

DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN CONSIDERANDO INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

por

**LUIS CARLOS BÁEZ LOZADA
PABLO ECHEVERRI LÓPEZ**

Trabajo de grado presentado a la

Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil
Pontificia Universidad Javeriana

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Pontificia Universidad Javeriana
Carrera de Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia, Diciembre 2015

Aprobado por

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

Director

Departamento de Ingeniería Civil

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Jesús Villalba

Jurado 1

Departamento de Ingeniería civil

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Alfonso Mariano Ramos Cañón

Jurado 2

Instituto Geofísico

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Índice General

1. Introducción	11
1.1. Objetivos	12
1.2. Descripción del documento	13
1.3. Herramientas computacionales	13
2. Marco teórico	13
2.1. Presiones laterales	13
2.1.1. Mohr-Coulomb.....	14
2.1.1.1. Presión Activa (Pa).....	14
2.1.1.2. Presión Pasiva (Pp).....	15
2.1.2. Mononobe-Okabe.....	16
2.1.2.1. Presión Activa total (Pae).....	16
2.1.2.2. Presión Pasiva total (Ppe).....	17
2.2. Tipología muros de contención	17
2.2.1. Muro gravedad	17
2.2.2. Muro cantiléver	18
2.2.3. Muro gaviones.....	19
2.2.4. Muro Pantalla	19
2.3. Factores de seguridad	20
2.3.1. Deslizamiento.....	22
2.3.2. Volcamiento	23
2.3.3. Capacidad portante	23
3. Metodología	25
3.1. Consideraciones iniciales	26
3.1.1. Parámetros de suelo.....	26
3.1.2. Condiciones de sismo.....	27
3.1.3. Pre dimensionamiento	27
3.1.3.1. Muro gravedad	28
3.1.3.2. Muro cantiléver	29
3.1.3.3. Muro gaviones.....	30
3.1.3.4. Muro Pantalla	31

3.1.4.	Proceso constructivo	32
3.1.4.1.	Muro Pantalla	32
3.1.4.2.	Muro Gaviones, Gravedad y Cantiléver.....	33
3.1.4.2.1.	Fase 1	33
3.1.4.2.2.	Fase 2	34
3.1.4.2.3.	Fase 3	34
3.1.4.2.4.	Fase 4	35
3.1.5.	Simulaciones con herramientas computacionales	35
3.1.5.1.	Simulación por elementos finitos con Plaxis	35
3.1.5.1.1.	Muro gravedad, gaviones y cantiléver	36
3.1.5.1.2.	Muro pantalla	49
3.1.5.2.	Equilibrio límite por medio de Slide	61
3.1.5.2.1.	Preparación del modelo	61
3.1.5.2.2.	Condiciones iniciales para la modelación de Muro de gravedad, gaviones y cantiléver. 62	
3.1.5.2.3.	Condiciones iniciales para la modelación del Muro pantalla.....	74
3.1.5.3.	Simulación estructural con elementos finitos por medio de Sap2000.....	77
4.	Resultados y análisis.....	80
4.1.	Dimensionamiento y factores de seguridad.....	80
4.2.	Simulación con herramientas computacionales	82
4.2.1.	Simulación por elementos finitos con Plaxis	83
4.2.1.1.	Muro de gravedad.....	83
4.2.1.1.1.	20, 10, 35.....	83
4.2.1.2.	Muro cantiléver	88
4.2.1.2.1.	15, 20, 35.....	88
4.2.1.3.	Muro gaviones.....	94
4.2.1.3.1.	20, 10, 35.....	94
4.2.1.4.	Muro Pantalla	97
4.2.1.4.1.	15, 00, 30.....	97
4.2.1.4.2.	20, 00, 35.....	100
4.2.2.	Equilibrio límite por medio de Slide	106
4.2.2.1.	Muro de gravedad.....	106
4.2.2.2.	Muro Cantiléver	114

4.2.2.3.	Muro gaviones.....	119
4.2.2.4.	Muro pantalla	124
4.2.3.	Simulación estructural con elementos finitos por medio de Sap2000.....	127
5.	Conclusiones	132
6.	Resumen y perspectiva.....	133
6.1.	Resumen.....	133
6.2.	Perspectivas.....	133
7.	Referencias.....	134

Índice de Tablas

<i>tabla 2.1 Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos definidos por la NSR-10</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2.2 Factores de seguridad indirectos mínimos definidos por la NSR-10</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2.3 Factores de seguridad indirectos de capacidad portante mínimos definidos por la NSR-10</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3.4 Combinaciones determinadas por los parámetros de suelo</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 3.5 Propiedades de la Fase I</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3.6 Propiedades de la Fase II</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3.7 Propiedades de la Fase III</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 3.8 Propiedades de la Fase IV.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 3.9 Propiedades de la Fase V, sismo.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 3.10 Propiedades de la Fase I</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 3.11 Propiedades de la Fase II</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 3.12 Propiedades de la Fase III</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 3.13 Propiedades de la Fase IV.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 3.14 Propiedades de la Fase V.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 3.15 Propiedades de la Fase VI.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 3.16 Propiedades de la Fase VII.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 3.17 Propiedades de la Fase VIII.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 3.18 Ángulos de excavación muros de gravedad</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 3.19 Ángulos de excavación muros gaviones</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 3.20 Ángulos de excavación muros cantiléver</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 4.21 Dimensionamiento muro gravedad.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 4.22 Dimensionamiento muro cantiléver</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 4.23 Dimensionamiento muro gaviones.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 4.24 Dimensionamiento Muro pantalla</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 4.25 Muros a evaluar</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 4.26 Diagrama de esfuerzos y deformaciones por etapas de construcción</i>	<i>83</i>

<i>Tabla 4.27 Diagramas de esfuerzos obtenidos por Plaxis</i>	84
<i>Tabla 4.28 Esfuerzos de la interacción suelo-estructura</i>	84
<i>Tabla 4.29. Diagramas de esfuerzos para presión activa</i>	86
<i>Tabla 4.30 Diagramas de esfuerzos para presión pasiva</i>	86
<i>Tabla 4.31 Resultados de presiones laterales</i>	87
<i>Tabla 4.32 Diagrama de esfuerzos y deformaciones por etapas de construcción</i>	88
<i>Tabla 4.33 Diagramas de esfuerzos obtenidos por Plaxis</i>	89
<i>Tabla 4.34 Esfuerzos de la interacción suelo-estructura</i>	89
<i>Tabla 4.35 Esfuerzos para presión activa</i>	91
<i>Tabla 4.36 Diagramas de esfuerzos para presión activa</i>	91
<i>Tabla 4.37 Diagramas de esfuerzos para presión pasiva</i>	92
<i>Tabla 4.38 Resultados de presiones laterales</i>	93
<i>Tabla 4.39 Diagrama de esfuerzos y deformaciones por etapas de construcción</i>	94
<i>Tabla 4.40 Diagramas de esfuerzos obtenidos por Plaxis</i>	94
<i>Tabla 4.41 Esfuerzos de la interacción suelo-estructura</i>	95
<i>Tabla 4.42 Diagramas de esfuerzos para presión activa</i>	95
<i>Tabla 4.43 Diagramas de esfuerzos para presión pasiva</i>	96
<i>Tabla 4.44 Resultados de presiones laterales</i>	97
<i>Tabla 4.45 Diagrama de esfuerzos y deformaciones por etapas de construcción</i>	97
<i>Tabla 4.46 Diagramas de esfuerzos obtenidos por Plaxis</i>	99
<i>Tabla 4.47 Esfuerzos de la interacción suelo-estructura</i>	99
<i>Tabla 4.48 Diagramas de esfuerzos obtenidos por Plaxis</i>	105
<i>Tabla 4.49 Esfuerzos de la interacción suelo-estructura</i>	105
<i>Tabla 4.50 Factores de seguridad obtenidos por Slide para muros de gravedad</i>	113
<i>Tabla 4.51 Factores de seguridad obtenidos por Slide para Muros cantiléver</i>	118
<i>Tabla 4.52 Factores de seguridad obtenidos por Slide para muro gaviones</i>	124
<i>Tabla 4.53 Factores de seguridad obtenidos por Slide para muros pantalla</i>	127
<i>Tabla 4.54 Diseño a flexión de muro cantiléver vástago</i>	130
<i>Tabla 4.55 Diseño a flexión de muro cantiléver base</i>	130

Índice de Figuras

<i>Figura 2.1. Diagrama de parámetros para el cálculo de presiones por el método mohr-coulomb</i> ..	14
<i>Figura 2.2. Muro gravedad</i>	17
<i>Figura 2.3. Muro cantiléver</i>	18
<i>Figura 2.4. Muro gaviones</i>	19
<i>Figura 2.5. Muro pantalla</i>	19

<i>Figura 3.6 Pre dimensionamiento muro gravedad propuesto por (Murthy, 2002)</i>	28
<i>Figura 3.7 pre dimensionamiento muro gravedad</i>	29
<i>Figura 3.8 Pre dimensionamiento muro cantiléver propuesto por (Murthy, 2002)</i>	29
<i>Figura 3.9 Pre dimensionamiento muro cantiléver</i>	30
<i>Figura 3.10 Pre dimensionamiento muro gaviones</i>	31
<i>Figura 3.11 Pre dimensionamiento Muro pantalla</i>	32
<i>Figura 3.12 Proceso constructivo para muro pantalla</i>	33
<i>Figura 3.13 Fase I de construcción</i>	34
<i>Figura 3.14 Fase II de construcción</i>	34
<i>Figura 3.15 Fase III de construcción</i>	35
<i>Figura 3.16 Fase IV de construcción</i>	35
<i>Figura 3.17 Ventana de Project en configuraciones generales del muro de gravedad 20, 10, 35</i>	37
<i>Figura 3.18 Nombre y comentarios del Muro de Gravedad 201035</i>	37
<i>figura 3.19 Tipo de modelo y número de elementos del proyecto.</i>	38
<i>Figura 3.20 Aceleraciones en dirección x-y del sismo a trabajar</i>	38
<i>Figura 3.21 Unidades empleadas para el desarrollo y cálculo del proyecto</i>	38
<i>Figura 3.22 Geometría y dimensiones del terreno</i>	39
<i>Figura 3.23 Icono de interface</i>	39
<i>Figura 3.24 Icono de Standard fixities</i>	39
<i>Figura 3.25 Modelo geométrico finalizado del Muro de gravedad 20, 10, 35</i>	40
<i>Figura 3.26 Icono de Material sets</i>	40
<i>Figura 3.27 Materiales empleados en la modelación</i>	41
<i>Figura 3.28 Propiedades del concreto del Muro de gravedad</i>	41
<i>Figura 3.29 Propiedades del relleno utilizado</i>	42
<i>Figura 3.30 Propiedades del suelo</i>	42
<i>Figura 3.31 Icono de generación de la malla de elementos finitos</i>	43
<i>Figura 3.32 Malla de elementos finitos del proyecto</i>	43
<i>Figura 3.33 Nivel freático del proyecto</i>	44
<i>Figura 3.34 Esfuerzos iniciales del modelo</i>	44
<i>Figura 3.35 Ventana de cálculos y sus fases correspondientes</i>	45
<i>Figura 3.36 Casilla de entrada de carga a etapas de construcción</i>	45
<i>Figura 3.37 Geometría fase I</i>	46
<i>Figura 3.38 Geometría de la Fase II</i>	47
<i>Figura 3.39 Geometría de la Fase III</i>	47
<i>Figura 3.40 Geometría de la Fase IV</i>	48
<i>Figura 3.41 Multiplicadores totales de la fase V</i>	48
<i>Figura 3.42 Nombre y comentarios del proyecto</i>	50
<i>Figura 3.43 Tipo de modelo y número de elementos para el proyecto</i>	50
<i>Figura 3.44 Aceleraciones en dirección x-y del sismo</i>	50
<i>Figura 3.45 Unidades empleadas para el desarrollo y cálculo del proyecto</i>	50
<i>Figura 3.46 Geometría y dimensiones del terreno del proyecto</i>	51
<i>Figura 3.47 Icono de Plate</i>	51
<i>Figura 3.48 Icono de node to node anchor</i>	51

Figura 3.49 Icono de geogrid.....	52
Figura 3.50 Modelo geométrico finalizado del Muro pantalla 15, 00, 30.....	52
Figura 3.51 Materiales empleados en la modelación	52
Figura 3.52 Propiedades del terreno	53
Figura 3.53 Propiedades del muro	53
Figura 3.54 Propiedades del bulbo	54
Figura 3.55 Propiedades de los anclajes	54
Figura 3.56 Malla de elementos finitos del Muro pantalla	54
Figura 3.57 Nivel freático del proyecto.....	55
Figura 3.58 Esfuerzos iniciales del modelo	55
Figura 3.59 Ventana de cálculos y sus fases correspondientes.....	56
Figura 3.60 Geometría de la Fase I.....	56
Figura 3.61 Geometría de la Fase II.....	57
Figura 3.62 Geometría de la Fase III	58
Figura 3.63 Geometría de la Fase IV	58
Figura 3.64 Geometría de la Fase V	59
Figura 3.65 Geometría de la Fase VI	59
Figura 3.66 Geometría de la Fase VII	60
Figura 3.67 Muro de gravedad 20, 10, 35.....	61
Figura 3.68 Ajustes de proyecto para Slide V6.0.....	62
Figura 3.69 Superficies de falla	62
Figura 3.70 Suelo.....	63
Figura 3.71 Concreto con resistencia infinita.....	64
Figura 3.72 Concreto con cohesión de 10500 kN/m ²	64
Figura 3.73 Relleno.....	65
Figura 3.74 Relleno cohesivo.....	65
Figura 3.75 Geometría Fase I	66
Figura 3.76 Coordenadas Fase I	66
Figura 3.77 Geometría de la Fase II.....	67
Figura 3.78 Coordenadas de la Fase II	67
Figura 3.79 Geometría de la Fase III	69
Figura 3.80 Coordenadas de la Fase III	69
Figura 3.81 Coordenadas del dentellón como material boundary del muro	70
Figura 3.82 Geometría de la Fase IV	70
Figura 3.83 Coordenadas de la Fase IV	70
Figura 3.84 Geometría de la Fase IV con esfuerzos.....	71
Figura 3.85 Ubicación vértices para situar las fuerzas distribuidas	71
Figura 3.86 Coordenadas vértices	72
Figura 3.87 Aplicación de cargas distribuidas	73
Figura 3.88 Definición carga sísmica.....	73
Figura 3.89 Muro pantalla sin anclajes	74
Figura 3.90 Coordenadas de external boundary en muro pantalla	74
Figura 3.91 Coordenadas de material boundary en muro pantalla	75

<i>Figura 3.92 Muro pantalla</i>	76
<i>Figura 3.93 Comando add support</i>	76
<i>Figura 3.94 Propiedades del soporte</i>	76
<i>Figura 3.95 Aplicación cargas distribuidas sobre el muro</i>	77
<i>Figura 3.96 Aplicación carga obtenida por el método de mononobe-okabe</i>	78
<i>Figura 4.97 Curvas de los diagramas de esfuerzos para presión activa</i>	86
<i>Figura 4.98 Curvas de los diagramas de esfuerzos para presión pasiva</i>	87
<i>Figura 4.99 Zona del diagrama de esfuerzos para presión activa</i>	91
<i>Figura 4.100 Curvas de los diagramas de esfuerzos para presión activa</i>	92
<i>Figura 4.101 Curvas de los diagramas de esfuerzos para presión pasiva</i>	93
<i>Figura 4.102 Curvas de los diagramas de esfuerzos para presión activa</i>	96
<i>Figura 4.103 Curvas de los diagramas de esfuerzos para presión pasiva</i>	96
<i>Figura 4.104 Ventana de resultados con fases de construcción</i>	101
<i>Figura 4.105 Diagramas de desplazamiento en el eje x de la fase 3 de construcción, considerando el proceso constructivo</i>	102
<i>Figura 4.106 Ventana de resultados sin fases de construcción</i>	103
<i>Figura 4.107 Diagramas de desplazamiento en el eje x de la fase 4 de construcción, sin considerar su proceso constructivo</i>	104
<i>Figura 4.99 Muro de gravedad Fase I</i>	106
<i>Figura 4.100 Muro de gravedad Fase II</i>	107
<i>Figura 4.101 Muro de gravedad Fase III</i>	107
<i>Figura 4.102 Muro de gravedad Fase IV, con resistencia infinita</i>	109
<i>Figura 4.103 Muro de gravedad Fase IV, no drenado</i>	109
<i>Figura 4.104 Muro de gravedad Fase IV, no drenado y en condición de sismo</i>	110
<i>Figura 4.105 Muro de gravedad Fase IV, con esfuerzos</i>	111
<i>Figura 4.106 Muro de gravedad Fase IV, con esfuerzos y sismo</i>	111
<i>Figura 4.107 Muro de gravedad Fase IV, con esfuerzos y relleno cohesivo</i>	112
<i>Figura 4.108 Muro de gravedad Fase IV, con esfuerzos aumentados al 150%</i>	112
<i>Figura 4.109 Muro de gravedad Fase IV, con esfuerzos aumentados al 150% y relleno cohesivo</i> ..	113
<i>Figura 4.110 Muro cantiléver Fase II</i>	114
<i>Figura 4.111 Muro cantiléver Fase III</i>	114
<i>Figura 4.112 Muro cantiléver Fase IV, con resistencia infinita</i>	115
<i>Figura 4.113 Muro cantiléver Fase IV, no drenado</i>	115
<i>Figura 4.114 Muro cantiléver Fase IV, no drenado con sismo</i>	115
<i>Figura 4.115 Muro cantiléver Fase IV, con esfuerzos</i>	116
<i>Figura 4.116 Muro cantiléver Fase IV, con esfuerzos y sismo</i>	116
<i>Figura 4.117 Muro cantiléver Fase IV, con esfuerzos y relleno cohesivo</i>	117
<i>Figura 4.118 Muro cantiléver Fase IV, con esfuerzos aumentados al 150%</i>	117
<i>Figura 4.119 Muro cantiléver Fase IV, con esfuerzos aumentados al 150% y relleno cohesivo</i>	118
<i>Figura 4.120 Muro gaviones Fase II</i>	119
<i>Figura 4.121 Muro gaviones Fase III</i>	119
<i>Figura 4.122 Muro gaviones Fase IV, resistencia infinita</i>	120
<i>Figura 4.123 Muro gaviones Fase IV, no drenado</i>	120

<i>Figura 4.124 Muro gaviones Fase IV, no drenado con sismo</i>	121
<i>Figura 4.125 Muro gaviones Fase IV, con esfuerzos</i>	121
<i>Figura 4.126 Muro gaviones Fase IV, con esfuerzos y sismo</i>	122
<i>Figura 4.127 Muro gaviones Fase IV, con esfuerzos y relleno cohesivo</i>	122
<i>Figura 4.128 Muro gaviones Fase IV, con esfuerzos aumentados al 150%</i>	123
<i>Figura 4.129 Muro gaviones Fase IV, con esfuerzos aumentados al 150% y relleno cohesivo</i>	123
<i>Figura 4.130 Muro pantalla sin anclajes</i>	124
<i>Figura 4.131 Muro pantalla con anclajes</i>	125
<i>Figura 4.132 Muro pantalla con anclajes y sismo</i>	125
<i>Figura 4.133 Muro pantalla con esfuerzos</i>	126
<i>Figura 4.134 Muro pantalla con esfuerzos y sismo</i>	126
<i>Figura 4.135 Muro pantalla con esfuerzos aumentados al 150%</i>	127
<i>Figura 4.136 Momento máximo muro cantiléver 15, 20, 35 en el vástago con esfuerzos de Plaxis</i>	128
<i>Figura 4.137 Momento máximo muro cantiléver 15, 20, 35 en la base con esfuerzos de Plaxis</i> ...	128
<i>Figura 3.138 Momento máximo muro cantiléver 15, 30, 35 en el vástago con esfuerzos de Plaxis</i>	128
<i>Figura 4.139 Momento máximo muro cantiléver 15, 30, 35 en la base con esfuerzos de Plaxis</i>	128
<i>Figura 4.140 Momento máximo muro cantiléver 15, 30, 35 en la base con esfuerzos obtenidos por el método de mononobe-okabe</i>	129
<i>Figura 4.141 Momento máximo muro cantiléver 15, 30, 35 en el vástago con esfuerzos obtenidos por el método de mononobe-okabe</i>	129
<i>Figura 4.142 Momento máximo muro cantiléver 15, 20, 35 en la base con esfuerzos obtenidos por el método de mononobe-okabe</i>	129
<i>Figura 4.143 Momento máximo muro cantiléver 15, 20, 35 en el vástago con esfuerzos obtenidos por el método de mononobe-okabe</i>	129

1. Introducción

Los muros de contención son estructuras muy comunes e importantes para la protección de vías de comunicación, edificaciones y zonas con alto riesgo de deslizamiento. Son utilizadas para contener las presiones de tierra u otros materiales. En cualquier tipo de estructura de retención, el comportamiento y la respuesta a la carga estática y sísmica depende de las restricciones cinemáticas impuestas sobre la estructura y en su rigidez. (D.D. Theodorakopoulos 2001).

La presión del suelo en estructuras de contención es uno de los inconvenientes de la mecánica de suelos. A pesar de una investigación teórica y experimental intensa durante más de 200 años, todavía hay grandes discrepancias entre las soluciones teóricas y los resultados experimentales. Además, estas presiones pueden ser dinámicas debido a la influencia sísmica que incrementan las presiones laterales que ponen en riesgo la estabilidad de la estructura y el terreno (Xinpo Li 2010).

Las metodologías analíticas que tradicionalmente son utilizadas para la determinación de los esfuerzos generados por un determinado suelo sobre una estructura de contención, son la de Mohr-Coulomb para una condición estática y la de Mononobe-Okabe para una condición pseudo-estática. A partir de los esfuerzos obtenidos como resultado de las metodologías anteriormente mencionadas, se puede realizar un análisis de estabilidad del muro por el método del equilibrio límite definido por los factores de seguridad para volcamiento, deslizamiento y capacidad portante (Xinpo Li 2010) (P.N. Psarropoulos 2004).

Debido a que todavía existen incógnitas sobre la interacción suelo-estructura y los esfuerzos producidos a partir de esta interacción en condiciones estáticas o dinámicas, el análisis y diseño de muros de contención que se realiza actualmente puede subestimar las cargas y se corre el riesgo de que las estructuras de contención diseñadas puedan fallar. El fallo de estas estructuras puede afectar vías, presas, viviendas, causar problemas ambientales y sociales, inclusive poner en riesgo vidas humanas. Esto ha generado la

necesidad plantear diferentes metodologías para el diseño de estas estructuras aplicando procedimientos y criterios que permitan establecer un adecuado nivel de seguridad (Xinpo Li 2010) (Gutiérrez Gomez y Rodríguez Pineda 2015).

Para poder determinar la contribución de la estructura en la estabilidad, se debe realizar un análisis considerando la interacción del suelo y la estructura. Considerando los efectos de esta interacción se obtiene un diagrama de presiones que puede variar de acuerdo al tipo de estructura que se haya diseñado (L. Widulinski 2011).

A partir de lo anterior, se plantea el uso de elementos finitos para modelar la interacción suelo-estructura bajo condiciones estáticas y dinámicas. Los cuales son capaces de simular con éxito la interacción y su fiabilidad ha sido verificada mediante resultados de modelos reales y computarizados (D.D. Theodorakopoulos 2001). Los cálculos de elementos finitos son más realistas que las soluciones analíticas, ya que tienen en cuenta las leyes constitutivas que describen el comportamiento de los suelos, se pueden predecir la evolución de la localización de la deformación y simula cargas sísmicas (Gutiérrez Gomez y Rodríguez Pineda 2015). Además, se obtiene una distribución de presiones más aproximada a la real para el diseño estructural, en función de la rigidez de la estructura y bajo condiciones de suelo en ausencia de presiones hidrostáticas (P.N. Psarropoulos 2004).

1.1. Objetivos

Objetivo general:

Evaluar el comportamiento y el diseño estructural de distintas estructuras de contención bajo las mismas condiciones de suelo, considerando interacción suelo-estructura.

Objetivo específico:

1. Analizar la interacción suelo-estructura para diferentes tipos de muros de contención.

2. Realizar un análisis de estabilidad de taludes a cada tipo de estructura de contención, para evaluar el comportamiento de los muros con el suelo, considerando la interacción suelo-estructura.

3. Proponer una metodología de diseño estructural de los muros de contención, de acuerdo con el resultado de interacción suelo-estructura.

1.2. Descripción del documento

En este documento se presenta una propuesta de diseño para diferentes tipos de muro de contención (muro de gaviones, muro gravedad, muro cantiléver y muro pantalla), donde se determinan las presiones laterales a través de metodologías analíticas tradicionales y simulación en 2D con análisis por medio de elementos finitos.

1.3. Herramientas computacionales

Para el desarrollo de este documento se utilizaron los programas computacionales Plaxis v8.2 y Slide v6.0, donde se simularon las fases de construcción de las estructuras de contención y se analizaron y evaluaron los resultados obtenidos a partir de estos modelos.

2. Marco teórico

2.1. Presiones laterales

Los muros de contención comúnmente conocidos en la ingeniería (gravedad, cantiléver, gaviones, pantalla, etc.) cumplen con la necesidad de soportar masas de suelo. Para el diseño y la construcción de un muro de contención es necesario tener conocimiento sobre las presiones generadas por la interacción suelo-estructura. Estas presiones son denominadas presión activa (P_a) y presión pasiva (P_p) y existen diversos métodos para el cálculo de sus magnitudes, entre estos, el método de Mohr-Coulomb (Das, Fundamentals of Geotechnical Engineering 2007).

2.1.1. Mohr-Coulomb

El cálculo de las magnitudes de las presiones laterales por el método de Mohr-Coulomb se desarrolla a partir del buzamiento (β), el ángulo formado por el plano AB y la horizontal (α), el ángulo de fricción del muro (δ) y las condiciones iniciales del suelo como su peso específico (γ) y el ángulo de fricción del suelo (ϕ) (Figura 2.1); **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

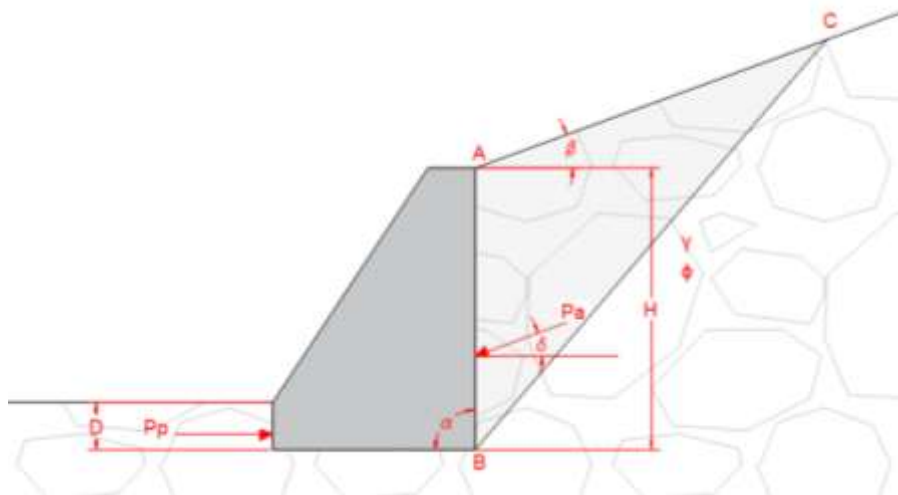


FIGURA 2.1. DIAGRAMA DE PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE PRESIONES POR EL MÉTODO MOHR-COULOMB

2.1.1.1. Presión Activa (P_a)

La presión activa es la presión que actúa sobre el espaldar del muro (Figura 2.1) y las ecuaciones que la definen, por el Método de Mohr-Coulomb, incluyen la fricción del suelo (δ) a diferencia del Método de Rankine.

Coefficiente de presión activa, K_a .

(2.1)

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(\alpha + \emptyset)}{\text{sen}^2 \alpha \text{sen}(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\emptyset + \delta) \text{sen}(\emptyset - \beta)}{\text{sen}(\alpha - \delta) \text{sen}(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

La fuerza total de la presión activa (P_a) está determinada por el área del diagrama de presiones.

(2.2)

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma_{\text{suelo}} H^2 K_a$$

Donde H es la altura del muro (*Figura 2.1*) y el γ_{suelo} está determinado por el peso específico del suelo.

2.1.1.2. Presión Pasiva (P_p)

La presión pasiva es la presión que resiste los desplazamientos generados por la presión activa y se encuentra ubicada en la parte frontal de la estructura (*Figura 2.1*).

Coefficiente de presión pasiva, K_p .

(2.3)

$$K_p = \frac{\text{sen}^2(\alpha - \emptyset)}{\text{sen}^2 \alpha \text{sen}(\alpha + \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\text{sen}(\emptyset + \delta) \text{sen}(\emptyset + \beta)}{\text{sen}(\alpha + \delta) \text{sen}(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

La fuerza total de la presión pasiva (P_p) está determinada por el área del diagrama de presiones.

(2.4)

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_{\text{suelo}} D^2 K_p$$

Donde H es la altura del muro tomada (*Figura 2.1*; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y el γ_{suelo} está determinado por el peso específico del suelo.

2.1.2. Mononobe-Okabe

El método de Mononobe-Okabe es utilizado para el cálculo de presiones laterales para la condición pseudo-estática. Es similar al método estático desarrollado por Coulomb pero con la inclusión de coeficientes de aceleración horizontal (K_h) y vertical (K_v) (Murthy 2002).

2.1.2.1. Presión Activa total (P_{ae})

Coefficiente dinámico de presión activa (K_{ae})

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi - \eta - \theta)}{\cos\eta \cos^2\theta \cos(\delta + \theta + \eta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi - \eta - \beta)}{\cos(\delta + \theta + \eta)\cos(\beta - \theta)}}\right]^2} \quad (2.5)$$

Donde

$$\eta = \tan^{-1}\left[\frac{K_h}{1 - K_v}\right] \quad (2.6)$$

θ = Ángulo de inclinación de la superficie AB (*Figura 2.1*) con respecto a la vertical.

La magnitud total de la presión activa en condición pseudo-estática está dada por

$$P_{ae} = \frac{1}{2} \gamma_{suelo} H^2 (1 - K_v) K_{ae} \quad (2.7)$$

Donde P_{ae} es la suma de la presión activa en condición estática (P_a) y la componente dinámica de la presión activa ($\overline{P_a}$). La cual se ubica en $H/2$ sobre la superficie AB (*Figura 2.1*) para fines de diseño y análisis (Murthy 2002).

2.1.2.2. Presión Pasiva total (Ppe)

Las ecuaciones correspondientes para la presión pasiva en condición pseudo-estática son.

(2.8)

$$K_{pe} = \frac{\cos^2(\phi - \eta + \theta)}{\cos\eta \cos^2\theta \cos(\delta - \theta + \eta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi - \eta + \beta)}{\cos(\delta - \theta + \eta)\cos(\beta - \theta)}}\right]^2}$$

(2.9)

$$P_{pe} = \frac{1}{2} \gamma_{suelo} D^2 (1 - K_v) K_{pe}$$

La fuerza resultante Ppe será ubicada en H/2 sobre la superficie frontal del muro para fines de diseño y análisis (Murthy 2002).

2.2. Tipología muros de contención

2.2.1. Muro gravedad

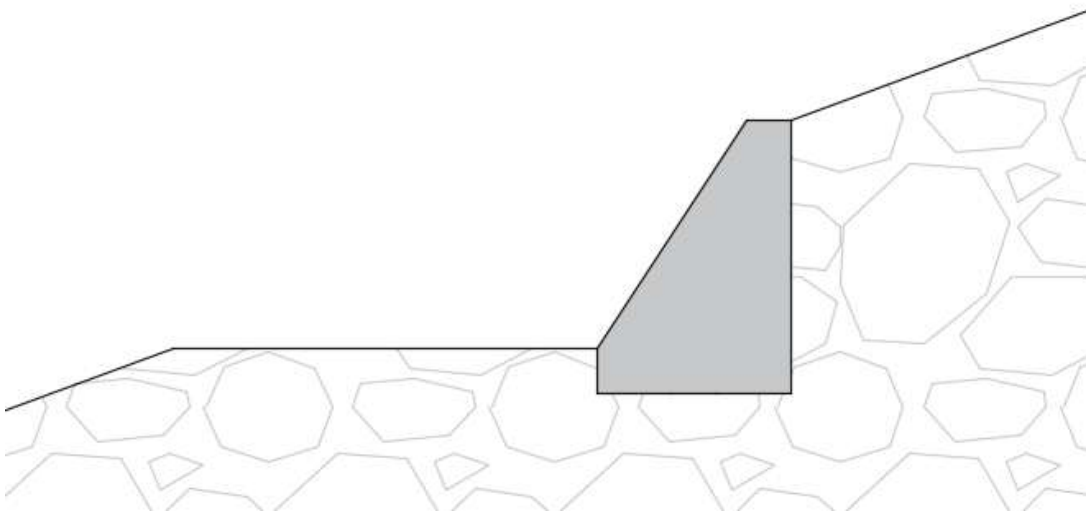


FIGURA 2.2. MURO GRAVEDAD

Muros construidos generalmente con concreto ciclópeo, los cuales dependen de su propio peso y del tipo de suelo en el que encuentran para la estabilidad. Este tipo de estructura no es económico para grandes alturas (Das, Fundamentals of Geotechnical Engineering 2007).

2.2.2.Muro cantiléver

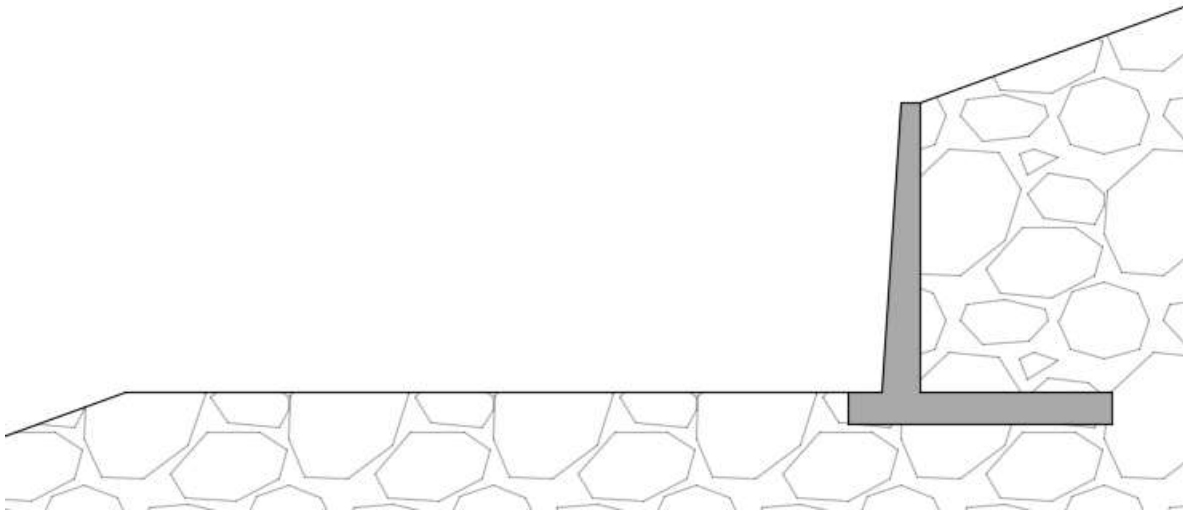


FIGURA 2.3. MURO CANTILÉVER

Muro de concreto reforzado que consiste en un vástago delgado y una losa de base para retener la masa de suelo detrás de la pared, son de forma simple de L o T invertida. La estabilidad se logra a partir del peso del suelo en la parte del talón de la losa de base. En ocasiones es necesario adicionar un dentellón para aumentar la resistencia al deslizamiento, al igual que los muros de gravedad (Chris R.I. Clayton 2013).

2.2.3.Muro gaviones

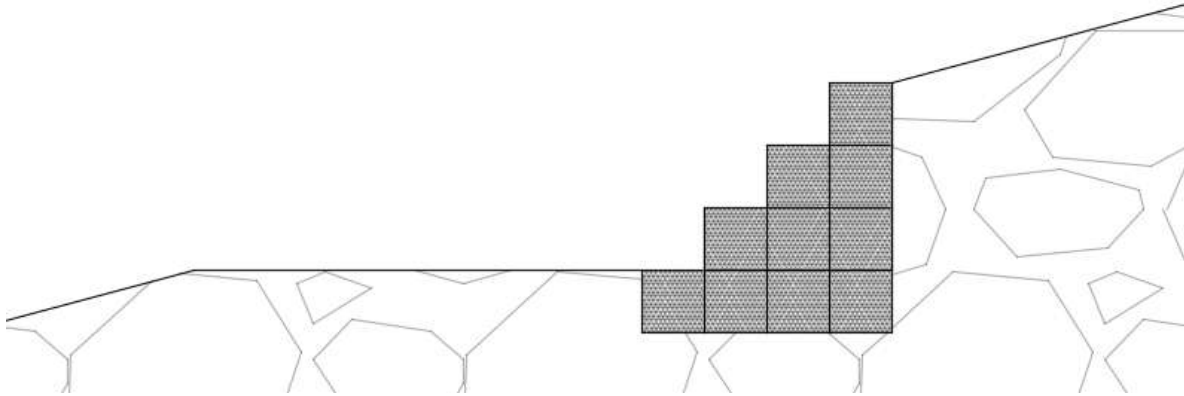


FIGURA 2.4. MURO GAVIONES

Un gavión consiste en una caja de metal o malla de plástico que se llena in situ con material granular grueso proveniente de roca, adoquines triturados o similares. Estos gaviones se ordenan de acuerdo al diseño y conforman el muro de gaviones. Los muros de gaviones funcionan como un muro de gravedad. (Chris R.I. Clayton 2013).

2.2.4.Muro Pantalla

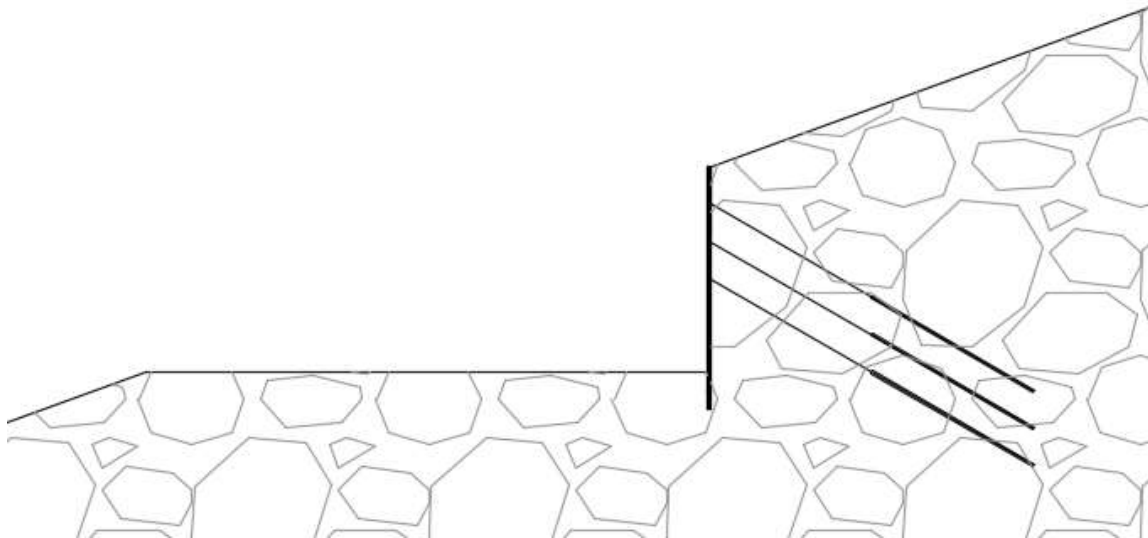


FIGURA 2.5. MURO PANTALLA

Estructura de contención que consiste en una pantalla de concreto reforzado, la cual es construida in situ para soportar las cargas del terreno. El proceso de excavación se hace descendente y a medida que se va excavando, se van haciendo los anclajes que determine su diseño (Chris R.I. Clayton 2013).

2.3. Factores de seguridad

Factor de Seguridad (F.S) se define como la relación entre fuerzas resistentes (FR) y actuantes (FA).

(2.10)

$$F.S = \frac{F_R}{F_A}$$

En Ingeniería Geotécnica el Factor de Seguridad Básico (**F.S.B**), se define como la relación entre esfuerzo cortante último resistente o esfuerzo cortante a la falla (τ_F) y esfuerzo cortante actuante (τ_A).

(2.11)

$$F.S.B = \frac{\tau_F}{\tau_A}$$

En cualquier caso los Factores de Seguridad Básicos aplicados al material térreo (suelo, roca o material intermedio) no deben ser inferiores a los Factores de Seguridad Básicos Mínimos (FSBM o FSBUM) de la *tabla 2.1*.

TABLA 2.1 FACTORES DE SEGURIDAD BÁSICOS MÍNIMOS DIRECTOS DEFINIDOS POR LA NSR-10

Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos				
Condición	FSBM		FSBUM	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1,50	1,25	1,80	1,25
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1,25	1,10	1,40	1,10
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1,10	1,00	No se permite	No se permite
Taludes - Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1,50	1,25	1,80	1,40
Taludes - Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1,05	1,00	No se permite	No se permite

El Factor de Seguridad Básico o directo (**F.S.B**) es el factor de seguridad geotécnico real, pero de él se derivan Factores de Seguridad Indirectos que tienen valores diferentes y los cuales se especifican en la *Tabla 2.2*.

TABLA 2.2 FACTORES DE SEGURIDAD INDIRECTOS MÍNIMOS DEFINIDOS POR LA NSR-10

Factores de Seguridad Indirectos Mínimos				
Condición	Construcción	Estático	Sismo	Seudo estático
Deslizamiento	1,6	1,6	Diseño	1,05
Volcamiento: El que resulte más crítico de Momento Resistente / Momento Actuante. Excentricidad en sentido del momento (e/B)	$\geq 3,00$ $\leq 1/6$	$\geq 3,00$ $\leq 1/6$	Diseño Diseño	$\geq 2,00$ $\leq 1/4$
Capacidad portante	Iguales a los de la <i>Tabla 2.3</i> .			

Como se enuncia en la *Tabla 2.2*, los factores para la capacidad portante están determinados por diferentes condiciones presentadas en la *Tabla 2.3*.

TABLA 2.3 FACTORES DE SEGURIDAD INDIRECTOS DE CAPACIDAD PORTANTE MÍNIMOS DEFINIDOS POR LA NSR-10

Condición	FSICP Mínimo
	Diseño
Carga Muerta + Carga Viva Normal	3
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	2,5
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1,5

2.3.1.Deslizamiento

El empuje de tierra activo (P_a) debe ser resistido por las fuerzas de corte entre el suelo y la base y por la resistencia pasiva ejercida por el suelo a la estructura. El factor de seguridad contra deslizamiento puede ser expresado por la siguiente ecuación

$$F.S_{DESLIZAMIENTO} = \frac{\sum F_R}{\sum F_d} \quad (2.12)$$

Donde

$\sum F_R$ = Sumatoria de fuerzas de resistencia horizontales

$\sum F_d$ = Componente horizontal P_a

$$\sum F_d = P_a \times \cos \delta \quad (2.13)$$

La estabilidad contra deslizamiento deberá ser garantizada sin tomar en cuenta el empuje pasivo que puede movilizarse frente al pie del muro. Si no es suficiente la resistencia al desplazamiento, se podrá cambiar la inclinación de la base del muro colocándola hacia adentro, aumentar la rugosidad en el contacto muro-suelo, colocar dentellones reforzados,

anclar o pilotear el muro, profundizar la base del muro o ampliar la base del mismo (NSR-10 2012).

2.3.2. Volcamiento

Las fallas por volcamiento ocurren debido a que el momento causado por las presiones activas de suelo supera a la sumatoria de momentos resistentes cerca del punto de rotación. Estos momentos resistentes son generados por el peso de la estructura y del relleno. El factor de seguridad en contra volcamiento sobre su pie, punto D de la *Figura 2.1*, puede ser expresada

(2.14)

$$F.S_{VOLCAMIENTO} = \frac{\sum M_R}{\sum M_O}$$

Donde

$\sum M_R$ = Sumatoria de momentos de fuerzas que tienden a volcar sobre el punto D (*Figura 2.1*)

$\sum M_O$ = Sumatoria de momentos de fuerzas que tienden a resistir el volcamiento sobre el punto D (*Figura 2.1*)

El momento de volcamiento está definido por

(2.15)

$$\sum M_O = P_h \times \frac{H'}{3}$$

Donde

$$P_h = P_a \times \cos \delta$$

H' = Altura total del muro y del terreno si presenta inclinación

2.3.3. Capacidad portante

La capacidad de carga admisible o de trabajo es con la que se diseña la cimentación para la estructura de retención. La presión vertical transmitida al suelo por la losa de la base del muro de contención no debe exceder la capacidad de carga máxima del suelo, de lo contrario fallaría el elemento estructural. El factor de seguridad contra fallos de capacidad de carga se puede determinar por

(2.16)

$$F.S_{C.P} = \frac{q_u}{q_{max}}$$

Donde

q_u = Capacidad de carga ultima

q_{max} = Capacidad de carga máxima

Las presiones o cargas máximas (q_{max}) se producen en los extremos de las secciones de pie o talón de la estructura. El valor puede ser obtenido con la siguiente expresión

(2.17)

$$q_u = \frac{\sum V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B} \right)$$

Donde

$\sum V$ = Sumatoria de fuerzas verticales

B = Base de la estructura

e = Excentricidad

La excentricidad se define como

(2.18)

$$e = \frac{B}{2} - \frac{M_{net}}{\sum V}$$

Momento neto sobre el punto D *Figura 2.1*, se representa como

(2.19)

$$M_{net} = \sum M_R - \sum M_O$$

Para finalizar el cálculo de factor de seguridad, se debe determinar primero la capacidad de carga máxima del suelo. Por medio de las ecuaciones de Meyerhof, Hansen y Vesic modificadas se puede determinar la capacidad de carga máxima con la expresión (2.20)

(2.20)

$$q_u = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + \bar{q} N_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0,5 \gamma B' N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$

Donde N, s, d, i g y b son factores de capacidad de carga, forma, profundidad, inclinación de carga, inclinación del suelo e inclinación de la estructura respectivamente (Joseph E. Bowles 1997).

3. Metodología

Para el diseño de muros de contención se propone dimensionarlo con el método tradicional cumpliendo con los requisitos propuestos por la NSR-10, además de realizar un análisis de interacción suelo-estructura y de estabilidad teniendo en cuenta las fases de construcción. A continuación se propone el orden con el que se deben diseñar las estructuras de contención:

- Dimensionamiento de las estructuras por el método tradicional cumpliendo los factores de seguridad de la NSR-10.
- Análisis de estabilidad y determinación del ángulo de excavación por medio de Slide.
- Análisis de esfuerzos y deformaciones teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura por medio de Plaxis,
- Reemplazo de los muros por los esfuerzos obtenidos de la interacción suelo-estructura en Plaxis.
- Desarrollo de diseño estructural con los esfuerzos obtenidos por el método tradicional y con los esfuerzos obtenidos por la interacción suelo-estructura.

Para muro pantalla se realiza el siguiente procedimiento:

- Se definen las superficies de falla y a partir de estas se escoge la longitud de los tendones, todo este proceso se lleva a cabo en Slide, en el cual se verifican además los factores de seguridad.

- Análisis de esfuerzos y deformaciones teniendo en cuenta interacción suelo-estructura con Plaxis 2D
- Se reemplazan los esfuerzos obtenidos de la interacción suelo-estructura y se realiza el análisis de estabilidad

En caso de que en algún análisis de estabilidad o de interacción suelo-estructura no cumplan con la estabilidad o se generen grandes deformaciones, es necesario pre-dimensionar la estructura.

3.1. Consideraciones iniciales

Previo al diseño de los muros de contención se deben definir ciertos parámetros como las características iniciales del suelo y de los muros. Estos parámetros definen una serie de posibles escenarios (combinaciones) que determinan el diseño por equilibrio límite para cada tipología de muro.

3.1.1. Parámetros de suelo

Los materiales del terreno, al igual que los parámetros geotécnicos escogidos para la simulación, fueron obtenidos a partir de artículos científicos, del título B de la NSR 10 y de libros de geotecnia o mecánica de suelos acerca del diseño y del dimensionamiento de estructuras de contención (Diaz Diaz 2008) (Camargo Garcia y Gonzalez Escamilla 2011).

Se recopiló información de las diferentes base para determinaron las inclinaciones del terreno (β), las cohesiones (C'), ángulos de fricción (ϕ') y el peso específico (γ) del terreno a trabajar. Finalmente con los datos escogidos se generaron diferentes combinaciones de las variables del suelo para comparar los resultados *Tabla 3.4*.

TABLA 3.4 COMBINACIONES DETERMINADAS POR LOS PARÁMETROS DE SUELO

Parámetros del Suelo			
γ (kN/m ³)	β	C' (kPa)	ϕ'
19	15°	0	30°
			35°

		10	30°
			35°
		20	30°
			35°
		30	30°
			35°
	20°	0	35°
		10	35°
		20	35°
		30	35°

Para el relleno utilizado para el proceso de construcción de muros gaviones, gravedad y cantiléver, se le asignó una cohesión igual a 0 y el ángulo de fricción igual a $\frac{2}{3}\phi$ del terreno (Murthy 2002).

3.1.2. Condiciones de sismo

Las condiciones de sismo se desarrollan para zona de amenaza intermedia de acuerdo a la NSR-10. Para esta condición se le da un valor al coeficiente de aceleración horizontal (K_h) de 0.15 y el coeficiente de aceleración vertical (K_v) se obtiene de aproximadamente el 30% del K_h .

3.1.3. Pre dimensionamiento

El pre dimensionamiento de los muros de gravedad, gaviones y cantiléver se llevó a cabo a partir de una hoja de cálculo en la que se evalúan las condiciones del suelo y las dimensiones de los muros para cumplir con los factores mínimos de diseño.

El pre dimensionamiento de los muros pantalla se lleva a cabo a partir de las herramientas computacionales Plaxis y Slide.

3.1.3.1. Muro gravedad

Para el pre dimensionamiento de los muros de gravedad se consideran alturas entre los 4 y 8 metros (Suarez 2015). Los muros de gravedad desarrollados en los modelos de este documento tienen una altura de 6 metros.

Para definir las demás dimensiones del muro de gravedad se puede partir de pre dimensionamientos propuestos en la literatura como el de la *Figura 3.6*.

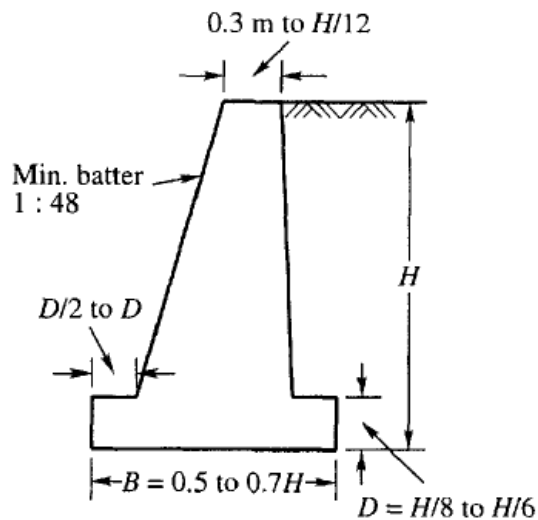


FIGURA 3.6 PRE DIMENSIONAMIENTO MURO GRAVEDAD PROPUESTO POR (MURTHY 2002)

De acuerdo al pre dimensionamiento anterior, se determinan las dimensiones de los muros gravedad cambiando dos variables (a y D) como se muestra en la *Figura 3.7*, con el fin de que cada muro cumpliera los factores de seguridad.

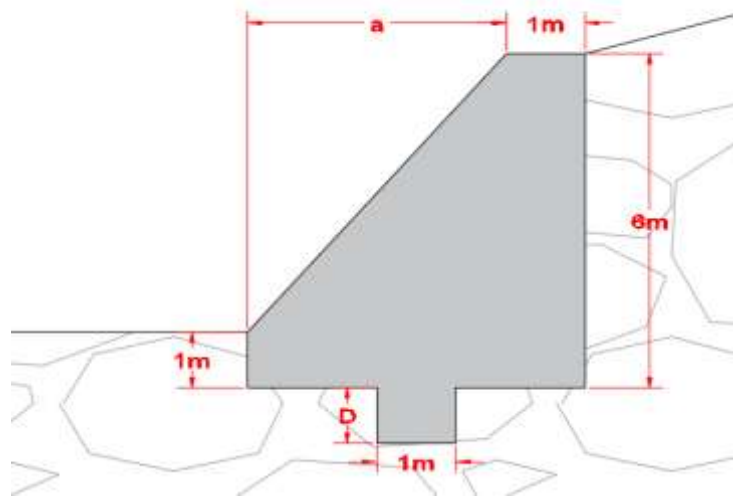


FIGURA 3.7 PRE DIMENSIONAMIENTO MURO GRAVEDAD

Los muros de gravedad son construidos con concreto simple y su densidad es de 2300 kg/m³ (NSR-10 2012).

3.1.3.2. Muro cantiléver

La altura recomendada y que es comúnmente utilizada en los muros de cantiléver es de 10 metros (Gomez 2013).

Uno de los pre dimensionamientos propuestos por la literatura está definido en la *Figura 3.8*.

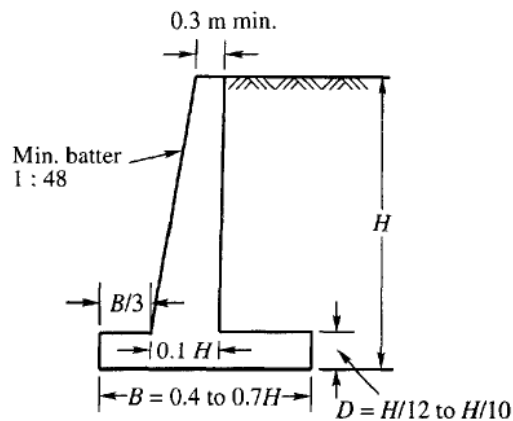


FIGURA 3.8 PRE DIMENSIONAMIENTO MURO CANTILÉVER PROPUESTO POR (MURTHY 2002)

A partir del pre dimensionamiento propuesto, se definen las dimensiones base para los modelos de muro cantiléver en los que solo se varían las dimensiones d y D para satisfacer los factores de seguridad (*Figura 3.9*).

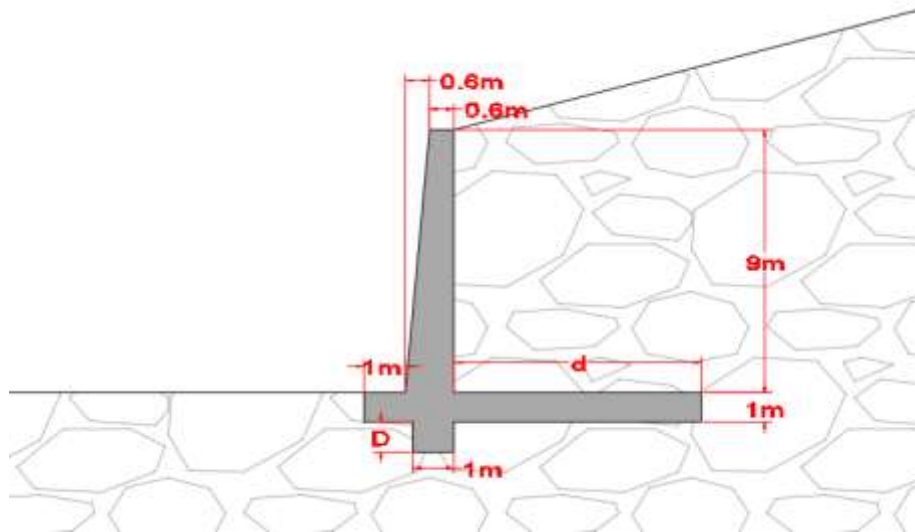


FIGURA 3.9 PRE DIMENSIONAMIENTO MURO CANTILÉVER

Los muros cantiléver son construidos con concreto reforzado y su densidad es de 2400 kg/m³ (NSR-10 2012).

3.1.3.3. Muro gaviones

La altura recomendada y que es comúnmente utilizada en los muros de gaviones es de 4 metros (Suarez 2015).

Los gaviones son tomados con dimensiones de 1m x 1m x 1m y sus dimensiones para la totalidad de los modelos está dada por la *Figura 3.10*.

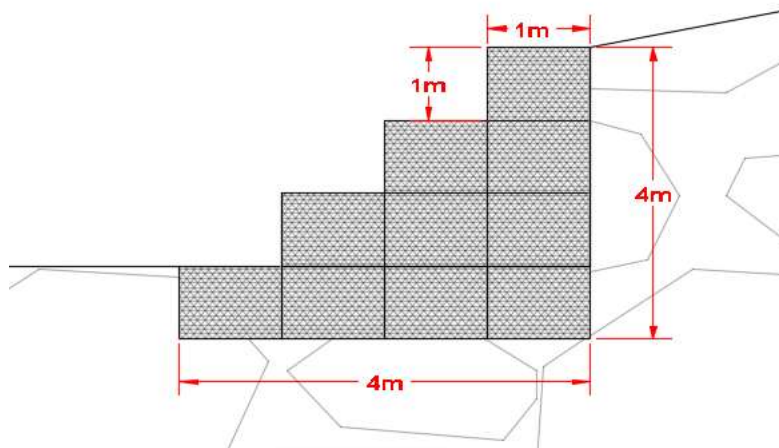


FIGURA 3.10 PRE DIMENSIONAMIENTO MURO GAVIONES

La densidad del relleno para los gaviones es de 1800 kg/m³ (Arcotierra 2007)

3.1.3.4. Muro Pantalla

Los muros pantalla son los que permiten retener masas de suelo con alturas superiores a 10 metros, es por esto que se definió una altura de 12 metros para la modelación de los muros de este tipo.

Las variables que determinan su funcionabilidad frente a los factores de seguridad son la separación vertical entre anclajes (a) y la longitud de los tendones (b) (Figura 3.11).

La longitud de los bulbos de estos anclajes es de 10 metros y está definida por valores típicos para este tipo de muros.

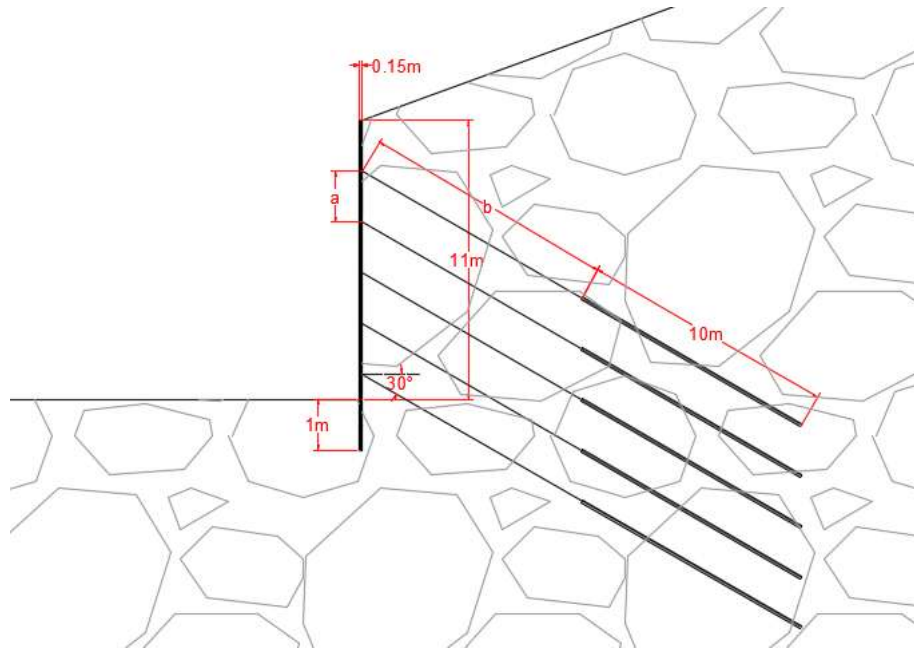


FIGURA 3.11 PRE DIMENSIONAMIENTO MURO PANTALLA

3.1.4. Proceso constructivo

Los procesos constructivos de las diferentes estructuras de contención (muro gavión, muro gravedad, muro cantiléver y muro pantalla) fueron organizados por fases, con el fin de simular cada una de ellas como se desarrolla a continuación (Diaz Diaz 2008) (Chris R.I. Clayton 2013).

3.1.4.1. Muro Pantalla

Cuando se dispone a realizar la construcción de un muro pantalla, lo primero que se debe hacer es una zanja de poca profundidad, la cual tiene como objetivo marcar una guía para la instalación del anclaje y finalmente se vuelve a excavar. Este proceso se repite dependiendo del número de anclajes requeridos, la *Figura 3.12* muestra las etapas de construcción (Pappin, y otros 1985)

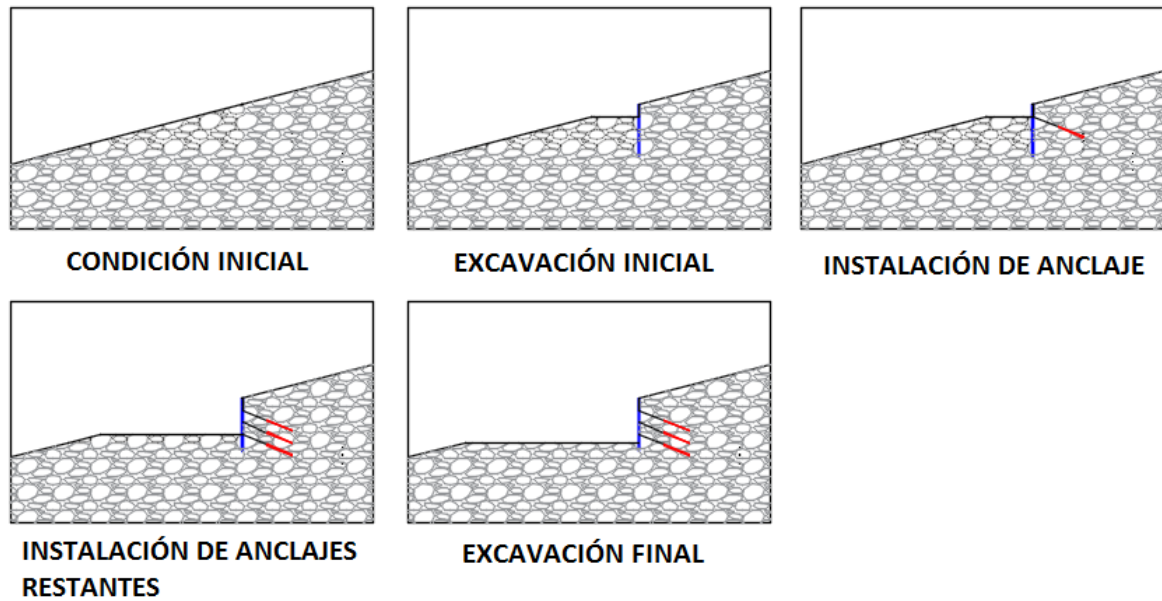


FIGURA 3.12 PROCESO CONSTRUCTIVO PARA MURO PANTALLA

3.1.4.2. Muro Gaviones, Gravedad y Cantiléver

Las etapas constructivas para muros gaviones, gravedad y cantiléver se realizan y simulan de manera similar, solo se diferencia por el tipo estructura (Chris R.I. Clayton 2013). Se definen 4 fases de construcción, las cuales serán descritas a continuación.

3.1.4.2.1. Fase 1

Consiste en la condición inicial del terreno, el cual puede presentar un ángulo de inclinación de 15° o 20°.

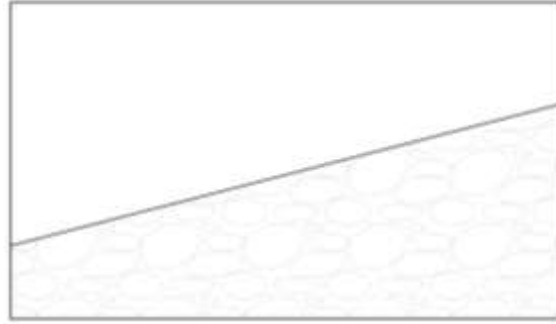


FIGURA 3.13 FASE I DE CONSTRUCCIÓN

3.1.4.2.2. Fase 2

Se ejecuta el proceso de excavación del terreno donde se ubicará el muro de contención. Con la simulación en Slide de esta fase se obtiene el ángulo de excavación que cumpla con el factor de seguridad 1,25 de acuerdo a los factores de seguridad establecidos por la NSR-10.

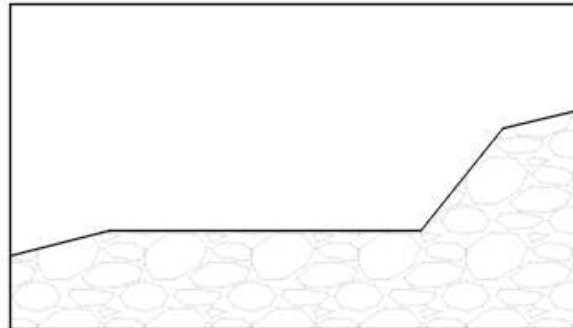


FIGURA 3.14 FASE II DE CONSTRUCCIÓN

3.1.4.2.3. Fase 3

Se lleva a cabo la construcción de la estructura de contención. Los muros son ubicados a 2 metros de distancia de la excavación, simulando el espacio requerido para facilitar su construcción como es realizado en prácticas ingenieriles.

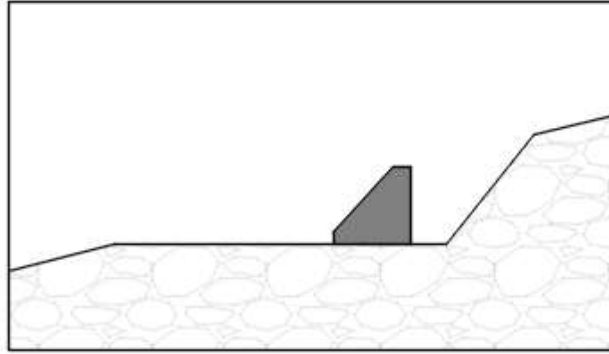


FIGURA 3.15 FASE III DE CONSTRUCCIÓN

3.1.4.2.4. Fase 4

Etapa final del proceso de construcción, donde se ubica el relleno en el terreno. Cumpliendo que la base del muro se encuentre cuando menos a 1 m bajo la superficie del terreno enfrente del muro de acuerdo al título H de la NSR-10.

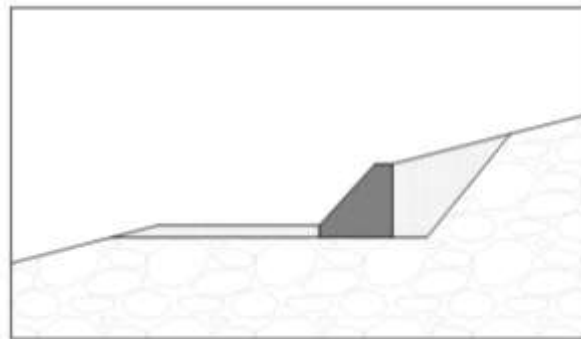


FIGURA 3.16 FASE IV DE CONSTRUCCIÓN

3.1.5. Simulaciones con herramientas computacionales

3.1.5.1. Simulación por elementos finitos con Plaxis

PLAXIS V8 es un software bidimensional que funciona mediante el método de elementos finitos, el cual está diseñado para analizar deformaciones y estabilidades de problemas

geotécnicos. Esta herramienta computacional grafica las dimensiones de cualquier situación geotécnica, para luego segmentarla a través de una malla de elementos finitos, definir las condiciones iniciales, realizar los respectivos cálculos y poder obtener los resultados del problema (Diaz Diaz 2008).

3.1.5.1.1. Muro gravedad, gaviones y cantiléver

A continuación se encuentran los procesos realizados para la modelación del Muro de gravedad 20, 10, 35 y el Muro pantalla 15, 0, 30 (esta nomenclatura corresponde al ángulo de buzamiento (β), cohesión del suelo (c') y ángulo de fricción del suelo (ϕ) respectivamente). El procedimiento de simulación para muro gaviones, gravedad y cantiléver son similares.

3.1.5.1.1.1. Creación del modelo geométrico

Para la simulación de la estructura se pre dimensiona el muro, de acuerdo a los estipulado en pre-dimensionamiento (3.1.3.1) y a los parámetros del terreno (3.1.1). Las dimensiones del Muro de gravedad 20, 10, 35 se encuentran en la *Tabla 4.21*, en terreno inclinado a 20° , con cohesión de 10 kN/m^2 y ángulo de fricción de 35° .

3.1.5.1.1.2. Condiciones Generales

Cuando se ingresa al programa al usuario se le preguntará si desea trabajar con un nuevo proyecto o continuar con uno previamente definido. Al elegir nuevo proyecto se activa la ventana *General Settings*, ésta posee dos pestañas *Project* y *Dimensions* como aparece en la *Figura 3.17*.

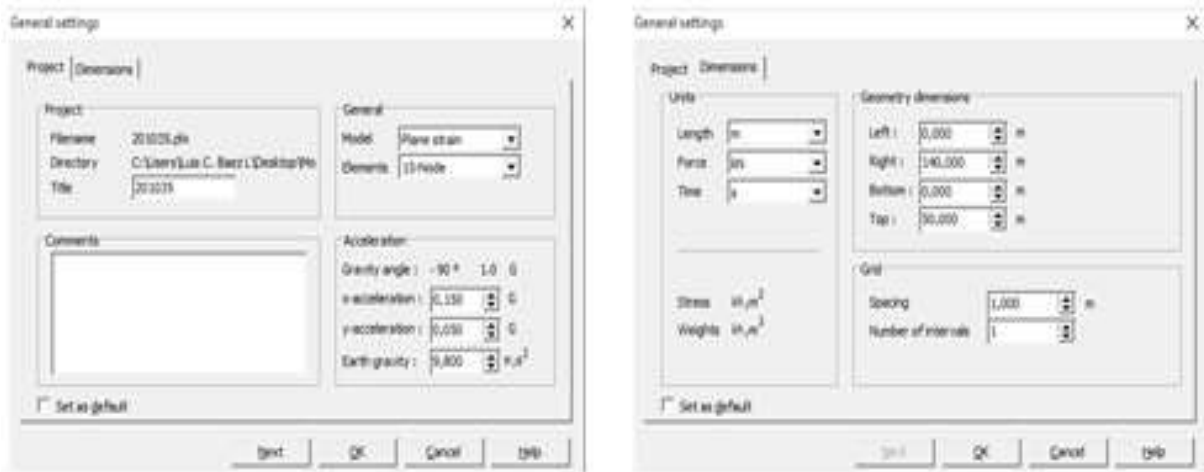


FIGURA 3.17 VENTANA DE PROJECT EN CONFIGURACIONES GENERALES DEL MURO DE GRAVEDAD 20, 10, 35

En *Project* se encuentran *Title* para escribir el nombre del proyecto, *Comments* el cuadro de comentarios para almacenar información sobre el análisis, *General* para elegir el tipo de análisis y el tipo de elementos y *Acceleration* el cual permite ingresar datos de aceleración en dirección *x-y*.

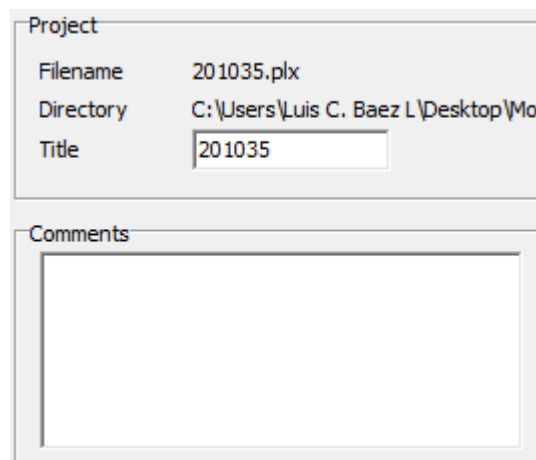


FIGURA 3.18 NOMBRE Y COMENTARIOS DEL MURO DE GRAVEDAD 201035

En *General* se define el proyecto con *Plane strain* (deformación plana) el cual se utiliza para modelos en casos de geometrías con una sección transversal aproximadamente uniforme y *15-node* que indica la cantidad de nodos de los elementos del suelo y de estructuras, 15 nodos proporciona una gran exactitud en los resultados. (Brinkgreve 2004)

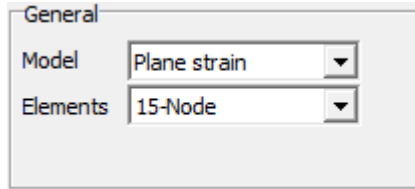


FIGURA 3.19 TIPO DE MODELO Y NÚMERO DE ELEMENTOS DEL PROYECTO.

Se introduce la aceleración de gravedad que trabaja por defecto con $9,8 \text{ m/s}^2$ en el plano x-y. Como se requiere modelar fuerzas dinámicas (sismos) de una forma pseudo estática, se utilizan los valores de aceleración en los ejes x-y.

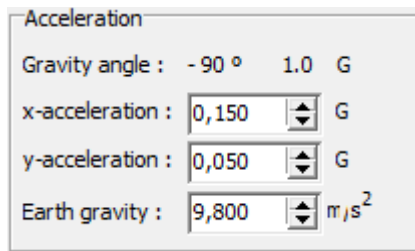


FIGURA 3.20 ACELERACIONES EN DIRECCIÓN X-Y DEL SISMO A TRABAJAR

Dimensions, se definen las unidades de longitud, fuerza, tiempo y las dimensiones mínimas de la zona dibujada, de manera que la geometría del modelo se ajuste al área del proyecto.

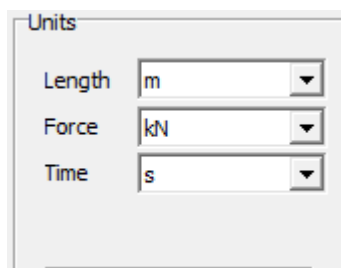


FIGURA 3.21 UNIDADES EMPLEADAS PARA EL DESARROLLO Y CÁLCULO DEL PROYECTO

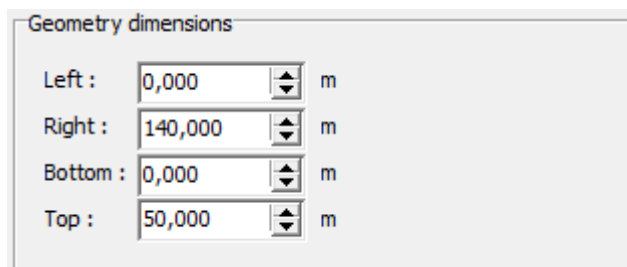


FIGURA 3.22 GEOMETRÍA Y DIMENSIONES DEL TERRENO

3.1.5.1.1.3. Modelo Geométrico

Cuando la configuración general se ha finalizado, se define la geometría de la estructura y del terreno por medio de un sistema de coordenadas que representan en dos dimensiones el proyecto. Se utilizan líneas geométricas, interfaces y condiciones de contorno para plasmar el modelo. El modelo geométrico debe incluir la división del subsuelo, objetos estructurales, las fases de construcción como se puede observar en la *Figura 3.25*.

Interface, este comando se utiliza para delimitar la interacción del suelo con las estructuras y para obtener diagramas de esfuerzos definidos alrededor de la estructura de contención. La creación de una interfaz se realiza de manera similar a una línea geométrica (*Figura 3.23*).

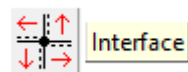


FIGURA 3.23 ICONO DE INTERFACE

Standard fixities, este comando se utiliza para establecer las condiciones de contorno generales, restringen los desplazamientos iguales a cero en los bordes del proyecto (*Figura 3.24*).

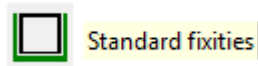


FIGURA 3.24 ICONO DE STANDARD FIXITIES

A continuación se presenta el modelo geométrico finalizado del muro de gravedad 20, 10, 35.

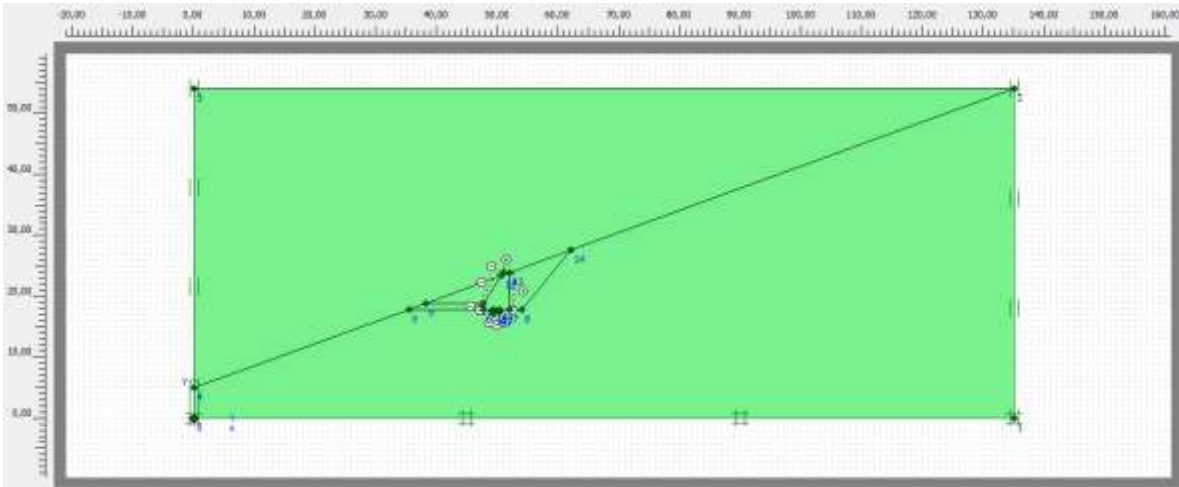


FIGURA 3.25 MODELO GEOMÉTRICO FINALIZADO DEL MURO DE GRAVEDAD 20, 10, 35

3.1.5.1.1.4. Propiedades de los materiales

En esta etapa de modelación se asignan las propiedades de los materiales que conforman el proyecto (suelo, concreto y relleno). Estas propiedades son introducidas con la herramienta Material Sets, donde se crean los materiales a utilizar con sus respectivas propiedades (Figura 3.26). Las propiedades de los materiales fueron definidas de acuerdo a la bibliografía y a las modelaciones realizadas por los artículos y manuales investigados que fueron guía para simulación de los muros a realizar (Camargo Garcia y Gonzalez Escamilla 2011) (Brinkgreve 2004) (Diaz Diaz 2008).

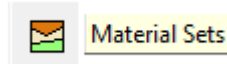


FIGURA 3.26 ICONO DE MATERIAL SETS

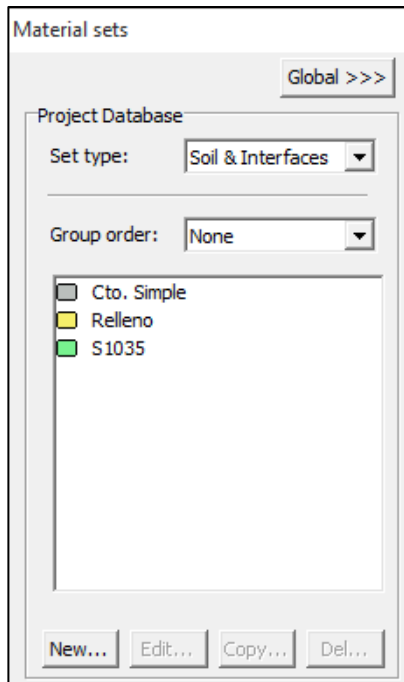


FIGURA 3.27 MATERIALES EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN

Cto. Simple, simula el comportamiento del concreto del muro de gravedad como un material lineal elástico que posee dos parámetros de rigidez, el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν). Además se ingresa el peso específico del concreto ciclópeo. El comportamiento del concreto se modela como material no poroso y lineal elástico (Diaz Diaz 2008)

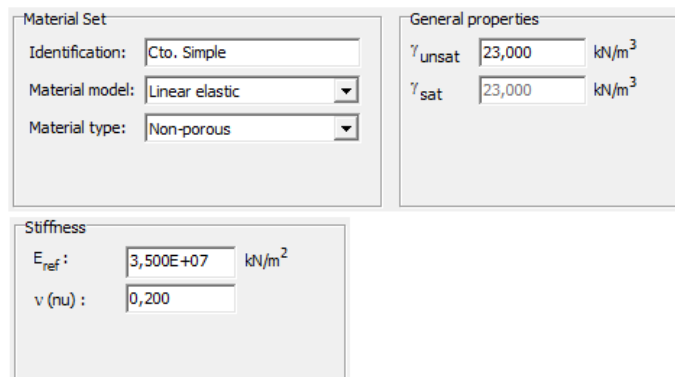


FIGURA 3.28 PROPIEDADES DEL CONCRETO DEL MURO DE GRAVEDAD

Relleno, corresponde al material utilizado para rellenar la excavación realizada en la construcción del muro gravedad. Se define como un material Mohr-Coulomb ya que es el que se aproxima más al comportamiento del suelo en general. El modelo incluye módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ). Se define la densidad seca y saturada del suelo a trabajar.

Material Set Identification: <input type="text" value="Relleno"/> Material model: <input type="text" value="Mohr-Coulomb"/> Material type: <input type="text" value="Drained"/>	General properties γ_{unsat} : <input type="text" value="19,000"/> kN/m ³ γ_{sat} : <input type="text" value="21,000"/> kN/m ³
Stiffness E_{ref} : <input type="text" value="7,000E+04"/> kN/m ² ν (nu): <input type="text" value="0,300"/>	Strength c_{ref} : <input type="text" value="0,000"/> kN/m ² ϕ (phi): <input type="text" value="23,330"/> ° ψ (psi): <input type="text" value="0,000"/> °

FIGURA 3.29 PROPIEDADES DEL RELLENO UTILIZADO

S1035, representa el material del terreno que posee similares parámetros a los del relleno pero con diferente cohesión.

Material Set Identification: <input type="text" value="S1035"/> Material model: <input type="text" value="Mohr-Coulomb"/> Material type: <input type="text" value="Drained"/>	General properties γ_{unsat} : <input type="text" value="19,000"/> kN/m ³ γ_{sat} : <input type="text" value="21,000"/> kN/m ³
Stiffness E_{ref} : <input type="text" value="7,000E+04"/> kN/m ² ν (nu): <input type="text" value="0,300"/>	Strength c_{ref} : <input type="text" value="10,000"/> kN/m ² ϕ (phi): <input type="text" value="35,000"/> ° ψ (psi): <input type="text" value="0,000"/> °

FIGURA 3.30 PROPIEDADES DEL SUELO

3.1.5.1.1.5. Generación de la malla de Elementos Finitos

Finalizado el modelo geométrico y las propiedades de los materiales han sido asignados a todos los grupos y objetos estructurales, la geometría se divide en elementos finitos con el fin de realizar los respectivos cálculos. La generación de la malla se ejecuta oprimiendo el icono *Generate mesh* (Figura 3.31).

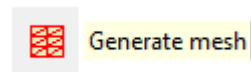


FIGURA 3.31 ICONO DE GENERACIÓN DE LA MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

Plaxis permite refinar zonas específicas de la malla con el fin de ser más preciso en los resultados, como se puede observar en la *Figura 3.32* la malla se ha refina alrededor del muro de gravedad.

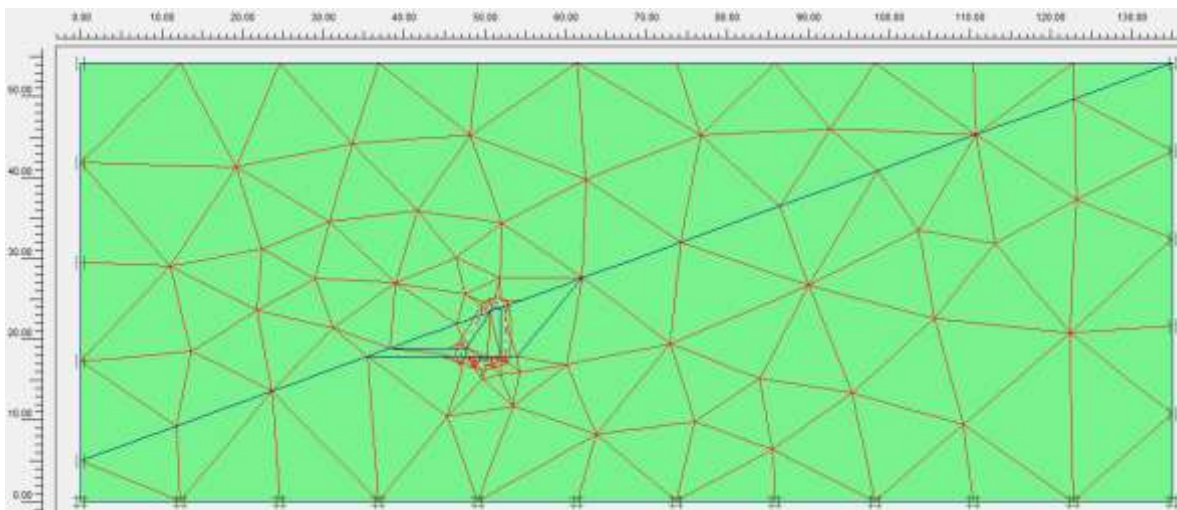


FIGURA 3.32 MALLA DE ELEMENTOS FINITOS DEL PROYECTO

3.1.5.1.1.6. Condiciones Iniciales

Una vez se ha creado el modelo geométrico, definido materiales y generado la malla de elementos finitos, se deben generar las condiciones iniciales del problema geotécnico a

modelar. Estas condiciones corresponden a las presiones iniciales del agua y a los esfuerzos iniciales.

Las condiciones de agua subterránea se activan y Plaxis genera el nivel freático automático, pero este puede ser modificado de acuerdo a las características del proyecto. Para este caso no se modifica ya que el nivel freático se encuentra a una profundidad significativa, inferior a la del proyecto.

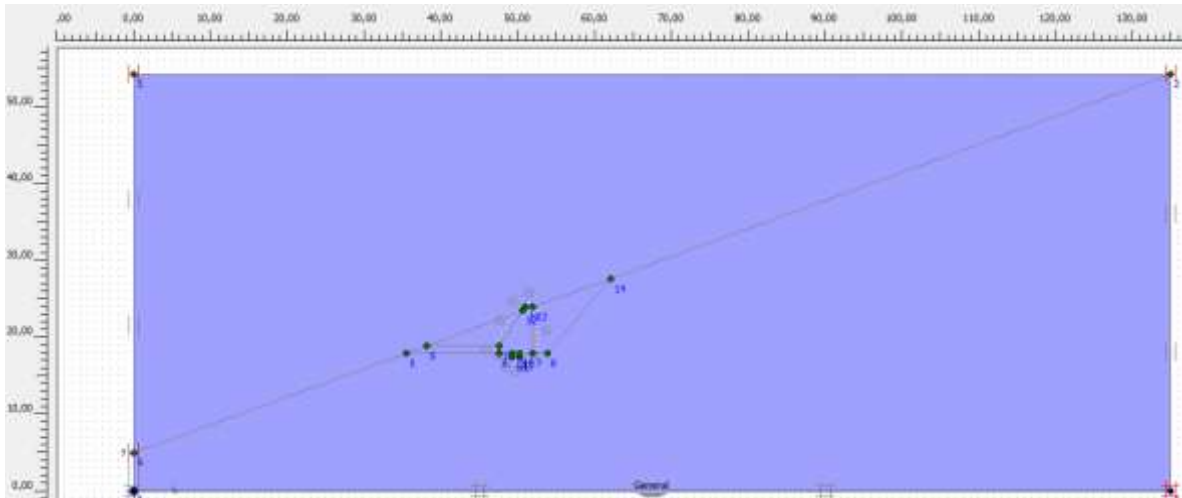


FIGURA 3.33 NIVEL FREÁTICO DEL PROYECTO

Una vez establecido el nivel freático y las presiones del agua, se continúa con la generación de los esfuerzos iniciales del terreno. Plaxis genera automáticamente los esfuerzos iniciales, al ejecutar el comando *Generate initial stresses*.

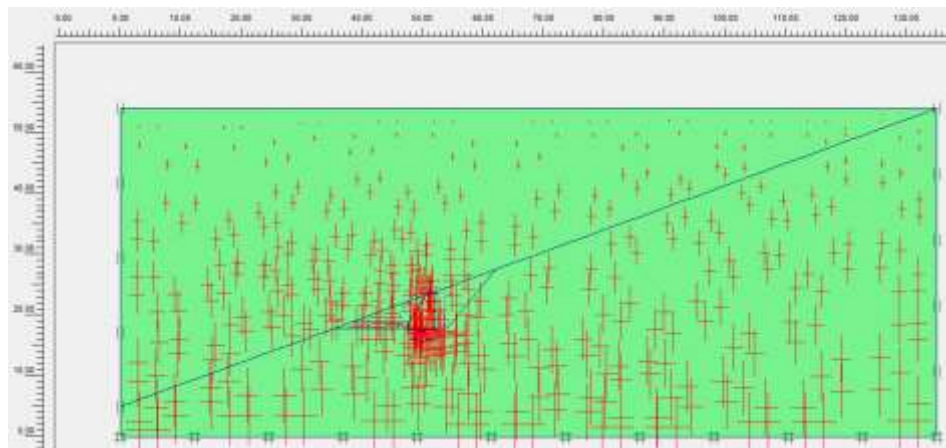


FIGURA 3.34 ESFUERZOS INICIALES DEL MODELO

3.1.5.1.1.7. Cálculos

Para la modelación de estos muros, el cálculo a realizar se compone de 5 fases, las primeras 4 fases son las diferentes etapas constructivas del muro de contención y la última fase se adiciona al cálculo para poder simular el escenario bajo condiciones pseudo-estáticas.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 s	0
✓ Fase 1	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 s	1
✓ Fase 2	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 s	2
✓ Fase 3	3	2	Plastic	Staged construction	0,00 s	3
✓ Fase 4	4	3	Plastic	Staged construction	0,00 s	4
✓ Sismo	7	4	Plastic	Total multipliers	0,00 s	4

FIGURA 3.35 VENTANA DE CÁLCULOS Y SUS FASES CORRESPONDIENTES

Para las 4 fases constructivas del proyecto, se utiliza *Stage construction* para problemas analizados que involucran construcción por etapas. El usuario debe definir las etapas cambiando las geometrías y los tipos de material (Figura 3.36).

FIGURA 3.36 CASILLA DE ENTRADA DE CARGA A ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN

Fase 1: Condición inicial

Fase constructiva referente al estado inicial del terreno con su inclinación. Las propiedades de la fase están definidas en la *Tabla 3.5* y su geometría como se define en la *Figura 3.37*.

TABLA 3.5 PROPIEDADES DE LA FASE I

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 1	1	0	Plástico	Construcción por etapas

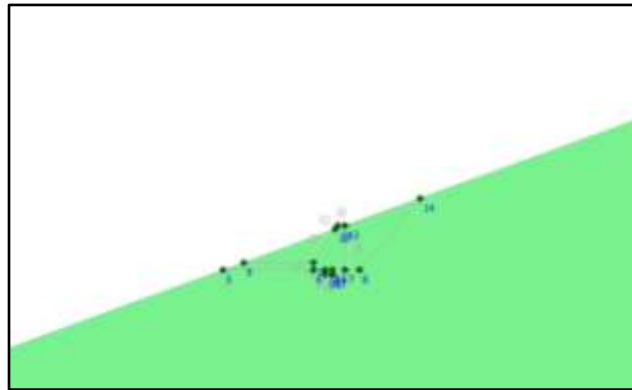


FIGURA 3.37 GEOMETRÍA FASE I

Fase 2: Proceso de excavación

Etapa de excavación de la zona de construcción del muro de gravedad. Las propiedades de la fase están definidas en la *Tabla 3.6* y su geometría como se define en la *Figura 3.38*.

TABLA 3.6 PROPIEDADES DE LA FASE II

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 2	2	1	Plástico	Construcción por etapas

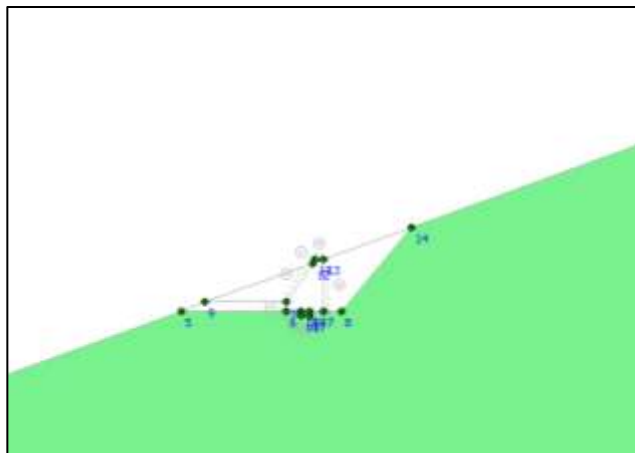


FIGURA 3.38 GEOMETRÍA DE LA FASE II

Fase 3: Proceso de construcción del muro

Construcción del muro de contención, donde se define la etapa de cálculo activando las capas de la geometría de la estructura y cambiando las propiedades del material por las de concreto simple. Las propiedades de la fase 3 están definidas en la *Tabla 3.7* y su geometría como se define en la *Figura 3.39*

TABLA 3.7 PROPIEDADES DE LA FASE III

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 3	3	2	Plástico	Construcción por etapas

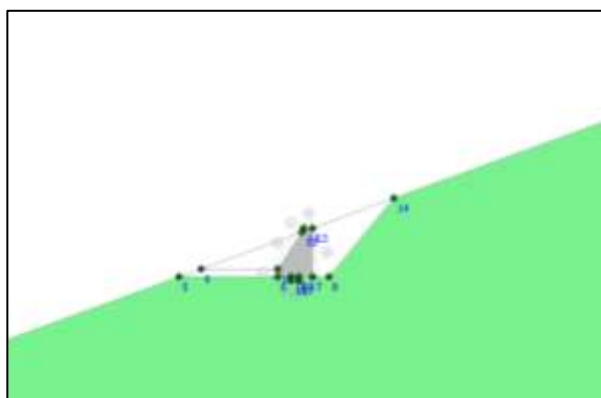


FIGURA 3.39 GEOMETRÍA DE LA FASE III

Fase 4: Etapa final

Etapa donde se ubica el relleno en el terreno. Las propiedades de la fase 4 están definidas en la *Tabla 3.8* y su geometría como se define en la *Figura 3.40*

TABLA 3.8 PROPIEDADES DE LA FASE IV

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 4	4	3	Plástico	Construcción por etapas

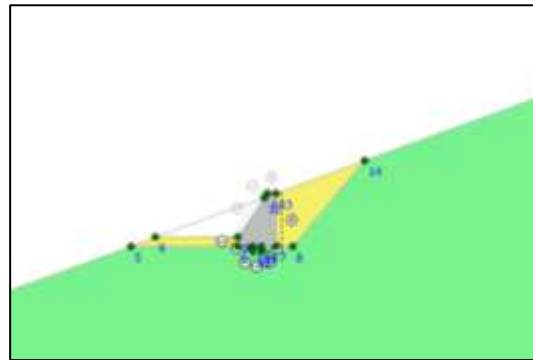


FIGURA 3.40 GEOMETRÍA DE LA FASE IV

Fase 5: Sismo

Para poder evaluar el sismo en el proyecto, se utiliza multiplicador total en la fase 4 que permite simular este tipo de cargas pseudo-estáticas. Multiplicador total representa al nivel total de carga en una etapa de cálculo o fase particular. Para simular el sismo en la modelación del muro se iguala el multiplicador de aceleración (Σ -Maccel) a 1, como se aprecia en la *Figura 3.41*.

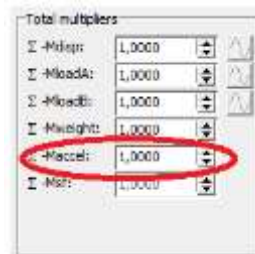


FIGURA 3.41 MULTIPLICADORES TOTALES DE LA FASE V

La geometría para el cálculo de los esfuerzos bajo cargas dinámicas, es la misma de la fase 4 donde el muro se encuentra construido. Las propiedades de la fase de Sismo están definidas en la *Tabla 3.9*

TABLA 3.9 PROPIEDADES DE LA FASE V, SISMO

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 5	5	4	Plástico	Multiplicador total

3.1.5.1.2. Muro pantalla

Para modelar un muro pantalla fue necesario determinar las propiedades de la estructura que cumplieran con los factores de seguridad requeridos utilizando Slide 6.0. Las características que determinan la funcionalidad del muro pantalla son la separación entre anclajes, la longitud de los tendones y sus bulbos. Estos parámetros de la estructura se encuentran ilustrados en la *Figura 3.11*.

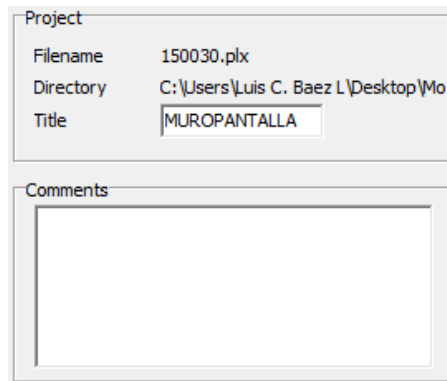
El Muro pantalla 15, 00, 30 está bajo condiciones de terreno inclinado a 15°, suelo sin cohesión y con ángulo de fricción de 30°. Las dimensiones de este muro se encuentran especificadas en la *Tabla 4.24*.

El proceso de modelación para muros pantalla consta de comandos adicionales para el desarrollo del modelo geométrico y la definición de las propiedades de los materiales utilizados, adicionalmente sus fases de construcción son distintas a las de los muros de gravedad, gaviones y cantiléver. Los pasos empleados para la modelación se desarrollan a continuación:

3.1.5.1.2.1. Condiciones Generales

Este paso se ejecuta como se expone en el numeral 3.1.5.1.1.2. Los pasos se ven ilustrados en la *Figura 3.42*, *Figura 3.43*, *Figura 3.44*, *Figura 3.45* y la *Figura 3.46*.

Proyecto:

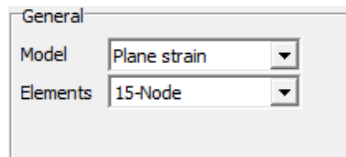


Project

Filename: 150030.plx
Directory: C:\Users\Luis C. Baez L\Desktop\Mo
Title: MUROPANTALLA

Comments

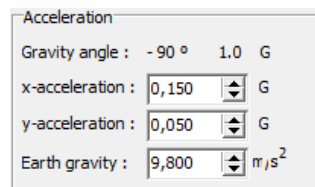
FIGURA 3.42 NOMBRE Y COMENTARIOS DEL PROYECTO



General

Model: Plane strain
Elements: 15-Node

FIGURA 3.43 TIPO DE MODELO Y NÚMERO DE ELEMENTOS PARA EL PROYECTO

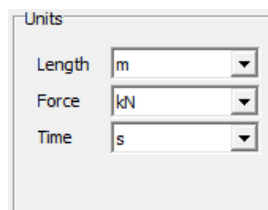


Acceleration

Gravity angle: -90 ° 1.0 G
x-acceleration: 0,150 G
y-acceleration: 0,050 G
Earth gravity: 9,800 m/s²

FIGURA 3.44 ACELERACIONES EN DIRECCIÓN X-Y DEL SISMO

Dimensiones:



Units

Length: m
Force: kN
Time: s

FIGURA 3.45 UNIDADES EMPLEADAS PARA EL DESARROLLO Y CÁLCULO DEL PROYECTO

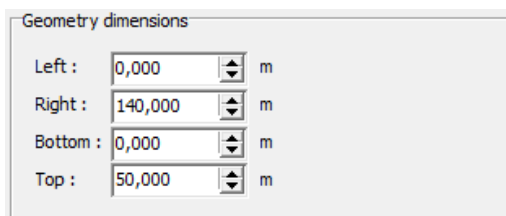


FIGURA 3.46 GEOMETRÍA Y DIMENSIONES DEL TERRENO DEL PROYECTO

3.1.5.1.2.2. Modelo Geométrico

Cuando la configuración general del muro pantalla se ha realizado, se procede a definir la geometría de la estructura. Se utilizan líneas geométricas, interfaces y condiciones de contorno al igual que muros de gravedad, adicionalmente se utilizan *Plates* para el muro estructural, *Node to node anchor* para los anclajes y *Geogrid* para el bulbo. Es necesario incluir la división del subsuelo, objetos estructurales y las fases de construcción del proyecto como se observa en la *Figura 3.50*.

Plate, las placas son objetos estructurales utilizados para modelar la influencia de los muros y estructuras esbeltas que interactúan con el suelo, con una rigidez a flexión y una rigidez normal (*Figura 3.47*).



FIGURA 3.47 ICONO DE PLATE

Node to node anchor, es el comando para modelar los anclajes entre dos puntos, que son sometidos a fuerzas de tracción y/o compresión (*Figura 3.48*).

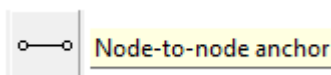


FIGURA 3.48 ICONO DE NODE TO NODE ANCHOR

Geogrid, se utiliza para modelar los refuerzos del suelo que solo resisten fuerzas de tracción, como el bulbo del muro pantalla (*Figura 3.49*).

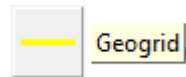


FIGURA 3.49 ICONO DE GEOGRID

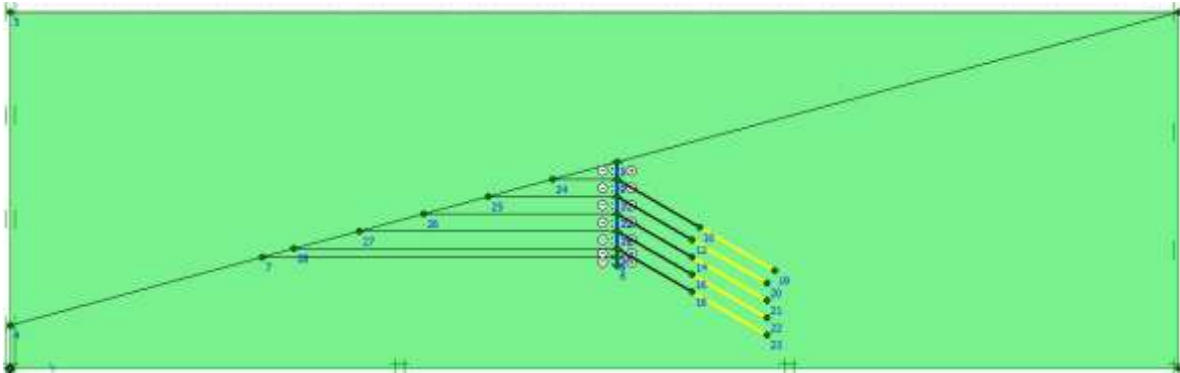


FIGURA 3.50 MODELO GEOMÉTRICO FINALIZADO DEL MURO PANTALLA 15, 00, 30

3.1.5.1.2.3. Propiedades de los materiales

En esta etapa de modelación se asignan las propiedades de los materiales que componen el modelo de muro pantalla como son el suelo, el muro, el bulbo y los anclajes (*Figura 3.51*), fueron definidas de acuerdo a los artículos y manuales investigados (Brinkgreve 2004) (Camargo Garcia y Gonzalez Escamilla 2011) (Diaz Diaz 2008).

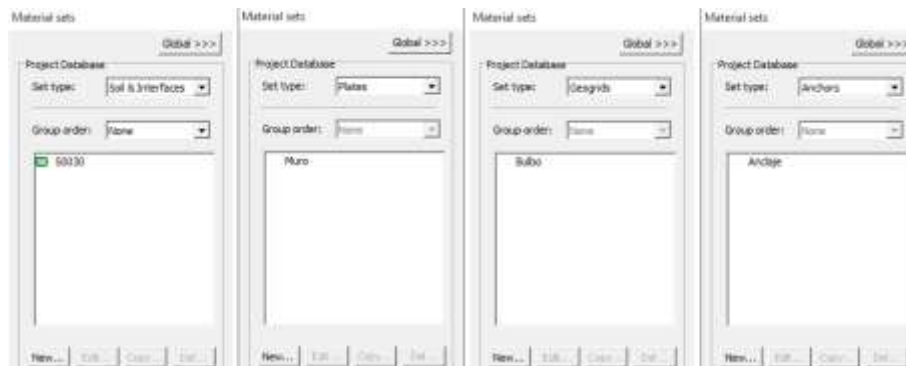


FIGURA 3.51 MATERIALES EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN

S0030, corresponde al material del suelo del proyecto. Se define igual que los materiales de Relleno y del suelo S1035 del muro gravedad 20, 10, 35 pero con cohesión y ángulo de fricción diferentes (Figura 3.52).

Material Set Identification: S0030 Material model: Mohr-Coulomb Material type: Drained	General properties γ_{unsat} : 19,000 kN/m ³ γ_{sat} : 21,000 kN/m ³
Stiffness E_{ref} : 7,000E+04 kN/m ² ν (nu): 0,300	Strength c_{ref} : 0,000 kN/m ² ϕ (phi): 30,000 ° ψ (psi): 0,000 °

FIGURA 3.52 PROPIEDADES DEL TERRENO

Muro, representa a la pantalla construida para retener las presiones ejercidas por el terreno. Los parámetros son la resistencia a la flexión (EI) y la rigidez axial (EA). A partir de estos dos parámetros Plaxis calcula el espesor equivalente de la placa. Se puede modificar su peso (w) y la relación de Poisson (ν) (Figura 3.53).

Material set Identification: Muro Material type: Elastic
Properties EA : 5,000E+06 kN,m EI : 9375,000 kNm ² ,m d : 0,150 m w : 15,000 kN,m,m ν : 0,150

FIGURA 3.53 PROPIEDADES DEL MURO

Bulbo, la única propiedad que se puede modificar al bulbo es su rigidez elástica axial (EA) (Figura 3.54).

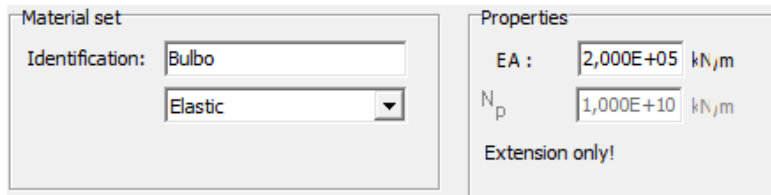


FIGURA 3.54 PROPIEDADES DEL BULBO

Anclaje, la propiedad de soporte importante es la rigidez axial (EA) aportada al anclaje en la unidad de fuerza y no por unidad de longitud fuera de la dirección del plano. El espacio fuera del plano ($L_{spacing}$) se introduce manualmente (*Figura 3.55*).

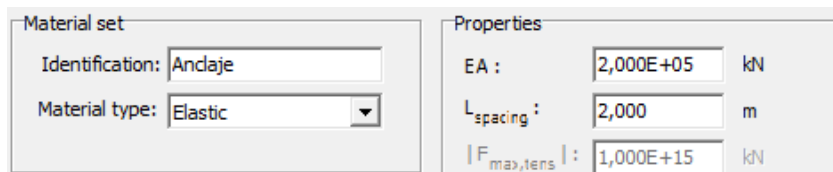


FIGURA 3.55 PROPIEDADES DE LOS ANCLAJES

3.1.5.1.2.4. Generación de la malla de Elementos Finitos

Finalizado los pasos anteriores se genera la malla de elementos finitos para realizar los cálculos de la modelación. Las zonas cercanas al muro pantalla se refinan para tener obtener resultados con mayor precisión.

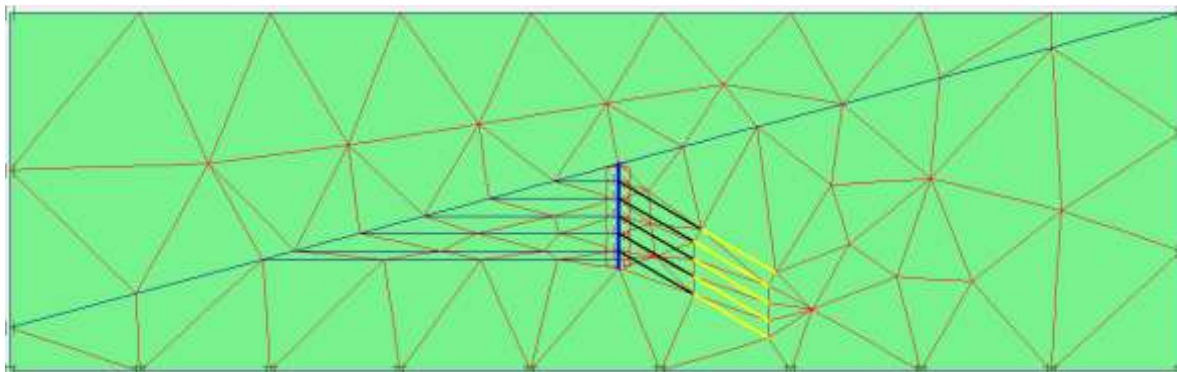


FIGURA 3.56 MALLA DE ELEMENTOS FINITOS DEL MURO PANTALLA

3.1.5.1.2.5. Condiciones Iniciales

Se generan las condiciones iniciales que corresponden a las presiones iniciales del agua y a los esfuerzos iniciales, Figura 3.57 y Figura 3.58 respectivamente.

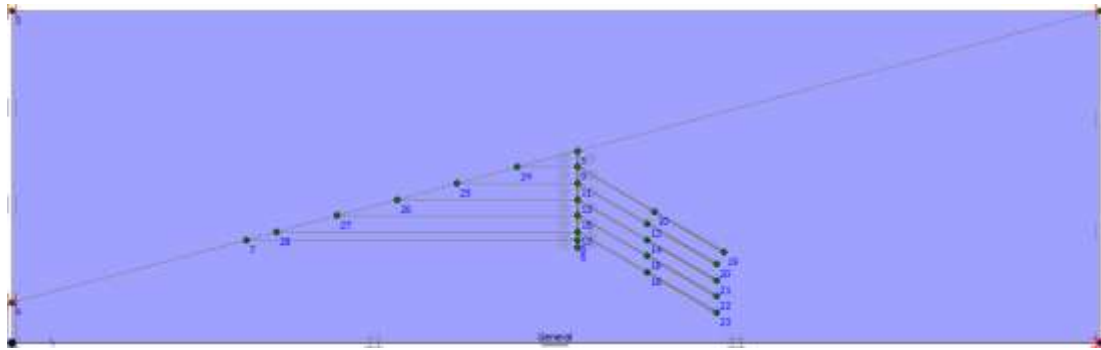


FIGURA 3.57 NIVEL FREÁTICO DEL PROYECTO

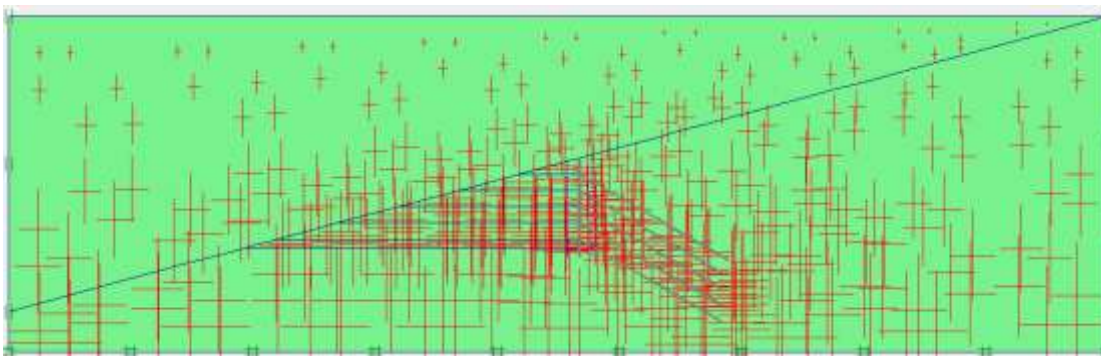


FIGURA 3.58 ESFUERZOS INICIALES DEL MODELO

3.1.5.1.2.6. Cálculos

Para modelos de Muro Pantalla, las fases que componen los cálculos del proyecto dependen del número de anclajes que posea el muro. La última fase corresponde a la simulación del sismo en el terreno construido, como se ilustra en la *Figura 3.59*.

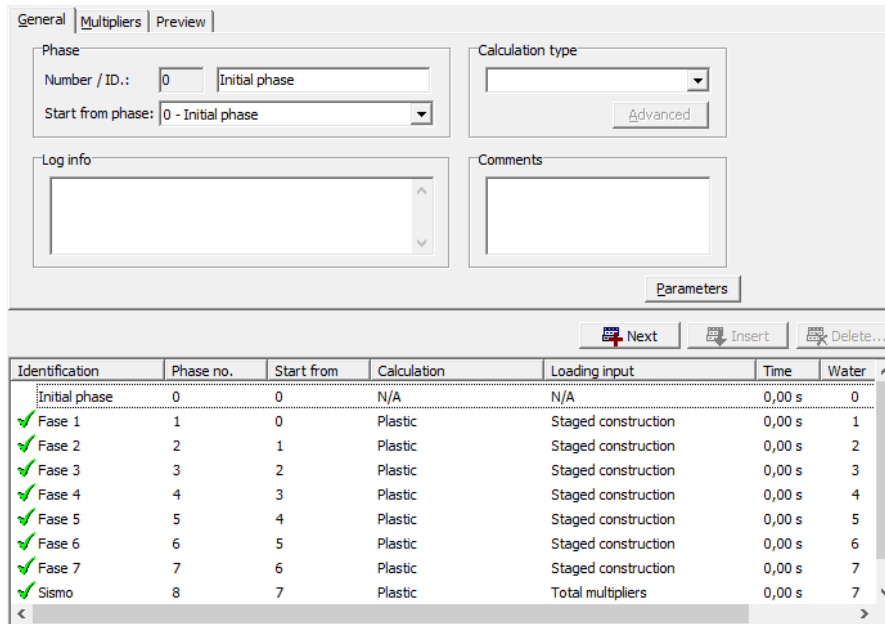


FIGURA 3.59 VENTANA DE CÁLCULOS Y SUS FASES CORRESPONDIENTES

El Muro Pantalla 15, 00, 30 cuenta con 7 fases constructivas, las cuales se ejecutan de la siguiente manera:

Fase 1: Condición inicial

Fase constructiva referente al estado inicial del terreno con su inclinación. Las propiedades de la fase están definidas en la *Tabla 3.10* y su geometría como se define en la *Figura 3.60*

TABLA 3.10 PROPIEDADES DE LA FASE I

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 1	1	0	Plástico	Construcción por etapas

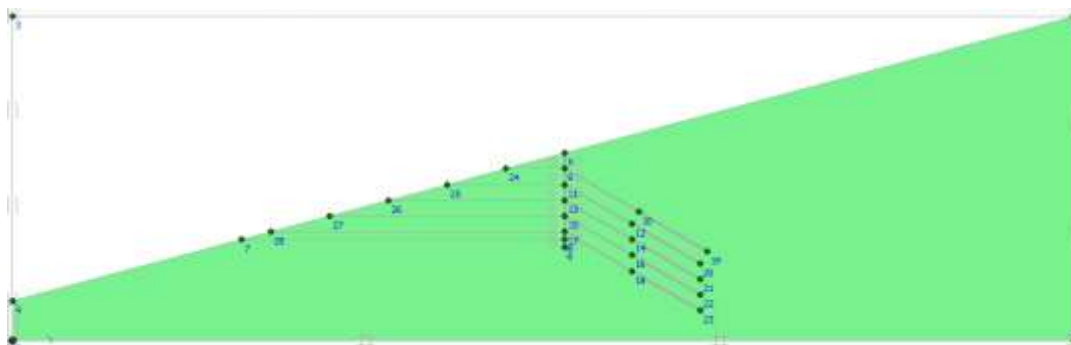


FIGURA 3.60 GEOMETRÍA DE LA FASE I

Fase 2: Excavación e instalación del primer anclaje

Etapa de excavación de la zona de construcción donde se ubicará el primer anclaje de la pantalla, se activa el muro pantalla junto a su interface, el bulbo y el anclaje. Las propiedades de la fase están definidas en la Tabla 3.11 y su geometría como se define en la Figura 3.61

TABLA 3.11 PROPIEDADES DE LA FASE II

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 2	2	1	Plástico	Construcción por etapas

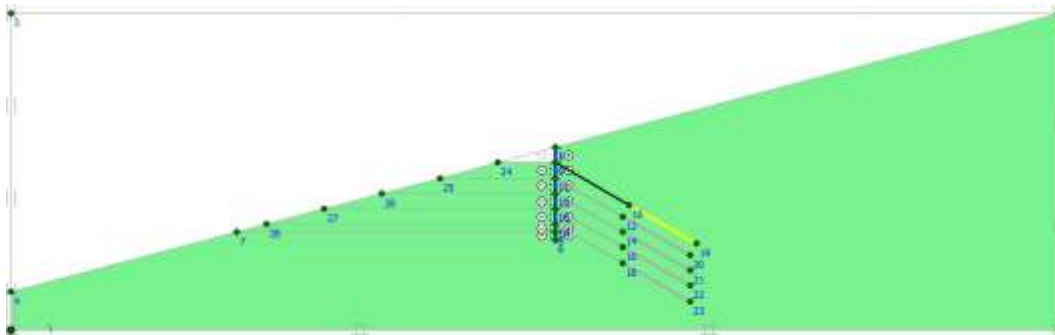


FIGURA 3.61 GEOMETRÍA DE LA FASE II

Fase 3: Excavación e instalación del segundo anclaje

Las propiedades de la fase 3 están definidas en la Tabla 3.12 y su geometría como se define en la Figura 3.62.

TABLA 3.12 PROPIEDADES DE LA FASE III

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 3	3	2	Plástico	Construcción por etapas

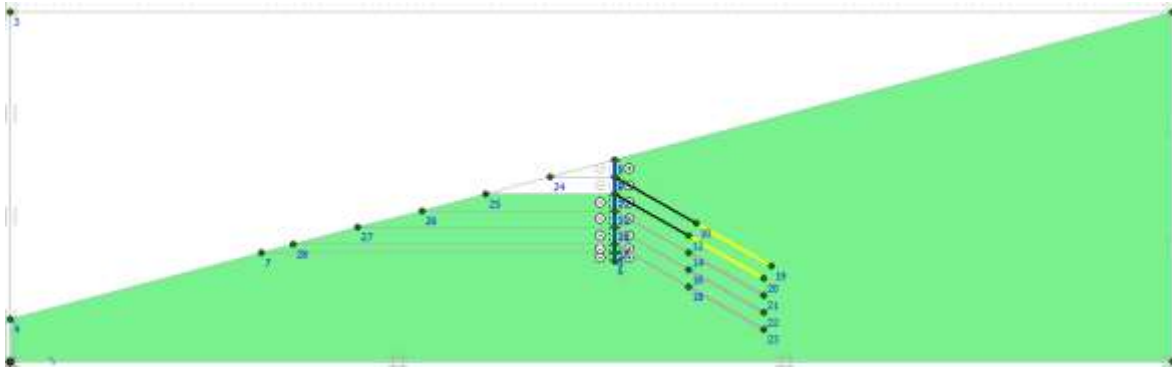


FIGURA 3.62 GEOMETRÍA DE LA FASE III

Fase 4: Excavación e instalación del tercer anclaje

Las propiedades de la fase 4 están definidas en la *Tabla 3.13* y su geometría como se define en la *Figura 3.63*.

TABLA 3.13 PROPIEDADES DE LA FASE IV

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 4	4	3	Plástico	Construcción por etapas

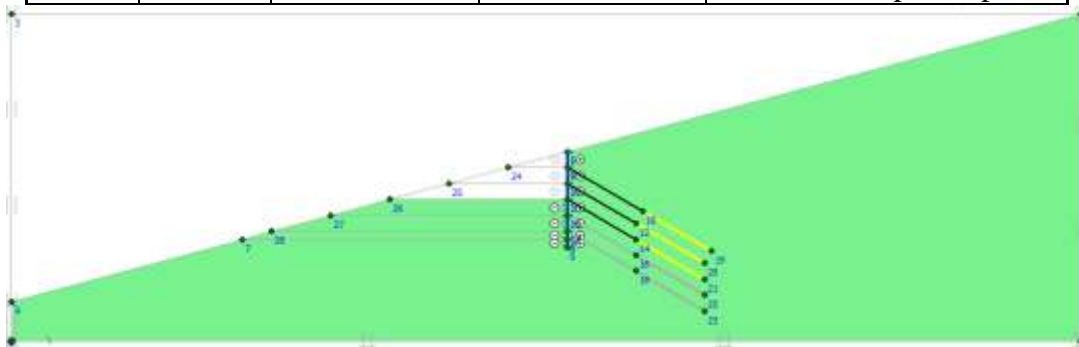


FIGURA 3.63 GEOMETRÍA DE LA FASE IV

Fase 5: Excavación e instalación del cuarto anclaje

Las propiedades de la fase 5 están definidas en la *Tabla 3.14* y su geometría como se define en la *Figura 3.64*.

TABLA 3.14 PROPIEDADES DE LA FASE V

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 5	5	4	Plástico	Construcción por etapas

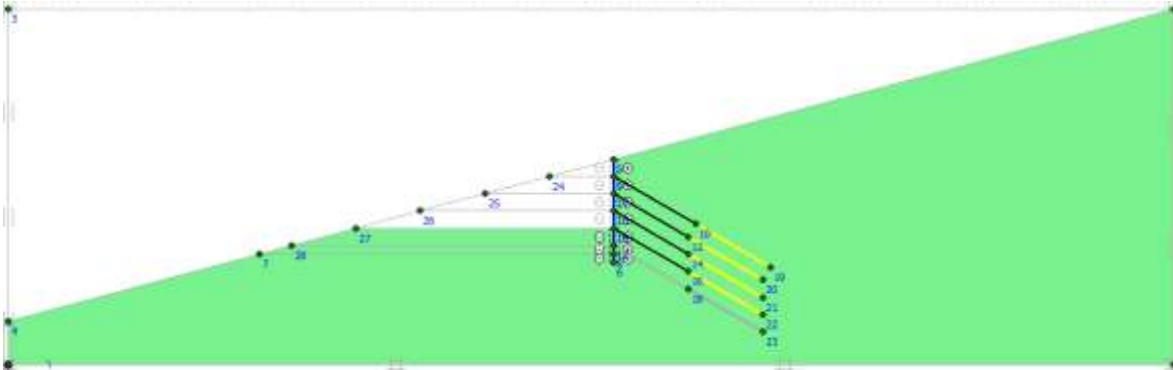


FIGURA 3.64 GEOMETRÍA DE LA FASE V

Fase 6: Excavación e instalación del quinto anclaje

Las propiedades de la fase 6 están definidas en la *Tabla 3.15* y su geometría como se define en la *Figura 3.65*.

TABLA 3.15 PROPIEDADES DE LA FASE VI

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 6	6	5	Plástico	Construcción por etapas

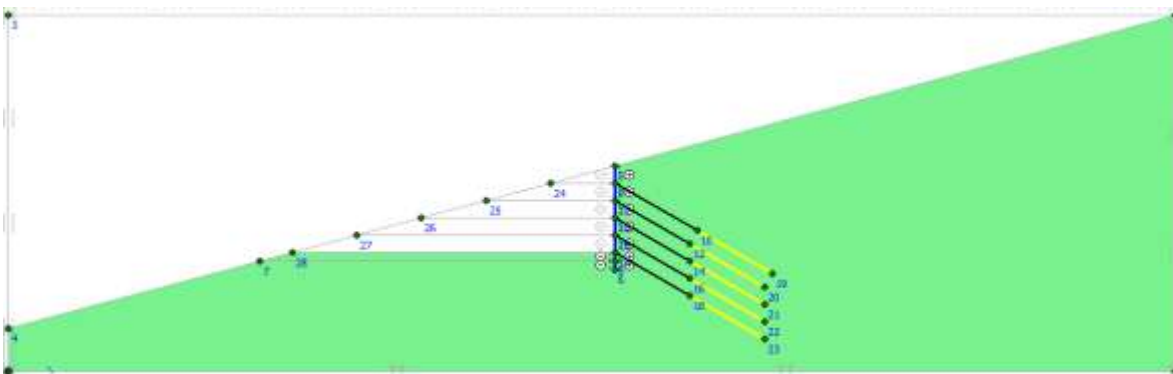


FIGURA 3.65 GEOMETRÍA DE LA FASE VI

Fase 7: Etapa final

El construcción del muro pantalla ha finalizado. Las propiedades de la fase 7 están definidas en la *Tabla 3.16* y su geometría como se define en la *Figura 3.66*.

TABLA 3.16 PROPIEDADES DE LA FASE VII

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 7	7	6	Plástico	Construcción por etapas

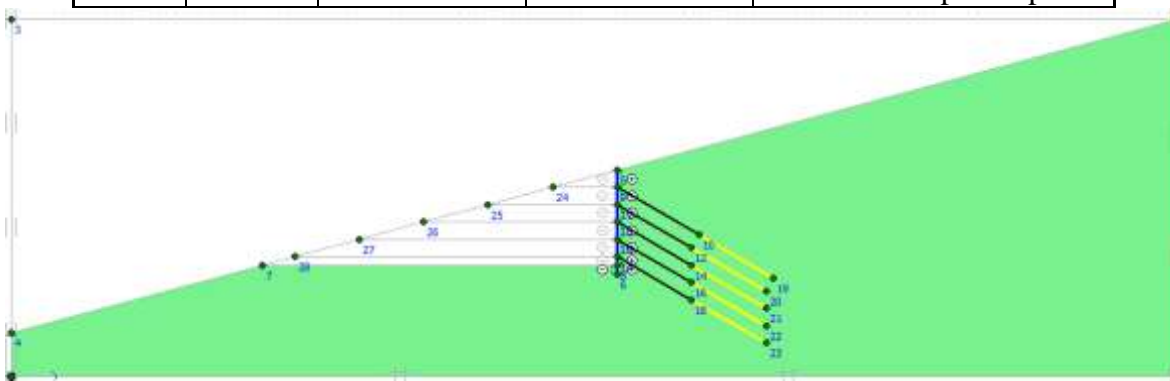


FIGURA 3.66 GEOMETRÍA DE LA FASE VII

Se agrega una fase adicional para evaluar el efecto del sismo en la estructura. El sismo se evalúa respecto a la fase 7 o etapa final del muro pantalla.

Fase 8: Sismo

Las propiedades de la fase de Sismo están definidas en la *Tabla 3.17*.

TABLA 3.17 PROPIEDADES DE LA FASE VIII

Etapa	Paso N°	Paso Anterior	Tipo de Cálculo	Asignación de cargas
Fase 8	8	7	Plástico	Multiplicador total

3.1.5.2. Equilibrio límite por medio de Slide

Slide V6.0 es un software bidimensional diseñado para el análisis de la estabilidad de taludes y evalúa por diferentes métodos la estabilidad general del sistema para de esta forma poder resolver problemas geotécnicos. Esta herramienta computacional grafica las dimensiones de cualquier situación geotécnica; es capaz de definir las condiciones iniciales del terreno, determinar planos de falla y determinar factores de seguridad.

A continuación se presentan las consideraciones iniciales para el modelo del muro de gravedad 20, 10, 35 (Figura 3.67), esta nomenclatura corresponde al ángulo de buzamiento (β), cohesión del suelo (c') y ángulo de fricción del suelo (ϕ) respectivamente.

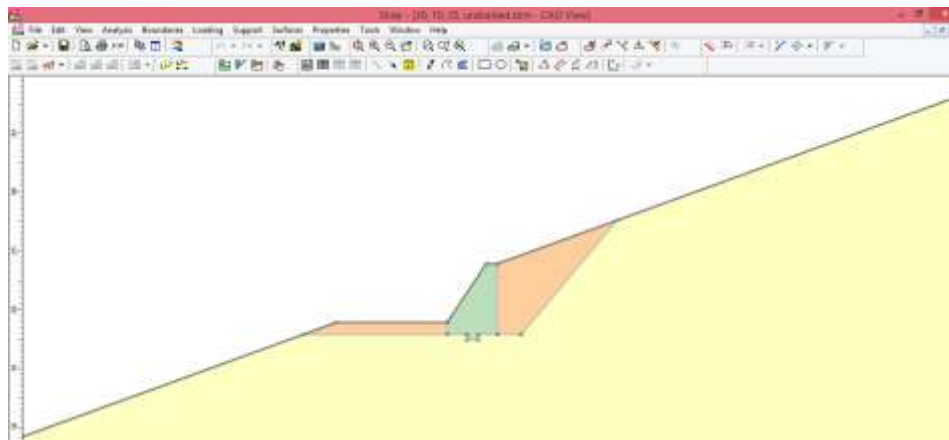


FIGURA 3.67 MURO DE GRAVEDAD 20, 10, 35

3.1.5.2.1. Preparación del modelo

Inicialmente se escoge el método de análisis de estabilidad general con el que se desea desarrollar el modelo. Para este documento se escogió el método GLE/Morgenstern-Price como se muestra en la Figura 3.68. Este método es uno de los más utilizados en la práctica (Chris R.I. Clayton 2013).

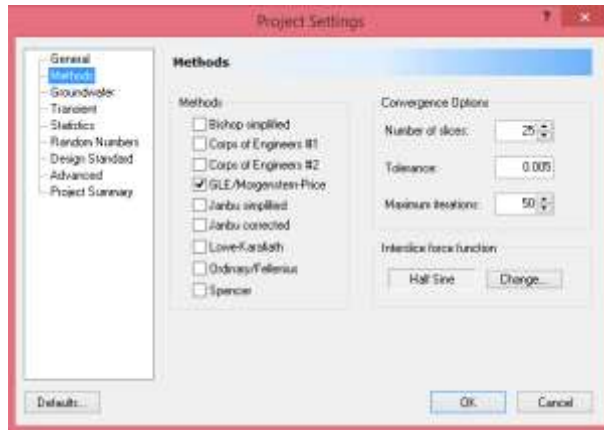


FIGURA 3.68 AJUSTES DE PROYECTO PARA SLIDE V6.0

Adicionalmente, para definir las superficies de falla, se escoge la opción Auto Refine Search como se muestra en la *Figura 3.69*, de esta forma se evalúan planos de falla sobre todo el modelo.



FIGURA 3.69 SUPERFICIES DE FALLA

3.1.5.2.2. Condiciones iniciales para la modelación de Muro de gravedad, gaviones y cantiléver.

A continuación se presentan las condiciones iniciales para la modelación del muro de gravedad, gaviones y cantiléver. Para estos muros las condiciones iniciales son

estrechamente similares y se pueden enunciar como un conjunto. Seguido a esto, se presentaran las condiciones para la modelación del muro pantalla en el numeral 3.1.5.2.3.

3.1.5.2.2.1. Materiales

En la *Figura 3.70* se presentan las características del suelo de este modelo.

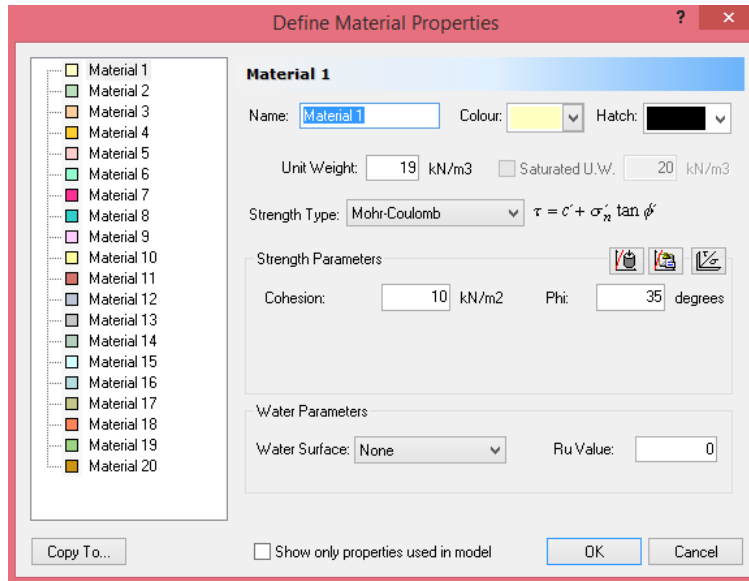


FIGURA 3.70 SUELO

Para la definir las condiciones del concreto, se consideran tres opciones para analizar su comportamiento en los resultados de los modelos, las tres opciones son:

- Con resistencia infinita como se muestra en la *Figura 3.71*
- Material no drenado con cohesión de 10500 kN/m2 como se muestra en la *Figura 3.72* (para el muro de gaviones, el material no drenado tiene cohesión de 1716 kN/m2 (Almeida 2013)) (este valor está dado por la resistencia a la compresión del concreto de 21 MPa dividida por la mitad)
- y por medio de esfuerzos los cuales serán puntualizados más adelante en el documento.

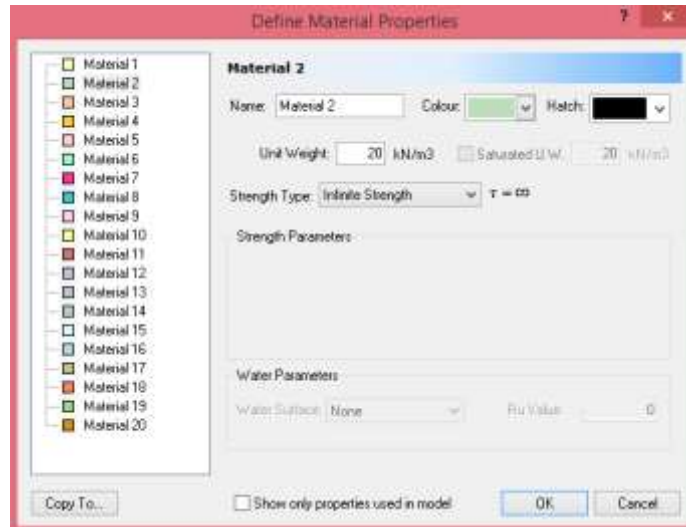


FIGURA 3.71 CONCRETO CON RESISTENCIA INFINITA

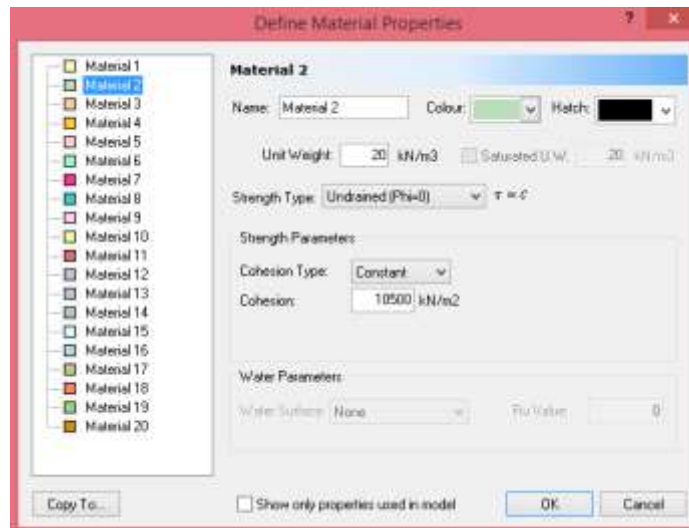


FIGURA 3.72 CONCRETO CON COHESIÓN DE 10500 kN/M2

El relleno que se definió para todos los modelos considera un ángulo de fricción de la forma $\frac{2}{3} \phi$ y no cohesivo como se muestra en la *Figura 3.73*. Pero por consideraciones de análisis, para dos modelos de cada tipología de muro, se le da una cohesión de $\frac{2}{3}c'$ como se muestra en la *Figura 3.74*.

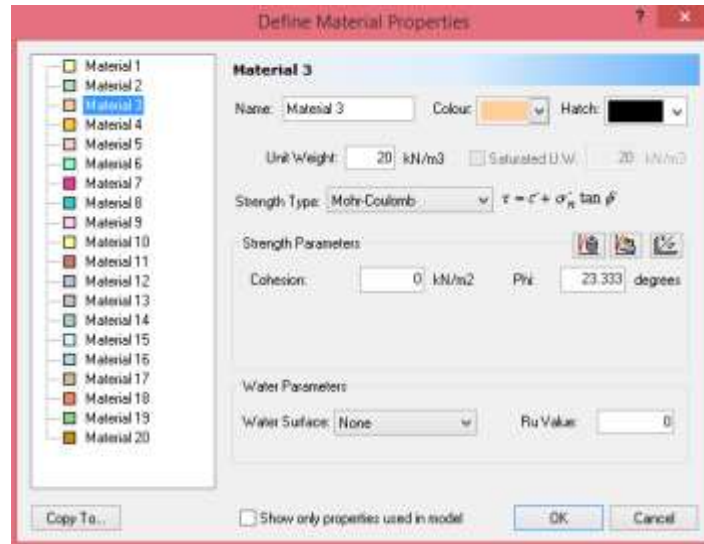


FIGURA 3.73 RELLENO

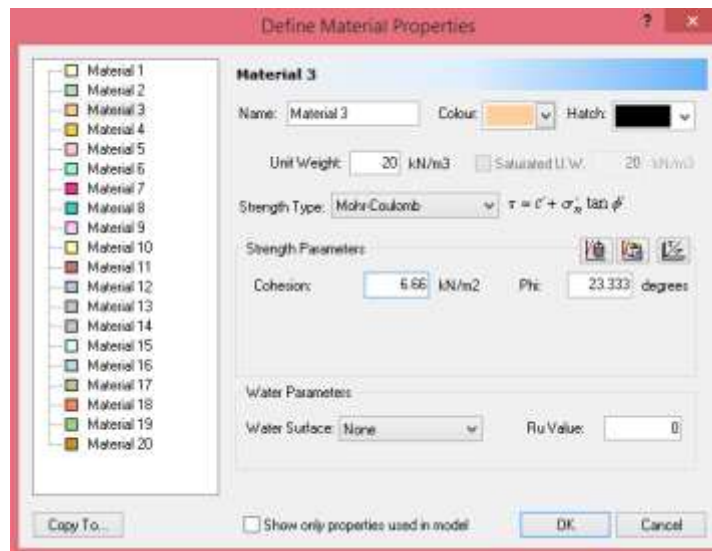


FIGURA 3.74 RELLENO COHESIVO

3.1.5.2.2.2. Etapas de construcción

Para cada diseño, de cada tipología de muro, se evalúa la estabilidad general del sistema, por lo tanto se definen las geometrías de cada fase con los materiales correspondientes.

Fase 1: Condición inicial

Para crear el modelo se debe agregar un external boundary que determine los límites en la geometría del modelo. La modelación de la fase 1 es como se define en la *Figura 3.75* y sus coordenadas se precisan en la *Figura 3.76*.

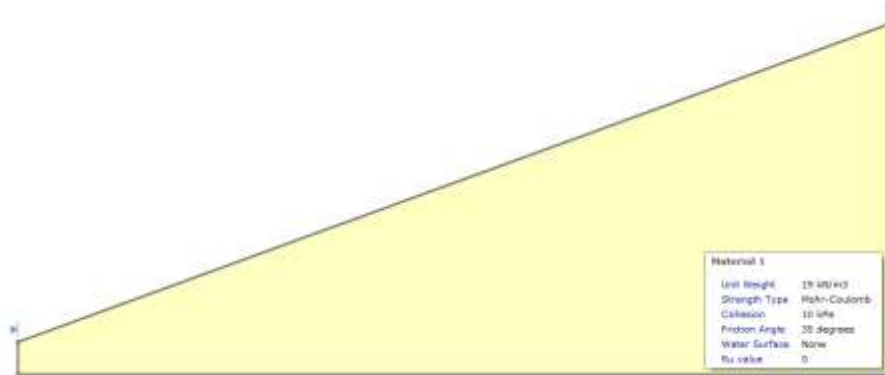


FIGURA 3.75 GEOMETRÍA FASE I

Point	X	Y
1	135.054	54.1555
2	0	5
3	0	0
4	135.054	0
5		
6		
7		
8		
9		

FIGURA 3.76 COORDENADAS FASE I

Fase 2: Proceso de excavación

Para el proceso de excavación se plantea la geometría de la *Figura 3.77* con sus respectivas coordenadas (*Figura 3.78*). En esta etapa de la modelación se procura escoger un ángulo de excavación que cumpla con el factor de seguridad para la estabilidad general del sistema. Los ángulos y factores de seguridad para los muros de gravedad, gaviones y cantiléver están enunciados en la *Tabla 3.18*, *Tabla 3.19* y *Tabla 3.20* respectivamente. Algunas combinaciones fueron descartadas ya que el ángulo de excavación era muy pequeño y no era viable su construcción.

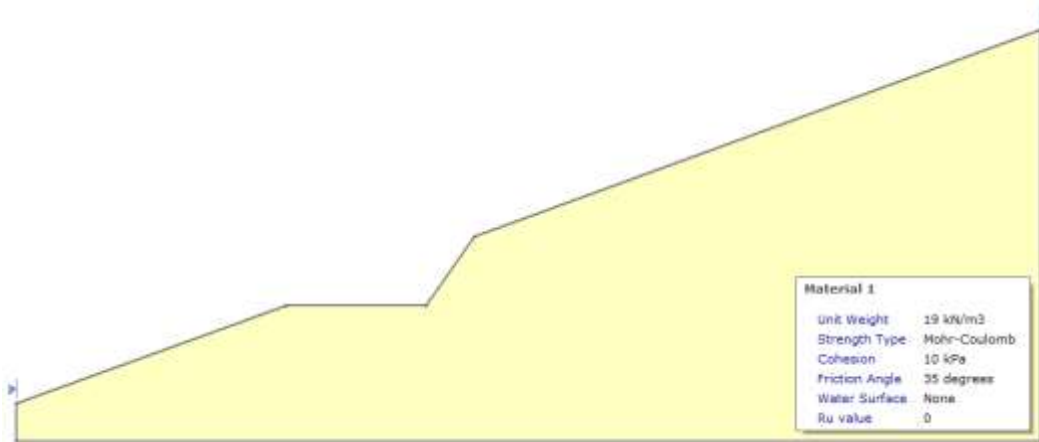


FIGURA 3.77 GEOMETRÍA DE LA FASE II

Point	X	Y
1	135.054	0
2	135.054	54.1555
3	60.2844	26.9477
4	58.9622	17.9127
5	35.4773	17.9127
6	0	5
7	0	0
8		
9		

FIGURA 3.78 COORDENADAS DE LA FASE II

TABLA 3.18 ÁNGULOS DE EXCAVACIÓN MUROS DE GRAVEDAD

Muro de gravedad				
B	C	phi	Angulo	FS
15	0	30	24	1,297
15	0	35	25	1,502
15	10	30	45	1,271
15	10	35	55	1,325
15	20	30	70	1,49
15	20	35	80	1,596
15	30	30	90	1,348
15	30	35	90	1,501
20	0	35	25	1,502
20	10	35	50	1,26
20	20	35	75	1,31
20	30	35	90	1,33

TABLA 3.19 ÁNGULOS DE EXCAVACIÓN MUROS GAVIONES

Muro gaviones				
B	C	phi	Angulo	FS
15	0	30	-	-
15	0	35	25	1,502
15	10	30	55	1,298
15	10	35	55	1,354
15	20	30	80	1,47
15	20	35	80	1,571
15	30	30	90	1,576
15	30	35	90	1,867
20	0	35	25	1,502
20	10	35	60	1,273
20	20	35	90	1,424
20	30	35	90	1,942

TABLA 3.20 ÁNGULOS DE EXCAVACIÓN MUROS CANTILÉVER

Muro cantiléver				
B	C	phi	Angulo	FS
15	0	30	-	-
15	0	35	-	-
15	10	30	35	1,262
15	10	35	40	1,276
15	20	30	45	1,323
15	20	35	55	1,278
15	30	30	60	1,31
15	30	35	70	1,342
20	0	35	-	-
20	10	35	-	-
20	20	35	50	1,267
20	30	35	65	1,264

Fase 3: Proceso de construcción del muro

Para el proceso de excavación, en el cual se incluye el muro de gravedad, se debe tener asignar un material boundary el cual delimita el suelo con el muro, se plantea la geometría de la *Figura 3.79* con sus respectivas coordenadas (*Figura 3.80*), definidas. Adicionalmente se incluyen las coordenadas del dentellón que fue diseñado para cumplir con el factor de seguridad de desplazamiento de este muro en específico (*Figura 3.81*).

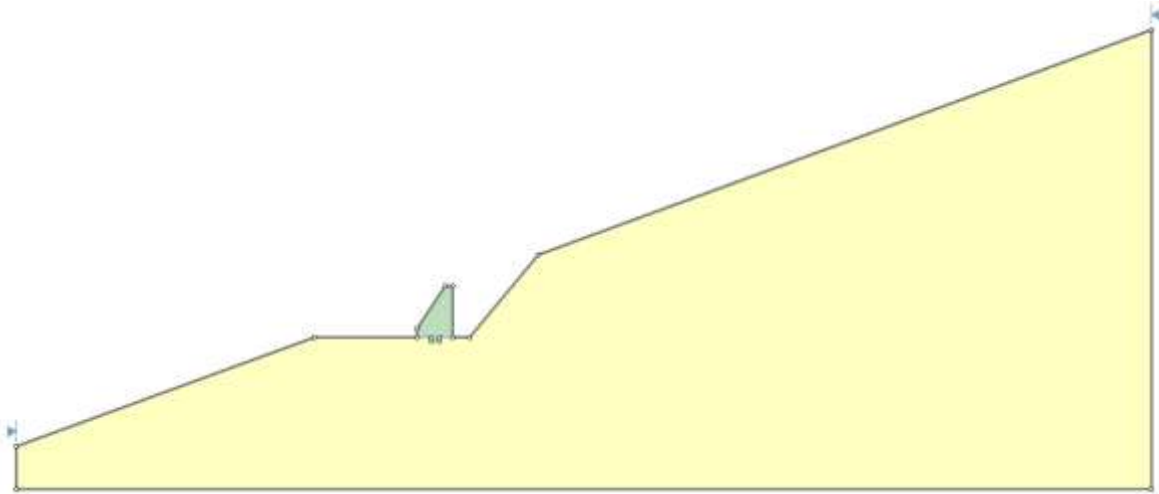


FIGURA 3.79 GEOMETRÍA DE LA FASE III

La imagen muestra una ventana de software titulada "Edit Boundary Coordinates". Dentro de la ventana hay una tabla con 12 filas y 3 columnas: "Point", "X" y "Y". Los datos de la tabla son los siguientes:

Point	X	Y
1	135.054	54.1555
2	62.0899	27.5989
3	53.9622	17.9127
4	51.9622	17.9127
5	51.9622	23.9127
6	50.9622	23.9127
7	47.6622	18.9127
8	47.6622	17.9127
9	35.4773	17.9127
10	0	5
11	0	0
12	135.054	0

Debajo de la tabla hay botones para "Import...", "Export...", "OK" y "Cancel".

FIGURA 3.80 COORDENADAS DE LA FASE III

Point	X	Y
1	47.6622	17.9127
2	48.3122	17.9127
3	48.3122	17.4127
4	50.3122	17.4127
5	50.3122	17.9127
6	51.9622	17.9127
7		
8		
9		

FIGURA 3.81 COORDENADAS DEL DENTELLÓN COMO MATERIAL BOUNDARY DEL MURO

Fase 4: Etapa final

Para la etapa final se ubican los rellenos como se indica en la *Figura 3.82*, delimitados por un material boundary, y sus correspondientes coordenadas en la *Figura 3.83*.

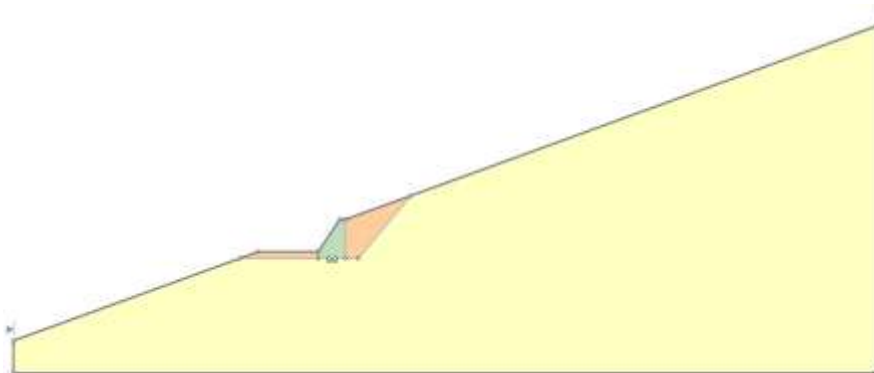


FIGURA 3.82 GEOMETRÍA DE LA FASE IV

Point	X	Y
1	33.054	54.1225
2	42.0899	27.5688
3	51.9677	73.9127
4	50.8022	23.9127
5	47.6622	18.9127
6	44.2448	18.9127
7	35.4773	17.9127
8	0	0
9	0	0
10	33.054	0

FIGURA 3.83 COORDENADAS DE LA FASE IV

Adicionalmente y como parte de los análisis que se desea realizar en este documento, se prepara la geometría del modelo para que se le asignen los esfuerzos correspondientes a la interacción suelo-estructura (*Figura 3.84*). Los vértices creados para asignar las cargas distribuidas se pueden observar en la *Figura 3.85* y sus correspondientes coordenadas en la *Figura 3.86*. La ubicación de estos vértices depende del numeral 4.2.1.1.1 en el que se obtienen las magnitudes y ubicaciones de estos esfuerzos por medio de Plaxis.

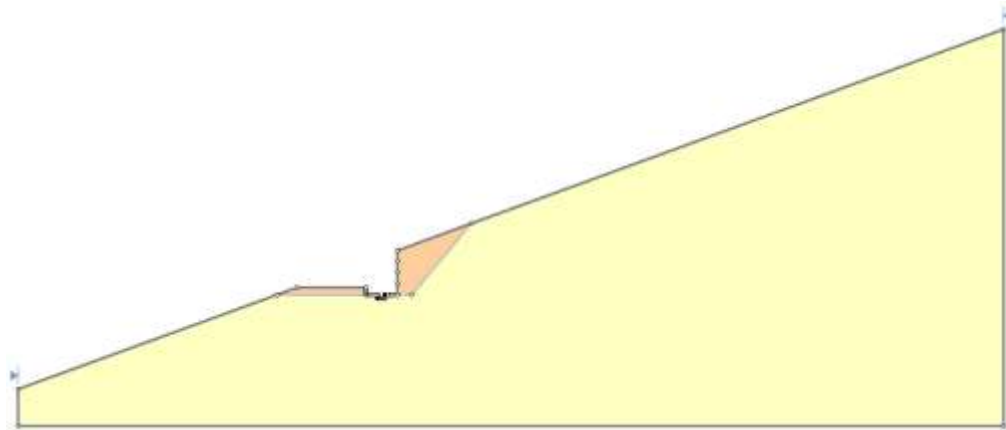


FIGURA 3.84 GEOMETRÍA DE LA FASE IV CON ESFUERZOS

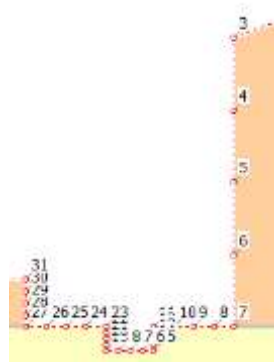


FIGURA 3.85 UBICACIÓN VÉRTICES PARA SITUAR LAS FUERZAS DISTRIBUIDAS

Point	X	Y
4	51.9622	22.4127
5	51.9622	20.9127
6	51.9622	19.4127
7	51.9622	17.9127
8	51.5497	17.9127
9	51.1372	17.9127
10	50.7247	17.9127
11	50.3122	17.9127
12	50.3122	17.7877
13	50.3122	17.6627
14	50.3122	17.5377
15	50.3122	17.4127
16	50.0622	17.4127
17	49.8122	17.4127
18	49.5622	17.4127
19	49.3122	17.4127
20	49.3122	17.5377
21	49.3122	17.6627
22	49.3122	17.7877
23	49.3122	17.9127
24	48.8997	17.9127
25	48.4872	17.9127
26	48.0747	17.9127
27	47.6622	17.9127
28	47.6622	18.1627
29	47.6622	18.4127
30	47.6622	18.6627
31	47.6622	18.9127

FIGURA 3.86 COORDENADAS VÉRTICES

Las cargas distribuidas se asignan a los vértices como se indica en la Figura 3.87 por medio de la opción add distributed load, las magnitudes y ubicación de estas cargas están dispuestas por los resultados obtenidos en el numeral 4.2.1.1.

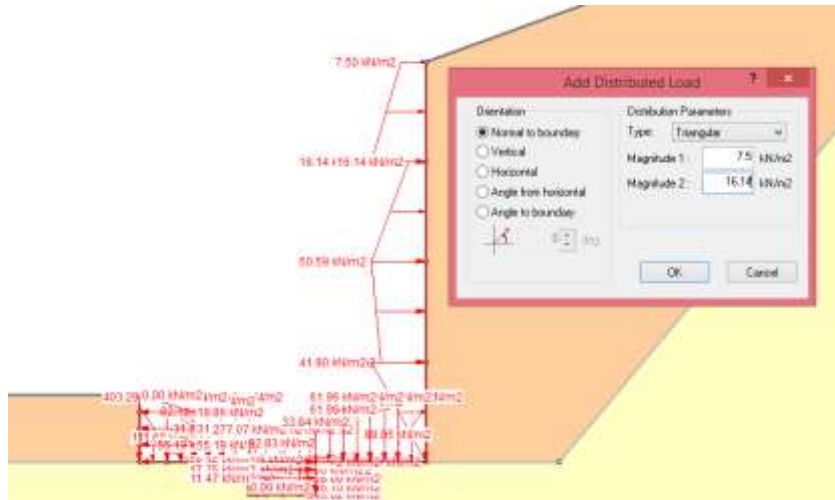


FIGURA 3.87 APLICACIÓN DE CARGAS DISTRIBUIDAS

Fase 5: Sismo

Se toman los tres modelos de la fase 4 y se les asigna una carga sísmica con coeficiente de aceleración horizontal (K_h) = 0.15 y coeficiente de aceleración vertical (v) = 0.05 como está descrito en el numeral 3.1.3 de este documento.

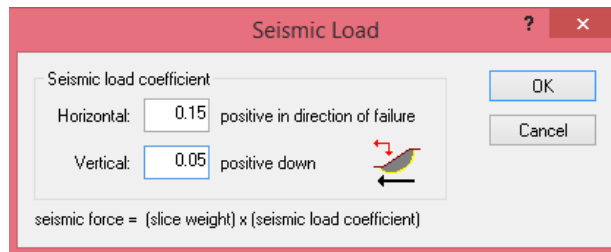


FIGURA 3.88 DEFINICIÓN CARGA SÍSMICA

Para la modelación con esfuerzos, se extraen los esfuerzos obtenidos por medio de Plaxis para la condición de sismo y de esta forma aplicar esta carga distribuida de la misma forma que se ve enunciada en la Figura 3.88 en la ventana Seismic load.

3.1.5.2.3. Condiciones iniciales para la modelación del Muro pantalla

El dimensionamiento de los muros pantalla está especificado en el numeral 3.1.3.4 y es tenido en cuenta para la geometría de los modelos.

La modelación de los muros pantalla en Slide se hace en una sola fase en la que se considera el muro ya construido. A continuación se presentan las especificaciones para desarrollar el modelo del Muro Pantalla 15, 0, 30 (su nomenclatura depende del ángulo de buzamiento (β), cohesión (c') y ángulo de fricción del suelo (ϕ) respectivamente).

Inicialmente se crea el modelo sin anclajes de la forma en que se presenta en la *Figura 3.89*, con sus respectivas coordenadas *Figura 3.90* y se incluye el muro dentro del material boundary especificado por las coordenadas indicadas por la *Figura 3.91*.

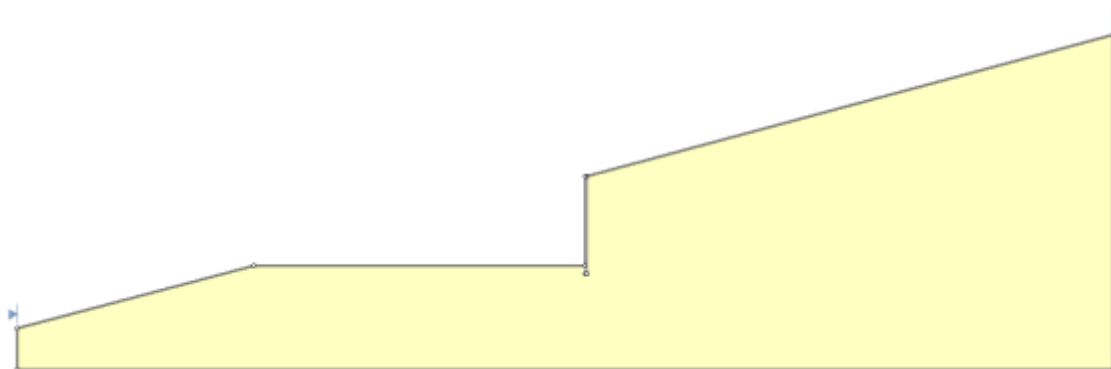
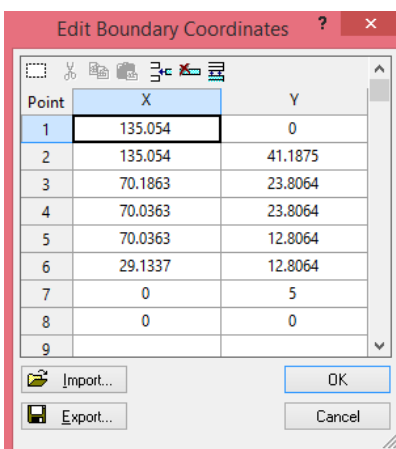


FIGURA 3.89 MURO PANTALLA SIN ANCLAJES



Point	X	Y
1	135.054	0
2	135.054	41.1875
3	70.1863	23.8064
4	70.0363	23.8064
5	70.0363	12.8064
6	29.1337	12.8064
7	0	5
8	0	0
9		

FIGURA 3.90 COORDENADAS DE EXTERNAL BOUNDARY EN MURO PANTALLA

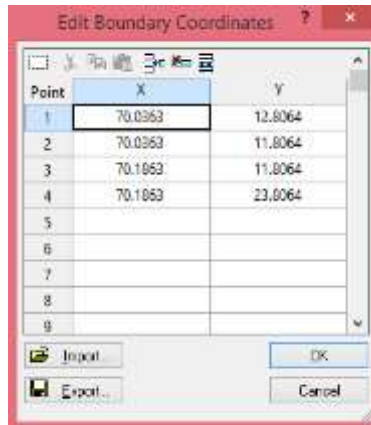


FIGURA 3.91 COORDENADAS DE MATERIAL BOUNDARY EN MURO PANTALLA

Esta modelación se realiza sin anclajes para poder evaluar en los resultados los planos de falla y de esta forma adicionar los anclajes procurando que el bulbo este por fuera del plano de falla más crítico. A continuación se presentan los pasos para el diseño de los anclajes.

Para adicionar anclajes o soportes como están descritos en Slide, se debe oprimir el comando add support. De esta forma se determina el ángulo de los anclajes con respecto al terreno, la longitud del anclaje y el espaciamiento entre anclajes de forma vertical como se observa en la *Figura 3.93*. Seguido a esto, se deben definir el tipo de soporte y las propiedades del anclaje (*Figura 3.94*):

- Support type: Se escogió grouted tieback.
- Out of plane spacing: Esta propiedad se va variando para cumplir con los factores de seguridad, determina el espaciamiento de los anclajes fuera del plano.
- Tensile capacity: Esta es la capacidad de carga que tiene el anclaje y se escogió una carga de 20 toneladas para todos los anclajes y de esta forma unificar las propiedades para los demás modelos
- Plate capacity: Para esta propiedad se determinó una carga igual a la Tensile capacity porque determina la capacidad que tiene el muro para resistir las tensiones causadas por el tendón.
- Bond length: Esta propiedad determina la longitud del bulbo del anclaje y para este proyecto se escogió una distancia de 10 metros para todos los anclajes.

- Bond strength: Esta propiedad se ajustó de acuerdo a los parámetros escogidos para tensile capacity y bond length, se escogió 2 ton/m para que en el desarrollo de los 10 metros se cumpliera con las 20 toneladas establecidas anteriormente.

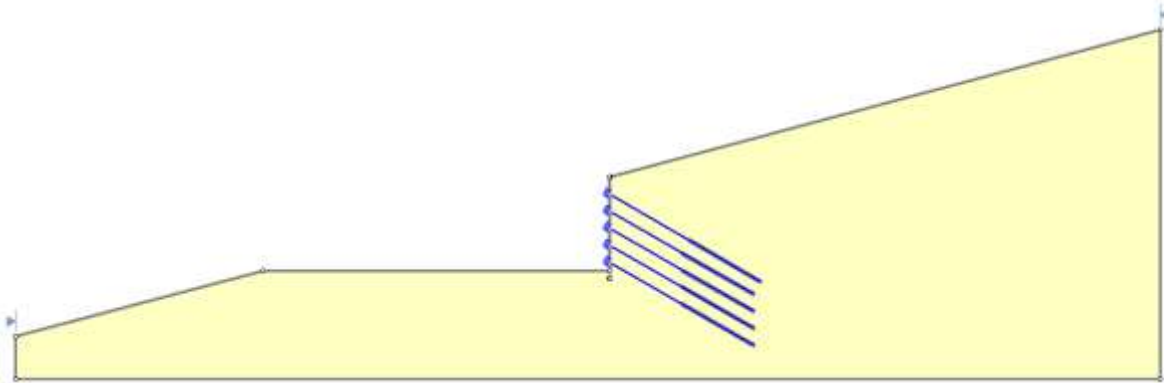


FIGURA 3.92 MURO PANTALLA

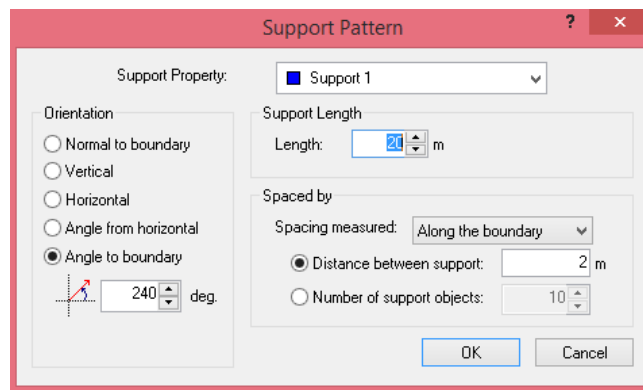


FIGURA 3.93 COMANDO ADD SUPPORT

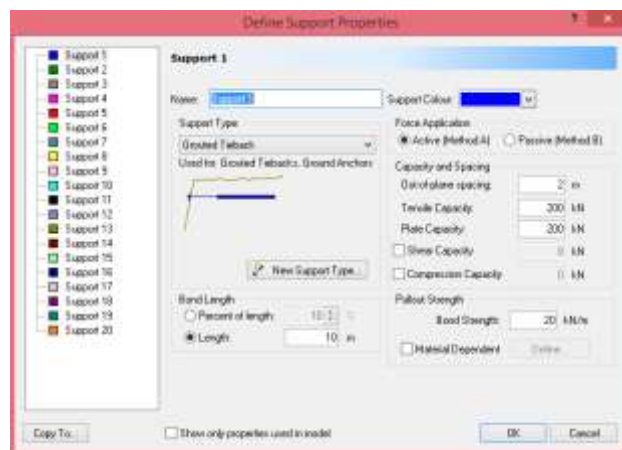


FIGURA 3.94 PROPIEDADES DEL SOPORTE

3.1.5.3. Simulación estructural con elementos finitos por medio de Sap2000

Sap2000 es un software para el análisis y diseño de estructuras de todo tipo. A partir de este programa se puede modelar teóricamente el muro pantalla y cantiléver para poder desarrollar su diseño a flexión.

A continuación se presenta el proceso que se realizó para el diseño estructural del Muro cantiléver 15, 20, 35.

En la *Figura 3.95* se presenta el modelo para este muro y adicionalmente se encuentran las cargas distribuidas obtenidas del numeral 4.2.1.2.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** para condición pseudo-estática. Este modelo se realiza para obtener el momento máximo y de esta forma diseñar estructuralmente el muro.

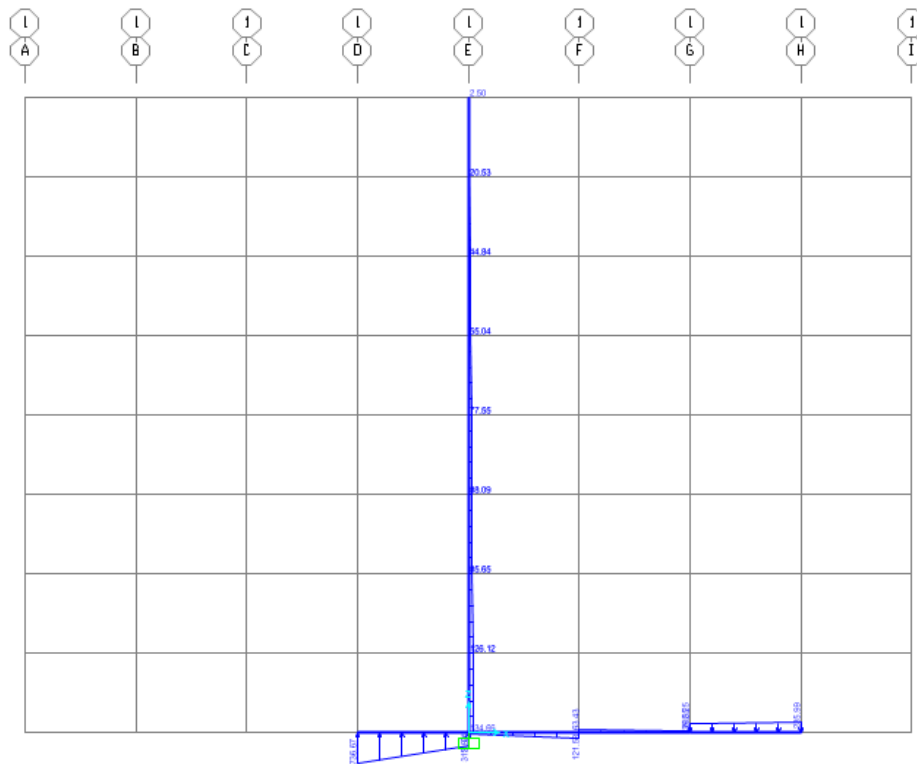


FIGURA 3.95 APLICACIÓN CARGAS DISTRIBUIDAS SOBRE EL MURO

Adicionalmente, se elabora el modelo con las cargas obtenidas por el método de Mononobe-Okabe (*Figura 3.96*) para obtener momentos máximos y diseñar a flexión. Esto con el fin de comparar ambos diseños y realizar el análisis pertinente.

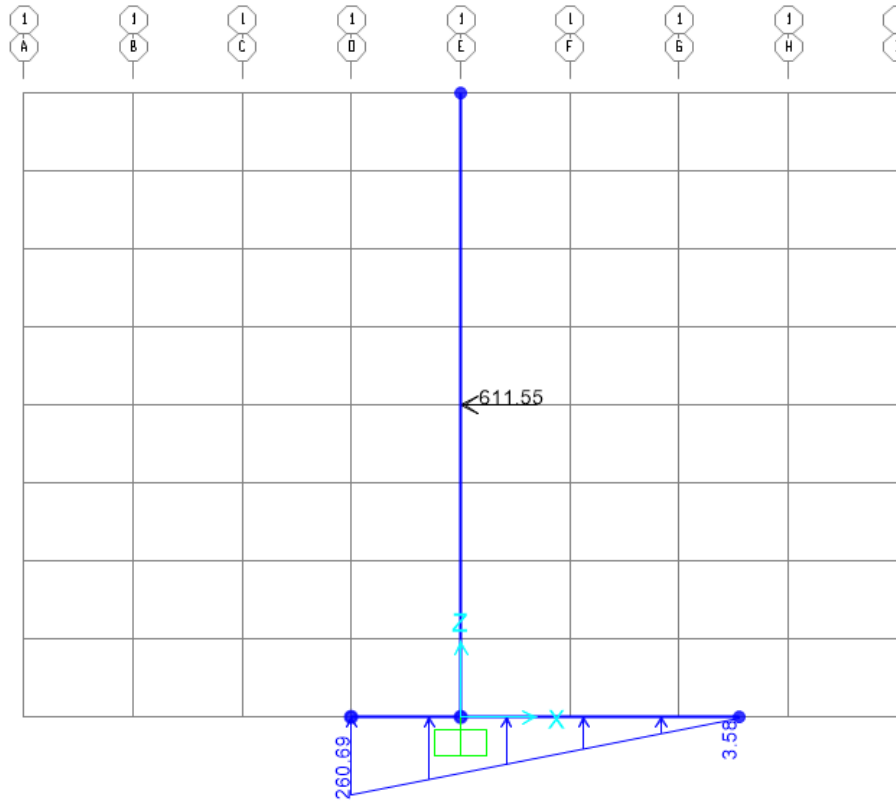


FIGURA 3.96 APLICACIÓN CARGA OBTENIDA POR EL MÉTODO DE MONONOBE-OKABE

El diseño a flexión se realiza por medio de los siguientes parámetros:

(21)

$$m = \frac{f_y}{0.85 * f'_c}$$

Donde f_y es el límite de fluencia del acero (420 MPa) y f'_c es la resistencia del concreto (21 MPa).

- R_n relaciona el momento último actuante con las dimensiones de la sección y es utilizado más adelante para el cálculo de la cuantía del refuerzo:

(22)

$$Rn = \frac{Mu}{b * d^2}$$

Donde Mu es el momento último actuante.

- Cuantía del refuerzo, se debe procurar que la cuantía este entre 0.0033 y 0.016:

(23)

$$\rho = \frac{1}{m} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 * m * Rn}{\phi * fy}} \right]$$

- Área del acero de refuerzo obtenida a partir de la cuantía y las dimensiones de la sección:

(24)

$$As = \rho * b * d$$

Donde d es la distancia efectiva entre fibra extrema a compresión hasta el eje de las barras que están a tensión, en este documento está definido de la forma $d = h - d'$, donde h es la altura de la sección y d' es el recubrimiento (0.07m).

- Distancia del bloque de Whitney:

(25)

$$a = \rho * d * m$$

- Momento nominal, debe ser superior al momento último actuante para q cumpla el refuerzo establecido:

(26)

$$\phi Mn = \phi * As * fy \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Donde ϕ es el factor de reducción de resistencia

4. Resultados y análisis

4.1. Dimensionamiento y factores de seguridad

4.1.1. Muro de gravedad

El muro de gravedad fue dimensionado como se muestra en la *Tabla 4.21*, variando las dimensiones a y D como se especifica en la *Figura 3.7*. Adicionalmente se enuncian los valores de los factores obtenidos para dichos dimensionamientos en condición estática y pseudo-estática para las diferentes combinaciones de suelo.

TABLA 4.21 DIMENSIONAMIENTO MURO GRAVEDAD

		B=15								B=20				
		c=0 kPa		c=10 kPa		c=20 kPa		c=30 kPa		c=0 kPa	c=10 kPa	c=20 kPa	c=30 kPa	
		phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	
MURO GRAVEDAD	Dimensiones	a (m)	3,50	3,10	3,50	3,20	3,50	3,20	3,50	3,10	3,30	3,30	3,30	3,30
		D (m)	0,50	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00
	F.S Estático	Vol	5,70	6,14	5,70	6,41	5,70	6,41	5,70	6,14	6,20	6,20	6,20	6,20
		Des	2,95	6,59	3,20	2,33	3,45	2,63	3,71	2,87	10,29	10,57	2,47	2,75
		C.P.	8,92	18,25	14,73	28,25	20,85	38,42	27,24	48,53	17,55	27,26	37,35	47,76
	F.S Seudo-estático	Vol	1,96	2,00	1,96	2,08	1,96	2,07	1,96	2,00	2,01	2,01	2,01	2,01
		Des	1,26	2,50	3,70	1,05	1,48	1,17	1,59	1,27	3,75	3,86	1,09	1,20
		C.P.	6,05	14,53	9,44	23,54	13,10	31,18	17,01	35,21	15,75	22,51	29,74	37,42

4.1.2. Muro cantiléver

El muro de cantiléver fue dimensionado como se muestra en la *Tabla 4.22*, variando las dimensiones d y D como se especifica en la *Figura 3.9*. Adicionalmente se enuncian los valores de los factores obtenidos para dichos dimensionamientos en condición estática y pseudo-estática para las diferentes combinaciones de suelo. Las combinaciones para las que no se presentó un dimensionamiento, fueron descartadas debido a que los modelos no eran viables en su proceso constructivo.

TABLA 4.22 DIMENSIONAMIENTO MURO CANTILÉVER

			B=15								B=20			
			c=0 kPa		c=10 kPa		c=20 kPa		c=30 kPa		c=0 kPa	c=10 kPa	c=20 kPa	c=30 kPa
			phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35
MURO CANTILEVER	Dimensiones	d (m)			6,30	4,80	6,30	4,80	6,00	4,00			6,00	6,00
		D (m)			1,00	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00			0,00	0,00
	F.S Estático	Vol			5,12	5,26	5,12	5,26	4,92	4,66			5,21	5,21
		Des			1,93	2,04	2,06	2,21	2,16	2,26			2,06	2,19
		C.P.			18,12	36,49	24,41	47,20	28,79	53,28			50,04	61,47
	F.S Seudo-estático	Vol			2,08	2,26	2,08	2,26	2,01	2,04			2,03	2,03
		Des			1,07	1,23	1,13	1,32	1,19	1,35			1,12	1,19
		C.P.			9,85	26,85	13,19	34,45	15,75	38,54			28,96	35,35

4.1.3. Muro gaviones

El dimensionamiento para muro gaviones es el mismo para todos los modelos y está definido por la *Figura 3.10*. En la *Tabla 4.23* se enuncian los valores de los factores obtenidos para el dimensionamiento único en condición estática y seudo-estática para las diferentes combinaciones de suelo.

TABLA 4.23 DIMENSIONAMIENTO MURO GAVIONES

			B=15								B=20			
			c=0 kPa		c=10 kPa		c=20 kPa		c=30 kPa		c=0 kPa	c=10 kPa	c=20 kPa	c=30 kPa
			phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35
MURO GAVIONES	F.S Estático	Vol	7,47	9,48	7,47	9,48	7,47	9,48	7,47	9,48	8,79	8,79	8,79	8,79
		Des	4,14	10,35	4,64	11,00	5,14	11,64	5,65	12,29	17,00	17,59	18,18	18,78
		C.P.	14,04	30,56	24,63	48,91	35,81	67,97	47,41	87,54	28,07	45,94	64,57	83,76
	F.S Seudo-estático	Vol	3,01	3,93	3,01	3,93	3,01	3,93	3,01	3,93	3,35	3,35	3,35	3,35
		Des	2,06	5,23	2,33	5,59	2,60	5,96	2,87	6,32	7,57	7,86	8,16	8,45
		C.P.	2,22	3,46	3,51	5,06	4,89	6,76	6,36	8,54	3,31	4,87	6,54	8,29

4.1.4. Muro pantalla

El muro pantalla fue dimensionado como se muestra en la *Tabla 4.24*, variando las dimensiones a y b como se especifica en la *Figura 3.11* y variando el espaciado fuera del plano. Adicionalmente se enuncian los valores de los factores de seguridad para la

estabilidad general obtenidos en dichos dimensionamientos en condición estática y pseudo-estática de acuerdo a las diferentes combinaciones de suelo.

Las casillas sombreadas en rojo en la *Tabla 4.24* pertenecen a muros pantalla para los cuales, de acuerdo con los resultados obtenidos por Slide, no son necesarios anclajes y cumplen con los factores de seguridad de la estabilidad general.

TABLA 4.24 DIMENSIONAMIENTO MURO PANTALLA

			B=15								B=20			
			c=0 kPa		c=10 kPa		c=20 kPa		c=30 kPa		c=0 kPa	c=10 kPa	c=20 kPa	c=30 kPa
			phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35
			phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35
MURO PANTALLA	Dimensiones	a (m)	2,00	3,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00
		b (m)	10,00	10,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00
		espaciamiento fuera del plano (m)	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00
	F.S Estático	1,54	1,60	1,56	1,57	1,59	1,82	1,84	2,07	1,53	1,51	1,74	1,96	
	F.S Seudo-estático	1,19	1,31	1,30	1,32	1,31	1,51	1,50	1,70	1,32	1,29	1,45	1,61	

4.2. Simulación con herramientas computacionales

En este capítulo se expondrá los resultados obtenidos para un diseño de cada tipología, los diseños que se evaluaron son los enunciados en la *Tabla 4.25*.

TABLA 4.25 MUROS A EVALUAR

		B=15								B=20			
		c=0 kPa		c=10 kPa		c=20 kPa		c=30 kPa		c=0 kPa	c=10 kPa	c=20 kPa	c=30 kPa
		phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35
		phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35
Muro de gravedad													
Muro cantiléver													
Muro gaviones													
Muro Pantalla													

4.2.1. Simulación por elementos finitos con Plaxis

Finalizado el proceso anterior, se continúa con la modelación de los muros de contención con el fin de determinar los esfuerzos generados entre la interacción suelo-estructura y analizar las posibles variables que afecten su estabilidad.

4.2.1.1. Muro de gravedad

4.2.1.1.1. 20, 10, 35

La *Tabla 4.26* proporciona información de los esfuerzos y desplazamientos de cada una de las fases de cálculo. Como se puede apreciar los esfuerzos y las deformaciones se van concentrando en la base del muro durante su construcción, es debido a que esta estructura cuenta con un dentellón como refuerzo que garantiza su estabilidad a volcamiento. Por otra parte, las mayores deformaciones presentadas se encuentran en el relleno del muro.

TABLA 4.26 DIAGRAMA DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES POR ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN

MURO GRAVEDAD (201035)	Esfuerzos totales			Deformaciones cartesianas
	X-X	Y-Y	X-Y	
FASE 1: Condición inicial				
FASE 2: Proceso de excavación				
FASE 3: Proceso de construcción del muro				
FASE 4: Etapa final				
FASE 5: Sismo				

En la siguiente *Tabla 4.27* se pueden apreciar los diagramas de esfuerzos obtenidos entre la interacción suelo-estructura en condición estática y pseudo-estática. Los valores de los

esfuerzos se encuentran en la *Tabla 4.28*, con el fin de reemplazar la presencia del muro en el terreno.

TABLA 4.27 DIAGRAMAS DE ESFUERZOS OBTENIDOS POR PLAXIS

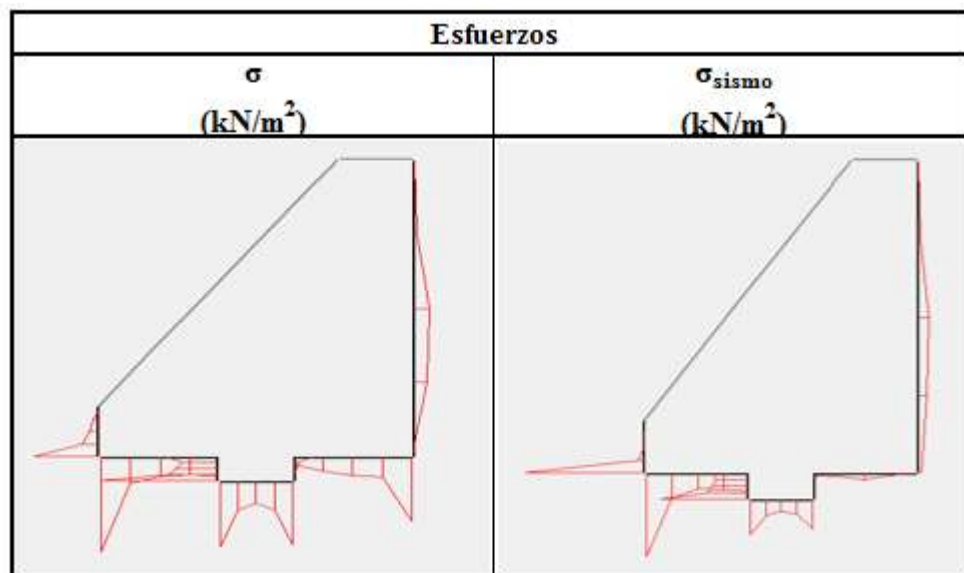


TABLA 4.28 ESFUERZOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
49,3122	17,913	-84,81	-155,82
48,8997	17,913	-77,31	-140,50
48,4872	17,913	-82,90	-135,23
48,0747	17,913	-111,60	-222,54
47,6622	17,913	-403,30	-737,41
47,6622	17,913	-192,69	-888,20
47,6622	18,163	-55,19	-60,74
47,6622	18,413	-31,27	-13,20
47,6622	18,663	-19,87	-18,86
47,6622	18,913	0,00	0,00
51,9623	23,913	-7,51	-15,30
51,9623	22,413	-16,15	-33,15
51,9623	20,913	-50,59	-95,10
51,9623	19,413	-41,90	-81,77

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
51,9623	17,913	0,00	-37,70
49,3122	17,413	-343,03	-654,36
49,3122	17,538	-146,10	-304,27
49,3122	17,663	-128,00	-271,43
49,3122	17,788	-108,87	-245,23
49,3122	17,913	-155,12	-274,80
50,3122	17,413	-267,76	-261,57
50,0622	17,413	-122,39	-129,82
49,8122	17,413	-92,83	-110,32
49,5622	17,413	-121,87	-147,95
49,3122	17,413	-277,07	-317,29
51,9622	17,913	-274,47	0,00
51,5497	17,913	-89,06	-23,04
51,1372	17,913	-81,01	-60,39
50,7247	17,913	-61,97	-27,95
50,3122	17,913	-33,84	-17,36
50,3122	17,913	-58,05	-60,66
50,3122	17,788	-17,76	-1,10
50,3122	17,663	-11,48	-0,42
50,3122	17,538	0,00	-0,74
50,3122	17,413	0,00	0,00

Para poder comparar las presiones laterales entre las calculadas en el dimensionamiento de los muros y las simuladas en elementos finitos, fue necesario realizar el siguiente procedimiento para calcular dichas presiones a partir de los datos de la modelación.

Se graficaron los diagramas de esfuerzos laterales respecto a su posición para determinar el área bajo la curva del diagrama. Dicha área puede ser una presión activa o pasiva dependiendo de la ubicación del diagrama en el muro.

Presiones activas, su cálculo se realiza respecto a los esfuerzos del muro de la Tabla 4.29. Graficando estos esfuerzos se obtienen dos curvas que corresponden a condición estática y pseudo-estática como se ilustra en la Figura 4.97.

TABLA 4.29. DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN ACTIVA

Condición Estática		Condición Seudo-estática	
Y (m)	σ (kN/m ²)	Y (m)	σ_{sismo} (kN/m ²)
17,913	0,00	17,913	37,70
19,413	41,90	19,413	81,77
20,913	50,59	20,913	95,10
22,413	16,15	22,413 <td 33,15	
23,913	7,51	23,913	15,30

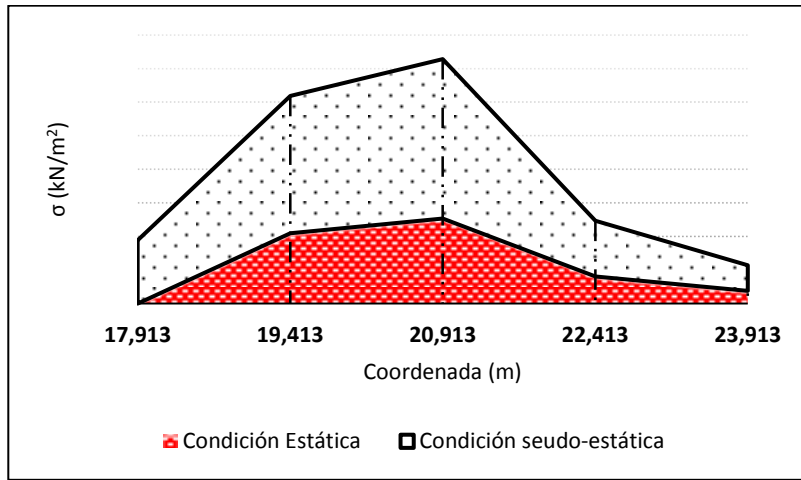


FIGURA 4.97 CURVAS DE LOS DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN ACTIVA

Presiones pasivas, su cálculo se realiza respecto a los esfuerzos del muro de la Tabla 4.30, donde graficándolos me generan dos curvas como se ilustra en la Figura 4.98.

TABLA 4.30 DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN PASIVA

Condición Estática		Condición Seudo-estática	
Y (m)	σ (kN/m ²)	Y (m)	σ_{sismo} (kN/m ²)
17,913	192,69	17,913	888,20
18,163	55,19	18,163	60,74
18,413	31,27	18,413	13,20
18,663	19,87	18,663	18,86

Condición Estática	
Y (m)	σ (kN/m ²)
18,913	0,00

Condición Seudo-estática	
Y (m)	σ_{sismo} (kN/m ²)
18,913	0,00

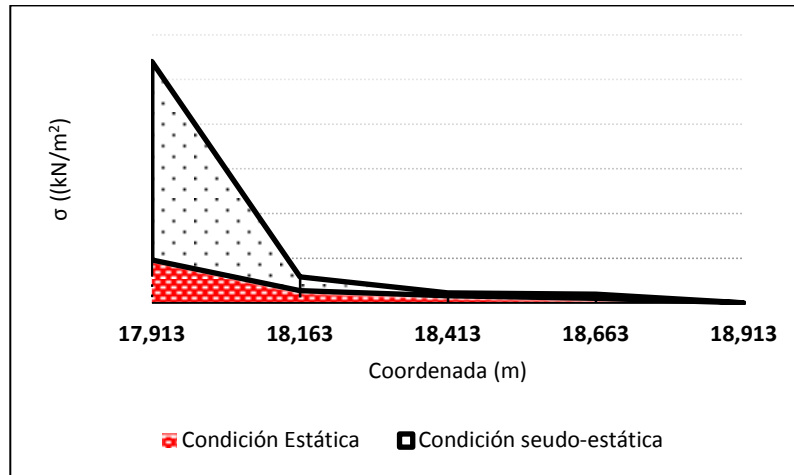


FIGURA 4.98 CURVAS DE LOS DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN PASIVA

En la Tabla 4.31 se encuentran los resultados de las presiones laterales del muro de gravedad, donde se puede apreciar que las presiones activas calculadas por ambos métodos son muy similares pero se encuentra gran diferencia en los valores de las presiones pasivas de la estructura. Las presiones pasivas obtenidas para el diseño del muro son mucho mayores que las calculas por Plaxis, ya que el dentellón puede disminuir la magnitud de estas presiones pasivas en la parte delantera del elemento y porque el muro está soportando la mayor parte de las cargas.

TABLA 4.31 RESULTADOS DE PRESIONES LATERALES

	Condición Estática		Condición Seudo-estática	
	Pa (kN/m)	Pp (kN/m)	Pa (kN/m)	Pp (kN/m)
Plaxis	168,60	50,67	354,79	134,22
Diseño	110,30	849,02	278,79	737,00

4.2.1.2. Muro cantiléver

4.2.1.2.1. 15, 20, 35

La siguiente Tabla 4.32 proporciona información de los esfuerzos y desplazamientos de cada una de las fases de cálculo. Semejante al muro de gravedad 20, 30 ,35 los esfuerzos y las deformaciones se van concentrando en la base de la estructura durante su construcción, a diferencia del muro gravedad presentaba un área mayor de concentración. Los esfuerzos del cantiléver se concentran en la parte delantera del muro. En este caso, no se presentaron deformaciones o esfuerzos considerables en el relleno.

TABLA 4.32 DIAGRAMA DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES POR ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN

MURO CANTILEVER (152035)	Esfuerzos totales			Deformaciones cartesianas
	X-X	Y-Y	X-Y	
FASE 1: Condición inicial				
FASE 2: Proceso de excavación				
FASE 3: Proceso de construcción del muro				
FASE 4: Etapa final				
FASE 5: Sismo				

En la siguiente Tabla 4.33 se pueden apreciar los diagramas de esfuerzos obtenidos entre la interacción suelo-estructura en condición estática y pseudo-estática. Los valores de los esfuerzos se encuentran en la Tabla 4.34, con el fin de reemplazar la presencia del muro en el terreno.

TABLA 4.33 *DIAGRAMAS DE ESFUERZOS OBTENIDOS POR PLAXIS*

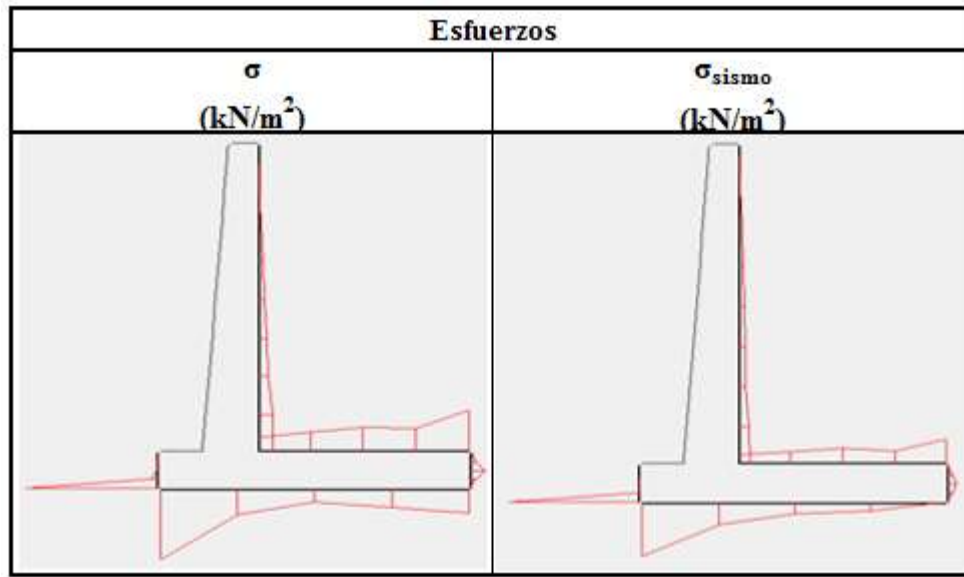


TABLA 4.34 *ESFUERZOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA*

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
60,1863	21,127	0,00	-2,50
60,1863	20,002	-9,69	-20,53
60,1863	18,877	-19,39	-44,85
60,1863	17,752	-34,60	-55,05
60,1863	16,627	-47,23	-77,56
60,1863	16,627	-47,23	-77,56
60,1863	15,502	-57,61	-88,10
60,1863	14,377	-66,09	-85,66
60,1863	13,252	-91,26	-126,12
60,1863	12,127	-96,82	-134,66
57,9863	11,127	-826,60	-1463,33
57,9863	11,377	-55,34	-43,11
57,9863	11,627	-21,95	-22,78
57,9863	11,877	-20,51	-16,24
57,9863	12,127	-8,98	-2,88
64,9862	11,127	-197,33	0,00
63,2363	11,127	-159,61	-128,93

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
61,4863	11,127	-115,76	-162,71
59,7363	11,127	-215,70	-313,94
57,9864	11,127	-569,59	-736,67
60,1863	12,127	-125,28	-151,47
61,3863	12,127	-167,79	-192,36
62,5863	12,127	-202,06	-234,92
63,7863	12,127	-195,10	-202,26
64,9863	12,127	-342,08	-364,92
64,9863	12,127	-22,82	0,00
64,9863	11,877	-42,38	-69,08
64,9863	11,627	-102,97	-101,01
64,9863	11,377	-43,88	-61,54
64,9863	11,127	0,00	0,00

Al igual que el muro de gravedad 20, 10, 35 se calcularon las presiones laterales graficando los diagramas de esfuerzos y calculando el área bajo la curva del diagrama.

Presiones activas, su cálculo se realiza respecto a los esfuerzos del muro de la Tabla 4.36. Graficando estos esfuerzos se obtienen dos curvas que corresponden a condición estática y pseudo-estática como se ilustra en la Figura 4.100.

A razón de que el dimensionamiento se realizó por Mohr-Coulomb donde la presión activa es calculada en el espaldar de la estructura, los diagramas de esfuerzos para presión activa se extraen como se observa en la Figura 4.99 y los datos se encuentran en la Tabla 4.35 .

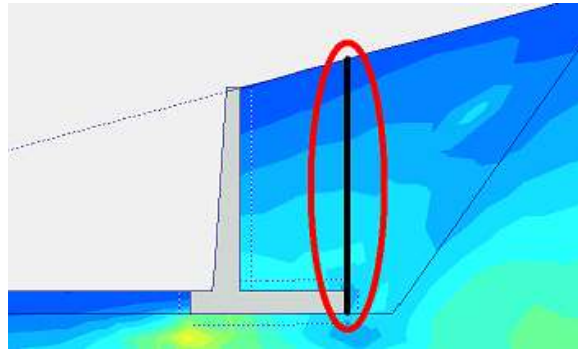


FIGURA 4.99 ZONA DEL DIAGRAMA DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN ACTIVA

TABLA 4.35 ESFUERZOS PARA PRESIÓN ACTIVA

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
64,9863	11,127	41,42	41,67
64,9863	12,256	-108,27	-85,20
64,9863	13,384	-199,59	-245,62
64,9863	14,513	-153,38	-195,41
64,9863	15,641	-131,99	-170,74
64,9863	16,770	-114,28	-176,57
64,9863	17,899	-106,02	-153,11
64,9863	19,027	-116,99	-160,74
64,9863	20,156	-58,97	-81,61
64,9863	21,284	-35,93	-50,63
64,9863	22,413	-2,12	-2,06

TABLA 4.36 DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN ACTIVA

Condición Estática		Condición Seudo-estática	
Y (m)	σ (kN/m ²)	Y (m)	σ_{sismo} (kN/m ²)
11,127	-41,42	11,127	-41,67
12,256	108,27	12,256	85,20
13,384	199,59	13,384	245,62
14,513	153,38	14,513	195,41

Condición Estática	
Y (m)	σ (kN/m ²)
15,641	131,99
16,770	114,28
17,899	106,02
19,027	116,99
20,156	58,97
21,284	35,93
22,413	2,12

Condición Seudo-estática	
Y (m)	σ_{sismo} (kN/m ²)
15,641	170,74
16,770	176,57
17,899	153,11
19,027	160,74
20,156	81,61
21,284	50,63
22,413	2,06

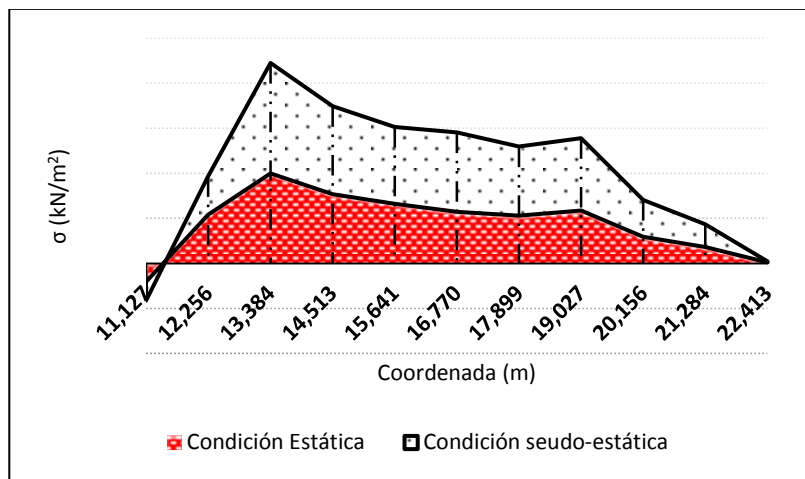


FIGURA 4.100 CURVAS DE LOS DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN ACTIVA

Presiones pasivas, su cálculo se realiza respecto a los esfuerzos del muro de la Tabla 4.37, donde graficándolos me generan dos curvas como se ilustra en la Figura 4.101.

TABLA 4.37 DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN PASIVA

Condición Estática	
Y (m)	σ (kN/m ²)
11,127	826,60
11,377	55,34
11,627	21,95
11,877	20,51

Condición Seudo-estática	
Y (m)	σ_{sismo} (kN/m ²)
11,127	1463,33
11,377	43,11
11,627	22,78
11,877	16,24

Condición Estática	
Y (m)	σ (kN/m ²)
12,127	8,98

Condición Seudo-estática	
Y (m)	σ_{sismo} (kN/m ²)
12,127	2,88

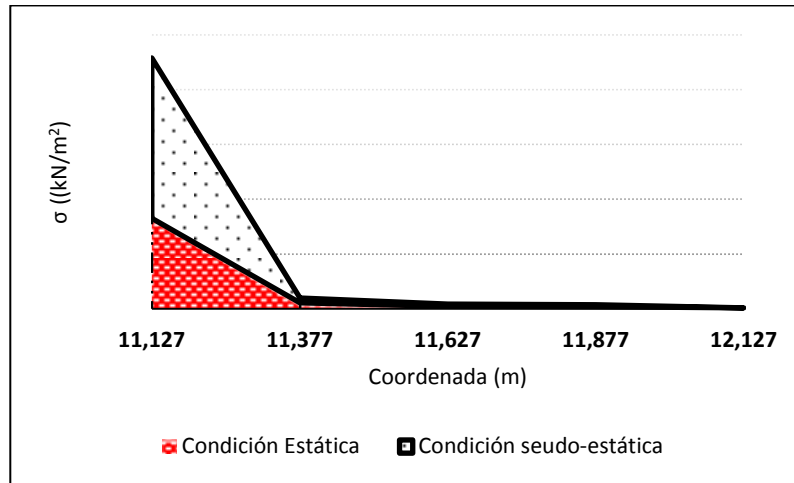


FIGURA 4.101 CURVAS DE LOS DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN PASIVA

En la Tabla 4.38 se encuentran los resultados de las presiones laterales para el muro cantiléver, donde se puede apreciar que las presiones pasivas son casi nulas a comparación con las presiones activas, este comportamiento puede ser debido a que el peso del suelo contribuye a la estabilidad de los muros cantiléver. De acuerdo a la NSR-10 solo se puede tener en cuenta las presiones pasivas después de 1 m de profundidad, el muro solo presenta las presiones obtenidas por medio de la modelación.

TABLA 4.38 RESULTADOS DE PRESIONES LATERALES

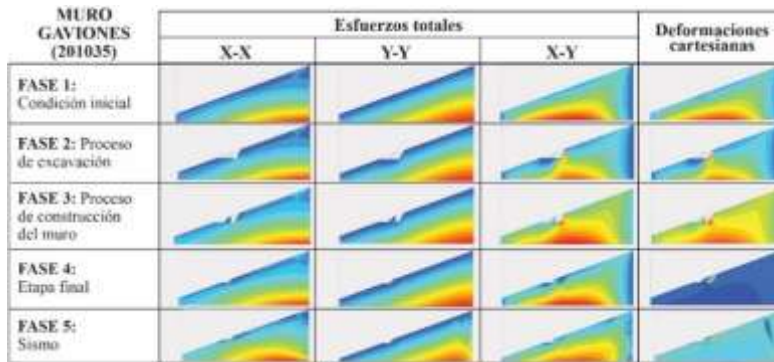
	Condición Estática		Condición Seudo-estática	
	Pa (kN/m)	Pp (kN/m)	Pa (kN/m)	Pp (kN/m)
Plaxis	1135,11	128,89	1466,99	203,80
Diseño	357.44	0,00	635.46	0,00

4.2.1.3. Muro gaviones

4.2.1.3.1. 20, 10, 35

La siguiente Tabla 4.39 proporciona información de los esfuerzos y desplazamientos de cada una de las fases de cálculo. Se puede observar que los esfuerzos se concentran en la base del muro, muy similar al muro de gravedad. Las mayores deformaciones se presentan en la interacción relleno-suelo.

TABLA 4.39 DIAGRAMA DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES POR ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN



En la siguiente Tabla 4.40 se pueden apreciar los diagramas de esfuerzos obtenidos entre la interacción suelo-estructura en condición estática y pseudo-estática. Los valores de los esfuerzos se encuentran en la Tabla 4.41, con el fin de reemplazar la presencia del muro en el terreno.

TABLA 4.40 DIAGRAMAS DE ESFUERZOS OBTENIDOS POR PLAXIS

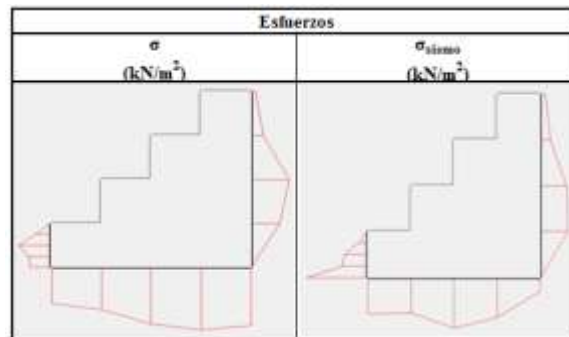


TABLA 4.41 ESFUERZOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
36,5751	14,312	-57,80	-20,76
35,5751	14,312	-62,13	-61,00
34,5751	14,312	-56,51	-77,08
33,5751	14,312	-42,34	-54,12
32,5751	14,312	-35,56	-55,24
36,5751	18,312	-3,76	-8,49
36,5751	17,312	-10,19	-17,09
36,5751	16,312	-33,43	-43,66
36,5751	15,312	-24,77	-45,59
36,5751	14,312	0,00	0,00
32,5751	14,312	-17,83	-99,36
32,5751	14,562	-19,94	-41,84
32,5751	14,812	-28,44	-38,83
32,5751	15,062	-13,83	-15,44
32,5751	15,312	-1,66	-1,69

Al igual que los otros muros se calcularon las presiones laterales graficando los diagramas de esfuerzos y calculando el área bajo la curva del diagrama.

Presiones activas, su cálculo se realiza respecto a los esfuerzos del muro de la Tabla 4.42. Graficando estos esfuerzos se obtienen dos curvas que corresponden a condición estática y pseudo-estática como se ilustra en la Figura 4.102.

TABLA 4.42 DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN ACTIVA

Condición Estática		Condición Seudo-estática	
Y (m)	σ (kN/m ²)	Y (m)	σ_{sismo} (kN/m ²)
14,312	0,00	14,312	0,00
15,312	24,77	15,312	45,59
16,312	33,43	16,312	43,66
17,312	10,19	17,312	17,09
18,312	3,76	18,312	8,49

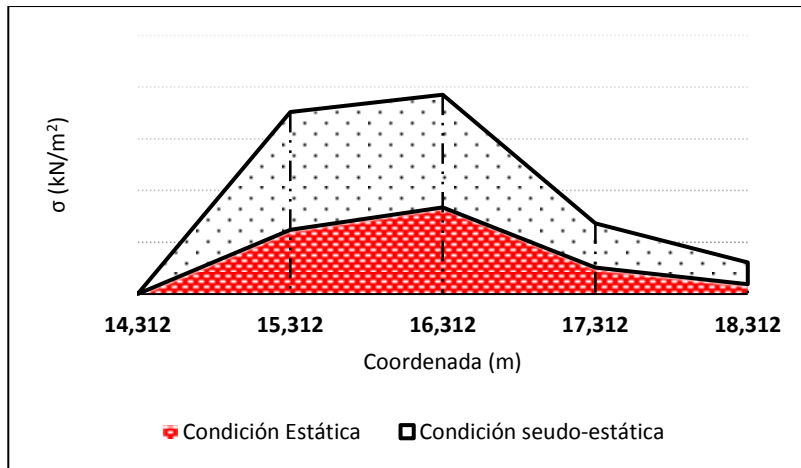


FIGURA 4.102 CURVAS DE LOS DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN ACTIVA

Presiones pasivas, su cálculo se realiza respecto a los esfuerzos del muro de la Tabla 4.43, donde graficándolos me generan dos curvas como se ilustra en la Figura 4.103.

TABLA 4.43 DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN PASIVA

Condición Estática		Condición Seudo-estática	
Y (m)	σ (kN/m ²)	Y (m)	σ_{sismo} (kN/m ²)
14,312	17,83	14,312	99,36
14,562	19,94	14,562	41,84
14,812	28,44	14,812	38,83
15,062	13,83	15,062	15,44
15,312	1,66	15,312	1,69

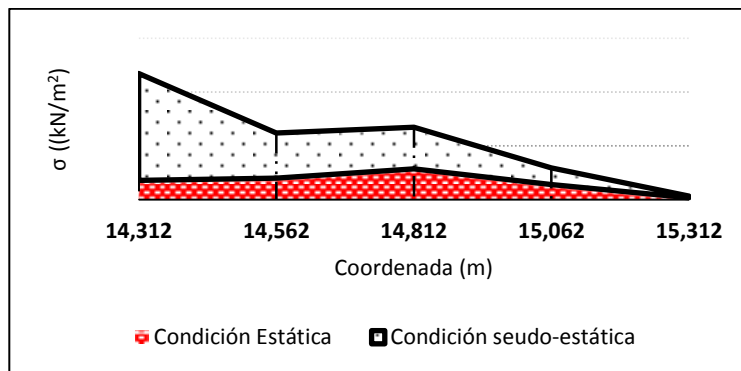


FIGURA 4.103 CURVAS DE LOS DIAGRAMAS DE ESFUERZOS PARA PRESIÓN PASIVA

En la Tabla 4.44 se encuentran los resultados de las presiones laterales del muro gaviones, donde se puede observar que las presiones pasivas de diseño son más altas que las modeladas. Los resultados de la simulación indican que el muro está soportando la mayor parte de las cargas por esta razón el suelo de relleno no presentan esfuerzos considerables y deformaciones.

TABLA 4.44 RESULTADOS DE PRESIONES LATERALES

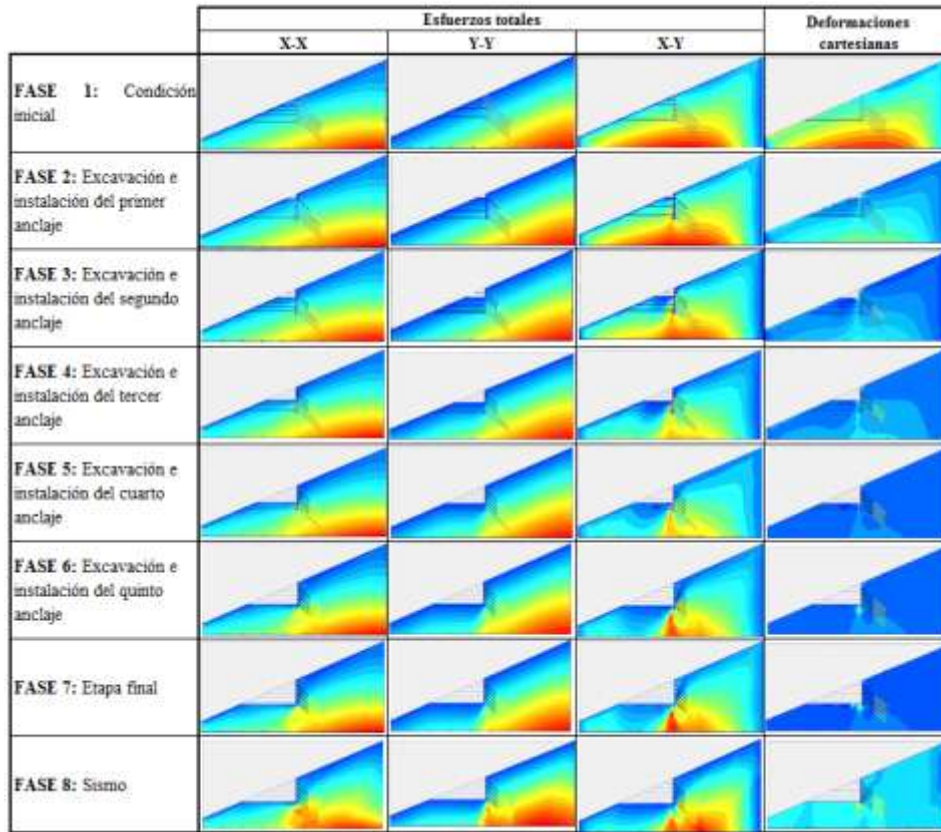
	Condición Estática		Condición Seudo-estática	
	Pa (kN/m)	Pp (kN/m)	Pa (kN/m)	Pp (kN/m)
Plaxis	70,27	17,99	110,59	36,66
Diseño	45,01	679,21	90,42	589,60

4.2.1.4. Muro Pantalla

4.2.1.4.1. 15, 00, 30

La siguiente Tabla 4.45 proporciona información de los esfuerzos y desplazamientos de cada una de las fases de cálculo. A medida que las etapas de construcción avanzan hasta finalizar, los esfuerzos se van concentrando hacia la parte de atrás de la pantalla, en la zona donde se encuentran los anclajes. En la parte inferior de la pantalla se generan las mayores deformaciones del modelo.

TABLA 4.45 DIAGRAMA DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES POR ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN



En la siguiente Tabla 4.46 se pueden apreciar los diagramas de esfuerzos obtenidos entre la interacción suelo-estructura en condición estática y pseudo-estática. Los valores de los esfuerzos se encuentran en la Tabla 4.47, con el fin de reemplazar la presencia del muro en el terreno.

TABLA 4.46 DIAGRAMAS DE ESFUERZOS OBTENIDOS POR PLAXIS

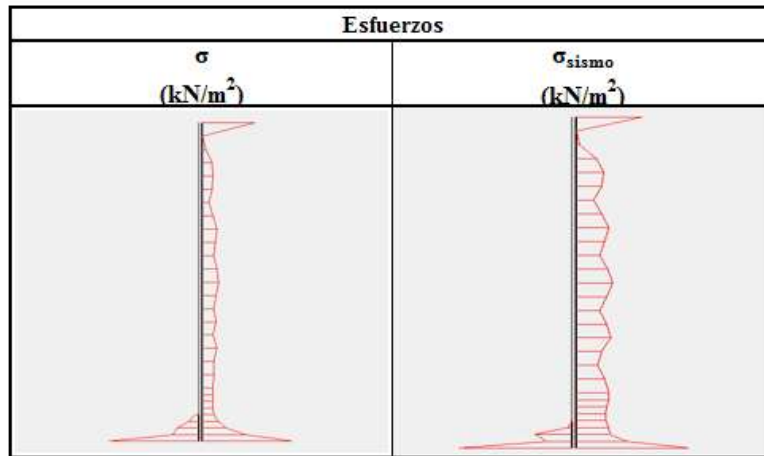


TABLA 4.47 ESFUERZOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
70,1863	23,8064	-165,12	-165,12
70,1863	23,3064	-18,33	-18,27
70,1863	22,8064	-18,48	-25,09
70,1863	22,3064	-37,32	-55,19
70,1863	21,8064	-47,74	-73,52
70,1863	21,3064	-45,28	-66,53
70,1863	20,8064	-39,62	-55,32
70,1863	20,3064	-50,72	-71,32
70,1863	19,8064	-52,5	-76,52
70,1863	19,3064	-52,06	-71,97
70,1863	18,8064	-46,99	-60,44
70,1863	18,3064	-54,98	-73,25
70,1863	17,8064	-58,75	-81,53
70,1863	17,3064	-57,14	-75,18
70,1863	16,8064	-54,43	-66,84
70,1863	16,3064	-64,14	-79,74
70,1863	15,8064	-65,31	-77,62
70,1863	15,3064	-62,21	-84,35
70,1863	14,8064	-54,3	-73,61

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
70,1863	14,3064	-63,83	-85,2
70,1863	13,8064	-66,65	-87,21

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
70,1863	13,5564	-69,85	-88,44
70,1863	13,3064	-69,54	-85,26
70,1863	13,0564	-71,66	-84,45
70,1863	12,8064	-78,47	-87,29
70,1863	12,5564	-77,92	-86,13
70,1863	12,3064	-94,94	-88,5
70,1863	12,0564	-162,28	-151,85
70,1863	11,8064	-279,12	-279,12
70,1863	11,8064	-279,12	-279,12
70,1863	12,0564	-91,94	-83,99
70,1863	12,3064	-95,2	-81
70,1863	12,5564	-33,09	-26,84
70,1863	12,8064	-7,48	0

4.2.1.4.2. 20, 00, 35

Para este muro, se modeló considerando las etapas de construcción y sin fases de construcción.

El modelo con etapas de construcción no se ejecutaron todas sus fases de cálculo como se ilustra en la Figura 4.104. Debido a las deformaciones de la Figura 4.105 son muy altas para que se presenten a mitad del proceso constructivo, en la parte superior de la pantalla en la fase 3 se presentaban deformaciones aproximadas a 4 cm.

Plaxis 8.2 Calculations - 200035.plx

File Edit View Calculate Help

Input Output Cures

Output...

General Parameters Multipliers Preview

Phase
 Number / ID.: 3 Fase 3
 Start from phase: 2 - Fase 2

Calculation type
 Plastic
 Advanced

Log info
 Prescribed ultimate state not reached!
 Load advancement procedure fails, try manual control
 Inspect output and load-displacement curve

Comments

Parameters

Next Insert Delete...

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 s	0
✓ Fase 1	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 s	1
✓ Fase 2	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 s	2
✗ Fase 3	3	2	Plastic	Staged construction	0,00 s	3
➔ Fase 4	4	3	Plastic	Staged construction	0,00 s	4
➔ Sismo	5	4	Plastic	Staged construction	0,00 s	4

FIGURA 4.104 VENTANA DE RESULTADOS CON FASES DE CONSTRUCCIÓN

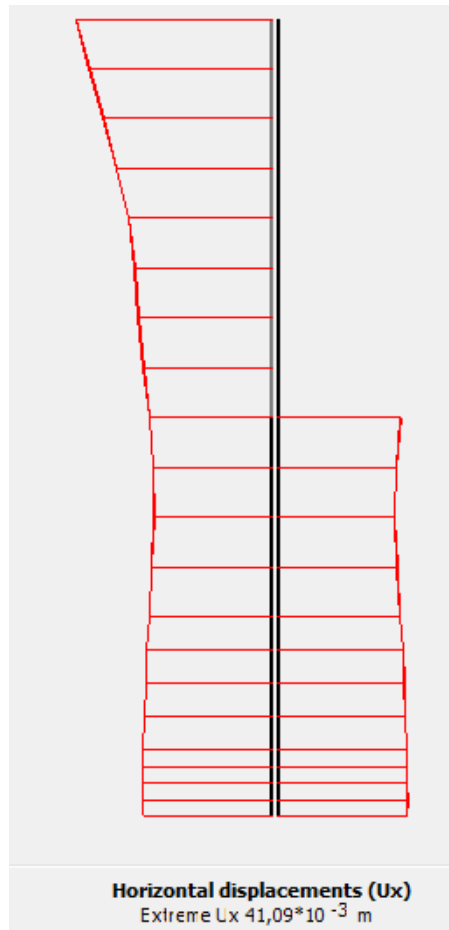


FIGURA 4.105 DIAGRAMAS DE DESPLAZAMIENTO EN EL EJE X DE LA FASE 3 DE CONSTRUCCIÓN, CONSIDERANDO EL PROCESO CONSTRUCTIVO

La Figura 4.106 presenta los cálculos finalizados del muro construido pero sin tener en cuenta sus etapas constructivas. Aunque se sigan presentando deformaciones horizontales altas (7 cm) como se ilustra en la Figura 4.107, el programa realiza los cálculos y garantiza la estabilidad.

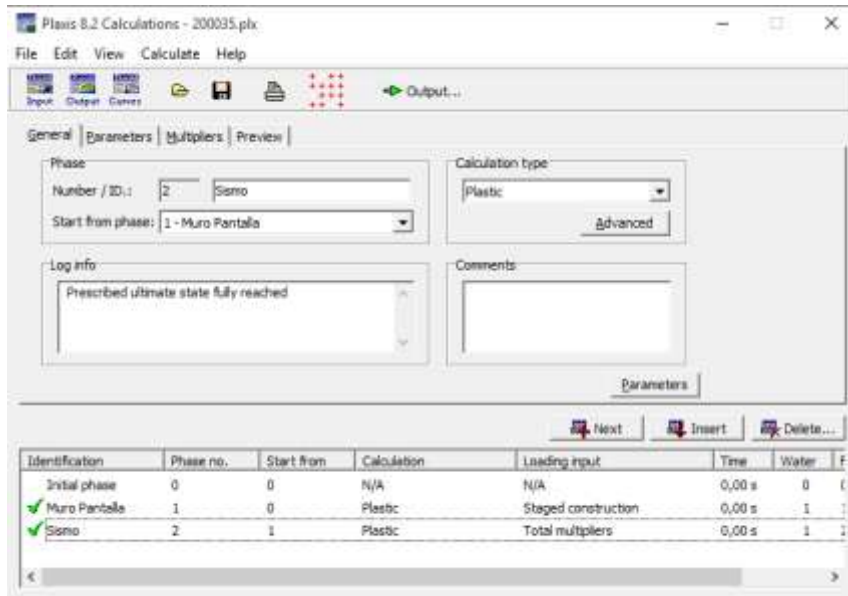


FIGURA 4.106 VENTANA DE RESULTADOS SIN FASES DE CONSTRUCCIÓN

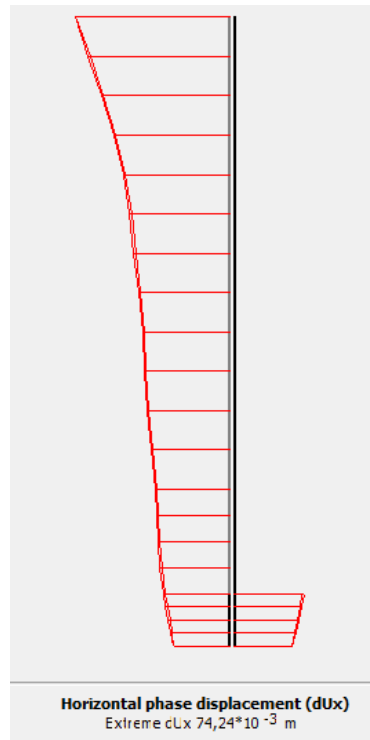


FIGURA 4.107 DIAGRAMAS DE DESPLAZAMIENTO EN EL EJE X DE LA FASE 4 DE CONSTRUCCIÓN, SIN CONSIDERAR SU PROCESO CONSTRUCTIVO

En la siguiente Tabla 4.48 se pueden apreciar los diagramas de esfuerzos obtenidos entre la interacción suelo-estructura en condición estática y pseudo-estática. Los valores de los esfuerzos se encuentran en la Tabla 4.49, con el fin de reemplazar la presencia del muro en el terreno.

TABLA 4.48 DIAGRAMAS DE ESFUERZOS OBTENIDOS POR PLAXIS

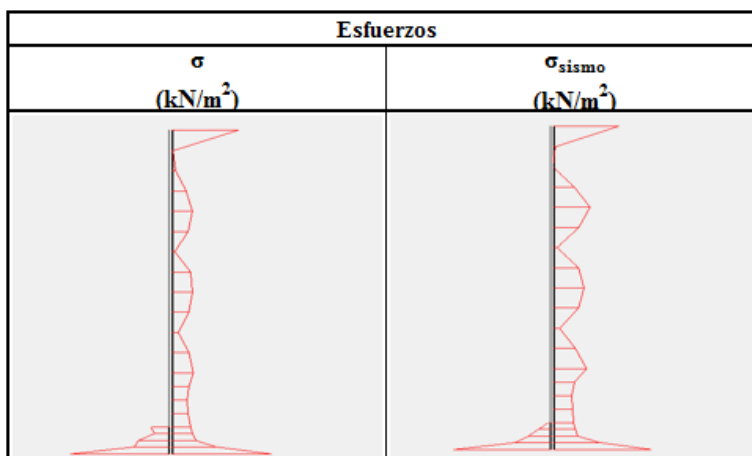


TABLA 4.49 ESFUERZOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
70,1863	30,5457	-191,29	-191,29
70,1863	29,7957	-6,98	-6,96
70,1863	29,0457	-9,38	0,00
70,1863	28,2957	-43,48	-61,08
70,1863	26,7957	-48,67	-84,72
70,1863	26,0457	-7,02	-9,38
70,1863	25,2957	-61,34	-85,16
70,1863	23,7957	-53,64	-77,92
70,1863	23,0457	-20,59	-25,22
70,1863	22,2957	-47,13	-71,56
70,1863	21,0457	-45,56	-72,80
70,1863	20,5457	-44,20	-54,10
70,1863	20,0457	-46,67	-63,81
70,1863	19,2957	-54,43	-71,13
70,1863	19,0457	-68,32	-73,74
70,1863	18,7957	-139,60	-141,57
70,1863	18,5457	-288,51	-288,51
70,1863	18,5457	-288,51	-288,51
70,1863	18,7957	-108,82	-126,40
70,1863	19,0457	-90,40	-46,62

Coordenadas		Esfuerzos	
X (m)	Y (m)	σ (kN/m ²)	σ_{sismo} (kN/m ²)
70,1863	19,2957	-44,60	-52,19
70,1863	19,5457	-67,36	-2,86

4.2.2. Equilibrio límite por medio de Slide

En esta sección se evalúa la estabilidad general para las fases de construcción de los muros y adicionalmente se plantea la modelación con esfuerzos como sustituto del muro.

4.2.2.1. Muro de gravedad

En la fase 1 se verifica la estabilidad general del terreno sin excavar, de esta forma se pueden evaluar las combinaciones de los parámetros del suelo (3.1.1) revisando que el factor de seguridad no sea menor a 1.25. En la *Figura 4.108* se puede observar que el suelo para Muro de gravedad 20, 10, 35 y para los muros que tengan las mismas condiciones de suelo cumple con los requisitos establecidos.

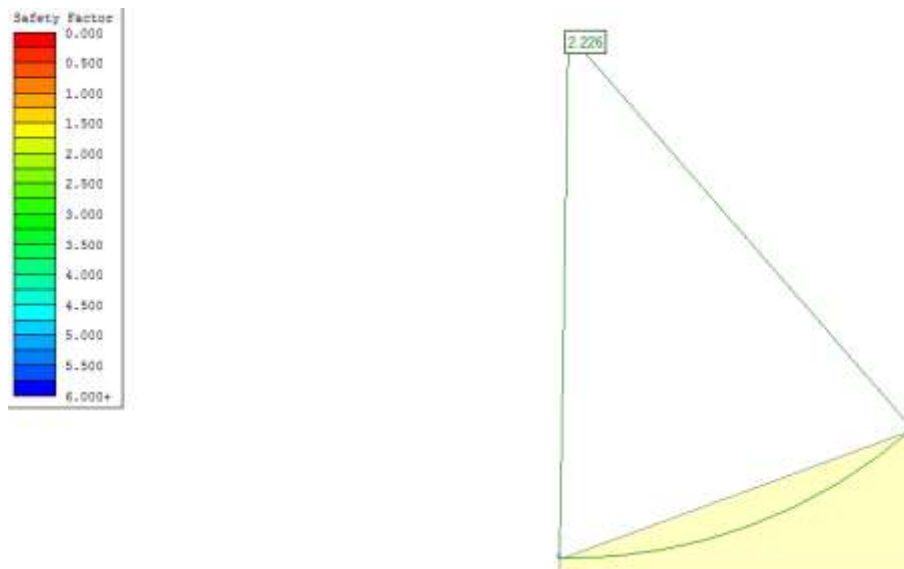


FIGURA 4.108 MURO DE GRAVEDAD FASE I

Como se mencionó en el numeral 3.1.5.2.2.2, en la fase 2 se escoge el ángulo de excavación para que este cumpla con el factor de seguridad superior a 1.25. En el Muro de gravedad 20, 10, 35 se escogió el un ángulo de 50° y su factor de seguridad es de 1.26 (Figura 4.109), el cual es mayor a 1.25 y por lo tanto cumple con los requisitos establecidos.

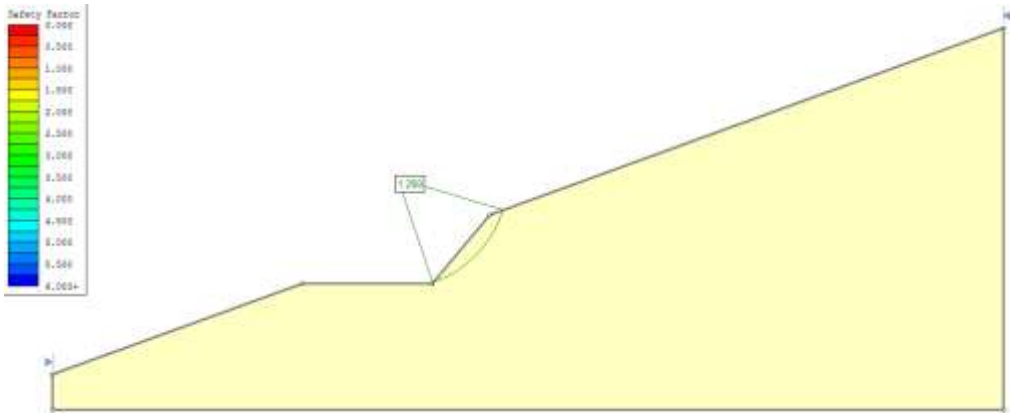


FIGURA 4.109 MURO DE GRAVEDAD FASE II

En la fase 3 se verifica nuevamente la estabilidad de la excavación pero esta vez incluyendo la carga del muro. En la Figura 4.110 que corresponde al Muro de gravedad 20, 10, 35 se puede observar como su factor de seguridad aumenta levemente y sigue cumpliendo con los requerimientos establecidos.

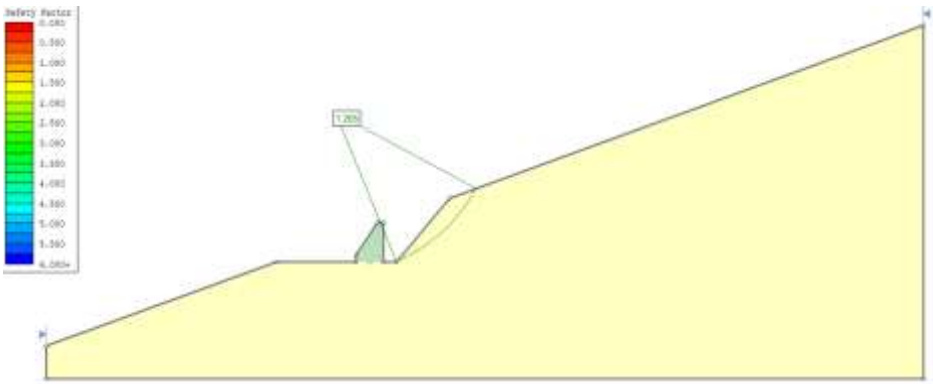


FIGURA 4.110 MURO DE GRAVEDAD FASE III

La fase 4 es la fase más importante para el análisis de los modelos y diseños, la construcción del muro se finaliza y la estructura entra a soportar las cargas de servicio. Para el análisis de esta fase, se elaboraron cinco modelos en los que se varía la representación del muro; muro con resistencia infinita (*Figura 4.111*), muro con cohesión de 10500 kN/m² (*Figura 4.112*) y esfuerzos obtenidos por Plaxis (*Figura 4.114*). Por otra parte, se evalúa el muro con cohesión de 10500 kN/m² con cargas sísmicas (*Figura 4.113*), la representación del muro con esfuerzos en condición sísmica (*Figura 4.115*) y de acuerdo a los resultados obtenidos por los modelos ya descritos, se escogieron dos diseños para cada tipología de muro cuyos resultados representan de la mejor manera la totalidad de los resultados para los muros diseñados, con estos muros se realizaron tres modelos adicionales: se le aumenta la cohesión al relleno al 2/3 de la cohesión del suelo (*Figura 4.116*), se aumentaron los esfuerzos al 150% (*Figura 4.117*) y la combinación de los esfuerzos y la cohesión del relleno aumentadas (*Figura 4.118*).

Los modelos en los que se toma la resistencia del concreto como infinita o se toma el concreto como un material no drenado con cohesión igual a $f'c/2$, suelen tener resultados casi idénticos. Lo que se planteaba con modelar el muro con resistencia infinita era tener un modelo base que represente la modelación tradicional de estos muros y al convertir el concreto en un material no drenado con cohesión se planteaba permitir que el muro no restringiera las superficies de falla. La modelación de estos dos muros permite resolver que el concreto como material no drenado con cohesión de 10500 kN/m² tiene una alta resistencia y restringe las superficies de falla, por lo tanto, los resultados obtenidos son bastante similares.

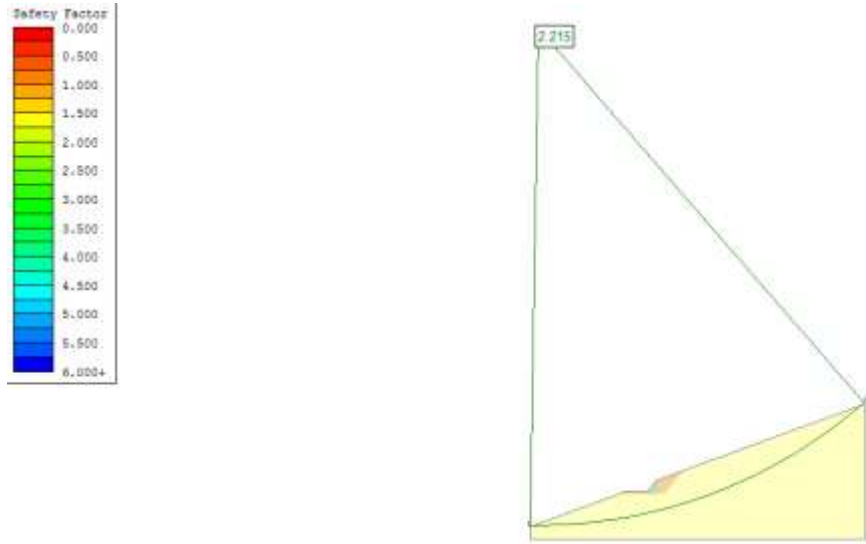


FIGURA 4.111 MURO DE GRAVEDAD FASE IV, CON RESISTENCIA INFINITA

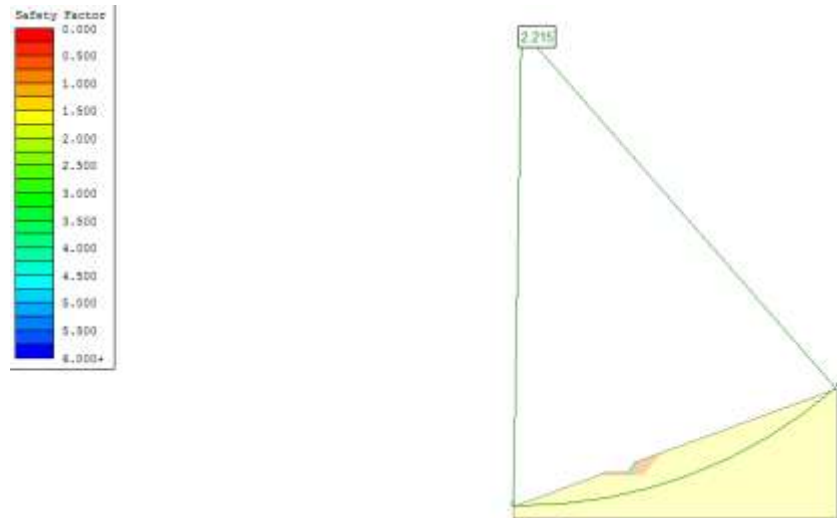


FIGURA 4.112 MURO DE GRAVEDAD FASE IV, NO DRENADO

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las dos modelaciones previas, se escogió modelar la condición de sismo con el muro representado por el material no drenado.

El muro cumple con los factores de seguridad para condición estática y pseudo-estática con las condiciones de modelación tradicional.

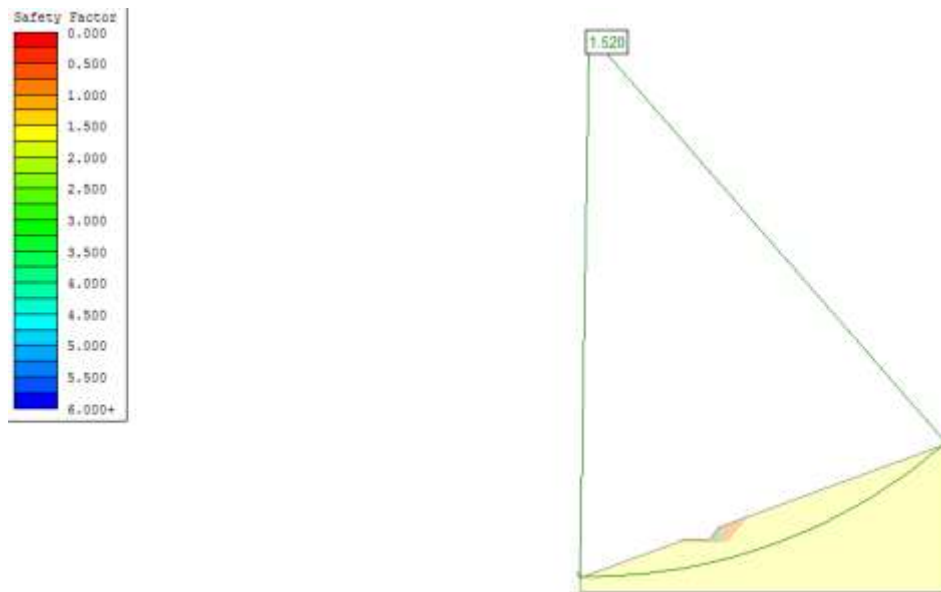


FIGURA 4.113 MURO DE GRAVEDAD FASE IV, NO DRENADO Y EN CONDICIÓN DE SISMO

En la modelación del muro representado por cargas distribuidas (Figura 4.114) se puede observar que el relleno está presentando superficies de falla con factores de seguridad inferiores a 1.5, esto indica que las cargas obtenidas por Plaxis no son suficientemente grandes para contener el relleno y por último se puede observar que las cargas distribuidas no restringen las superficies de falla que podrían afectar la estructura.

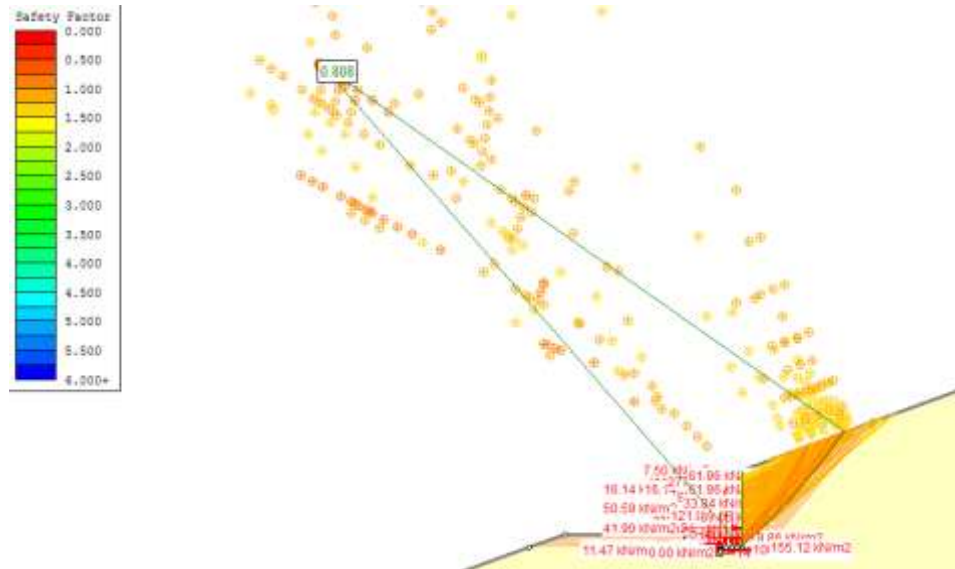


FIGURA 4.114 MURO DE GRAVEDAD FASE IV, CON ESFUERZOS

Los esfuerzos que se obtienen de Plaxis para la condición pseudo-estática son mayores a los de la condición estática y por lo tanto permiten restringir superficies de falla que se presentan sobre el espaldar del muro (Figura 4.115). Pero en este muro siguen existiendo superficies de falla sobre el relleno que no cumplen con los factores de seguridad, es por esto que se planteó realizar los tres modelos adicionales en los que se mejoran las condiciones del relleno y de las cargas.

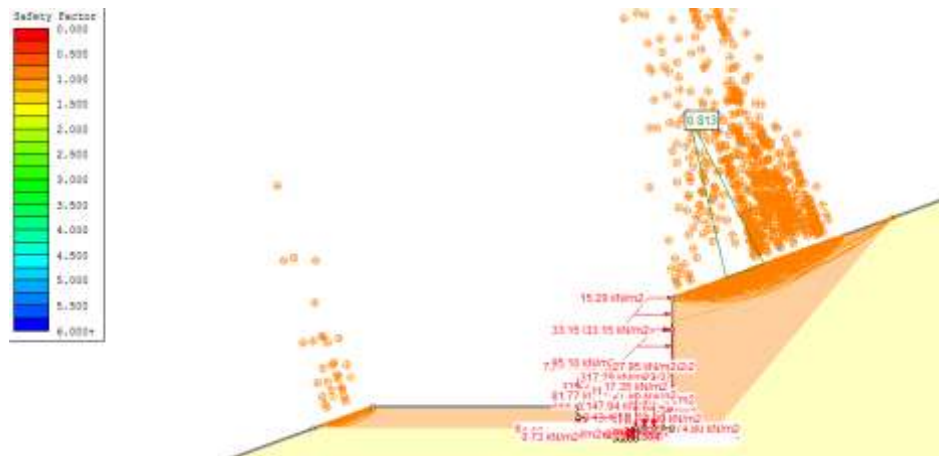


FIGURA 4.115 MURO DE GRAVEDAD FASE IV, CON ESFUERZOS Y SISMO

Al darle cohesión al relleno (*Figura 4.116*) se puede observar como el factor de seguridad aumento con respecto al modelo con el relleno sin cohesión, adicionalmente se puede ver una concentración de los planos de falla, algo que no ocurre en el modelo con relleno sin cohesión, en el que los planos de falla están distribuidos a lo largo del espaldar del muro.



FIGURA 4.116 MURO DE GRAVEDAD FASE IV, CON ESFUERZOS Y RELLENO COHESIVO

Al aumentar las cargas al 150% (*Figura 4.117*) se puede observar que el factor de seguridad es mayor al del modelo en el que se le da cohesión al relleno, pero se presentan concentraciones de superficies de falla en diferentes puntos del relleno y aún no cumple con el factor de seguridad mínimo.

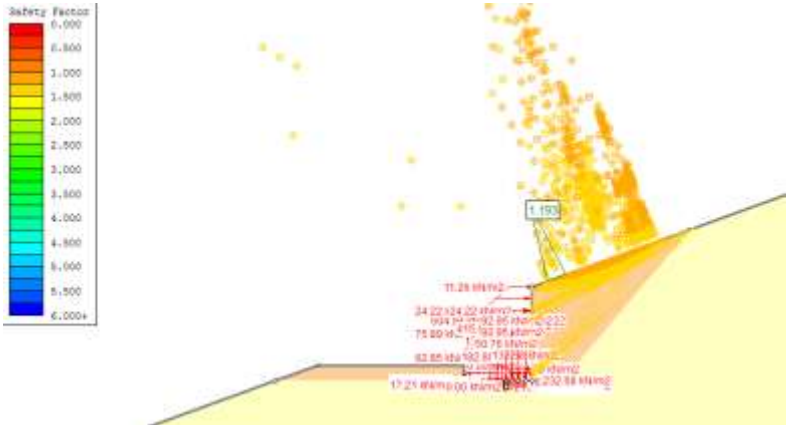


FIGURA 4.117 MURO DE GRAVEDAD FASE IV, CON ESFUERZOS AUMENTADOS AL 150%

Al aumentar los esfuerzos y darle cohesión al relleno (Figura 4.118) se tiene un modelo que cumple con el factor de seguridad mínimo y presenta una superficie de falla que pasa a través del muro, es decir, no restringe las superficies de falla que se encuentran puntualizados sobre la estructura.

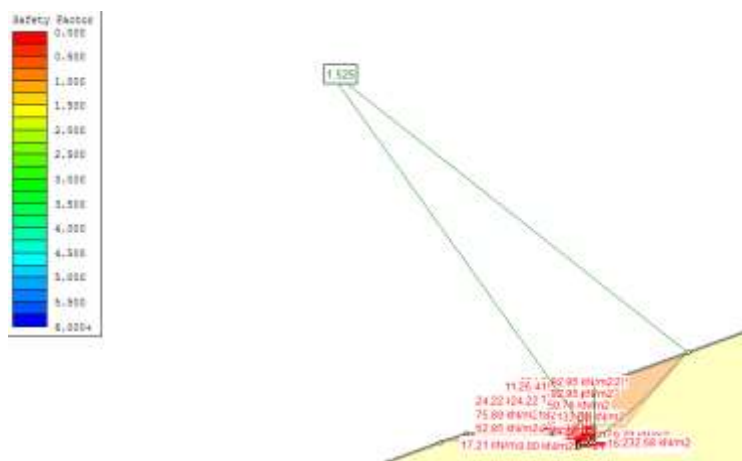


FIGURA 4.118 MURO DE GRAVEDAD FASE IV, CON ESFUERZOS AUMENTADOS AL 150% Y RELLENO COHESIVO

En la *Tabla 4.50* se encuentran los factores de seguridad para los demás muros de gravedad diseñados y modelados. Cabe resaltar que muchos de estos factores de seguridad están por debajo de 1.5 por superficies de falla presentadas sobre el relleno que no tienen la misma relevancia que las que se podrían llegar a presentar sobre el suelo.

TABLA 4.50 FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS POR SLIDE PARA MUROS DE GRAVEDAD

	B=15								B=20			
	c=0 kPa		c=10 kPa		c=20 kPa		c=30 kPa		c=0 kPa	c=10 kPa	c=20 kPa	c=30 kPa
	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35
Resistencia infinita	1,368	1,621	1,368	1,622	2,756	2,835	2,961	3,473	1,193	2,215	2,4	2,556
Cohesion de 10500 kN/m2	1,368	1,621	1,368	1,622	2,756	2,835	2,96	3,472	1,193	2,215	2,4	2,556
Condición seudo-estática	0,844	1,017	1,593	1,017	1,739	2,049	0,844	1,014	0,812	1,52	1,645	1,746
Con esfuerzos	0,101	0,199	0,769	0,584	0,165	0,224	0,371	0,649	0,276	0,808	0,092	0,561
Con esfuerzos y condición seudo-estática			0	0,542	0,858	0,28	0,55			0,813	0,812	1,035

4.2.2.2. Muro Cantiléver

El ángulo de excavación para la fase 2 del Muro cantiléver 15, 20, 35 es de 55° y su factor de seguridad es de 1.278 como se indica en la *Figura 4.119*.

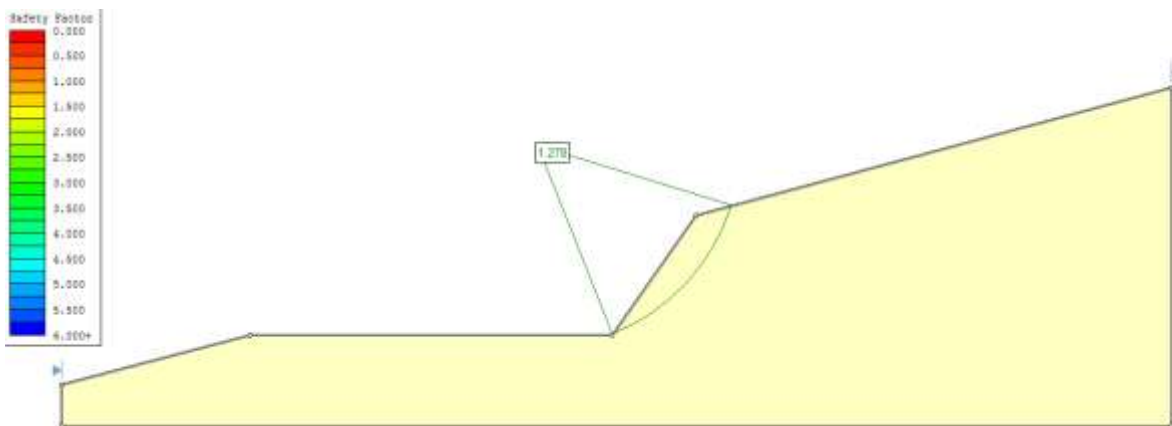


FIGURA 4.119 MURO CANTILÉVER FASE II

El factor de seguridad no varía en la fase 3 (*Figura 4.120*), la carga del muro no afecta considerablemente la estabilidad.

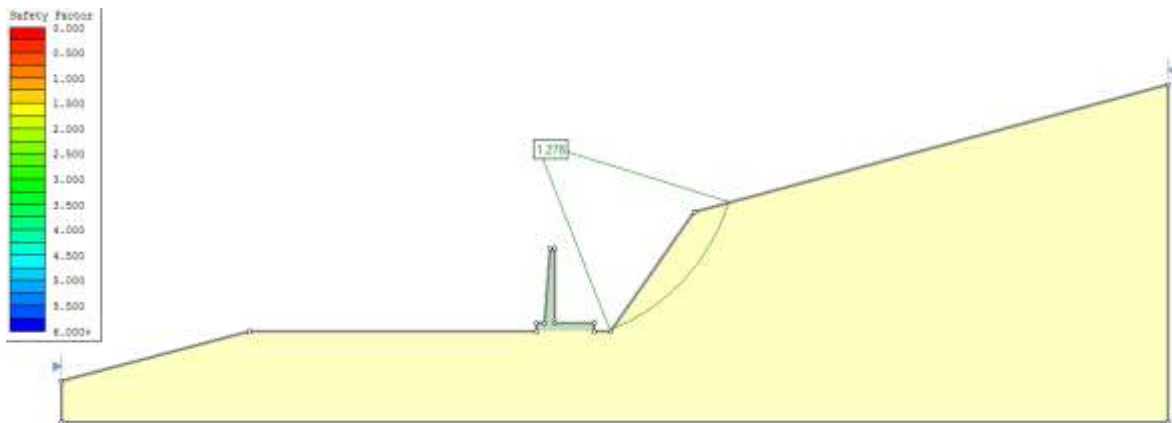


FIGURA 4.120 MURO CANTILÉVER FASE III

En la *Figura 4.121*, *Figura 4.122* y *Figura 4.123* se puede observar como el muro con alta resistencia está restringiendo las superficies de falla que atraviesan el muro dado que el

plano de falla más crítico pasa justo por debajo del muro. Las tres modelaciones cumplen con el factor de seguridad mínimo.

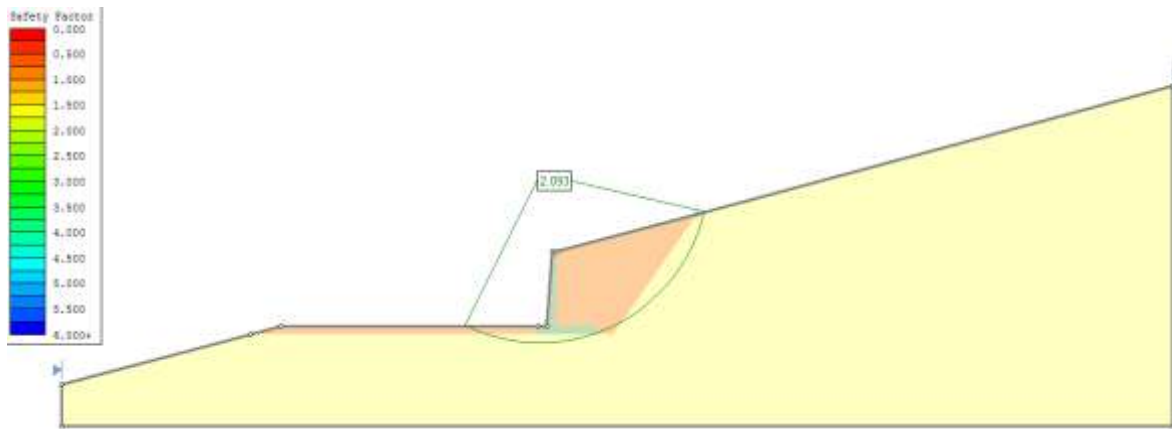


FIGURA 4.121 MURO CANTILÉVER FASE IV, CON RESISTENCIA INFINITA

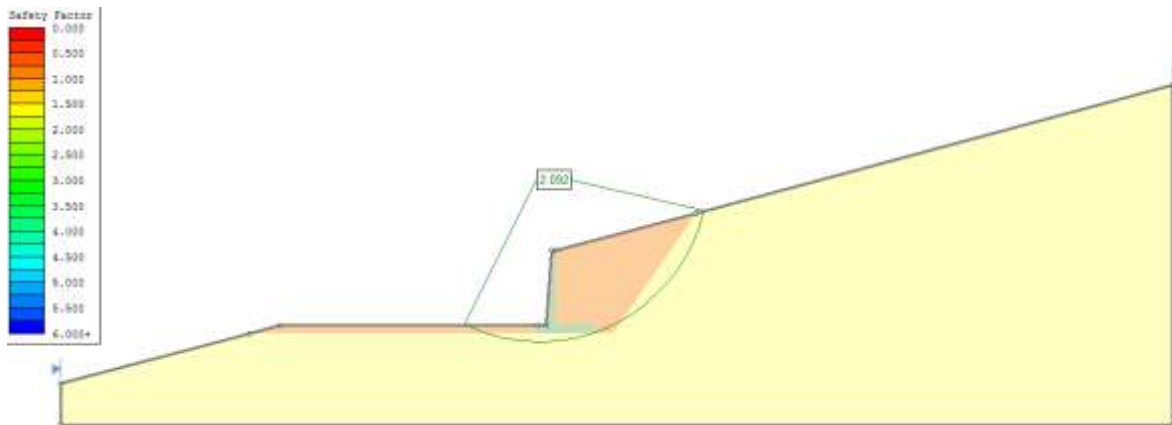


FIGURA 4.122 MURO CANTILÉVER FASE IV, NO DRENADO

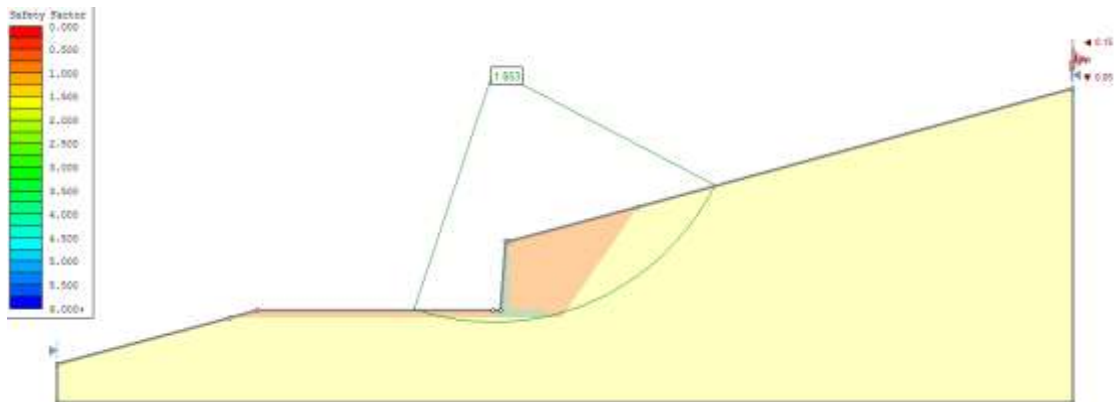


FIGURA 4.123 MURO CANTILÉVER FASE IV, NO DRENADO CON SISMO

La *Figura 4.124* presenta una concentración de planos de falla que van reduciendo su factor de seguridad al acercarse a la base del muro. Los planos de falla se desarrollan en el relleno y marcan una tendencia del relleno a fallar independientemente del suelo.

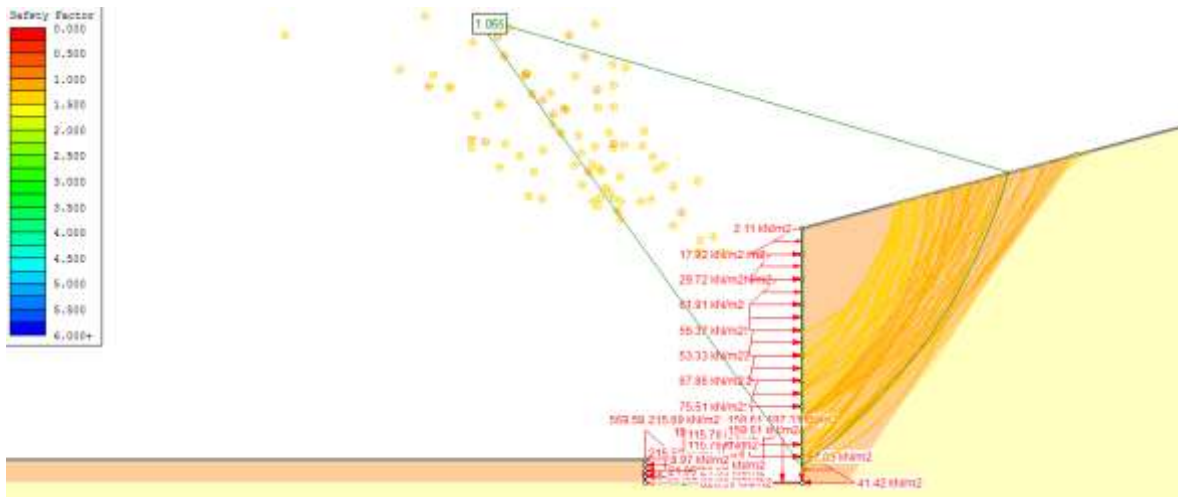


FIGURA 4.124 MURO CANTILÉVER FASE IV, CON ESFUERZOS

Como se vio en el numeral 4.2.2.1 donde se presenta el muro con esfuerzos y en condición pseudo-estática, las superficies de falla en la *Figura 4.125* se reducen y el factor de seguridad no se reduce considerablemente en comparación con la condición estática.

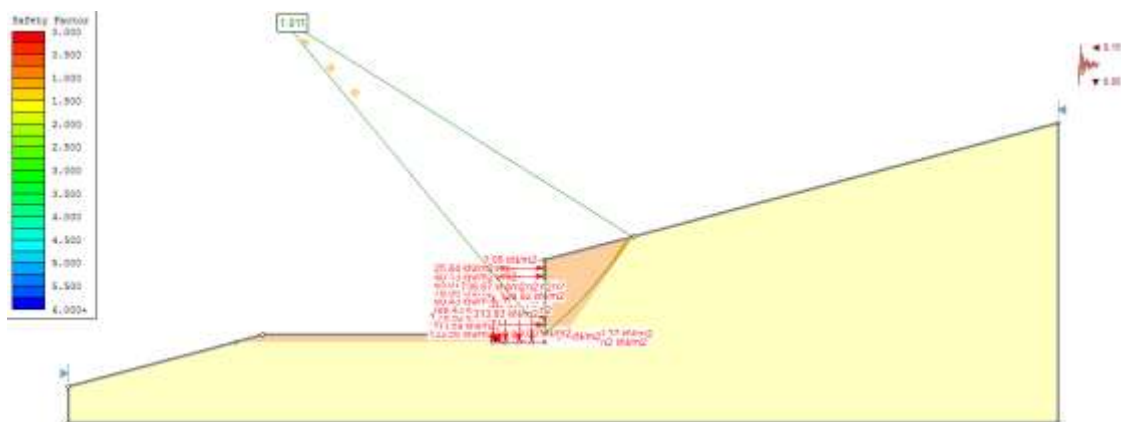


FIGURA 4.125 MURO CANTILÉVER FASE IV, CON ESFUERZOS Y SISMO

Para la condición de relleno cohesivo (Figura 4.126) se ve un incremento considerable en el factor de seguridad, muy cercano al factor de seguridad mínimo. Adicionalmente hay una reducción en la cantidad de superficies de falla.

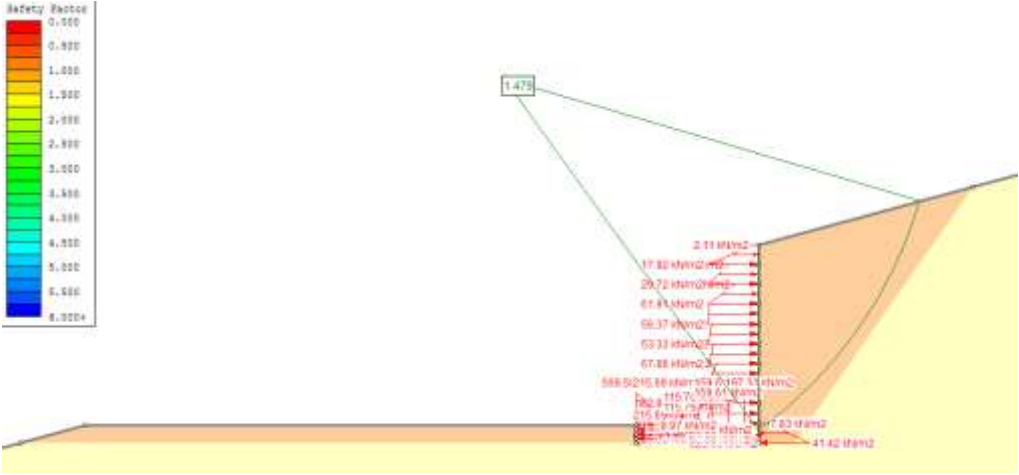


FIGURA 4.126 MURO CANTILÉVER FASE IV, CON ESFUERZOS Y RELLENO COHESIVO

Al aumentar los esfuerzos como se ve en la Figura 4.127, solo se generan superficies de falla cerca de la corona del muro, estas superficies de falla están directamente relacionadas con la cohesión del relleno. También se puede observar que los esfuerzos están restringiendo superficies de falla a lo largo del espaldar del muro.

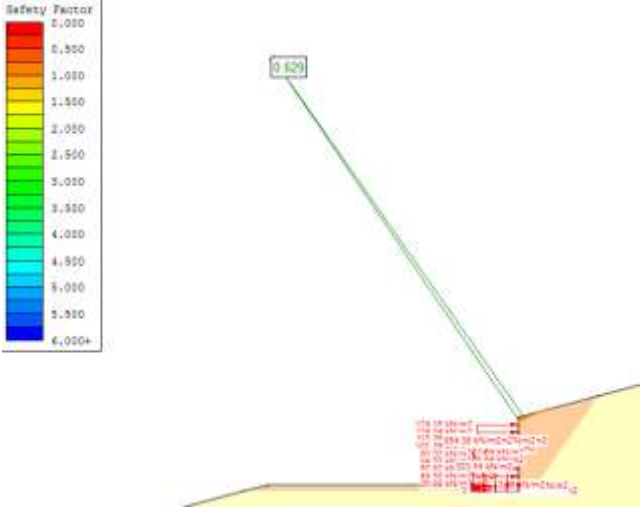


FIGURA 4.127 MURO CANTILÉVER FASE IV, CON ESFUERZOS AUMENTADOS AL 150%

En la *Figura 4.128* se puede observar como el modelo cumple con el factor de seguridad mínimo al aumentar los esfuerzos y la cohesión del relleno. Adicionalmente se puede observar el plano de falla más crítico que pasa por el muro, el relleno y el suelo.

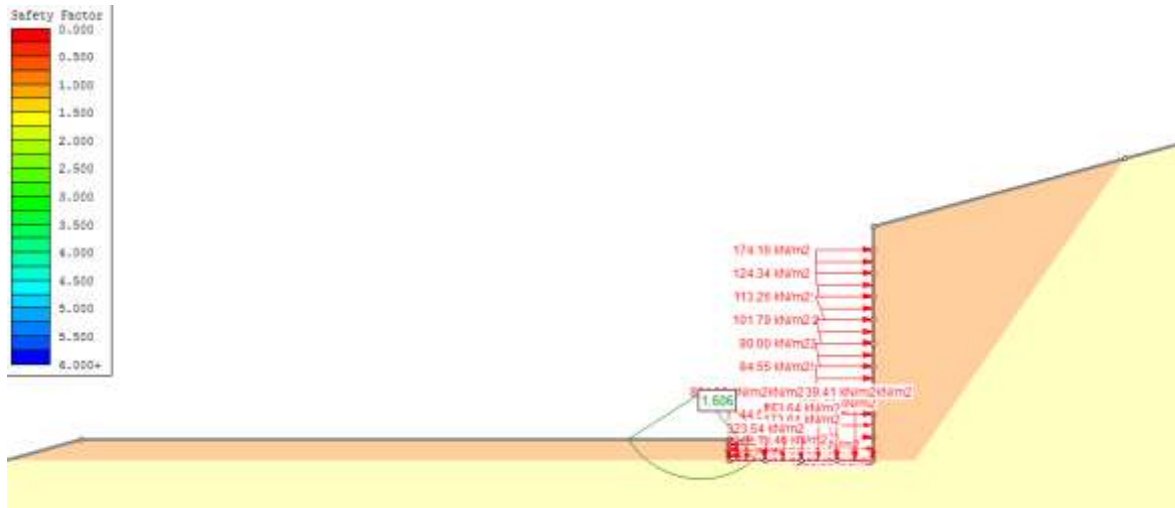


FIGURA 4.128 MURO CANTILÉVER FASE IV, CON ESFUERZOS AUMENTADOS AL 150% Y RELLENO COHESIVO

En la *Tabla 4.51* se presentan los factores de seguridad para los modelos realizados de muros cantiléver.

TABLA 4.51 FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS POR SLIDE PARA MUROS CANTILÉVER

	B=15								B=20			
	c=0 kPa		c=10 kPa		c=20 kPa		c=30 kPa		c=0 kPa	c=10 kPa	c=20 kPa	c=30 kPa
	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35
Resistencia infinita			1,368	1,621	1,368	2,093	2,217	2,436			1,193	2,237
Cohesion de 10500 kN/m2			1,368	1,621	1,368	2,092	2,211	2,435			1,193	2,22
Condición seudo-estática			0,858	1,017	0,858	1,653	1,667	1,874			0,812	1,685
Con esfuerzos			0,877	1,053	0,319	1,065	1,237	0,966			0,748	1,179
Con esfuerzos y condición seudo-estática						1,011		1,017				

4.2.2.3. Muro gaviones

El ángulo de excavación para la fase 2 del Muro gaviones 20, 10, 35 es de 60° y su factor de seguridad es de 1.273 como se indica en la *Figura 4.129*.

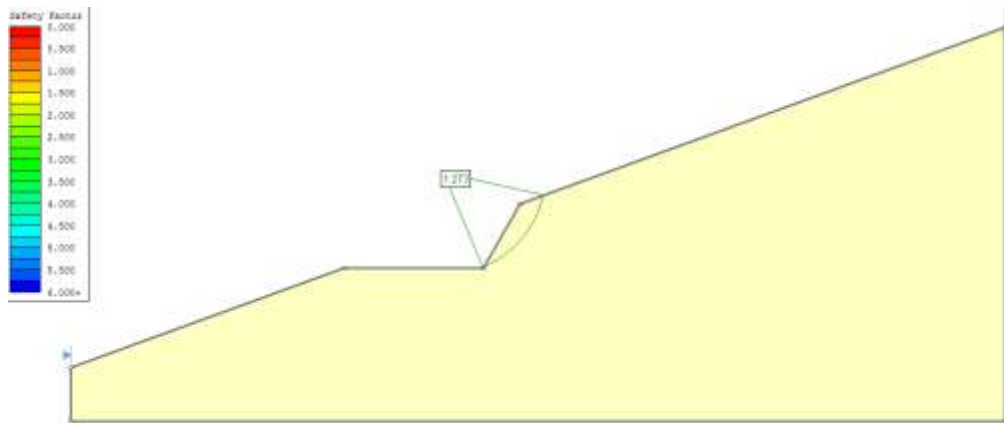


FIGURA 4.129 MURO GAVIONES FASE II

La carga del muro en la *Figura 4.130* hace que el factor de seguridad se vea reducido pero no considerablemente.

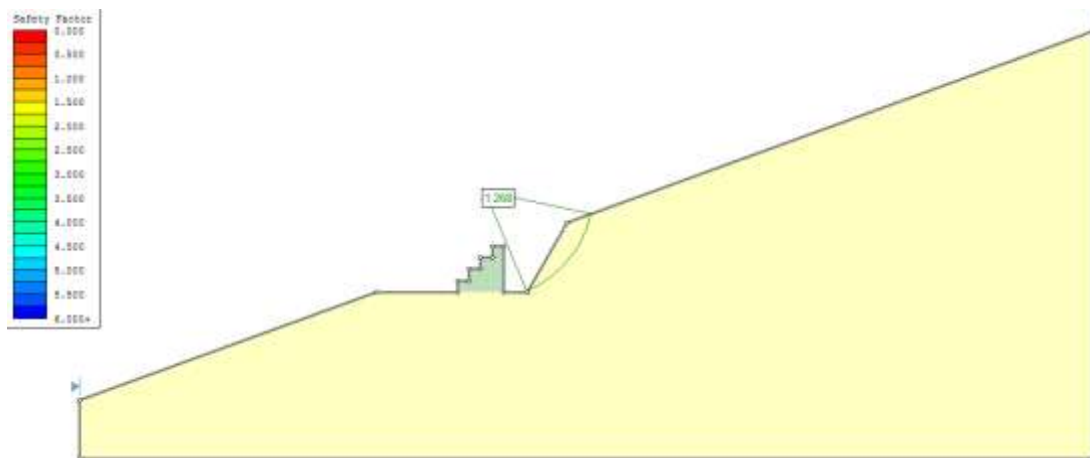


FIGURA 4.130 MURO GAVIONES FASE III

Los muros presentados en la *Figura 4.131*, la *Figura 4.132* y la *Figura 4.133* restringen las superficies de falla q los atraviesan y adicionalmente el terreno tiene características favorables para la contención del terreno.

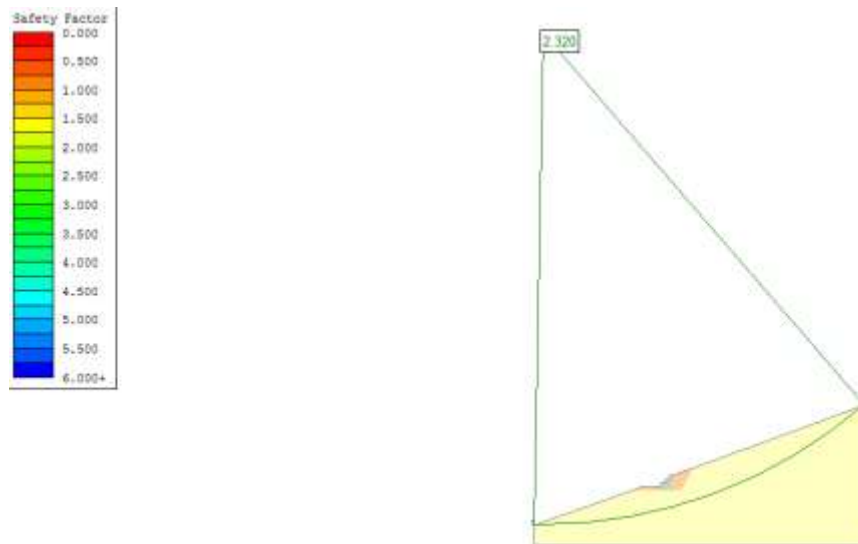


FIGURA 4.131 MURO GAVIONES FASE IV, RESISTENCIA INFINITA

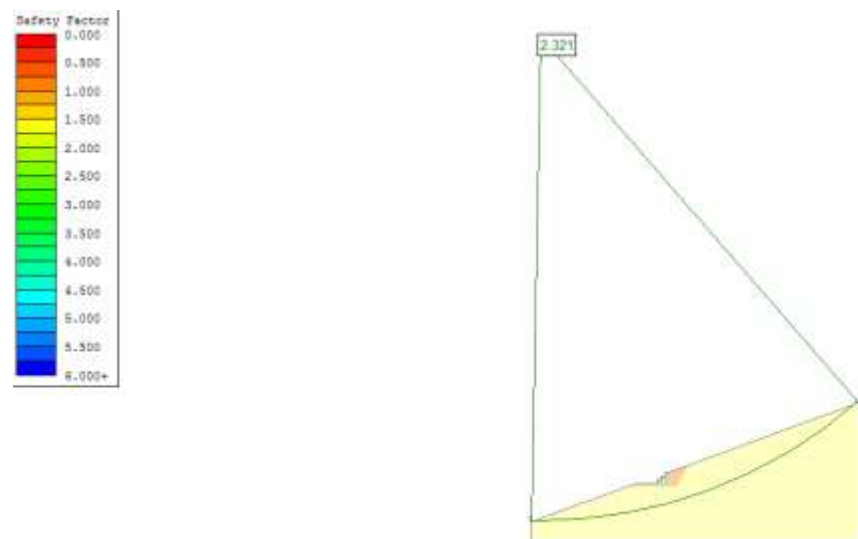


FIGURA 4.132 MURO GAVIONES FASE IV, NO DRENADO

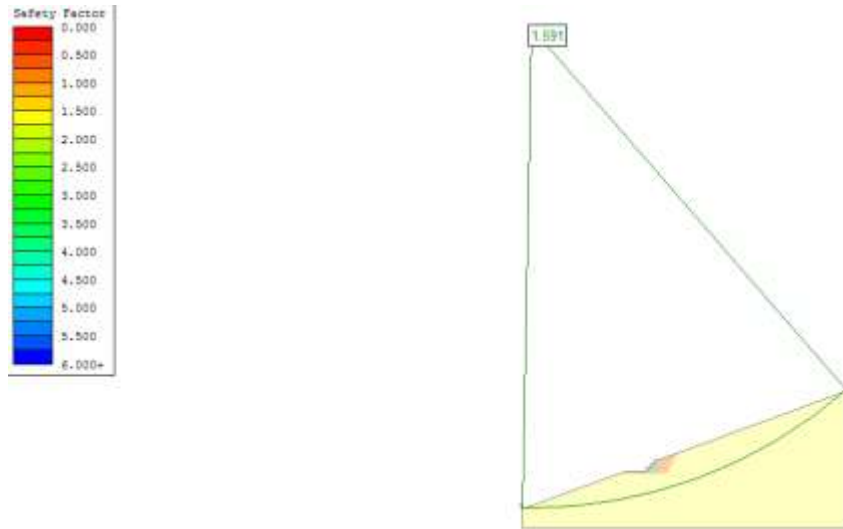


FIGURA 4.133 MURO GAVIONES FASE IV, NO DRENADO CON SISMO

En la *Figura 4.134* se pueden observar superficies de falla con un factor de seguridad menor al requerido. Todos los planos de falla se presentan sobre el relleno.

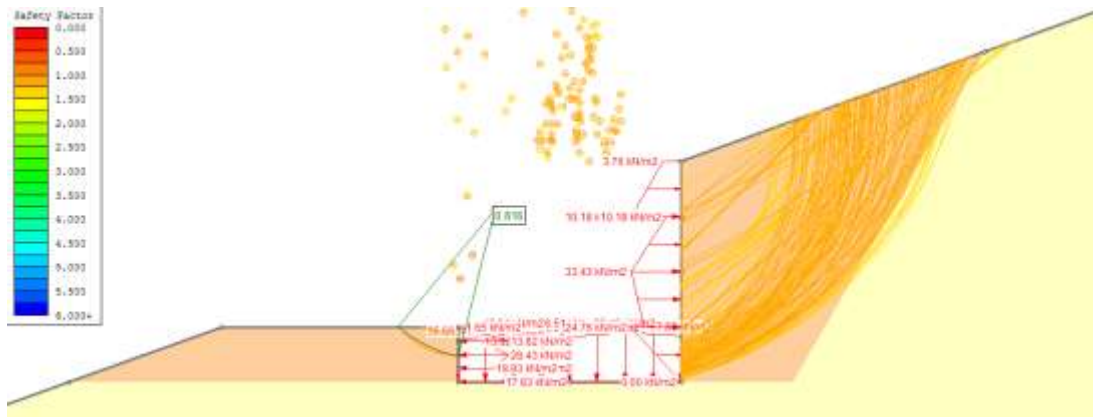


FIGURA 4.134 MURO GAVIONES FASE IV, CON ESFUERZOS

En la *Figura 4.135* se muestra la concentración de dos grupos de superficies de falla ubicados en el relleno e inferiores al factor de seguridad mínimo.

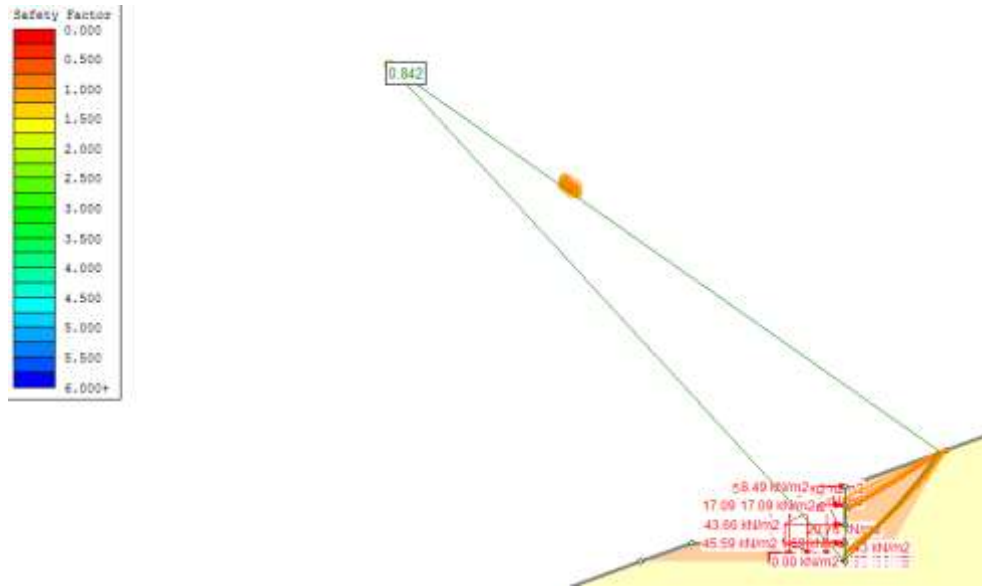


FIGURA 4.135 MURO GAVIONES FASE IV, CON ESFUERZOS Y SISMO

Al aumentar la cohesión del relleno (*Figura 4.136*) se puede observar un incremento en el factor de seguridad considerable y una reducción en las superficies de falla. El modelo no cumple con el factor de seguridad mínimo.

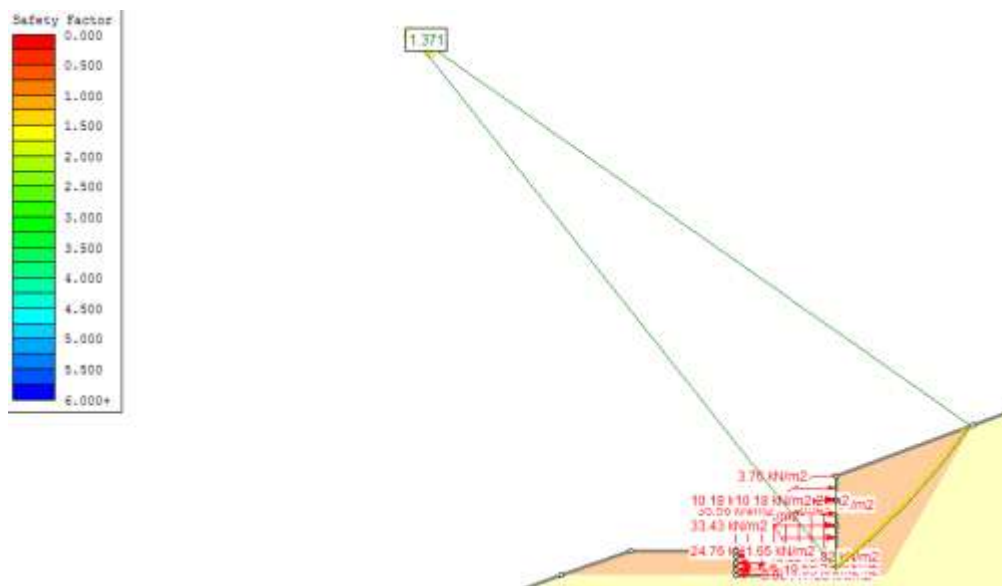


FIGURA 4.136 MURO GAVIONES FASE IV, CON ESFUERZOS Y RELLENO COHESIVO

Al aumentar los esfuerzos (*Figura 4.137*) se puede ver una falla en el costado frontal del muro causado por las cargas aplicadas y no por la falla del muro.

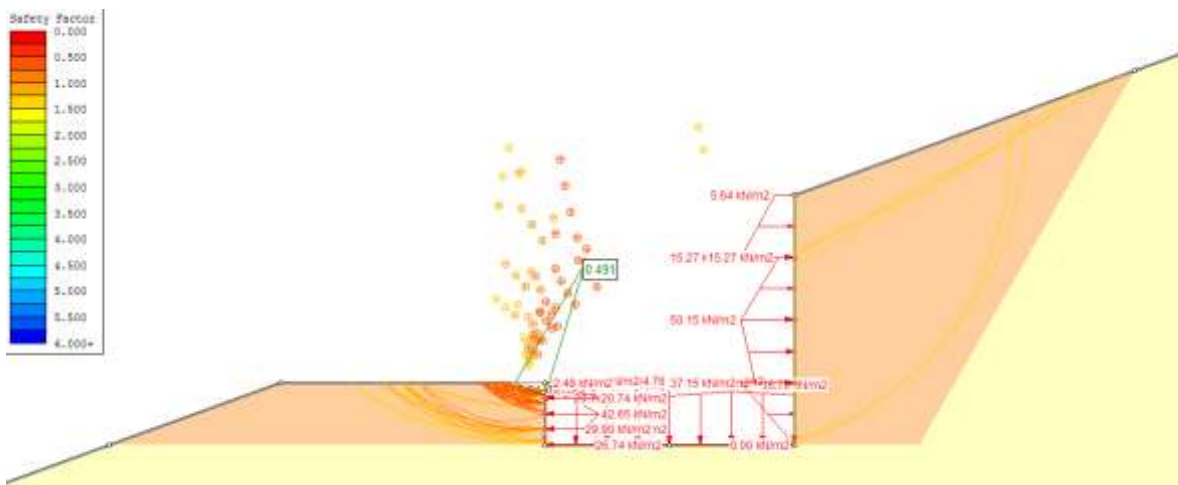


FIGURA 4.137 MURO GAVIONES FASE IV, CON ESFUERZOS AUMENTADOS AL 150%

Al aumentar los esfuerzos y la cohesión se tiene un factor de seguridad que cumple con el requerido, además se presenta el plano de falla crítica que se desarrolla a lo largo del relleno y atraviesa el muro.

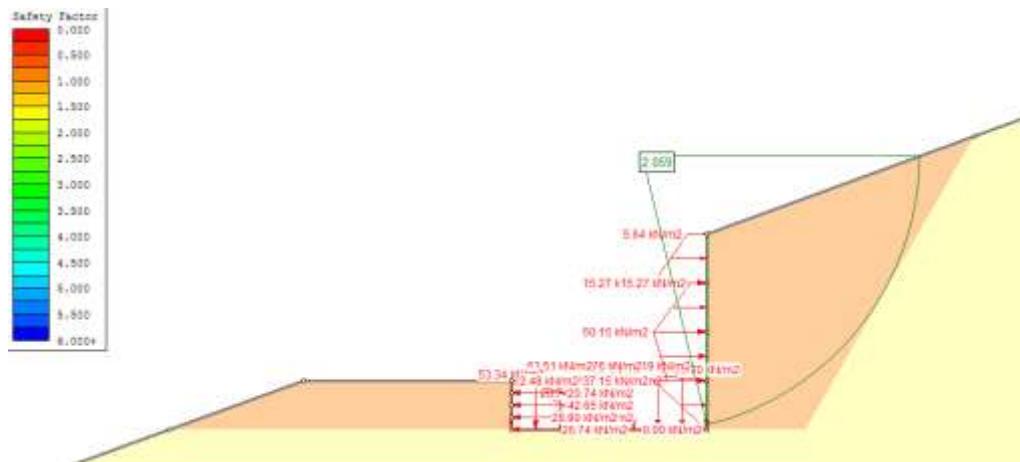


FIGURA 4.138 MURO GAVIONES FASE IV, CON ESFUERZOS AUMENTADOS AL 150% Y RELLENO COHESIVO

En la *Tabla 4.28* se presentan los factores de seguridad para los modelos realizados de muros gaviones.

TABLA 4.52 FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS POR SLIDE PARA MURO GAVIONES

	B=15								B=20			
	c=0 kPa		c=10 kPa		c=20 kPa		c=30 kPa		c=0 kPa	c=10 kPa	c=20 kPa	c=30 kPa
	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35
Resistencia infinita		1,62	1,367	1,621	1,368	1,621	1,368	1,621	1,188	2,32		
Cohesion de 1716 kN/m2		1,619	1,367	1,621	1,368	1,621	1,368	1,621	1,187	2,321		
Condición seudo-estática		1,013	0,855	1,014	0,855	1,014	2,057	1,014	0,808	1,591		
Con esfuerzos		0,683	0,726	0,751	0,497	0,825	0,832	0,853	0,853	0,816		
Con esfuerzos y condición seudo-estática			0,78	0,742	0,713	0,734	0,734	0,722		0,842		

4.2.2.4. Muro pantalla

En la *Figura 4.139* se presenta el muro (desarrollado como material no drenado con cohesión de 10500 kN/m²) que por su alta resistencia está restringiendo superficies de falla. Este modelo se realizó para ubicar las superficies de falla y diseñar los anclajes de acuerdo a esto.

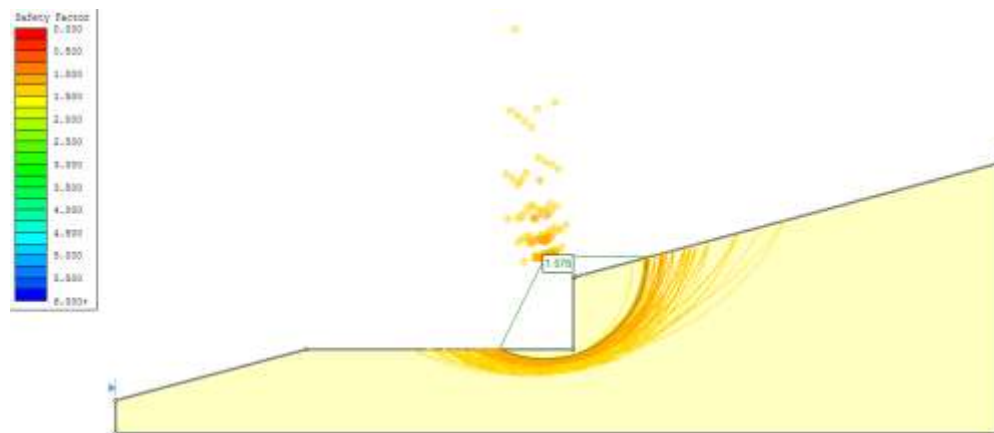


FIGURA 4.139 MURO PANTALLA SIN ANCLAJES

El muro presentado en la *Figura 4.140* presenta los anclajes con el bulbo detrás de la superficie de falla crítica. El muro cumple con el factor de seguridad mínimo.

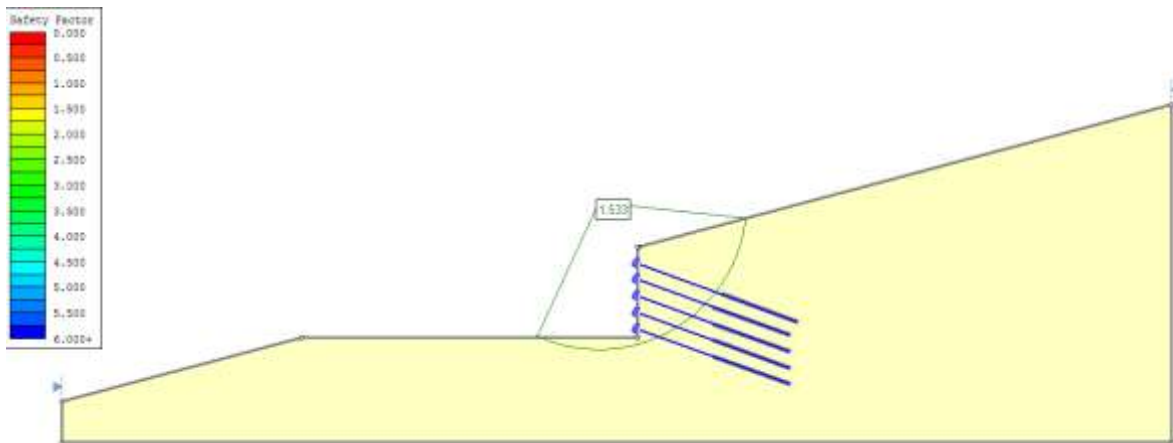


FIGURA 4.140 MURO PANTALLA CON ANCLAJES

Para la condición seudo-estática (*Figura 4.141*), el muro cumple con el factor de seguridad mínimo y la superficie de falla crítica se encuentra en su mayor parte detrás de los bulbos de los anclajes.

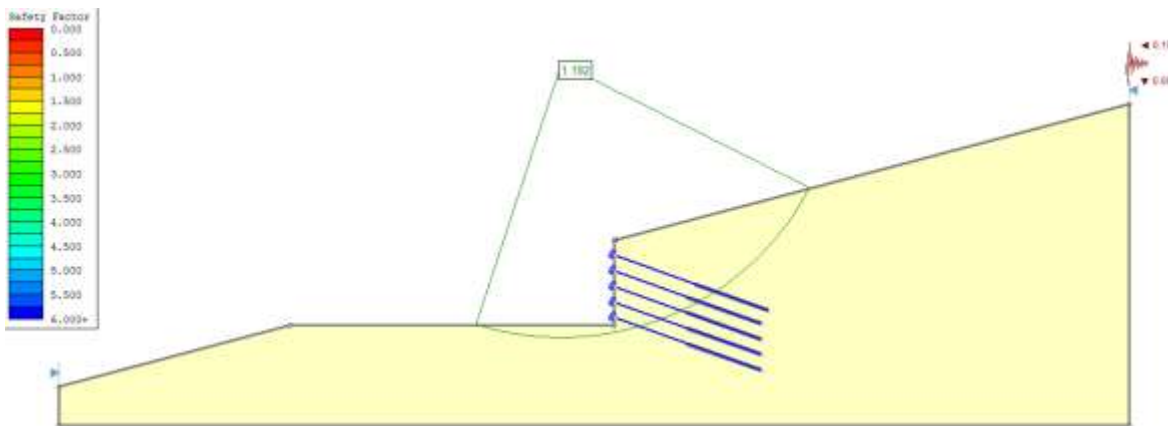


FIGURA 4.141 MURO PANTALLA CON ANCLAJES Y SISMO

Dado que en el muro pantalla no se modela con rellenos debido a su proceso constructivo, se puede observar en la *Figura 4.142* como los planos de falla ocurren porque los esfuerzos no tienen la magnitud suficiente para alcanzar el factor de seguridad mínimo.

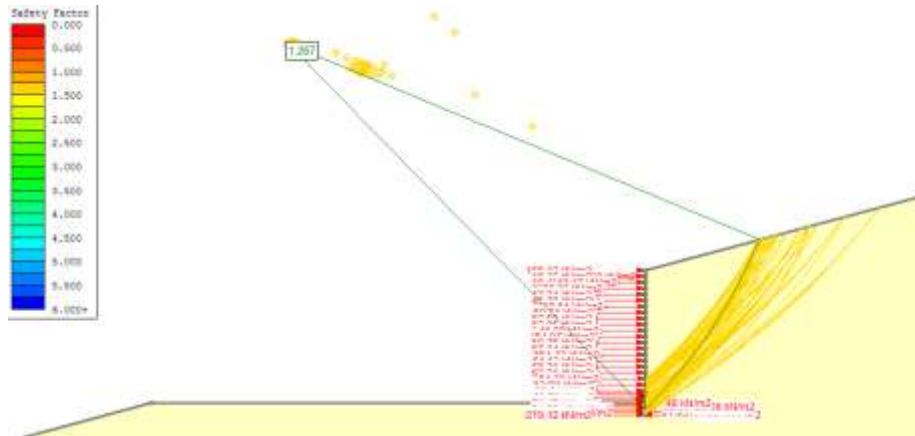


FIGURA 4.142 MURO PANTALLA CON ESFUERZOS

Para la condición seudo-estática con esfuerzos (*Figura 4.143*), el factor de seguridad disminuyó un poco con respecto a la condición estática pero aún cumple con el requerimiento mínimo.

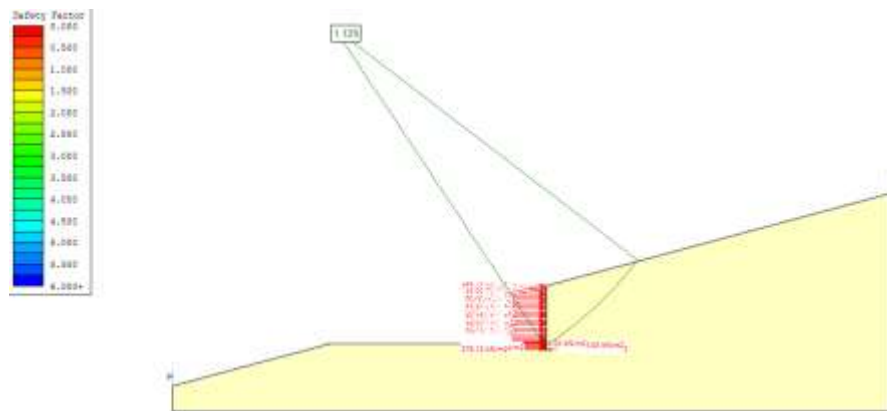


FIGURA 4.143 MURO PANTALLA CON ESFUERZOS Y SISMO

Al aumentar los esfuerzos (*Figura 4.144*) se restringen superficies de falla que se presentaban en el modelo con esfuerzos sin modificar, adicionalmente el factor de seguridad se incrementó considerablemente y cumple con el requerimiento mínimo.



FIGURA 4.144 MURO PANTALLA CON ESFUERZOS AUMENTADOS AL 150%

En la *Tabla 4.29* se presentan los factores de seguridad para los modelos realizados de muros cantiléver. Cabe resaltar que los muros al ser representados como material no drenado con cohesión alta, restringen superficies de falla que pueden llegar a ser críticas para la estructura, pero de acuerdo al modelo, sin anclajes cumplen con el factor de seguridad mínimo.

TABLA 4.53 FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS POR SLIDE PARA MUROS PANTALLA

	B=15								B=20			
	c=0 kPa		c=10 kPa		c=20 kPa		c=30 kPa		c=0 kPa	c=10 kPa	c=20 kPa	c=30 kPa
	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=30	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35	phi=35
Sin anclajes	1,078	1,309	1,339	1,567	1,594	1,823	1,839	2,073	1,283	1,512	1,737	1,957
Con anclajes	1,533	1,602	1,62						1,539			
Condición seudo-estática	1,192	1,31	1,299	1,321	1,308	1,513	1,498	1,7		1,29	1,447	1,607
Con esfuerzos	1,267	1,194	1,3						1,161			
Con esfuerzos y condición seudo-estática	1,129	1,223	1,094						1,098			

4.2.3. Simulación estructural con elementos finitos por medio de Sap2000

Se realizó el diseño a flexión para dos muros cantiléver de acuerdo a las cargas obtenidas por Plaxis para la condición seudo-estática y a las presiones laterales definidas por el método de Mononobe-Okabe.

En la *Figura 4.145*, *Figura 4.146*, *Figura 3.147* y *Figura 4.148* se presentan los momentos máximos obtenidos para la base y el vástago del muro a partir de los esfuerzos obtenidos por Plaxis para el Muro cantiléver 15, 20, 35 y 15, 30, 35

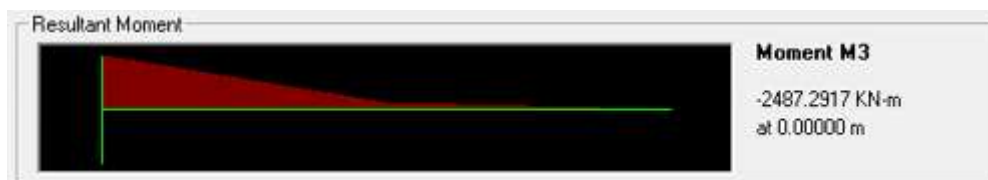


FIGURA 4.145 MOMENTO MÁXIMO MURO CANTILÉVER 15, 20, 35 EN EL VÁSTAGO CON ESFUERZOS DE PLAXIS



FIGURA 4.146 MOMENTO MÁXIMO MURO CANTILÉVER 15, 20, 35 EN LA BASE CON ESFUERZOS DE PLAXIS

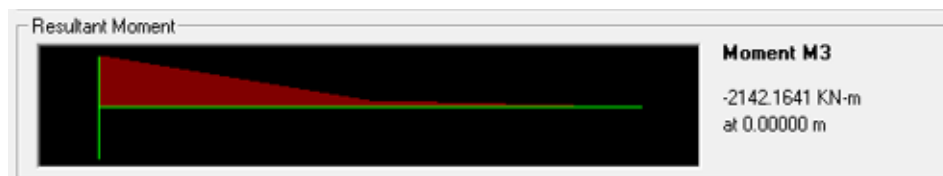


FIGURA 3.147 MOMENTO MÁXIMO MURO CANTILÉVER 15, 30, 35 EN EL VÁSTAGO CON ESFUERZOS DE PLAXIS

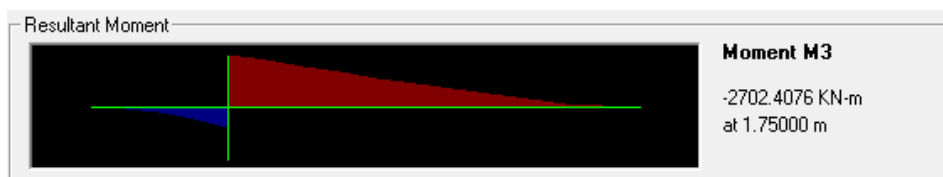


FIGURA 4.148 MOMENTO MÁXIMO MURO CANTILÉVER 15, 30, 35 EN LA BASE CON ESFUERZOS DE PLAXIS

En la *Figura 4.149*, *Figura 4.150*, *Figura 4.151* y *Figura 4.152* se presentan los momentos máximos obtenidos para la base y el vástago del muro a partir de los esfuerzos obtenidos por el método de Mononobe-Okabe para el Muro cantiléver 15, 20, 35 y 15, 30, 35.

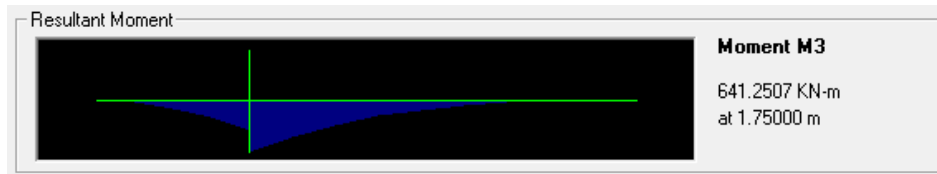


FIGURA 4.149 MOMENTO MÁXIMO MURO CANTILÉVER 15, 30, 35 EN LA BASE CON ESFUERZOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE MONONOBE-OKABE

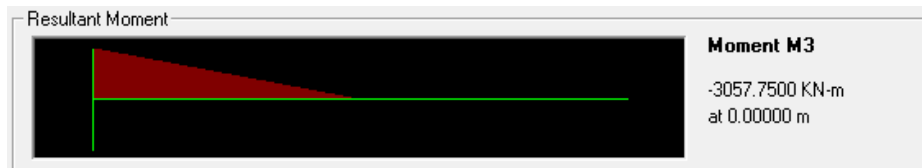


FIGURA 4.150 MOMENTO MÁXIMO MURO CANTILÉVER 15, 30, 35 EN EL VÁSTAGO CON ESFUERZOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE MONONOBE-OKABE

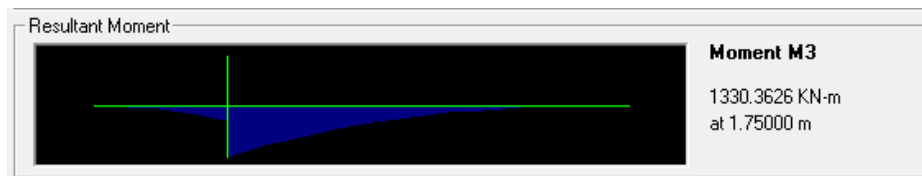


FIGURA 4.151 MOMENTO MÁXIMO MURO CANTILÉVER 15, 20, 35 EN LA BASE CON ESFUERZOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE MONONOBE-OKABE

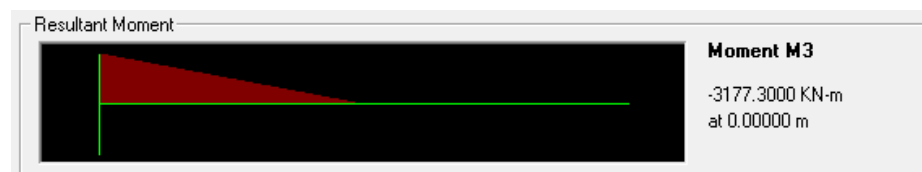


FIGURA 4.152 MOMENTO MÁXIMO MURO CANTILÉVER 15, 20, 35 EN EL VÁSTAGO CON ESFUERZOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE MONONOBE-OKABE

En la *Tabla 4.54* se presentan los pasos para el diseño a flexión realizado para el vástago del muro y el despiece correspondiente para resistir los momentos últimos actuantes obtenidos por los dos métodos y en la

Tabla 4.55 realiza el mismo procedimiento para la base del muro. A partir de estas tablas se puede deducir que el diseño a flexión a partir de los esfuerzos obtenidos por las

modelaciones de Plaxis resulta con una menor cuantía que el diseño a flexión a partir de los esfuerzos tomados por el método de Mononobe-Okabe.

TABLA 4.54 DISEÑO A FLEXIÓN DE MURO CANTILÉVER VÁSTAGO

		Muro Cantiléver														
		f'c (Mpa)	fy (Mpa)	ϕ	b (m)	h (m)	d (m)	m	Mu (kN-m)	Rn (kPa)	ρ	As teórico (cm2)	Barras	As real (cm2)	a (m)	ϕ Mn (kN-m)
15, 20, 35	Plaxis	21	420	0,9	1	1,2	1,13	23,53	2487,3	1947,91	0,0055	62,27	8 N° 10 @ 14	63,52	0,15	2537,30
	Mononobe-Okabe	21	420	0,9	1	1,2	1,13	23,53	3177	2488,06	0,0072	81,25	11 N° 10 @ 11	87,34	0,19	3415,05
15, 30, 35	Plaxis	21	420	0,9	1	1,2	1,13	23,53	2702,4	2116,38	0,0060	68,09	9 N° 10 @ 12,5	71,46	0,16	2835,95
	Mononobe-Okabe	21	420	0,9	1	1,2	1,13	23,53	3057	2394,08	0,0069	77,88	10 N° 10 @ 11	79,4	0,18	3116,48

TABLA 4.55 DISEÑO A FLEXIÓN DE MURO CANTILÉVER BASE

		Muro Cantiléver														
		f'c (Mpa)	fy (Mpa)	ϕ	b (m)	h (m)	d (m)	m	Mu (kN-m)	Rn (kPa)	ρ	As teórico (cm2)	Barras	As real (cm2)	a (m)	ϕ Mn (kN-m)
15, 20, 35	Plaxis	21	420	0,9	1	1,2	1,13	23,53	1791,4	1402,89	0,0039	43,95	9 N° 8 @ 12,5	45,63	0,10	1859,86
	Mononobe-Okabe	21	420	0,9	1	1,2	1,13	23,53	641,25	502,19	0,0033	37,29	8 N° 8 @ 14	40,56	0,09	1665,22
15, 30, 35	Plaxis	21	420	0,9	1	1,2	1,13	23,53	2017,9	1580,34	0,0044	49,83	10 N° 8 @ 11	50,7	0,12	2053,25
	Mononobe-Okabe	21	420	0,9	1	1,2	1,13	23,53	1330,4	1041,87	0,0033	37,29	9 N° 8 @ 12,5	45,63	0,09	1873,37

En la Figura 4.153 se describe el despiece para el muro cantiléver 15, 20, 35 en el que se denota el refuerzo longitudinal requerido para la base y el vástago y adicionalmente se incluyen barras longitudinales y transversales constructivas para cumplir con el refuerzo mínimo requerido para el muro con estas dimensiones. Se toma un recubrimiento de 7 cm para proteger el acero de refuerzo y la longitud de las barras depende de las dimensiones del muro y el gancho a 90° depende del diámetro de la barra.

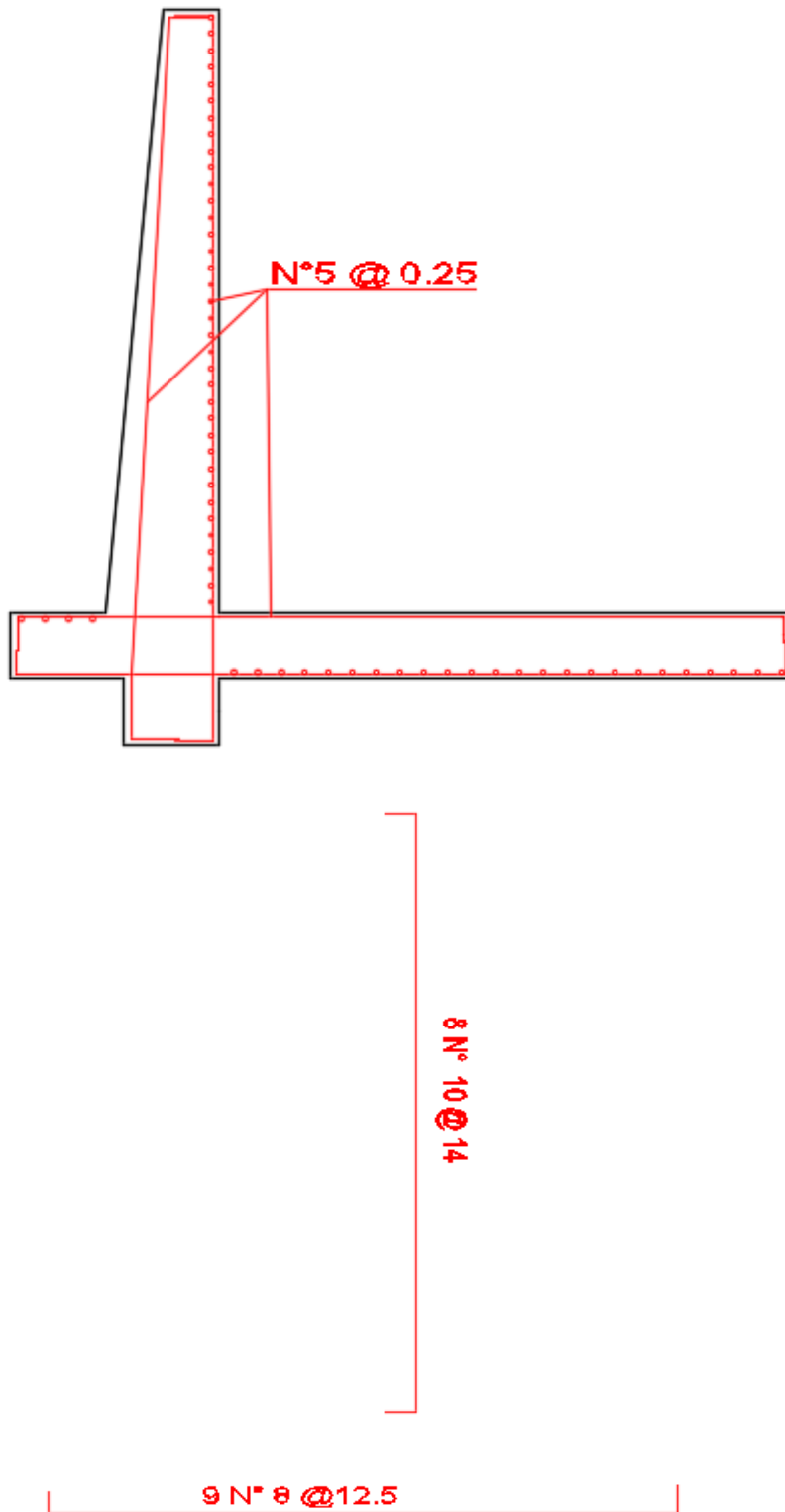


FIGURA 4.153 DESPIECE MURO CANTILEVER 15, 20, 35 CON ESFUERZOS DE PLAXIS

5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se pudo concluir lo siguiente:

- Las metodologías analíticas pueden ser menos próximas a la realidad en comparación a los elementos finitos en el cálculo de las presiones laterales generadas en el suelo, debido a que no tienen en cuenta el proceso constructivo, las deformaciones, la interacción suelo-estructura y las propiedades de la estructura. El análisis por elementos finitos evalúan estas condiciones que permite obtener diagramas de esfuerzos y presiones laterales con mejor estimación a la realidad.
- Para el dimensionamiento adecuado de muros de contención los cuales no solo se ven afectador por presiones de tierra estática o pseudo-estática, sino que también puede ser influenciada por los parámetros del relleno de la estructura y sus etapas constructivas, se recomienda la simulación en un programa de elementos finitos, ya que facilita representar el proceso constructivo, además de que consideran la evolución de los esfuerzos y las deformaciones de cada fase, aproximándose más a la realidad.
- Los efectos sísmicos siempre deben ser considerados para el diseño de estructuras de contención, con el fin de asegurar que se diseña para la condición más crítica. A pesar de que todos los muros fueron diseñados teniendo cargas dinámicas, por medio de Mononobe-Okabe, muchas de las estructuras colapsaron o no eran estables al modelarlo por medio de elementos finitos para esta condición.
- La modelación en Slide V6.0 de un muro de contención como un material de resistencia infinita o un material no drenado con cohesión igual a $f'c/2$, restringe las superficies de falla.
- La modelación en Slide V6.0 de un muro de contención como esfuerzos sobre el terreno permite superficies de falla que atraviesan el muro.

- El aumento en la cohesión del relleno es más efectivo para incrementar el factor de seguridad que el aumento de los esfuerzos cuando se modela en Slide V6.0
- En Slide V6.0, cuando se incrementan los esfuerzos y la cohesión del relleno, se obtiene un modelo con factores de seguridad similares a los que se obtienen cuando se modela el muro como un material de resistencia infinita, pero permite que se presenten superficies de falla a través del muro.
- El diseño a flexión por medio de los esfuerzos obtenidos por Plaxis, para la condición pseudo-estática, es de menor cuantía que el diseño a flexión considerando las cargas de Mononobe-Okabe.
- Para la modelación de muros pantalla en Slide V6.0, si se considera el muro como un material de resistencia infinita o un material no drenado con cohesión igual a $f'c/2$, los resultados van a discrepar con los de Plaxis en la medida en que en Slide V6.0 el muro pantalla tiende dar factores de seguridad superiores a los de Plaxis para el mismo muro.

6. Resumen y perspectiva

6.1. Resumen

Los muros de contención por lo general son sometidos a cargas que no son calculadas adecuadamente, por esta razón surge la necesidad de implementar el uso de herramientas computacionales para obtener resultados más aproximados a la realidad. Para determinar el diseño de cada estructura es indispensable considerar los cambios de los esfuerzos y las deformaciones en cada una de las fases de construcción y analizar la interacción suelo-estructura.

6.2. Perspectivas

- Se debe tener cuidado al definir las condiciones de frontera del modelo, es importante que el modelo sea suficiente grande para simular la situación real y no solo concentrarse en los

resultados de un lugar en específico. Se pueden presentar fallas en el relleno de la estructura, como se evidenció en los diferentes tipos de muro.

- Al modelar el relleno, se deben considerar técnicas de mejoramiento de suelos para incrementar su cohesión y que el modelo presente resultados más aproximados a la realidad.
- Se recomienda modelar los muros de contención incluyendo las fases constructivas ya que la distribución de esfuerzos y deformaciones varía de acuerdo a estas fases.
- Para las simulaciones en Plaxis 2D se recomienda la utilización de interfaces que permite delimitar la interacción suelo-estructura con el fin de obtener resultados y diagramas de presiones laterales bien definidos. Con la utilización de la interface no es necesario ser tan riguroso en el refinamiento de la malla de elementos finitos ya que se obtienen resultados y diagramas similares. Si se desea diagramas laterales mayor definidos, se recomienda definir la matriz global y no refinar en zonas específicas.

7. Referencias

- Almeida, Persio Leister de. *Obras de contención, manual técnico*. MACCAFERRI, 2013.
- Arcotierra, S.L. «Ayuntamiento de Jerez.» *Página web del Ayuntamiento de Jerez*. 1 de Julio de 2007.
http://www.jerez.es/fileadmin/Documentos/Departamento_contratacion_08/Departamento_contratacion09/Urbanizacion_ARI-F11_SAN_JUAN_DE_DIOS_1o_DESGL/_3_-3UR08-1o_DESG._SAN_JUAN_DE_DIOS_-PROYECTO.pdf.
- Brinkgreve, R.B.J. *Plaxis Versión 8 Manual de Referencia*. Delft: Plaxis b.v., 2004.
- Camargo Garcia, Carolina Andrea, y Alba Lucía Gonzalez Escamilla. *Modelamiento de Estructuras de Contención Lateral Mediante Programa de Elementos Finitos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011.
- Chris R.I. Clayton, Rick I. Woods, Andrew J. Bond, Jarbas Milititsky. *Earth Pressure and Earth-Retaining Structures*. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- D.D. Theodorakopoulos, A.P. Chassiakos, D.E. Beskos. «Dynamic pressures on rigid cantilever walls retaining poroelastic soil media. Part I. First method of solution.» *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001.
- Das, Braja M. *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. United States: Chris Carson, 2007.
- . *Principles of Geotechnical Engineering*. Toronto: Chris Carson, 2005.

- Díaz Díaz, Yamyle Abigail. *Plaxis como Herramienta de Modelación para la Solución de Algunos Problemas Geotécnicos Reales en la Ciudad de Punta Arenas*. Punta Arenas: Universidad de Magallanes, 2008.
- Gomez, Herney Gustavo. «METODOLOGIA DE DISEÑO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL PARA MUROS DE CONTENCIÓN CON CONTRAFUERTE EN EL TRASDOSO, BASADOS EN UN PROGRAMA DE COMPUTO.» *Escuela Colombiana de Ingeniería*, 2013.
- Gutiérrez Gomez, Juan Sebastián, y Carlos Eduardo Rodríguez Pineda. «Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.» *Página web de Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*. 8 de August de 2015.
[http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2013/cf/siisg/memorias/documentos/2_6 Muros_contencion.pdf](http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2013/cf/siisg/memorias/documentos/2_6_Muros_contencion.pdf).
- Joseph E. Bowles, P.E., S.E. *Foundation Analysis and Design*. Singapore: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
- L. Widulinski, J. Tejchman, J. Kozicki, D. Lesniewska. «Discrete simulations of shear zone patterning in sand in earth pressure problems of a retaining wall.» *International Journal of Solids and Structures*, 2011.
- Murthy, V. N. S. *Geotechnical Engineering Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. New York: CRC Press, 2002.
- NSR-10. Bogotá D.C.: AIS, 2012.
- P.N. Psarropoulos, G. Klonaris, G. Gazetas. «Seismic earth pressures on rigid and flexible retaining walls.» *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004.
- Pappin, Y.W., B. Simpson, P.J. Felton, y C. Raison. «Numerical Analysis of Flexible Retaining Walls.» Londres, 1985.
- Suarez, Jaime. *Deslizamientos: Técnicas de remediación*. Geotecnologías S.A.S., 2015.
- Xinpo Li, Yong Wu, Siming He. «Seismic stability analysis of gravity retaining walls.» *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010.