficial	30	20	28,57	0,54	7,50	18	10	0,042	0,2305	13,07		0,1456
1,5	Intermedia	30	20	24,91	0,46	11,25	18	10	0,063	0,2375	7,43		0,0828
1,5	Intermedia	30	20	21,62	0,40	15,00	18	10	0,083	0,2420	4,76		0,0530
1,5	Intermedia	30	20	15,54	0,28	22,50	18	10	0,125	0,2375	2,22		0,0248
1,5	Intermedia	30	20	10,07	0,18	30,00	18	10	0,167	0,2195	1,07		0,0119
1,5	Profunda	30	20	5,69	0,10	37,50	18	10	0,208	0,1640	0,48		0,0053
1,5	Profunda	30	20	2,32	0,04	45,00	18	10	0,250	0,1220	0,16		0,0018
1,5	Profunda	30	20	0,00	0,00	53,78	18	10	0,299	0,0970	0,00	0,0000	

Tabla 4-13, Valores de coeficientes sísmicos horizontales ( $K_y$ ) críticos para taludes de 30° ( $q=20$  kPa).  
(Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos ( $K_y$ ) para taludes de  $30^\circ$ . (Figura 4-13)

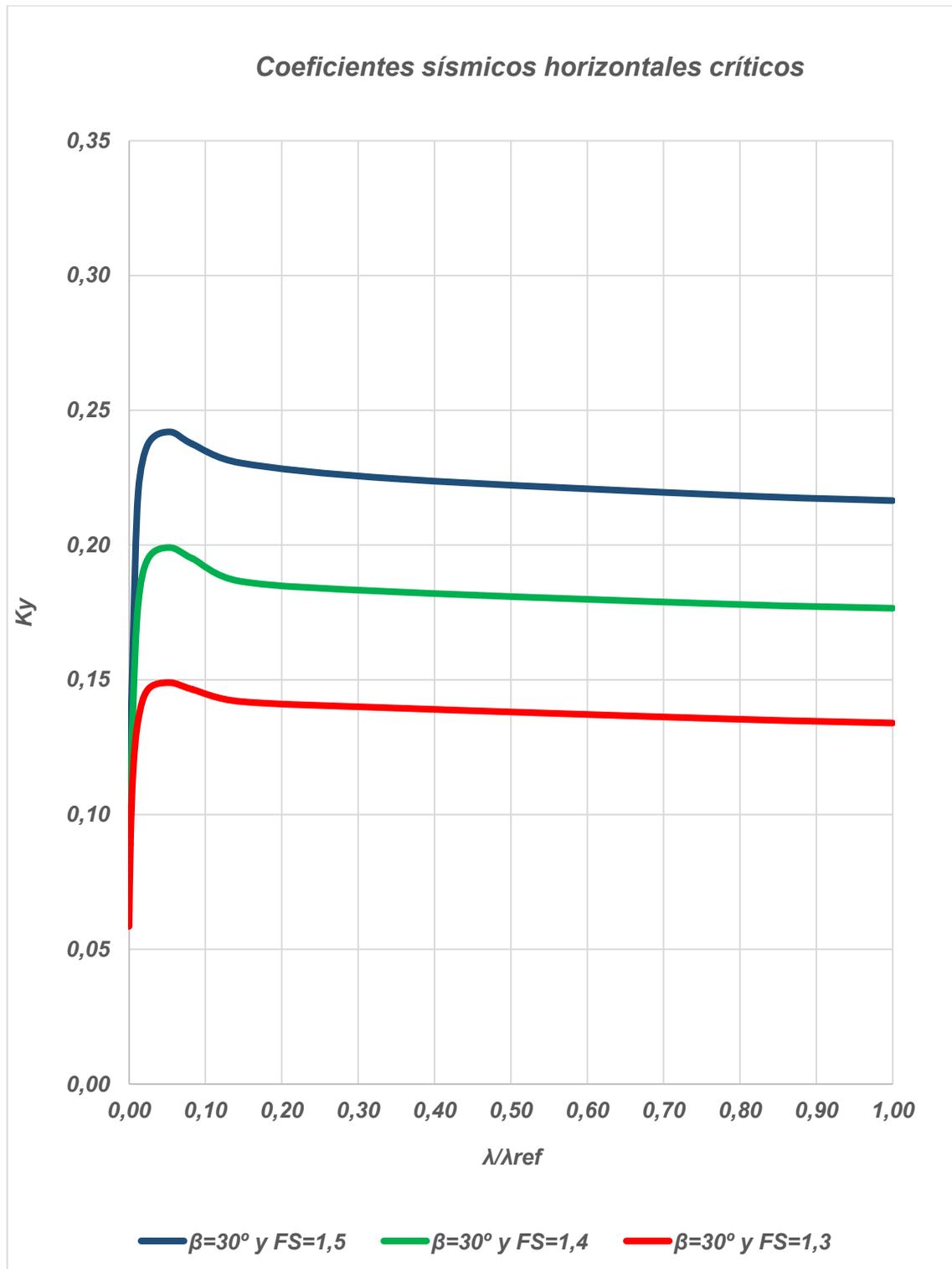


Figura 4-13, Curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos teóricos para taludes de  $30^\circ$  ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

- Talud 15°

FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,3													
F <sub>Sest</sub>	Falla	β [°]	q [kPa]	φ [°]	tan φ	c [kPa]	γ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c/γH	K <sub>y</sub>	λ	λ <sub>ref</sub>	λ/λ <sub>ref</sub>
1,3	Intermedia	15	20	16,83	0,30	1,30	18	10	0,007	0,0780	41,89	41,89	1,0000
1,3	Intermedia	15	20	16,52	0,30	1,63	18	10	0,009	0,0780	32,85		0,7842
1,3	Intermedia	15	20	15,13	0,27	3,25	18	10	0,018	0,0780	14,98		0,3575
1,3	Intermedia	15	20	12,53	0,22	6,50	18	10	0,036	0,0780	6,15		0,1469
1,3	Profunda	15	20	10,35	0,18	9,75	18	10	0,054	0,0780	3,37		0,0805
1,3	Profunda	15	20	8,94	0,16	13,00	18	10	0,072	0,0770	2,18		0,0520
1,3	Profunda	15	20	6,23	0,11	19,50	18	10	0,108	0,0720	1,01		0,0241
1,3	Profunda	15	20	3,90	0,07	26,00	18	10	0,144	0,0630	0,47		0,0113
1,3	Profunda	15	20	2,08	0,04	32,50	18	10	0,181	0,0480	0,20		0,0048
1,3	Profunda	15	20	0,00	0,00	45,76	18	10	0,254	0,0325	0,00		0,0000
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,4													
F <sub>Sest</sub>	Falla	β [°]	q [kPa]	φ [°]	tan φ	c [kPa]	γ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c/γH	K <sub>y</sub>	λ	λ <sub>ref</sub>	λ/λ <sub>ref</sub>
1,4	Intermedia	15	20	18,05	0,33	1,40	18	10	0,008	0,1030	41,89	41,89	1,0000
1,4	Intermedia	15	20	17,71	0,32	1,75	18	10	0,010	0,1030	32,85		0,7842
1,4	Intermedia	15	20	16,24	0,29	3,50	18	10	0,019	0,1030	14,98		0,3575
1,4	Intermedia	15	20	13,46	0,24	7,00	18	10	0,039	0,1030	6,15		0,1469
1,4	Profunda	15	20	11,13	0,20	10,50	18	10	0,058	0,1030	3,37		0,0805
1,4	Profunda	15	20	9,62	0,17	14,00	18	10	0,078	0,1020	2,18		0,0520
1,4	Profunda	15	20	6,70	0,12	21,00	18	10	0,117	0,0960	1,01		0,0241
1,4	Profunda	15	20	4,20	0,07	28,00	18	10	0,156	0,0815	0,47		0,0113
1,4	Profunda	15	20	2,24	0,04	35,00	18	10	0,194	0,0590	0,20		0,0048
1,4	Profunda	15	20	0,00	0,00	49,28	18	10	0,274	0,0420	0,00		0,0000
FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO = 1,5													
F <sub>Sest</sub>	Falla	β [°]	q [kPa]	φ [°]	tan φ	c [kPa]	γ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]	c/γH	K <sub>y</sub>	λ	λ <sub>ref</sub>	λ/λ <sub>ref</sub>
1,5	Intermedia	15	20	19,24	0,35	1,50	18	10	0,008	0,1280	41,89	41,89	1,0000
1,5	Intermedia	15	20	18,89	0,34	1,88	18	10	0,010	0,1280	32,85		0,7842
1,5	Intermedia	15	20	17,33	0,31	3,75	18	10	0,021	0,1280	14,98		0,3575
1,5	Intermedia	15	20	14,38	0,26	7,50	18	10	0,042	0,1280	6,15		0,1469
1,5	Profunda	15	20	11,90	0,21	11,25	18	10	0,063	0,1280	3,37		0,0805
1,5	Profunda	15	20	10,29	0,18	15,00	18	10	0,083	0,1265	2,18		0,0520
1,5	Profunda	15	20	7,18	0,13	22,50	18	10	0,125	0,1180	1,01		0,0241
1,5	Profunda	15	20	4,49	0,08	30,00	18	10	0,167	0,0980	0,47		0,0113
1,5	Profunda	15	20	2,40	0,04	37,50	18	10	0,208	0,0695	0,20		0,0048
1,5	Profunda	15	20	0,00	0,00	52,80	18	10	0,293	0,0510	0,00		0,0000

Tabla 4-14, Valores de coeficientes sísmicos horizontales ( $K_y$ ) críticos para taludes de 15° ( $q=20$  kPa).  
(Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos tabulados se construyen las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos ( $K_y$ ) para taludes de  $15^\circ$  (Figura 4-14).

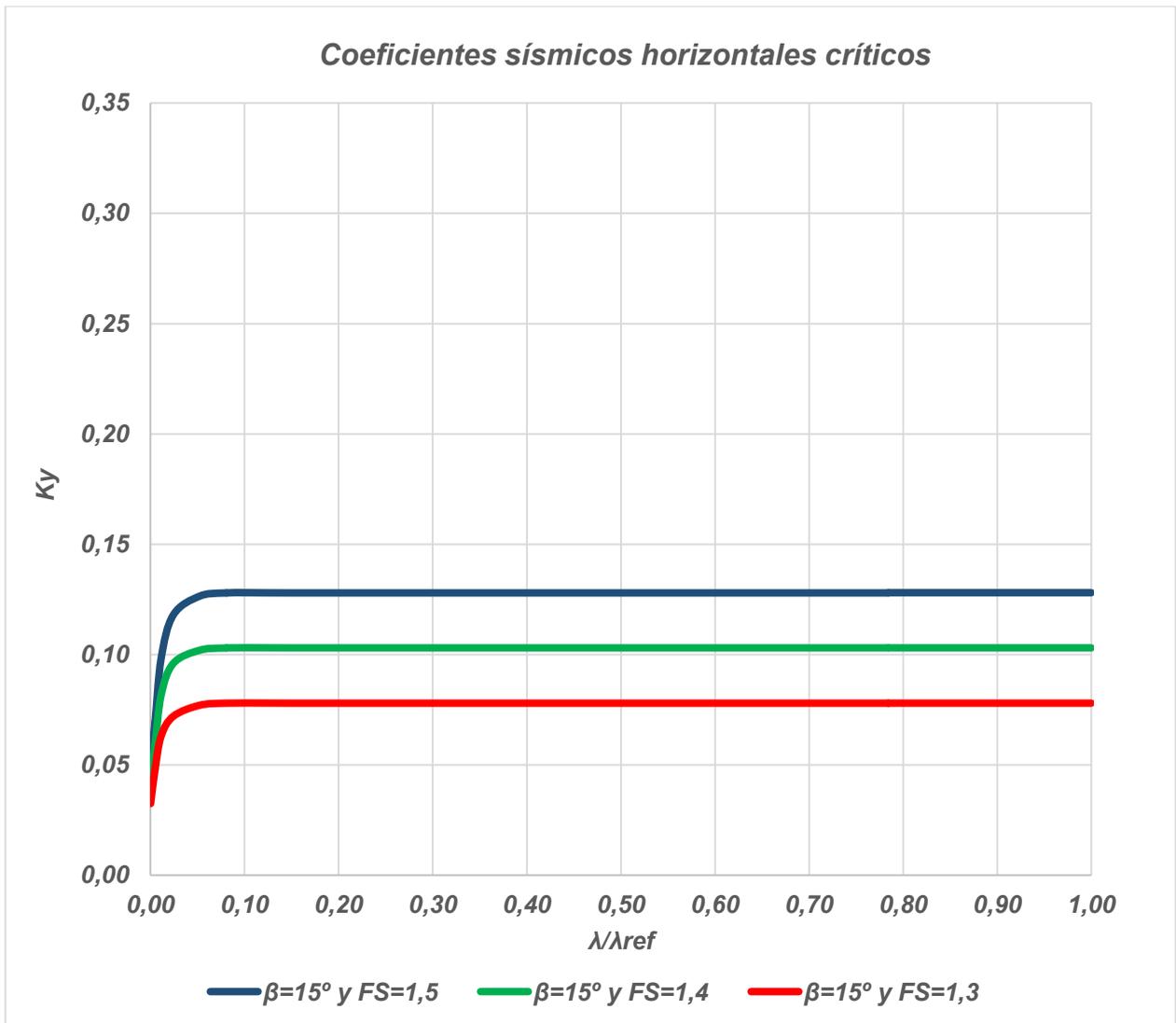


Figura 4-14, Curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos teóricos para taludes de  $15^\circ$  ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

### 4.2.3 Curvas de diseño simplificadas - Caso sin sobrecarga ( $q=0$ )

A continuación, se presentan los valores de las regresiones lineales realizadas (para el caso con  $q=0$ ) para cada punto de inflexión seleccionado de las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos, asociado a cada  $FS_{est}$ . Desde el punto de vista de inclinación se tiene lo siguiente:

#### - Talud 45°

FS	Ky
1,5	0,154
1,4	0,123
1,3	0,093

Tabla 4-15, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 1. (Elaboración propia 2016)

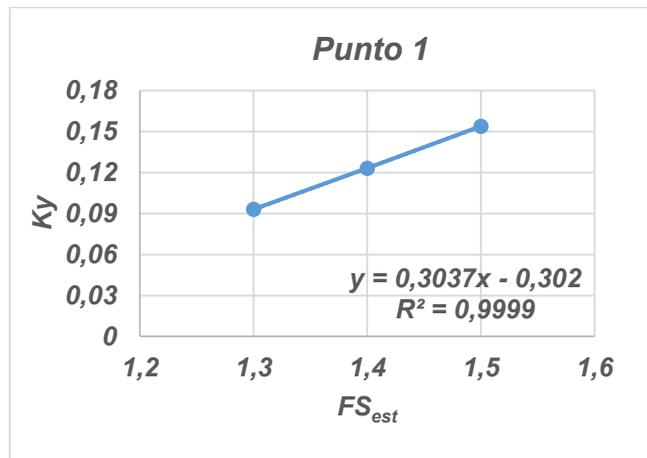


Figura 4-15, Punto 1 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,296
1,4	0,241
1,3	0,185

Tabla 4-16, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 2. (Elaboración propia, 2016)

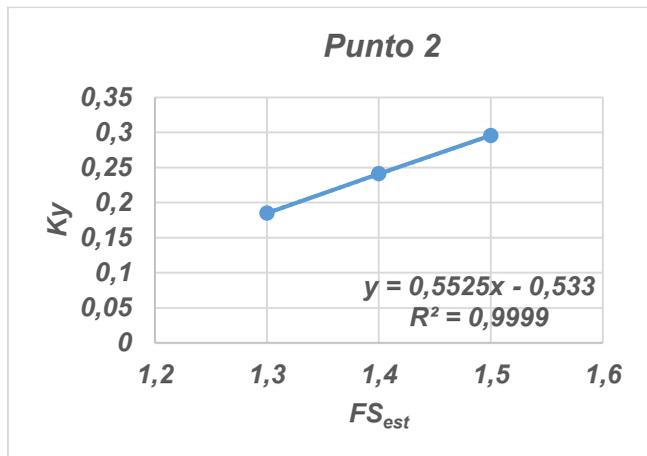


Figura 4-16, Punto 2 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,293
1,4	0,239
1,3	0,183

Tabla 4-17, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 3. (Elaboración propia, 2016)

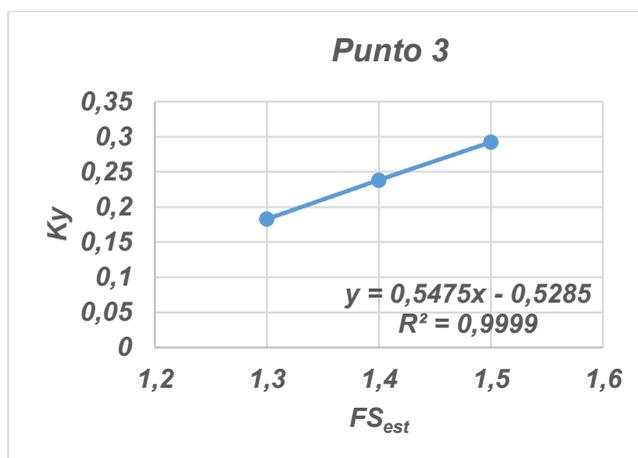


Figura 4-17, Punto 3 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,247
1,4	0,203
1,3	0,158

Tabla 4-18, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 4. (Elaboración propia, 2016)

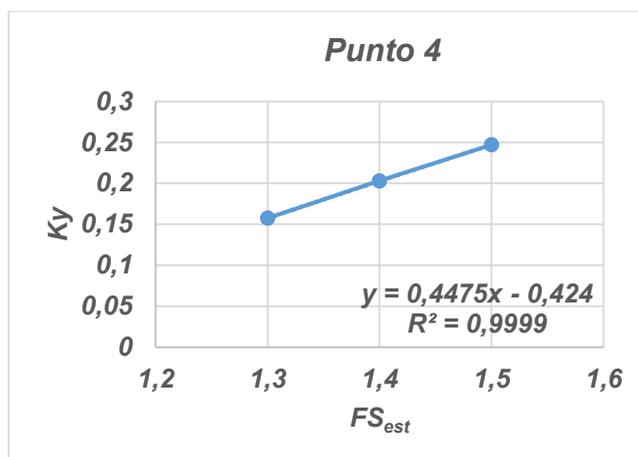


Figura 4-18, Punto 4 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,229
1,4	0,190
1,3	0,147

Tabla 4-19, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 5. (Elaboración propia, 2016)

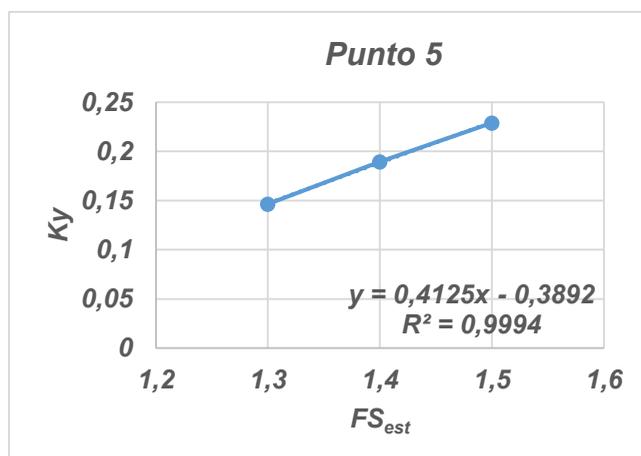


Figura 4-19, Punto 5 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

Una vez calculada la ecuación de cada punto en función de los  $FS_{est}$ , se procede a elaborar las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un talud de  $45^\circ$ .

- $FS_{est} = 1,3$

FS	1,3	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
<b>Punto 1</b>		0,093	0,000
<b>Punto 2</b>		0,185	0,022
<b>Punto 3</b>		0,183	0,078
<b>Punto 4</b>		0,158	0,342
<b>Punto 5</b>		0,147	1,000

Tabla 4-20, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

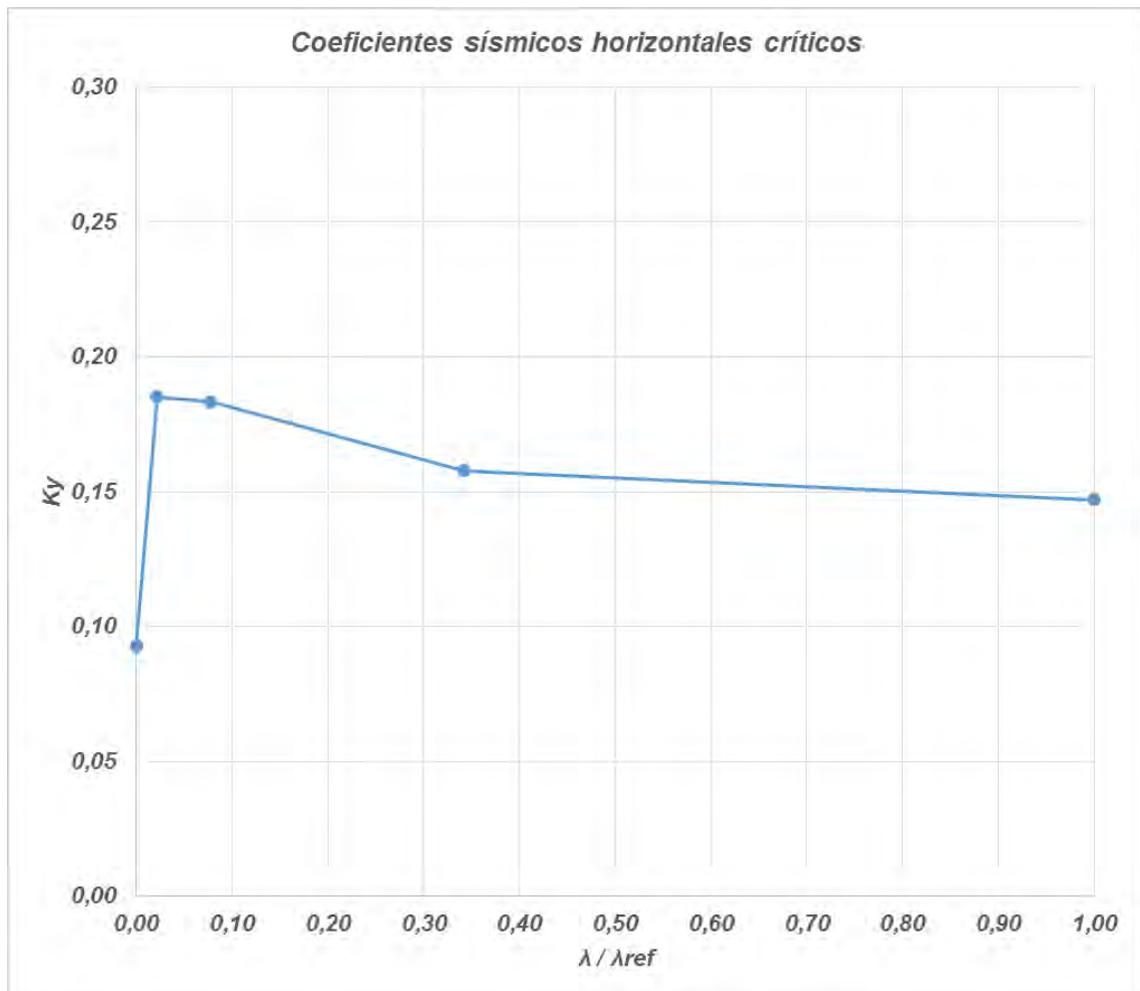


Figura 4-20, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,4$

FS	1,4	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,123	0,000
Punto 2		0,241	0,022
Punto 3		0,238	0,078
Punto 4		0,203	0,342
Punto 5		0,188	1,000

Tabla 4-21, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

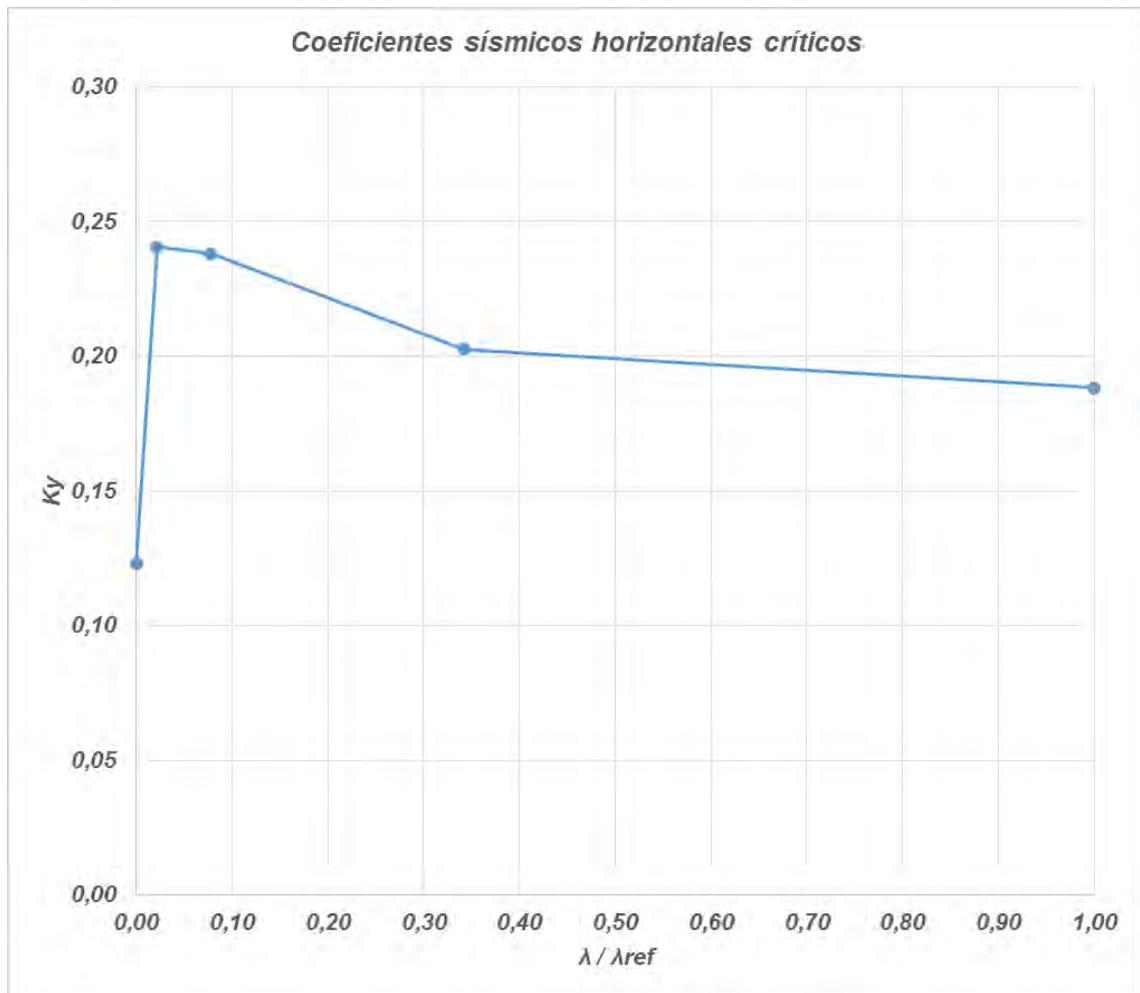


Figura 4-21, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,5$

FS	1,5	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,154	0,000
Punto 2		0,296	0,022
Punto 3		0,293	0,078
Punto 4		0,247	0,342
Punto 5		0,230	1,000

Tabla 4-22, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

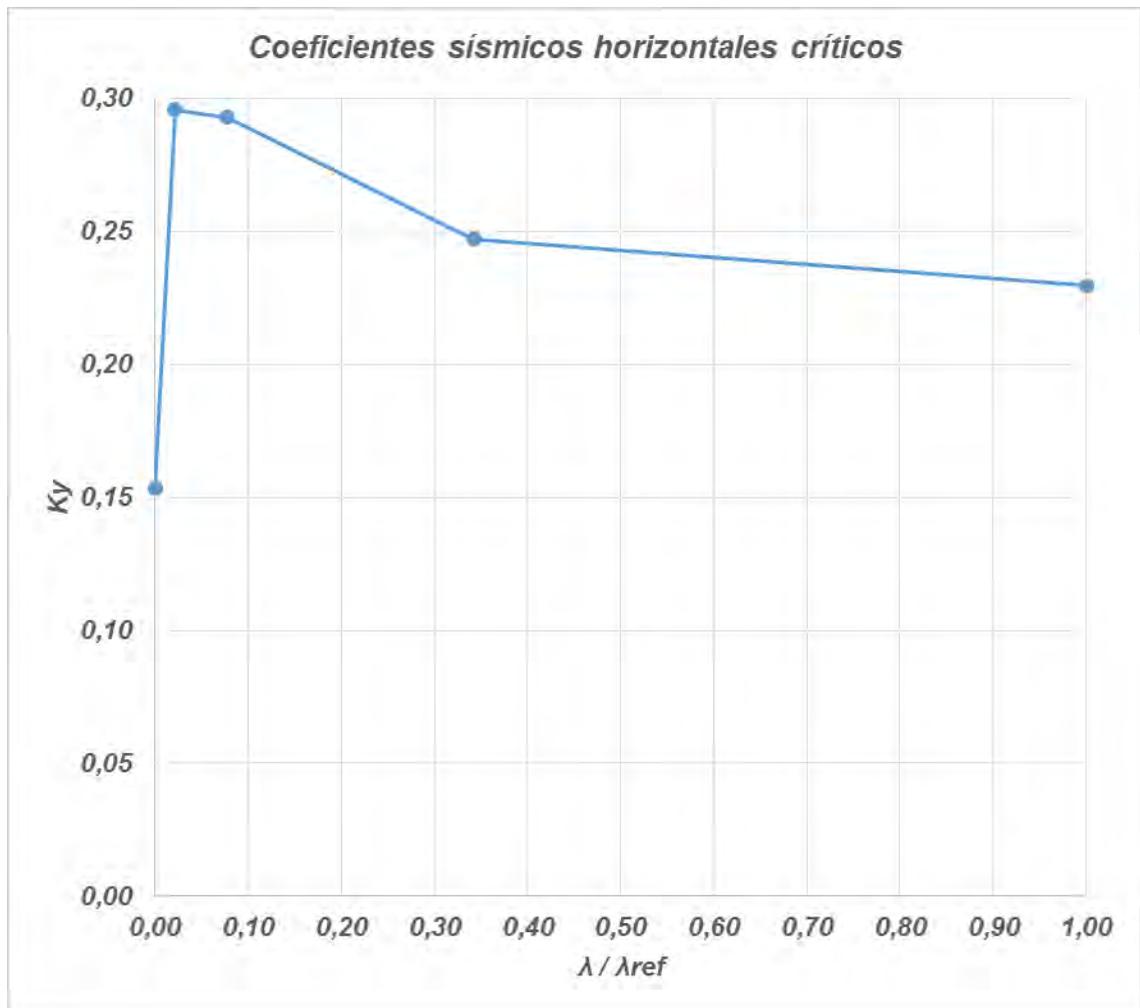


Figura 4-22, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

Con los resultados obtenidos anteriormente, se construye el ábaco de coeficientes horizontales sísmicos críticos para un talud de 45°.

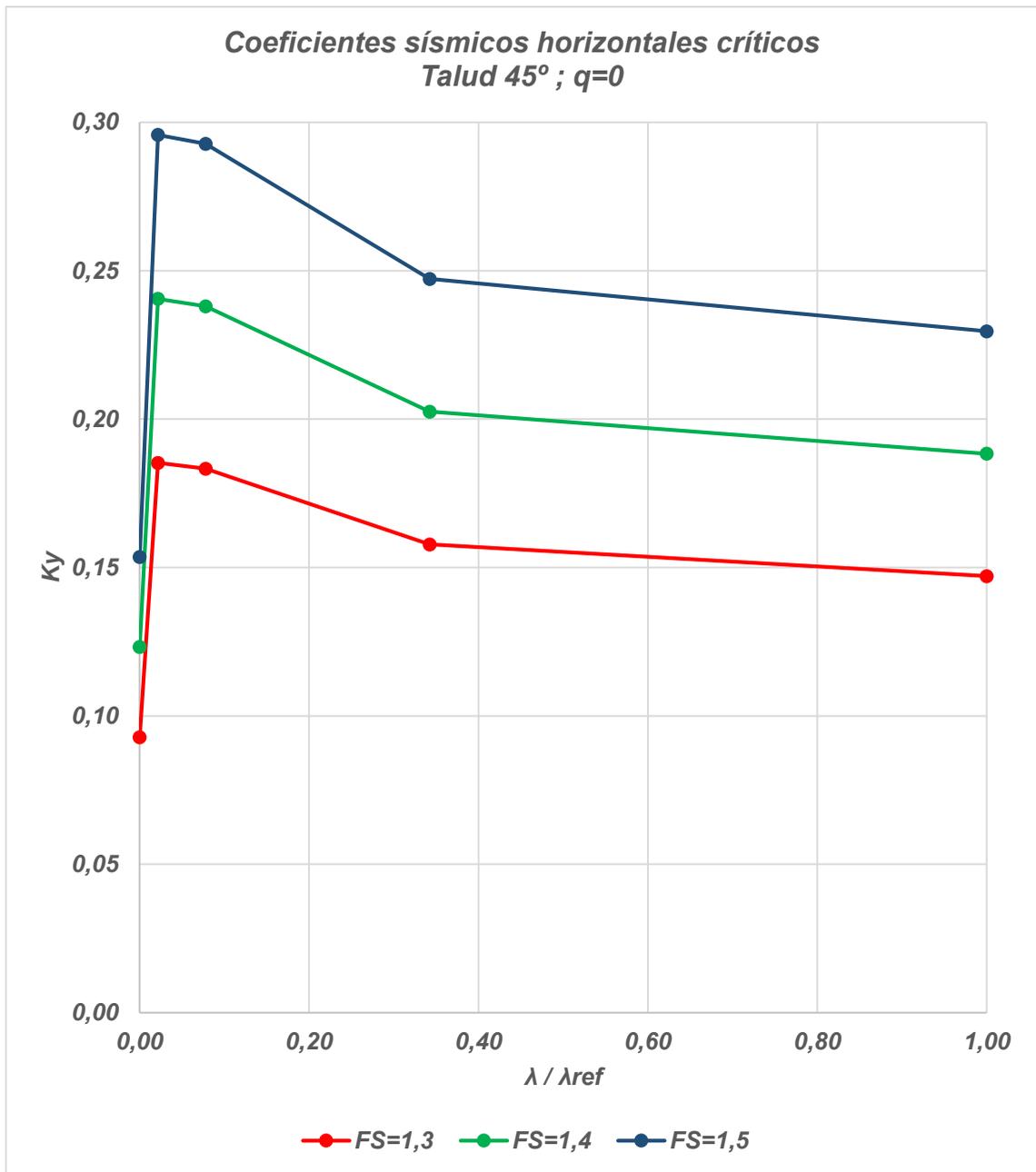


Figura 4-23, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 45° sin sobrecarga (q=0). (Elaboración propia, 2016)

- Talud 30°

FS	Ky
1,5	0,087
1,4	0,070
1,3	0,053

Tabla 4-23, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 1. (Elaboración propia, 2016)

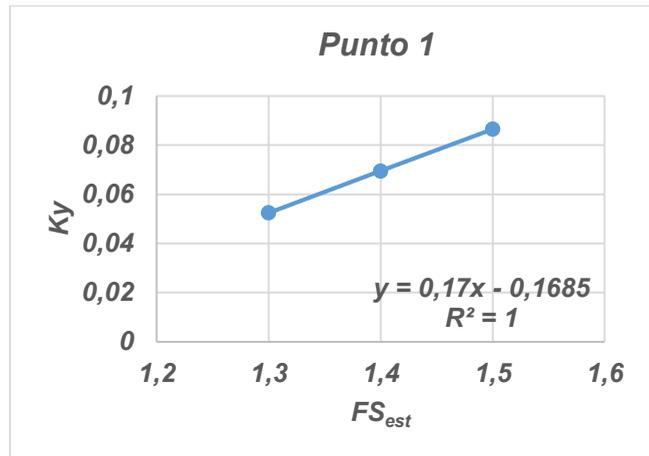


Figura 4-24, Punto 1 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,225
1,4	0,182
1,3	0,138

Tabla 4-24, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 2. (Elaboración propia, 2016)

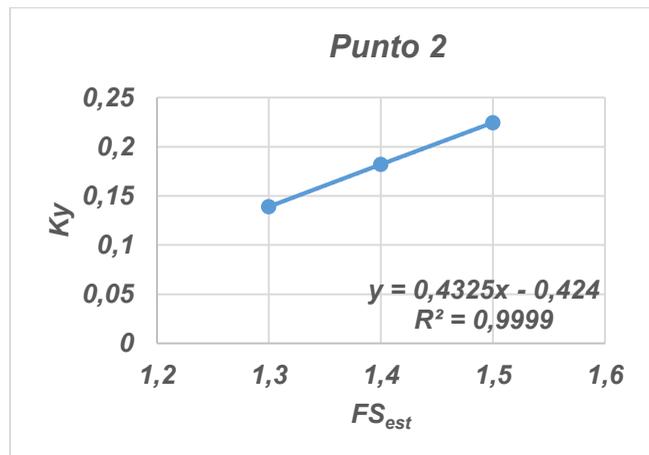


Figura 4-25, Punto 2 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,225
1,4	0,184
1,3	0,140

Tabla 4-25, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 3. (Elaboración propia, 2016)

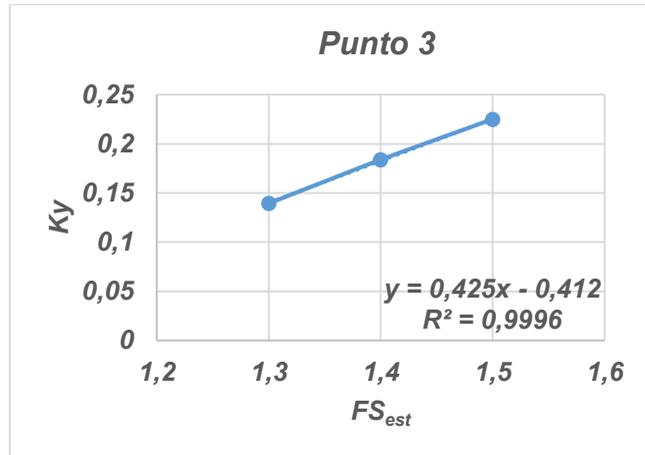


Figura 4-26, Punto 3 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,211
1,4	0,172
1,3	0,131

Tabla 4-26, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 4. (Elaboración propia, 2016)

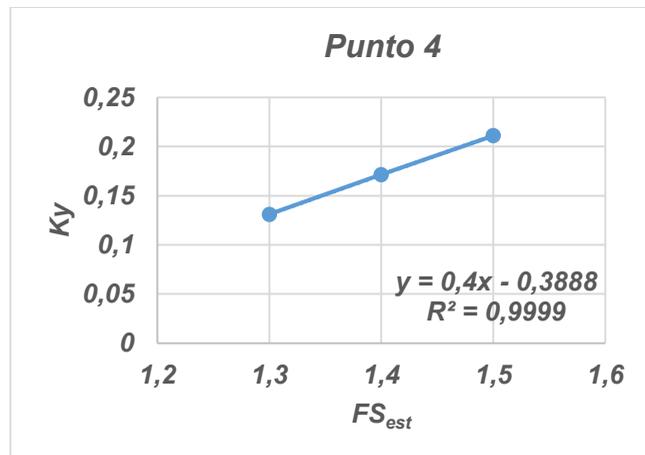


Figura 4-27, Punto 4 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,206
1,4	0,168
1,3	0,128

Tabla 4-27, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 5. (Elaboración propia, 2016)

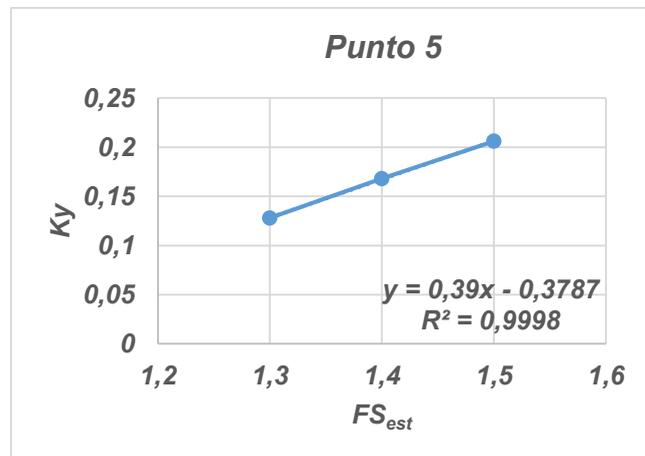


Figura 4-28, Punto 5 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

Una vez calculada la ecuación de cada punto en función de los  $FS_{est}$ , se procede a elaborar las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un talud de  $30^\circ$ .

- $FS_{est} = 1,3$

FS	1,3	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,053	0,000
Punto 2		0,138	0,048
Punto 3		0,141	0,141
Punto 4		0,131	0,346
Punto 5		0,128	1,000

Tabla 4-28, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

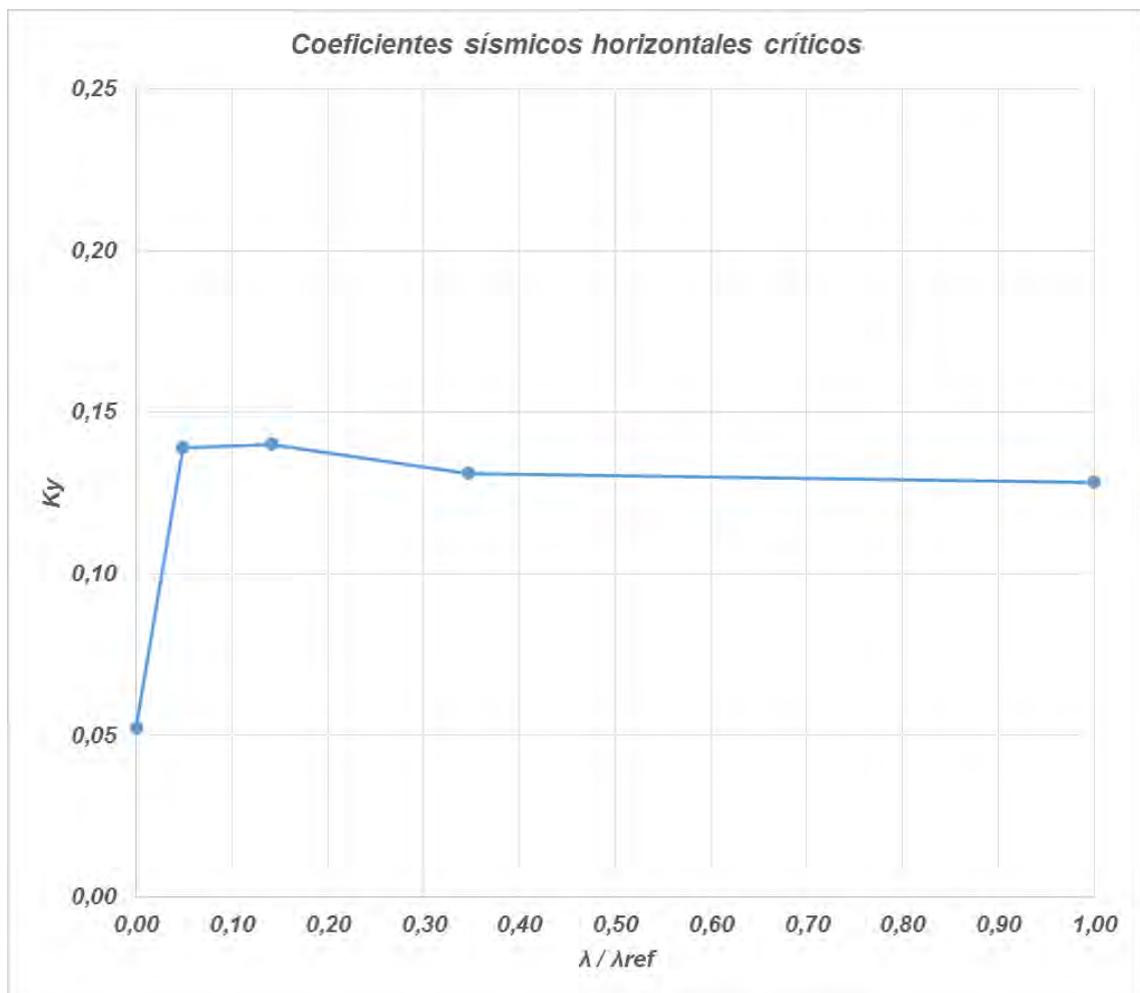


Figura 4-29, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,4$

FS	1,4	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,070	0,000
Punto 2		0,182	0,048
Punto 3		0,183	0,141
Punto 4		0,171	0,346
Punto 5		0,167	1,000

Tabla 4-29, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

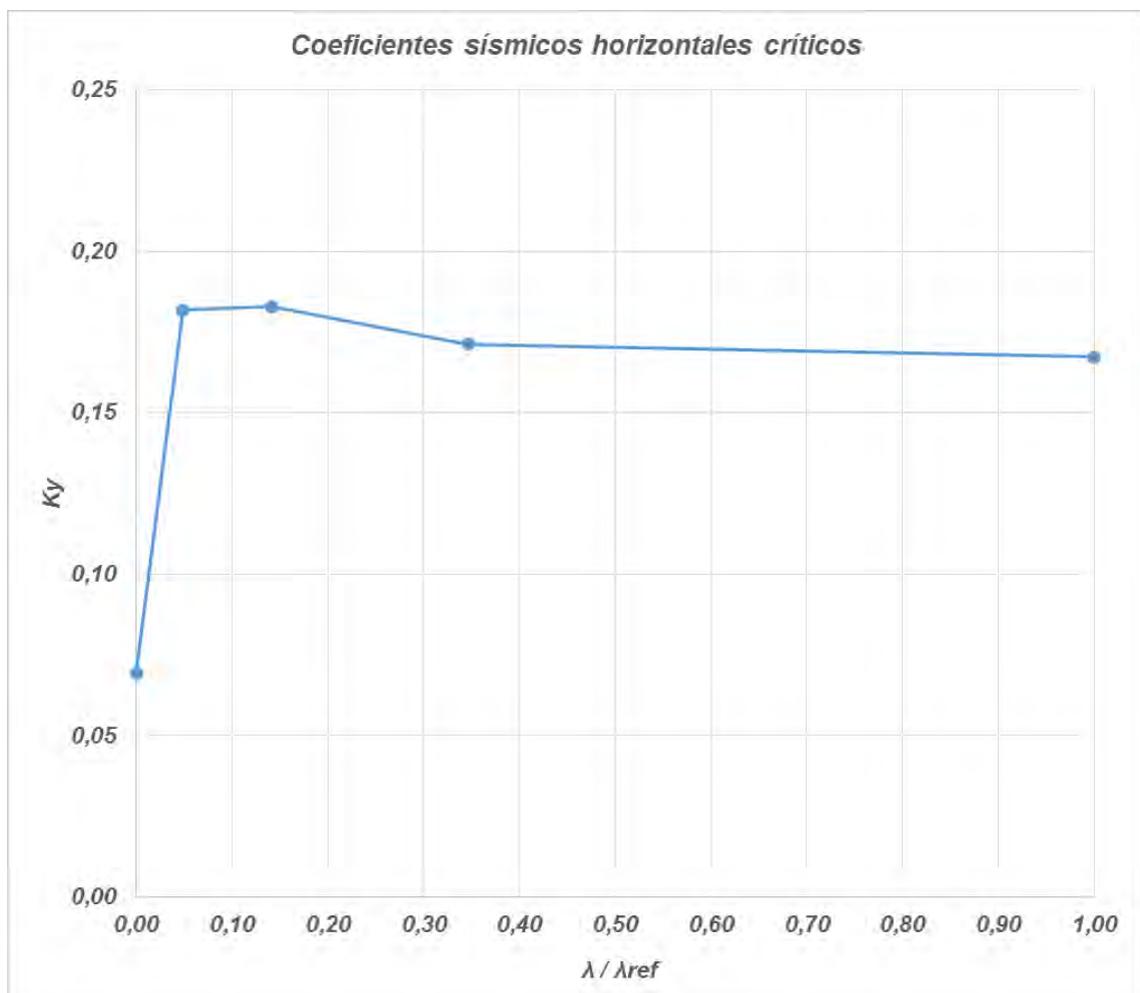


Figura 4-30, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,5$

FS	1,5	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,087	0,000
Punto 2		0,225	0,048
Punto 3		0,226	0,141
Punto 4		0,211	0,346
Punto 5		0,206	1,000

Tabla 4-30, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

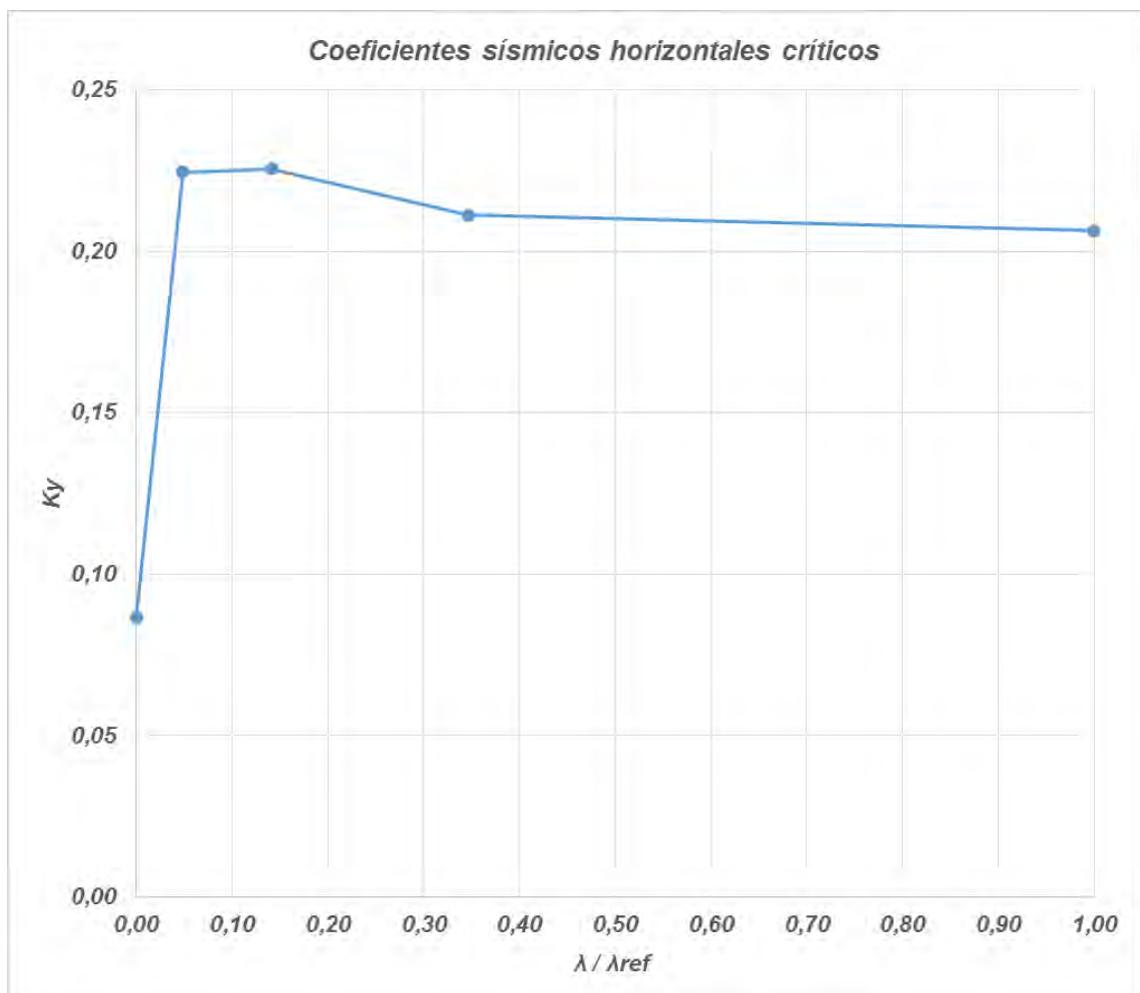


Figura 4-31, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

Con los resultados obtenidos anteriormente, se construye el ábaco de coeficientes horizontales sísmicos críticos para un talud de 30°.

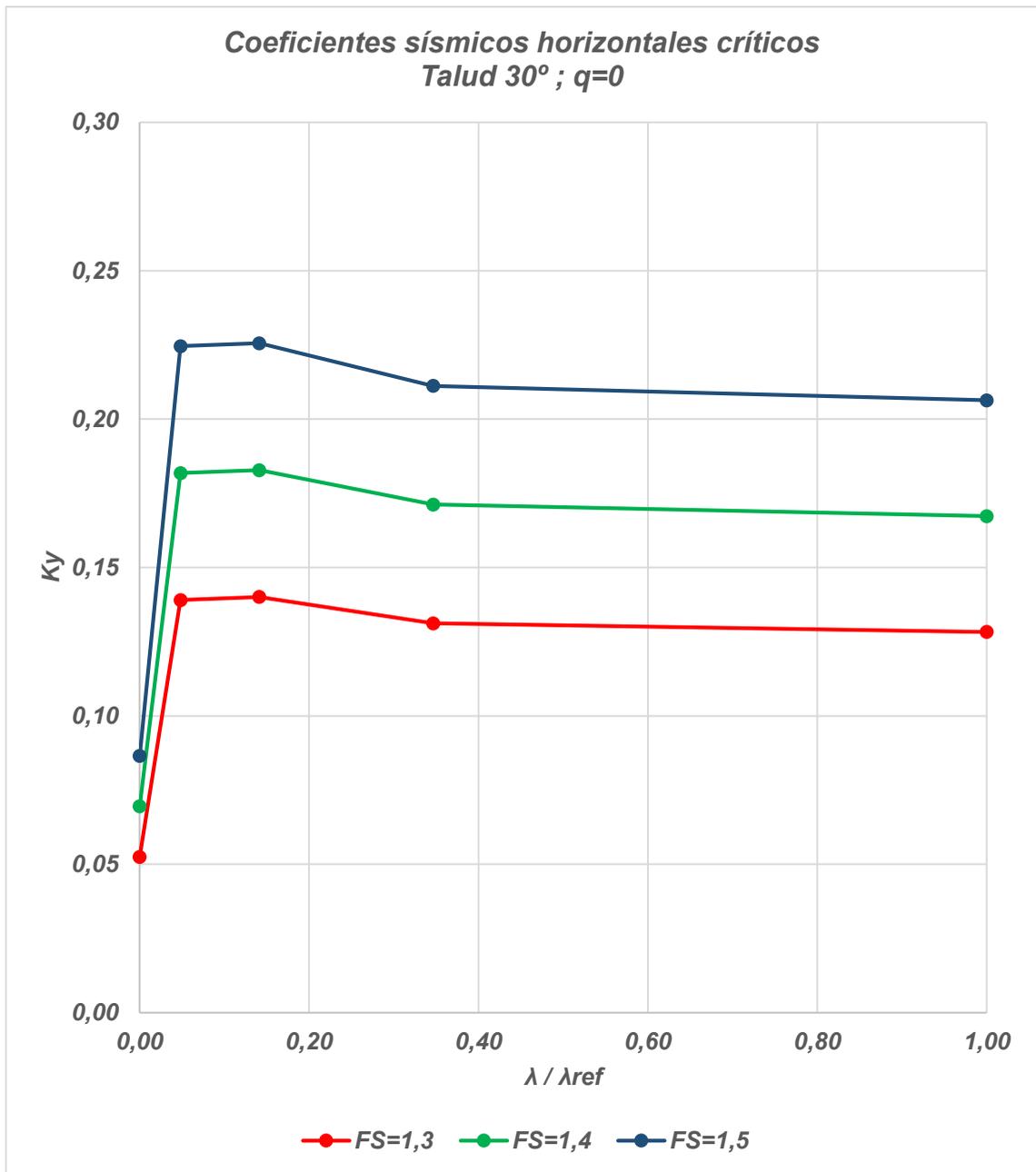


Figura 4-32, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 30° sin sobrecarga ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

- Talud 15°

FS	Ky
1,5	0,040
1,4	0,032
1,3	0,024

Tabla 4-31, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 1. (Elaboración propia, 2016)

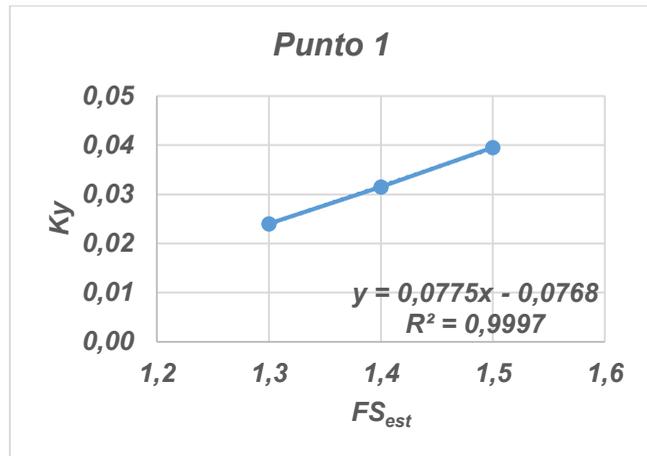


Figura 4-33, Punto 1 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,118
1,4	0,095
1,3	0,072

Tabla 4-32, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 2. (Elaboración propia, 2016)

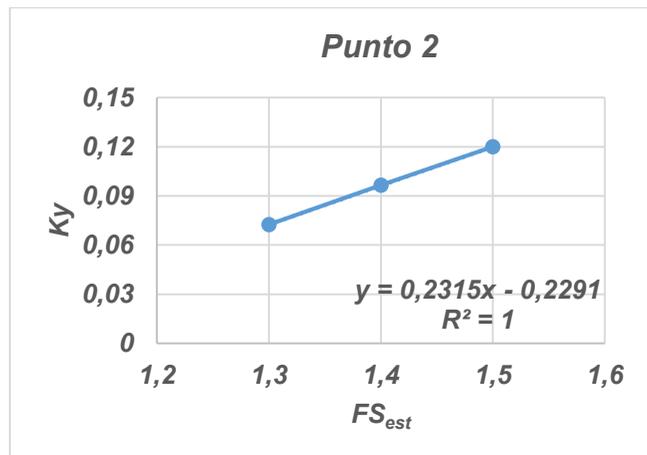


Figura 4-34, Punto 2 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,121
1,4	0,098
1,3	0,073

Tabla 4-33, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 3. (Elaboración propia, 2016)

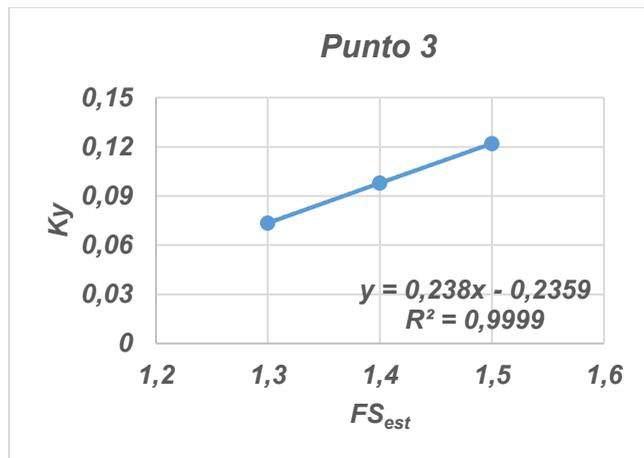


Figura 4-35, Punto 3 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,122
1,4	0,098
1,3	0,074

Tabla 4-34, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 4. (Elaboración propia, 2016)

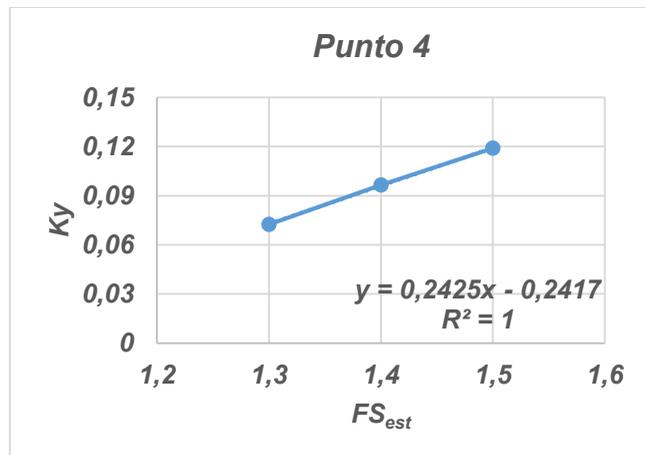


Figura 4-36, Punto 4 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,122
1,4	0,097
1,3	0,074

Tabla 4-35, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 5. (Elaboración propia, 2016)

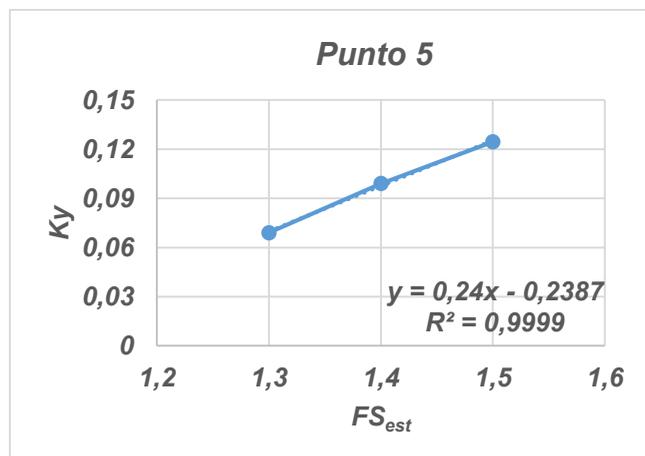


Figura 4-37, Punto 5 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

Una vez calculada la ecuación de cada punto en función de los  $FS_{est}$ , se procede a elaborar las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un talud de  $15^\circ$ .

- $FS_{est} = 1,3$

FS	1,3	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,024	0,000
Punto 2		0,072	0,048
Punto 3		0,074	0,078
Punto 4		0,074	0,141
Punto 5		0,073	1,000

Tabla 4-36, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

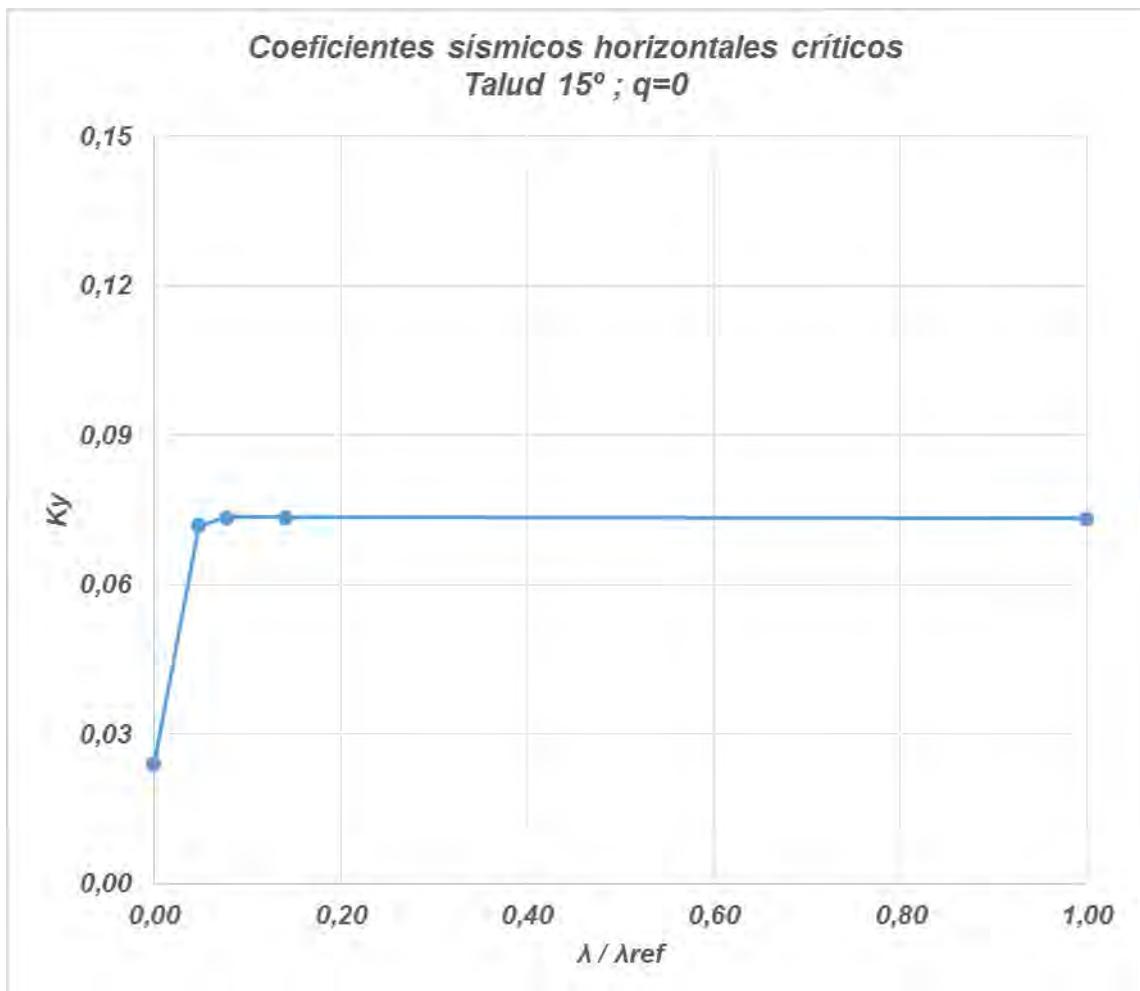


Figura 4-38, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,4$

FS	1,4	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,032	0,000
Punto 2		0,095	0,048
Punto 3		0,097	0,078
Punto 4		0,098	0,141
Punto 5		0,097	1,000

Tabla 4-37, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

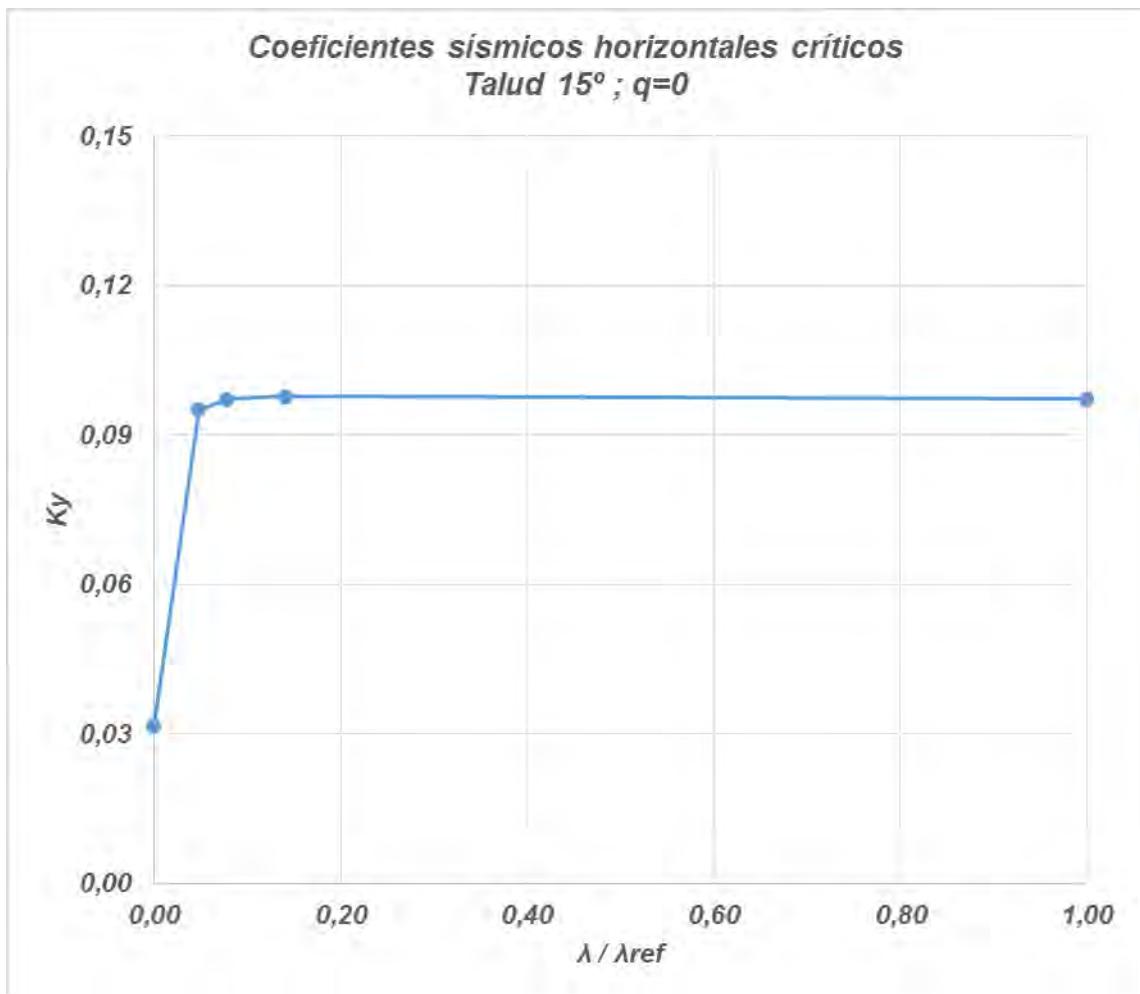


Figura 4-39, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,5$

FS	1,5	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,039	0,000
Punto 2		0,118	0,048
Punto 3		0,121	0,078
Punto 4		0,122	0,141
Punto 5		0,121	1,000

Tabla 4-38, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

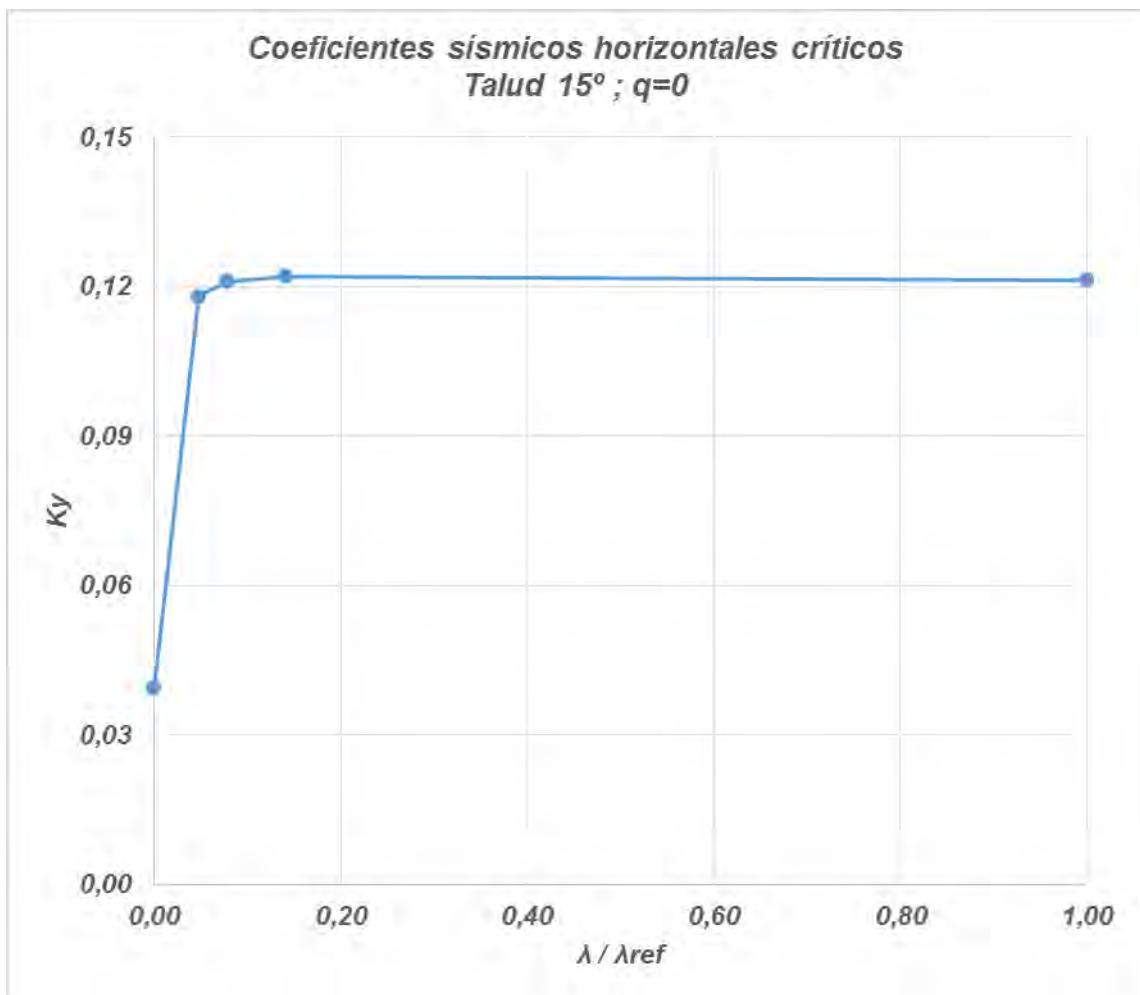


Figura 4-40, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

Con los resultados obtenidos anteriormente, se construye el ábaco de coeficientes horizontales sísmicos críticos para un talud de 15°.

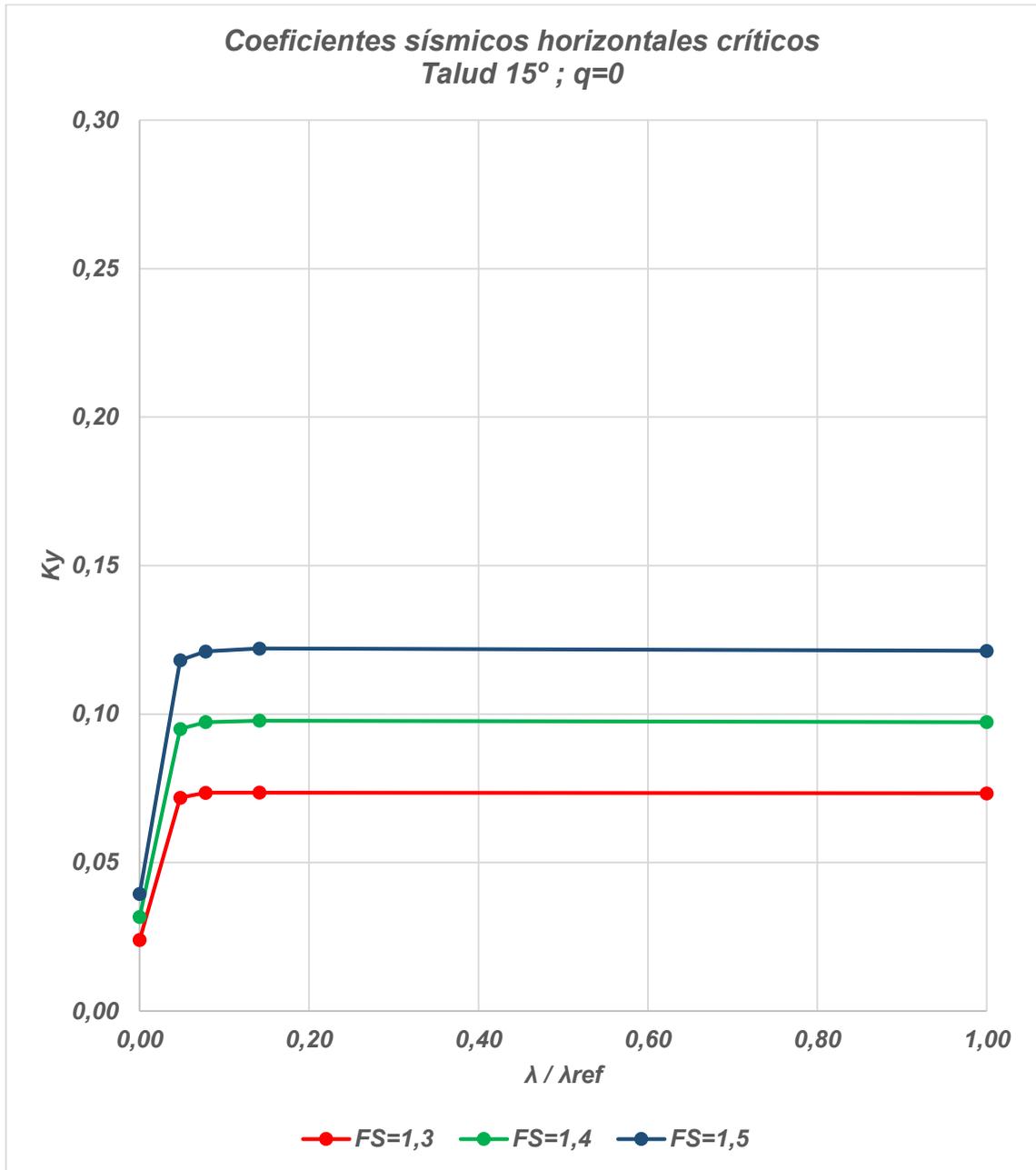


Figura 4-41, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 15° sin sobrecarga ( $q=0$ ).  
(Elaboración propia, 2016)

#### 4.2.4 Curvas de diseño simplificadas - Caso con sobrecarga (q=20 kPa)

A continuación, se presentan los valores de las regresiones lineales realizadas (para el caso q=20 kPa) para cada punto de inflexión seleccionado de las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos, asociado a cada  $FS_{est}$ . Desde el punto de vista de inclinación se tiene lo siguiente:

##### - Talud 45°

FS	Ky
1,5	0,176
1,4	0,142
1,3	0,107

Tabla 4-39, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 1. (Elaboración propia, 2016)

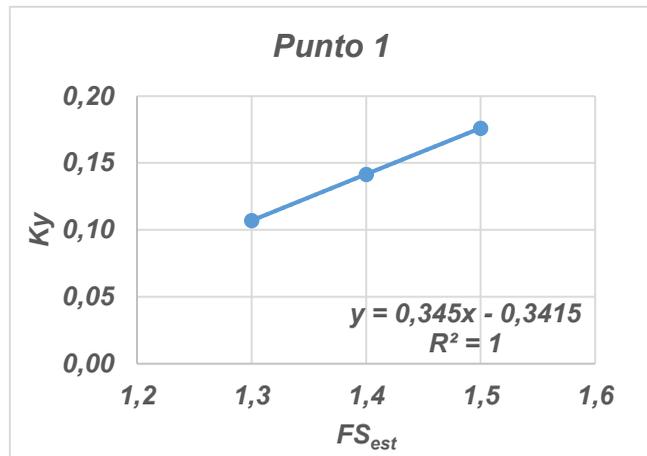


Figura 4-42, Punto 1 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,327
1,4	0,265
1,3	0,203

Tabla 4-40, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 2. (Elaboración propia, 2016)

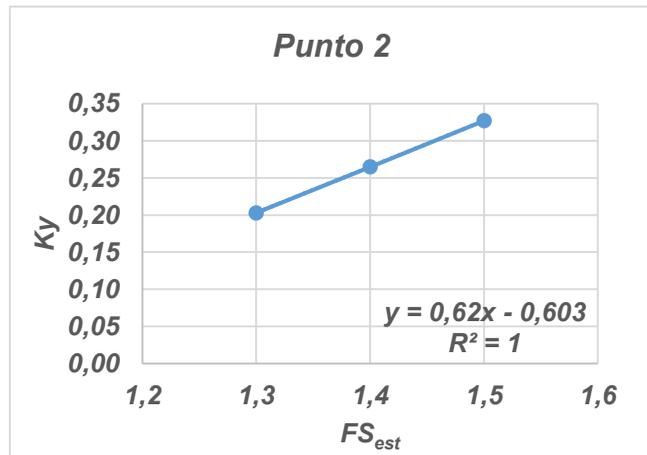


Figura 4-43, Punto 2 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,294
1,4	0,241
1,3	0,186

Tabla 4-41, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 3. (Elaboración propia, 2016)

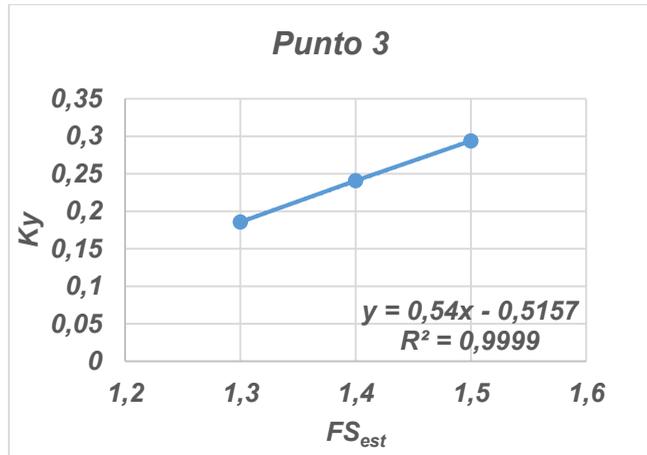


Figura 4-44, Punto 3 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,262
1,4	0,216
1,3	0,168

Tabla 4-42, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 4. (Elaboración propia, 2016)

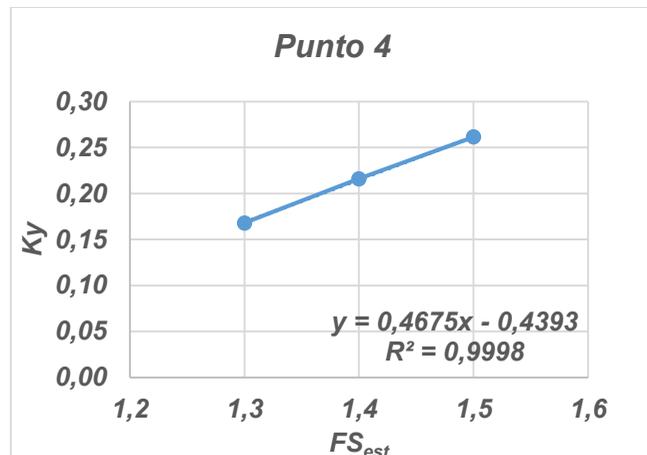


Figura 4-45, Punto 4 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,244
1,4	0,202
1,3	0,157

Tabla 4-43, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 5. (Elaboración propia, 2016)

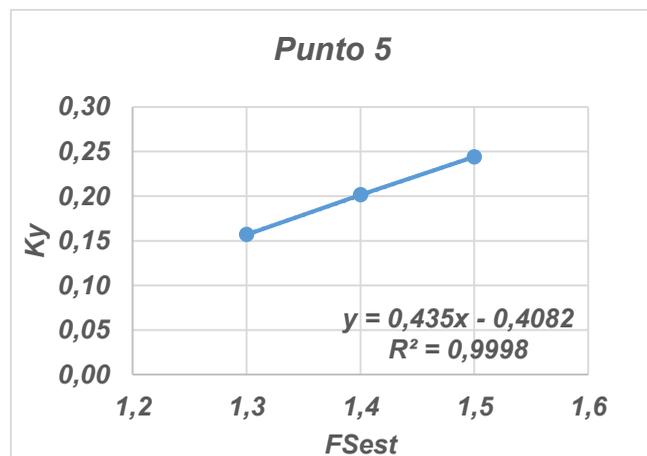


Figura 4-46, Punto 5 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

Una vez calculada la ecuación de cada punto en función de los  $FS_{est}$ , se procede a elaborar las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un talud de  $45^\circ$ .

- $FS_{est} = 1,3$

FS	1,3	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,107	0,000
Punto 2		0,203	0,025
Punto 3		0,186	0,082
Punto 4		0,168	0,347
Punto 5		0,157	1,000

Tabla 4-44, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

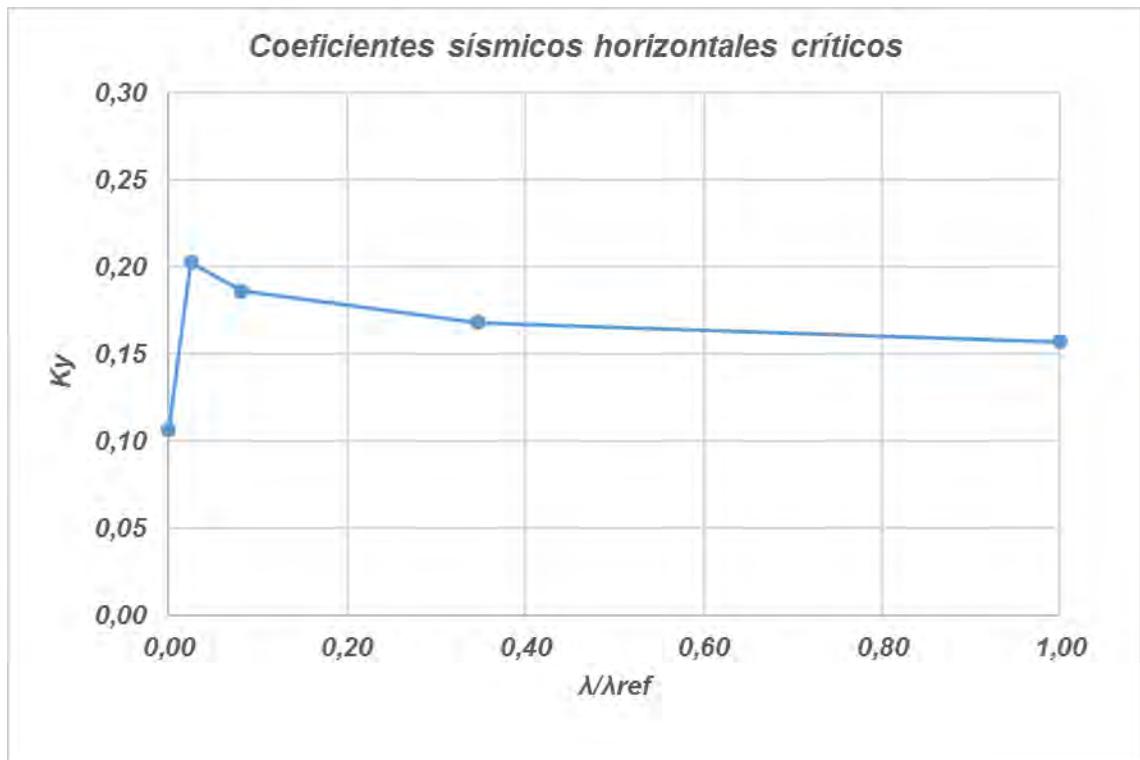


Figura 4-47, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,4$

FS	1,4	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,142	0,000
Punto 2		0,265	0,025
Punto 3		0,240	0,082
Punto 4		0,215	0,347
Punto 5		0,201	1,000

Tabla 4-45, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

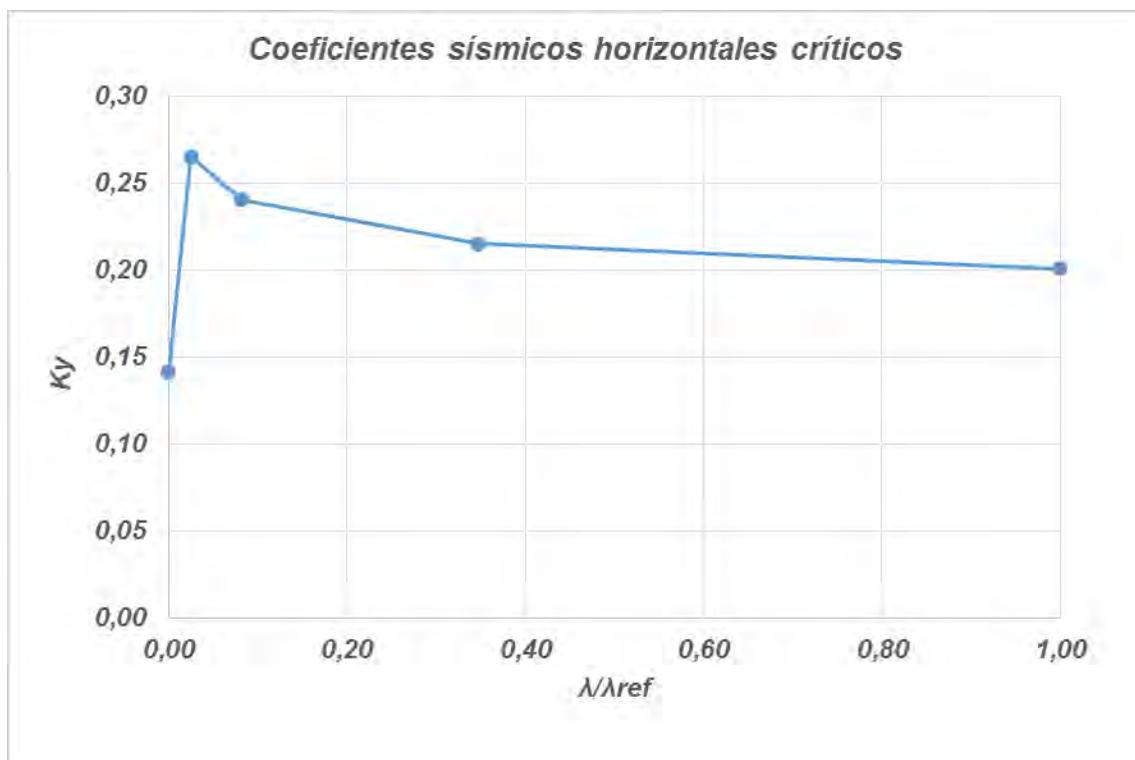


Figura 4-48, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,5$

FS	1,5	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
Punto 1		0,323	0,000
Punto 2		0,468	0,009
Punto 3		0,386	0,094
Punto 4		0,318	0,360
Punto 5		0,297	1,000

Tabla 4-46, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

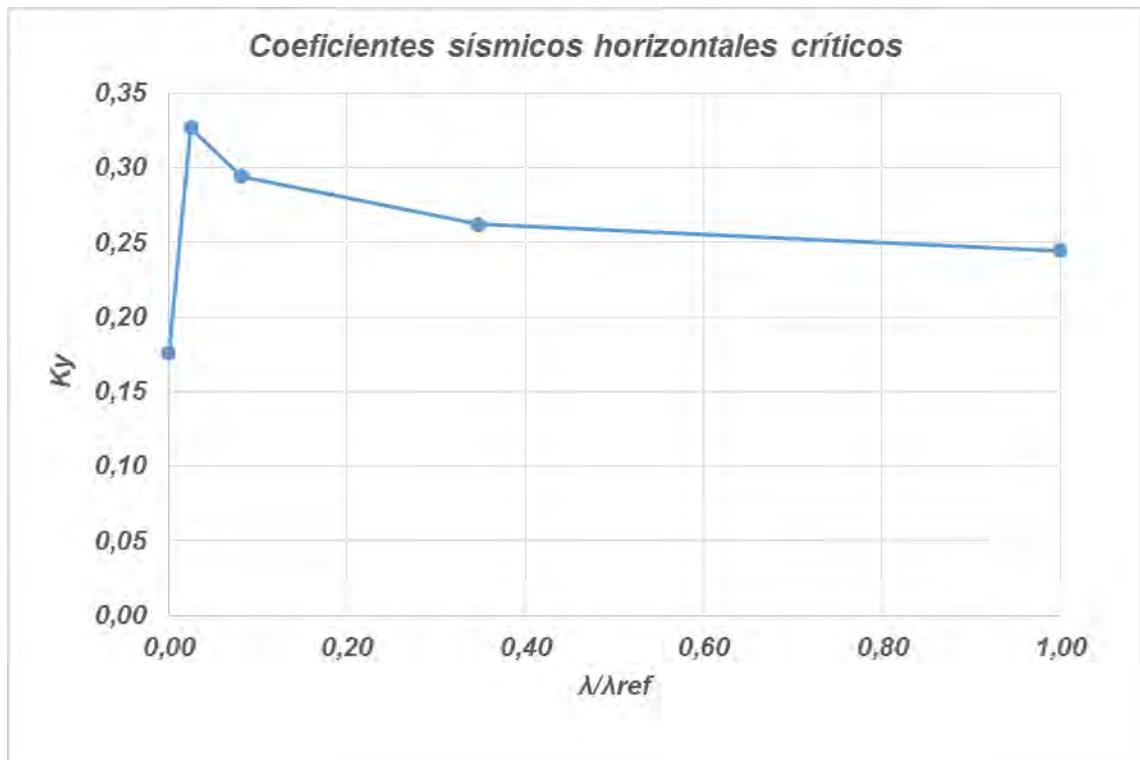


Figura 4-49, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

Con los resultados obtenidos anteriormente, se construye el ábaco de coeficientes horizontales sísmicos críticos para un talud de 45°.

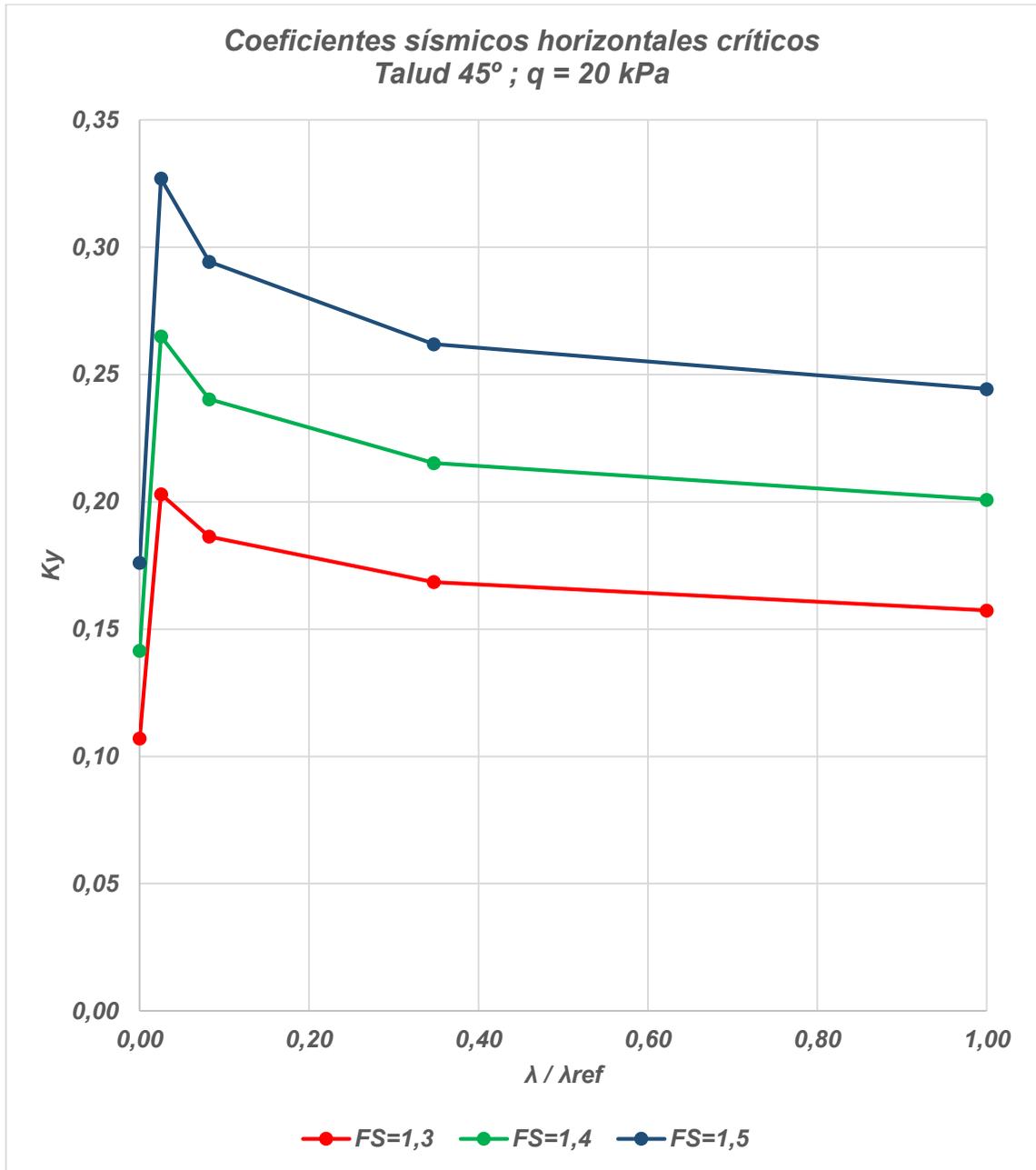


Figura 4-50, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 45° con sobrecarga (q=20 kPa).  
(Elaboración propia, 2016)

- Talud 30°

FS	Ky
1,5	0,097
1,4	0,078
1,3	0,059

Tabla 4-47, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 1. (Elaboración propia, 2016)

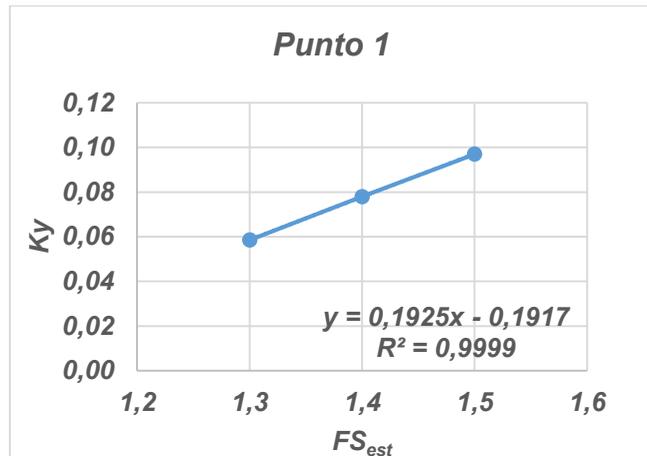


Figura 4-51, Punto 1 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,238
1,4	0,195
1,3	0,147

Tabla 4-48, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 2. (Elaboración propia, 2016)

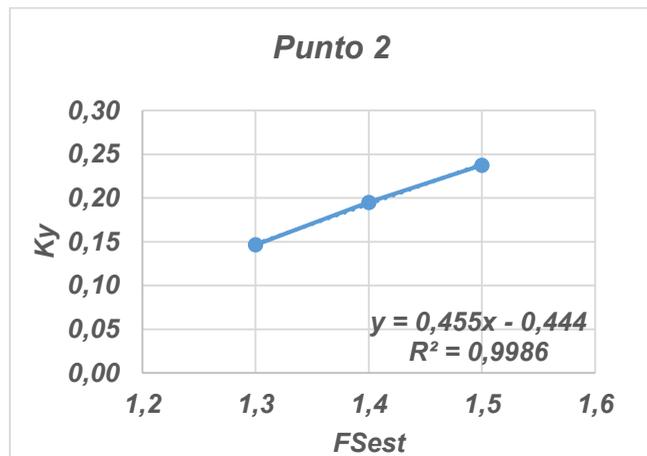


Figura 4-52, Punto 2 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,238
1,4	0,195
1,3	0,147

Tabla 4-49, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 3. (Elaboración propia, 2016)

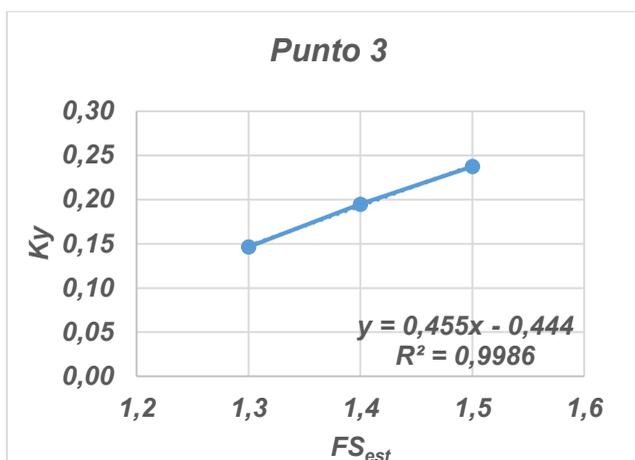


Figura 4-53 Punto 3 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,231
1,4	0,187
1,3	0,142

Tabla 4-50, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 4. (Elaboración propia, 2016)

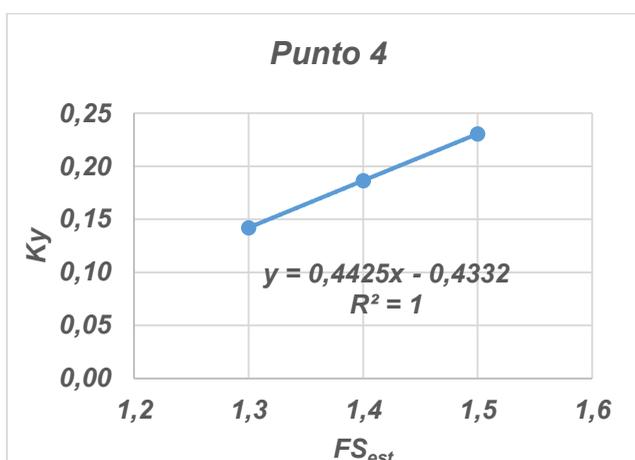


Figura 4-54, Punto 4 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,217
1,4	0,177
1,3	0,134

Tabla 4-51, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 5. (Elaboración propia, 2016)

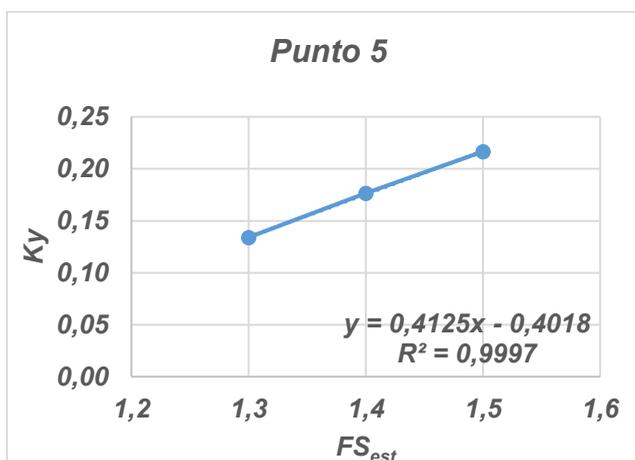


Figura 4-55, Punto 5 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

Una vez calculada la ecuación de cada punto en función de los  $FS_{est}$ , se procede a elaborar las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un talud de  $30^\circ$ .

- $FS_{est} = 1,3$

FS	1,3	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
P1		0,059	0,000
P2		0,148	0,025
P3		0,148	0,083
P4		0,142	0,146
P5		0,134	1,000

Tabla 4-52, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

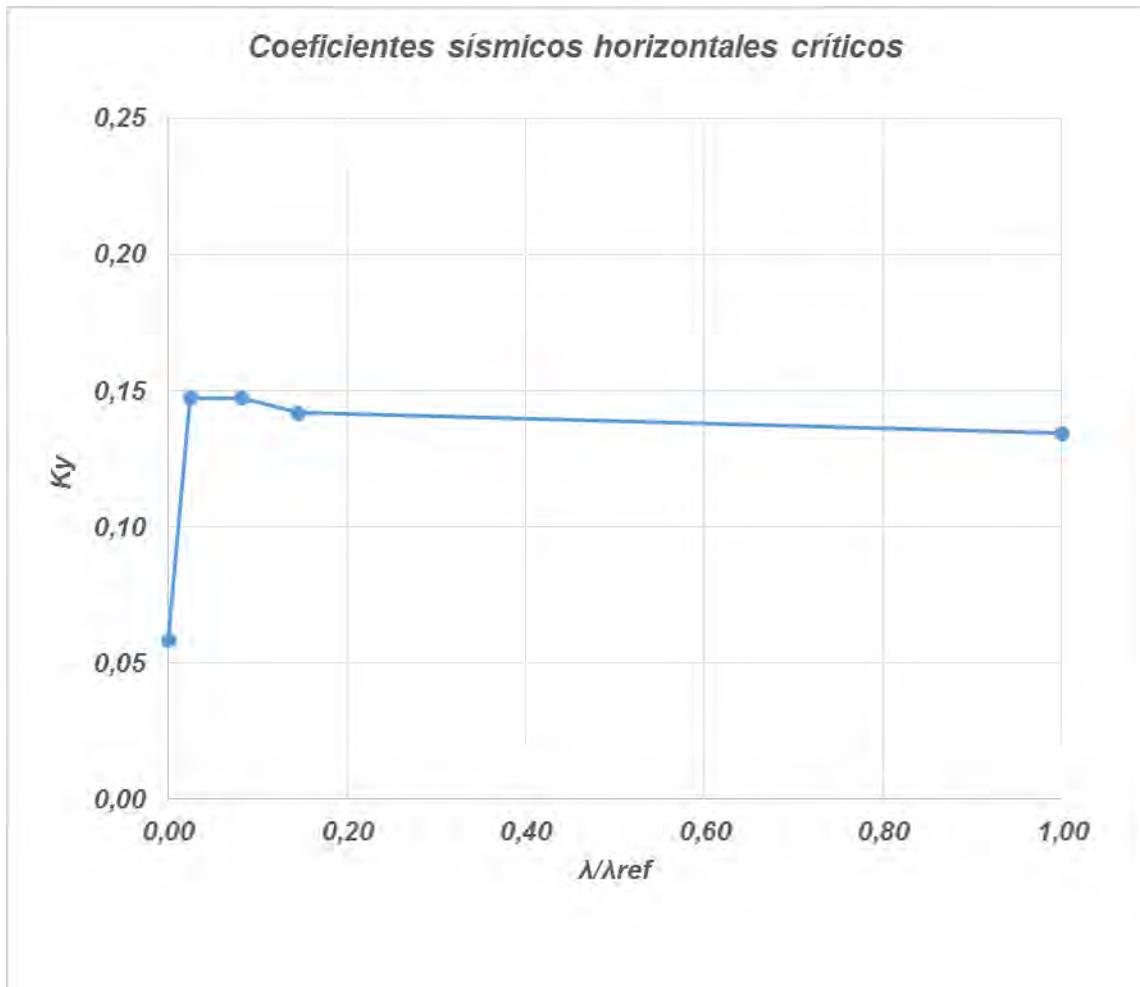


Figura 4-56, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,4$

FS	1,4	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
P1		0,078	0,000
P2		0,193	0,025
P3		0,193	0,083
P4		0,186	0,146
P5		0,176	1,000

Tabla 4-53, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

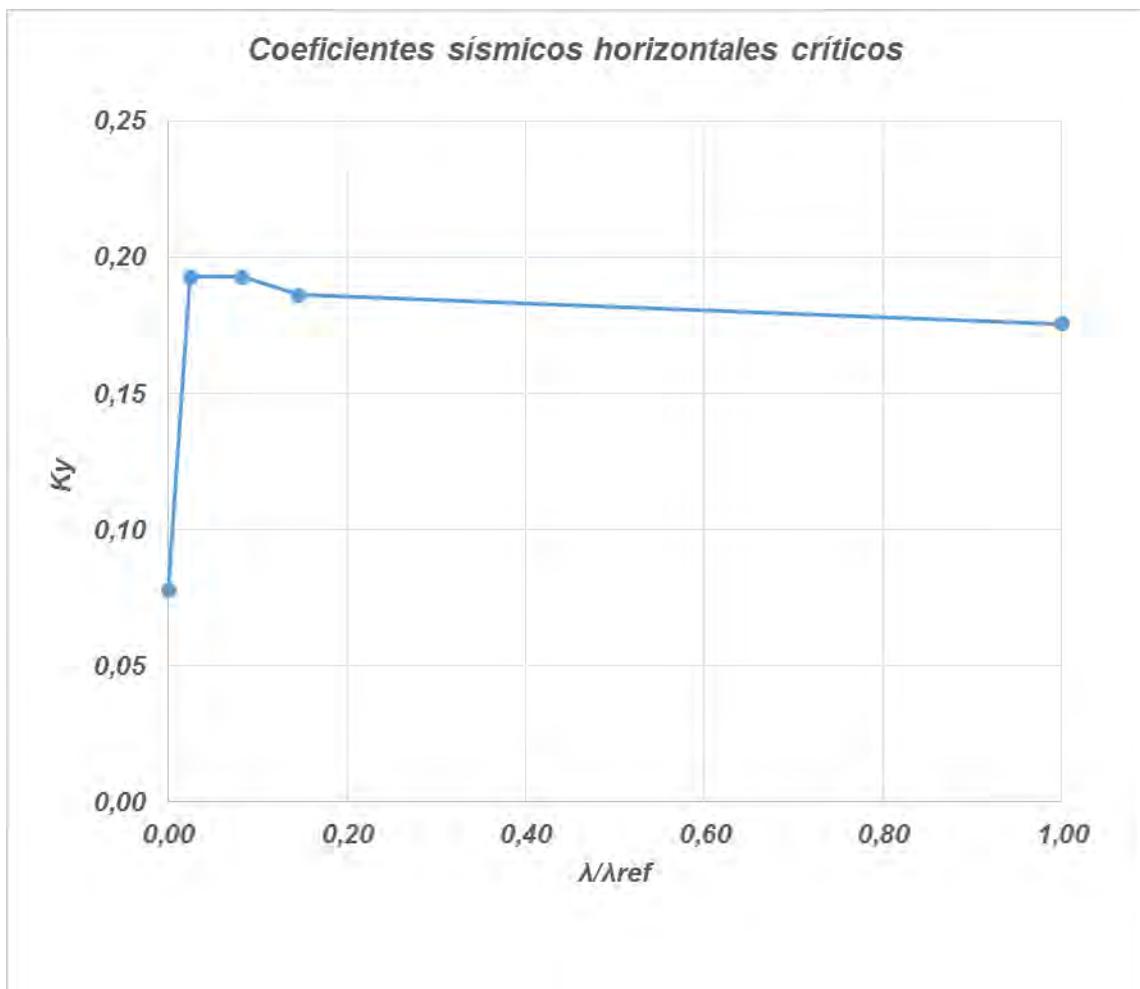


Figura 4-57, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,5$

FS	1,5	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
P1		0,097	0,000
P2		0,239	0,025
P3		0,239	0,083
P4		0,231	0,146
P5		0,217	1,000

Tabla 4-54, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

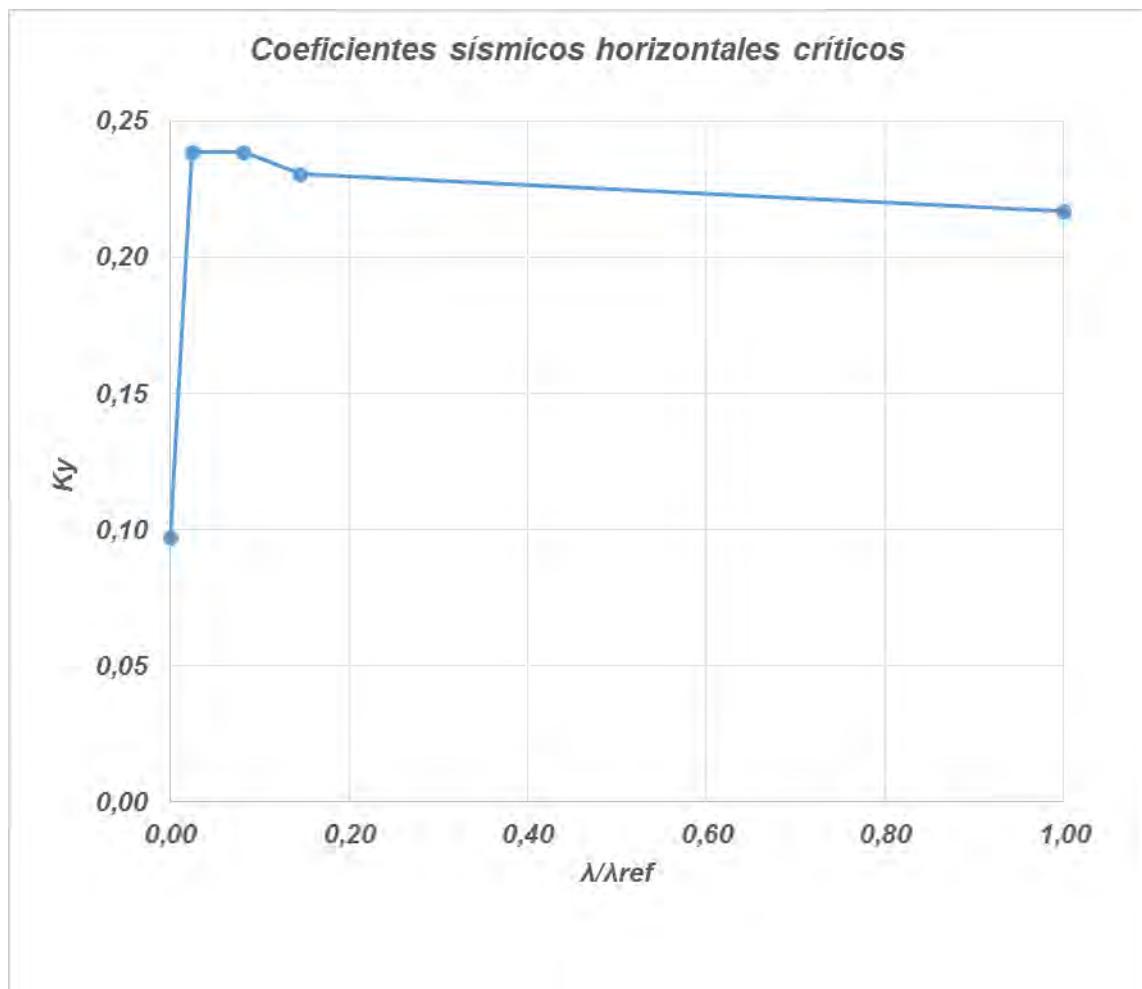


Figura 4-58, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

Con los resultados obtenidos anteriormente, se construye el ábaco de coeficientes horizontales sísmicos críticos para un talud de 30°.

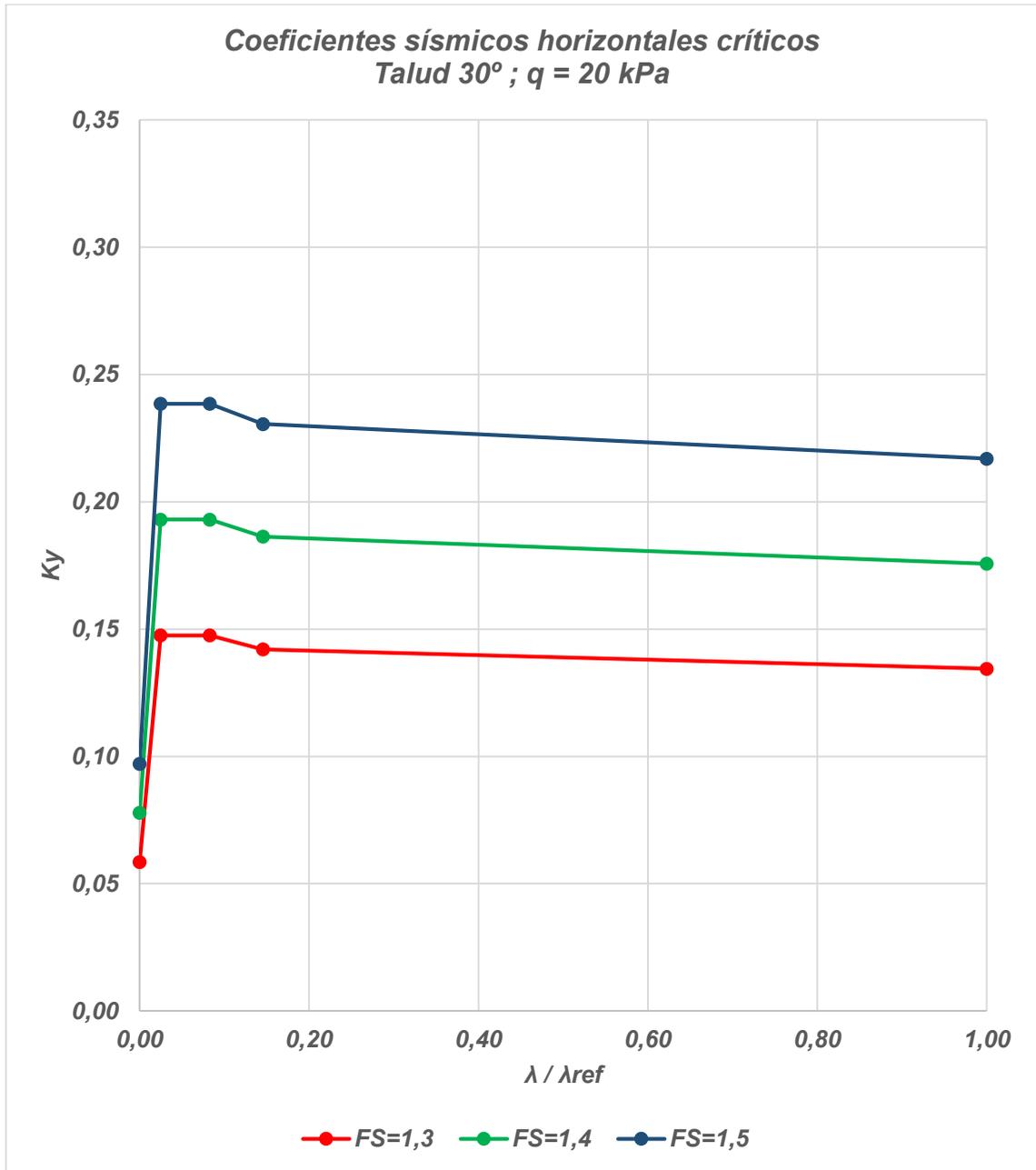


Figura 4-59, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 30° con sobrecarga (q=20 kPa). (Elaboración propia, 2016)

- Talud 15°

FS	Ky
1,5	0,051
1,4	0,042
1,3	0,033

Tabla 4-55, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 1. (Elaboración propia, 2016)

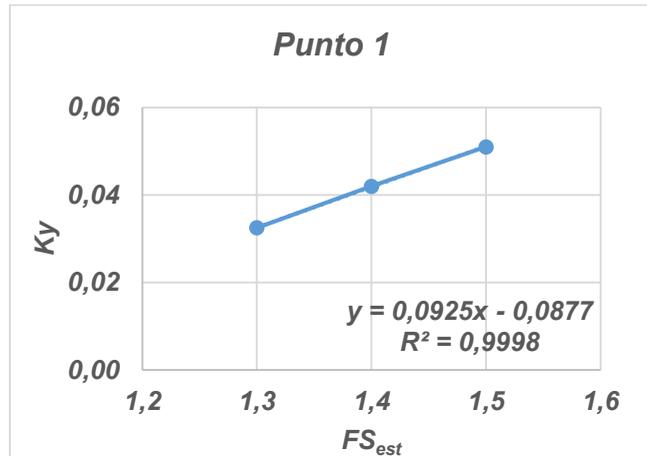


Figura 4-60, Punto 1 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,118
1,4	0,096
1,3	0,072

Tabla 4-56, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 2. (Elaboración propia, 2016)

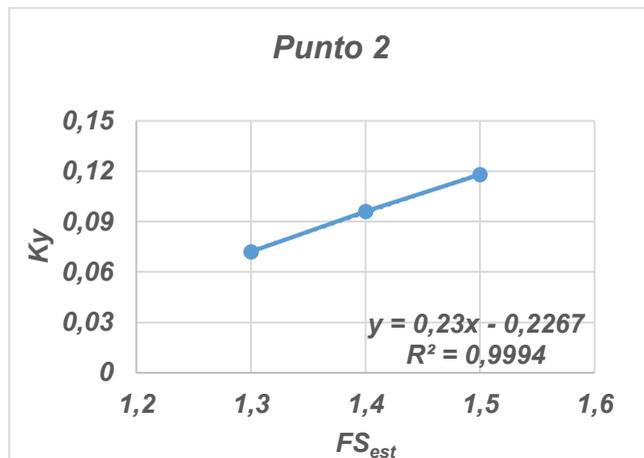


Figura 4-61, Punto 2 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,128
1,4	0,103
1,3	0,078

Tabla 4-57, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 3. (Elaboración propia, 2016)

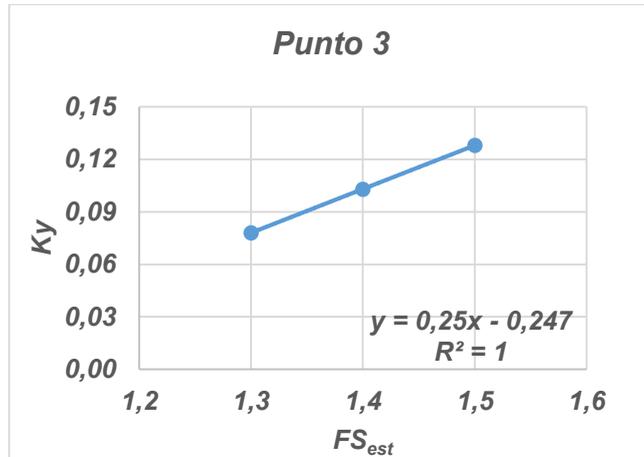


Figura 4-62, Punto 3 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,128
1,4	0,103
1,3	0,078

Tabla 4-58, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 4. (Elaboración propia, 2016)

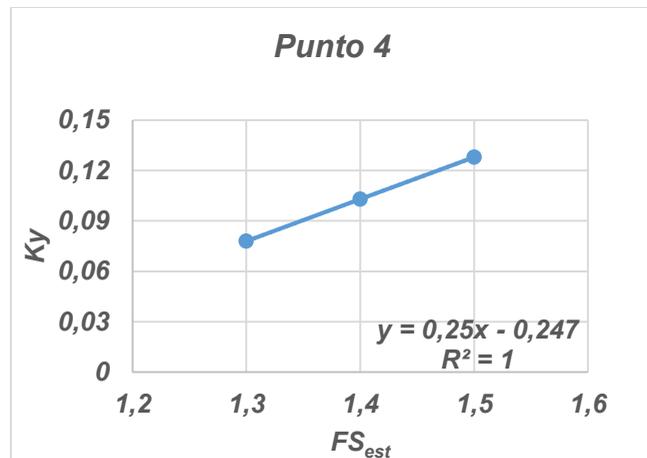


Figura 4-63, Punto 4 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

FS	Ky
1,5	0,128
1,4	0,103
1,3	0,078

Tabla 4-59, Coeficientes sísmicos horizontales críticos seleccionados, para graficar el punto 5. (Elaboración propia, 2016)

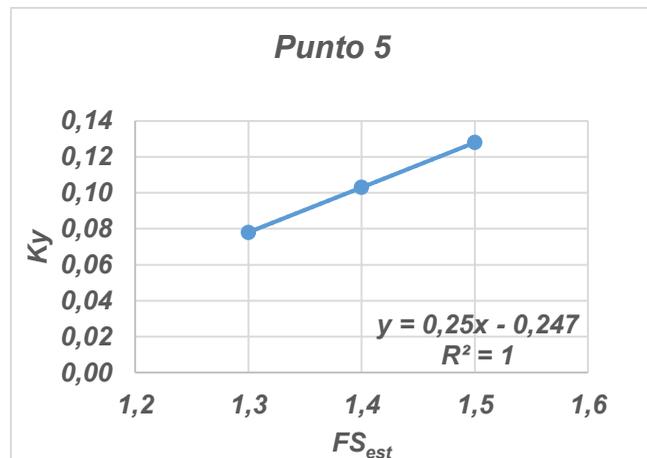


Figura 4-64, Punto 5 regresión lineal. (Elaboración propia, 2016)

Una vez calculada la ecuación de cada punto en función de los  $FS_{est}$ , se procede a elaborar las curvas de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un talud de  $15^\circ$ .

- $FS_{est} = 1,3$

FS	1,3	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
P1		0,033	0,000
P2		0,072	0,024
P3		0,078	0,081
P4		0,078	0,358
P5		0,078	1,000

Tabla 4-60, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

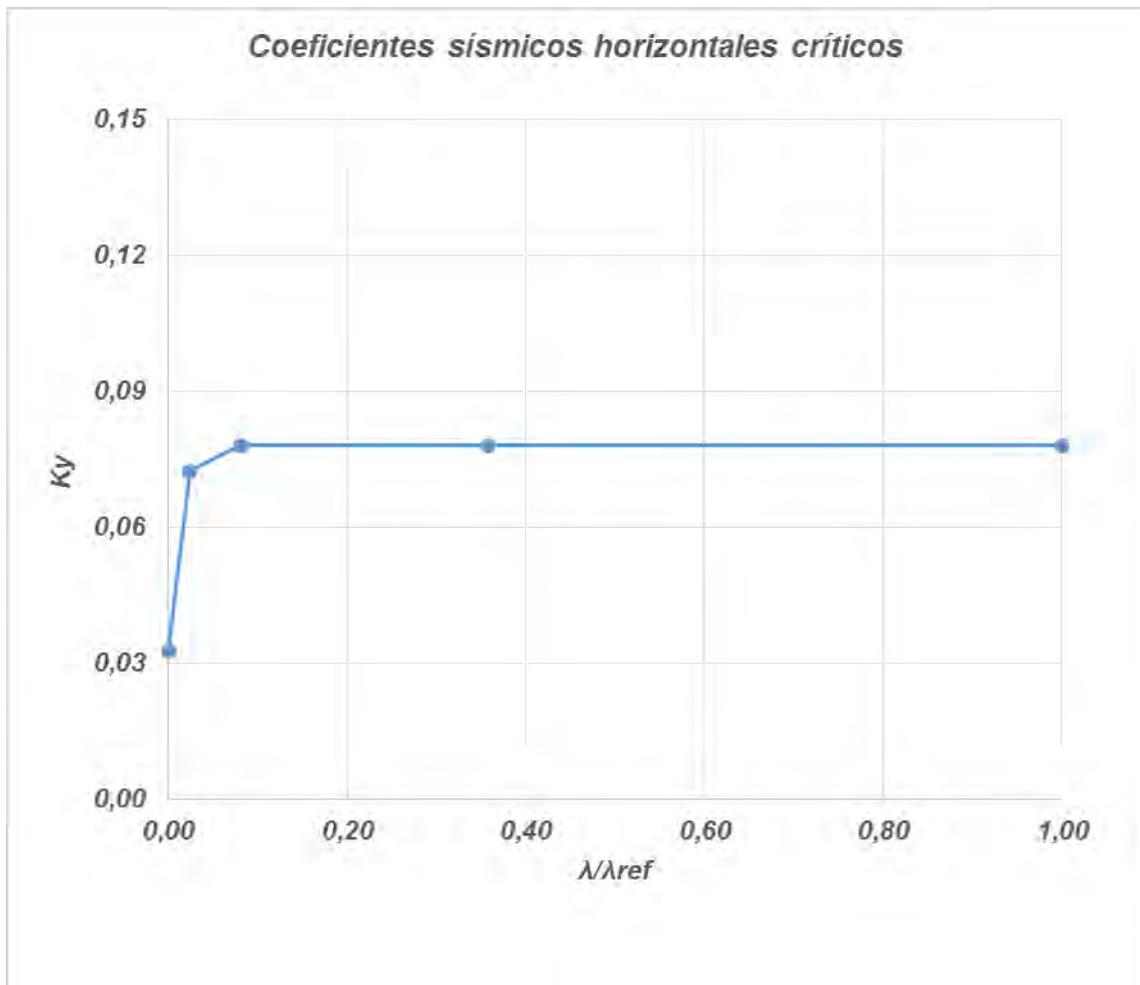


Figura 4-65, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,3$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,4$

FS	1,4	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
P1		0,042	0,000
P2		0,095	0,024
P3		0,103	0,081
P4		0,103	0,358
P5		0,103	1,000

Tabla 4-61, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

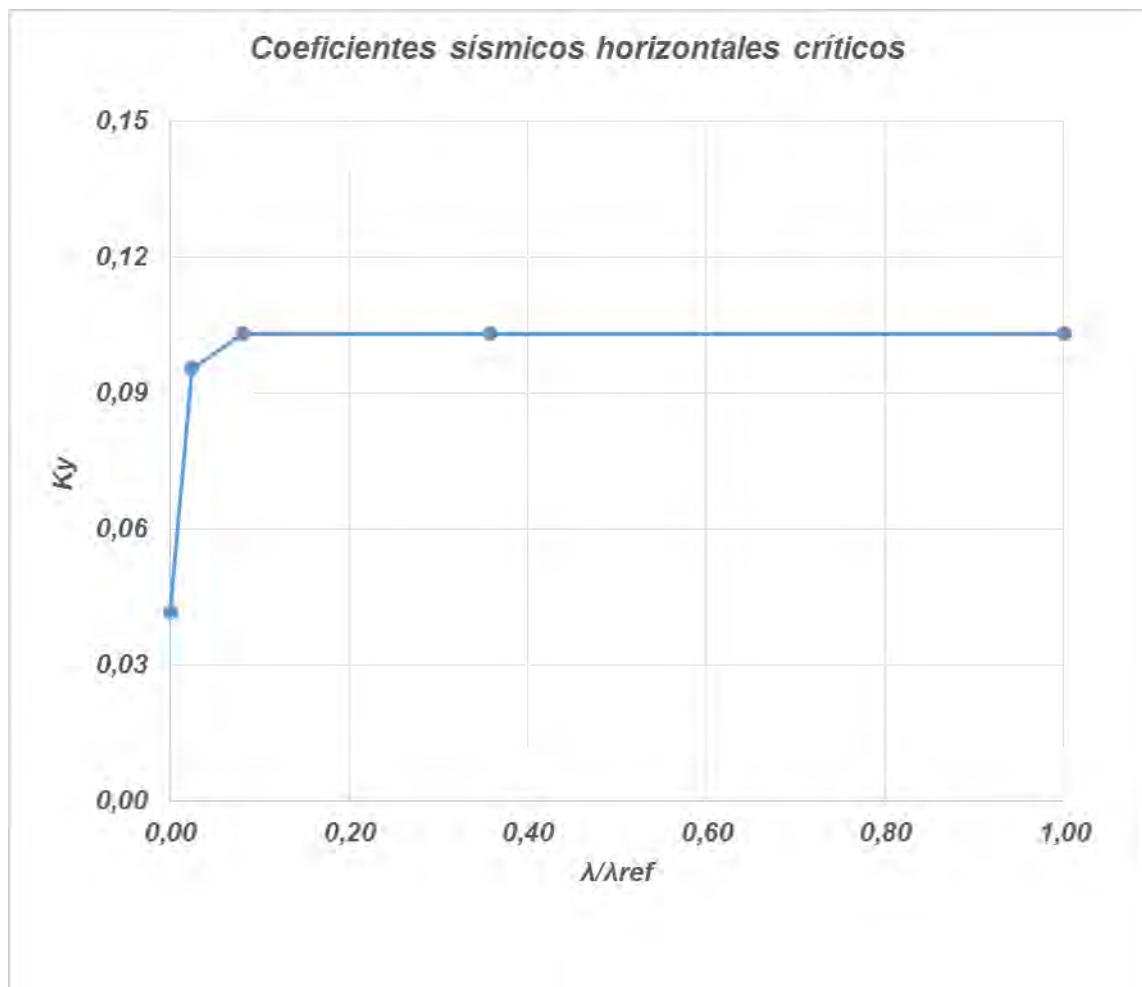


Figura 4-66, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,4$ . (Elaboración propia, 2016)

- $FS_{est} = 1,5$

FS	1,5	Ecuación	$\lambda/\lambda_{ref}$
P1		0,051	0,000
P2		0,118	0,024
P3		0,128	0,081
P4		0,128	0,358
P5		0,128	1,000

Tabla 4-62, Valores de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

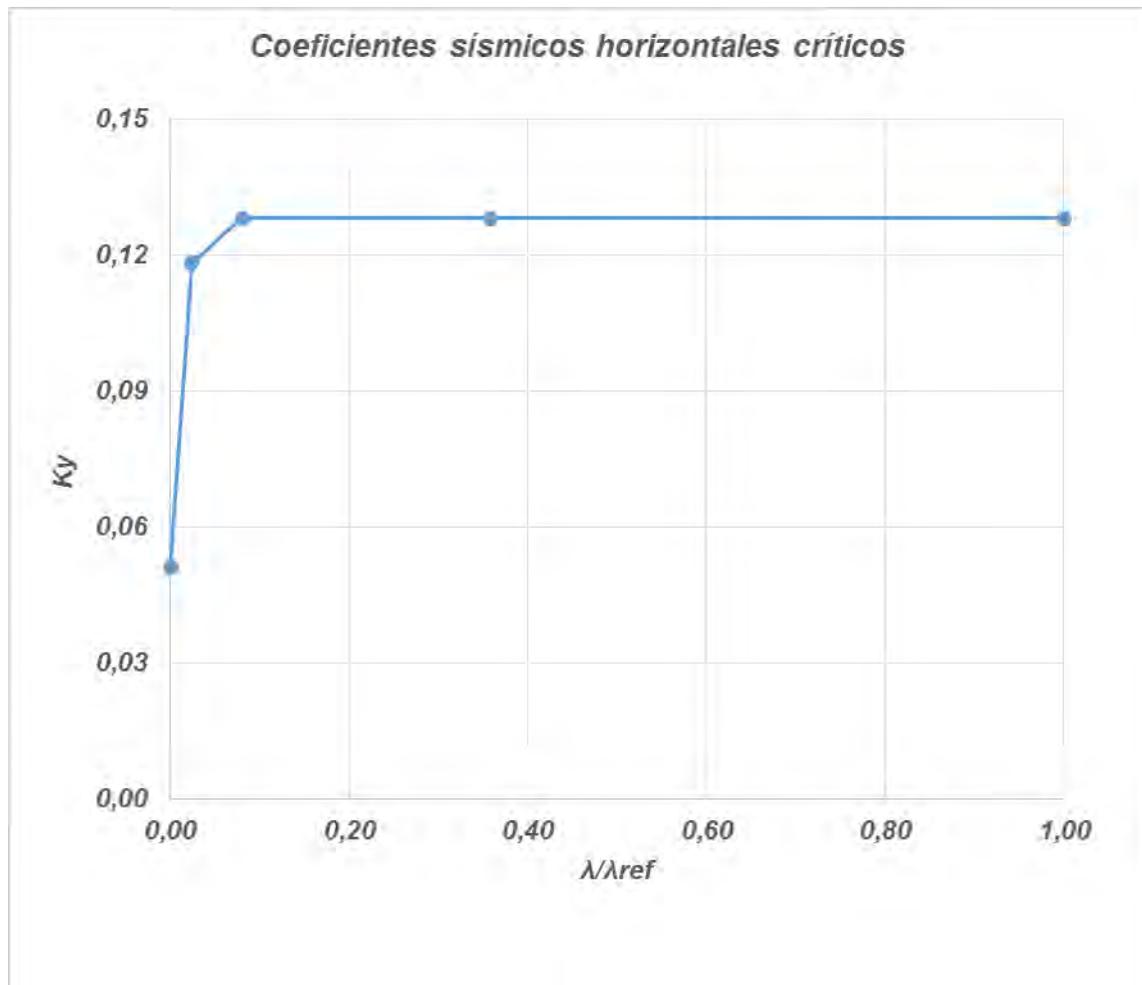


Figura 4-67, Curva de coeficientes sísmicos horizontales críticos para un  $FS_{est} = 1,5$ . (Elaboración propia, 2016)

Con los resultados obtenidos anteriormente, se construye el ábaco de coeficientes horizontales sísmicos críticos para un talud de 15°.

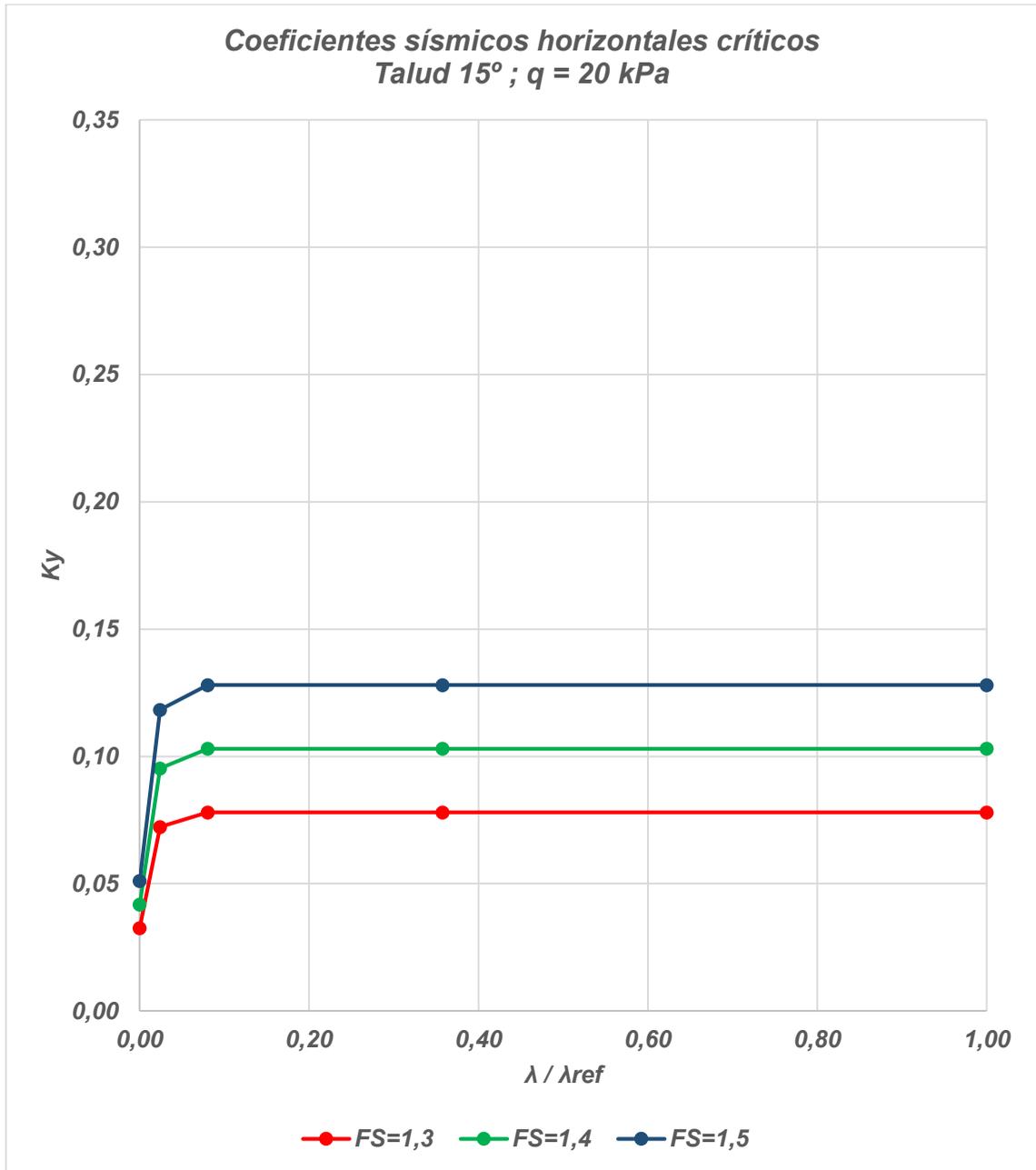


Figura 4-68, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 15° con sobrecarga (q=20 kPa).  
(Elaboración propia, 2016)

#### 4.2.5 Resumen curvas de diseño simplificadas

A continuación, se presenta el resumen de las curvas de diseño simplificadas obtenidas para cada inclinación ( $\beta = 15^\circ, 30^\circ$  y  $45^\circ$ ) y sobrecarga ( $q=0$  y  $q=20$  kPa). Además, en cada ábaco presentado se visualizan las etiquetas de los puntos que conforman cada curva, estos, son evaluados en cada ecuación que la regresión lineal entrega para su elaboración. Dichas funciones dependen del  $FS_{est}$  y son válidas para valores iguales a 1,3; 1,4 y 1,5.

La finalidad de realizar las regresiones lineales anteriormente mencionadas, son para entregar un uso práctico a los valores brutos obtenidos en el progreso de esta investigación. De esta forma garantizamos un comportamiento similar de las curvas como producto final, es decir, los ábacos de diseño.

▪ Caso  $q=0$  kPa

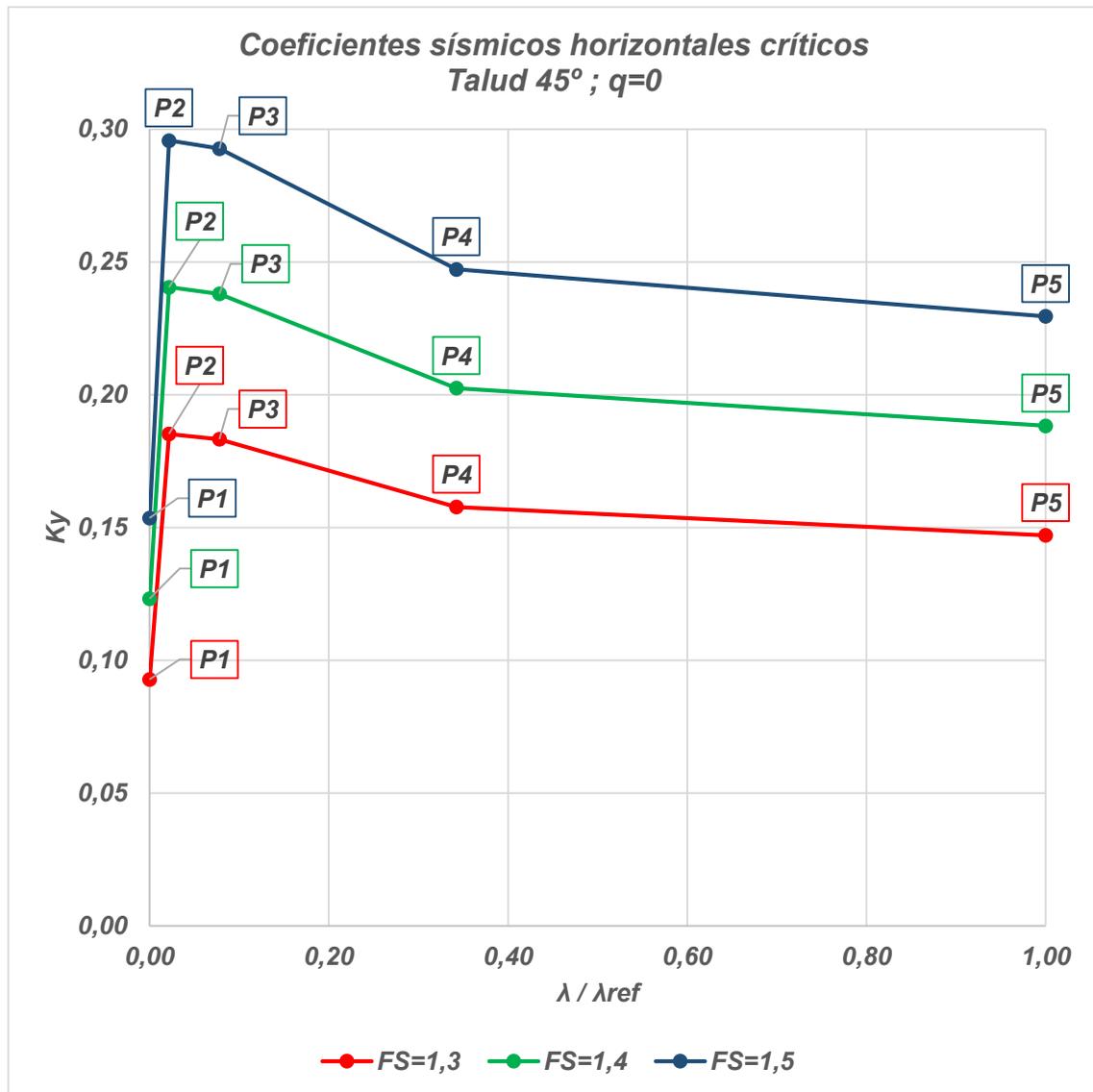


Figura 4-69, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 45° con sobrecarga ( $q=0$ ).  
(Elaboración propia, 2016)

Talud 45° q=0					
Punto	FS <sub>est</sub>	1,3	1,4	1,5	λ / λref
	Ecuación	Ky	Ky	Ky	
1	$Ky = 0,304 \times FS - 0,302$	0,093	0,123	0,154	0,000
2	$Ky = 0,553 \times FS - 0,533$	0,185	0,241	0,296	0,022
3	$Ky = 0,548 \times FS - 0,529$	0,183	0,238	0,293	0,078
4	$Ky = 0,448 \times FS - 0,424$	0,158	0,203	0,247	0,342
5	$Ky = 0,413 \times FS - 0,389$	0,147	0,188	0,230	1,000

Tabla 4-63, Resumen ecuaciones y valores de coeficientes pseudoestáticos críticos para talud de 45° y  $q=0$ .  
(Elaboración propia, 2016)

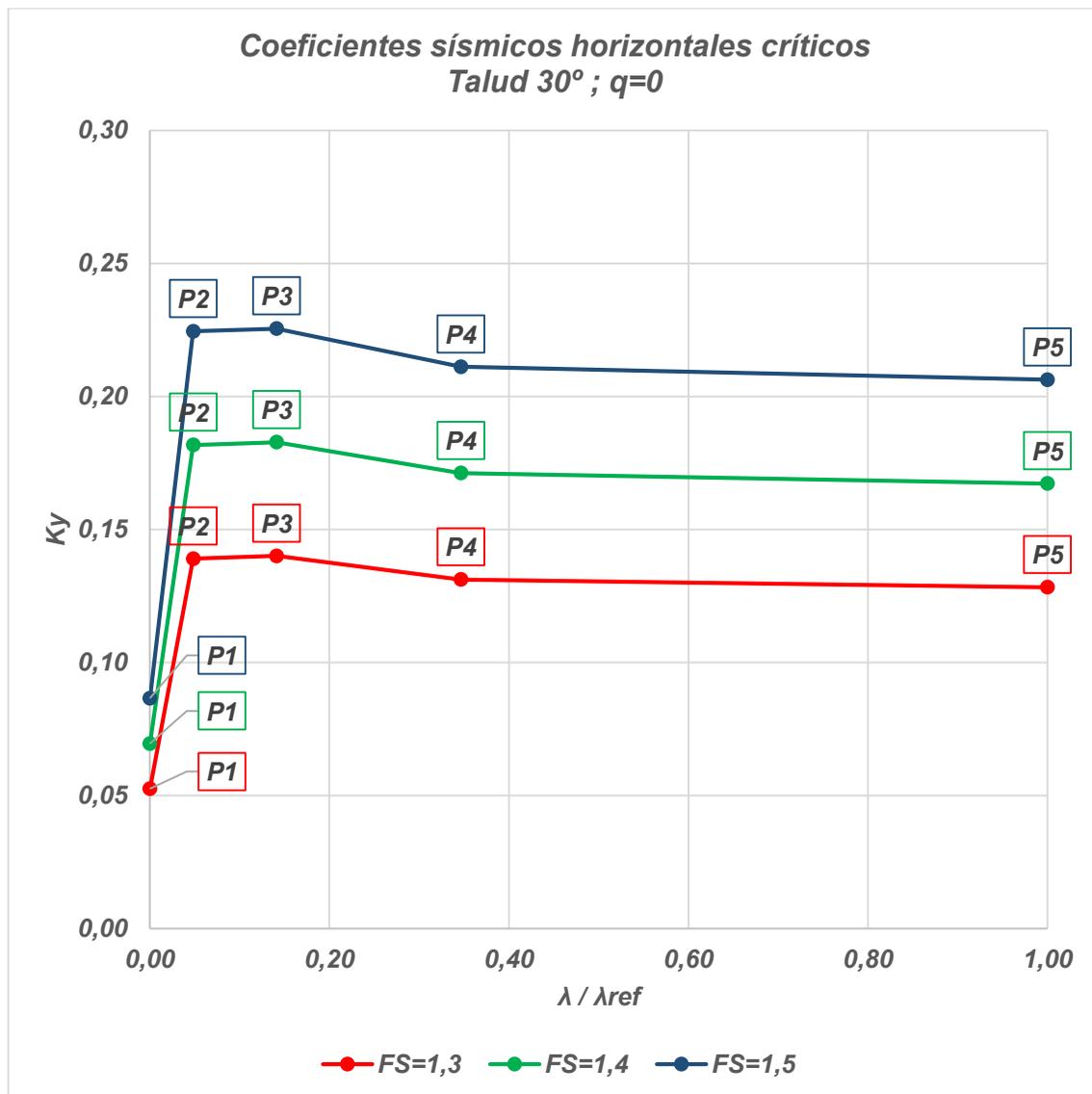


Figura 4-70, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 30° con sobrecarga (q=0). (Elaboración propia, 2016)

Talud 30° q=0					
Punto	FS <sub>est</sub>	1,3	1,4	1,5	$\lambda / \lambda_{ref}$
	Ecuación	Ky	Ky	Ky	
1	$Ky = 0,170 \times FS - 0,169$	0,053	0,070	0,087	0,000
2	$Ky = 0,433 \times FS - 0,424$	0,138	0,182	0,225	0,048
3	$Ky = 0,425 \times FS - 0,412$	0,141	0,183	0,226	0,141
4	$Ky = 0,400 \times FS - 0,389$	0,131	0,171	0,211	0,346
5	$Ky = 0,390 \times FS - 0,379$	0,128	0,167	0,206	1,000

Tabla 4-64, Resumen ecuaciones y valores de coeficientes pseudoestáticos críticos para talud de 30° y q=0. (Elaboración propia, 2016)

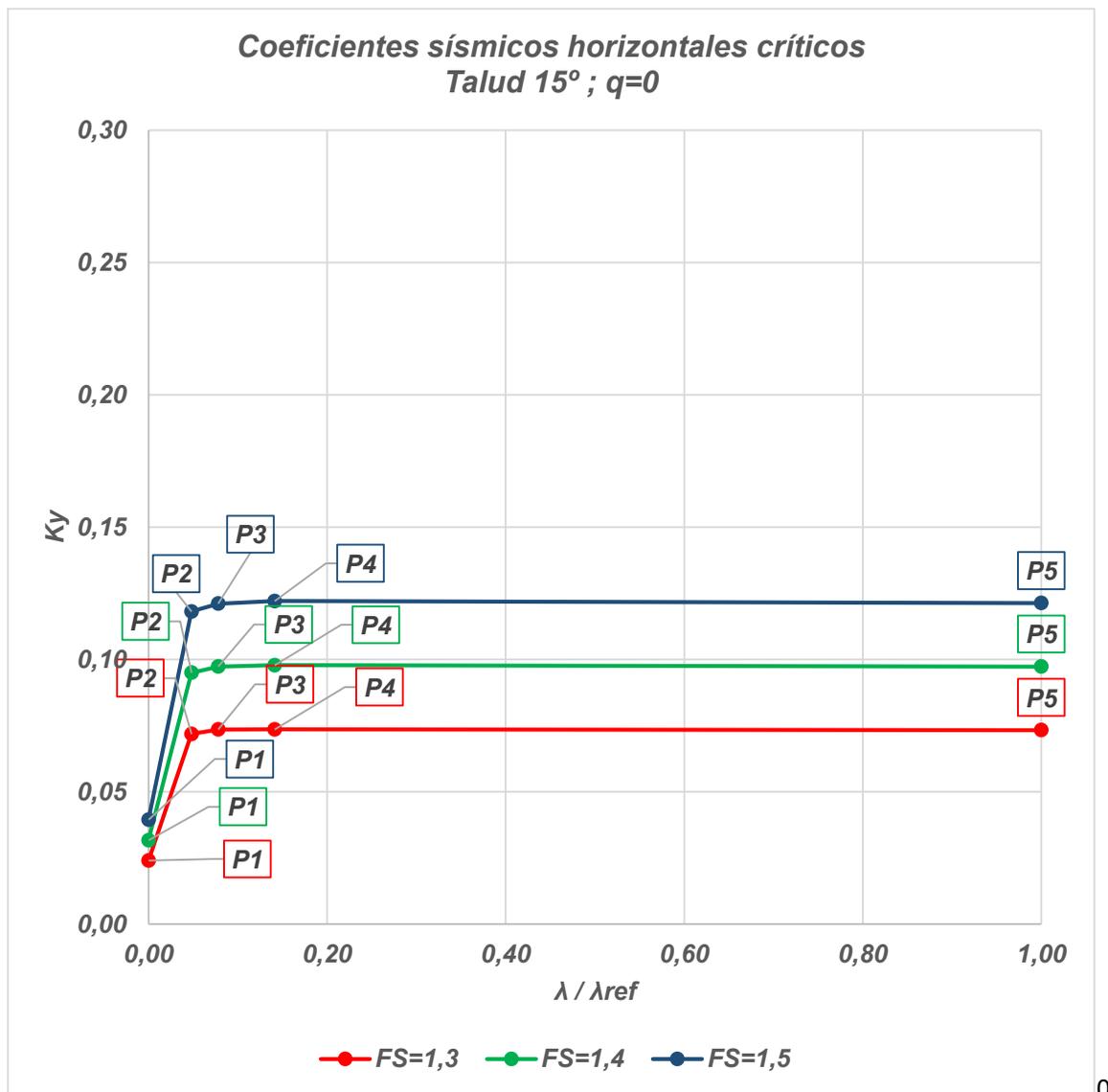


Figura 4-71, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 15° con sobrecarga (q=0).  
(Elaboración propia, 2016)

Talud 15° q=0					
Punto	FS <sub>est</sub>	1,3	1,4	1,5	$\lambda / \lambda_{ref}$
	Ecuación	Ky	Ky	Ky	
1	$Ky = 0,078 \times FS - 0,077$	0,024	0,032	0,039	0,000
2	$Ky = 0,232 \times FS - 0,229$	0,072	0,095	0,118	0,048
3	$Ky = 0,238 \times FS - 0,236$	0,074	0,097	0,121	0,076
4	$Ky = 0,243 \times FS - 0,242$	0,074	0,098	0,122	0,137
5	$Ky = 0,240 \times FS - 0,239$	0,073	0,097	0,121	1,000

Tabla 4-65, Resumen ecuaciones y valores de coeficientes pseudoestáticos críticos para talud de 15° y q=0.  
(Elaboración propia, 2016)

▪ Caso  $q=20$  kPa

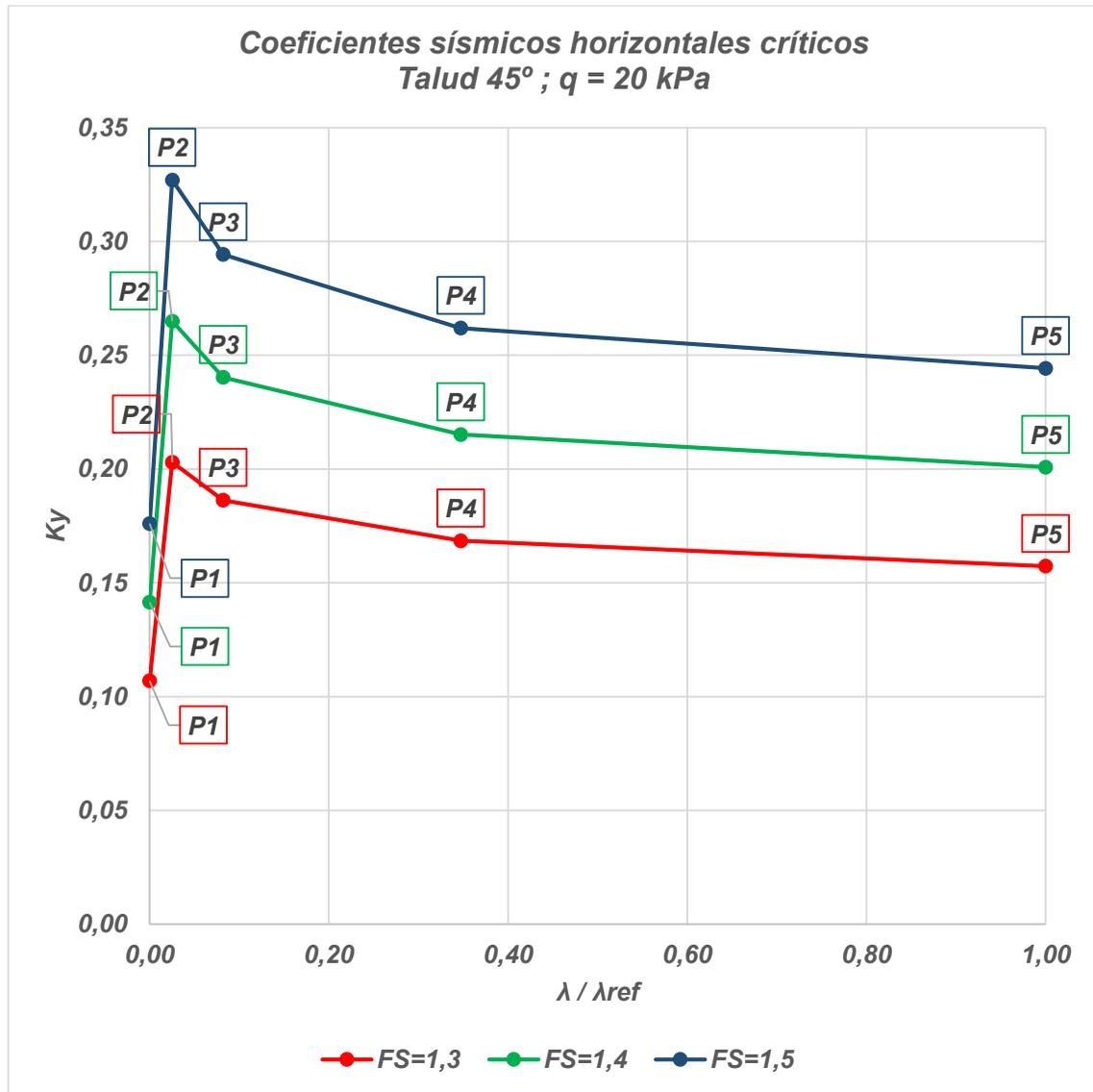


Figura 4-72, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 45° con sobrecarga ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

Talud 45° $q=20$ kPa					
Punto	FS <sub>est</sub>	1,3	1,4	1,5	$\lambda / \lambda_{ref}$
	Ecuación	Ky	Ky	Ky	
1	$K_y = 0,345 x - 0,242$	0,107	0,142	0,176	0,000
2	$K_y = 0,620 x - 0,603$	0,203	0,265	0,327	0,025
3	$K_y = 0,540 x - 0,516$	0,186	0,240	0,294	0,082
4	$K_y = 0,468 x - 0,439$	0,168	0,215	0,262	0,347
5	$K_y = 0,435 x - 0,408$	0,157	0,201	0,244	1,000

Tabla 4-66, Resumen ecuaciones y valores de coeficientes pseudoestáticos críticos para talud de 45° y  $q=20$  kPa. (Elaboración propia, 2016)

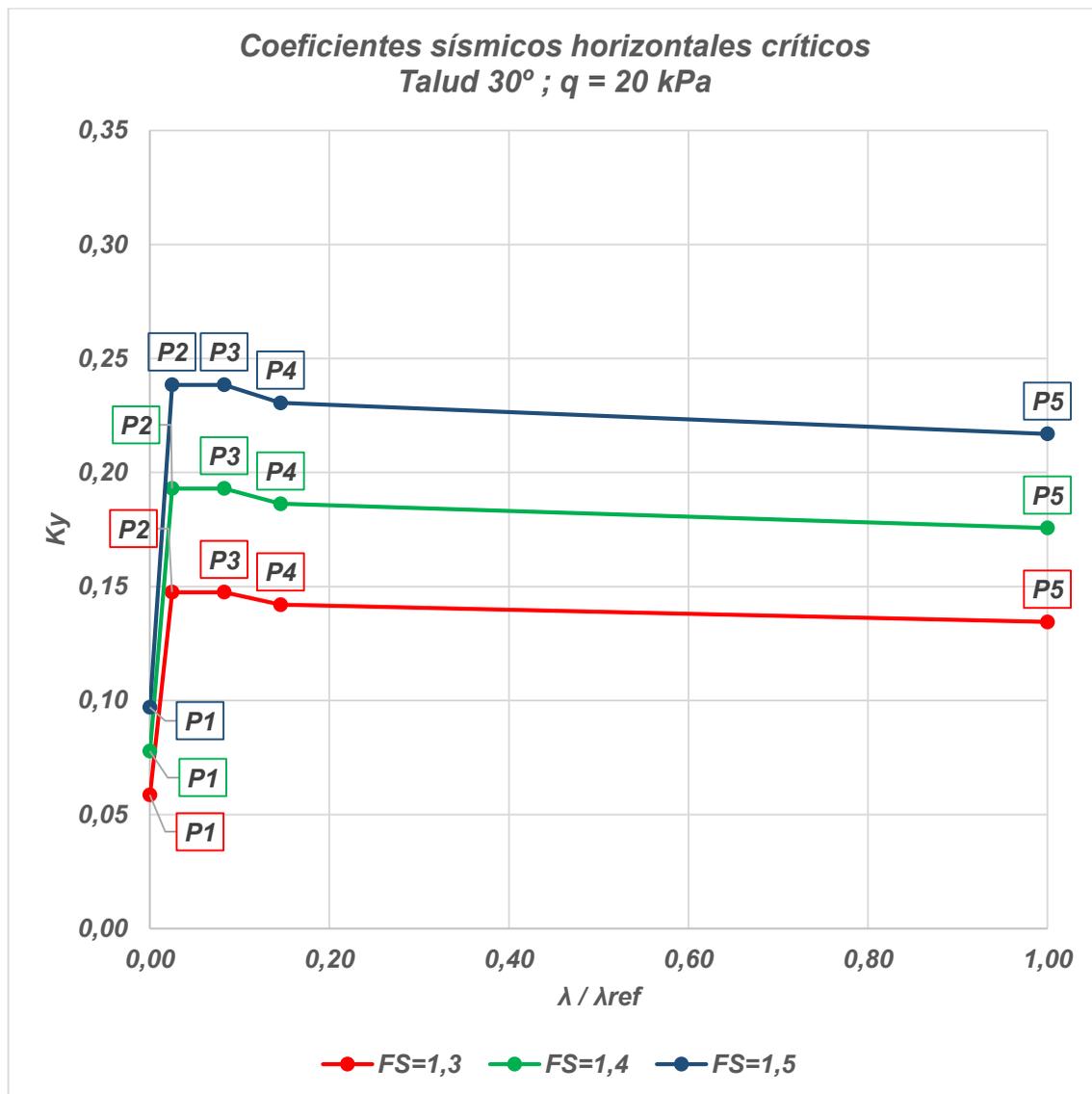


Figura 4-73, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 30° con sobrecarga ( $q=20\text{kPa}$ ).  
(Elaboración propia, 2016)

Talud 30° q=20 kPa					
Punto	FS <sub>est</sub>	1,3	1,4	1,5	$\lambda / \lambda_{ref}$
	Ecuación	Ky	Ky	Ky	
1	$K_y = 0,193 \times FS - 0,192$	0,059	0,078	0,097	0,000
2	$K_y = 0,455 \times FS - 0,444$	0,148	0,193	0,239	0,025
3	$K_y = 0,455 \times FS - 0,444$	0,148	0,193	0,239	0,083
4	$K_y = 0,443 \times FS - 0,433$	0,142	0,186	0,231	0,146
5	$K_y = 0,413 \times FS - 0,402$	0,134	0,176	0,217	1,000

Tabla 4-67, Resumen ecuaciones y valores de coeficientes pseudoestáticos críticos para talud de 30° y  $q=20\text{ kPa}$ .  
(Elaboración propia, 2016)

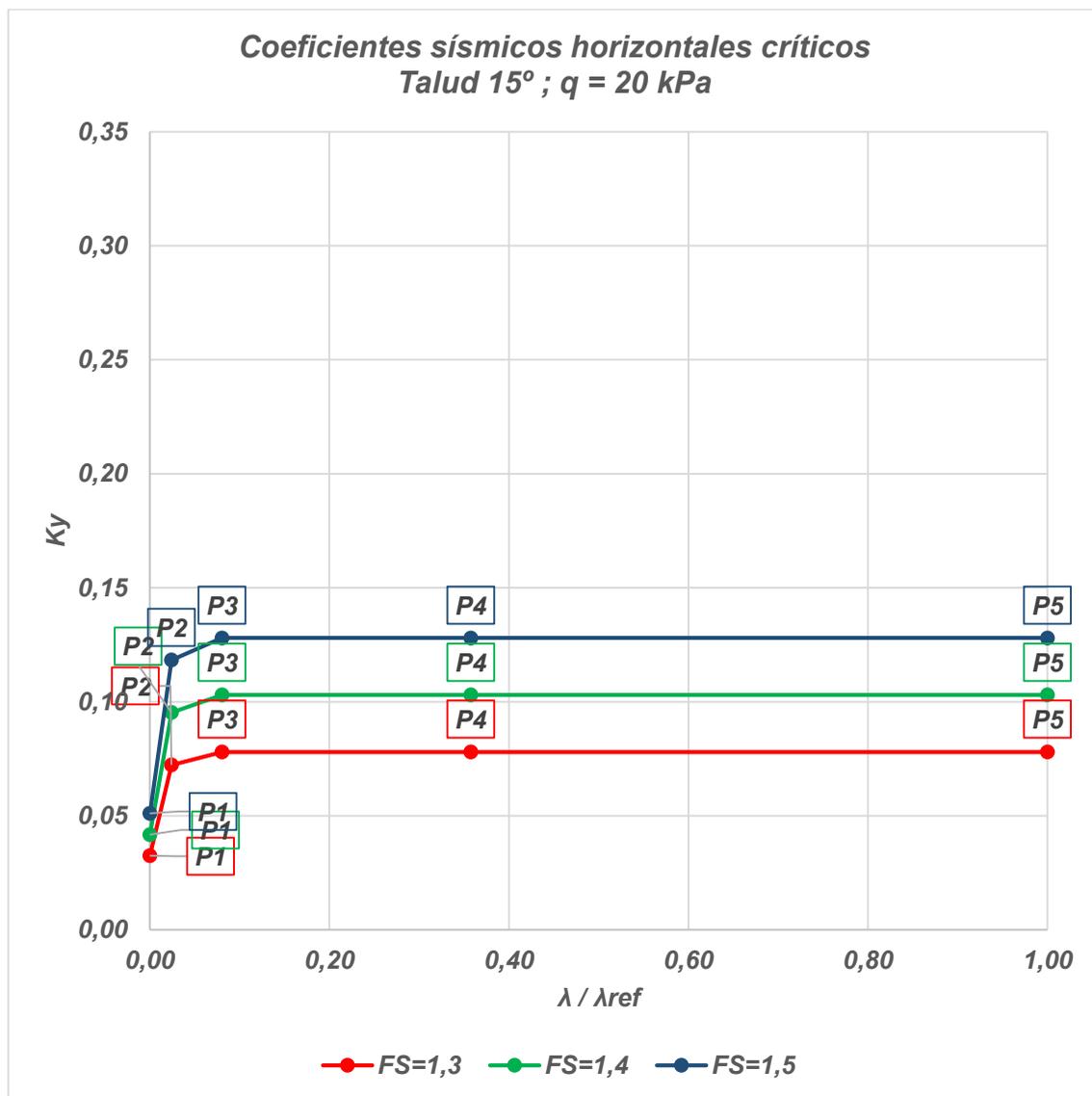


Figura 4-74, Ábaco de coeficientes sísmicos horizontales críticos para talud de 15° con sobrecarga ( $q=20\text{kPa}$ ).  
(Elaboración propia, 2016)

Talud 15° $q=20\text{ kPa}$					
Punto	FS <sub>est</sub>	1,3	1,4	1,5	$\lambda / \lambda_{ref}$
	Ecuación	Ky	Ky	Ky	
1	$K_y = 0,093 \times FS - 0,088$	0,033	0,042	0,051	0,000
2	$K_y = 0,230 \times FS - 0,227$	0,072	0,095	0,118	0,024
3	$K_y = 0,250 \times FS - 0,247$	0,078	0,103	0,128	0,081
4	$K_y = 0,250 \times FS - 0,247$	0,078	0,103	0,128	0,358
5	$K_y = 0,250 \times FS - 0,247$	0,078	0,103	0,128	1,000

Tabla 4-68, Resumen ecuaciones y valores de coeficientes pseudoestáticos críticos para talud de 15° y  $q=20\text{ kPa}$ .  
(Elaboración propia, 2016)

## 5 Análisis y discusión de resultados

### 5.1 Comentarios generales

Cabe señalar que se realizó aproximadamente 300 corridas computacionales para el desarrollo de los gráficos entregados. En una etapa preliminar de la investigación, se requirió de una gran cantidad de modelos a fin de explorar distintos parámetros y evaluar su influencia en los resultados. En este sentido, las herramientas para el análisis de sensibilidad que ofrece el programa SLOPE/W 2012 permitieron optimizar el tiempo y reducir al mínimo las corridas necesarias.

En relación con los resultados obtenidos, las curvas desarrolladas para el caso estático presentan tendencias que resultan coherentes en relación a los parámetros adimensionales utilizados para su construcción. Como era de esperar, en la medida que la cohesión del suelo se reduce (o que el producto  $\gamma H$  aumenta), se requiere de mayor resistencia friccional para garantizar el equilibrio. De modo análogo, cuando el suelo es predominantemente cohesivo, se requiere solo de un pequeño aporte de la fricción para tener el FS deseado.

También en el caso estático, se observa que la inclusión de la sobrecarga  $q$  implica que para la obtención de un mismo FS objetivo, se necesita de mayor resistencia del suelo (o bien de una reducción en la pendiente del talud). En ese sentido, la carga  $q$  produce un efecto desestabilizador, lo cual resulta coherente con el criterio de falla de Mohr-Coulomb; que establece que la resistencia al corte máximo del suelo puede alcanzarse por medio de un incremento en la tensión vertical solicitante.

Por otro lado, se observa que, al pasar de un caso sin sobrecarga a uno con sobrecarga, para suelos puramente cohesivos se requiere de un incremento comparativo mayor de  $c$  que lo que se requiere como incremento en el término  $\tan \phi$  cuando el suelo es puramente friccional. En ese sentido, cuando  $q$  aumenta, la cohesión se vuelve un parámetro más determinante para la resistencia.

En el caso sísmico se aprecian ciertas tendencias comunes. Las curvas obtenidas pueden definirse, en general, mediante 5 puntos característicos. Estos muestran inicialmente una transición desde el valor mínimo al máximo valor de  $k_y$  (en la zona teórica de suelos secos de muy alta cohesión y nula o muy baja fricción), para luego decaer hacia valores de  $k_y$  intermedios en la medida que el cociente  $\lambda/\lambda_{ref}$  se acerca a 1,0 (zona en donde predomina la fricción de los materiales, i.e., suelos gruesos limpios). Al igual que en el caso estático, la inclusión de la sobrecarga produce un efecto desestabilizador. Esto conlleva, para alcanzar un mismo FS objetivo, a un incremento en los valores del coeficiente pseudoestático crítico resultante.

Se observa que en la medida que la inclinación del talud  $\beta$  disminuye las curvas  $k_y$  v/s  $\lambda/\lambda_{ref}$  se vuelven más planas, siendo menos sensible el valor de  $k_y$  a la combinación de parámetros de resistencia al corte del suelo ( $c, \phi$ ).

Por último, se aprecia que, principalmente en el caso de FS y pendientes de talud elevados, los valores de  $k_y$  resultan mayores que los coeficientes sísmicos  $k_h$  que típicamente se utilizan en los análisis pseudoestáticos tradicionales, basados en fuerzas y factores de seguridad (los cuales no suelen ser mayores a 0,22 en el caso chileno). Para este tipo de taludes es de esperar que no se produzcan corrimientos permanentes de importancia durante sismos como los considerados en las normas nacionales de diseño sísmico.

### **CASO PRÁCTICO.**

#### **Estimación de desplazamientos sísmicos esperados en taludes diseñados de acuerdo a la metodología propuesta**

Para facilitar la comprensión de los conceptos expuestos a lo largo de esta memoria, se realiza una estimación de los desplazamientos permanentes que cabría esperar en taludes homogéneos que han sido diseñados a partir del procedimiento propuesto.

Se analiza el caso de taludes en arena de inclinación  $\beta=30^\circ$ , con y sin sobrecarga, que han sido diseñados utilizando un FS estático igual a 1,5. A partir de los resultados obtenidos (figuras 4-70 y 4-73), se observa que en el primer caso ( $q=0$ ) los coeficientes sísmicos críticos pueden variar entre un valor mínimo de 0,085 y máximo de 0,230; alcanzando valores del orden de 0,210 para razones  $\lambda/\lambda_{ref}$  cercanas a 1,0, las cuales son propias de suelos arenosos (alta fricción y baja cohesión). En el segundo caso ( $q=20\text{kPa}$ ), se tiene un valor de  $k_y$  mínimo de 0,100 y máximo de 0,240; mientras que se alcanzan valores del orden de 0,220 para razones  $\lambda/\lambda_{ref}$  cercanas a 1,0 (caso típico de arenas).

Las tablas 5-1 y 5-2 muestran la información de una serie de registros sísmicos medidos en estaciones acelerográficas ubicadas en suelos arenosos para los terremotos de Chile Central en 1985 ( $M_s=7,8$ ) (Riddell, 1995) y del Maule en 2010 ( $M_w=8,8$ ) (Saragoni y Ruiz, 2012).

Estación	Tipo de suelo	Componente	$a_{\text{máx}}$ [g]	$V_{\text{máx}}$ [cm/s]	$d_{\text{máx}}$ [cm]
Llolleo	II- Arena densa	S80E	0,446	23,3	4,26
		N10E	0,712	40,29	10,5
Iloca	II- Arena	NS	0,226	9,34	1,11
		EW	0,278	15,09	1,39
Viña del Mar	III- Arena densa	N70W	0,237	25,51	4,11
		S20W	0,363	30,74	5,42
El Almendral	III - Relleno artificial	N50E	0,297	28,58	5,78

Tabla 5-1, Resumen registros sísmicos medidos en suelos arenosos. Terremoto 03 de marzo de 1985. (Elaboración propia, 2016)

Estación	Componente	$a_{m\acute{a}x}$ [g]	$V_{m\acute{a}x}$ [cm/s]	$d_{m\acute{a}x}$ [cm]
Angol	EW	0,69	37,55	7,29
	NS	0,93	33,90	3,60
Concepción Centro	LONG	0,40	67,46	20,38
	TRAN	0,29	51,69	15,68
Constitución	LONG	0,54	43,25	10,07
	TRAN	0,63	68,43	14,38
Curicó	EW	0,41	32,69	7,34
	NS	0,47	27,68	7,01
Llolleo	LONG	0,33	25,78	4,03
	TRAN	0,56	30,93	4,60
El Almendral	LONG	0,22	29,13	4,66
	TRAN	0,27	22,31	3,76
Viña del Mar, El Salto	EW	0,34	44,62	27,99
	NS	0,35	37,91	21,91

Tabla 5-2, Resumen registros sísmicos medidos en suelos arenosos. Terremoto 27 de febrero de 2010. (Elaboración propia, 2016)

Para cada uno de estos registros, puede evaluarse la razón  $k_y/a_{m\acute{a}x}$  para los valores de  $k_y$  (correspondientes a  $\lambda/\lambda_{ref} \approx 1,0$ ) identificados según la metodología utilizada. De este modo, con los valores de  $v_{m\acute{a}x}$  conocidos, puede utilizarse el método de Richards y Elms (1979) (ecuación 12) para estimar los desplazamientos sísmicos esperados. (Tablas 5-3, 5-4, 5-5 y 5-6).

Estación	Componente	$K_y$	$K_y/a_{max}$	Desplazamiento Esperado [cm]
Llolleo	S80E	0,21	0,47	2,20
	N10E	0,21	0,30	26,74
Iloca	NS	0,21	0,93	0,05
	EW	0,21	0,76	0,22
Viña del Mar	N70W	0,21	0,89	0,40
	S20W	0,21	0,58	2,06
El Almendral	N50E	0,21	0,71	0,98

Tabla 5-3, Desplazamientos inducidos por terremoto de 1985 en talud arenoso de 30°, sin sobrecarga ( $q=0$ ). (Elaboración propia, 2016)

Estación	Componente	Ky	Ky/a <sub>max</sub>	Desplazamiento Esperado [cm]
Lolleo	S80E	0,23	0,52	1,53
	N10E	0,23	0,32	18,59
Iloca	NS	0,23	1,02	0,02
	EW	0,23	0,83	0,16
Viña del Mar	N70W	0,23	0,97	0,27
	S20W	0,23	0,63	1,43
El Almendral	N50E	0,23	0,77	0,68

Tabla 5-4, Desplazamientos inducidos por terremoto de 1985 en talud arenoso de 30°, con sobrecarga (q=20 kPa).  
(Elaboración propia, 2016)

Estación	Componente	Ky	Ky/a <sub>max</sub>	Desplazamiento Esperado [cm]
Angol	EW	0,21	0,30	21,1
	NS	0,21	0,23	42,1
Concepción Centro	LONG	0,21	0,53	13,3
	TRAN	0,21	0,72	3,0
Constitución	LONG	0,21	0,39	13,4
	TRAN	0,21	0,33	53,4
Curicó	EW	0,21	0,51	3,4
	NS	0,21	0,45	3,6
Lolleo	LONG	0,21	0,64	1,1
	TRAN	0,21	0,38	7,7
El Almendral	LONG	0,21	0,96	0,4
	TRAN	0,21	0,78	0,4
Viña del Mar, El Salto	EW	0,21	0,62	3,6
	NS	0,21	0,60	2,8

Tabla 5-5, Desplazamientos inducidos por terremoto de 2010 en talud arenoso de 30°, sin sobrecarga (q=0).  
(Elaboración propia, 2016)

Estación	Componente	Ky	Ky/a <sub>max</sub>	Desplazamiento Esperado [cm]
Angol	EW	0,23	0,33	14,7
	NS	0,23	0,25	29,3
Concepción Centro	LONG	0,23	0,57	9,2
	TRAN	0,23	0,79	2,1
Constitución	LONG	0,23	0,43	9,3
	TRAN	0,23	0,37	37,1
Curicó	EW	0,23	0,56	2,3
	NS	0,23	0,49	2,5
Llolleo	LONG	0,23	0,70	0,8
	TRAN	0,23	0,41	5,3
El Almendral	LONG	0,23	1,05	0,3
	TRAN	0,23	0,85	0,3
Viña del Mar, El Salto	EW	0,23	0,68	2,5
	NS	0,23	0,66	2,0

Tabla 5-6, Desplazamientos inducidos por terremoto de 2010 en talud arenoso de 30°, sin sobrecarga ( $q=20$  kPa). (Elaboración propia, 2016)

Se observa que los desplazamientos son, en promedio, del orden de 12,10 cm para los registros de 1985, con una variación entre el mínimo y máximo de 0,5 mm y 26,74 cm respectivamente. En el caso de los registros de 2010, el mínimo desplazamiento es del orden de 5 mm y el máximo de 26,74 cm, con un promedio de 5 cm; ambos para el caso en que  $q=0$ .

Para la acción de  $q=20$  kPa, se obtiene que los desplazamientos inducidos son, en promedio, del orden de 3,24 cm para registros de 1985; con un máximo de 18,59 cm y un mínimo de 3 mm, respectivamente. En el caso de los registros de 2010, los desplazamientos presentan un promedio de 8,40 cm, con variación entre el mínimo y máximo de 3 mm y 37,1 cm respectivamente.

Este tipo de análisis puede utilizarse como referencia para tener una idea del orden de magnitud de los corrimientos permanentes que pueden esperarse, para el caso de terremotos reales, en taludes diseñados de acuerdo a los factores de seguridad estáticos típicamente adoptados en la práctica de ingeniería.

## 6 Conclusiones

En esta memoria se presentó un procedimiento para abordar el diseño sísmico por desempeño de taludes homogéneos que han sido proyectados en base a criterios de estabilidad estática. La metodología presentada consta esencialmente de dos etapas: (i) la elección del FS estático deseado para el talud, y (ii) la estimación del coeficiente pseudo-estático crítico  $k_y$  en el caso sísmico. Para estos efectos, utilizando los resultados obtenidos por medio de análisis efectuados en el software SLOPE/W, se elaboró una serie de gráficos de diseño sobre la base de variables adimensionales que permiten tener en cuenta los principales parámetros que definen la estructura y sus condiciones de carga.

Una vez conocido el valor de  $k_y$ , se pueden estimar los desplazamientos sísmicos esperados en el talud para un terremoto dado. En esta memoria en particular se mostró cómo hacer uso de la expresión propuesta por Richards y Elms (1979), desarrollada a partir del método del bloque deslizante de Newmark (1965), para tal propósito.

Por medio del procedimiento propuesto en este trabajo, el proyectista tiene la opción de anticipar el nivel de desempeño de un talud dado, o bien conocer los requerimientos de estabilidad que debe satisfacer un talud para un nivel de desempeño objetivo que se busque satisfacer bajo un sismo de diseño.

A los ábacos de diseño desarrollados se les dio un sentido práctico, cuyo objetivo es permitir una utilización sencilla y eficaz ante un proyecto determinado en el cual se necesite evaluar alternativas de forma rápida y eficiente (por ejemplo, pendientes máximas de un corte, factores de seguridad asociados a un pre-diseño, desplazamientos sísmicos esperados bajo diferentes escenarios, parámetros resistentes del suelo mínimos requeridos, etc.). En ese sentido, la expresión de resultados en términos de parámetros adimensionales ( $\tan \phi$ ,  $c/\gamma H$ ,  $k_y$  y  $\lambda/\lambda_{ref}$ ), resulta de gran ayuda. Por un lado, permite reducir la cantidad de variables de trabajo y hace las soluciones gráficas más abreviadas; mientras que por otra parte, permite englobar de forma racional los parámetros más importantes para el diseño de un talud.

De los resultados obtenidos se observó que la inclusión de la sobrecarga en el diseño produce un efecto desestabilizador. Esto quiere decir, que para conseguir un mismo factor de seguridad deseado se requiere o bien de mayor resistencia del material o bien de una disminución en la inclinación del talud.

En ese mismo sentido se encontró cuando  $q$  aumenta desde 0 a 20 kPa, la cohesión se vuelve un parámetro más determinante para la estabilidad. Esto se ve reflejado en que el incremento de cohesión requerido para alcanzar un FS determinado, cuando se incluye la sobrecarga, es comparativamente mayor al incremento de fricción que se necesita para los mismos efectos.

En el caso sísmico se observó que, en general, los valores de  $k_y$  varían desde el valor mínimo al máximo en la zona teórica de suelos altamente cohesivos, para luego decaer hacia valores de  $k_y$  intermedios en la medida que el cociente  $\lambda/\lambda_{ref}$  se acerca a 1,0 (zona de suelos gruesos limpios). Al igual que en el caso estático, la inclusión de la sobrecarga produce un efecto desestabilizador. Esto conlleva, para un mismo FS objetivo, a un incremento en los valores del coeficiente pseudoestático crítico resultante.

Se observó que en la medida que la inclinación del talud  $\beta$  disminuye las curvas  $k_y$  v/s  $\lambda/\lambda_{ref}$  resultan menos sensibles a las variaciones en los parámetros de resistencia al corte del suelo ( $c, \phi$ ).

Se pudo notar que al seguir los criterios de diseño estático tradicionales existen casos en los cuales es probable que no existan desplazamientos sísmicos de importancia en los taludes. Esto se debe a que los valores de  $k_y$  resultan mayores que los coeficientes sísmicos  $k_h$  típicamente utilizados en Chile para análisis de tipo pseudoestáticos (basados en fuerzas y factores de seguridad). Esto ocurre principalmente cuando el FS estático es elevado y el ángulo del talud es pronunciado.

Al evaluar un caso práctico de talud a ejecutarse en arena, en donde  $FS=1,5$  y  $\beta=30^\circ$ , se obtuvo que para un conjunto de registros sísmicos medidos en los terremotos de Chile de 1985 y 2010, los desplazamientos obtenidos por medio del método de Richards y Elms (1979) resultan moderados en la mayoría de los casos. Si bien se observan valores elevados, en general se aprecian en estaciones cercanas a las respectivas zonas de ruptura. Se debe considerar además que en algunos casos, tanto las aceleraciones como las velocidades máximas que se utilizan como parámetros de entrada corresponden a valores propios de un terremoto cuya magnitud es particularmente elevada; sobre todo para el contexto en que los métodos de estimación de desplazamientos basados en ecuaciones se han desarrollado. Por este motivo se estima que, en general, los taludes diseñados de acuerdo a los criterios de estabilidad estática tradicionales debieran experimentar desplazamientos controlados durante sismos severos, lo cual permitiría considerar viable la posibilidad de diseñar este tipo de estructuras en base a criterios de desempeño.

Finalmente, se debe tener en cuenta que las conclusiones derivadas de esta memoria son válidas únicamente para los casos estudiados (geometría de taludes, parámetros del suelo, niveles de sobrecarga, etc.). Como propuestas de trabajo futuro quedan, entre otras: la evaluación del efecto del agua en los resultados obtenidos, la inclusión de condiciones de heterogeneidad en el suelo, y la modelación por medio de métodos numéricos (por ejemplo, elementos finitos) del comportamiento sísmico de taludes.

## 7 Bibliografía

- Baker, R. (2003). A second look at Taylor's stability chart. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(12), 1102–1108.
- Bañón Blázquez, L.; Beviá García, J. F. (2000). *Manual de carreteras*. Alicante: Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A., 2000. Vol. 2.
- Cai, Z.; Bathurst, R. (1996). Deterministic sliding block methods for estimating seismic displacements of earth structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 15, 255-268.
- Day, R. (2006). *Foundation engineering handbook: design and construction with the 2006 international building code*. New York: McGraw-Hill.
- Duncan, J. M. (1996). State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes. *J. Geotech. Eng.*, 122(7), 577–596.
- Duncan, J. M.; Wright, S. G. (1980). The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. *Eng. Geol.*, 16(1–2), 5–17.
- Franklin, A., Chang, F. (1977). Permanent displacement of earth embankments by Newmark sliding block analysis. Paper S-71-17, Soil and Pavements Lab., US Army Eng. Waterways Expt. Stn., Vicksburg, Miss.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2012) *GeoStudio – Slope/W (2012)*, licencia completa, [Programa de computador]. GEOSLOPE, International Ltd, Calgary, AB, Canada.
- GEO-SLOPE. (2008). *Stability Modeling with SLOPE/W 2007 Version*. Obtenido de [www.geo-slope.com](http://www.geo-slope.com).
- Grupo de geotecnia (2009), Universidad Católica de Valparaíso (UCV).
- Instituto Geológico y Minero de España (1987). *Manual de Taludes*. (1ª Edición). Capítulo 7: Métodos de cálculo, 185-289.
- Jiang, J., Yamagami, T. (2006). Charts for estimating strength parameters from slips in homogeneous slopes. *Computers and Geotechnics*, 33, 294–304.
- Jibson, R. (2007). Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engng Geol.* 91, 2–4, 209–218.
- Klar, A., Aharonov, E., Kalderon-Asael, B., and Katz, O. (2011). Analytical and observational relations between landslide volume and surface area. *J. Geophys. Res.*, 116(F2), F02001.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, NJ.: Prentice Hall.

- Manual de Carreteras (2002). Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile. Vol. 3, Instrucciones y Criterios de Diseño.
- Martínez, R., Barrera, S., & Gómez, P. (2011). El método pseudoestático de estabilidad en presas: un análisis crítico. *Obras y Proyectos* 9, 30-37.
- Michalowski, R. L. (2002). Stability charts for uniform slopes. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 128(4), 351–355.
- Morgenstern, N. R., Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79–93.
- Newmark, N. M. (1965). Effect of earthquakes on dams and. *Géotechnique* 15, 139–160.
- Norma chilena Nch433-Of.1996-mod2009. Instituto Nacional de Normalización.
- Paredes, L. (2010) Apunte: Geomecánica, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
- Richards, R.; Elms, D. G. (1979). Seismic design of gravity retaining walls. *Geotech. Engng Div., ASCE* 105, No. GT4, 449–464.
- Riddell, R. (1995). Inelastic design spectra accounting for soil conditions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, 1491-1510.
- Saez, E. (2015). Apunte: Estabilidad de taludes. Departamento de Ingeniería Estructural y Geotecnia de la Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Saragoni, R. (1993). Análisis de riesgo sísmico para la reconstrucción del Puerto de Valparaíso. 6tas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago, Vol 2, 165-178.
- Saragoni, R.; Ruiz, S. (2012). Implicaciones y nuevos desafíos de diseño sísmico de los acelerogramas del terremoto del 2010. *Mw*, 8, 127-146.
- Saygili, G.; Rathje E. (2009). Probabilistic assessment of earthquake induced sliding displacements of natural slopes. *New Zealand Soc. Earthquake Engng* 42, Vol. 1, 18–27.
- Seed, H.B. (1979). “Considerations in the Earthquake-Resistant Design of Earth and Rockfill Dams.” *Geotechnique*, V. 29(3), pp. 215-263.
- SLOPE/W 2012 [Computer software]. Calgary, AB, Canada, GEO-SLOPE International.
- Steward, T., Sivakugan, N., Shukla, S. K., and Das, B. M. (2011). Taylor’s slope stability charts revisited. *Int. J. Geomech.*, 11(4), 348–352.

- Sun, J.; Zhao, Z. (2013). Stability charts for homogenous soil slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(12), 2212-2218.
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*, Wiley, New York.
- USACE (2003). *Slope Stability, Engineering Manual, EM-1110-2-1902*, U.S. Army Corps of Engineers.
- Viejo, N. (2016). *Diseño sísmico de taludes en arena por medio de métodos basados en desempeño*. Santiago, Chile.: [s.n].
- Whitman, R. V.; Liao, S. (1983). Seismic design of gravity retaining walls. *Proc. 8th WCEE, San Francisco, Vol. 3*, 533-540.

## 8 Anexos

### 8.1 Anexo A

Como anexo se presenta el informe que genera el programa Slope/W 2012 (GeoStudio 2012) de uno de los diferentes análisis creados para llevar a cabo este documento, a modo de visualizar el trabajo detrás de cada modelo computacional estudiado:

### **Estabilidad de Taludes**

---

Reporte generado utilizando GeoStudio 2012. Copyright © 1991-2014 GEO-SLOPE International Ltd.

#### Información del archivo

Archivo de la versión: 8.14  
Creado por: Alumno  
Última edición por: Alumno  
Número de revisión: 77  
Fecha: 08-03-2016  
Tiempo: 10:41:34  
Versión de la herramienta: 8.14.1.10087  
Nombre de archivo: T1.gsz  
Directorio: C:\Users\Alumno\Documents\Cristian Opazo Guerra - Tesis\Análisis de Sensibilidad\Prueba - Estático - q=20 kPa\Talud 15°\  
Última fecha solucionado: 10-03-2016  
La última vez solucionada: 8:59:28

#### Ajustes del proyecto

Unidades de longitud (l): Metros  
Unidades de tiempo: Segundos  
Unidades Fuerza (F): Kilonewtons  
Unidades Presión (p): KPA  
Unidades de fuerza: KPA  
Unidad de peso de agua: 9.807 kN/m<sup>3</sup>  
Vista: 2D  
Elemento grueso: 1

#### Configuración de análisis

##### Estabilidad de Taludes

Clase: SLOPE/W  
Método: Morgenstern-Price  
Configuración  
Función lateral  
Opción de función de fuerza entre rebanadas: Medio-Seno  
PWP condiciones fuente: (ninguno)  
Superficie de deslizamiento  
Dirección de Movimiento: Derecha a Izquierda  
Use el modo pasivo: No  
Opción superficie antideslizante: Entrada-Salida  
Superficies de deslizamiento crítico salvadas: 1  
Ángulo convexo máxima resistencia lateral: 1 °

Ángulo convexo máxima conducción lateral: 5 °  
Optimizar la ubicación de la superficie de deslizamiento crítica: No  
Fisura de tensión

Opción de fisura de tensión: (ninguno)

Distribución del FS

F de la opción de cálculo de S: Sensitividad

Modificadores

Propiedad	Offset
Materials[1].Applied.Phi	Range(Mean=0,Delta=0.1)

Avanzado

Número de rebanadas: 100

F de S tolerancia: 0.001

Profundidad superficial mínimo resbalón: 0.1 m

Método de búsqueda: Localizador de raíz

Diferencia tolerable entre F de S inicial o de convergencia: 3

Máximo de iteraciones para calcular lambda convergente: 20

Lambda absoluto máximo: 2

Materiales

M1

Modelo: Mohr-Coulomb

Peso de la unidad: 18 kN/m<sup>3</sup>

Cohesión ': 0 KPA

Phi: 15 °

Phi-B: 0 °

Deslizamiento superficial entrada y salida

Proyección izquierdo: Rango

Coordenada izquierda de la zona izquierda: (74.642, 40) m

Coordenada derecha de la zona izquierda: (149.284, 40) m

Incremento de zona izquierda: 20

Proyección correcta: Rango

Zona derecha izquierda coordenada: (186.615, 50) m

Zona derecha, coordinada derecha: (261.257, 50) m

Incremento de la zona derecha: 20

Incrementos de radio: 4

Límites de superficie antideslizante

Coordenada izquierda: (0, 40) m

Coordenada derecha: (335.889, 50) m

Cargas de pago

Carga de pago 1

Suplemento (peso unitario): 20 kN/m<sup>3</sup>

Dirección: Vertical

### Coordenadas

X (m)	Y (m)
186.615	50
186.615	51
261.257	51

### Puntos

	X (m)	Y (m)
Punto 1	0	0
Punto 2	335.889	0
Punto 3	335.889	50
Punto 4	186.605	50
Punto 5	149.284	40
Punto 6	0	40

### Regiones

	Material	Puntos	Área (m <sup>2</sup> )
Región 1	M1	6,1,2,3,4,5	15,115

### Superficie de deslizamiento actual

Superficie de deslizamiento: 2,101

F de S: 1.002

Volumen: 19.156473 m<sup>3</sup>

Peso: 344.81651 kN

Resistencia al momento: 22,523.975 kN-m

Momento de Activación: 22,465.951 kN-m

Fuerza de resistencia: 86.226128 kN

Fuerza de Activación: 86.081704 kN

F de S Rank: 1

Salida: (149.284, 40) m

Entrada: (186.615, 50) m

Radios: 252.18224 m

Centro: (102.88889, 287.87775) m

Rebanadas de deslizamiento

	X (m)	Y (m)	Presión de agua intersticial (KPA)	Esfuerzo normal de base (KPA)	Resistencia Friccional (KPA)	Resistencia por Cohesión (KPA)
Rebanada 1	149.47061	40.035072	0	0.2559384	0.068578487	0
Rebanada 2	149.84382	40.105508	0	0.76275804	0.2043804	0
Rebanada 3	150.21703	40.176525	0	1.2595304	0.33749015	0
Rebanada 4	150.59024	40.248126	0	1.7462282	0.46790043	0
Rebanada 5	150.96345	40.32031	0	2.222824	0.59560388	0
Rebanada 6	151.33666	40.393078	0	2.6892902	0.72059313	0
Rebanada 7	151.70987	40.46643	0	3.1455993	0.8428608	0
Rebanada 8	152.08308	40.540367	0	3.5917241	0.96239957	0
Rebanada 9	152.45629	40.614889	0	4.0276375	1.0792022	0
Rebanada 10	152.8295	40.689998	0	4.4533129	1.1932616	0
Rebanada 11	153.20271	40.765693	0	4.8687243	1.3045707	0
Rebanada 12	153.57592	40.841974	0	5.2738464	1.4131229	0
Rebanada 13	153.94913	40.918844	0	5.6686546	1.5189114	0
Rebanada 14	154.32234	40.996301	0	6.0531252	1.62193	0
Rebanada 15	154.69555	41.074348	0	6.4272355	1.7221726	0
Rebanada 16	155.06876	41.152983	0	6.7909638	1.8196333	0
Rebanada 17	155.44197	41.232209	0	7.1442896	1.9143066	0
Rebanada 18	155.81518	41.312024	0	7.4871936	2.0061875	0
Rebanada 19	156.18839	41.392431	0	7.8196577	2.095271	0
Rebanada 20	156.5616	41.473429	0	8.1416652	2.1815526	0
Rebanada 21	156.93481	41.555019	0	8.453201	2.2650284	0
Rebanada 22	157.30802	41.637202	0	8.7542511	2.3456945	0
Rebanada 23	157.68123	41.719978	0	9.0448031	2.4235477	0

Rebanada 24	158.05444	41.803348	0	9.3248463	2.498585	0
Rebanada 25	158.42765	41.887313	0	9.5943712	2.570804	0
Rebanada 26	158.80086	41.971872	0	9.8533701	2.6402026	0
Rebanada 27	159.17407	42.057027	0	10.101837	2.706779	0
Rebanada 28	159.54728	42.142779	0	10.339767	2.7705321	0
Rebanada 29	159.92049	42.229128	0	10.567156	2.831461	0
Rebanada 30	160.2937	42.316074	0	10.784004	2.8895653	0
Rebanada 31	160.66691	42.403618	0	10.990311	2.9448449	0
Rebanada 32	161.04011	42.491761	0	11.186077	2.9973003	0
Rebanada 33	161.41332	42.580504	0	11.371306	3.0469323	0
Rebanada 34	161.78653	42.669847	0	11.546002	3.0937419	0
Rebanada 35	162.15974	42.75979	0	11.71017	3.1377307	0
Rebanada 36	162.53295	42.850335	0	11.863818	3.1789005	0
Rebanada 37	162.90616	42.941483	0	12.006954	3.2172537	0
Rebanada 38	163.27937	43.033233	0	12.139587	3.2527926	0
Rebanada 39	163.65258	43.125586	0	12.261728	3.2855202	0
Rebanada 40	164.02579	43.218544	0	12.373389	3.3154396	0
Rebanada 41	164.399	43.312106	0	12.474582	3.3425542	0
Rebanada 42	164.77221	43.406275	0	12.565321	3.3668675	0
Rebanada 43	165.14542	43.501049	0	12.645619	3.3883834	0
Rebanada 44	165.51863	43.59643	0	12.715493	3.4071061	0
Rebanada 45	165.89184	43.692419	0	12.774958	3.4230396	0
Rebanada 46	166.26505	43.789016	0	12.82403	3.4361885	0
Rebanada 47	166.63826	43.886223	0	12.862726	3.4465571	0
Rebanada 48	167.01147	43.984039	0	12.891063	3.45415	0
Rebanada 49	167.38468	44.082466	0	12.909059	3.458972	0

Rebanada 50	167.75789	44.181504	0	12.916732	3.4610278	0
Rebanada 51	168.1311	44.281154	0	12.914097	3.460322	0
Rebanada 52	168.50431	44.381417	0	12.901175	3.4568594	0
Rebanada 53	168.87752	44.482294	0	12.877981	3.4506447	0
Rebanada 54	169.25073	44.583785	0	12.844534	3.4416825	0
Rebanada 55	169.62394	44.685891	0	12.80085	3.4299774	0
Rebanada 56	169.99715	44.788613	0	12.746945	3.4155337	0
Rebanada 57	170.37036	44.891951	0	12.682837	3.3983559	0
Rebanada 58	170.74357	44.995907	0	12.608539	3.378448	0
Rebanada 59	171.11678	45.100481	0	12.524068	3.3558139	0
Rebanada 60	171.48999	45.205675	0	12.429436	3.3304575	0
Rebanada 61	171.8632	45.311488	0	12.324658	3.3023821	0
Rebanada 62	172.23641	45.417921	0	12.209744	3.2715911	0
Rebanada 63	172.60962	45.524977	0	12.084707	3.2380875	0
Rebanada 64	172.98283	45.632654	0	11.949556	3.2018738	0
Rebanada 65	173.35604	45.740955	0	11.804299	3.1629525	0
Rebanada 66	173.72925	45.849879	0	11.648946	3.1213256	0
Rebanada 67	174.10247	45.959429	0	11.4835	3.0769947	0
Rebanada 68	174.47568	46.069604	0	11.307969	3.0299611	0
Rebanada 69	174.84889	46.180405	0	11.122354	2.9802258	0
Rebanada 70	175.2221	46.291834	0	10.926658	2.9277893	0
Rebanada 71	175.59531	46.403891	0	10.720882	2.8726517	0
Rebanada 72	175.96852	46.516577	0	10.505024	2.8148126	0
Rebanada 73	176.34173	46.629893	0	10.279081	2.7542714	0
Rebanada 74	176.71494	46.74384	0	10.043049	2.6910269	0
Rebanada 75	177.08815	46.858419	0	9.7969224	2.6250775	0

Rebanada 76	177.46136	46.973631	0	9.5406933	2.5564211	0
Rebanada 77	177.83457	47.089476	0	9.2743523	2.4850552	0
Rebanada 78	178.20778	47.205955	0	8.9978884	2.4109769	0
Rebanada 79	178.58099	47.32307	0	8.7112891	2.3341829	0
Rebanada 80	178.9542	47.440822	0	8.41454	2.2546692	0
Rebanada 81	179.32741	47.55921	0	8.1076251	2.1724316	0
Rebanada 82	179.70062	47.678237	0	7.790527	2.0874654	0
Rebanada 83	180.07383	47.797903	0	7.4632265	1.9997655	0
Rebanada 84	180.44704	47.918209	0	7.1257028	1.9093263	0
Rebanada 85	180.82025	48.039157	0	6.7779339	1.8161419	0
Rebanada 86	181.19346	48.160746	0	6.4198959	1.7202059	0
Rebanada 87	181.56667	48.282978	0	6.051564	1.6215117	0
Rebanada 88	181.93988	48.405855	0	5.6729117	1.5200521	0
Rebanada 89	182.31309	48.529376	0	5.2839113	1.4158198	0
Rebanada 90	182.6863	48.653544	0	4.8845341	1.308807	0
Rebanada 91	183.05951	48.778358	0	4.4747501	1.1990057	0
Rebanada 92	183.43272	48.903821	0	4.0545282	1.0864076	0
Rebanada 93	183.80593	49.029932	0	3.6238368	0.97100415	0
Rebanada 94	184.17914	49.156694	0	3.182643	0.85278663	0
Rebanada 95	184.55235	49.284107	0	2.7309136	0.73174608	0
Rebanada 96	184.92556	49.412172	0	2.2686144	0.60787339	0
Rebanada 97	185.29877	49.54089	0	1.795711	0.48115932	0
Rebanada 98	185.67198	49.670262	0	1.3121687	0.35159454	0
Rebanada 99	186.04519	49.80029	0	0.81795236	0.21916967	0
Rebanada 100	186.4184	49.930974	0	0.31302692	0.08387531	0
Rebanada 101	186.61	49.99824	0	0.028953166	0.0077579775	0