

**COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y
EQUILIBRIO LÍMITE EN LA MODELACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES
UTILIZANDO LOS SOFTWARE PLAXIS Y SLOPE/W**

**RONALD GUSTAVO RAMIREZ CONTRERAS
YOVANNY SALCEDO BARRETO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISIOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2006**

**COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y
EQUILIBRIO LÍMITE EN LA MODELACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES
UTILIZANDO LOS SOFTWARE PLAXIS Y SLOPE/W**

**RONALD GUSTAVO RAMIREZ CONTRERAS
YOVANNY SALCEDO BARRETO**

**Tesis de grado presentada como requisito
para optar al título de ingeniero civil**

**Director
Jaime Suárez Díaz
Ingeniero civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISIOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2006**

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A Dios, quien me dio la perseverancia y la fortaleza para llegar hasta este momento.

A mi madre, mi padre y a mi hermano. Por su gran afecto y apoyo, por alentarme siempre a seguir adelante y sembrar en mi el valor de la responsabilidad y el espíritu de superación.

A mi familia, por creer en mí.

A Emilse Vergara e hijas, por brindarme apoyo y recibirme como a un miembro más de su familia, su labor diaria fue quien hizo más fácil el camino para alcanzar esta meta. Gracias.

Ronald Gustavo Ramírez Contreras

DEDICATORIA

A Dios, por que nada en mi vida habría sido posible sin él.

A mi madre y mis hermanos, por estar allí en los momentos más difíciles de mi vida, por su apoyo, aliento y ánimos. Los quiero.

A mi familia, por creer en mí.

A mi novia, por su apoyo incondicional.

A todas las personas que me acompañaron en esta etapa de mi vida. Gracias.

Yovanny Salcedo Barreto

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Jaime Suárez Días, por ser nuestro director de proyecto y permitirnos desarrollar este tema apoyado por sus conocimientos.

A todo el personal de GEOTECNOLOGÍA Ltda. por su apoyo y por facilitarnos las herramientas necesarias para el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE

1.1	Introducción	1
1.2	Elementos esenciales de los métodos	1
1.3	Método de equilibrio límite general	4
1.4	Función fuerza entre dovelas	7
1.5	Formas de la superficie de deslizamiento	7
1.6	Distribución de esfuerzos	10
1.7	Equilibrio límite: fuerzas y esfuerzos	11
1.8	Método de janbú generalizado	11
1.9	Método de equilibrio límite general	12
1.10	Método ordinario o de fellenius	12
1.11	Método simplificado de bishop	16
1.12	Método simplificado de janbú	18
1.13	Método de spencer	19
1.14	Metodo de morgenstern-price (M-P)	22
1.15	Método generalizado de janbú	22
1.16	Comparación de los diversos métodos	26

CAPÍTULO 2. PROGRAMA SLOPE/W

2.1	Introducción	28
2.2	Características	28
2.2.1	Formulaciones	29
2.2.2	Función fuerza entre dovelas	29
2.2.3	Formas de la superficie de falla	29
2.2.4	Fuerzas de filtración	30
2.3	Formas de la superficie de falla	31

2.3.1	Introducción	31
2.3.2	Grilla y radio para deslizamientos circulares	31
2.3.3	Perfiles del factor de seguridad	34
2.4	Geometría	34
2.4.1	Introducción	34
2.4.2	Regiones	35
2.5	Presión de poros	35
2.5.1	Introducción	35
2.5.2	Superficie piezometrica	36
2.6	Teoría	36
2.6.1	Definición de variables	36
2.6.2	Método de equilibrio límite general	41
2.6.3	Solución de los factores de seguridad	41
2.7	Programa SLOPE/W	43
2.7.1	Introducción	43
2.7.2	Definición del problema	43
2.7.3	Solución del problema	51
2.7.4	Observación de resultados	52

CAPÍTULO 3. METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS APLICADOS AL ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES

3.1	Introducción	55
3.2	Teoría de deformación	55
3.3	Ecuaciones básicas	55
3.4	Discretización de los elementos finitos	57
3.5	Integración implícita de los modelos de plasticidad	58
3.6	Proceso global de iteración	59
3.7	Teoría del flujo subterráneo	60
3.7.1	Ecuaciones básicas	60
3.7.2	Discretización de elementos finitos	61
3.7.3	Flujo en elementos de interfase	63
3.8	Teoría de consolidación	63
3.8.1	Ecuaciones básicas de la teoría de consolidación	63
3.9	Formulación de elementos	63
3.9.1	Funciones de interpolación para elementos lineales	64
3.9.2	Funciones de interpolación para elementos triangulares	66
3.10	Integración numérica de elementos lineales	67

3.11	Integración numérica de elementos triangulares	68
------	--	----

CAPÍTULO 4. SOFTWARE PLAXIS

4.1	Introducción	69
4.2	Unidades y convenio de signos	69
4.2.1	Unidades	69
4.2.2	Convenio de signos	70
4.3	Introducción de datos	70
4.3.1	Introducción de los datos y pre-procesador	71
4.3.2	El programa de introducción de datos (INPUT)	71
4.3.3	El menú de introducción de datos (INPUT)	73
4.4	Configuración general	74
4.5	Modelo	75
4.6	Geometría	77
4.6.1	Puntos y líneas	78
4.6.2	Placas	78
4.7	Cargas y condiciones de contorno	79
4.7.1	Fijaciones	79
4.7.2	Fijaciones estándar	79
4.7.3	Cargas repartidas	80
4.8	Propiedades de los materiales	80
4.8.1	Base de datos de los materiales	81
4.8.2	Modelización del comportamiento del suelo	82
4.9	Modelos constitutivos	83
4.9.1	Modelo de mohr- coulomb (CM)	84
4.9.1.1	Relación entre los parámetros del modelo básico y el comportamiento real del suelo	85
4.9.1.2	Formulación del modelo de Mohr – Coulomb	87
4.9.1.3	Parámetros básicos del modelo de mohr – coulomb (plasticidad perfecta)	89
4.9.2	Modelo del suelo rigidizante	91
4.9.2.1	Parámetros del modelo de suelo rigidizante	92
4.9.2.2	Módulo de rigidez E_{50}^{ref} y E_{oed}^{ref} y potencia m	92
4.10	Asignación de conjuntos de datos a los componentes de la geometría	93
4.11	Generación de la malla	94

4.11.1	Prácticas aconsejables para la generación de mallas	95
4.12	Condiciones iniciales	95
4.13	Niveles freáticos	95
4.14	Generación de presiones de agua	99
4.15	Configuración de la geometría inicial	96
4.15.1	Desactivación de cargas y objetos geométricos	96
4.15.2	Generación de esfuerzos iniciales (procedimiento K_0)	97
4.15.3	Inicio de los cálculos	99
4.16	Cálculos	99
4.16.1	El programa de cálculos	100
4.16.2	El menú de cálculos	101
4.16.3	Definición de una fase de cálculo	101
4.16.4	Inserción y eliminación de fases de cálculo	102
4.17	Consideraciones generales acerca de los cálculos	103
4.17.1	Parámetros de control del cálculo	103
4.17.2	Parámetros de control de los procedimientos iterativos	105
4.18	Construcción por etapas	108
4.18.1	Cambios en la configuración de la geometría	109
4.18.2	Activación y desactivación de dominios o de objetos estructurales	109
4.18.3	Activación o modificación de cargas	110
4.18.4	Construcción por etapas con $\Sigma\text{MSTAGE}<1$	111
4.19	Multiplicadores de carga	111
4.19.1	Reducción fi-c (phi-c-reduction)	112
4.20	Selección de puntos para curvas	113
4.21	Ejecución del proceso de cálculo	114
4.21.1	Inicio del proceso del cálculo	115
4.22	Resultados generados durante los cálculos	115
4.23	Post-proceso de los resultados	116
4.23.1	El programa de resultados (output)	116
4.23.2	El menú del programa de resultados	117
4.23.3	Deformaciones (deformations)	119
4.23.3.1	Desplazamientos totales, horizontales y verticales	119
4.23.3.2	Desplazamientos incrementales	120
4.23.3.3	Deformaciones totales	120
4.23.3.4	Deformaciones incrementales	120
4.23.4	Esfuerzos	121

4.23.4.1	Esfuerzos efectivos	121
4.23.4.2	Esfuerzos totales	122
4.24	Estructuras e interfaces	122
4.24.1	Placas	123
4.25	Tabla de resultados	123
4.26	Curvas de carga-desplazamiento y trayectorias de tensiones	124
4.26.1	El programa de curvas	124
4.26.2	Generación de curvas	125

CAPÍTULO 5. RESULTADO DE LOS MODELOS

5.1	Introducción	127
5.2	Estudio y diseño geotécnico: estabilización del deslizamiento PR9+0200 carretera Cúcuta–San Faustino–La China ruta 55 NS 09	127
5.2.1	Localización y descripción del proyecto	127
5.2.2	Geología	129
5.2.3	Hidrología e hidráulica	131
5.2.4	Sondeos y ensayos de campo	132
5.2.5	Ensayos de laboratorio	133
5.2.6	Cálculo de los factores de seguridad de los taludes	135
5.2.6.1	Métodos de análisis para equilibrio límite	136
5.2.6.2	Modelo de elementos finitos	149
5.3	Lote calle 55a carrera 29 esquina suroriental Bucaramanga	149
5.3.1	Localización y descripción del proyecto	149
5.3.2	Geología	150
5.3.3	Investigaciones geotécnicas realizadas	151
5.3.4	Sondeos y ensayos de campo	151
5.3.5	Ensayos de laboratorio	153
5.3.6	Cálculo de factores de seguridad de las excavaciones	154
5.3.6.1	Métodos de análisis para equilibrio límite	156
5.3.6.2	Modelo de elementos finitos	158

CAPÍTULO 6. OBSERVACIONES y ANALISIS DE LOS MODELOS

6.1	Introducción	195
6.2	Comparación de los métodos de equilibrio límite	195

6.3	Comparación de los modelos de elementos finitos y el estado de equilibrio límite	196
6.4	Observaciones	197

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1	Introducción	200
7.2	Conclusiones	200
7.3	Recomendaciones	202

BIBLIOGRAFÍA

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
CAPITULO 1.	
Figura 1-1. Detalle de la dovela y las fuerzas actuantes sobre ella en una masa deslizante	2
Figura 1- 2. Función medio – seno de fuerza entre dovelas	5
Figura 1-3. Gráfica factor de seguridad versus lambda	6
Figura 1-4. Condiciones para una superficie circular simple	8
Figura 1-5. Situación para una superficie de falla plana	9
Figura 1-6. Situación típica para una superficie de falla compuesta	9
Figura 1-7. Distribución normal de esfuerzos en el pie de la superficie de falla	10
Figura 1-8. Distribución normal de esfuerzos en lo profundo de la superficie de falla	10
Figura 1-9. Efecto de la dirección del deslizamiento sobre lambda	12
Figura 1-10. Ejemplo de un cálculo manual	13
Figura 1-11. Cálculo del factor ordinario de seguridad por SLOPE/W	15
Figura 1-12. Diagramas de cuerpo libre y polígono de fuerzas para el método ordinario	16
Figura 1-13. Diagramas de cuerpo libre y polígono de fuerzas para el método de Bishop	17
Figura 1-14. Factor de seguridad para el método simplificado de Bishop	17
Figura 1-15. Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerza para el método simplificado de Janbú	18
Figura 1-16. Factor de seguridad del método simplificado de Janbú	19
Figura 1-17. Situación de estabilidad de talud típica	20
Figura 1-18. Factor de seguridad de Spencer	20
Figura 1-19. Función entre dovelas para el método de Spencer	21
Figura 1-20. Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerza para el método de Spencer	21
Figura 1-21. Resultado del análisis de M-P	22
Figura 1-22. Factor de seguridad M-P con la función de medio-seno	23

Figura 1-23. Función entre dovela medio-seno	24
Figura 1-24. Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerza para el método M-P	24
Figura 1-25. Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerza para el método generalizado de Janbú	26

CAPITULO 2.

Figura 2-1. Fuerzas entre dovelas cuando las fuerzas de filtración están en consideración	30
Figura 2-2. Método de la grilla y radio para especificar las superficies de falla de ensayo.	32
Figura 2-3. Superficie de falla de ensayo imaginaria ³³	
Figura 2-4. Características de las líneas de radio ³³	
Figura 2-5. Perfiles del factor de seguridad en la grilla de centros rotación	34
Figura 2-6. Regiones básicas representativas	35
Figura 2-7. Regiones y puntos	35
Figura 2-8. Presión de poros desde una línea piezometrica	36
Figura 2-9. Fuerzas actuando sobre una dovela en una masa deslizante con una superficie de falla circular	38
Figura 2-10. Fuerzas actuando sobre una dovela en una masa deslizante con una superficie de falla compuesta.	38
Figura 2-11. Fuerzas que actúan sobre una dovela a través de una masa deslizante definidas por una superficie de falla totalmente especificada	39
Figura 2-12. Ejemplo de una grafica de factor de seguridad versus lambda.	43
Figura 2-13. Problema de estabilidad del talud.	44
Figura 2-14. Cuadro de dialogo Toolbars.	44
Figura 2-15. Cuadro de dialogo Page.	45
Figura 2-16. Cuadro de dialogo Scale.	45
Figura 2-17. Cuadro de dialogo Grid.	46
Figura 2-18. Cuadro de dialogo Axes	47
Figura 2-19. Geometría del problema.	47
Figura 2-20. Pestaña Project ID del cuadro de dialogo Análisis Settings.	48
Figura 2-21. Cuadro de dialogo Material Properties.	48

Figura 2-22. Cuadro de dialogo Region Properties.	49
Figura 2-23. Estratigrafía del talud.	49
Figura 2-24. Cuadro de dialogo Draw Piezometric Lines.	50
Figura 2-25. Cuadro de dialogo Draw Slip Surface.	50
Figura 2-26. Diagrama del modelo.	51
Figura 2-27. Cuadro de dialogo Solve.	51
Figura 2-28. Cuadro de dialogo Solve y resultados del análisis.	52
Figura 2-29. Gráfico de la superficie de falla y el factor de seguridad asociado.	53
Figura 2-30. Cuadro de dialogo Slip Surface de la función CONTOUR.	53
Figura 2-31. Cuadro de dialogo Free Body Diagram & Force Polygon.	54

CAPITULO 3.

Figura 3-1. Ilustración de la condición de continuidad	61
Figura 3-2. Funciones de forma para un elemento lineal de tres nodos.	64
Figura 3-3. Funciones de forma para un elemento lineal de 5 nodos	65
Figura 3- 4. Numeración local y posicionamiento de nodos en un elemento triangular de 15 nodos	66

CAPITULO 4.

Figura 4-1. Sistema de coordenadas y representación de las componentes positivas de tensión.	70
Figura 4-2. Ventana principal INPUT	71
Figura 4-3. Ventana de configuración general (pestaña <i>Project</i>)	74
Figura 4-4. Ejemplo de un problema de deformación plana y de uno axisimétrico	75
Figura 4-5. Posición de los nodos y los puntos de tensión en el elemento de suelo	76
Figura 4-6. Ventana de Configuración general (pestaña <i>Dimensions</i>)	77
Figura 4-7. Aplicaciones en las que se utilizan placas, anclajes e interfaces	79
Figura 4-8. Ventana de introducción de los parámetros que definen las cargas repartidas	80
Figura 4-9. Ventana de los conjuntos de datos de materiales en la que se muestran la base de datos del proyecto y la global	81

Figura 4-10. Ventana de conjuntos de datos de materiales tipo suelo e interfaces (pestaña <i>General</i>)	83
Figura 4-11. Resultados de ensayos triaxiales drenados estándar (a) y modelo elástico-plástico (b)	85
Figura 4-12. Idea básica de un modelo elástico perfectamente plástico	86
Figura 4-13. Superficie de producción de Mohr-Coulomb	88
Figura 4-14. Definición de E_{50} y E_0 para resultados de ensayos triaxiales	90
Figura 4-15. Condiciones de cohesión y ángulo de fricción	90
Figura 4-16. Definición de los parámetros de rigidez con ensayos de oedómetros.	93
Figura 4-17. Ventana de la generación de las presiones de agua.	96
Figura 4-18. Ventana de generación de esfuerzos iniciales (Procedimiento K_0)	97
Figura 4-19. Ventana principal del programa de Cálculos (<i>Calculations</i>)	100
Figura 4-20. Pestaña <i>Parameters</i> de la ventana de Cálculos	104
Figura 4-21. Ventana de los parámetros de control de los procedimientos iterativos	106
Figura 4-22. Solución calculada frente a solución exacta	106
Figura 4-23. Proceso de iteración con sobre-relajación (a) y sin sobre-relajación (b)	107
Figura 4-24. Ventana de introducción para una carga puntual	110
Figura 4-25. Ventana de introducción para una carga repartida	110
Figura 4-26. Pestaña <i>Multipliers</i> de la ventana de Cálculos	112
Figura 4-27. Ventana de cálculos	115
Figura 4-28. Barra de herramientas de la ventana principal del programa de Resultados	117
Figura 4-29. Convención de signos para esfuerzos axiales y esfuerzos perpendiculares al plano en placas, geomallas y anclajes	123
Figura 4-30. Barra de herramientas de la ventana principal del programa de Curvas	125
Figura 4-31. Ventana de generación de curvas	126

CAPITULO 5.

Figura 5-1. Resultados del análisis por SLOPE/W	136
Figura 5-2. Geometría y estratigrafía del modelo	138
Figura 5-3. Cálculo del factor de seguridad	139

Figura 5-4. Malla de elementos finitos	139
Figura 5-5. Malla de elemento finitos deformada para la Fase 1	140
Figura 5-6. Contornos relativos de desplazamiento dentro de la masa de suelo.	141
Figura 5-7. Dirección de los esfuerzos efectivos principales.	141
Figura 5-8. Contornos relativos de deformación en el modelo.	142
Figura 5-9. Detalle de los desplazamientos en el área de la excavación	143
Figura 5-10. Dirección de los esfuerzos efectivos principales.	143
Figura 5-11. Sección transversal de esfuerzos.	144
Figura 5-12. Malla de elemento finitos deformada antes de realizar el relleno de la excavación	145
Figura 5-13. Desplazamientos totales	145
Figura 5-14. Dirección de los esfuerzos efectivos principales.	146
Figura 5-15. Malla de elementos finitos deformada después de la tercera fase de cálculo.	146
Figura 5-16. Contornos relativos de deformación en el modelo.	147
Figura 5-17. Dirección de los esfuerzos efectivos principales.	147
Figura 5-18. Momentos en la pantalla de concreto ciclópeo.	148
Figura 5-19. Fuerzas cortantes en la pantalla.	148
Figura 5-20. Fuerzas normales en la pantalla.	149
Figura 5-21. Esquema de Localización del lote estudiado	150
Figura 5-22. Plano de Localización de Sondeos	152
Figura 5-23. Resultados arrojados por SLOPE/W para el Talud vertical	157
Figura 5-24. Resultados arrojados por SLOPE/W para el Talud 1V:1H	157
Figura 5-25. Resultados arrojados por SLOPE/W para el Talud 1V:0.5H	157
Figura 5-26. Resultados arrojados por SLOPE/W para el Talud 1V:3/4H	158
Figura 5-27. Geometría de la excavación	159
Figura 5-28. Cálculo del factor de seguridad	160
Figura 5-29. Malla de elementos finitos	160
Figura 5-30. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 1	161
Figura 5-31. Desplazamientos totales	162
Figura 5-32. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	162
Figura 5-33. Sección transversal de esfuerzos	163
Figura 5-34. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 2	163
Figura 5-35. Desplazamientos totales	164
Figura 5-36. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	164
Figura 5-37. Sección transversal de esfuerzos.	165

Figura 5-38. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 3	165
Figura 5-39. Deformaciones totales	166
Figura 5-40. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	166
Figura 5-41. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 4	167
Figura 5-42. Deformaciones totales	167
Figura 5-43. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	168
Figura 5-44. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 5	168
Figura 5-45. Deformaciones totales	169
Figura 5-46. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	169
Figura 5-47. Geometría del modelo	170
Figura 5-48. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 2	170
Figura 5-49. Deformaciones totales	171
Figura 5-50. Dirección de los esfuerzos efectivos principales.	171
Figura 5-51. Sección transversal de esfuerzos	172
Figura 5-52. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 3	172
Figura 5-53. Deformaciones totales	173
Figura 5-54. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	173
Figura 5-55. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 4	174
Figura 5-56. Deformaciones totales	174
Figura 5-57. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	175
Figura 5-58. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión	175
Figura 5-59. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 5	176
Figura 5-60. Deformaciones totales	176
Figura 5-61. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	177
Figura 5-62. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión	177
Figura 5-63. Cálculo del factor de seguridad	178
Figura 5-64. Geometría del modelo	178
Figura 5-65. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 2	179
Figura 5-66. Deformaciones totales 1	179
Figura 5-67. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	180
Figura 5-68. Sección transversal de esfuerzos	180
Figura 5-69. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 3	181
Figura 5-70. Deformaciones totales	181
Figura 5-71. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	182
Figura 5-72. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 4	182
Figura 5-73. Deformaciones totales	183
Figura 5-74. Dirección de los esfuerzos efectivos principales.	183

Figura 5-75. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión	184
Figura 5-76. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 5	184
Figura 5-77. Deformaciones totales	185
Figura 5-78. Dirección de los esfuerzos efectivos principales.	185
Figura 5-79. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión	186
Figura 5-80. Cálculo del factor de seguridad	186
Figura 5-81. Geometría del modelo	187
Figura 5-82. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 2	187
Figura 5-83. Deformaciones totales	188
Figura 5-84. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	188
Figura 5-85. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 3	189
Figura 5-86. Deformaciones totales	189
Figura 5-87. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	190
Figura 5-88. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 4	190
Figura 5-89. Deformaciones totales	191
Figura 5-90. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	191
Figura 5-91. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión	192
Figura 5-92. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 5	192
Figura 5-93. Deformaciones totales	193
Figura 5-94. Dirección de los esfuerzos efectivos principales	193
Figura 5-95. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión	194
Figura 5-96. Cálculo del factor de seguridad	194

CAPITULO 5.

Figura 6-1. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión para la fase 1	197
Figura 6-2. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión para la fase 3	198
Figura 6-3. Superficie de falla una vez construida la contención	198
Figura 6-4. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión para la fase 5	199

LISTA DE TABLAS

	Pág.
CAPITULO 1.	
Tabla 1. Ecuaciones estáticas satisfechas	4
Tabla 2. Características y relaciones de las fuerzas entre dovelas	4
Tabla 3. Ejemplo de cálculos manuales	14
Tabla 4. Ejemplo de cálculos manuales	14
CAPITULO 2.	
Tabla 1. Resumen de cantidades conocidas para resolver un factor de seguridad	40
Tabla 2. Resumen de cantidades desconocidas para resolver un factor de seguridad	40
CAPITULO 3.	
Tabla 1. Integración de Newton – Cotes	67
Tabla 2. Integración de Gauss.	67
Tabla 3. Integración 3 puntos para elementos de 6 nodos.	68
Tabla 4. Integración de puntos para elementos de 15 nodos.	68
CAPITULO 4.	
Tabla 1: Unidades disponibles y factores de conversión a las unidades por defecto	69
Tabla 2: Parámetros básicos del análisis de Mohr – Coulomb	89

CAPITULO 5.

Tabla 1. Ensayos de laboratorio realizados.	134
Tabla 2. Resultados de los ensayos de laboratorio realizados.	134
Tabla 3. Resultados del ensayo de Corte Directo	134
Tabla 4. Factores de seguridad obtenidos	136
Tabla 5. Parámetros del suelo utilizados en el análisis de esfuerzo – deformación	138
Tabla 6. Características y localización de los sondeos	152
Tabla 7. Ensayos de laboratorio realizados	153
Tabla 8. Resultados de los ensayos de laboratorio realizados.	154
Tabla 9. Resultados de los ensayos de corte directo.	154
Tabla 10. Parámetros del suelo utilizados en el análisis de esfuerzo – deformación	159

LISTA DE FOTOS

	Pág.
CAPITULO 5.	
Foto1. Deslizamiento en el sitio Cúcuta - La china.	128
Foto2. Panorámica nivel alto del río Pamplonita y falla de la vía.	128
Foto3. Afloramiento de lodolitas grises, laminadas y fracturadas, ligeramente plegadas en la zanja norte que limita el deslizamiento.	129
Foto 4. Depósito de Coluvión localizado en la parte alta de la zona del deslizamiento, el cual presenta en la parte superior una corona de desprendimiento antigua.	130
Foto 5. Panorámica del sector norte del deslizamiento, foto en dirección al oriente.	131
Foto 6. Equipo de perforación a rotación en el sitio del sondeo 1	133
Foto 7. Zona de excavación.	155
Foto 8. Zona de excavación con apreciación del nivel freático.	155

TITULO: COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN Y EQUILIBRIO LÍMITE EN LA MODELACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES UTILIZANDO LOS SOFTWARE PLAXIS Y SLOPE/W*

AUTORES: RONALD GUSTAVO RAMIREZ CONTRERAS
YOVANNY SALCEDO BARRETO**

PALABRAS CLAVES: Equilibrio límite, Elementos Finitos, Factor de Seguridad, Estabilidad de Taludes, Excavaciones, Mohr - Coulomb, Deslizamiento.

RESUMEN: El objetivo principal de un estudio de taludes o laderas es de establecer medidas de prevención y control para reducir los niveles de amenaza y riesgo. La determinación de los niveles de amenaza y riesgo deben estar antecedidas por un estudio exhaustivo del talud para poder conocer el mecanismo de falla y, después de analizado los factores de equilibrio se puede pasar al diseño de los sistemas de prevención, control o estabilización. Es práctica común en la ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. La determinación del factor de seguridad puede realizarse a través de las técnicas de Equilibrio Límite las cuales suponen que en caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. Algunos métodos emplean la teoría de los elementos finitos. El método esencialmente divide la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos. Los resultados obtenidos por este método se presentan en forma de esfuerzos y desplazamientos en los puntos nodales. La meta principal de esta investigación es el estudio de estas metodologías (Equilibrio Límite y Elementos Finitos) para establecer sus ventajas, desventajas, limitaciones y deficiencias. Para lograr esto, se evaluaron dos problemas geotécnicos de estabilidad de taludes y se realizó el cálculo del Factor de Seguridad para cada uno a través del programa SLOPE/W de modelamiento por Equilibrio Límite y el programa PLAXIS de modelamiento por Elementos Finitos, se estableció un comparativo entre ambos y luego se plantearon las conclusiones y recomendaciones respectivas.

* Tesis de grado.

**Facultad de Ciencias Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Jaime Suárez Díaz.

TITLE: COMPARISON OF THE METHODS OF STRESS - STRAIN AND LIMIT EQUILIBRIUM IN THE MODELING OF SLOPE STABILITY USING THE SOFTWARE PLAXIS AND SLOPE/W *

AUTHORS: RONALD GUSTAVO RAMIREZ CONTRERAS
YOVANNY SALCEDO BARRETO**

KEY WORDS: Limit Equilibrium, Finite Element, Factor of Safety, Slope Stability, Excavations, Mohr - Coulomb, Slip.

ABSTRACT: The main objective of a study of slope or hillsides is of establishing measurement of prevention and control to reduce the threat levels and risk. The determination of the threat levels and risk should be preceded by an exhaustive study of the slope to be able to know the flaw mechanism and, after having analyzed the equilibrium factors it can spend to the design of the systems of prevention, control or stabilization. It is practical common in the engineering to define the stability of a slope in terms of a factor of safety (FS), obtained of a mathematical analysis of stability. The model must bear in mind most the factors that affect the stability.

The determination of the factor of safety can come true through the techniques of Limit Equilibrium which suppose that in the event of a slip, the forces mobilized and resistant along the equivalent flaw surface to a factor of security of 1.0. Some methods use the theory of the finite elements. The method essentially divides the soil mass in discreet units that call themselves finite elements. The results obtained by this method are presented in form of stress and displacements in the nodal points.

The main goal of this investigation is the study of these methodologies (Limit Equilibrium and Finite Elements) to establish its advantages, disadvantages, limitations and deficiencies. To achieve this, two stability of slope geotechnical problems and was carried out the calculation of the Factor of Security for each one through the software SLOPE/W modeling for Limit equilibrium and the software PLAXIS modeling for Finite Elements, a comparative one settled down between both and then they thought about the conclusions and respective recommendations.

* Undergraduate thesis

**Physic-Mechanic Sciences Faculty, Department of Civil Engineering, Jaime Suárez Díaz.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de un estudio de taludes o laderas es de establecer medidas de prevención y control para reducir los niveles de amenaza y riesgo.

Generalmente, los beneficios más importantes desde el punto de vista de reducción de amenaza y riesgo es la prevención.

La determinación de los niveles de amenaza y riesgo de un talud deben estar antecedidas por un estudio exhaustivo del mismo para poder conocer el mecanismo de falla y, después de analizado los factores de equilibrio se puede pasar al objetivo final que es el diseño de los sistemas de prevención, control o estabilización.

Es práctica común en la ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen la geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc.

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas de equilibrio límite. Ese tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El sistema de equilibrio límite supone que en caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Algunos de los métodos de análisis más conocidos basados en los estados límites son:

- Ordinario o de Fellenius.
- Bishop simplificado.
- Janbú simplificado.
- Morgentern y Price.

Actualmente se conocen software comerciales los cuales tienen como base el concepto de equilibrio limite uno de ellos es el SLOPE/W el cual permite de una forma rápida y sencilla obtener los factores de seguridad de taludes o laderas con cierto grado de complejidad y por cualesquiera de los métodos de análisis.

Algunos métodos emplean la teoría de los elementos finitos que resuelven muchas de las deficiencias de los métodos de equilibrio límite, este método fue introducido por Clough y Woodward (1967). El método esencialmente divide la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos. Estos elementos se interconectan en sus nodos y en los bordes predefinidos. Los resultados obtenidos por este método se presentan en forma de esfuerzos y desplazamientos en los puntos nodales, así la condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos falla simultáneamente.

Existen algunos programas de análisis de estabilidad de taludes utilizando este método. Uno de estos es el plaxis. Es un programa de ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñados específicamente para la realización de análisis de

deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modelizables corresponden a problemas de deformación plana o con asimetría. El programa utiliza una interfaz grafica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una maya de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate.

El proyecto basa su importancia por la necesidad de tratar de implementar estas nuevas herramientas metodológicas para el estudio de la estabilidad de taludes las cuales permitan obtener una información mas completa del comportamiento que se presenta en la estructura del talud al ser sometida a eventos o acciones de tipo natural o antropicas.

CAPÍTULO 1. MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE

1.1 INTRODUCCIÓN

Existen por lo menos tres sistemas analíticos que pueden ser utilizados para analizar la estabilidad de taludes sujetos a fuerzas gravitacionales, hidráulicas y de sismo; de equilibrio límite, solución con mecánica de medios continuos y análisis de elemento finito. Estos sistemas suponen generalmente condiciones de deformación plana para simplificar el problema.

En la actualidad la manera más difundida para el análisis de la estabilidad de una masa de suelo es el empleo de las *técnicas de equilibrio límite*. Estos métodos han sido usados por varias décadas para taludes terrestres sujetos a fuerzas gravitacionales (Terzaghi 1943, Taylor 1948, Bishop 1955, Morgenstern y Price 1965, Janbu 1973) todo con el fin de llegar a determinar el *factor de seguridad* que le permitirá al ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones.

Cada uno de los métodos que emplean el principio de estado de equilibrio límite tiene sus ventajas y desventajas, y existen varios tipos de problemas para los cuales es recomendable el uso de uno o de otro. Sin embargo, todos los métodos que usan este principio presentan un problema en común y es que las suposiciones sobre las cuales fueron formulados sus procedimientos matemáticos no reflejan a cabalidad la realidad del problema; no teniendo en consideración factores de crucial importancia para un análisis mas minucioso.

Un buen análisis debería representar adecuadamente el mecanismo de falla de un talud. Estos análisis son generalmente simples en concepto, y en las matemáticas estos pueden ser demostrados. En general se consideran únicamente las condiciones requeridas para la estabilidad, o para ser más precisos, para el equilibrio límite. El término equilibrio límite se aplica a sistemas de fuerza que están justo en el punto de falla. El método no permite la predicción de desplazamientos, o ratas de desplazamientos que acompañan la falla.

1.2 ELEMENTOS ESENCIALES DE LOS MÉTODOS

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas.

Se han desarrollado muchas técnicas diferentes de solución para el método de dovelas en los últimos años. Básicamente todos son muy similares. La diferencia entre los métodos está en qué ecuaciones de estáticas son incluidas y satisfechas, qué fuerzas entre dovelas son incluidos y lo que es la relación supuesta entre el cortante entre dovelas y las fuerzas normales. La figura 1 ilustra la discretización de una masa deslizada típica en dovelas y las posibles fuerzas en la dovela. Fuerzas cortantes y normales en la base de la rodaja y en los lados de la dovela, respectivamente.

A través del siglo XX una gran cantidad de investigadores crearon teorías con miras a la solución del problema de la estabilidad de taludes, tratando de dar una correcta modelación a lo que en la práctica realmente sucedía.

Algunas de las más reconocidas investigaciones en este campo son:

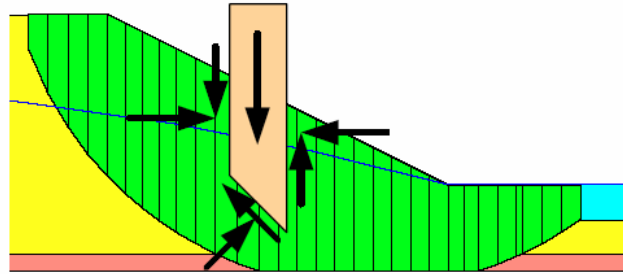


Figura 1-1¹. Detalle de la dovela y las fuerzas actuantes sobre ella en una masa deslizante

- Análisis del talud infinito
- Análisis no friccionante
- Análisis ordinario de dovelas
- Análisis de bloque deslizante
- Método simplificado de Bishop
- Método simplificado de Janbú
- Método riguroso de Janbú
- Método de Spencer
- Método de Morgenstern-Price

Existen una serie más amplia de métodos de análisis de estabilidad sin embargo, para efectos de simplicidad de este trabajo, apenas se esbozarán los conceptos de algunos de los mencionados arriba.

MÉTODO DEL TALUD INFINITO

La aplicación eficaz del método se da en condiciones en las cuales se presenta una falla paralela a la superficie del talud, a una profundidad somera y la longitud de falla es larga comparada con su espesor. Al suponer un talud de un largo suficientemente pronunciado con una capa delgada de suelo, cualquier tamaño de columna de suelo es representativo de todo el talud.

De esta manera las irregularidades del terreno serán ignoradas. Las propiedades del suelo y presiones de poro a cualquier profundidad dentro del talud se asumen constantes.

ANÁLISIS ORDINARIO DE DOVELAS

Este método fue desarrollado en Suecia para superficies circulares. Aquí la masa deslizante se dividía en tajadas verticales o dovelas y el equilibrio de cada dovela era considerado por separado.

Este método no es muy usado en la actualidad por su dificultad en el manejo de secciones no homogéneas. Sin embargo, la práctica de dividir la masa deslizante en dovelas es usada aún en la actualidad, y forma la base de todos los análisis modernos.

¹ Fuente: "SLOPEW Engineering Book". John Krahn. Pág 9.

ANÁLISIS DE BLOQUE DESLIZANTE

Es muy útil cuando existe un manto débil o cuando aparece un manto muy duro sobre el cual se puede presentar el deslizamiento. Puede utilizarse cuando existe a una determinada profundidad, una superficie de debilidad relativamente recta y delgada.

Consiste en dividir la masa deslizante en dos o más bloques y el equilibrio de cada bloque se considera independiente, utilizando las fuerzas entre los bloques.

MÉTODO SIMPLIFICADO DE BISHOP

Bishop (1955) ideó un esquema que incluía las fuerzas normales entre dovelas pero ignorando las fuerzas de cortante. El método simplificado de Bishop solo satisface el equilibrio de momento. Es de interés e importancia en este método el hecho de que incluyendo las fuerzas normales entre dovelas, la ecuación del factor de seguridad se volvió no lineal y se requiere de un proceso iterativo para calcularlo.

MÉTODO SIMPLIFICADO DE JANBÚ

El método simplificado de Janbú es similar al de Bishop ya que considera las fuerzas normales entre dovelas e ignora las fuerzas cortantes. La diferencia entre los dos radica en que el método simplificado de Janbú satisface solo un equilibrio horizontal de fuerzas.

MÉTODO RIGUROSO DE JANBÚ

Se diferencia del anterior por la inclusión de la fuerzas cortante entre dovelas en el análisis, y por la determinación de puntos en los cuales las fuerzas resultantes entre dovelas interceptan los lados de las dovelas. De esta manera se encuentra una *línea de impulso* uniendo los puntos de acción de la resultante de las dovelas.

MÉTODO DE SPENCER

Spencer (1967) desarrolló dos ecuaciones de factor de seguridad; uno con respecto al equilibrio del momento y otro con respecto al equilibrio de fuerza horizontal. Él adoptó una relación constante entre el cortante entre las dovelas y las fuerzas normales. Encontrando la proporción cortante-normal que hace los dos factores de seguridad el mismo, significa que momento y equilibrio de fuerza están satisfechos.

Spencer asume que las inclinaciones de las fuerzas resultantes entre dovelas son constantes para todas las dovelas.

MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

A diferencia del método de Spencer, que asume inclinaciones constantes para las fuerzas entre dovela, la solución planteada por Morgenstern – Price (1965) asume que los valores de estas inclinaciones varían sistemáticamente a través de la masa deslizada.

Cada uno de los métodos expuestos anteriormente están orientados a cumplir con el equilibrio básico de la estructura de talud, que son equilibrio de fuerzas y de momentos o alguno de los dos. En la tabla 1 se muestra un resumen de las ecuaciones estáticas satisfechas por cada uno de los métodos.

Tabla 1. Ecuaciones estáticas satisfechas

Método	Equilibrio de momento	Equilibrio de fuerzas
Ordinary o Fellenius	Si	No
Bishop simplificado	Si	No
Janbú simplificado	No	Si
Spencer	Si	Si
Morgenstern-Price	Si	Si
Janbú Generalizado	Si	Si

Tabla 2. Características y relaciones de las fuerzas entre dovelas

Método	Normal (E)	Cortante entre dovelas (X)	Inclinación de la resultante X/E, relación X-E
Ordinary o Fellenius	No	No	No considera fuerzas entre dovelas
Bishop simplificado	Si	No	Horizontal
Janbú simplificado	Si	No	Horizontal
Spencer	Si	Si	Constante
Morgenstern-Price	Si	Si	Variable, usa una función
Janbú Generalizado	Si	Si	Aplica líneas de empuje y equilibrio de momento de dovelas.

1.3 MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE GENERAL

Una formulación del equilibrio límite general (GLE) se desarrolló por Fredlund en la Universidad de Saskatchewan en los años setenta (Fredlund y Krahn 1977; Fredlund 1981). La formulación de GLE es basado en dos ecuaciones de factor de seguridad y permite un rango de condiciones de fuerzas cortante-normal entre dovelas. Una ecuación da el factor de seguridad con respecto al equilibrio del momento (F_m) mientras la otra ecuación da el factor de seguridad con respecto al equilibrio de fuerza horizontal (F_t). La idea de usar dos factores de ecuaciones de seguridad realmente se publicó primero por Spencer (1967).

Las fuerzas cortantes entre dovelas son manejadas con una ecuación propuesta por Morgenstern and Price:

$$X = E \lambda f(x) \quad (1)$$

Donde:

$f(x)$ = una función.

λ = el porcentaje (en decimal) de la función usada.

E = la fuerza normal entre dovelas.

X = la fuerza de cortante entre dovelas.

La Figura 1-2 muestra una función del medio-seno típica. La curva superior en esta figura es la función especificada real. La más curva más baja es la función usada. La proporción entre las dos curvas representa λ . Lambda (λ) en la Figura es 0.43. Para la rodaja 10, $f(x) = 0.83$. Por ejemplo, si $E = 100$ kN, entonces $X = E f(x) \lambda = 100 \times 0.43 \times 0.83 = 35.7$ kN. $\text{Arc tan}(35.7/100) = 19.6$ grados. Esto significa la fuerza entre dovelas resultante está inclinado en 19.6 grados del horizontal en la Rodaja 10. Uno de los problemas importantes en la formulación de equilibrio de límite, como se ilustrará después, está en saber definir esta función entre dovelas.

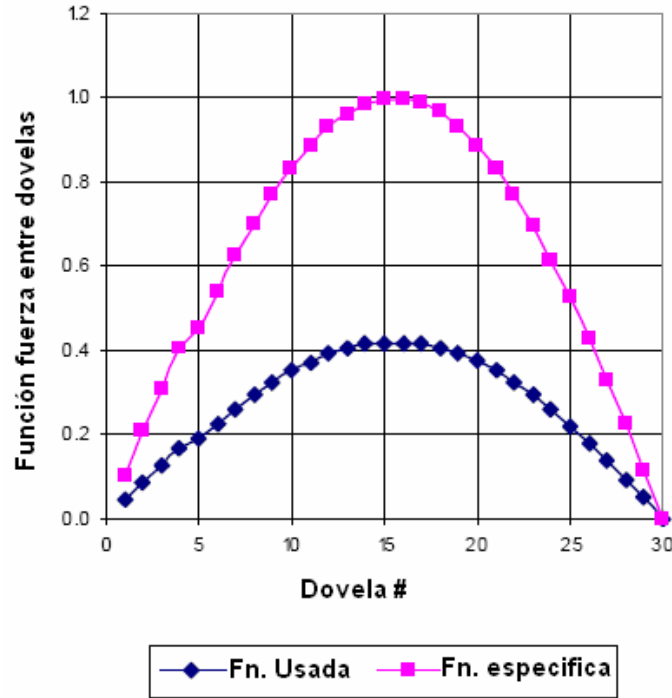


Figura 1- 2. Función medio – seno de fuerza entre dovelas

La ecuación para el factor de seguridad por equilibrio de momento:

$$F_m = \frac{\sum (c' \beta R + (N - u \beta) R \tan \phi')}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad (2)$$

La ecuación para el factor de seguridad por equilibrio de fuerzas:

$$F_f = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \omega} \quad (3)$$

Los términos en la ecuación son:

- c' = Cohesión efectiva.
- ϕ' = ángulo de fricción efectivo.
- u = Presión de poros.
- N = Fuerza normal en la base de la dovela.

W = peso de la dovela.
 D = Línea de carga.
 $\beta, R, x, f, d, \omega$ = Parámetros geométricos.
 α = Inclinación de la base de la dovela.

Una de las variables importantes en ambas ecuaciones es N , el normal a la base de cada dovela. Esta ecuación se obtiene por la suma de fuerzas verticales, así el equilibrio de fuerza vertical está consecuentemente satisfecho. En el formulario de la ecuación, *el normal base* se define como:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha + u \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \quad (4)$$

F es F_m cuando N se sustituye en la ecuación del factor de seguridad por equilibrio de momento y F que es F_f cuando N se sustituye en la ecuación del factor de seguridad por equilibrio de fuerzas. La literatura en el análisis de estabilidad de cuesta se refiere a menudo al denominador de esta ecuación como el m_a .

Un punto muy importante para tener en cuenta es el normal bajo de la dovela es dependiente de las fuerzas cortantes entre dovelas X_R y X_L . El normal bajo en la dovela es consecuentemente diferente para cada métodos, dependiendo de cómo cada método en particular maneja los cortantes entre dovelas.

El método de GLE computa F_m y F_f para un rango de valores de lambda (λ). Con estos valores computados, una gráfica similar al de la Figurar 1-3 pueden dibujarse que muestra cómo F_m y F_f varían con el lambda (λ).

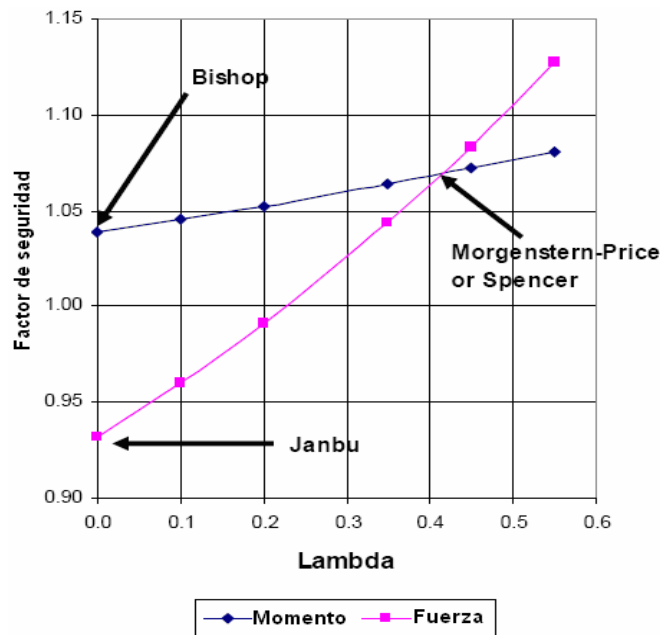


Figura 1-3. Gráfica factor de seguridad versus lambda.

El método Simplificado de Bishop ignora las fuerzas cortantes entre dovelas y satisfacen sólo equilibrio del momento. En la terminología de GLE, descuidando las fuerzas cortantes entre dovelas significa que λ es cero. Como resultado, el factor de seguridad Simplificado de Bishop en Figura 1-3 está donde λ es el cero. El método Simplificado de Janbú también ignora los cortantes entre dovelas y sólo satisfacen el equilibrio de fuerza. El factor de seguridad Simplificado del Janbú cae por consiguiente en la curva de fuerza, Figura 1-3, donde λ es el cero. En los métodos de Spencer y Morgenstern-Price (M-P) los factores de seguridad están determinados en el punto donde la dos curvas se cruzan en Figura 1-3. A estas alturas, el factor de seguridad satisface momento y equilibrio de fuerza. El punto del cruce de los factores de seguridad Spencer o M-P depende de la función de fuerza entre dovelas. Spencer sólo consideró una proporción de X/E constante para todas las dovelas que en la formulación de GLE corresponden a una función constante (horizontal) de fuerzas cortantes entre dovelas. El método de M-P puede utilizar cualquier función general apropiada.

La inclinación de la resultante entre dovelas es el Arc Tang (λ) cuando el $f(x)$ es un constante 1.0 como en el método de Spencer.

El método de GLE es muy útil para explicar las diferencias entre los diferentes métodos y para determinar cómo el factor de seguridad esta influenciado por las funciones entre dovelas.

Hay una característica en las dos ecuaciones de factor de seguridad y la ecuación de la normal bajo la dovela que tiene una consecuencia profunda. Al final hay sólo un factor de seguridad global para el talud. F_m y F_f son el mismo cuando el equilibrio de momento y equilibrio de fuerza están satisfechos. Este mismo valor aparece en la ecuación para el normal a la base (normal bajo) de la rodaja. Esto significa que el factor de seguridad es el mismo para cada rodaja.

Otro punto importante sobre el método de GLE es que no se restringe por la forma de la superficie de falla. El método Simplificado de Bishop se desarrolló inicialmente para las superficies de falla redondas, pero las asunciones inherente en el método Simplificado de Bishop pueden aplicarse a cualquier superficie no circular.

1.4 FUNCIÓN FUERZA ENTRE DOVELAS

Cómo se manejan y calculan las fuerzas cortantes entre dovelas es un punto fundamental en cada una de las metodologías vistas. El método de Spencer, por ejemplo, usa una función constante la cual infiere que la relación cortante y normal es constante entre todas las dovelas.

Sólo los métodos de Morgenstern-price y GLE permiten usar las funciones entre dovelas especializadas por él. Algunas de las funciones disponible es la constante, medio-seno, el cortante-seno, trapezoidal y el datos-punto específico. Las funciones normalmente usadas son la constante y funciones del medio-seno. Un Morgenstern-price o análisis de GLE con una función constante son iguales al análisis de Spencer.

1.5 FORMAS DE LA SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO

La importancia de la función de fuerza entre dovelas depende, en gran parte, de la cantidad de contorsión que la masa potencial deslizante debe sufrir para mover. La

función no es importante para algunos tipos de movimiento pero puede influir significativamente en el factor de seguridad de otros tipos de movimientos. Los ejemplos siguientes ilustran algunas de las superficies de falla que más se presentan mostrando esta sensibilidad.

SUPERFICIE CIRCULAR

Figure 1-4 presenta una superficie de deslizamiento redonda simple junto con el gráfico asociado FS Vs λ . En este caso el equilibrio del momento es completamente independiente de las fuerzas cortantes entre dovelas, como indica la curva de equilibrio de momento horizontal. El equilibrio de fuerza, sin embargo, es dependiente en las fuerzas de cortante.

El equilibrio del momento no se influencia por las fuerzas cortantes porque la masa deslizante como un cuerpo libre puede girar sin cualquier desprendimiento entre las rodajas. Sin embargo, el desprendimiento sustancial entre las dovelas es necesario para la masa corrediza mover lateralmente.

Como una consecuencia el equilibrio de fuerza horizontal es sensible al cortante entre dovelas. Desde que el equilibrio del momento es completamente independiente de cortante, cualquier asunción con respecto a una función de fuerza cortante es irrelevante. Puede asumirse que el cortante entre dovelas es el cero, como en el método Simplificado del Bishop, y todavía obtener un factor aceptable de seguridad, con tal de que el método satisfaga el equilibrio del momento.

Esto es, claro, falso para un método basado en satisfacer sólo equilibrio de fuerza horizontal como el método Simplificado del Janbú. Ignorando el cortante entre dovelas para una superficie circular de falla resulta en un factor de seguridad relativamente diferente a cuando ambos, fuerza y momento, son satisfechos.

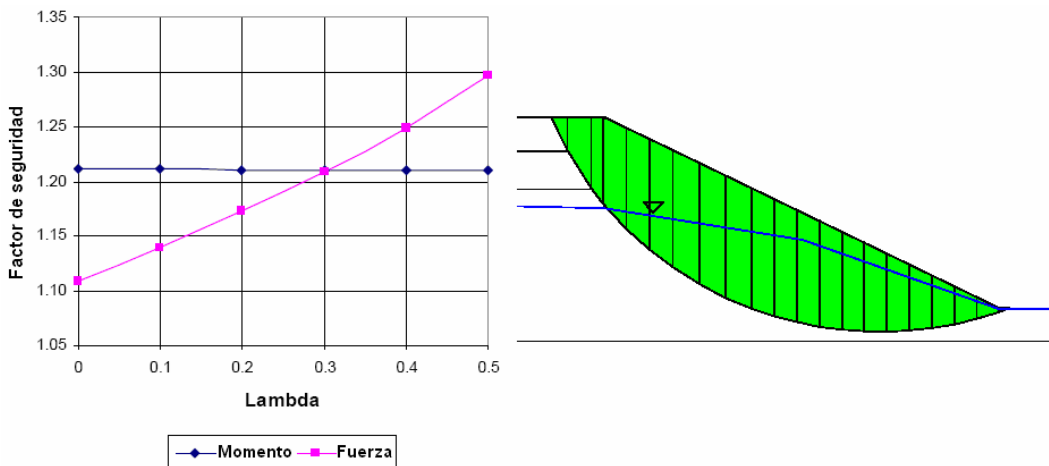


Figura 1-4. Condiciones para una superficie circular simple.

La curva de equilibrio de momento no siempre está absolutamente horizontal para las superficies de falla redondas. La curva del momento en Figura 1-4 se obtuvo de un análisis de superficie falla redonda y es ligeramente inclinado. Normalmente, sin embargo, la pendiente de la curva del momento está casi horizontal. Esto es por qué los factores de seguridad de Bishop y del Morgenstern-Price son a menudo similares para las superficies de falla redondas.

SUPERFICIE PLANA

Figure 1-5 ilustra una superficie falla plana. La curva de momento y el equilibrio de fuerza ahora tienen las posiciones inversas de aquéllos para una superficie falla redonda. Ahora el equilibrio de fuerza es completamente independiente del cortante entre dovelas, mientras el equilibrio del momento es bastante sensible al cortante. La cuña de la tierra en la superficie de falla plana puede mover sin desprendimiento entre las dovelas. Sin embargo, se requiere el desprendimiento considerable para que la cuña pueda girar.

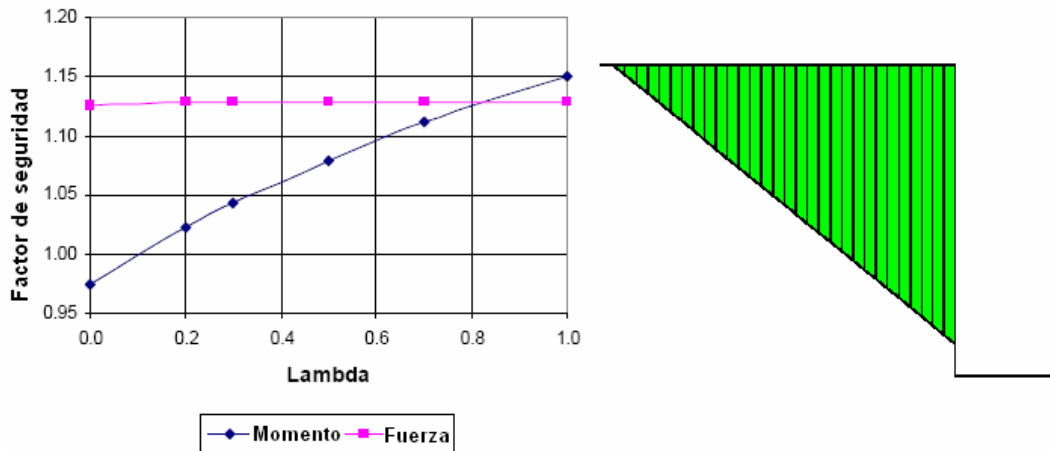


Figura 1-5. Situación para una superficie de falla plana.

SUPERFICIE COMPUESTA

Una superficie de falla compuesta es una donde la superficie de falla está parte en el arco de un círculo y parte en una superficie plana, como se ilustra en Figura 1-6. La porción plana en este ejemplo sigue una capa débil, una situación común en muchas escenas estratigráficas. En este caso, momento y equilibrio de fuerza son influenciados por las fuerzas de cortante entre dovelas. El factor de seguridad para el equilibrio de fuerzas aumenta, mientras el factor de seguridad para el equilibrio de momento disminuye con el aumento de las fuerzas cortantes (el valor de lambda más alto).

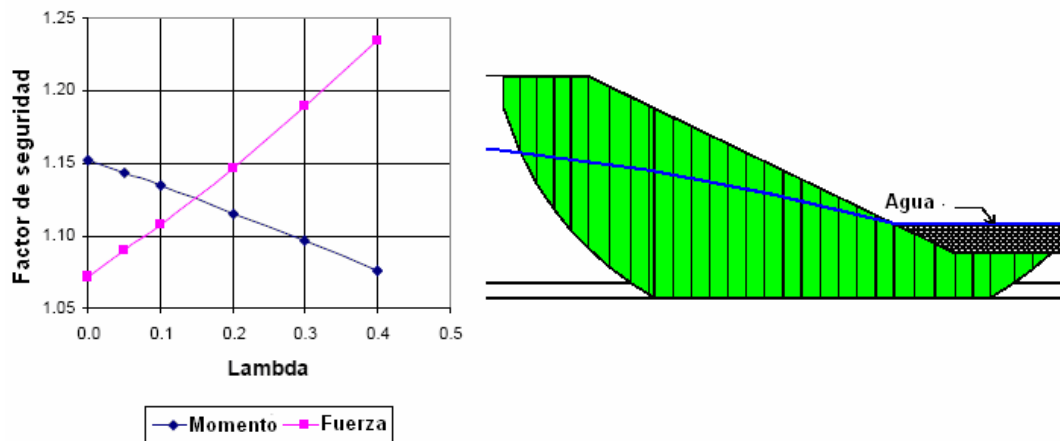


Figura 1-6. Situación típica para una superficie de falla compuesta.

Esto ilustra que el análisis simplificado de Bishop de no siempre yerra (equivocarse) en el lado seguro. Una formulación más rigurosa como el Morgenstern-Price o el método de Spencer dará un más bajo factor de seguridad que el arrojado por el método de Bishop Simplificado. Esto no es necesariamente verdad para todas las superficies de falla compuestas. No es posible generalizar acerca de cuando un factor de seguridad quiere o no errar en el lado seguro. El desprendimiento entre las dovelas debe ocurrir para momento y equilibrio de fuerza para una superficie de falla de esta forma y, por consiguiente, el cortante entre dovelas es importante para ambos tipos de equilibrio.

1.6 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS

La principal incógnita en una formulación de equilibrio límite es el normal en la base de la dovela. Trazando los esfuerzos a lo largo de una superficie de falla da una indicación de la distribución de esfuerzos en el talud. Los esfuerzos calculados son, sin embargo, no siempre representante de los verdaderos esfuerzos en el suelo.

Considere el talud de 45-grado simple en Figura 1-7 y Figura 1-8 con una superficie de falla a través del pie y otra superficie de falla más profunda debajo del pie. La distribución de esfuerzo normal a lo largo de la superficie de falla de un análisis de equilibrio límite Morgenstern - Price con una función de fuerza entre dovelas constante se compara con la distribución de esfuerzo normal de un análisis de esfuerzo de elemento finito lineal-elástico. Para la superficie de falla del pie, los esfuerzos normales son bastante diferentes, sobre todo en el área del pie. Las distribuciones de esfuerzos normales para la superficie de falla más profunda son más íntimas, pero todavía diferente para una porción buena de la superficie de falla.

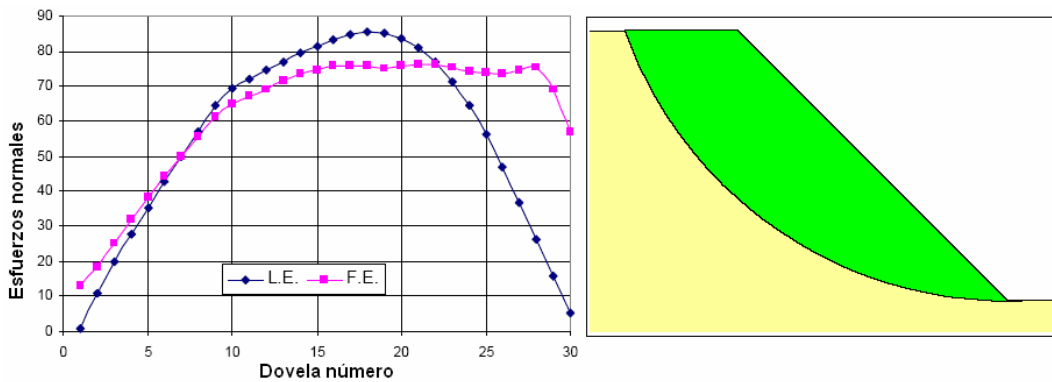


Figura 1-7. Distribución normal de esfuerzos en el pie de la superficie de falla.

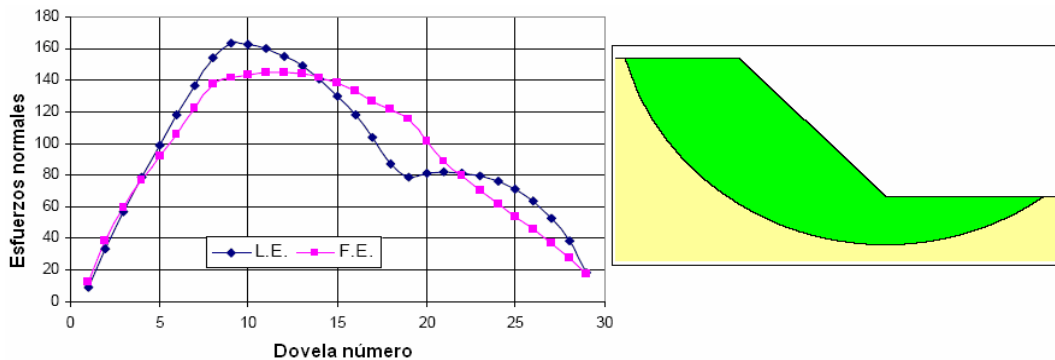


Figura 1-8. Distribución normal de esfuerzos en lo profundo de la superficie de falla.

1.7 EQUILIBRIO LÍMITE: FUERZAS Y ESFUERZOS

Los métodos de equilibrio límite de dovelas exigen técnicas iterativas para resolver ecuaciones no lineales de factor de seguridad. En el método de Morgenstern-Price o métodos de Spencer, se exige un segundo nivel de iteraciones para encontrar las fuerzas de la dovela que producen el mismo F_m y F_f . Fundamentalmente, en las iteraciones se exige encontrar dos condiciones, a saber:

- Encontrar las fuerzas que actúan en cada dovela para que esté en el equilibrio, y
- Encontrar las fuerzas en cada dovela que hará el factor de seguridad sea el mismo para cada dovela.

Esto significa que las fuerzas entre dovelas y las fuerzas de superficie de falla no son necesariamente representante de la condición real *in situ*, pero ellas son las fuerzas que satisfacen las dos condiciones anteriores para cada dovela.

1.8 MÉTODO DE JANBÚ GENERALIZADO

En el contexto de distribuciones de esfuerzo, es de interés examinar la formulación Generalizada de Janbú (Janbú, 1954,; Janbú, 1957). El método Generalizado de Janbú impone una distribución de esfuerzo en cada dovela. La distribución de esfuerzos es a menudo supuesta hidrostática y se asume que la resultante actúa a lo largo del tercio del lado mas bajo de la dovela. Una línea que pasa por la resultante de fuerzas es conocida como la línea de empujón. Asumiendo una línea de empujón y tomando los momentos sobre la base de cada dovela hace posible determinar las magnitudes de la fuerza entre dovelas.

Esta aproximación trabaja bastante bien proporcionando la distribución de esfuerzo real en el suelo muy cerca de la distribución de esfuerzos propuesta, como cuando la superficie de falla no tiene las esquinas afiladas y la masa deslizante es prolongada en relativo a la profundidad de la dovela. Más generalmente, la aproximación trabaja bien cuando la masa deslizante potencial no tiene concentraciones de esfuerzos significantes. Si existen concentraciones de esfuerzos que se desvíen significativamente de la distribución de esfuerzos propuesta por Janbú, el problema está sobreforzado. Esto lleva a los problemas de la convergencia y falta de equilibrio de fuerza por algunas dovelas. Esto es particularmente verdad cuando los rasgos como anclas son incluidos en el análisis.

Como la línea de empuje pudiera potencialmente caer fuera de la dovela. Con el método de GLE, dovelas están siempre en el equilibrio de fuerza, pero es posible que las fuerzas entre dovelas tuvieran que actuar fuera de la dovela para que pueda estar en equilibrio del momento. En la aproximación generalizada de Janbú, por otro lado, la línea de fuerzas de empuje esta en un punto particular en el lado de la dovela, pero esto puede llevar a la dovela a no estar en el equilibrio de fuerza. Así que no siempre es posible lograr ambas condiciones. A veces la línea de empuje necesita estar fuera de la rodaja para tener el equilibrio de fuerza, o la dovela no puede estar en el equilibrio de fuerza si la línea de empuje está fija en un punto particular en la dovela.

El comportamiento del método generalizado de Janbú es que refuerza la observación más temprana que los métodos de equilibrio de límite basados puramente en las estáticas pueden, en algunas circunstancias, subestimar el problema, produciendo condiciones de esfuerzos poco realistas. En este sentido una aproximación de Janbú no es diferente a cualquier otro método de equilibrio de límite. Las suposiciones sobre

las fuerzas inherentes entre las dovelas son diferentes, pero al final las limitaciones son similares.

1.9 MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE GENERAL

Anteriormente se mencionó que este método presenta dos ecuaciones, una para el equilibrio de fuerzas, F_f , y otra para el equilibrio de momentos, F_m . El método de GLE satisface equilibrio de momento y equilibrio de fuerza encontrando el punto de cruce de las curvas F_m y F_f . La grafica del factor de seguridad contra del lambda se muestra para los problemas de derecha-izquierda e izq-der, ilustrado en Figura 1-9. Los factores de seguridad son el mismo (1.283), pero el lambda tiene signos opuestos. Esto se requiere para mantener todas las fuerzas en la dirección correcta. Los valores de lambda a veces pueden asumir también signos opuestos, por ejemplo, cuando fuerzas laterales grandes son aplicadas

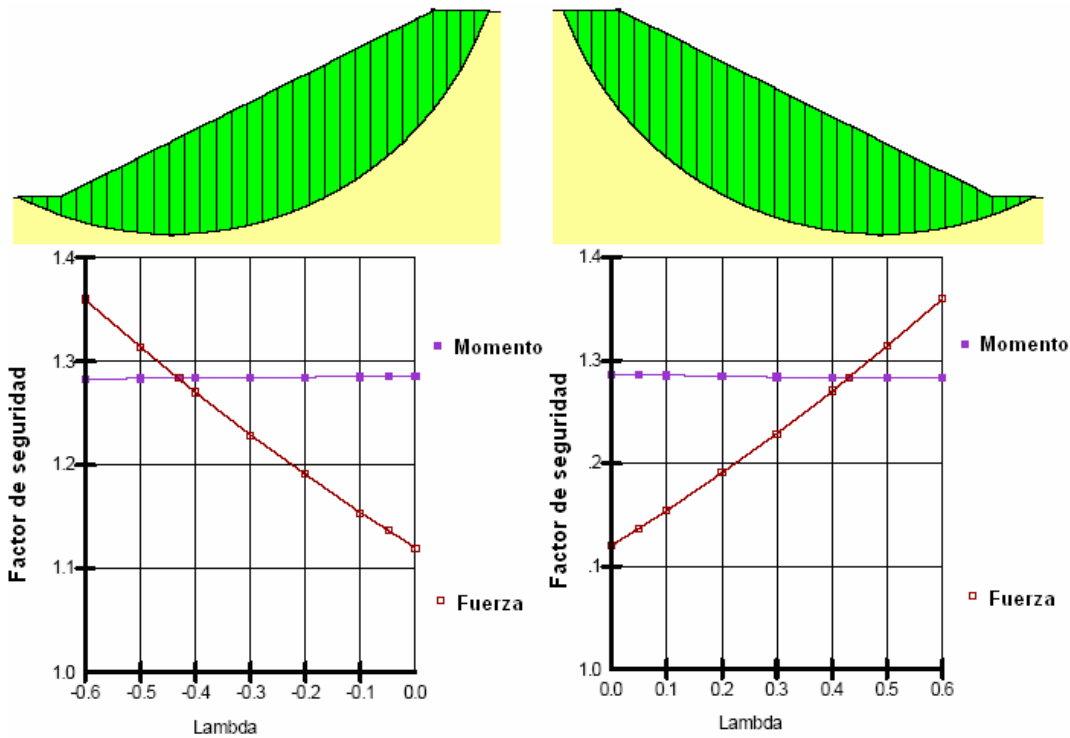


Figura 1-9. Efecto de la dirección del deslizamiento sobre lambda.

1.10 MÉTODO ORDINARIO O DE FELLENIUS

Este método también es a veces llamado el método sueco de dovelas. Éste es el primer método de dovelas desarrollado y presentado en la literatura. La simplicidad del método hizo posible calcular factores de seguridad usando cálculos manuales.

En este método, todas las fuerzas entre dovelas se ignoran. El peso de la dovela está resuelto en las fuerzas paralelas y perpendiculares a la base de la rodaja. La fuerza perpendicular a la base de la dovela es la fuerza normal base que se usa para computar la fuerzas cortantes disponible. La componente de peso paralelo a la base de la dovela es la fuerza gravitatoria. La suma de momentos sobre un punto usada para describir la superficie de falla de ensayo también se usa para calcular el factor de

seguridad. El factor de seguridad es la fuerza total de cortante disponible a lo largo de la superficie de falla dividida por la suma de las fuerzas gravitatorias (cortante que moviliza). La forma más simple de la ecuación del factor de seguridad en ausencia de cualquier presión de poros de agua para una superficie de falla redonda son:

$$FS = \frac{\sum [c\beta + N \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha} = \frac{\sum S_{resistance}}{\sum S_{mobilized}} \quad (5)$$

Donde:

C = cohesión.

β = Longitud de la base de la dovela.

N = normal base ($W \cos \alpha$).

ϕ = ángulo de fricción.

W = peso de la dovela.

ϕ = ángulo de fricción

α = inclinación de la base de la dovela.

El factor de seguridad Ordinario que usa puede ser fácilmente calculado usando una hoja de cálculo de forma manual.

Considere el problema simple en Figura 1-10. Hay 14 rodajas numeradas de izquierda a derecha. La fuerza cohesiva es 5 kPa y el ángulo de fricción de tierra ϕ es 20 grados.

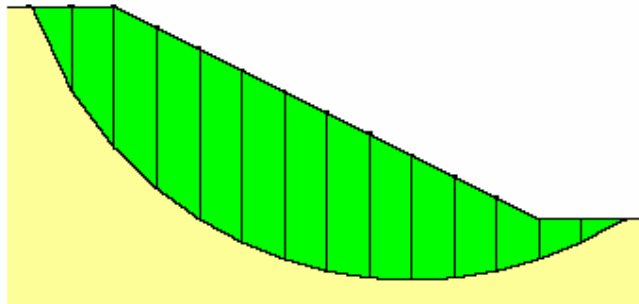


Figura 1-10. Ejemplo de un cálculo manual.

Las siguientes dos tablas muestran como el factor de seguridad puede ser fácilmente calculado. La parte más difícil es especificar las dimensiones de las dovelas.

Tabla 3. Ejemplo de cálculos manuales.

Dovela #	Ancho (m)	Media- altura (m)	Peso (kN)	Alpha (Grados)	β (m)
1	1.9	2.3	86.9	64.7	4.42
2	2.0	5.4	217.8	52.9	3.32
3	2.0	7.2	287.0	43.7	2.77
4	2.0	7.8	313.2	35.8	2.46
5	2.0	8.1	323.3	28.5	2.28
6	2.0	8.0	320.9	21.8	2.15
7	2.0	7.7	307.7	15.4	2.07
8	2.0	7.1	285.1	9.2	2.03
9	2.0	6.3	253.7	3.0	2.00
10	2.0	5.3	213.7	-3.0	2.00
11	2.0	4.1	165.1	-9.2	2.03
12	2.0	2.7	107.7	-15.4	2.07
13	2.0	1.5	60.9	-21.8	2.15
14	2.0	0.6	23.3	-28.5	2.28

Tabla 4. Ejemplo de cálculos manuales.

Dovela #	$C \beta$	N	$N \tan \phi$	$W \sin \alpha$	$C \beta + N \tan \phi$
1	22.12	37.09	13.50	78.56	35.62
2	16.60	131.25	47.77	173.84	64.37
3	13.83	207.49	75.52	198.27	89.35
4	12.32	254.18	92.51	182.98	104.83
5	11.38	284.02	103.37	154.50	114.76
6	10.77	297.88	108.42	119.23	119.19
7	10.37	296.70	107.99	81.67	118.36
8	10.13	281.48	102.45	45.40	112.58
9	10.01	253.30	92.19	13.46	102.21
10	10.01	213.35	77.65	-11.34	87.67
11	10.13	163.01	59.33	-26.29	69.46
12	10.37	103.87	37.81	-28.59	48.18
13	10.77	56.50	20.56	-22.61	31.33
14	11.38	20.49	7.46	-11.15	18.84
Σ	-	-	-	947.93	1116.75

De las sumas listadas, el factor de seguridad puede calcularse para ser:

$$FS = \frac{\sum [c\beta + N \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha} = \frac{1116.75}{947.93} = 1.18$$

SLOPE/W da el mismo factor de seguridad como se muestra en la Figura 1-11.

1.18

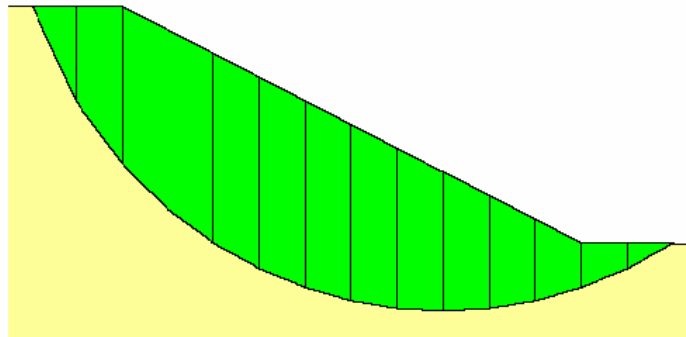


Figura 1-11. Cálculo del factor ordinario de seguridad por SLOPE/W.

Los aspectos más notables de este método son la fuerza entre dovelas y polígonos de fuerza. Figure 1-12 muestras el diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerza para dovela 3 y dovela 13. La dovela 3 simplemente está debajo de la cresta del talud y la dovela 13 está debajo del pie del talud. En primer lugar, note que no hay fuerzas normales ni cortantes entre las dovelas. En segundo lugar, note el cierre de polígono de fuerza sumamente pobre. La falta de cierre de polígono de fuerza indica que las dovelas no están en el equilibrio de fuerza. Sin las fuerzas normales entre dovelas, no hay nada disponible para contrarrestar los componentes laterales del cortante en la base y normal, particularmente cuando la base de la dovela está cerca de estar horizontal.

Al interpretar el diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerza, es importante notar que el cortante a la base de la dovela es el cortante que moviliza, no la resistencia de fuerza cortante disponible. La última columna en las listas de las tablas anteriores la resistencia de fuerza cortante disponible que tiene que ser dividido por el factor de seguridad para emparejar los valores del cortante base mostrada en el diagrama de cuerpo libre de las dovelas.

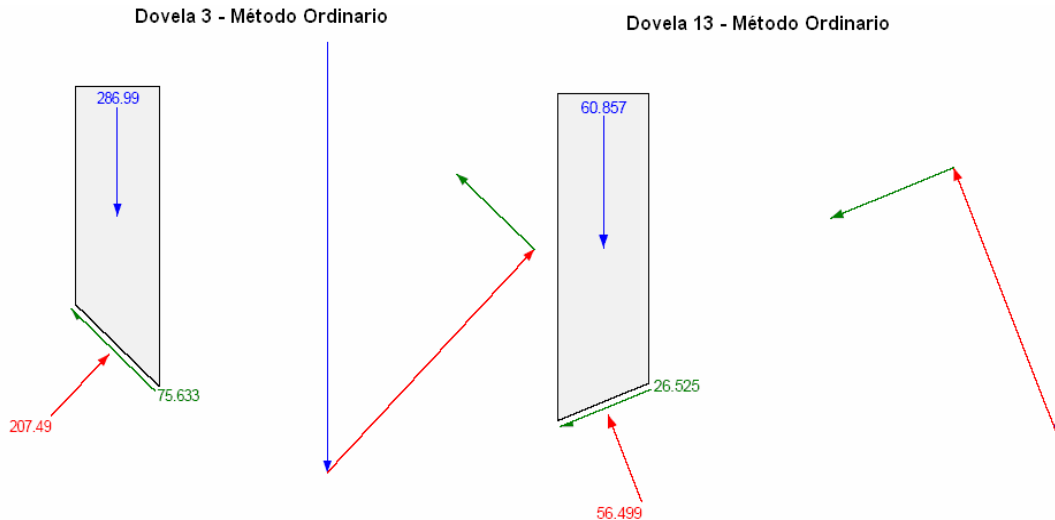


Figura 1-12. Diagramas de cuerpo libre y polígono de fuerzas para el método ordinario.

Debido al pobre cierre de polígono de fuerza, el método Ordinario puede dar factores de seguridad poco realistas y por consiguiente no debe usarse en la práctica. Un Factor de seguridad más realista para este problema simple está alrededor de 1.36 que son aproximadamente superior 15% que los 1.18 obtenidos del método Ordinario

1.11 MÉTODO SIMPLIFICADO DE BISHOP

En el 1950 Profesor Bishop en la Universidad Imperial en Londres inventó un método que incluyó las fuerzas normales entre dovelas, pero ignoró las fuerzas cortantes. Bishop desarrolló una ecuación para el normal base de la dovela sumando las fuerzas que actúan en dirección vertical sobre la dovela. La consecuencia de esto es que el normal base se vuelve función del factor de seguridad. Esto hace a su vez no lineal la función del factor de seguridad (es decir, FS aparece en ambos lados de la ecuación) y se exige un procedimiento iterativo para calcular el factor de seguridad. Una forma simple de ecuación del factor de seguridad Simplificado del Bishop en la ausencia de cualquier presión de poro-agua es:

$$FS = \frac{\sum \left[(c\beta + W \tan \phi) \left\{ \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS} \right\} \right]}{\sum W \sin \alpha} \quad (6)$$

FS está en ambos lados de la ecuación como notamos anteriormente. La ecuación no es diferente de la ecuación del factor Ordinario de seguridad salvo el término m_a que se define:

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS} \quad (7)$$

Para resolver para el factor Simplificado del Bishop de seguridad, es necesario empezar con una suposición para FS. En SLOPE/W, la suposición inicial se toma como el factor Ordinario de seguridad. La suposición inicial para FS se usa para calcular el m_a y entonces un nuevo FS se calcula. Luego el nuevo FS se usa para calcular el m_a y entonces otro nuevo FS se calcula. El procedimiento se repite hasta que el último FS calculado esté dentro de una tolerancia especificada del FS anterior.

Afortunadamente, normalmente toma sólo unas iteraciones para alcanzar una solución convergida.

Ahora si nosotros examinamos el diagrama de cuerpo libre y el polígono de fuerzas para la misma dovela examinada en el método ordinario, nosotros vemos una marcada diferencia (Figura 1-13). El cierre del polígono de fuerza es ahora bastante bueno con la suma de las fuerzas normales entre dovelas. No Hay fuerzas cortantes entre dovelas, como es asumido por Bishop, pero son incluidas las fuerzas normales.

En una gráfica de factor de seguridad contra el lambda, como en Figura 1-14, el valor del factor de seguridad Simplificado del Bishop es donde en la curva de equilibrio de momento el lambda es cero (FS = 1.36).

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

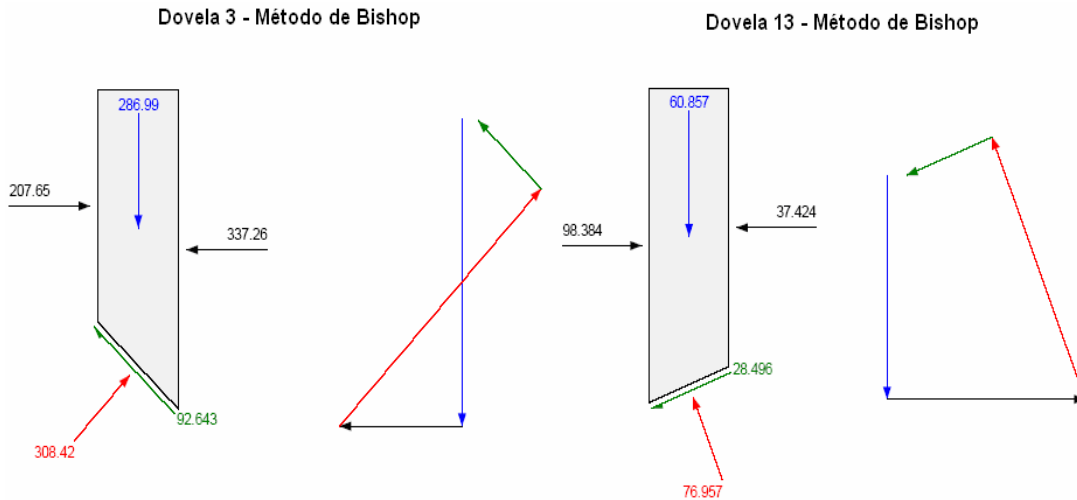


Figura 1-13. Diagramas de cuerpo libre y polígono de fuerzas para el método de Bishop.

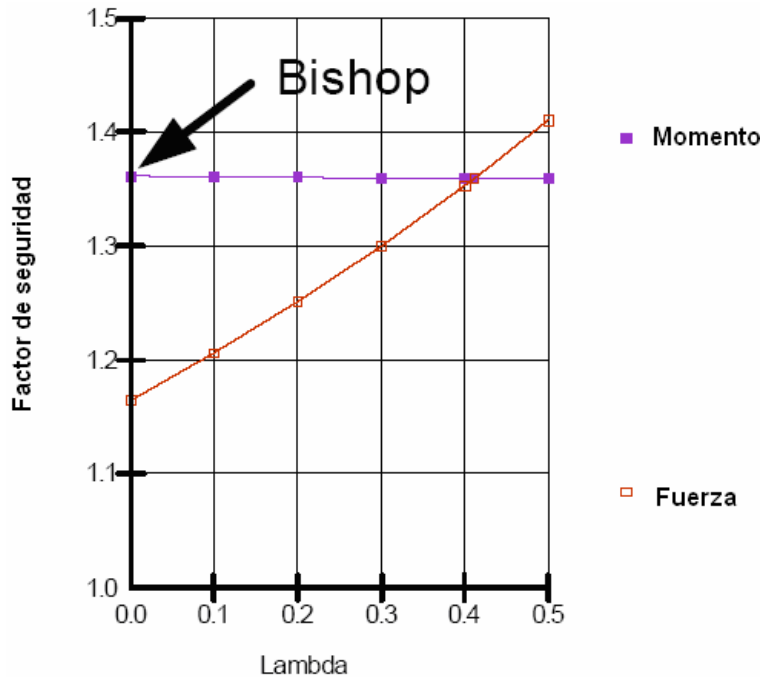


Figura 1-14. Factor de seguridad para el método simplificado de Bishop.

Note que en este caso el factor de seguridad por equilibrio de momento (F_m) es insensible a las fuerzas entre dovelas. La razón para esto, como discutido en el capítulo anterior, es que la masa deslizante no necesita de ninguna fuerza presente entre dovelas para poder girar. Esto no es verdad para el equilibrio de fuerza y así el factor de seguridad por equilibrio de fuerzas (F_f) es sensible a las fuerza entre dovelas.

En el resumen, el método Simplificado del Bishop, (1) considera la fuerza normal, pero ignora las fuerzas cortantes, y (2) satisface encima de todo el equilibrio del momento, pero no el equilibrio de fuerza horizontal global.

1.12 MÉTODO SIMPLIFICADO DE JANBÚ

El método Simplificado del Janbú es similar al método Simplificado del Bishop sólo que el método Simplificado del Janbú satisface sólo equilibrio de fuerza horizontal global, pero no el equilibrio del momento global.

La Figura 1-15 muestra el diagrama de cuerpo libre y el polígono de fuerzas del método Simplificado del Janbú. El cierre del polígono de fuerzas en la dovela es realmente bueno que para el método Simplificado de Bishop. El factor de seguridad, sin embargo, es 1.16 diferente al 1.36 propuesto por el método Simplificado de Bishop. Ésta es una diferencia significativa. El factor de seguridad Simplificado de Janbú es realmente demasiado bajo, aunque las dovelas están en el equilibrio de fuerza.

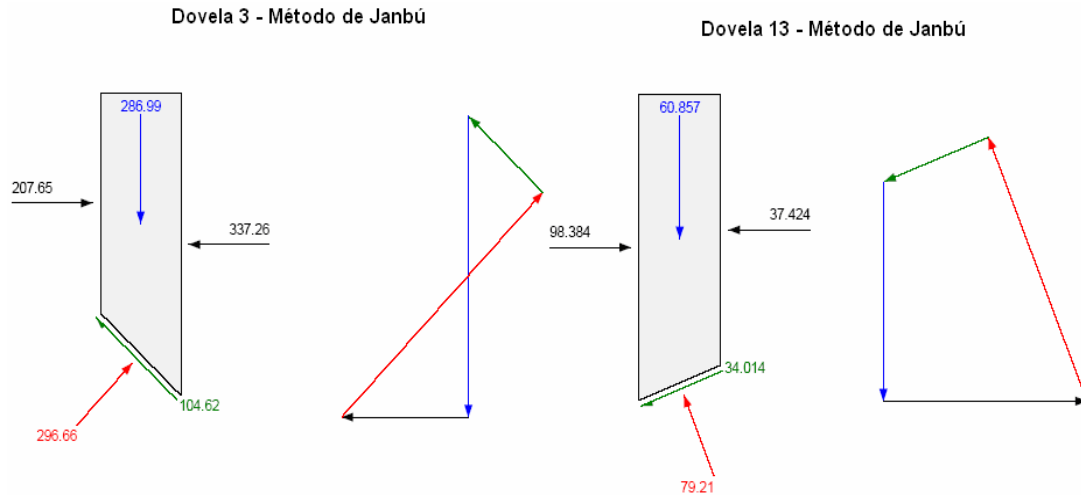


Figura 1-15. Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerza para el método simplificado de Janbú.

Como con el método Simplificado del Bishop, λ es cero en el método Simplificado del Janbú, desde que el cortante entre dovelas se ignora. Por consiguiente, el factor de seguridad Simplificado del Janbú es, en la curva de equilibrio de fuerza, donde el λ es el cero (Figura 1-16). Desde que el equilibrio de fuerza es sensible al cortante entre dovelas supuesto, ignorando el cortante entre dovelas, como en el método Simplificado del Janbú, hace el factor de seguridad resultante demasiado bajo para las superficies de falla redondas.

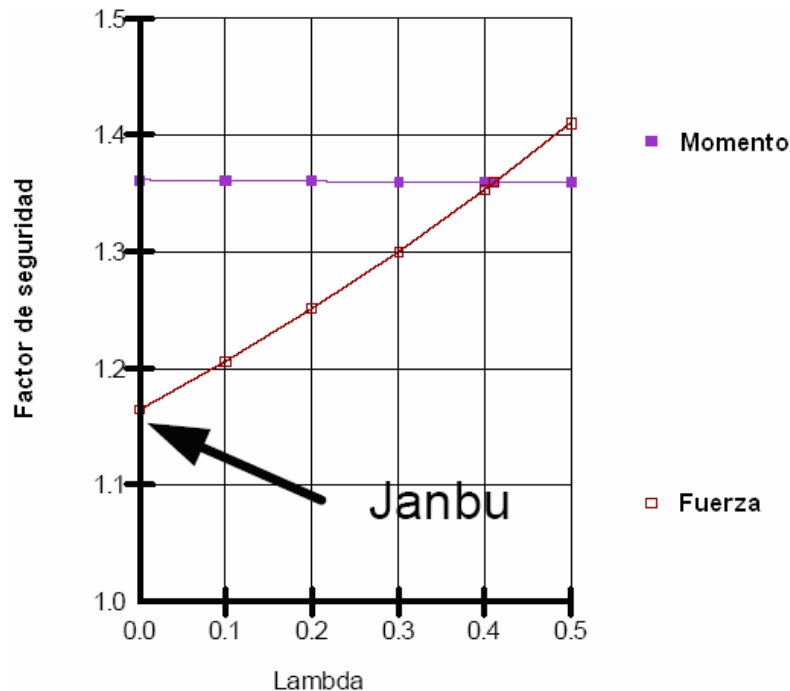


Figura 1-16. Factor de seguridad del método simplificado de Janbú.

En el resumen, el método Simplificado del Janbú, (1) considera la fuerza normal entre dovelas, pero ignora las fuerzas cortantes, y (2) satisface el equilibrio de toda fuerza horizontal, pero no satisface el equilibrio del momento.

1.13 MÉTODO DE SPENCER

Spencer (1967) desarrolló dos ecuaciones de factor de seguridad; uno con respecto al equilibrio del momento y otro con respecto al equilibrio de fuerza horizontal. Él adoptó una relación constante entre las fuerzas cortantes y las fuerzas normales, y a través de un procedimiento iterativo cambiando la relación de cortante a normal hasta que los factores de seguridad sean el mismo. Encontrando la relación cortante-normal que hace los dos factores de seguridad el mismo, significa que el equilibrio de momento y equilibrio de fuerza están satisfechos.

SLOPE/W usa la ecuación siguiente para relacionar el cortante entre dovelas (X) y las fuerzas normales (E).

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

En el método de Spencer, la función $f(x)$ es una constante; es decir, la relación cortante-normal entre dovelas es el mismo.

En la Figura 1-17 se muestra una situación de estabilidad de talud típica. El Factor de Seguridad de Spencer es de 1.140

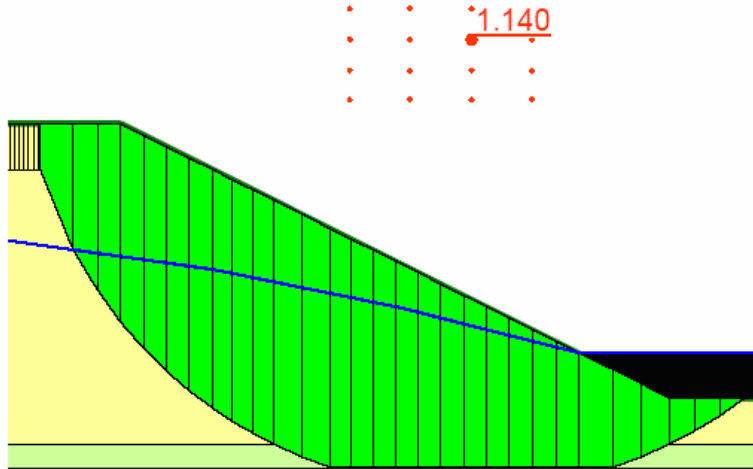


Figura 1-17. Situación de estabilidad de talud típica.

En una gráfica de Factor de Seguridad contra Lambda como en Figura 1-18 el factor de seguridad de spencer es donde las curvas de el momento y el equilibrio de fuerza se cruzan. Lambda es el punto de cruce que es 0.12. La función $f(x)$ es 1.0 para el método de Spencer. Esto significa que la ecuación que relaciona las fuerzas cortantes y normales es:

$$X = E \times 0.12 \times 1.0$$

$$X = 0.12E$$

Un gráfico de la función especificada y la función entre dovelas aplicada se muestra en Figura 1-19. Note que la función aplicada está una constante en 0.12.

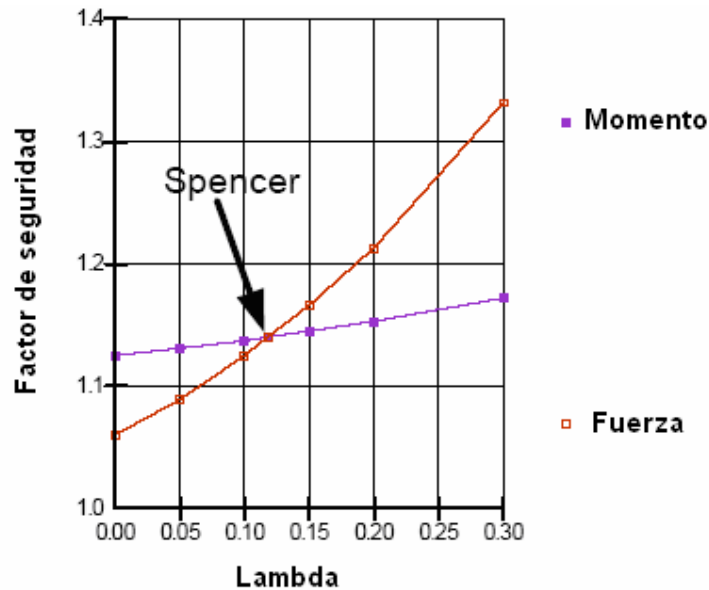


Figura 1-18. Factor de seguridad de Spencer.

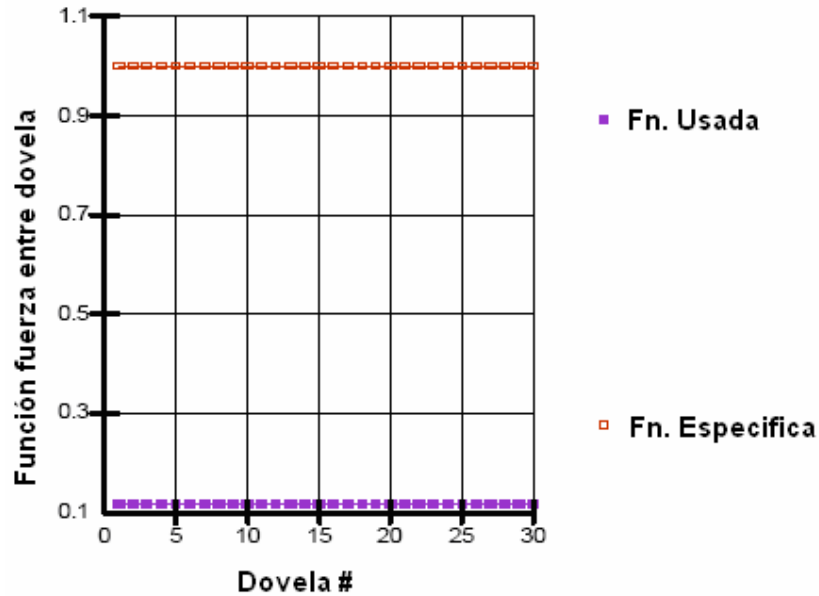


Figura 1-19. Función entre dovelas para el método de Spencer.

Dovela 6 - Método de Spencer

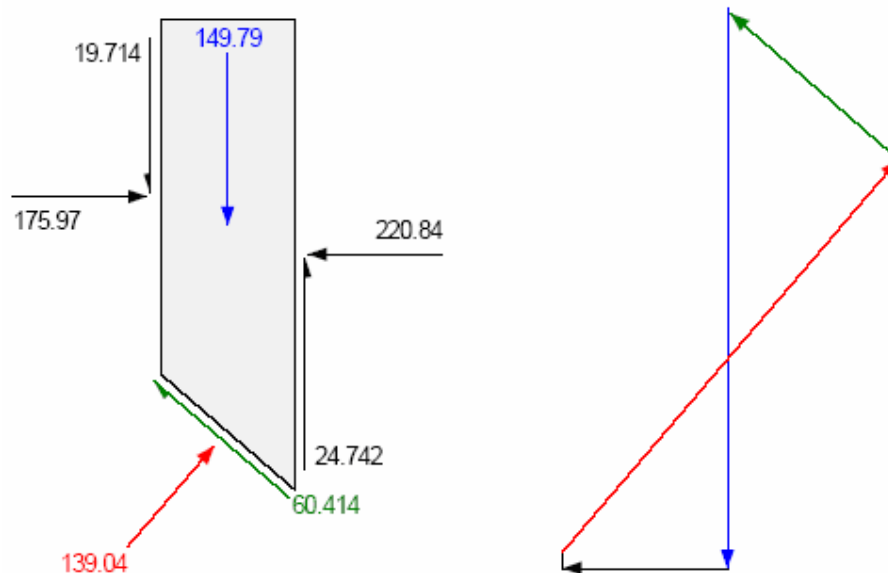


Figura 1-20. Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerza para el método de Spencer.

En la izquierda de la dovela, la relación de cortante-normal es $19.714/175.97$ que es 0.12. En el lado derecho la relación es $24.742/220.84$ que también es 0.12. Una relación cortante-normal de 0.12 significa que la resultante de las fuerzas entre dovelas está inclinada a un ángulo de $\arctan(0.12)$ que es 6.74 grados.

El valioso notar es que cuando las fuerzas cortantes y normales entre dovelas son incluidas, el cierre de polígono de fuerza es muy bueno.

En el resumen, el método de Spencer:

- Considera tanto fuerzas cortantes como fuerzas normales,

- Satisface equilibrio de momento y de fuerza, y
- Asume una función de fuerzas constantes entre dovelas.

1.14 MÉTODO DE MORNGENSTERN-PRICE (M-P)

Morgenstern y Price (1965) desarrolló un método similar al método de Spencer, pero ellos permitieron varias funciones de fuerza entre dovelas usuario - especificado. Las funciones de fuerzas entre dovelas disponibles en SLOPE/W para el uso con el método Morgenstern-Price (M-P) son:

- Constante
- Medio-seno
- Seno – sujeto
- Trapezoidal
- Datos de puntos especificados

Al seleccionar la función Constante, el método de M-P es idéntico al método de Spencer.

Para los propósitos ilustrativos, observemos un análisis de M-P con una función del medio-seno para el mismo problema como fue usado para discutir el método de Spencer. El resultado se presenta en Figura 1-21.

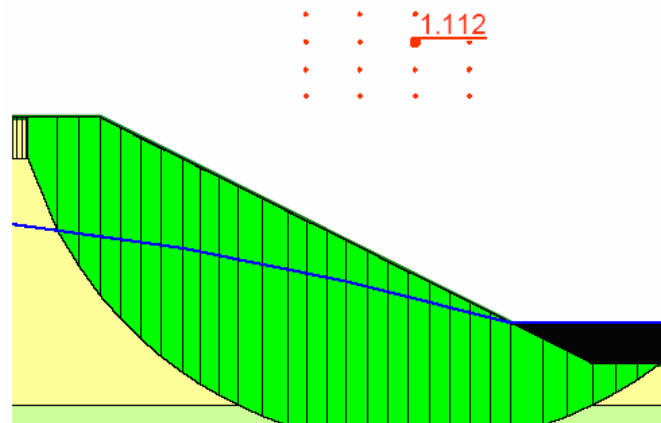


Figura 1-21. Resultado del análisis de M-P.

La Figura 1-22 muestra los factores de seguridad por momento y fuerza varían con lambda. El Factor de seguridad M-P ocurre donde las dos curvas se cruzan.

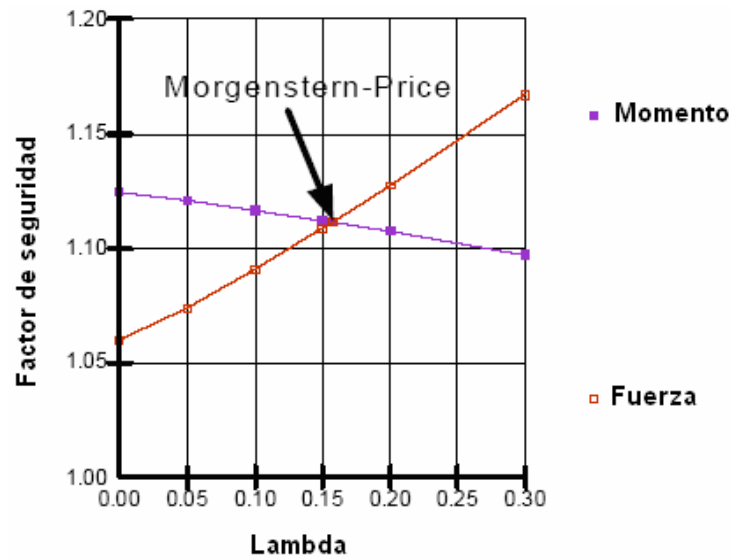


Figura 1-22. Factor de seguridad M-P con la función de medio-seno.

Las funciones de fuerzas aplicadas y la especificada se presentan en la Figura 1-23. La función especificada tiene la forma de una curva del medio-seno. La función aplicada tiene la misma forma, pero se reduce por un valor igual a lambda que es 0.145. Considere las fuerzas en la dovela 10 (Figura 1-24). La función especificada a la dovela 10 es 0.86 y lambda es 0.146. La fuerza normal en el lado derecho de la dovela 10 es 316.62. Las fuerzas cortantes entre dovelas correspondientes son entonces,

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

$$X = 316.62 \times 0.146 \times 0.86$$

$$X = 39.7$$

Esto iguala el valor de los cortantes entre dovelas en el diagrama del cuerpo libre en Figura 1-31. Como con el método de Spencer, el cierre de polígono de fuerza es muy bueno con el método de M-P, además las fuerzas normales y cortantes entre las dovelas son incluidas.

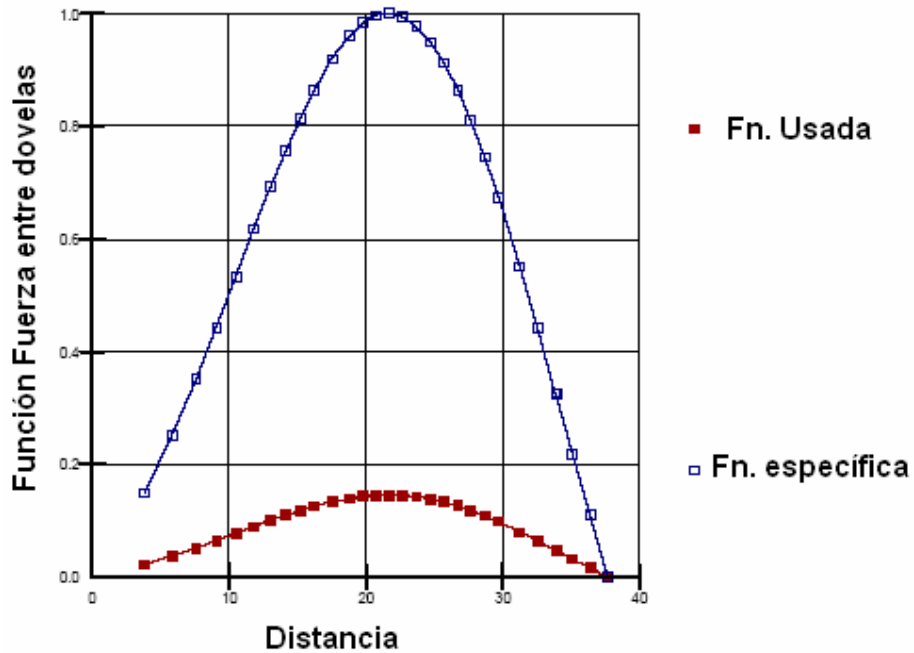


Figura 1-23. Función entre dovela medio-seno.

Dovela 10 - Método de Morgenstern-Price

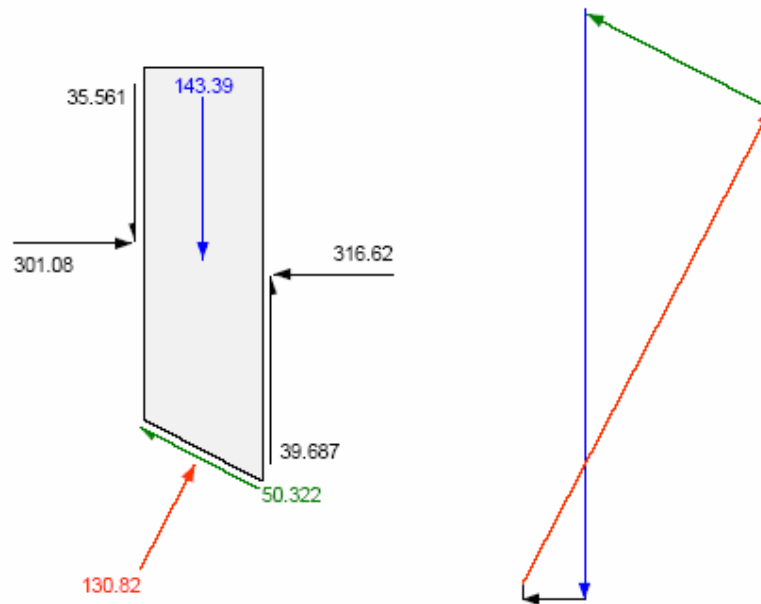


Figura 1-24. Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerza para el método M-P.

Una observación significativa en la Figura 1-22 es que el M-P Factor de Seguridad (punto de cruce) es más bajo que el Factor de Seguridad Simplificado del Bishop. Esto es porque la curva de equilibrio de momento tiene una pendiente negativa. Este ejemplo muestra que un método más simple como el método Simplificado de Bishop que ignora las fuerzas cortantes entre dovelas no siempre se va por el lado de la seguridad. Un método más riguroso como el método de M-P que considera tanto fuerzas normales y cortantes resulta en un más bajo factor de seguridad en este caso.

En el resumen, el método del Morgenstern-Price:

- Considera las fuerzas normales y de cortante.
- Satisface equilibrio de momento y de fuerzas, y
- Permite para una variedad de funciones de fuerzas que pueden ser especificadas por el usuario.

1.15 MÉTODO GENERALIZADO DE JANBÚ

El método generalizado de Janbú es algo diferente que todos los otros métodos de equilibrio límite discutidos anteriormente. Este método impone una distribución de esfuerzos en la masa potencialmente deslizante definiendo una línea de falla. Se asume que la resultante cortante-normal actúa donde la línea de falla corta las dovelas que típicamente es a 1/3 del punto mas bajo a lo largo de los lados de las dovelas representa una distribución de esfuerzos hidrostática. Asumiendo la posición de la resultante hace posible calcular la fuerza cortante entre dovelas tomando los momentos cerca del centro de la base de la rodaja, los normales son primero calculados usando el método simplificado de Janbú que se ha discutido antes. Luego las fuerzas cortantes son determinadas tomando los momentos sobre la base de la rodaja.

El método Generalizado de Janbú sólo satisface equilibrio de fuerza global, que es igual que el Janbú Simplificado. El equilibrio del momento sólo está satisfecho en el nivel de la dovela.

El capítulo anterior en los Principios de Equilibrio de Límite discute la consecuencia de imponer una distribución de esfuerzos en la masa potencialmente deslizante. Las formulaciones de equilibrio límite necesariamente no producen las distribuciones de esfuerzos realistas. Estas formulaciones encuentran las fuerzas de la dovela que aseguran equilibrio de fuerza de cada dovela y eso asegure un factor de seguridad constante para cada dovela. Estas características inherentes pueden producir los esfuerzos poco realistas, y si los esfuerzos son poco realistas, la propia dovela no puede satisfacer el equilibrio del momento. Numéricamente esto significa que el punto de aplicación de la resultante de fuerzas puede estar fuera de la dovela. Recíprocamente, si nosotros encontramos las fuerzas de la dovela que aseguran equilibrio del momento de cada dovela, entonces no puede ser posible asegurar equilibrio de fuerza si el factor de seguridad es supuesto el mismo para cada dovela.

Concentraciones de esfuerzos que se levantan de las esquinas afiladas en una superficie de falla lineal o de fuerzas concentradas representando el refuerzo pueden crear las dificultades de convergencia en el método Generalizado de Janbú. También, el método puede exhibir el cierre de polígono de fuerza muy pobre. Estableciendo el equilibrio de momento significa que no siempre es posible lograr el equilibrio de fuerza de la dovela. La Figura 1-25 nos muestra el diagrama de cuerpo libre y el polígono de fuerzas utilizando el método generalizado de Janbú.

Usted notará en las publicaciones en el método Generalizado de Janbú que el potencial ilustrado las masas deslizantes es a menudo relacionado a la extensa profundidad. En un deslizamiento poco profundo relativamente largo, la distribución de esfuerzo está probablemente cerca de ser hidrostático con la profundidad, similar a lo asumido en el método. El método Generalizado de Janbú trabaja mejor cuando la distribución de esfuerzos real está cerca de la distribución de esfuerzos impuesta.

Dovela 6 - Método generalizado de Janbú

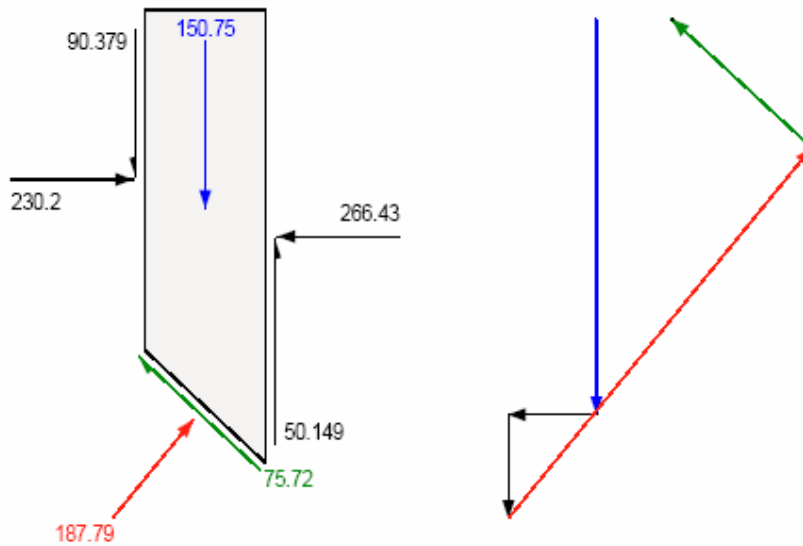


Figura 1-25. Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerza para el método generalizado de Janbú.

En resumen, el método Generalizado de Janbú es simplemente otro acercamiento a una formulación de equilibrio límite. No es necesariamente bueno o mucho peor que cualquiera de los otros métodos, como él simplemente tiene las limitaciones como todos los otros métodos. Los factores de seguridad del método Generalizado de Janbú serán similares a esos métodos que consideran las fuerzas cortantes y normales entre dovelas, particularmente si no hay ninguna esquina afilada a lo largo de la superficie de falla o las cargas concentradas altas que causan las concentraciones de esfuerzos.

Un entendimiento detallado del método y sus límites lleva a una confianza mayor en el uso y en la interpretación de los resultados. Para usar el método de equilibrio límite eficazmente, es también importante examinar detalladamente la fuerza sobre la dovela y la variación de parámetros a lo largo de la superficie de falla, por lo menos alguna vez durante el curso de un proyecto. Mirar un gráfico de FS contra lambda, por ejemplo, es una gran ayuda a la hora de definir una función de fuerza entre dovelas.

1.16 COMPARACIÓN DE LOS DIVERSOS MÉTODOS

La cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos en todo el mundo son los simplificados de Bishop y de Janbú, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de los factores de seguridad que se obtienen por estos dos métodos generalmente difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern – Price.

Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no siempre es posible, los factores de seguridad determinados con el método de Bishop difieren por

aproximadamente el 5% con respecto a soluciones más precisas, mientras el método simplificado de Janbú generalmente subestima el factor de seguridad hasta valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores de 5%. Esta aseveración fue documentada por Freddlund y Krahn (1977).

Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos de FS. Por esta razón se prefieren métodos más sencillos pero más fáciles de manejar como son los métodos simplificados de Bishop o de Janbú.

CAPÍTULO 2. PROGRAMA SLOPE/W

2.1 INTRODUCCIÓN

Es un software que usa la teoría de equilibrio límite para calcular el factor de seguridad de taludes de tierra y roca. La formulación comprensiva de SLOPE/W hace posible analizar fácilmente problemas de estabilidad de taludes simples y complejos usando varios métodos para calcular el factor de seguridad. Los análisis pueden ser realizados utilizando parámetros determinísticos o probabilísticos.

El programa requiere como datos de entrada los siguientes valores de las características físicas y parámetros de resistencia del material: peso específico, ángulo de fricción interna y la cohesión. Los cuales se obtuvieron directamente del estudio de mecánica de suelos.

SLOPE/W es el producto del software principal para calcular el factor de seguridad de suelos y taludes sobre roca. Con SLOPE/W, usted puede analizar los problemas simples y complejos para una variedad de formas de la superficie de falla, condiciones de presión de poro de agua, propiedades del suelo, métodos del análisis y condiciones de carga.

Usando el equilibrio límite, SLOPE/W puede modelar tipos de suelo heterogéneos, estratigrafía y geometría de superficie de fallas complejas, condiciones de presión de poro de agua inconstantes que usan una selección grande de modelos de suelo. Pueden realizarse los análisis usando una entrada de datos determinístico o probabilístico. Con este rango comprensivo de rasgos, SLOPE/W puede usarse para analizar casi cualquier problema de estabilidad de talud.

SLOPE/W permite crear la geometría dibujándola en la pantalla. Entonces se escoge un método del análisis, se especifica las propiedades del suelo y presiones de poro de agua, definimos los refuerzos, y crea sus superficies de falla de ensayo.

Una vez usted hemos resuelto el problema de estabilidad, SLOPE/W ofrece muchas herramientas para ver los resultados. Podemos Desplegar la superficie de falla mínima y factor de seguridad, o ver cada uno individualmente. Ver la información sobre la superficie de falla crítica, incluso la masa deslizante total, un diagrama del cuerpo libre y un polígono de fuerza que muestran las fuerzas que actúan en cada dovela.

Este programa es una herramienta muy útil para resolver problemas de estabilidad en estructuras de suelo. Su interfase permite un fácil manejo del mismo lo que permite al modelador visualizar de una manera sencilla el problema que se presenta.

2.2 CARACTERISTICAS

El programa SLOPE/W presenta las siguientes características:

- Incluye los métodos de equilibrio Limite como el Morgenstern - Price, GLE, Spencer, Bishop, ordinario, Janbú, y más.
- Incluye modelos de fuerza de suelo como Mohr - el Culombio, bilineal, No drenado ($\Phi=0$), fuerza anisotrópica, las funciones cortante/normal , y muchos tipos de funciones de fuerza.

- Especifique muchos tipos de funciones de fuerza cortante-normal entre dovelas.
- Las opciones de presión de poro de agua incluyen los coeficientes de R_u , la línea piezométrica, contornos de presión, etc.
- Defina las superficies de falla potenciales por una reja de líneas de centros y radio, los bloques de superficie de falla apuntan, o especifican totalmente las formas.

2.2.1 FORMULACIONES

SLOPE/W está formulado en término de las ecuaciones de los factores de seguridad para el equilibrio de momento y equilibrio de fuerza. Por ejemplo, el método del Morgenstern-Price satisface tanto equilibrio de fuerzas como de momentos. Esta formulación general lo hace fácil de calcular el factor de seguridad para una variedad de métodos y entender las relaciones y diferencias prontamente entre todos los métodos.

2.2.2 FUNCIÓN FUERZA ENTRE DOVELAS

SLOPE/W usa la función del medio-seno por defecto para los M-P y métodos de GLE. La función medio-seno tiende a concentrar la fuerza cortante entre dovelas hacia el medio de la masa corrediza y disminuye el cortante en la cresta y en el área del pie del talud.

Predefinir la función medio-seno para este método esta basado principalmente en la experiencia y la intuición y no en cualquier consideración teórica.

2.2.3 FORMAS DE LA SUPERFICIE DE FALLA

Es Inherente en los análisis de estabilidad por equilibrio límite analizar muchas superficies de falla de ensayo y encontrar la superficie de falla que dé el factor más bajo de seguridad. Incluido en este acercamiento del ensayo es la forma de la superficie de falla; es decir, si es redonda, lineal o alguna combinación de segmentos curvos y lineales. SLOPE/W tiene una variedad de opciones para especificar las superficies de falla de ensayo.

A menudo la forma de superficie de falla se controla, por lo menos en parte por límites estratigráficos o los rasgos geológicos como las fallas o superficies de pre-corte. Definir estos rasgos se vuelve parte de formar las superficies de falla de ensayo. El punto es que todavía hay, incluso con los tales controles estructurales, una necesidad de examinar muchos deslizamientos de ensayo al parecer desde que la superficie de falla no se define completamente por los límites estratigráficos.

La posición de la superficie de falla crítica es afectada por las propiedades de resistencia de suelo. La posición de la superficie de falla crítica para un suelo completamente friccional ($c = 0$) es sumamente diferente que para un suelo con una fuerza asignada no drenada ($\phi = 0$).

Esto complica la situación, porque significa esto que para encontrar la posición de la superficie de falla crítica, es necesario definir las propiedades de suelo con precisión por lo que se refiere a los parámetros de fuerza efectiva.

Recientes investigaciones ha mostrado asumiendo formas de superficie de falla especificadas por el usuario necesariamente no dan el factor de seguridad mas bajo. Algoritmos que alteran la forma de superficie de falla de alguna manera sistemática tienden a dar los más bajos factores de seguridad que para una forma de superficie de falla predeterminada. Por ejemplo, digamos un factor mínimo de seguridad se ha encontrado para una superficie de falla redonda. Más allá el refinamiento de la forma puede llevar a una superficie de falla no-redonda con un más bajo factor de seguridad.

En SLOPE/W esto se llama la optimización, auto-búsqueda o auto localización y posición de la forma de superficie de falla.

Encontrando la forma de superficie de falla crítica y la posición todavía sigue siendo uno de los problemas importantes en cualquier análisis de equilibrio límite, a pesar de todas las técnicas avanzadas disponible.

2.2.4 FUERZAS DE FILTRACIÓN

La fuerza de filtración en un análisis de estabilidad puede generar confusiones. El concepto de fuerzas de la filtración es fácil de comprender, pero incluso las fuerzas de filtración en un análisis de equilibrio límite están mal interpretadas.

Considere la rodaja en Figura 2-1 la línea del nivel freático pasa a través de la dovela referenciado a la base. La fuerza de agua en el lado izquierdo de la dovela es más grande que en el lado derecho. La diferencia entre las fuerzas de agua a ambos lados de la dovela es conocida como fuerza de filtración. La fuerza es perdida o disipada como los flujos de agua a través de la dovela y la fuerza de la filtración es proporcional a la pérdida de fuerza.

Ahora si la fuerza de la filtración será considerada en una formulación de equilibrio de límite, es necesario tratar con las fuerzas múltiples entre dovelas. Debajo de la superficie freática nosotros necesitamos una fuerza de agua y una fuerza del suelo dónde la fuerza del suelo es determinada del peso de la unidad flotante o sumergida. Sobre la superficie freática, la fuerza del suelo es determinada del peso de la unidad total. Esto se ilustra en Figura 2-1

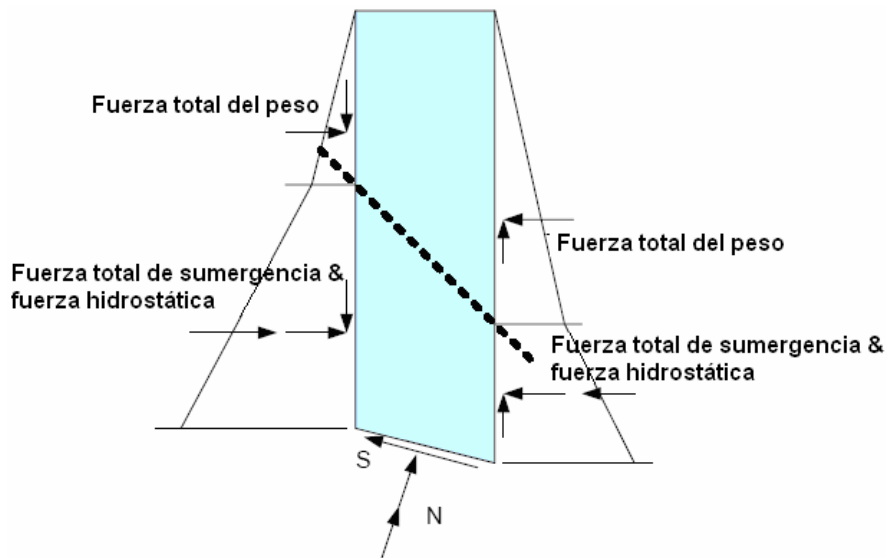


Figura 2-1. Fuerzas entre dovelas cuando las fuerzas de filtración están en consideración

Una fuerza normal y una de cortante en cada lado es adecuada para satisfacer las ecuaciones inherentes de estáticas. El primero objetivo es asegurar equilibrio de fuerza de cada rodaja.

La formulación de SLOPE/W usa el concepto de fuerzas de frontera y pesos totales - SLOPE/W no usa el concepto alternativo de fuerzas de filtración y sumergencia o los pesos de la unidad flotantes. Es importante ser consciente de la formulación de SLOPE/W al ver las fuerzas de la dovela. Las fuerzas de la dovela son todas las fuerzas del total. SLOPE/W no muestra las fuerzas de filtración al desplegar el polígono de fuerzas. Las presiones de agua entran en la obra en el cálculo de fuerza del cortante base, pero las fuerzas producidas por el agua se no entran en los cálculos de equilibrio de la dovela.

2.3 FORMAS DE LA SUPERFICIE DE FALLA

2.3.1 INTRODUCCIÓN

Determinando la posición de la superficie de falla crítica con el factor más bajo de seguridad es uno de los problemas más importantes en un análisis de estabilidad. Como es bien sabido, encontrar la superficie de falla crítica involucra un procedimiento de ensayo. Una posible superficie de falla se crea y el factor de seguridad asociado se calcula. Esto se repite para muchas posibles superficies de falla y, al final, la superficie de falla de ensayo con el factor más bajo de seguridad se toma como la superficie de falla crítica.

El programa SLOPE/W maneja muchas maneras diferentes para definir la forma y posiciones de superficies de falla de ensayo.

2.3.2 GRILLA Y RADIO PARA DESLIZAMIENTOS CIRCULARES

Las superficies de falla de ensayo redondas eran inherentes en las formulaciones de equilibrio de límite más antiguas y las técnicas para especificar las superficies de falla redondas han invadido en estos tipos de análisis. La superficie de falla de ensayo es un arco de círculo. El arco es esa porción de un círculo que corta el talud. Un círculo puede definirse especificando las coordenadas x - y del centro y el radio. Una variación ancha de superficies de falla de ensayo puede especificarse con una grilla definida de centros del círculo y un rango de radios definidos. En SLOPE/W, este procedimiento se llama el método de Grilla y Radio. La Figura 2-2 muestra un ejemplo típico.

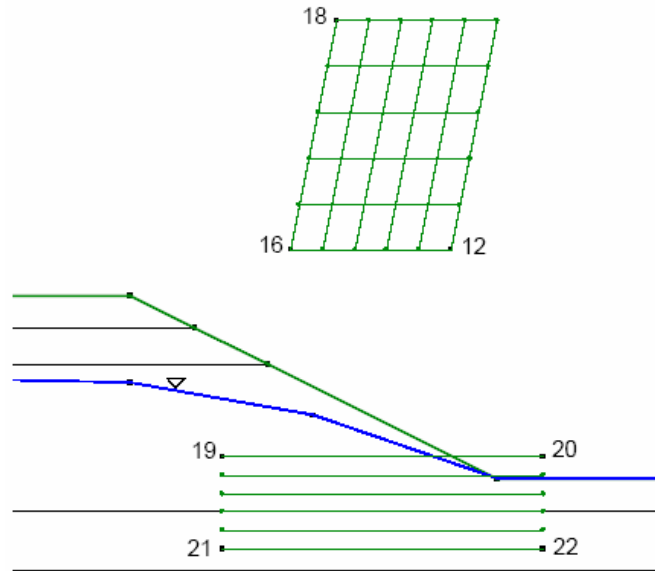


Figura 2-2. Método de la grilla y radio para especificar las superficies de falla de ensayo.

La grilla sobre el talud es la grilla de centros de rotación. Cada punto de la grilla es el centro del círculo para los deslizamientos de ensayo. En este ejemplo hay 36 (6 x 6) puntos en la grilla o centros de círculos.

Los radios de círculo de ensayo se especifican con radios o líneas tangentes. Las líneas se especifican por las cuatro esquinas de una caja. En el ejemplo anterior, las cuatro esquinas son 19 (izquierda superior), 21 (izquierda inferior), 22 (derecho inferior) y 20 (derecho superior). Para el SLOPE/W el procesador principal para interpretar la especificación de línea de radio correctamente, los cuatro puntos necesitan empezar por la izquierda superior y proceder en dirección contraria al sentido de las agujas del reloj alrededor de la caja. El número de incrementos entre las esquinas superior e inferior puede especificarse. En el ejemplo anterior hay cinco incrementos que hacen un número total de líneas del radio igual a 6.

Para empezar a formar las superficies de falla de ensayo, SLOPE/W forma una ecuación para la primera línea de radio. Luego SLOPE/W encuentra la distancia perpendicular entre la línea de radio y un centro de la grilla. La distancia perpendicular se vuelve el radio de la superficie de falla de ensayo. Las líneas de radio especificadas son realmente más correctamente las líneas tangentes; es decir, ellos son la tangente de las líneas a los círculos de ensayo. La Figura 2-3 muestra un círculo imaginario. La línea de radio especificada es tangente al círculo. La superficie de falla de ensayo es donde el círculo corta la sección del suelo. Para este ejemplo, SLOPE/W calculará los factores de seguridad para 216 (36 x 6) las superficies de falla de ensayo.

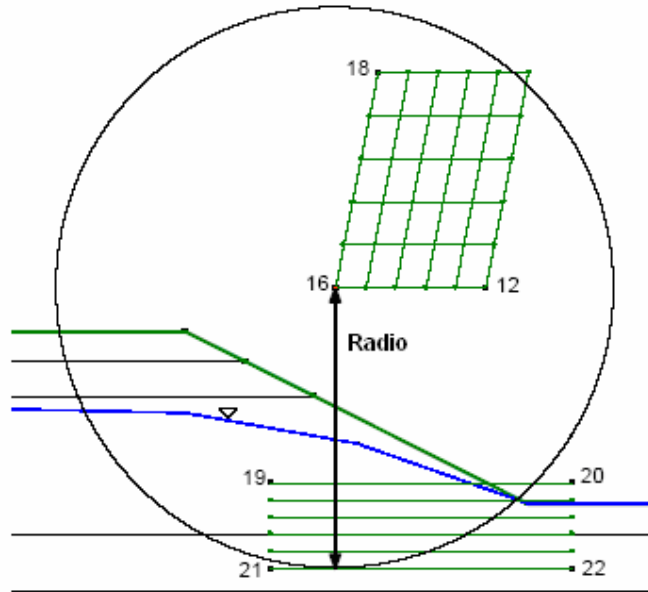


Figura 2-3. Superficie de falla de ensayo imaginaria

La línea de radio “la caja” (puntos 19, 21, 22, 20) puede localizarse a cualquier posición conveniente y puede formar cualquier forma cuadrilátera. La ilustración en la Figura 2-4 es completamente aceptable. También, la posición de la caja del radio necesariamente no necesita estar en la sección del suelo. Normalmente es muy conveniente para la caja estar en la sección del talud, pero éste no es un requisito en la formulación de SLOPE/W.

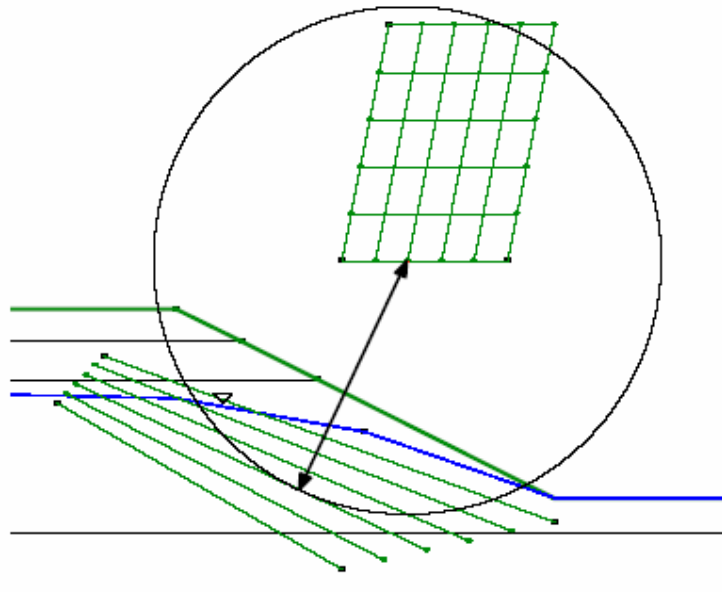


Figura 2-4. Características de las líneas de radio

2.3.3 PERFILES DEL FACTOR DE SEGURIDAD

En los antiguos análisis de equilibrio límite, la única manera de retratar un resumen de todos los factores de seguridad calculados gráficamente era perfilar los factores de seguridad en la grilla, como ilustrado en la Figura 2-5. Los perfiles proporcionan un cuadro de las magnitudes de las superficies de ensayo analizadas, pero más pretenciosamente los perfiles indican el mínimo factor de seguridad encontrado. La solución ideal es cuando los descensos mínimos están dentro de un perfil cerrado como el perfil 1.240 en la Figura 2-5.

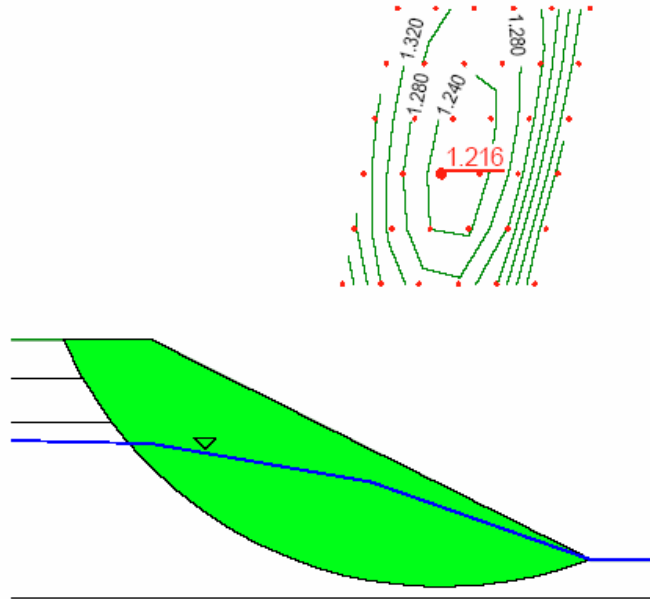


Figura 2-5. Perfiles del factor de seguridad en la grilla de centros rotación

Desgraciadamente, la solución ideal ilustrada en Figura 2-5 no siempre es asequible; de hecho el número de situaciones dónde el cuadro del perfil ideal puede lograrse es considerablemente menor que las situaciones dónde no es asequible. La solución ideal normalmente puede obtenerse para los análisis convencionales de taludes bastante planos (2h:1v o plano), sin la línea concentrada de carga, y con los parámetros de fuerzas eficaces C y ϕ . Un caso común dónde el ideal no puede lograrse es para el material completamente friccional ($C = 0$; $\phi > 0$).

2.4 GEOMETRÍA

2.4.1 INTRODUCCIÓN

SLOPE/W usa el concepto de regiones para definir la geometría. Básicamente esto simplemente significa el dibujo de una línea alrededor de una unidad de la tierra o la capa estratigráfica para formar un polígono cerrado, similar a lo que nosotros haríamos al esbozar un problema para explicar una situación particular esquemáticamente a alguien más. En este sentido, es un acercamiento natural e intuitivo.

2.4.2 REGIONES

Las regiones son en esencia polígonos. Polígonos con tres lados son triángulos y polígonos con cuatro lados cuadrados. La Figura 2-6 muestra algunas regiones básicas representativas.

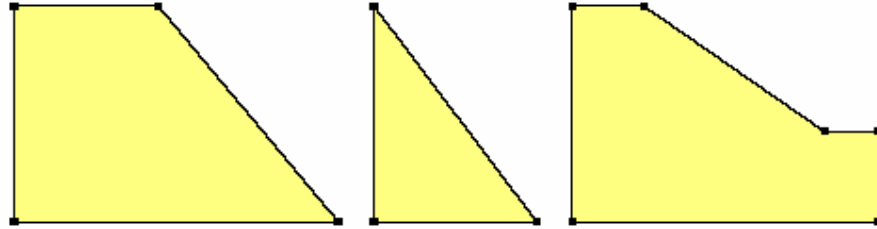


Figura 2-6. Regiones básicas representativas.

Todas las regiones necesitan ser conectadas para formar un continuo. Esto se hace con el uso de Puntos. Los cuadrados negros pequeños a las esquinas de la región en Figura 2-6 son los puntos. Las regiones se conectan compartiendo los puntos. En Figura 2-7, los puntos 6 y 7 son por consiguiente comunes a las dos regiones y las dos regiones se comportan como un continuo.

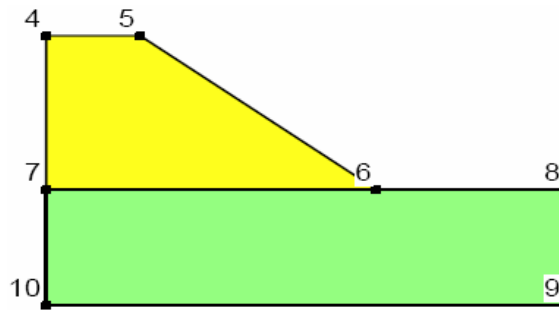


Figura 2-7. Regiones y puntos.

Uno de las ventajas de regiones es que la geometría puede modificarse fácilmente moviendo los puntos. Las regiones necesariamente no tienen que ser vueltas a dibujar sólo los puntos tienen que ser movidos para modificar la geometría.

Las regiones tienen un par de restricciones. Ellas son:

- Una región puede tener sólo un tipo de material (suelo). El mismo tipo de suelo puede asignarse a muchas regiones diferentes, pero cada región puede tener sólo un tipo de suelo.
- Las regiones no pueden superponerse.

2.5 PRESIÓN DE POROS

2.5.1 INTRODUCCIÓN

La posición más realista de la superficie de falla crítica se obtiene cuando se usan los parámetros de fuerzas efectivas en el análisis. Los parámetros de fuerzas efectivas,

sin embargo, sólo son significantes cuando ellos se usan junto con las presiones de poros.

Debido a la importancia de las presiones de poro en un análisis de estabilidad, SLOPE/W tiene varias maneras de especificar las condiciones de presión de poro y así obtener resultados mucho mas confiables.

2.5.2 SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA

La manera más común de definir las condiciones de presión de poro es con una línea piezometrica. SLOPE/W simplemente calcula la distancia vertical desde el punto medio de la base de la dovela a la línea de piezometrica, y multiplica esta distancia por el peso unitario del agua para conseguir la presión de poro a la base de la dovela. Esto se ilustra gráficamente en Figura 2-8.

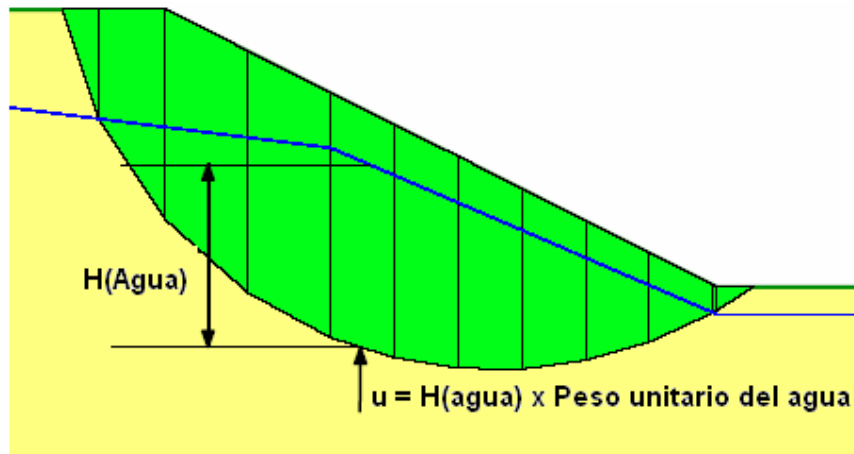


Figura 2-8. Presión de poros desde una línea piezometrica.

Al pensar sobre las presiones de poros en SLOPE/W, es sumamente importante tener en cuenta que estas presiones son incluidas solo en el cálculo de la fuerza del cortante en la base de la dovela. Estas presiones no entran en los cálculos de fuerzas entre dovelas.

2.6 TEORIA

2.6.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES

SLOPE/W usa la teoría de equilibrio límite de fuerzas y momentos para calcular el factor de seguridad. La teoría del Equilibrio Límite General (GLE) es presentada y usada como el contexto para relacionar los factores de seguridad para todos los métodos de dovela normalmente usados.

Un factor de seguridad se define como ese factor por el cual la fuerza cortante del suelo debe reducirse para inducir la masa de suelo en un estado límite el equilibrio a lo largo de una superficie de falla determinada.

Para un análisis de esfuerzos efectivos, la fuerza cortante se define como:

$$s = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (1)$$

Donde:

s = fuerza cortante,
 C' = cohesión efectiva,
 ϕ' = ángulo de fricción interna efectiva,
 σ_n = esfuerzo normal total, y
 u = presión de poros.

Para un análisis total de esfuerzos, los parámetros de fuerza son definidos en términos de los esfuerzos totales y las presiones de poro no se requieren.

El análisis de estabilidad involucra el paso una superficie de falla a través de la masa de suelo y dividiendo la porción inscrita en las dovelas verticales. La superficie de falla puede ser redonda, compuesta (es decir, combinación de porciones redondas y lineales) o consistir en cualquier forma definida por una serie de líneas rectas (es decir, la superficie de falla totalmente detallada).

La formulación de equilibrio límite asume que:

El factor de seguridad de la componente de la fuerza cohesiva y de la componente de la fuerza friccional es igual para todas los suelos involucrados. El factor de seguridad es el mismo para todas las dovelas. La Figura 2-9 y Figura 2-10 muestra todas las fuerzas que actúan sobre una superficie de falla circular y compuesta. Las variables se definen como sigue:

W = el peso total de una dovela de ancho b y altura h .

N = la fuerza normal total en la base de la dovela.

S_m = la fuerza cortante movilizador en la base de cada dovela.

E = las fuerzas normales horizontales entre dovelas. Los subíndices L y R designan los lados izquierdo y derecho de la dovela, respectivamente.

X = las fuerzas cortantes verticales entre dovelas. Los subíndices L y R definen los lados izquierdo y derecho de la dovela, respectivamente.

D = una línea de carga externa.

kW = la carga sísmica horizontal aplicada a través del centroide de cada dovela.

R = el radio para una superficie de falla circular o el brazo de momento asociado con la fuerza de cortante movilizador, S_m para cualquier forma de superficie de falla.

f = el desplazamiento perpendicular de la fuerza normal del centro de rotación o del centro de momentos.

x = la distancia horizontal desde la línea central de cada dovela al centro de rotación o al centro de momentos.

e = la distancia vertical desde la línea central de cada dovela al centro de rotación o al centro de momentos.

d = la distancia perpendicular desde una línea de carga al centro de rotación o al centro de momentos.

h = la distancia vertical del centro de la base de cada dovela a la línea más alta en la geometría (es decir, generalmente la superficie del suelo).

a = la distancia perpendicular desde la resultante externa de la fuerza hidrostática al centro de rotación o al centro de momentos. Los subíndices L y R designan los lados izquierdo y derecho del talud, respectivamente.

A = la resultante externa de la fuerza hidrostática. Los subíndices L y R designan los lados izquierdo y derecho del talud, respectivamente.

ω = ángulo de la línea de carga horizontal. Este ángulo es medido en el sentido de las agujas del reloj desde el x-eje positivo.

α = ángulo entre la tangente al centro de la base de cada dovela y la horizontal. La convención de signos es como sigue. Cuando el ángulo se inclina en la misma dirección de la geometría global del talud, α es positivo, y viceversa.

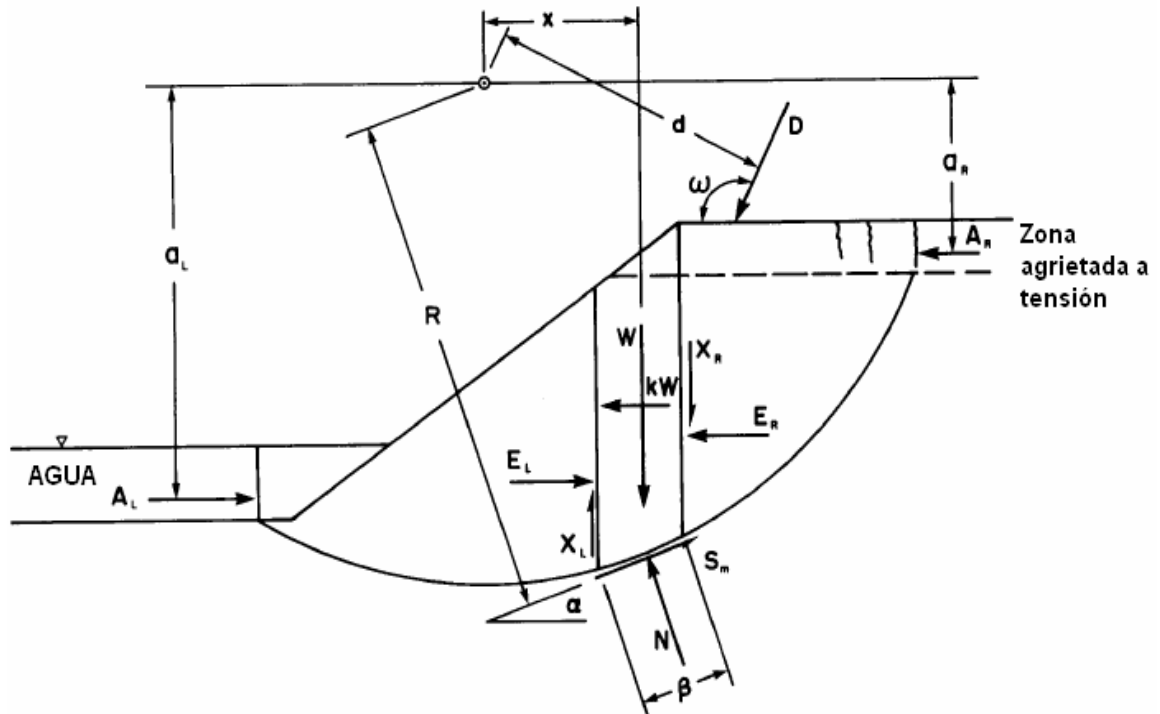


Figura 2-9. Fuerzas actuando sobre una dovela en una masa deslizante con una superficie de falla circular

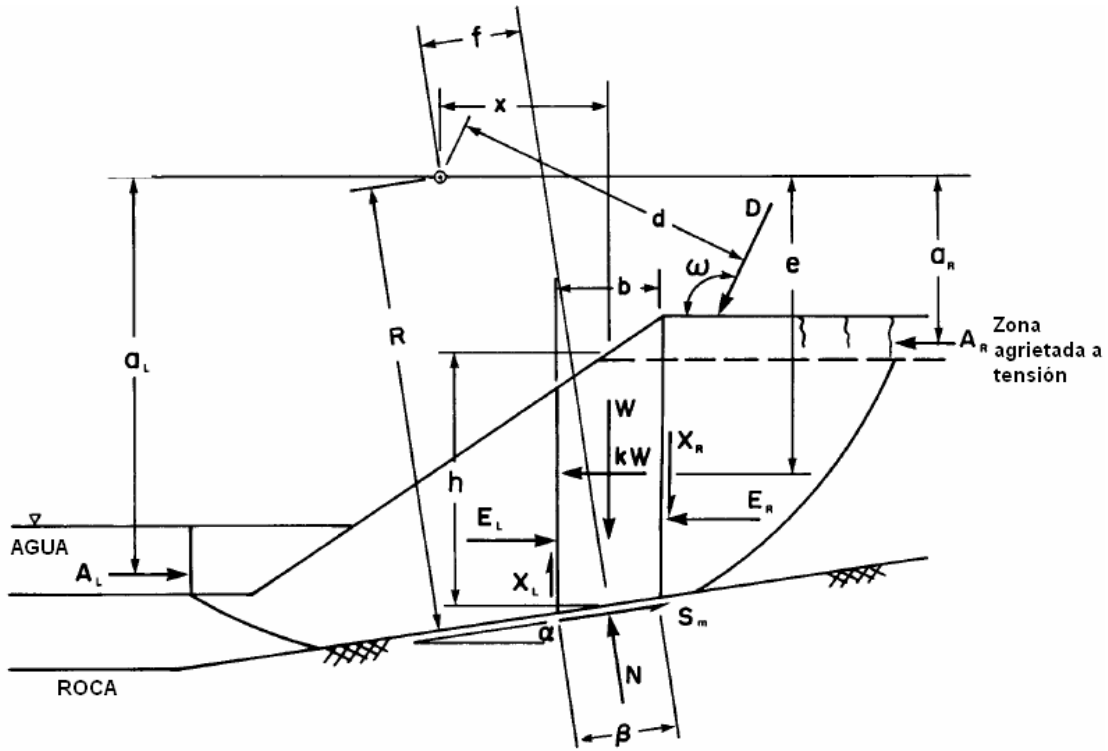


Figura 2-10. Fuerzas actuando sobre una dovela en una masa deslizante con una superficie de falla compuesta.

Figure 2-11 muestra las fuerzas que actúan en una superficie de falla definida por una serie de líneas rectas. El centro para el equilibrio de momento (es decir, el punto del eje) no tiene importancia cuando equilibrio de momento y el equilibrio de fuerza están satisfechos. Sin embargo, para los métodos simplificados de análisis que no satisfacen equilibrio de momento y de fuerza, el factor de seguridad calculado puede ser bastante sensible al centro para el equilibrio del momento, por consiguiente, es importante seleccionar un punto del eje razonable.

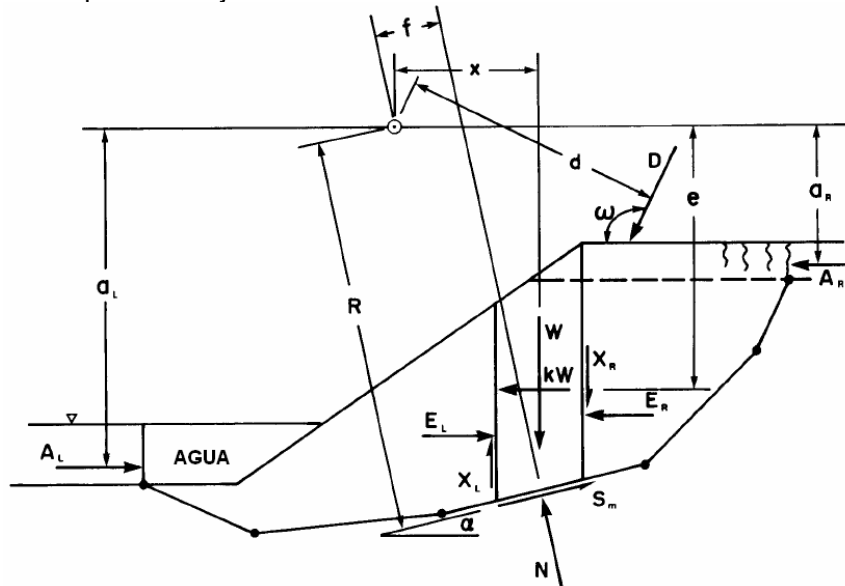


Figura 2-11. Fuerzas que actúan sobre una dovela a través de una masa deslizante definidas por una superficie de falla totalmente especificada

La magnitud de la fuerza cortante movilizante para satisfacer condiciones de equilibrio límite es:

$$S_m = \frac{s \beta}{F} = \frac{\beta \left(c' + \left(\sigma_n - u \right) \tan \phi' \right)}{F} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma_n = \frac{N}{\beta}$ = tensión normal promedio a la base de cada dovela,

F = factor de seguridad, y

β = la longitud de la base de cada dovela.

Los elementos de la estática que pueden usarse para deducir el factor de seguridad son la sumatoria de fuerzas en dos direcciones y la sumatoria de momentos. Éstos, junto con el criterio de error, son insuficientes para volver el problema determinado. Debe tenerse más información sobre o la distribución de fuerza normal a la base de las dovelas o la distribución de fuerzas entre dovelas. Las tablas 1 y 2 resumen las cantidades conocidas y desconocidas asociadas con un análisis de estabilidad de taludes.

Tabla 1. Resumen de cantidades conocidas para resolver un factor de seguridad

Número de cantidades conocidas	Descripción
n	Sumatoria de fuerzas en la dirección horizontal
n	Sumatoria de fuerzas en la dirección vertical
n	Sumatoria de momentos
n	Criterio de error de cortante del material
4n	Número total de ecuaciones

Tabla 2. Resumen de cantidades desconocidas para resolver un factor de seguridad

Número de cantidades desconocidas	Descripción
n	Magnitud de la fuerza normal a la base de una dovela, N
n	Punto de aplicación de la fuerza normal a la base de cada dovela
n-1	Magnitud de las fuerzas normales entre dovelas, E
n-1	Magnitud de la fuerza cortante entre dovelas, X
n-1	Punto de aplicación de las fuerzas entre dovelas
n	Fuerza cortante en la base de cada dovela, S_m
1	Factor de seguridad, F
1	El valor de Lambda, λ
6n-1	Número total de desconocidos

Desde que el número de cantidades desconocidas excede el número de cantidades conocidas, el problema es indeterminado. Deben hacerse suposiciones con respecto a

las direcciones, magnitud, y/o punto de aplicación de algunas de las fuerzas para volver determinado el análisis. La mayoría de los métodos asume primero que el punto de aplicación de la fuerza normal a la base de una dovela actúa a través de la línea central de la dovela.

En general, los diversos métodos de dovelas pueden ser clasificados en términos de:

- La estática usada para deducir la ecuación del factor de seguridad ,
y
- Las suposiciones de las fuerzas entre dovelas para volver el problema determinado.

2.6.2 MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE GENERAL

El método de equilibrio límite general (GLE) utiliza las siguientes ecuaciones estáticas para resolver el factor de seguridad:

- La Sumatoria de fuerzas en la dirección vertical para cada dovela se utiliza para calcular la fuerza normal en la base de la dovela, N .
- La sumatoria de fuerzas en la dirección horizontal para cada dovela es usado para calcular las fuerzas normales entre dovelas, E .
- La sumatoria de momentos alrededor de un punto común para todas las dovelas. La ecuación puede reestructurarse y resolverse para el factor de seguridad por equilibrio de momentos, F_m .
- La sumatoria de fuerzas en una dirección horizontal para todas las dovelas, dando lugar a un factor de seguridad de equilibrio de fuerza, F_f .

El análisis todavía es indeterminado, y se hace una extensa suposición con respecto a la dirección de las fuerzas resultantes entre dovelas. Se asume que la dirección es descrita por una función de fuerza entre dovelas. La dirección junto con la fuerza normal entre dovelas es usada para calcular la fuerza cortante entre dovelas. Ahora pueden calcularse los factores de seguridad basado en el equilibrio de momento (F_m) y el equilibrio de fuerza (F_f). Estos factores de seguridad pueden variar, dependiendo del porcentaje (λ) de la función de fuerza usada en el cálculo. El factor de seguridad que satisface tanto el equilibrio de fuerza como de momento se considera que es el factor de seguridad del método de GLE.

Usando la misma aproximación del GLE, también es posible especificar una variedad de condiciones de fuerza entre dovelas y satisfacer solo las condiciones de equilibrio de fuerzas o de momentos. Las suposiciones hechas a las fuerzas entre dovelas y la selección global de equilibrio de fuerzas o de momentos en las ecuaciones del factor de seguridad, da lugar a los varios métodos de análisis.

2.6.3 SOLUCIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD

Cuatro etapas diferentes están envueltas en calcular los varios factores de seguridad.

SOLUCIÓN ETAPA 1

Para la primera iteración, el cortante y el normal entre dovelas serán igual a cero. El factor de seguridad resultante para el equilibrio de momento es el factor de seguridad

Ordinario o de Fellenius. La primera iteración del factor de seguridad se usa como una aproximación para empezar la segunda fase.

SOLUCIÓN ETAPA 2

La etapa 2 empieza con la solución de las ecuaciones no lineales del factor de seguridad. Lambda (λ) se fija en cero y por consiguiente, las fuerzas cortantes entre dovelas también se fijan en cero. Normalmente se exigen 4 a 6 iteraciones para asegurar la convergencia de las ecuaciones para el factor de seguridad por equilibrio de fuerzas y de momentos. La respuesta de la ecuación del momento corresponde al método Simplificado de Bishop. La respuesta de la ecuación de equilibrio de fuerza corresponde al método Simplificado de Janbú sin cualquier corrección empírica.

SOLUCIÓN ETAPA 3

Salvo Para el método de GLE, la solución de la etapa 3 requiere que para todos los métodos se consideren las fuerzas entre dovelas. La etapa 3 calcula los factores de seguridad de equilibrio de fuerzas y de momentos para cualquier función de fuerzas entre dovelas.

En la etapa 3, SLOPE/W calcula un valor de λ que mantiene igual los valores de los factores de seguridad para el equilibrio de fuerzas y de momento (es decir, $F_m = 1$). La técnica usada se llama el "Solución rápida" y es similar a la técnica de Newton-Raphson.

La técnica de Solución rápida trabaja como sigue. SLOPE/W calcula el valor inicial para λ como igual a 2/3 de la pendiente entre la cresta y dedo del pie. Se calcula los factores de seguridad de fuerza y de momento usando esta estimación de lambda. Se usan estos factores de seguridad junto con los factores de seguridad que corresponde a un valor de lambda igual a 0.0 para predecir un valor del lambda donde los factores de seguridad para el equilibrio de fuerza y de momento sean iguales.

Este procedimiento de estimar los nuevos valores de lambda se repite hasta que los factores de seguridad para el equilibrio de fuerza y de momento estén dentro de la tolerancia seleccionada.

Cualquier una de las funciones de fuerza entre dovelas, $f(x)$, puede usarse en el cálculo del factor de seguridad.

SOLUCIÓN ETAPA 4

La etapa 4 se usa cuando una serie de valores de lambda se seleccionan y se resuelven los factores de seguridad para el equilibrio de momento y/o de fuerza. En la etapa 4 siempre se usa para el método de análisis de GLE. Los factores de seguridad para los diferentes valores de lambda pueden graficarse como se muestra en la Figura 2-12. El factor de seguridad que satisface el equilibrio de fuerzas y de momentos se selecciona de la gráfica.

La etapa 4 brinda un entendimiento completo de la relación entre los factores de seguridad para el equilibrio de momento y de fuerza para una función específica de fuerza entre dovelas. Puede usarse para simular todos los métodos de estabilidad de taludes que consideren la función de fuerza entre dovelas.

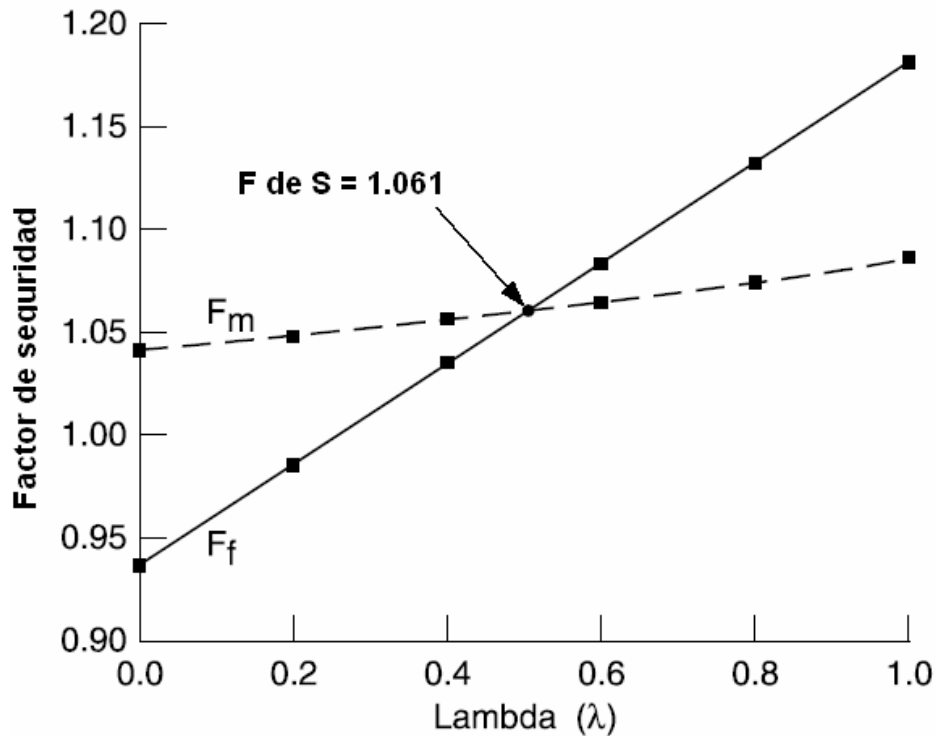


Figura 2-12. Ejemplo de una grafica de factor de seguridad versus lambda.

2.7 PROGRAMA SLOPE/W

2.7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hará una descripción de la forma como se debe manejar el programa SLOPE/W. Siguiendo cada uno de los pasos en la secuencia que se presenta, podremos definir un problema, resolverlo y ver los resultados. Nuestra intención en este capítulo no es presentar cada uno de los comandos y opciones disponible en SLOPE/W, sino el de obtener un entendiendo global de los rasgos e identificar algunos de los funcionamientos fundamentales de SLOPE/W.

2.7.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La Figura 2-13 presenta un diagrama esquemático de un problema de estabilidad de taludes. El objetivo del análisis es calcular el factor de seguridad mínimo y localizar la superficie de falla crítica. El talud esta dividido en dos materiales con pendiente 2:1 (horizontal: vertical). La capa superior es de 5 m de espesor y la altura total del corte es 10 m. Existe un Lecho de roca a 4 m debajo de la base del corte. Las condiciones de presión de poro se ilustran por la línea del piezometrica mostrada en Figura 2-13. Los parámetros de fuerza del suelo también se muestran en la Figura 2-13.

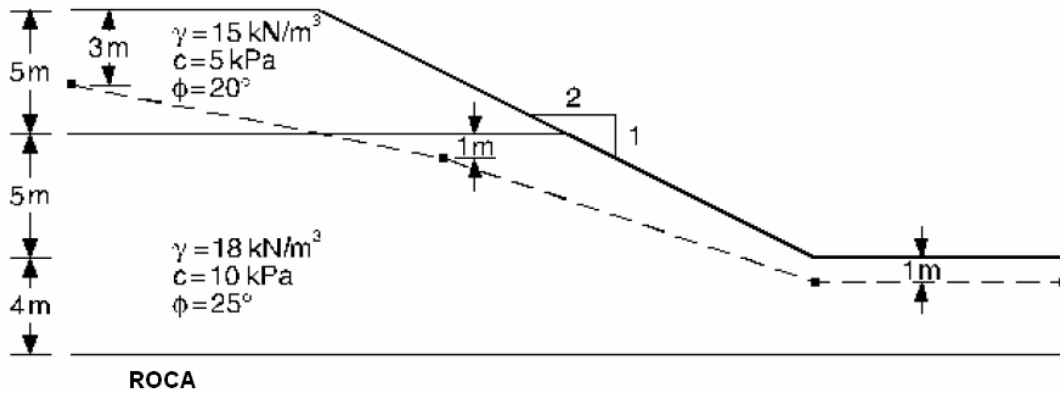


Figura 2-13. Problema de estabilidad del talud.

IDENTIFICAR LA CAJA DE HERRAMIENTAS (TOOLBARS)

En la ventana principal del programa, en la barra de menús se selecciona la opción *Toolbars* del menú de *View*. Aparece el siguiente cuadro de dialogo

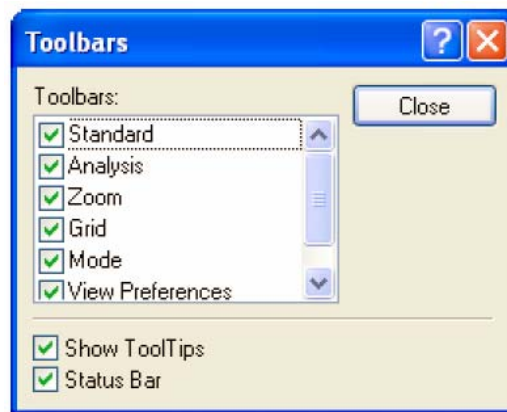


Figura 2-14. Cuadro de dialogo *Toolbars*.

Para identificar las barras de herramientas individuales disponibles se hace clic en el cuadro de cheque que se presenta para cada una de las barra de herramientas individuales. El símbolo (\surd) indica la barras de herramientas individuales activas.

DELIMITAR EL ÁREA DE TRABAJO

El área de trabaja es el espacio disponible para definir el problema. El área activa debe ser tal que se pueda trabajar a una escala conveniente. Para este ejemplo, un área de trabajo conveniente es 260 mm de ancho y 200 mm de alto.

Para establecer el tamaño del área de trabajo se escoge la opción *Page* del menú *Set*. Aparece el siguiente cuadro de dialogo:

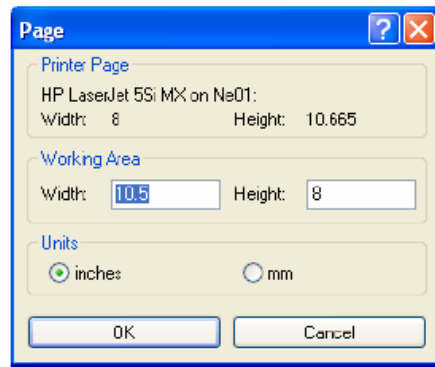


Figura 2-15. Cuadro de dialogo *Page*.

Las dimensiones pueden aparecer en unidades de pulgadas o mm. Para este ejemplo seleccionamos la unidad en *mm*, el ancho (*Width*) de 260 y la altura (*Height*) de 200. Presionamos OK.

ESPECIFICAR LA ESCALA

La geometría del problema esta especificada en metros. Como se muestra en la figura 2-13 el problema tiene 14 metros de alto y aproximadamente 40 metros de ancho. La esquina inferior izquierda del problema se dibuja en (0,0). Las dimensiones de la hoja de dibujo deben ser mayores a las dimensiones del problema para permitir un margen alrededor del dibujo. En este caso se estimarán de -4 a 40 en ambas direcciones. Una vez las dimensiones del problema han sido fijadas, *Define* calcula una escala aproximada. La escala también puede ser definida a mano, en este caso el problema se ajusta a la escala determinada. Para ajustar la escala se selecciona la opción *Scale* del menú *Set*. Aparece el siguiente cuadro de dialogo:

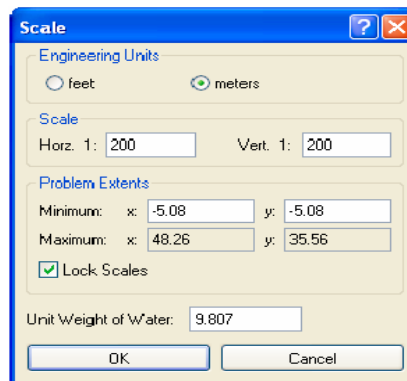


Figura 2-16. Cuadro de dialogo *Scale*.

Hay que asegurarse que en el área de *Engineering Units* se selecciona la opción metros. En las cajas que aparecen en el área *Problem Extents* hay que colocar los valores de *Minimum x = -4* y *Minimum y = -4*. Inmediatamente los valores en el área de *Scale* se modificarán. Una escala Horz 1:200 y Vert 1:200 es adecuada para el problema. Para que este valor no se modifique verifique la caja *check box Lock Scales*.

En el área *Problem Extents*, los valores *Maximum x =48* y *Maximum y = 36* significa que en una escala 1:200 las magnitudes aceptables del problema son de -4 a 49 m en

la dirección de x y de -4 a 37 m en la dirección de y para el área de trabajo previamente seleccionada de 260 mm ancho y 200 mm alto. Se presiona OK.

De esta forma el problema queda definido en unidades de metros y kN, el peso unitario del agua debe ser 9.807 kN/m^3 cuyo valor se define al especificar las unidades del problema.

DESPLEGAR LA GRILLA

En SLOPE/W podemos hacer uso de una grilla que nos permite esbozar de una manera más fácil la geometría del problema. Para ello seleccionamos la opción *Gris* del menú *Set*.

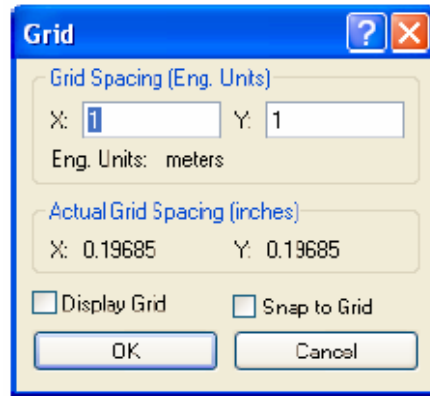


Figura 2-17. Cuadro de dialogo *Grid*.

En *Grid Spacing* definimos la separación entre cada punto de la grilla. Debemos seleccionar la cajas *check box* correspondientes a *Display Grid* y *Snap to grid* los cuales nos permiten ser mas exactos a la hora de dibujar la geometría del problema. Se presiona OK.

EJES DEL DIBUJO

Al establecer ejes en el área de dibujo se nos facilita el esbozo del problema así como el manejo de los resultados. Para esto se selecciona la opción *Axes* del menú *Sketch*.

En el cuadro de dialogo que aparece (Figura 2-18) podemos especificar los ejes así como nombrar cada uno de ellos. Al hacer clic en OK, el cursor cambiará de forma (forma de cruz) con el cual, haciendo un clic sostenido en el área de trabajo, podemos dibujar los ejes principales.

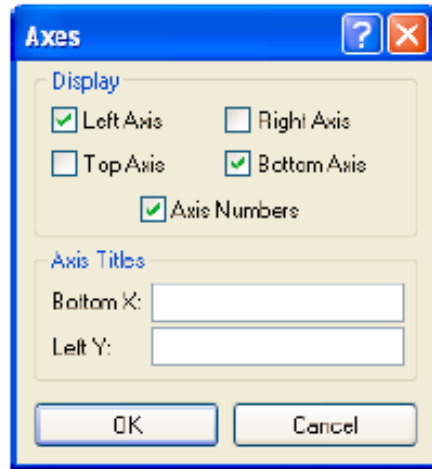


Figura 2-18. Cuadro de dialogo Axes.

Una vez hecho esto, procedemos a realizar el dibujo del problema, teniendo en cuenta las dimensiones de cada uno de los estratos.

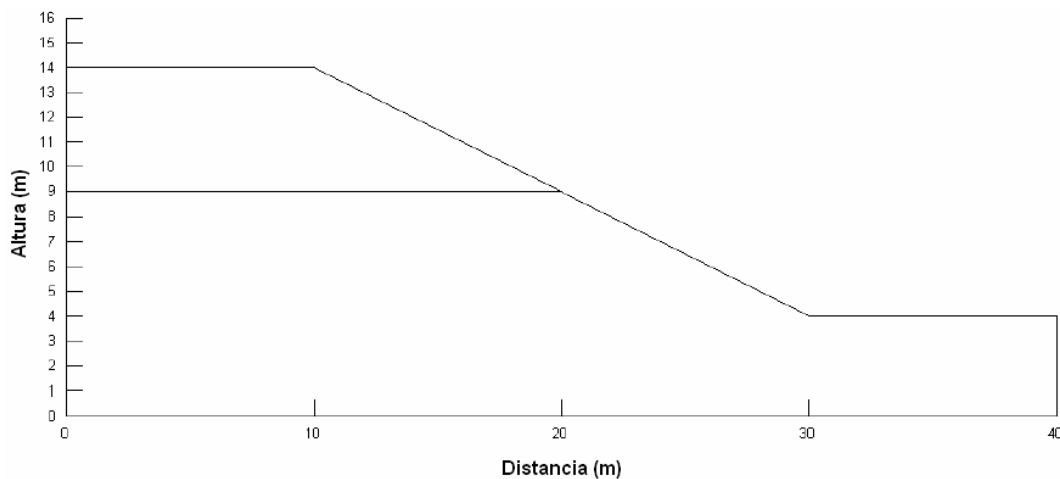


Figura 2-19. Geometría del problema.

ESPECIFICAR LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS

Para determinar los métodos de análisis seleccionamos la opción Analysis Settings del menú KeyIn.

En la pestaña *Project ID* podemos darle un título al proyecto a ejecutar así como una breve descripción del mismo.

Se especifica el método de análisis en la pestaña *Method* donde podemos escoger el método de análisis de equilibrio límite mas adecuado. SLOPE/W realiza un análisis de Janbú, Bishop, y Ordinario, además del seleccionado por el usuario.

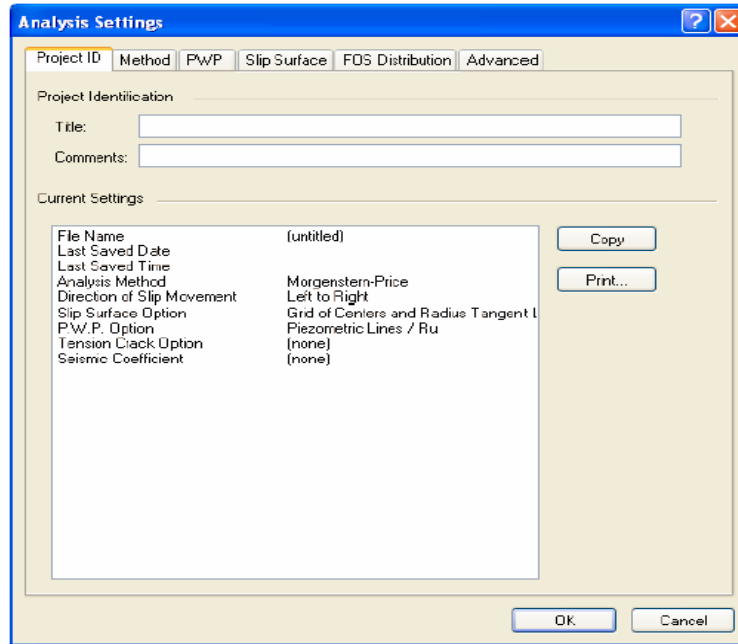


Figura 2-20. Pestaña *Project ID* del cuadro de diálogo *Análisis Settings*.

Luego de especificar el método de análisis a seguir y las características de la superficie de falla así como las condiciones de presión de poros, presionamos OK.

DEFINIR LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Para definir las propiedades del suelo seleccionamos la opción *Material Properties* del menú *KeyIn*.

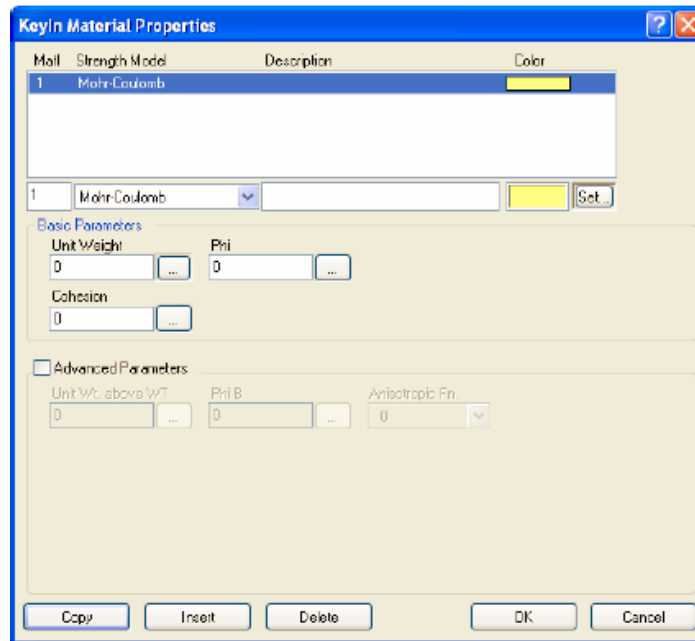


Figura 2-21. Cuadro de diálogo *Material Properties*.

En este cuadro de dialogo se especifica el modelo de fuerza a utilizar, la descripción de los estratos de suelo y los parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción y el peso unitario. Cada uno de los estratos que conforman el talud puede diferenciarse haciendo uso de la diferente gama de colores que ofrece el programa. Presionamos OK.

DIBUJAR LAS REGIONES

La geometría y estratigrafía son definidas dibujando las regiones individuales para cada capa de suelo o porciones de una capa de suelo.

Cada vez que se crean regiones aparece un cuadro de dialogo donde se muestra las propiedades correspondientes a cada material del suelo presente en esa región.

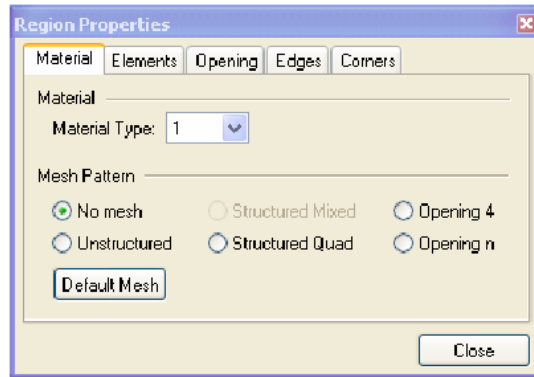


Figura 2-22. Cuadro de dialogo *Region Properties*.

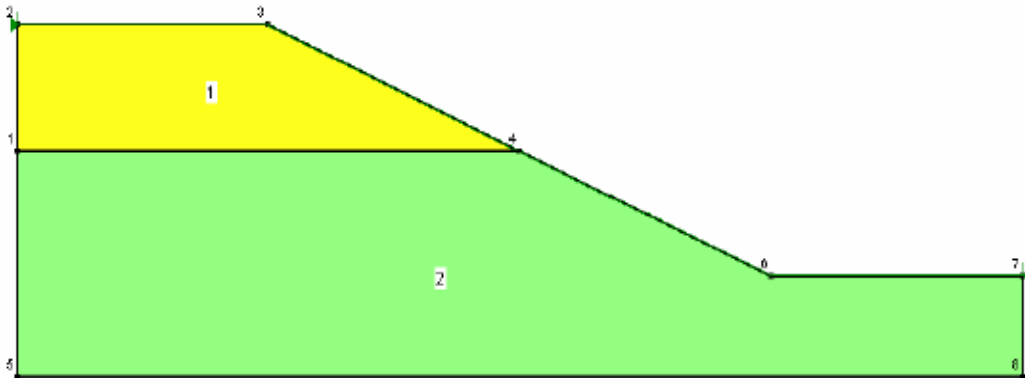


Figura 2-23. Estratigrafía del talud.

DIBUJAR LA LINE PIEZOMÉTRICA

Las condiciones de presión de poro en los estratos 1 y 2 son definidas por una línea del piezometrica. Para dibujar la línea piezometrica se escoge la opción *Pore Water Pressure* del menú *Draw*.

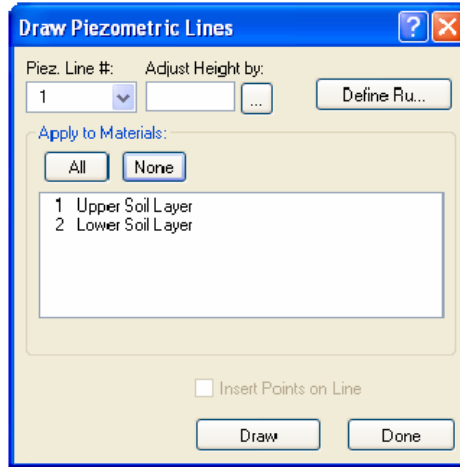


Figura 2-24. Cuadro de dialogo *Draw Piezometric Lines*.

DIBUJAR LA UBICACIÓN DE LA ENTRADA Y LA SALIDA

Para controlar la ubicación de las superficies de falla de ensayo, hay varias opciones de superficie de falla que pueden usarse. Una opción es definir la ubicación de la entrada y la salida. Se analizarán una serie de círculos de falla que entran en el perfil del suelo a través de la “zona de entrada” y que salen por la “zona de salida” definida por el usuario.

Para definir la zona de entrada escogemos la opción *Slip Surface* del menú *Draw*.

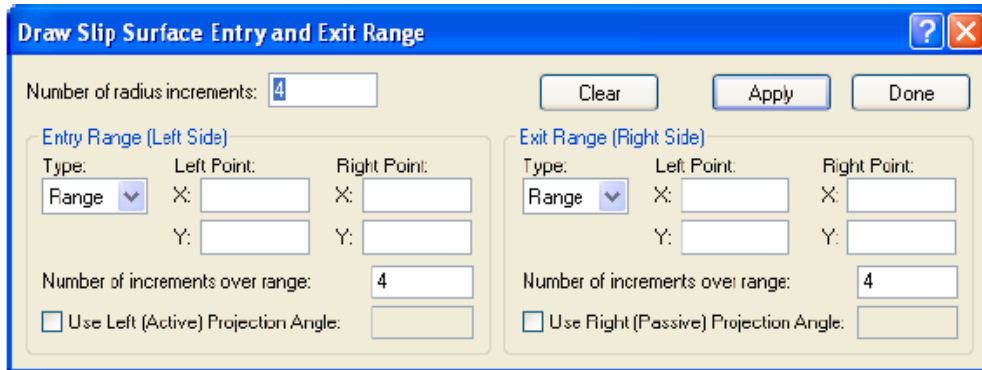


Figura 2-25. Cuadro de dialogo *Draw Slip Surface*.

En el área *Enter Range (Left Side)* se dan las coordenadas (x,y) de los puntos que delimitan la zona de entrada. La zona de salida se especifica en el área *Exit Range (Right Side)*.

Después de completados todos los pasos la apariencia del modelo será la siguiente:

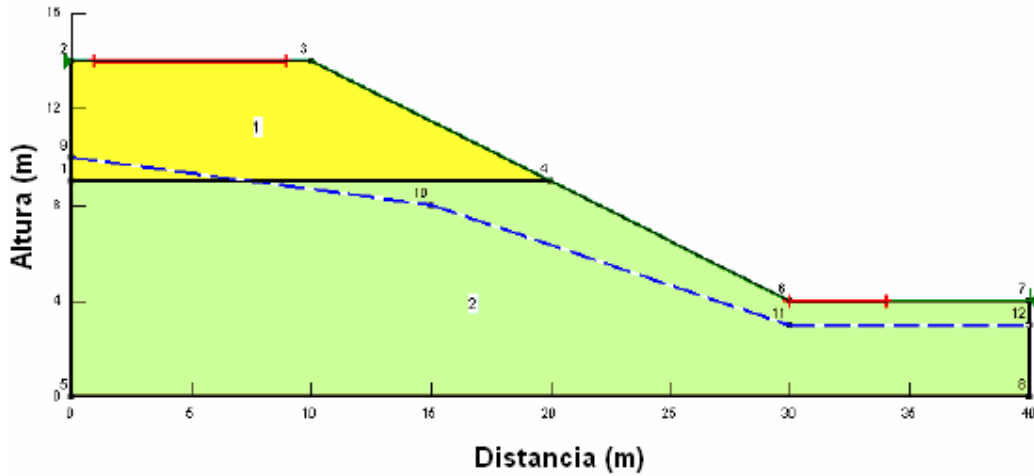


Figura 2-26. Diagrama del modelo.

Luego de verificar los datos (opción *Verify* del menú *Tools*) y de no haber encontrado error alguno, estamos listos para realizar los cálculos.

2.7.3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

La segunda parte de un análisis es usar la función SLOPE/W SOLVE para calcular los factores de seguridad.

Vamos al menú *Tools* y seleccionamos la opción SOLVE. Aparecera un cuadro de dialogo como el siguiente:

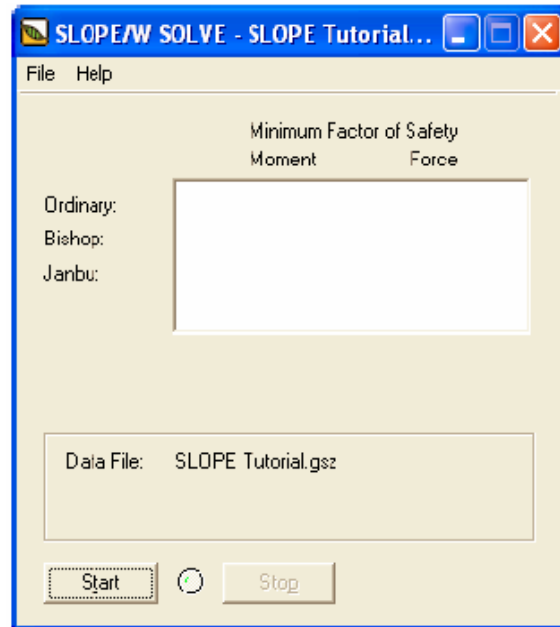


Figura 2-27. Cuadro de dialogo *Solve*.

Hacemos click en el botón *Start* lo que da inicio al proceso iterativo de cálculo. Al final nos muestra los valores de los factores de seguridad para el equilibrio de fuerzas y de momento para cada uno de los métodos seleccionados.

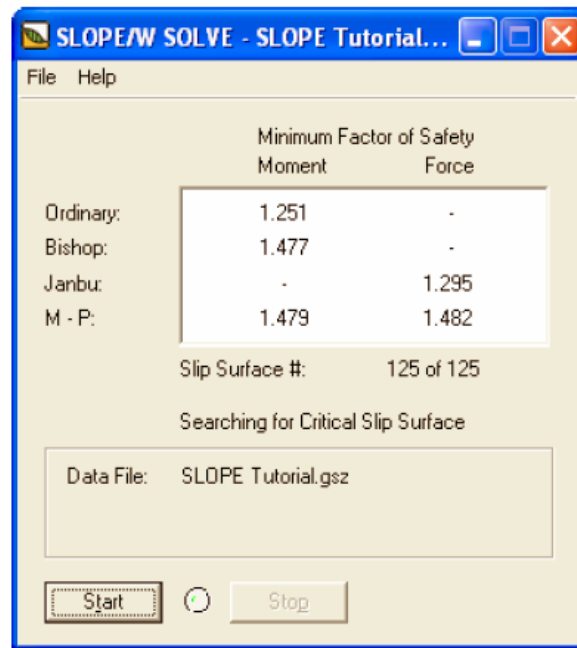


Figura 2-28. Cuadro de dialogo *Solve* y resultados del análisis.

2.7.4 OBSERVACIÓN DE RESULTADOS

La función *CONTOUR* del programa permite ver los resultados del problema gráficamente por:

- Gráficos de cualquiera de las superficies de falla analizadas, junto con el factor de seguridad asociado.
- Generación de gráficos de contornos de los factores de seguridad.
- Gráficos del diagrama de cuerpo libre y del polígono de fuerzas para cualquier dovela en la superficie de falla mínima.
- Graficas de los resultados del cálculo.

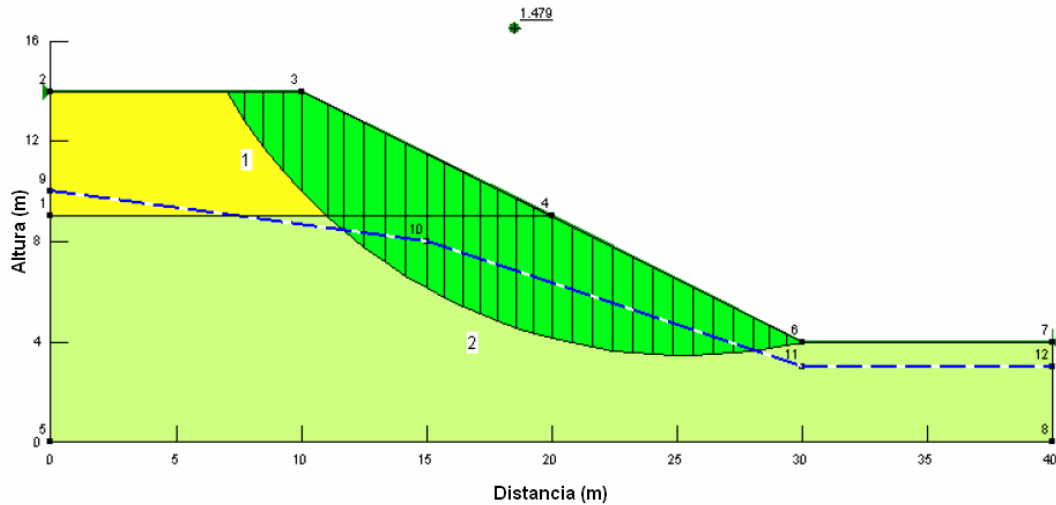


Figura 2-29. Gráfico de la superficie de falla y el factor de seguridad asociado.

Para observar todas las superficies de falla con sus respectivos factores de seguridad se selecciona la opción *Slip Surfaces* del menú *Draw* de la ventana *CONTOUR*.

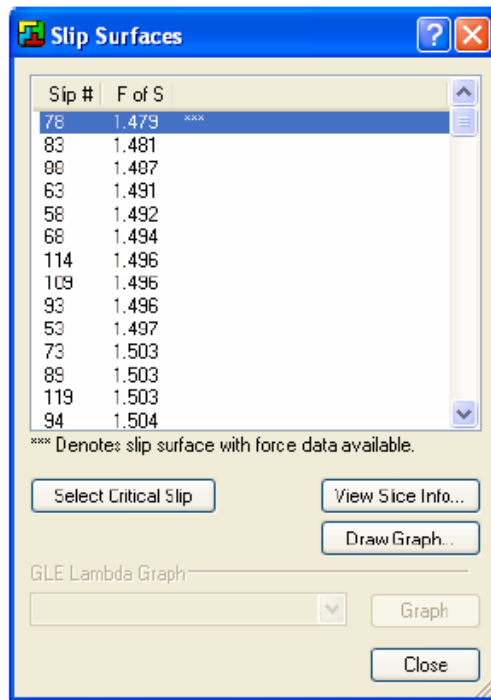


Figura 2-30. Cuadro de diálogo *Slip Surface* de la función *CONTOUR*.

En el cuadro de diálogo que aparece podemos ver las diferentes superficies de falla. También podemos ver la información correspondiente a una dovela en especial dando click al botón *View Slice Info...*

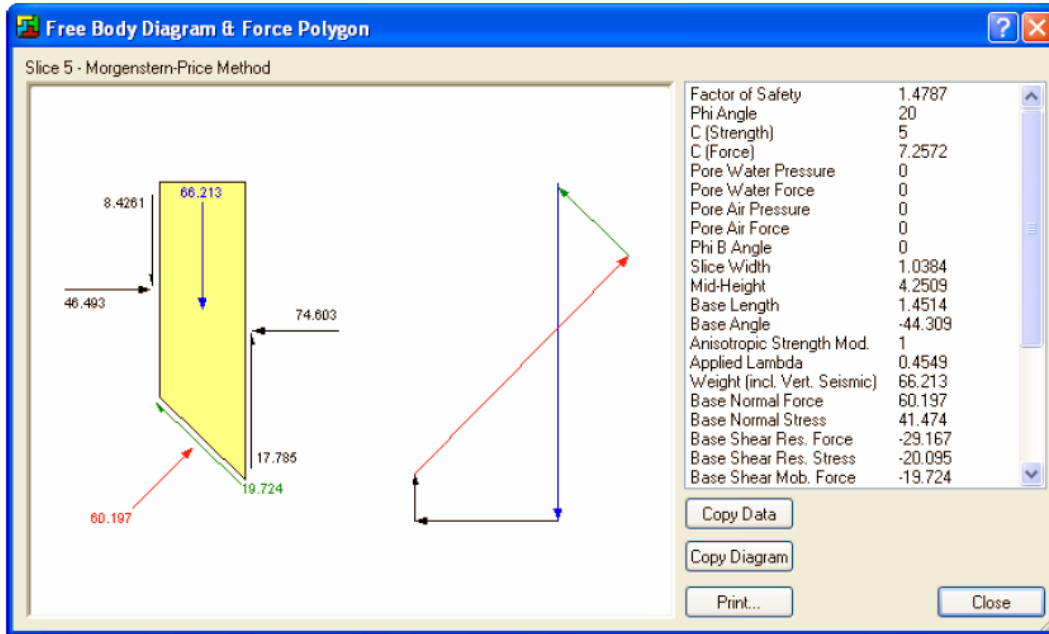


Figura 2-31. Cuadro de dialogo *Free Body Diagram & Force Polygon*.

CAPÍTULO 3. METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS APLICADOS AL ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES

3.1 INTRODUCCIÓN

Los análisis de equilibrio límite son usados en la valoración de la estabilidad de un talud. Sin embargo, este método de análisis no provee ninguna oportunidad de conocer la distribución de esfuerzos dentro de la masa de suelo.

Esta sección tiene por objetivo esbozar los conceptos principales del método de los elementos finitos, y su aplicación en la geotecnia, especialmente en estudio del comportamiento de los taludes.

Se tratarán los conceptos y procedimientos básicos que el método de los elementos finitos emplea en el análisis de problemas relacionados con el suelo y algunas estructuras geotécnicas. Se esbozarán las formulaciones básicas de la teoría de deformación, consolidación, flujo subterráneo y el tipo de elementos finitos empleados en análisis del estudio en cuestión.

3.2 TEORIA DE DEFORMACION

Las ecuaciones básicas que expresan la deformación estática de una masa de suelo son formuladas dentro del marco de la mecánica del medio continuo. Se hacen una restricción por cuanto las deformaciones consideradas por estas formulas son pequeñas.

Esto activa una formulación con referencia a la geometría inicial del problema, creando un problema continuo, el cual es discretizado con la ayuda del método de los elementos finitos.

3.3 ECUACIONES BASICAS

El equilibrio estático de un continuo puede ser formulado como

$$\underline{\underline{L}}^T \underline{\sigma} + \underline{P} = 0 \quad (1)$$

Esta ecuación relaciona las derivadas espaciales de las seis componentes del esfuerzo, ensambladas en el vector $\underline{\sigma}$, con las tres componentes de las fuerzas del vector \underline{P} , $\underline{\underline{L}}^T$ es la transpuesta del operador diferencial, definido como

$$\underline{\underline{L}}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2)$$

en adición a la ecuación de equilibrio, la relación cinemática puede ser formulada como

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{L}}\underline{u} \quad (3)$$

Donde:

$\underline{\underline{\varepsilon}}$ = Vector que contiene las seis componentes de deformación

\underline{u} = Vector que contiene las derivadas de las tres componentes de desplazamiento

$\underline{\underline{L}}$ = Operador diferencial.

En enlace entre las ecuaciones (1) y (3) se basan en una relación constitutiva que representa el comportamiento del material. La relación general es

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{M}}\underline{\underline{\varepsilon}} \quad (4)$$

La combinación de las ecuaciones (1), (3) y (4) lleva a una ecuación diferencial parcial de segundo orden en los desplazamientos \underline{u} . Sin embargo, en lugar de una combinación directa, la ecuación de equilibrio es reformulada en su forma débil, de acuerdo al principio variacional de Galerkin.

$$\int \delta \underline{u}^T (\underline{\underline{L}}^T \underline{\underline{\sigma}} + \underline{P}) dV = 0 \quad (5)$$

En esta formulación $\delta \underline{u}$ representa una variación cinemáticamente admisible de los desplazamientos. Aplicando el teorema de Green para integrar parcialmente el primer término de la ecuación (5) lleva a

$$\int \delta \underline{\varepsilon}^T \underline{\underline{\sigma}} dV = \int \delta \underline{u}^T \underline{P} dV + \oint \delta \underline{u}^T \underline{t} dS \quad (6)$$

La ecuación anterior introduce una integral de borde en la "tracción de borde" aparece.

Las tres componentes de la tracción de borde son ensambladas en el vector \underline{t} .

La ecuación (6) se le conoce como la ecuación del trabajo virtual.

El desarrollo del estado de esfuerzo $\underline{\underline{\sigma}}$ puede ser considerado como un proceso incremental:

$$\underline{\underline{\sigma}}^i = \underline{\underline{\sigma}}^{i-1} + \Delta \underline{\underline{\sigma}}; \quad \Delta \underline{\underline{\sigma}} = \int \dot{\underline{\underline{\sigma}}} dt \quad (7)$$

En esta relación, $\underline{\underline{\sigma}}^i$ representa el estado actual de esfuerzo, el cual es desconocido, y $\underline{\underline{\sigma}}^{i-1}$ el estado anterior de esfuerzo, cuyo valor es conocido. El incremento de esfuerzo $\Delta \underline{\underline{\sigma}}$ es la rata de esfuerzo integrada sobre un pequeño intervalo de tiempo.

Si la ecuación (6) se considera para el estado actual i , los esfuerzos desconocidos $\underline{\underline{\sigma}}^i$ pueden ser eliminados usando la ecuación (7)

$$\int \delta \underline{\varepsilon}^T \Delta \underline{\underline{\sigma}} dV = \int \delta \underline{u}^T \underline{P}^i dV + \oint \delta \underline{u}^T \underline{t}^i dS - \int \delta \underline{\varepsilon}^T \underline{\underline{\sigma}}^{i-1} dV \quad (8)$$

Debe notarse que todas las cantidades en las ecuaciones anteriores son funciones de la posición en el espacio tridimensional.

3.4 DISCRETIZACION DE LOS ELEMENTOS FINITOS

De acuerdo a la teoría del MEF, el continuo se divide en un número elementos de volumen. Cada elemento consiste de un número de nodos; cada nodo tiene un número de grados de libertad que corresponden a valores discretos de las incógnitas en el problema a resolver. En el caso de la teoría de deformación los grados de libertad corresponden a las componentes de desplazamiento. Dentro de un elemento, el campo de desplazamientos \underline{u} es obtenido a partir de los valores nodales discretos en un vector \underline{v} usando funciones de interpolación ensambladas en la matriz \underline{N} .

$$\underline{u} = \underline{N}\underline{v} \quad (9)$$

Las funciones de interpolación en la matriz \underline{N} se denotan con frecuencia como funciones de forma (aclarar en capítulo 6). Sustituyendo la ecuación (9) en la relación cinemática (3) se tiene que

$$\underline{\varepsilon} = \underline{L}\underline{N}\underline{v} = \underline{B}\underline{v} \quad (10)$$

Donde \underline{B} = matriz de interpolación de deformaciones, la cual contiene las derivadas espaciales de las funciones de interpolación.

La ecuación (8) puede ser reformulada ahora en su forma discretizada, de la siguiente manera

$$\int (\underline{B}\delta\underline{v})^T \Delta\sigma dV = \int (\underline{N}\delta\underline{v})^T \underline{P}^i dV + \oint (\underline{N}\delta\underline{v})^T \underline{t}^i dS - \int (\underline{B}\delta\underline{v})^T \underline{\sigma}^{i-1} dV \quad (11)$$

Los desplazamientos discretos pueden ser colocados fuera de la integral

$$\delta\underline{v}^T \int \underline{B}^T \Delta\sigma dV = \delta\underline{v}^T \int \underline{N}^T \underline{P}^i dV + \delta\underline{v}^T \oint \underline{N}^T \underline{t}^i dS - \delta\underline{v}^T \int \underline{B}^T \underline{\sigma}^{i-1} dV \quad (12)$$

Dado que la ecuación (12) se mantiene para cualquier variación cinemáticamente admisible de desplazamiento, se puede escribir

$$\int \underline{B}^T \Delta\sigma dV = \int \underline{N}^T \underline{P}^i dV + \oint \underline{N}^T \underline{t}^i dS - \int \underline{B}^T \underline{\sigma}^{i-1} dV \quad (13)$$

La ecuación anterior es la forma discretizada de la condición de equilibrio. El primer término a la derecha junto con el segundo representa el vector de fuerza externa, y el último término el vector de reacción interna del paso anterior. La diferencia entre el vector de fuerza externa y el de reacción interna debe ser balanceada por un incremento de esfuerzo $\Delta\sigma$.

La relación entre incrementos de esfuerzo e incrementos de deformación es usualmente no lineal. Como resultado, los incrementos de deformación pueden no ser calculados directamente, y un procedimiento global de integración es requerido para satisfacer la condición de equilibrio (ecuación 13) para todos los puntos del problema.

3.5 INTEGRACION IMPLICITA DE LOS MODELOS DE PLASTICIDAD

Los incrementos de esfuerzo $\Delta\sigma$ se obtienen mediante la integración de las ratas de esfuerzo de acuerdo a la ecuación (7). Para los modelos diferenciales de plasticidad, los incrementos de esfuerzo pueden ser escritos como

$$\Delta\sigma = \underline{\underline{D}}^e (\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon^p) \quad (14)$$

En esta ecuación $\underline{\underline{D}}^e$ representa la matriz elástica para el incremento de esfuerzo actual. Los incrementos de deformaciones $\Delta\varepsilon$ se obtienen a partir de los incrementos de desplazamientos Δv usando la matriz de interpolación $\underline{\underline{B}}$, similar a la ecuación (10). Para el comportamiento elástico del material, el incremento plástico de deformación $\Delta\varepsilon^p$ es cero. Para el comportamiento plástico, el incremento de desplazamiento puede ser escrito de la siguiente manera, Vermeer (1979).

$$\Delta\varepsilon^p = \Delta\lambda \left[(1-\omega) \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma} \right)^{i-1} + \omega \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma} \right)^i \right] \quad (15)$$

En la ecuación anterior, $\Delta\lambda$ es el incremento del multiplicador plástico, ω es el parámetro que indica el tipo de integración en el tiempo. Para $\omega=0$ la integración se denomina explícita, y para $\omega=1$, esta es de tipo implícito.

Usando exclusivamente la integración implícita ($\omega=1$), la ecuación (15) se reduce a

$$\Delta\varepsilon^p = \Delta\lambda \left[\left(\frac{\partial g}{\partial \sigma} \right)^i \right] \quad (16)$$

Sustituyendo la ecuación (16) en la (14), y sucesivamente en la (7) se obtiene la siguiente

$$\sigma^i = \sigma^{tr} - \Delta\lambda \underline{\underline{D}}^e \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma} \right)^i \quad \text{Con} \quad \sigma^{tr} = \sigma^{i-1} + \underline{\underline{D}}^e \Delta\varepsilon \quad (17)$$

En ésta ecuación, el termino σ^{tr} es un vector de esfuerzo auxiliar, denominados *esfuerzos elásticos*, los cuales representan el nuevo estado de esfuerzos cuando se considera comportamiento puramente elástico del material.

El incremento del multiplicador plástico $\Delta\lambda$ usado en la ecuación (17) puede ser resuelto a partir de la condición que el nuevo estado de esfuerzos tiene que satisfacer la condición

$$f(\sigma^i) = 0 \quad (18)$$

Para modelos perfectamente plásticos y modelos de "endurecimiento" lineal, el incremento del multiplicador plástico puede ser escrito como sigue

$$\Delta\lambda = \frac{f(\underline{\sigma}^{tr})}{d+h} \quad (19)$$

Donde

$$d = \left(\frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}} \right)^{\underline{\sigma}^{tr}} \stackrel{e}{=} D^e \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right)^i \quad (20)$$

El símbolo h denota el parámetro de endurecimiento, el cual es cero para modelos perfectamente plástico, y constante para modelos de “endurecimiento” lineal. En el segundo caso, el estado de esfuerzo nuevo puede ser formulado como:

$$\underline{\sigma}^i = \underline{\sigma}^{tr} - \frac{\langle f(\underline{\sigma}^{tr}) \rangle}{d+h} \stackrel{e}{=} D^e \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right)^i \quad (21)$$

Donde los corchetes $\langle \rangle$ se conocen como corchetes de McCauley, con la siguiente convención:

$$\langle x \rangle = 0 \quad \text{Para } x \leq 0 \quad \text{y } \langle x \rangle = x \quad \text{para } x > 0$$

3.6 PROCESO GLOBAL DE ITERACION

La sustitución de la relación entre incrementos de deformación y esfuerzo, $\Delta\underline{\sigma} = \underline{\underline{M}}\Delta\underline{\varepsilon}$, en la ecuación de equilibrio (13) lleva a

$$\underline{\underline{K}}^i \Delta\underline{v}^i = \underline{f}_{ex}^i - \underline{f}_{in}^{i-1} \quad (22)$$

Donde:

$\underline{\underline{K}}$ es la matriz de rigidez

$\Delta\underline{v}$ es el vector de desplazamientos incrementales

\underline{f}_{in} es el vector de reacciones internas.

El superíndice i se refiere al número del paso actual. Sin embargo, ya que la relación entre incrementos de esfuerzo y deformaciones es generalmente no lineal, la matriz de rigidez no puede ser formulada de forma directa. Por lo tanto, se requiere un proceso de iteración global para satisfacer la condición de equilibrio y la relación constitutiva. El proceso de iteración puede ser expresado como

$$\underline{\underline{K}}^j \delta\underline{v}^j = \underline{f}_{ex}^i - \underline{f}_{in}^{j-1} \quad (23)$$

Donde el superíndice j se refiere al número de iteración. $\delta\underline{v}$ es un vector que contiene desplazamientos sub-incrementales, los cuales contribuyen a los incrementos del paso i :

$$\Delta v^i = \sum_{j=1}^n \delta v^j \quad (24)$$

Donde n representa el número de iteraciones dentro del paso i . La matriz de rigidez representa el comportamiento del material en una manera aproximada. Mientras más precisa sea la matriz de rigidez, se tendrán que hacer menos iteraciones para obtener el equilibrio dentro de cierta tolerancia.

En su forma más simple, la matriz de rigidez representa una respuesta lineal-elástica. En este caso la matriz de rigidez puede ser formulada como

$$\underline{\underline{K}} = \int \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{B}} dV \quad (25)$$

Donde:

$\underline{\underline{D}}^e$ es la matriz elástica del material, de acuerdo con la ley de Hooke

$\underline{\underline{B}}$ es la matriz de interpolación de deformaciones.

El uso de una matriz de rigidez elástica da un proceso de interpolación robusto siempre y cuando la rigidez del material no aumente, aun cuando se usen modelos plásticos.

Técnicas especiales, tales como *control de la longitud de arco* (Risk, 1979), *sobre-relajación* y *extrapolación* (Vermeer y Van lancen, 1989) pueden ser usadas para mejorar el proceso de iteración.

3.7 TEORIA DEL FLUJO SUBTERRANEO

3.7.1 ECUACIONES BASICAS

El flujo en medos porosos puede ser descrito por la ley Darcy. Considerando el flujo en un plano vertical x - y , las siguientes ecuaciones se aplican:

$$q_x = -k_x \frac{\partial \phi}{\partial X} \quad q_y = -k_y \frac{\partial \phi}{\partial Y} \quad (26)$$

Las ecuaciones expresan que la descarga específica, q , depende de la permeabilidad, k , y el gradiente de la cabeza hidráulica. La cabeza, ϕ , se define como:

$$\phi = y - \frac{P}{\gamma_w} \quad (27)$$

Donde:

y es la posición vertical

P es el esfuerzo en el fluido (negativo para la presión)

γ_w es el peso unitario del fluido.

Para flujo estático la condición de continuidad aplica

$$\frac{\partial q_x}{\partial X} + \frac{\partial q_y}{\partial Y} = 0 \quad (28)$$

La ecuación (28) expresa que no hay flujo neto de salida o entrada en un elemento diferencial, tal como lo muestra la figura 1.

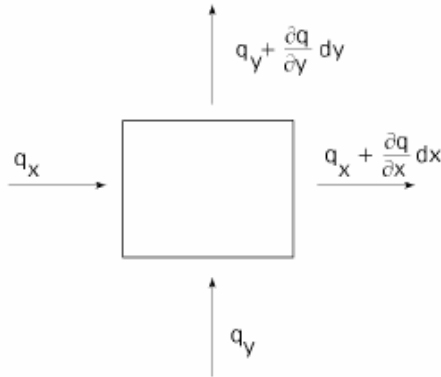


Figura 3-1¹. Ilustración de la condición de continuidad

3.7.2 DISCRETIZACION DE ELEMENTOS FINITOS

La cabeza hidráulica en cualquier posición dentro de un elemento puede ser expresada en función de los valores en los nodos de ese elemento

$$\phi(\xi, \eta) = \underline{N}\underline{\phi}^e \quad (29)$$

Donde:

\underline{N} es el vector que contiene las funciones de interpolación

ξ y η son las coordenadas locales dentro del elemento.

De acuerdo con la ecuación (26) la descarga específica se basa en el gradiente de la cabeza hidráulica. Este gradiente puede ser determinado mediante la matriz \underline{B} , la cual deriva las derivadas espaciales de las funciones de interpolación.

Para describir el flujo tanto a través del suelo saturado (por debajo de la línea freática) como a través del suelo no saturado, una función de reducción K^r se introduce a la ecuación de Darcy (Desai, 1976; Li y Desai, 1983; Bakker, 1989)

$$q_x = -K^r k_x \frac{\partial \phi}{\partial X} \quad q_y = -K^r k_y \frac{\partial \phi}{\partial Y} \quad (30)$$

La reducción K^r se define como

Presiones de poro tensiles

$$K^r = \alpha$$

Presiones de poro de compresión

$$K^r = 1$$

Zona de transición

$$K^r = \alpha + (1 - \alpha) \frac{\gamma_w \delta - P}{\gamma_w \beta}$$

¹Fuente: "PLAXIS Scientific manual". Pag 13.

Este es un concepto que no se basa en experiencias físicas o experimentos, sin embargo, es un artificio numérico necesario para resolver problemas inconfiados.

La función de reducción K^r es igual 1 bajo el nivel freático, mientras que en la zona de transición hay una transición lineal de 1 a α . Para evitar cualquier flujo eventual sobre la línea freática, el valor de α debe ser pequeño. El parámetro β y δ definen el tamaño y posición de la zona de transición.

$$\underline{q} = -K^r \underline{RB}\phi^e \quad (31)$$

Donde:

$$\underline{q} = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \underline{R} = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad (32)$$

A partir de las descargas específicas en los puntos de integración, \underline{q} , las descargas nodales \underline{Q}^e pueden ser integradas como:

$$\underline{Q}^e = -\int \underline{B}^T \underline{q} dV \quad (33)$$

Sustituyendo (31) en (33) se llega a la siguiente ecuación:

$$\underline{Q}^e = \underline{K}^e \phi^e \quad \text{Donde} \quad \underline{K}^e = \int \underline{B}^T \underline{RB} dV \quad (34)$$

En un nivel global, las contribuciones de todos los elementos son añadidas y las condiciones de borde son impuestas. Esto lleva a un sistema de n ecuaciones con n incógnitas.

$$\underline{Q} = \underline{K}\phi \quad (35)$$

En donde \underline{K} es la matriz global de flujo, y \underline{Q} contiene las descargas prescritas que son dadas con las condiciones de borde. En el caso que la línea freática es desconocida (problemas inconfiados), el esquema de Picard se usa para resolver el sistema de ecuaciones en forma iterativa. El procesote iteración puede formularse como

$$\delta\phi^j = \underline{K}^{-1} \underline{r}^{j-1} \quad \underline{r}^{j-1} = \int \underline{B}^T \underline{q}^{j-1} dV \quad \phi^j = \phi^{j-1} + \delta\phi^j \quad (36)$$

Donde j es número de iteración \underline{r} es el vector de desbalance. En cada iteración, los incrementos de la cabeza hidráulica son calculados a partir del desbalance en las descargas nodales, y añadidas a la cabeza activa. Desde la nueva distribución de cabeza hidráulica, las nuevas descargas específicas son calculadas a partir de la ecuación (31), la cual puede ser integrada a descargas nodales, como ya se formulo. Este proceso se continua hasta que el error en las descargas nodales sea menor que el error tolerado.

3.7.3 FLUJO EN ELEMENTOS DE INTERFASE

La descarga específica a través de una interfase se define por las siguientes ecuaciones.

$$\text{En la dirección normal} \quad q_n = -k_n \frac{\Delta\phi}{\delta_v}$$

$$\text{En la dirección longitudinal} \quad q_s = -k_s \frac{\Delta\phi}{\delta_s}$$

Donde δ_v es el espesor virtual de la interfase, $\Delta\phi$ es la descarga de la cabeza hidráulica a través de la interfase, y δ_s es una coordenada sobre la interfase en la dirección longitudinal. La descarga total a través de una interfase longitudinal l se da por

$$\text{En la dirección normal} \quad Q_n = \int q_n dl$$

$$\text{En la dirección longitudinal} \quad Q_s = q_s \delta_v$$

Las interfasas pueden ser usadas para mejorar los cálculos de filtración al añadir elementos al contorno de infiltración. La teoría empleada para modelar superficies de infiltración es escrita por Aubry y Ozanam (1988) y Bakker (1989).

3.8 TEORIA DE CONSOLIDACION

3.8.1 ECUACIONES BASICAS DE LA TEORIA DE CONSOLIDACION

Las ecuación gobernantes de consolidación usada sigue la teoría de Biot (Biot, 1956). la ley de Darcy para el flujo de fluido y el comportamiento elástico del esqueleto de suelo es asumida. La formulación es basada en la teoría de deformaciones pequeñas. Según el principio de Terzaghi, los esfuerzos son divididos en esfuerzos efectivos y presiones del poro:

$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma}' + m(P_{efectiva} - P_{exceso}) \quad (36)$$

$$\text{Donde: } \underline{\sigma} = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} + \sigma_{xy} + \sigma_{yz} + \sigma_{zx})^T \quad \text{y} \quad m = (111000)^T \quad (37)$$

$\underline{\sigma}$ es el vector de esfuerzos totales, $\underline{\sigma}'$ contiene los esfuerzos efectivos, P_{exceso} es el exceso de presión de poro, m es un vector que contiene las condiciones de unidad para los componentes de esfuerzos normales y cero para los componentes de esfuerzo cortante.

3.9 FORMULACION DE ELEMENTOS

A continuación se describen las funciones de interpolación empleadas por el software PLAXIS. Como se dijo anteriormente, cada elemento finito posee unos grados de libertad, los cuales valores discretos de las incógnitas a hallar en el problema. Para el

caso de la mecánica de suelos, estos grados de libertad están asociados a los desplazamientos y a las presiones de poro causadas por el nivel freático presente en la masa desuelo.

3.9.1 FUNCIONES DE INTERPOLACION PARA ELEMENTOS LINEALES

De la manera establecida en el capítulo 5, dentro de un elemento, el campo de desplazamiento $\underline{u} = (u_x, u_y)^T$ se obtiene a partir de los valores nodales discretos de un vector $\underline{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T$ usando funciones de interpolación ensambladas en la matriz \underline{N} :

$$\underline{u} = \underline{N}\underline{v} \quad (38)$$

Por ende, las funciones de interpolación se usan para interpolar valores dentro de un elemento en valores conocidos en los nodos. Estas funciones se conocen como funciones de forma.

Considerando en primera instancia un elemento lineal, los cuales son base elemento tales como geotextiles, cargas puntuales y distribuidas; se tiene que para la posición local, ξ , de un punto (usualmente de esfuerzo o integración) conocido, se puede escribir para la componente de desplazamiento u :

$$u(\xi) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi)v_i \quad (39)$$

Donde:

v_i son valores nodales

$N_i(\xi)$ es valor de la función de forma del nodo i en la posición ξ

$u(\xi)$ es valor resultante en la posición ξ

n número de nodos por elemento.

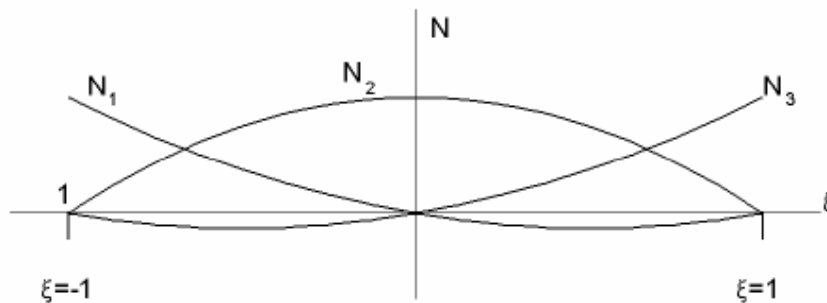


Figura 3-2². Funciones de forma para un elemento lineal de tres nodos.

²Fuente: "PLAXIS Reference manual". Pag 15.

En el gráfico 3 se muestra un ejemplo de un elemento lineal de tres nodos, el cual es compatible para un elemento triangular de 6 nodos, tres nodos en cada lado. Las funciones de forma N_i la propiedad es que función es uno en el nodo i e igual a cero en los otros nodos. Para elementos de este tipo, donde los nodos 1, 2, y 3 se localizan en $\xi = -1$ 0 y 1 respectivamente, las funciones de forma son dadas por:

$$N_1 = -\frac{1}{2}(1-\xi)\xi$$

$$N_2 = (1+\xi)(1-\xi)$$

$$N_3 = \frac{1}{2}(1+\xi)\xi$$

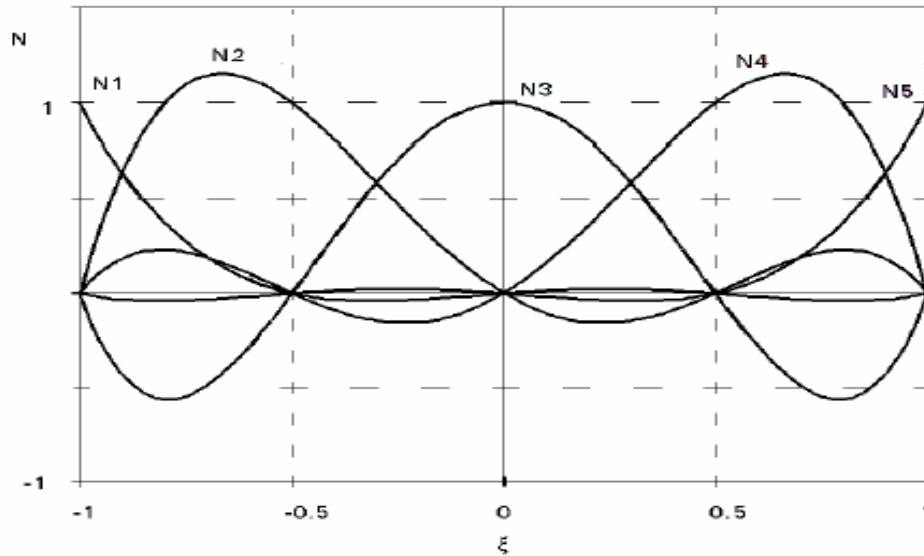


Figura 3-3³. Funciones de forma para un elemento lineal de 5 nodos

Quando se usan elementos triangulares de 15 nodos, hay 5 nodos a cada lado del triángulo. Para cuando los nodos de 1 a 5 están en $\xi = -1, -0.5, 0, 0.5$ y 1 , respectivamente, se tiene:

$$N_1 = -\frac{(1-\xi)(1-2\xi)\xi(-1-2\xi)}{6}$$

$$N_2 = \frac{4(1-\xi)(1-2\xi)\xi(-1-\xi)}{3}$$

$$N_3 = (1-\xi)(1-2\xi)(-1-2\xi)(-1-\xi)$$

$$N_4 = 4\frac{(1-\xi)\xi(-1-2\xi)(-1-\xi)}{3}$$

$$N_5 = \frac{(1-2\xi)\xi(-1-2\xi)(-1-\xi)}{6}$$

³Fuente: "PLAXIS Reference manual". Pag 22.

3.9.2 FUNCIONES DE INTERPOLACION PARA ELEMENTOS TRIANGULARES

Para elementos triangulares hay dos coordenadas locales (ξ y η). Adicionalmente, se usa una coordenada auxiliar $\zeta = 1 - \xi - \eta$. Para elementos triangulares de 15 nodos, las funciones de forma pueden ser escritas como:

$$N_1 = \zeta(4\zeta - 1)(4\zeta - 2)(4\zeta - 3)/6$$

$$N_2 = \xi(4\xi - 1)(4\xi - 2)(4\xi - 3)/6$$

$$N_3 = \eta(4\eta - 1)(4\eta - 2)(4\eta - 3)/6$$

$$N_4 = 4\zeta\xi(4\zeta - 1)(4\xi - 1)$$

$$N_5 = 4\xi\eta(4\xi - 1)(4\eta - 1)$$

$$N_6 = 4\eta\zeta(4\eta - 1)(4\zeta - 1)$$

$$N_7 = \xi\xi(4\xi - 1)(4\xi - 2)*8/3$$

$$N_8 = \zeta\xi(4\xi - 1)(4\xi - 2)*8/3$$

$$N_9 = \eta\xi(4\xi - 1)(4\xi - 2)*8/3$$

$$N_{10} = \xi\eta(4\eta - 1)(4\eta - 2)*8/3$$

$$N_{11} = \zeta\eta(4\eta - 1)(4\eta - 2)*8/3$$

$$N_{12} = \eta\zeta(4\zeta - 1)(4\zeta - 2)*8/3$$

$$N_{13} = 32\eta\xi\zeta(4\zeta - 1)$$

$$N_{14} = 32\eta\xi\zeta(4\xi - 1)$$

$$N_{15} = 32\eta\xi\zeta(4\eta - 1)$$

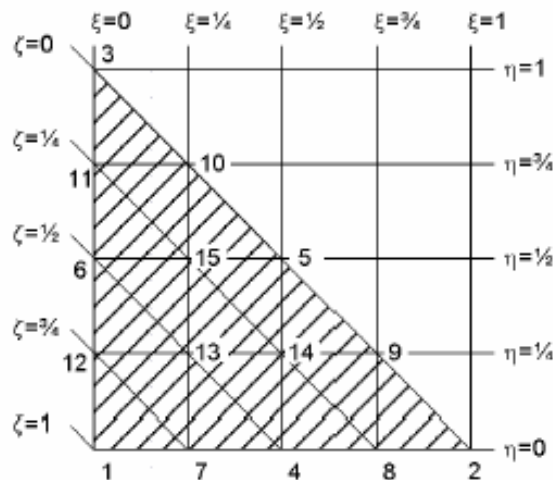


Figura 3- 4⁴. Numeración local y posicionamiento de nodos en un elemento triangular de 15 nodos.

⁴Fuente: "PLAXIS Scientific manual". Pag 5.

Similarmente, las funciones de forma para un elemento de 6 nodos son:

$$N_1 = \zeta(2\zeta - 1)$$

$$N_2 = \xi(2\xi - 1)$$

$$N_3 = \eta(2\eta - 1)$$

$$N_4 = 4\zeta\xi$$

$$N_5 = 4\xi\eta$$

$$N_6 = 4\eta\zeta$$

3.10 INTEGRACION NUMERICA DE ELEMENTOS LINEALES

Con el objetivo de obtener la integral sobre cierta línea o área, la integral es numéricamente estimada como:

$$\int_{\xi=-1}^1 F(\xi) d\xi \approx \sum_{i=1}^k F(\xi_i) w_i \quad (40)$$

Donde $F(\xi_i)$ es valor de la función F en la posición ξ_i , w_i es el factor de peso para el punto i . Un total de k puntos se usan en la integración. Dos métodos comunes de integración son comúnmente usados en este punto de análisis, primero, la integración de Newton-Cotes, donde los puntos ξ_i son escogidos en la posición de los nodos, y segundo, la integración de Gauss, donde menor cantidad de puntos en lugares especiales pueden ser usados para obtener una alta precisión. La posición y los factores de peso de los dos tipos de integración se dan en las siguientes tablas. Nótese que la suma de los factores de peso es igual a 2.

Tabla 1. Integración de Newton – Cotes

Nº DE NODOS	ξ_i	w_i
2	± 1	1
3	$\pm 1, 0$	1/3, 4/3
4	$\pm 1, \pm 1/3$	1/4, 3/4
5	$\pm 1, \pm 1/2, 0$	7/45, 32/45, 12/45

Tabla 2. Integración de Gauss.

Nº DE PUNTOS	ξ_i	w_i
1	0.000000...	2
2	$\pm 0.577350...(\pm 1/\sqrt{3})$	1
3	$\pm 0.774596...(\pm \sqrt{0.6})$ 0.000000...	0.555555...(5/9) 0.88888...(8/9)
4	$\pm 0.861136...$ $\pm 0.339981...$	0.347854 0.652145
5	± 0.906179 $\pm 0.538469...$ 0.000000...	0.236926 0.478628 0.568888

Empleando la integración de Newton-Cotes, se pueden integrar exactamente funciones polinomiales de orden menor al número de puntos de Gauss usados. Para la integración de Gauss, una función polinomial de grado $2k-1$ se puede integrar exactamente usando k puntos.

3.11 INTEGRACION NUMERICA DE ELEMENTOS TRIANGULARES

De manera semejante a los elementos lineales, para elementos triangulares se puede plantear la integración numérica de la siguiente forma:

$$\iint F(\xi, \eta) d\xi d\eta \approx \sum_{i=1}^k F(\xi_i, \eta_i) w_i \quad (41)$$

La integración de Gauss es la utiliza para integración dentro de los elementos triangulares. Para elementos de 6 nodos la integración se basa en tres puntos, mientras que para elementos de 15 nodos, esta se basa en 12 puntos. La posición y factores de peso de los puntos de integración se dan en la tabla 3 y 4. Nótese, en contraste con los elementos lineales, la suma de los factores de peso es igual a 1.

Tabla 3. Integración 3 puntos para elementos de 6 nodos.

PUNTO	ξ_i	η_i	ζ_i	w_i
1, 2 y 3	1/6	1/6	2/3	1/3

Tabla 4. Integración de puntos para elementos de 15 nodos.

PUNTO	ξ_i	η_i	ζ_i	w_i
1, 2 y 3	0.063089...	0.063089...	0.873821...	0.050845...
4...6	0.249286...	0.249286...	0.501426...	0.116786...
7...12	0.310352...	0.053145...	0.636502...	0.082851...

CAPÍTULO 4. SOFTWARE PLAXIS

4.1 INTRODUCCIÓN

PLAXIS es un programa de ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modelizables corresponden a problemas de deformación plana o con axisimetría. El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate. Es necesario que los usuarios estén familiarizados con el entorno Windows.

La interfaz de usuario está constituida por cuatro subprogramas (Input (Entrada), Calculations (Cálculos), Output (Resultados) y Curves (Curvas)), dicha interfaz hace del programa algo muy asequible, práctico y fácil de manejar.

4.2 UNIDADES Y CONVENIO DE SIGNOS

4.2.1 UNIDADES

Es importante en todo análisis adoptar un sistema de unidades coherente. Antes de la introducción de la geometría deberá seleccionarse un conjunto adecuado de unidades básicas a partir de una lista de unidades estándar. Las unidades básicas comprenden una unidad para la longitud, otra para la fuerza y otra para el tiempo. Las unidades a utilizar se determinan en la ventana General settings del programa de Input. En la Tabla 1 se facilita una descripción de todas las unidades disponibles y los factores de conversión con respecto a las unidades por defecto, que se indican entre corchetes ([]). El resto de datos deberá ajustarse al sistema de unidades seleccionado y los resultados deberán ser interpretados en términos de este mismo sistema. A partir del conjunto de unidades básicas, la unidad apropiada para la introducción de un parámetro en particular se encuentra por lo general indicada detrás del recuadro de edición o, cuando se utilizan tablas de introducción, encima de la columna correspondiente. De esta manera se reducen los errores debidos a la introducción de datos expresados en unidades equivocadas. En todos los ejemplos que se facilitan en los manuales de PLAXIS, se utilizan las unidades por defecto.

Tabla 1: Unidades disponibles y factores de conversión a las unidades por defecto

Longitud	Conversión	Fuerza	Conversión	Tiempo	Conversión
mm	= 0.001 m	N	= 0.001 kN	s (seg.)	= 1/86400 día
[m]	= 1 m	[kN]	= 1 kN	minuto	= 1/1440 día
in (pulgada)	= 0.0254 m	MN	= 1000 kN	h	= 1/24 día
ft (pie)	= 0.3048 m	lb (libra)	= 0.0044482 kN	[día]	= 1 día
		klb (kilolibra)	= 4.4482 kN		

Las unidades generalmente se utilizan solo como una referencia para el usuario pero, hasta cierto punto, el cambio de las unidades básicas en los General settings dará lugar a la conversión automática de los valores de entrada existentes a las nuevas unidades. Esto se aplica a los parámetros de los conjuntos de datos de materiales y a otras propiedades de los materiales en el programa de Input. No se aplica a los valores de entrada relacionados con la geometría, tales como los datos geométricos, las cargas, los desplazamientos prescritos o los niveles freáticos, ni a ningún valor fuera del programa de Input. Si el usuario tiene la intención de utilizar un sistema de unidades diferente en un proyecto ya existente, tiene que modificar de forma manual todos los datos geométricos y volver a efectuar todos los cálculos.

4.2.2 CONVENIO DE SIGNOS

La generación de un modelo de elementos finitos en dos dimensiones en PLAXIS está basada en un modelo geométrico. Este modelo geométrico se crea en el plano x-y del sistema de coordenadas global (Figura 4-1), mientras que la dirección z es la dirección perpendicular al plano. En el sistema de coordenadas global, la dirección z positiva apunta hacia el usuario. Aún cuando la versión 8 del PLAXIS es un programa en 2D, las tensiones están basadas en el sistema de coordenadas cartesiano en 3D que se muestra en la Figura 4-1. En un análisis de deformación plana, σ_{zz} es el esfuerzo perpendicular al plano xy. En un análisis axisimétrico, x representa la coordenada radial, representa la coordenada axial y z representa la dirección tangencial. En este caso, σ_{xx} representa la tensión radial y σ_{zz} representa la tensión circunferencial.

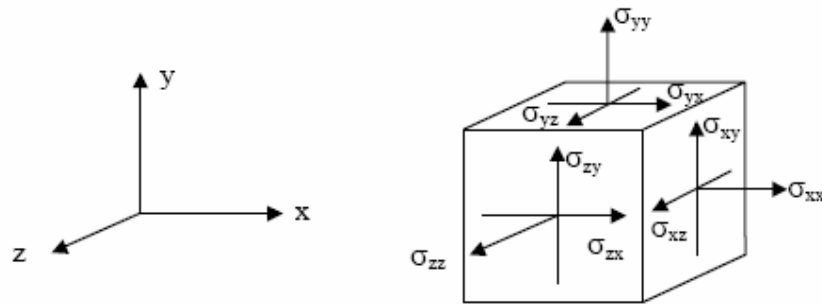


Figura 4-1. Sistema de coordenadas y representación de las componentes positivas de tensión.

En la salida de resultados, se considera siempre que cualquier esfuerzo o tensión de compresión - incluyendo la presión intersticial - es negativa, mientras que los esfuerzos y las tensiones de tracción se consideran positivos. En la Figura 4-1 se muestran las direcciones de las tensiones positivas.

4.3 INTRODUCCIÓN DE DATOS

En PLAXIS la introducción de datos se efectúa por medio del ratón y del teclado. En general, se puede establecer una distinción entre cuatro tipos de datos de entrada:

- La introducción de objetos geométricos (p. e. dibujar una capa de suelo).
- La introducción de texto (p. e. introducir el nombre del proyecto).
- La introducción de valores (p. e. introducir los parámetros del modelo).
- La introducción de selecciones (p. e. elegir un modelo de suelo).

El ratón se utiliza por lo general para fines de dibujo y de selección, mientras que se emplea el teclado para introducir textos y valores.

4.3.1 INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS Y PRE-PROCESADOR

Para llevar a cabo un análisis de elementos finitos utilizando PLAXIS, el usuario debe crear una malla de elementos finitos y especificar las propiedades de los materiales y las condiciones de contorno. Todo ello se lleva a cabo en el programa de introducción de datos (Input). Para generar una malla de elementos finitos, el usuario debe crear un modelo geométrico compuesto por puntos, líneas y otros componentes en las dos dimensiones del plano x-y. La generación de la malla y de sus propiedades y la imposición de las condiciones de contorno a nivel de elemento es ejecutada de forma automática por el generador de mallas PLAXIS basándose en la introducción del modelo geométrico. Los usuarios pueden también retocar la malla de elementos finitos con el fin de obtener un mallado óptimo. La parte final de la introducción de datos comprende la generación de las presiones de agua y de las tensiones efectivas que definen el estado inicial.

Cuando se crea un modelo geométrico en el programa Input, se sugiere que se seleccionen los diferentes elementos de entrada en el orden que viene dado por la segunda barra de herramientas (de izquierda a derecha). En primer lugar conviene dibujar el contorno geométrico, a continuación se añaden los diferentes estratos, luego los objetos estructurales, las capas de construcción, las condiciones de contorno y, por último, las cargas. Utilizando este procedimiento, la segunda barra de herramientas actúa como una guía para el uso del programa Input y asegura que todos los elementos de entrada necesarios son tratados debidamente.

4.3.2 EL PROGRAMA DE INTRODUCCIÓN DE DATOS (INPUT)



Este icono representa el programa de introducción de datos (Input). Este programa contiene todos los dispositivos necesarios para crear y modificar un modelo geométrico, así como para generar la correspondiente malla de elementos finitos y las condiciones de contorno. La generación de las condiciones iniciales se efectúa fuera del programa Input (Módulo de condiciones iniciales).

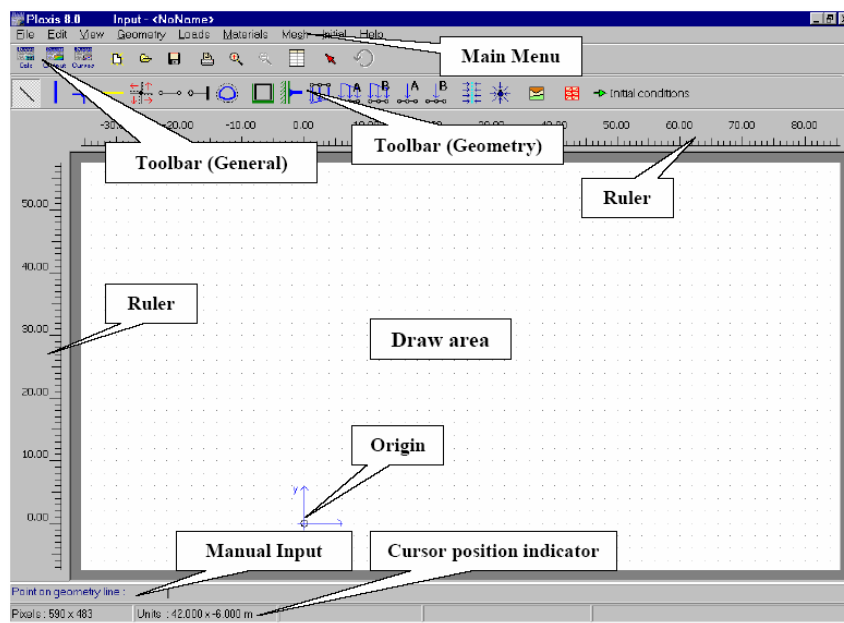


Figura 4-2. Ventana principal INPUT

La ventana principal del programa de introducción de datos (Input) contiene los elementos siguientes (Figura 4-2):

El menú de introducción de datos: El menú Input contiene todos los elementos de introducción y dispositivos para las operaciones del programa Input. La mayor parte de los elementos se encuentran también disponibles como iconos en la barra de las herramientas.

La barra de herramientas (General): Esta barra de herramientas contiene los botones para las acciones generales tales como las operaciones con los discos, la impresión, el uso del zoom o la selección de objetos. Contiene también los iconos para iniciar los otros subprogramas (Calculations, Output, Curves).

La barra de herramientas (Geometría):

Esta barra de herramientas contiene los iconos para las acciones que están relacionadas con la creación de un modelo geométrico. Los iconos están ordenados de forma tal que, por regla general, siguiéndolos en orden de izquierda a derecha se obtiene como resultado un modelo completamente definido.

Las reglas (Rulers): A la izquierda y en la parte superior de la zona de dibujo hay unas reglas que indican las coordenadas físicas x e y del modelo geométrico. Esto permite una visión directa de las dimensiones geométricas. Las reglas pueden ser desactivadas en el submenú View. Cuando se hace clic en las reglas, aparece la ventana General settings en la que se pueden modificar las dimensiones del modelo geométrico.

La zona de dibujo (Draw area): La zona de dibujo es la hoja sobre la cual se crea y se modifica el modelo geométrico. La creación y la modificación de un modelo geométrico se lleva a cabo principalmente por medio del ratón, pero en el caso de algunas opciones se encuentra disponible una introducción directa desde el teclado. La zona de dibujo puede ser utilizada de la misma manera que en un programa convencional de dibujo. La cuadrícula de pequeños puntos de la zona de dibujo puede ser utilizada para ir a posiciones determinadas.

Ejes: Si el origen físico se encuentra dentro del margen de las dimensiones dadas, se encontrará representado por un pequeño círculo en el que los ejes x e y aparecen indicados por medio de flechas. La indicación de los ejes puede ser desactivada en el submenú View.

Introducción manual: Si el dibujo con el ratón no proporciona la exactitud deseada, se puede utilizar la opción de Introducción manual (Manual input). Los valores correspondientes a las coordenadas x e y pueden ser introducidos mediante el teclado; ambas coordenadas deberán ir separadas por un espacio (valor de x <espacio> valor de y). La introducción manual puede utilizarse con todos los objetos salvo en el caso de las articulaciones (Hinges) y de las fijaciones de rotación (Rotation fixities). En lugar de la introducción de coordenadas absolutas, se pueden dar incrementos con respecto al punto anterior tecleando una @ directamente delante del valor (@valor de x <espacio> @valor de y). Además de la introducción de las coordenadas, los puntos de la geometría existente pueden ser seleccionados por su número.

Indicador de la posición del cursor: El indicador de la posición del cursor proporciona la posición actual del cursor del ratón tanto en unidades físicas (coordenadas x, y) como en píxeles de la pantalla.

4.3.3 EL MENÚ DE INTRODUCCIÓN DE DATOS (INPUT)

El menú principal del programa de introducción de datos contiene submenús desplegables que cubren la mayor parte de las opciones destinadas a la gestión de ficheros, la transferencia de datos, el visionado de gráficos, la creación de un modelo geométrico, la generación de mallas de elementos finitos y la introducción de datos en general. Puede establecerse una distinción entre el menú del módulo de creación de la geometría y el menú del módulo de condiciones iniciales. En el módulo de creación de la geometría, el menú está constituido por los submenús File, Edit, View, Geometry, Loads, Materials, Mesh, Initial y Help. En el módulo de condiciones iniciales el menú muestra los submenús File, Edit, View, Geometry, Generate y Help. A continuación se nombran los componentes de cada submenú (los menos conocidos):

El submenú File:

Work directory: Para establecer el directorio por defecto en el que serán guardados los ficheros de proyectos PLAXIS.

Import: Para importar datos de geometría procedentes de otro tipo de ficheros.

General settings: Para definir los parámetros básicos del modelo.

El submenú View:

Reset view: Para restaurar la zona de dibujo completa.

Table: Para ver la tabla con las coordenadas x e y de todos los puntos de la geometría. La tabla puede ser utilizada para ajustar las coordenadas existentes.

Rulers: Para mostrar u ocultar las reglas a lo largo de la zona de dibujo.

Cross hair: Para mostrar u ocultar la retícula durante la creación de un modelo geométrico.

Grid: Para mostrar u ocultar la cuadrícula en la zona de dibujo.

Axes: Para mostrar u ocultar las flechas que indican los ejes de las x y de las y.

Snap to grid: Para activar o desactivar el salto a los puntos regulares de la cuadrícula.

Point numbers: Para mostrar u ocultar los números de los puntos de geometría.

Chain numbers: Para mostrar u ocultar los números de 'cadena' de los objetos geométricos. Las 'cadenas' son grupos de objetos geométricos similares que son dibujados en una sola acción de trazado sin pulsar el botón derecho del ratón o la tecla de <Esc> en puntos intermedios.

El submenú Geometry:

El submenú Geometry contiene las opciones básicas para la composición de un modelo geométrico. Además de una línea geométrica normal, el usuario puede seleccionar placas, geomallas, interfaces, anclajes, túneles, articulaciones/muelles de rotación, drenes y pozos

El submenú Loads:

El submenú Loads contiene las opciones para añadir cargas y condiciones de contorno al modelo geométrico.

El submenú Materials:

El submenú Materials se utiliza para activar una base de datos para la creación y la modificación de conjuntos de propiedades de los diferentes materiales posibles, es decir, suelos e interfaces, placas, geomallas y anclajes.

El submenú Mesh:

El submenú Mesh contiene las opciones para establecer el tipo de elemento, para generar una malla de elementos finitos y para aplicar un refinamiento local o global a la malla.

El submenú Initial: El submenú Initial contiene la opción de pasar al módulo de definición de las condiciones iniciales del programa de introducción de datos (Input).

El submenú Geometry del módulo de definición de las condiciones iniciales:

Este submenú contiene las opciones para la introducción del peso específico del agua, trazar un nivel freático o crear unas condiciones de contorno adicionales para el flujo o los análisis de la consolidación.

El submenú Generate del módulo de definición de las condiciones iniciales:

Este submenú contiene las opciones para generar las presiones del agua y las tensiones efectivas iniciales.

4.4 CONFIGURACIÓN GENERAL

La ventana de configuración general (General settings) aparece cada vez que se inicia la creación de un nuevo modelo y puede seleccionarse más adelante desde el submenú File. La ventana de General settings contiene las dos pestañas de Proyecto (Project) y de Dimensiones (Dimensions). La pestaña Project contiene el nombre y la descripción del proyecto, el tipo del modelo y los datos de aceleración. La pestaña de Dimensions contiene las unidades básicas de longitud, fuerza y tiempo y las dimensiones de la zona de dibujo.

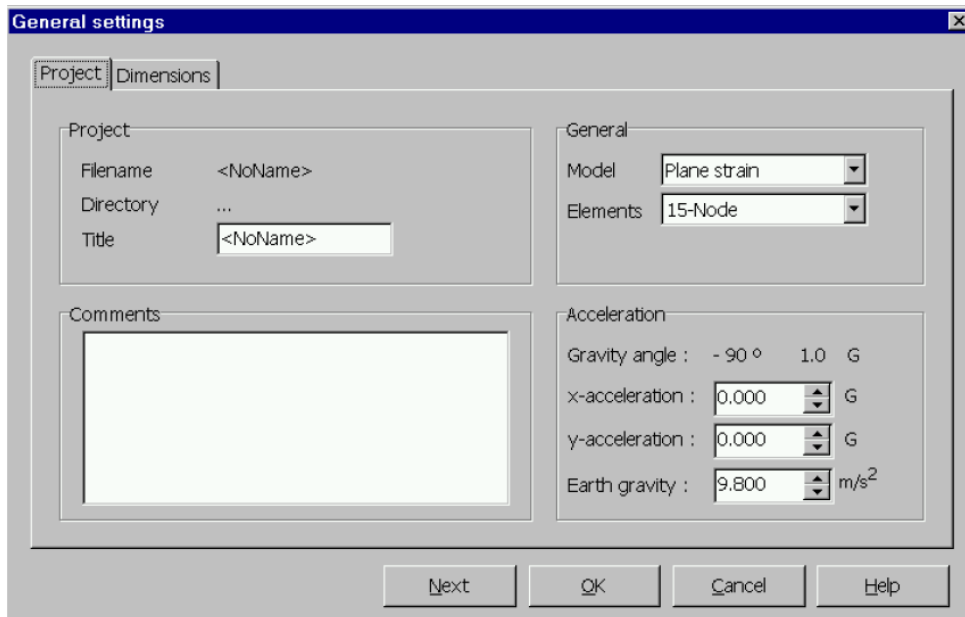


Figura 4-3. Ventana de configuración general (pestaña Project)

4.5 MODELO

La Versión 8 del PLAXIS puede ser utilizada para llevar a cabo análisis de elementos finitos en dos dimensiones. Los modelos de elementos finitos pueden ser de Deformación plana (*Plane strain*) o Axisimétricos (*Axisymmetric*). La configuración por defecto del parámetro *Model* es *Plane strain*.

Se utiliza un modelo de Deformación plana (*Plane strain*) en el caso de geometrías con una sección transversal (más o menos) uniforme para las que pueda suponerse que los correspondientes estados tensionales y de cargas son uniformes a lo largo de una determinada longitud perpendicular a la sección transversal (dirección z). Los desplazamientos y deformaciones en la dirección z se consideran nulos. Sin embargo, se tienen en cuenta completamente los esfuerzos en la dirección z. Se utiliza un modelo axisimétrico (*Axisymmetric*) en estructuras circulares con una sección transversal radial (más o menos) uniforme y un esquema de carga alrededor del eje central que permita suponer estados tenso-deformacionales idénticos en cualquier dirección radial. Debe recordarse que en el caso axisimétrico la coordenada x representa el radio y la coordenada y corresponde al eje de simetría. No se pueden utilizar coordenadas x negativas. La selección de *Plane strain* o de *Axisymmetric* da como resultado un modelo de elementos finitos en dos dimensiones con sólo dos grados de libertad de desplazamiento por nodo (dirección x e y).

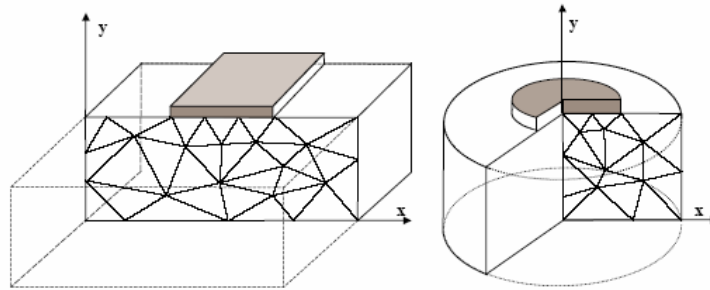


Figura 4-4¹. Ejemplo de un problema de deformación plana y de uno axisimétrico

ELEMENTOS

El usuario puede seleccionar elementos triangulares de 6 nodos o de 15 nodos (Figura 4-2) para modelar el suelo y otros dominios. El triángulo de 15 nodos es el elemento por defecto. Proporciona una interpolación de cuarto orden para los desplazamientos y la integración numérica implica doce puntos de Gauss (puntos de evaluación de tensiones). En el caso del triángulo de 6 nodos, el orden de interpolación es de dos y la integración numérica implica tres puntos de Gauss. El tipo de elemento para los elementos estructurales e interfaces se compatibiliza automáticamente con los de elementos bidimensionales que aquí se describen. El triángulo de 15 nodos es un elemento capaz de proporcionar una gran exactitud que ha conseguido resultados de alta calidad en problemas difíciles como por ejemplo en cálculos de hundimiento para suelos incompresibles.

¹ Fuente: "PLAXIS Manual de referencia". Pág 9.

El triángulo de 6 nodos es un elemento bastante exacto que da buenos resultados en los análisis de estándar de deformación siempre y cuando se utilice un número de elementos suficiente. Sin embargo, habrá que tener cuidado con los modelos axisimétricos o en aquellas situaciones en las que haya que tener en cuenta una (posible) rotura, como es el caso de cálculos de capacidad portante o de análisis de seguridad por medio del método de phi-c reduction (reducción fi-c). Las cargas de rotura y los factores de seguridad son por lo general sobreestimados cuando se utilizan elementos de 6 nodos. En estos casos es preferible el uso de elementos de 15 nodos. Se puede pensar en un elemento de 15 nodos como una composición de cuatro elementos de 6 nodos, dado que el número total de nodos y de puntos de tensión es igual. Sin embargo, un elemento de 15 nodos resulta más potente que cuatro elementos de 6 nodos.

Además de los elementos de suelo pueden utilizarse elementos de placa compatibles para simular el comportamiento de muros, placas y placas curvas y se utilizan elementos de geomalla para simular el comportamiento de geomallas y geotextiles. Además, se utilizan elementos de interfaz compatibles para simular la interacción sueloestructura. Finalmente, el módulo de creación de la geometría permite la introducción de anclajes de extremo fijo y de anclajes de nodo a nodo.

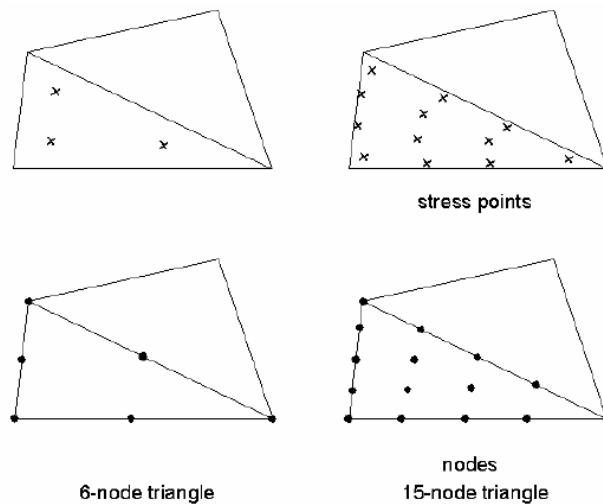


Figura 4-5. Posición de los nodos y los puntos de tensión en el elemento de suelo

UNIDADES

Las unidades de longitud, fuerza y tiempo a utilizar en el análisis se definen cuando se especifican los datos de entrada. Estas unidades básicas se introducen en la pestaña de las Dimensiones (*Dimensions*) de la ventana de Configuración general (*General settings*).

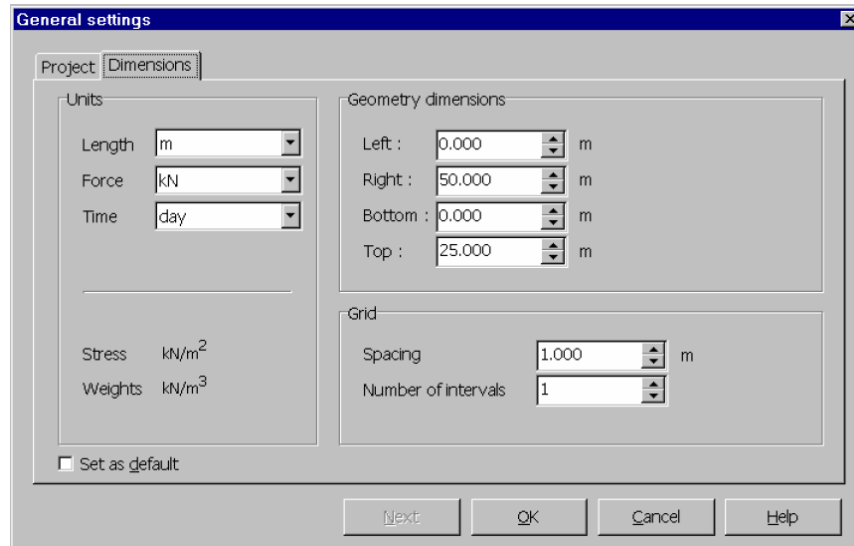


Figura 4-6. Ventana de Configuración general (pestaña *Dimensiones*)

Las unidades que el programa sugiere por defecto son m (metro) para la longitud, kN (kiloNewton) para la fuerza y día para el tiempo. Las unidades de tensión y de peso específico aparecen indicadas en el recuadro que aparece debajo de las unidades básicas. Todos los valores de entrada deberán darse en un sistema de unidades consistente. La unidad apropiada de un determinado valor de entrada se da por lo general directamente detrás del recuadro de edición, basándose en el conjunto de unidades básicas.

DIMENSIONES

Al principio de un nuevo proyecto, el usuario tiene que especificar las dimensiones de la zona de dibujo de manera que el modelo geométrico que ha de crearse encaje dentro de dichas dimensiones. Las dimensiones se introducen en la pestaña *Dimensiones* de la ventana de Configuración general (*General settings*).

LA CUADRÍCULA

Para facilitar la creación del modelo geométrico, el usuario puede definir una cuadrícula para la zona de dibujo. Esta cuadrícula puede ser utilizada para colocar el puntero en determinadas posiciones "regulares". La cuadrícula se define por medio de los parámetros de espaciado (*Spacing*) y del número de intervalos (*Number of intervals*). Se utiliza *Spacing* para establecer una cuadrícula de base, indicada por medio de los pequeños puntos que hay en la zona de dibujo. La cuadrícula efectiva es la cuadrícula de base dividida por el número de intervalos (*Number of intervals*). El número de intervalos por defecto es 1, lo cual da una cuadrícula igual a la cuadrícula de base. La especificación de la cuadrícula se introduce en la pestaña de *Dimensiones* de la ventana de *General settings*. Se puede utilizar el submenú *View* para activar o desactivar la opción de la cuadrícula y de la colocación de puntos.

4.6 GEOMETRÍA

La generación de un modelo de elementos finitos empieza con la creación de un modelo geométrico que representa el problema que se quiere resolver. Un modelo geométrico está constituido por puntos, líneas y dominios. Los puntos y las líneas son

introducidos por el usuario, mientras que los dominios son generados por el programa.

Se recomienda iniciar la creación de un modelo geométrico dibujando el contorno completo de la geometría. Además, el usuario puede especificar capas de materiales, objetos estructurales, las líneas utilizadas para las etapas de construcción, las cargas y las condiciones de contorno. El modelo geométrico deberá incluir no sólo la situación inicial, sino también las situaciones que se producen en las diversas fases del cálculo.

Una vez que se han creado los diferentes componentes del modelo geométrico, el usuario deberá establecer conjuntos de datos de materiales y asignarlos a los componentes geométricos correspondientes. Cuando se ha definido el modelo geométrico completo y se han asignado propiedades a todos sus componentes se puede generar la malla de elementos finitos.

SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES GEOMÉTRICOS



Cuando la herramienta de Selección (la flecha roja) está activa, se puede seleccionar un componente geométrico haciendo clic una vez sobre dicho componente. Se pueden seleccionar simultáneamente múltiples componentes del mismo tipo manteniendo pulsada la tecla de las mayúsculas (Shift) del teclado mientras se seleccionan.

4.6.1 PUNTOS Y LÍNEAS



El elemento de entrada básico para la creación de un modelo geométrico es la línea geométrica (*Geometry line*). Este elemento puede ser seleccionado en el submenú *Geometry* así como en la segunda barra de herramientas. Cuando se selecciona la opción de *Geometry line*, el usuario puede crear puntos y líneas en la zona de dibujo haciendo clic con el puntero del ratón (introducción gráfica) o bien tecleando las coordenadas en la línea de instrucciones (introducción por medio del teclado).

Los puntos o las líneas existentes pueden ser modificados o borrados eligiendo primero la herramienta de *Selection* en la barra de las herramientas. Para mover un punto o una línea, seleccionar el punto o la línea en la sección transversal y arrastrarlo hasta la posición que se desee. Para borrar un punto o una línea, seleccionar el punto o la línea en la sección transversal y pulsar la tecla de *Supr* en el teclado.

4.6.2 PLACAS



Las placas son objetos estructurales que se utilizan para modelizar estructuras esbeltas en el terreno, con rigidez a la flexión y rigidez a esfuerzos normales. Las placas pueden ser utilizadas para simular la presencia de muros, placas, láminas o revestimientos que se extiendan en la dirección z. En un modelo geométrico, las placas aparecen como 'líneas azules'. En la Figura 4-7 se muestran ejemplos de estructuras geotécnicas que incluyen placas.

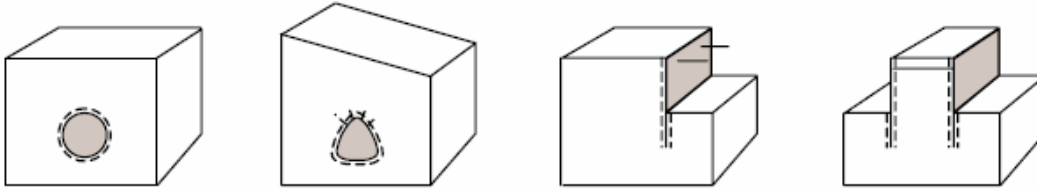


Figura 4-7. Aplicaciones en las que se utilizan placas, anclajes e interfaces

Las placas pueden ser seleccionadas en el submenú *Geometry* o bien haciendo clic sobre el botón correspondiente de la barra de las herramientas. La creación de placas en el modelo geométrico es similar a la creación de líneas geométricas. Cuando se crean placas, las líneas geométricas correspondientes se crean de manera simultánea. Por lo tanto, no es necesario crear primero una línea geométrica en la posición de una placa. Las placas pueden ser borradas seleccionándolas y pulsando la tecla *Supr.*

Las placas pueden ser activadas o desactivadas en las fases del cálculo utilizando la Construcción por etapas (*Staged construction*) como Introducción de carga (*Loading input*).

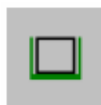
4.7 CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO

En el submenú de Cargas (*Loads*) están contenidas las opciones para la introducción de cargas repartidas, cargas lineales o cargas puntuales y para la prescripción de desplazamientos en el modelo geométrico. Las cargas y los desplazamientos prescritos pueden ser aplicados en los contornos del modelo así como en el interior del mismo.

4.7.1 FIJACIONES

Una fijación corresponde a la prescripción de un desplazamiento nulo. Este tipo de condición puede ser aplicada tanto a líneas geométricas como a puntos geométricos. Las fijaciones pueden ser seleccionadas en el submenú *Loads*. En el modelo geométrico se puede hacer la distinción entre Fijaciones horizontales (*Horizontal fixities*) ($\mu_x = 0$) y Fijaciones verticales (*Vertical fixities*) ($\mu_y = 0$). Además, se pueden seleccionar Fijaciones totales (*Total fixities*), que es una combinación de ambas ($\mu_x = \mu_y = 0$).

4.7.2 FIJACIONES ESTANDAR



Al seleccionar la opción Fijaciones estándar (*Standard fixities*) en el submenú de Cargas (*Loads*) o haciendo clic en el correspondiente icono de la barra de herramientas, PLAXIS impone de forma automática al modelo geométrico un conjunto de condiciones de contorno generales. Esas condiciones se generan de acuerdo con las siguientes reglas:

- A las líneas geométricas verticales en las que la coordenada x es igual a la coordenada x más alta o más baja del modelo se les asigna una fijación horizontal ($\mu_x = 0$).

- A las líneas geométricas horizontales en las que la coordenada y es igual a la coordenada y más baja del modelo se les asigna una fijación completa ($\mu_x = \mu_y = 0$).
- A las placas que se extienden hasta el contorno del modelo geométrico se les asigna una rotación fija en el punto que queda sobre el mismo ($\phi_z = 0$) si por lo menos una de las direcciones de desplazamiento de dicho punto es fija.

Las fijaciones estándar pueden ser utilizadas como una opción de introducción rápida y cómoda en muchas aplicaciones prácticas.

4.7.3 CARGAS REPARTIDAS



La creación de una carga repartida en el modelo geométrico es similar a la creación de una línea geométrica. Se dispone de dos sistemas de carga (A y B) para generar una combinación de cargas repartidas o cargas puntuales. Los sistemas de carga A y B pueden ser activados de manera independiente.

Las cargas repartidas para el sistema de carga A o el B pueden ser seleccionadas en el submenú de Cargas (*Loads*) o haciendo clic en el botón correspondiente de la barra de herramientas. Las unidades de una carga repartida son de fuerza por unidad de superficie (por ejemplo kN/m²). Las cargas repartidas pueden estar constituidas por una componente x y/o una componente y . Por defecto, las cargas que se apliquen sobre el contorno de la geometría tomarán un valor de una unidad de presión perpendicular a dicho contorno. El valor de una carga puede ser modificado haciendo doble clic en la línea geométrica correspondiente y seleccionando el sistema de carga de interés en el recuadro de diálogo de selección. Como resultado de ello, se abre la ventana de cargas repartidas en la que se pueden especificar las dos componentes de la carga en los dos puntos extremos de la línea del modelo geométrico sobre la que se aplica. La distribución es siempre lineal entre esos dos puntos.

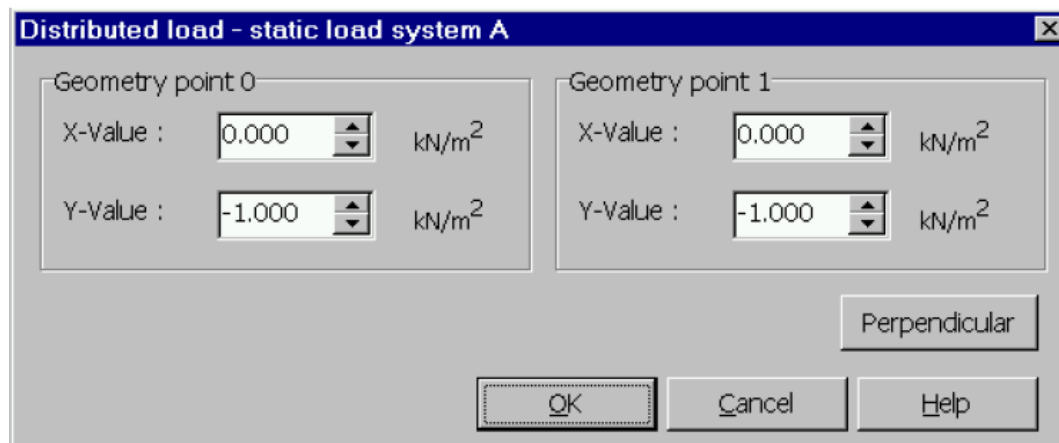


Figura 4-8. Ventana de introducción de los parámetros que definen las cargas repartidas

4.8 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

En PLAXIS las propiedades del suelo y de los materiales que constituyen las estructuras son almacenadas en conjuntos de datos de los materiales. Hay cuatro tipos diferentes de conjuntos de datos de materiales: conjuntos de datos para suelos

e interfaces, para placas, para geomallas y para anclajes. Todos los conjuntos de datos están guardados en una base de datos de los materiales. Desde la base de datos, los conjuntos de datos pueden ser asignados a los diferentes dominios de suelo o a los objetos estructurales correspondientes del modelo geométrico

4.8.1 BASE DE DATOS DE LOS MATERIALES



La base de datos de los materiales puede ser activada seleccionando una de las opciones del submenú de Materiales (*Materials*) o haciendo clic en el botón de *Material sets* de la barra de herramientas. Como resultado de ello, aparece una ventana de datos de los materiales en la que se muestra el contenido de la base de datos del proyecto

A cada lado de la ventana (*Project data base* y *Global data base*) hay dos recuadros extensibles y una lista de conjuntos de datos. En el primer recuadro extensible de la izquierda se puede seleccionar *Set type*. El parámetro Establecer tipo (*Set type*) determina qué tipo de conjunto de datos de los materiales aparece visualizado en la lista inferior (*Soil & Interfaces*, *Plates*, *Geogrids*, *Anchors*). Los conjuntos de datos de las listas son identificados por medio de un nombre definido por el usuario. Los conjuntos del tipo *Soil & Interfaces* pueden ser ordenados en grupos según el modelo de los materiales, el tipo de material o el nombre del conjunto de datos. Este orden puede ser seleccionado en el recuadro extensible *Group order*. La opción *None* puede ser utilizada para descartar la ordenación del grupo. Los pequeños botones que hay entre las dos listas de conjuntos de datos (> y <) pueden ser utilizados para copiar conjuntos de datos individuales de la base de datos del proyecto en la base de datos global o viceversa. El botón >> se utiliza para copiar todos los conjuntos de datos de la base de datos del proyecto en la base de datos global.

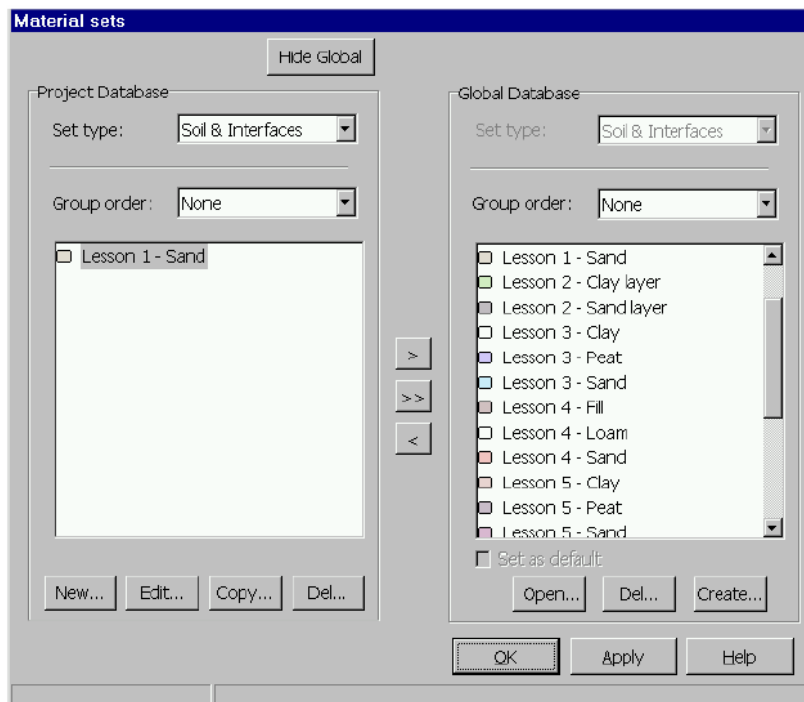


Figura 4-9. Ventana de los conjuntos de datos de materiales en la que se muestran la base de datos del proyecto y la global

Se crea un nuevo conjunto de datos haciendo clic sobre el botón de *New*. Como resultado de ello, aparece una nueva ventana en la que se pueden introducir las propiedades de los materiales o los parámetros del modelo. El primer elemento que se ha de introducir es siempre la identificación (*Identification*), que es el nombre definido por el usuario para ese conjunto de datos. Una vez se ha completado un conjunto de datos, éste se añadirá a la lista y aparecerá designado tal como se haya especificado *Identification*.

Los conjuntos de datos existentes pueden ser modificados seleccionando el nombre correspondiente de la lista de conjuntos de datos de la base de datos del proyecto y haciendo clic en el botón de *Edit*. Al seleccionar un conjunto de datos existente y hacer clic en el botón de *Copy*, se crea un nuevo conjunto de datos en el cual todos los parámetros son iguales a los del conjunto de datos seleccionado (existente). Cuando un conjunto de datos no es ya necesario se le puede eliminar seleccionándolo primero y haciendo luego clic en el botón de *Delete*.

4.8.2 MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO

Los suelos y las rocas tienen tendencia a comportarse de una forma fuertemente no lineal bajo los efectos de las cargas. Este comportamiento esfuerzo - deformación no lineal puede ser modelizado con diversos niveles de sofisticación. Sin embargo, el número de parámetros del modelo se incrementa al aumentar ese nivel de sofisticación. El conocido modelo de Mohr-Coulomb puede ser considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento real del suelo. Este modelo elástico perfectamente plástico exige cinco parámetros de entrada básicos, a saber: un módulo de Young, E , un coeficiente de Poisson, ν , una cohesión, c , un ángulo de fricción, ϕ , y un ángulo de dilatación, ψ .

Dado que los ingenieros geotécnicos están por lo general familiarizados con los cinco parámetros anteriores y raramente disponen de ningún otro dato acerca de otros parámetros del suelo, la atención se centrará aquí en este modelo básico de suelo. PLAXIS admite también algunos modelos de suelo avanzados. Dichos modelos y sus parámetros se describen en el manual de Modelos de Materiales.

CONJUNTOS DE DATOS PARA MATERIALES TIPO SUELO E INTERFACES

Las propiedades de los materiales y los parámetros del modelo correspondientes a dominios ocupados por materiales tipo suelo son introducidos en los conjuntos de datos de los materiales. Las propiedades de los materiales de las interfaces que interaccionan con cada uno de esos materiales están relacionadas con las propiedades del suelo correspondiente y se introducen en sus mismos conjuntos de datos. Un conjunto de datos para materiales tipo suelo e interfaces representa por lo general una determinada capa de suelo y puede ser asignado al dominio o a los dominios correspondientes del modelo geométrico. El nombre del conjunto de datos aparece indicado en la ventana de propiedades del dominio. A las interfaces que están presentes en o a lo largo de dicho dominio se les asigna automáticamente el mismo conjunto de datos. Esto viene indicado en la ventana de propiedades de las interfaces como *<Cluster material>*.

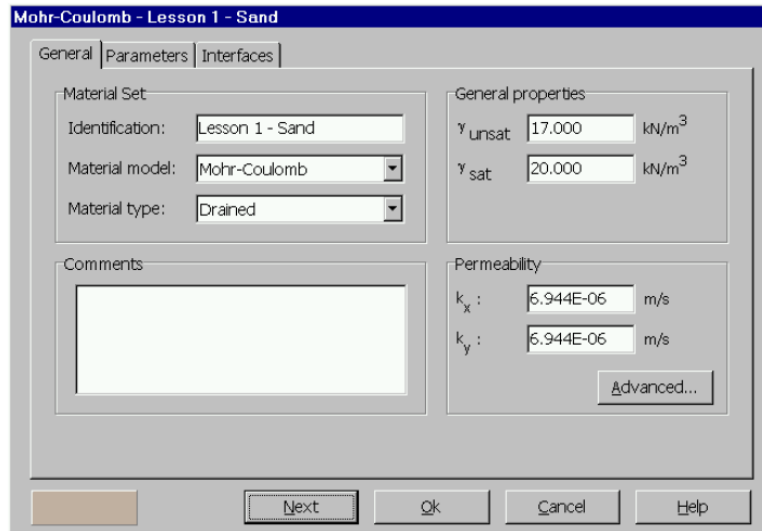


Figura 4-10. Ventana de conjuntos de datos de materiales tipo suelo e interfaces (pestaña *General*)

Se pueden crear varios conjuntos de datos para distinguir entre diferentes capas de suelo. El usuario puede especificar cualquier título de identificación para un conjunto de datos. Es aconsejable utilizar un nombre que tenga algún significado, dado que el conjunto de datos aparecerá en la lista de conjuntos de datos de la base de datos por su nombre de identificación. Para un fácil reconocimiento en el modelo, PLAXIS asigna un color propio a cada conjunto de datos. Este color aparece también en la lista de conjuntos de datos de la base de datos.

Las propiedades que se especifican en cada conjunto de datos se clasifican en tres categorías: *General*, *Parameters* y *Interfaces*. Cada categoría tiene asociada una pestaña dentro de la correspondiente ventana. La pestaña *General* contiene el tipo de modelo constitutivo del suelo, el tipo de comportamiento del suelo (drenado, no drenado o no poroso) y las propiedades generales del suelo tales como el peso específico. La pestaña *Parameters* contiene los parámetros de rigidez y de resistencia correspondientes al modelo constitutivo seleccionado. La pestaña *Interfaces* contiene los parámetros que relacionan las propiedades de las interfaces con las propiedades del suelo.

4.9 MODELOS CONSTITUTIVOS

El comportamiento mecánico de los materiales puede ser modelado con diversos grados de precisión. La ley de Hooke para elasticidad isotrópica y lineal, por ejemplo, puede ser considerada como la más simple relación disponible entre esfuerzo y deformaciones. Ya que incluye únicamente dos parámetros de entrada, el módulo de Young, E , y a rata de poisson, ν , es generalmente muy superficial para capturar características esenciales.

Sin embargo, para modelar elementos estructurales y formaciones de roca, las propiedades elásticas son aplicables.

PLAXIS admite diversos modelos constitutivos para simular el comportamiento del suelo y de otros medios continuos. Algunos de sus modelos y sus parámetros se analizan en detalle. A continuación se cita una breve descripción de los modelos disponibles:

MODELO ELÁSTICO LINEAL

Este modelo representa la ley de Hooke de elasticidad lineal isótropa. El modelo incluye dos parámetros de rigidez elástica, a saber: el módulo de Young, E , y el coeficiente de Poisson, ν . El modelo elástico lineal tiene muchas limitaciones en relación a la simulación del comportamiento de los suelos. Se utiliza fundamentalmente para capas rígidas de suelo.

MODELO DE MOHR-COULOMB

Este bien conocido modelo se utiliza como una primera aproximación al comportamiento del suelo en general. El modelo incluye cinco parámetros, a saber: el módulo de Young, E , el coeficiente de Poisson, ν , la cohesión, c , el ángulo de fricción, ϕ , y el ángulo de dilatación, ψ .

MODELO PARA ROCA FRACTURADA (JOINTED ROCK MODEL)

Se trata de un modelo elástico-plástico anisótropo en que la rotura por acción de las tensiones tangenciales sólo puede producirse en un número limitado de direcciones de deslizamiento. Este modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento de roca estratificada o fracturada.

MODELO DE SUELO RIGIDIZANTE (HARDENING SOIL MODEL)

Se trata de una variante elastoplástica del modelo hiperbólico, formulado en el marco de la plasticidad de endurecimiento por fricción. Además, el modelo incluye el endurecimiento por compresión para simular la compactación irreversible del suelo bajo una compresión primaria. Este modelo de segundo orden puede ser utilizado para simular el comportamiento de arenas y gravas, así como de tipos de suelo más blandos, como arcillas y sedimentos.

MODELO PARA SUELO BLANDO (SOFT SOIL MODEL)

Se trata de un modelo tipo CamClay que puede ser utilizado para simular el comportamiento de suelos blandos como arcillas normalmente consolidadas y turbas. El modelo proporciona buenos resultados en las situaciones de compresión primaria.

MODELO DE SUELO BLANDO CON FLUENCIA (SOFT SOIL CREEP MODEL)

Es éste un modelo de segundo orden formulado en el marco de la viscoplasticidad. El modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento dependiente del tiempo de suelos blandos tales como arcillas normalmente consolidadas y turbas.

4.9.1 MODELO DE MOHR- COULOMB (CM)

El modelo de Mohr-Coulomb involucra cinco parámetros de entrada, E y ν para elasticidad del suelo, ϕ y c , para plasticidad del suelo, y ψ como ángulo de dilatación. Este modelo representa una aproximación de "primer orden" al comportamiento de suelos y rocas. Se recomienda usar este modelo como una primera etapa del análisis de un problema particular.

Para cada etapa estima una rigidez promedio constante. Debido a esta rigidez constante, los cálculos tienden a ser muy rápidos y se obtienen una primera impresión de las deformaciones posibles. Además de los cinco parámetros mencionados, las

condiciones iniciales del problema juegan un papel crucial en los problemas de deformación.

Dado que los ingenieros geotécnicos están por lo general familiarizados con los cinco parámetros mencionados y raramente disponen de ningún otro dato acerca de otros parámetros del suelo, la atención se centrará aquí en este modelo básico de suelo.

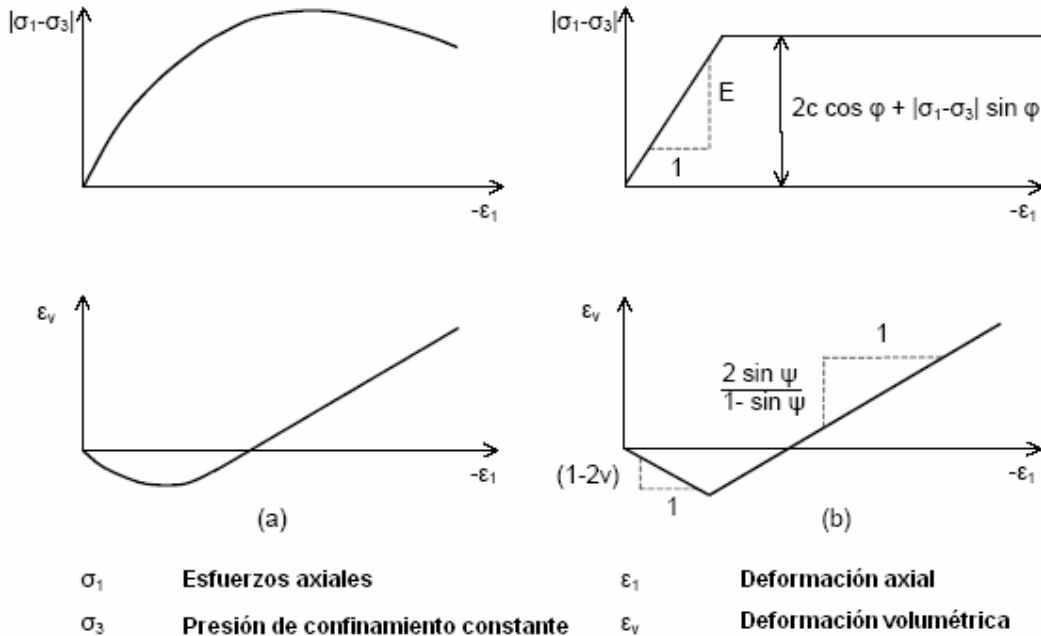


Figura 4-11². Resultados de ensayos triaxiales drenados estándar (a) y modelo elástico-plástico (b)

4.9.1.1 RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DEL MODELO BÁSICO Y EL COMPORTAMIENTO REAL DEL SUELO

Para comprender los cinco parámetros del modelo básico, se consideran las curvas típicas tensión-deformación tal como se obtienen de los ensayos triaxiales drenados estándar (Figura 4-11). El material ha sido comprimido de forma isótropa hasta alcanzar una tensión media σ_3 . Después de esto, se incrementa la tensión axial σ_1 mientras se mantiene constante la tensión radial. En esta segunda fase de la carga, los geomateriales tienden a producir curvas tales como las que se muestran en la Figura 4-11a.

El incremento del volumen (o de la deformación volumétrica) es típico de las arenas y se observa también con frecuencia en las rocas. En la Figura 4-11b se muestran la idealización del ensayo que corresponde al modelo Mohr-Coulomb. La figura da una indicación del significado y de la influencia de los cinco parámetros del modelo básico. Téngase en cuenta que se necesita el ángulo de dilatación ψ para modelizar el incremento irreversible de volumen.

² Fuente: "PLAXIS Manual de referencia". Pág 38.

COMPORTAMIENTO ELÁSTICO – PERFECTAMENTE PLÁSTICO

El principio básico de la elastoplasticidad es que la rata de deformaciones y esfuerzos son descompuestas en una parte elástica y una parte plástica

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^p \quad \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p \quad (1)$$

La ley de Hooke se usa para relacionar las ratas de esfuerzos con las ratas de deformaciones elásticas. De la sustitución de la ecuación (1) en la ley de Hooke se obtiene:

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}'}} = \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e = \underline{\underline{D}}^e (\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} - \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p) \quad (2)$$

De acuerdo con la teoría clásica de plasticidad (Hill, 1950), las ratas de deformaciones plásticas son proporcionales a la derivada de la función de producción con respecto a los esfuerzos. Esto significa que las ratas de deformación plástica pueden ser representadas como vectores perpendiculares a esta superficie.

Esta forma clásica de la teoría es conocida como “plasticidad asociada”. Sin embargo, para funciones de producción tipo Mohr-Coulomb, la teoría de plasticidad asociada lleva una sobrepredicción de la dilatación. Es por eso que en adición a la función *f* de producción, se incluye una función de potencial plástico *g*. En general, las ratas de deformación plásticas se escriben como:

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}'}} \quad (3)$$

En la cual λ es el multiplicador plástico. Para comportamientos puramente elásticos λ es igual a cero, mientras que en el caso de comportamiento plástico este multiplicador tiene un valor positivo.

$$(4a) \quad \lambda = 0 \text{ para } f < 0 \text{ o: } \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\underline{\sigma}'}} \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} \leq 0 \text{ Elasticidad}$$

$$(4b) \quad \lambda > 0 \text{ para } f = 0 \text{ y: } \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\underline{\sigma}'}} \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} > 0 \text{ Plasticidad}$$

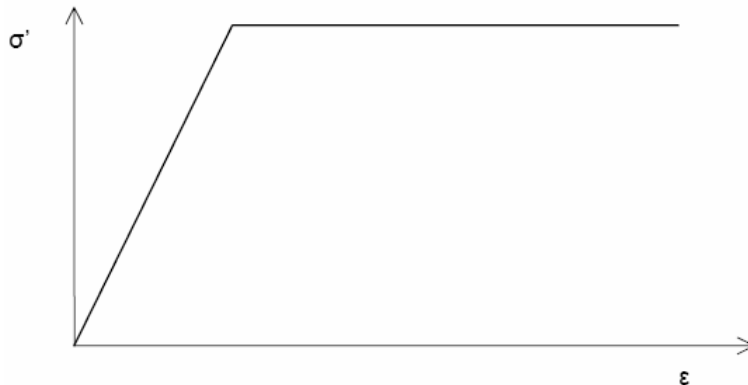


Figura 4-12. Idea básica de un modelo elástico perfectamente plástico

Estas ecuaciones pueden ser usadas para obtener la siguiente relación entre las tasas de esfuerzos efectivos y de deformaciones para la condición de elastoplasticidad (Smith y Griffith, 1982; Vermeer y Deborst, 1984)

$$\dot{\underline{\sigma}}' = \left(\underline{\underline{D}}^e - \frac{\alpha}{d} \underline{\underline{D}}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \frac{\partial f^I}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{\underline{D}}^e \right) \dot{\underline{\varepsilon}} \quad (5)$$

Donde:

$$d = \frac{\partial f^I}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{\underline{D}}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad (6)$$

El parámetro α se usa como un "interruptor". Si el comportamiento del material es elástico como fue definido en la ecuación (4a), el valor de α es igual a cero; mientras que para plasticidad, la ecuación (4b), este valor es igual a la unidad.

La anterior teoría de plasticidad se restringe a superficies de producción suaves y no cubre un contorno de múltiples superficies en la teoría de Mohr-Coulomb.

4.9.1.2 FORMULACIÓN DEL MODELO DE MOHR- COULOMB

La condición de producción de Mohr – Coulomb es una extensión de la ley de Coulomb de fricción para los estados generales de esfuerzo. De hecho, esta condición asegura que la ley de fricción de Coulomb se aplique en cualquier plano dentro de un elemento material. La condición completa de Mohr – Coulomb puede ser definida por seis funciones de producción cuando es formulada en términos de esfuerzos principales (Smith y Griffith, 1982):

$$\begin{aligned} f_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \\ f_{1b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \\ f_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \\ f_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \\ f_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \\ f_{3b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

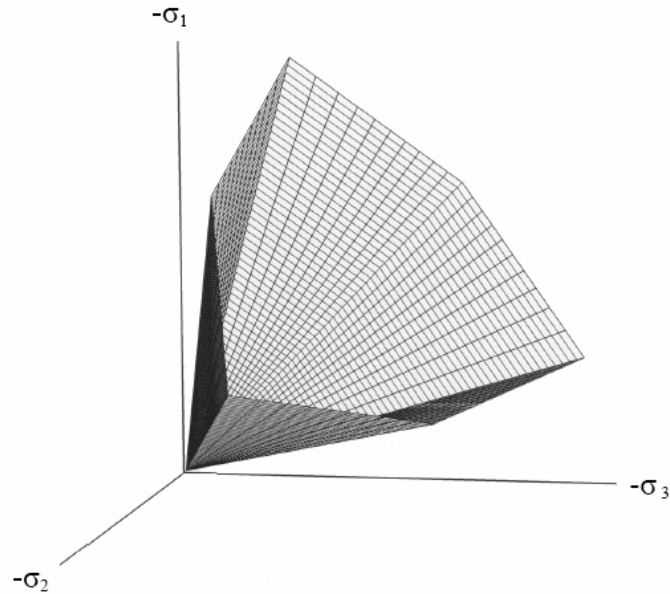


Figura 4-13. Superficie de producción de Mohr-Coulomb

Los dos parámetros del modelo plástico que aparecen en las funciones son el ángulo de fricción y la cohesión. Estas funciones representan un cono hexagonal en el espacio del esfuerzo principal, tal como se muestra en la figura 4-13.

En adición a estas funciones se incluyen seis más llamadas funciones de potencial plástico:

$$\begin{aligned}
 g_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\sin\psi \\
 g_{1b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2)\sin\psi \\
 g_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin\psi \\
 g_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin\psi \\
 g_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\sin\psi \\
 g_{3b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\sin\psi
 \end{aligned} \tag{8}$$

Las funciones de potencial plástico contienen un tercer parámetro de plasticidad, el ángulo de dilatación. Este parámetro es requerido para modelar incrementos positivos volumétricos (dilatación) como se puede observar en suelos densos. Cuando se implementa los modelos de Mohr-Coulomb para estados generales de esfuerzos, se requiere un tratamiento especial para la intersección de dos superficies de producción. Algunos softwares disponibles en el mercado usan una transición suave de una superficie a otra (Smith y Griffith, 1982). Este tratamiento de las intersecciones se encuentra en la literatura común (Koiter, 1960; van Langen & Vermeer, 1990).

Para $C > 0$, el criterio estándar de Mohr-Coulomb permite analizar tensión. De hecho, los esfuerzos tensiles admisibles aumentan con la cohesión. En realidad, el suelo puede sostener bajos valores de esfuerzos a tensión.

4.9.1.3 PARÁMETROS BÁSICOS DEL MODELO DE MOHR – COULOMB (PLASTICIDAD PERFECTA)

El modelo de Mohr-Coulomb requiere un total de cinco parámetros, los cuales son muy familiares en el ámbito de la geotecnia, a la vez que son de fácil obtención por medio de examen de laboratorios básicos. Estos parámetros aparecen a continuación con sus respectivas unidades.

Tabla 2: Parámetros básicos del análisis de Mohr - Coulomb

PARAMETROS	SIMBOLO	UNIDADES
<i>Cohesión</i>	<i>C</i>	<i>KN/m²</i>
<i>Rata de Poisson</i>	<i>v</i>	-
<i>Ángulo de fricción</i>	<i>φ</i>	<i>° (grados)</i>
<i>Modulo de young</i>	<i>E</i>	<i>KN/m²</i>
<i>Ángulo de dilatación</i>	<i>ψ</i>	<i>° (grados)</i>

EL MODULO DE YOUNG

Representa el módulo básico de rigidez en un modelo elástico, este tiene las unidades de esfuerzo. Los valores del parámetro de rigidez adoptados en un cálculo requieren especial atención, por cuanto existen muchos geomateriales que no presentan un comportamiento lineal desde el momento del inicio de la carga.

En la mecánica de suelos, la pendiente inicial de la gráfica de rigidez de un suelo obtenida en un ensayo triaxial drenado se denomina E_0 , y el módulo secante al 50% de la fuerza se denota como E_{50} . Para materiales con un rango lineal elástico es adecuado usar el parámetro E_0 , pero para suelos en proceso de carga se recomienda emplear E_{50} . Al considerar el evento de descarga, como en excavaciones y túneles, se usa el parámetro E_{un} .

Para suelos, tanto el módulo de descarga E_{un} y el de carga primaria, E_{50} , tienden a incrementar con la presión de confinamiento. Por ende, estratos profundos de suelo tienden a presentar una mayor rigidez que capas superficiales. Aún más, la rigidez observada depende de la trayectoria del esfuerzo. La rigidez es mucho mayor para descarga y recarga que para carga primaria. También, la rigidez observada en términos del módulo de young puede ser menor para cargas de compresión que para cargas de cortantes.

Es importante definir el módulo de young dependiendo del problema a analizar, de la trayectoria del esfuerzo y el tipo de carga.

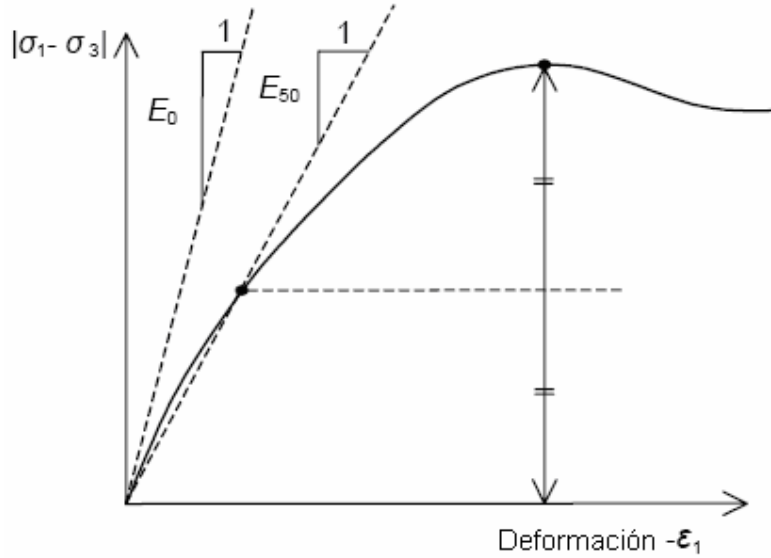


Figura 4-14. Definición de E_{50} y E_0 para resultados de ensayos triaxiales

COHESIÓN

La fuerza cohesiva tiene unidades de esfuerzo. Es importante observar que para muchos análisis en suelos granulares se usa un valor de cohesión igual a cero. Sin embargo es casi imposible encontrar un estrato cuya granulometría sea constituida enteramente por material friccionante limpio; por eso se recomienda si el estrato es poco fino, introducir un pequeño valor de cohesión, con el objeto de tener en cuenta la acción cohesiva de los diferenciales de tamaño en las partículas.

ÁNGULO DE FRICCIÓN

Este parámetro se introduce en grados. Ángulos de fricción altos, típicos de arenas densas, aumentarán sustancialmente el esfuerzo computacional; debido a que el tiempo de cálculo empleando un ordenador aumenta exponencialmente con el ángulo de fricción.

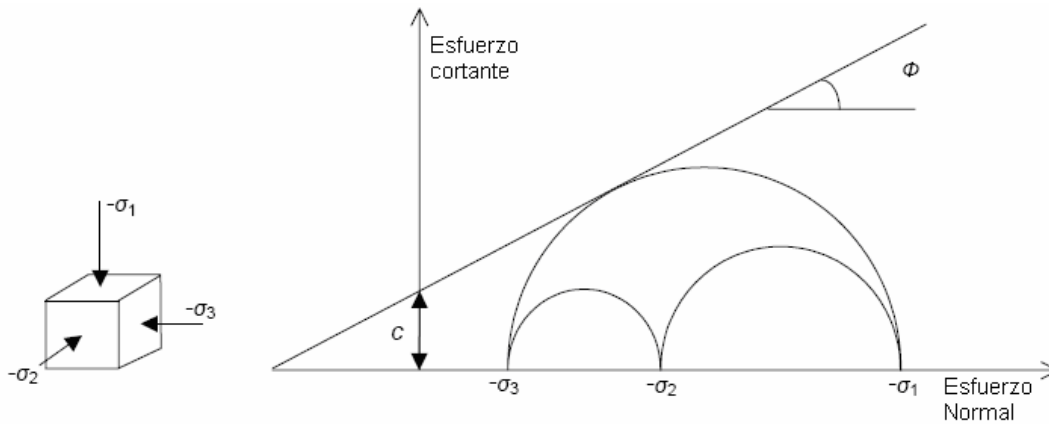


Figura 4-15. Condiciones de cohesión y ángulo de fricción

El ángulo de fricción determina la fuerza cortante, como lo muestra la figura 4-15 por medio de círculos de Mohr.

ÁNGULO DE DILATANCIA

Este otro parámetro introducido en grados. Aparte de estratos de suelo sobreconsolidados, suelos arcillosos tienden a mostrar una pequeña dilatancia. Este parámetro en arenas depende de tanto la densidad y del ángulo de fricción de la misma.

Para arenas cuarzosas, el ángulo de dilatancia se encuentra en el orden de $\psi \approx \varphi - 30^\circ$. Para valores de fricción iguales o menores a 30° , la dilatancia es cero. En arenas extremadamente sueltas, este ángulo presenta un valor negativo pequeño (Bolto, 1986).

RATA DE POISSON

Ensayos triaxiales drenados pueden arrojar una rata significativa de decrecimiento de volumen al principio de la imposición de la carga axial, y consecuentemente, un valor inicial bajo de la rata de Poisson.

4.9.2 MODELO DEL SUELO RIGIDIZANTE

Este modelo representa un estado más avanzado que el modelo de Mohr-Coulomb. Para Mohr-Coulomb, los estados de esfuerzo dependen del ángulo de fricción, la cohesión y el ángulo de dilatancia.

La rigidez del suelo es descrita mas apropiadamente usando tres rigideces diferentes: la de carga triaxial, E_{50} , la rigidez de descarga triaxial, E_{ur} , la rigidez de carga del oedómetro, E_{eod} .

Como valores promedio para diversos tipos de suelo, se tiene $E_{ur} \approx 3E_{50}$ y $E_{50} \approx E_{eod}$, aun cuando suelos muy duros y otro muy suaves tienden a presentar otras relaciones de E_{eod} / E_{50} .

En contraste con el modelo de Mohr-Coulomb, el modelo de suelo con endurecimiento presenta una dependencia al esfuerzo del modulo de rigidez. Esto significa que todas las rigideces aumentan con la presión.

En contraste con el modelo de Mohr-Coulomb, las superficie de producción de un modelo de suelo rigidizante no se limita en el espacio del esfuerzo principal, pero puede expandirse debido a deformaciones plásticas.

Se puede hacer una distinción entre dos tipos de rigidización: de cortante y de compresión.

La rigidización cortante es usada para modelar deformaciones plásticas irreversibles debido a la compresión primaria, con carga de eodómetro e isotrópicas. Este modelo es recomendable para modelar el comportamiento de suelos tanto blandos como duros, Schanz (1998). Cuando se somete el suelo a una carga primaria desviatoria, el suelo muestra un valor decreciente de rigidez y simultáneamente se desarrollan deformaciones plásticas. En el caso especial de un ensayo triaxial drenado, la relación observada entre la deformación axial y el esfuerzo desviador puede ser aproximado por una hipérbola. Tal relación fue formulada por Kondner (1963) y después por Duncan y Chang (1970).

El modelo rigidizante, sin embargo, mejora el modelo de la hipérbola, por cuanto usa la teoría de plasticidad en lugar de la elástica e incluye la dilatancia del suelo.

Algunas características del modelo son citadas a continuación:

- La rigidez depende del esfuerzo de acuerdo a una ley de energía.
- Ocurren deformaciones plásticas debido a las cargas primarias desviatorias.
- Ocurren deformaciones plásticas debido a compresión primaria.
- Las descargas y recargas tienen un comportamiento elástico.
- Las fallas son consideradas de acuerdo a los criterios de Mohr-Coulomb.

4.9.2.1 PARÁMETROS DEL MODELO DE SUELO RIGIDIZANTE

Algunos parámetros de este modelo coinciden con el de Mohr-Coulomb. Estos son los cohesión, el ángulo de fricción y de dilatación.

Parámetros de 4l modelo de Mohr-Coulomb.

C : cohesión en KN/m^2 .

φ : Ángulo de fricción en grados.

ψ : Ángulo de dilatación en grados.

Parámetros básicos para la rigidez del suelo.

E_{50}^{ref} : Rigidez secante en ensayo triaxial drenado en KN/m^2 .

E_{oed}^{ref} : Rigidez tangente para carga de oedometro primaria en KN/m^2 .

m : Potencia para dependencia de la rigidez.

Parámetros avanzados.

E_{ur}^{ref} : Rigidez de descarga y recarga en KN/m^2 .

ν_{ur} : Rata de Poisson para carga y descarga.

p^{ref} : Esfuerzo de referencia para rigideces en KN/m^2 .

4.9.2.2 MODULO DE RIGIDEZ E_{50}^{ref} Y E_{oed}^{ref} Y POTENCIA m

La ventaja del modelo de suelo rigidizante sobre el de Mohr-Coulomb es no únicamente el uso de una curva hiperbólica para la relación de esfuerzo-deformación, en lugar de una curva bilineal, pero también el control de la dependencia del nivel de esfuerzos. Cuando se usa el modelo de Mohr-Coulomb, el ingeniero debe escoger un valor fijo del módulo de Young, cuando en suelos reales, esta rigidez depende del nivel de los esfuerzos actuantes. Es entonces necesario estimar estos niveles de esfuerzos dentro del suelo y usarlos para obtener valores lógicos de rigidez.

Dentro de la teoría elástica de Hook, la conversión de E y G sigue la ecuación

$E = 2(1+\nu)G$. Como E_{ur} es la rigidez elástica real, se puede escribir $E_{ur} = 2(1+\nu)G_{ur}$. Donde G_{ur} es un módulo elástico cortante.

En contraste con los modelos basados en el concepto de elasticidad, el modelo elasto-plástico de rigidización de suelo no involucra una relación fija entre la rigidez triaxial E_{50} y la rigidez de oedometro E_{oed} para compresión unidimensional; esta rigidez puede ser ingresada independientemente.

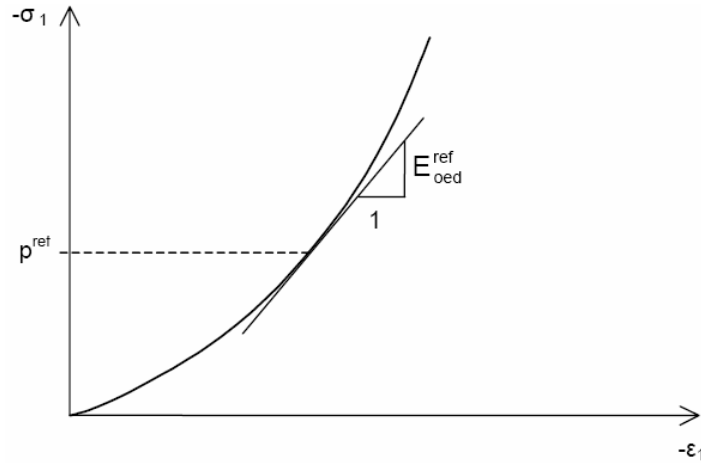


Figura 4-16. Definición de los parámetros de rigidez con ensayos de oedométricos.

Es importante definir ahora la rigidez de oedométrico:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (9)$$

Donde E_{oed} es un módulo tangente de rigidez indicado en la Figura 4-16.

4.10 ASIGNACIÓN DE CONJUNTOS DE DATOS A LOS COMPONENTES DE LA GEOMETRÍA

Después de la creación de todos los conjuntos de datos de los materiales para las diversas capas de suelo y estructuras se les deberá asignar a los componentes correspondientes. Esto puede llevarse a cabo de diferentes maneras. El primer método se basa en la apertura de una ventana de conjuntos de datos de materiales en la que se muestran los diferentes conjuntos. El conjunto de datos deseado puede ser arrastrado (seleccionándolo y manteniendo pulsado el botón izquierdo del ratón) hasta la zona de dibujo y dejado sobre el componente deseado. Puede verse por la forma del cursor si el punto escogido para dejar el conjunto de datos es válido o no. Téngase en cuenta que los conjuntos de datos de materiales no pueden ser arrastrados directamente desde la lista de conjuntos de datos de la base de datos global. El segundo método consiste en hacer doble clic sobre el componente que se desea.

Como resultado de ello, aparece la ventana de propiedades en la que se muestra el conjunto de datos correspondiente a ese componente. Si no se ha asignado un conjunto de datos a ese componente aparece en el recuadro del conjunto de datos correspondiente la indicación <Unassigned> (No asignado). Al hacer clic en el botón de *Change* aparece la ventana de los conjuntos de datos de materiales desde la cual se puede seleccionar el conjunto requerido. El conjunto de datos deseado puede ser arrastrado desde la lista de conjuntos de datos de la base de datos del proyecto y dejado en la ventana de propiedades. Alternativamente, después de la selección del conjunto de datos requerido, se le puede asignar al componente geométrico seleccionado haciendo clic en el botón de *Apply* de la ventana de conjuntos de datos de materiales. En este caso, la ventana de los conjuntos de datos permanece abierta. Cuando en vez de ello se hace clic en el botón de *OK*, el conjunto de datos es

también asignado al componente geométrico seleccionado y la ventana de los conjuntos de datos se cierra a continuación.

El tercer método consiste en desplazar el cursor hasta un componente geométrico y hacer clic con el botón derecho del ratón. A través del menú del cursor (*properties*) se puede seleccionar el componente geométrico deseado. Como resultado aparece la ventana de propiedades. A partir de aquí, el proceso de selección del conjunto de datos apropiado es el mismo que para el segundo método.

Después de la asignación de un conjunto de datos de material a un dominio de suelo, el dominio adquiere el color del correspondiente conjunto de datos. Por defecto, los colores de los conjuntos de datos tienen una intensidad baja. Para aumentar la intensidad de los colores de todos los conjuntos de datos, el usuario puede pulsar <Ctrl><Alt><C> simultáneamente en el teclado. Hay tres niveles de intensidad del color que pueden ser seleccionados de esta manera. Cuando los conjuntos de datos son asignados a objetos estructurales, dichos objetos parpadearán en rojo durante aproximadamente medio segundo para confirmar la correcta asignación del conjunto de datos.

4.11 GENERACIÓN DE LA MALLA



Una vez el modelo geométrico está completamente definido y las propiedades de los materiales han sido asignadas a todos los dominios y objetos estructurales, la geometría ha de ser dividida en elementos finitos con el fin de llevar a cabo los consiguientes cálculos. Una descomposición del dominio del problema en elementos finitos se denomina malla. El tipo básico de elemento de una malla es el elemento triangular de 15 nodos o el elemento triangular de 6 nodos. PLAXIS dispone de un generador de malla totalmente automático. Este generador es una versión especial del generador de mallas Triangle desarrollado por Sepra³. La generación de la malla se basa en un robusto procedimiento de triangulación, el cual da como resultado mallas 'no estructuradas'. Estas mallas pueden parecer desordenadas, pero su rendimiento numérico es por lo general mejor que el de las mallas regulares (estructuradas).

La generación de la malla se inicia haciendo clic en el botón de generación de mallas de la barra de herramientas o bien seleccionando la opción de Generar (*Generate*) en el submenú de Mallas (*Mesh*). La generación se activa también directamente después de la selección de una opción de refinamiento en el submenú *Mesh*.

Después de la generación de la malla se activa el programa de Resultados (*Output*) y se muestra la malla. Aun cuando los elementos de interfaz tienen un espesor cero, los interfaces de la malla están dibujados con un cierto espesor para poner de manifiesto las conexiones entre elementos de suelo e interfaces.

Este gráfico se denomina *de conectividad (Connectivity plot)* y está también disponible como opción para la visualización de resultados. El factor de escala puede ser utilizado para reducir el espesor gráfico de las interfaces. Para regresar al programa de Introducción (*Input*) debe pulsarse el botón de *Update*.

³ Fuente: Ingenieursbureau Sepra, Park Nabij 3, 2267 AX Leidschendam (NL)

4.11.1 PRÁCTICAS ACONSEJABLES PARA LA GENERACIÓN DE MALLAS

Para llevar a cabo un cálculo eficiente mediante elementos finitos puede realizarse un análisis preliminar utilizando una malla relativamente gruesa. Este análisis puede usarse para comprobar si el modelo es lo suficientemente ajustado a las dimensiones de los lugares en los que se producen concentraciones de tensiones y grandes gradientes de deformación. Esta información deberá ser utilizada para la creación de un modelo de elementos finitos refinado.

Para crear de manera eficiente una malla de elementos finitos optimizada, se deberá seleccionar en primer lugar el grado de refinamiento global (*Global coarseness*) requerido en el submenú *Mesh*. Además, cuando se desee un refinamiento local se deberá empezar por el refinamiento de los dominios y después efectuar el de las líneas y finalmente el de los puntos. Si se desea, se puede dar a los puntos un factor local directo de tamaño de los elementos.

4.12 CONDICIONES INICIALES

Una vez se ha creado el modelo geométrico y se ha generado la malla de elementos finitos, deben especificarse el estado tensional y la configuración inicial. Esto puede hacerse en el módulo dedicado a la imposición de las condiciones iniciales del programa de introducción de datos. Este módulo se divide en dos partes: un submódulo para la generación de las presiones iniciales del agua (módulo de condiciones iniciales referentes al flujo) y un submódulo para la especificación de la configuración inicial de la geometría y la generación del campo de tensiones efectivas iniciales (módulo de configuración de la geometría).



El paso de uno a otro de esos módulos se efectúa por medio del 'conmutador' de la barra de herramientas. El módulo de las condiciones iniciales permite regresar al módulo de creación de la geometría, pero esto no deberá por lo general hacerse, ya que parte de la información referente a las condiciones iniciales se perderá.

4.13 NIVELES FREÁTICOS



Las presiones intersticiales y las presiones externas del agua pueden ser generadas a partir de la fijación de unos niveles freáticos. Un nivel freático representa una serie de puntos en los que la presión del agua es exactamente cero (la atmosférica). Utilizando la introducción de un nivel freático, la presión del agua se incrementará de forma lineal con la profundidad de acuerdo con el peso del agua especificado (es decir, se supone que la variación de la presión es hidrostática). Antes de introducir un nivel freático, el usuario debe introducir el peso correcto del agua. La opción para la introducción de niveles freáticos puede ser seleccionada en el submenú *Geometry* o bien haciendo clic en el correspondiente icono de la barra de herramientas.

La introducción de un nivel freático es similar a la creación de una línea geométrica. Los niveles freáticos son definidos por medio de dos o más puntos.

La generación de las presiones del agua se lleva a cabo de hecho cuando se selecciona la opción de *Generate water pressures*.

4.14 GENERACIÓN DE PRESIONES DE AGUA



Después de la introducción de niveles freáticos o de la introducción de condiciones de contorno para un cálculo de flujo, se pueden generar las presiones de agua. Esto se puede llevar a cabo haciendo clic en el botón de *Generate water pressures* (cruces azules) de la barra de herramientas o seleccionando la opción *Water pressures* en el submenú *Generate*. Como resultado de ello, aparece una ventana en la que se puede especificar si las presiones del agua deberán ser generadas a partir de los niveles freáticos o por medio del cálculo del flujo. La primera opción es rápida y directa mientras que la última (cálculo del flujo) puede ser más realista pero requiere más parámetros de entrada y exige un tiempo mayor.

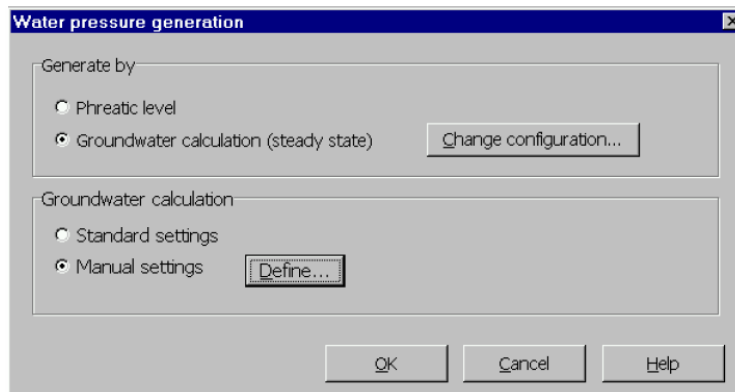


Figura 4-17. Ventana de la generación de las presiones de agua.

4.15 CONFIGURACIÓN DE LA GEOMETRÍA INICIAL



Para pasar del módulo de las condiciones referentes al flujo al módulo de configuración de la geometría, basta con hacer clic en el lado derecho del 'conmutador' de la barra de herramientas.

El módulo de configuración de la geometría se utiliza, entre otras cosas, para definir la configuración de la geometría inicial y permite des-seleccionar los dominios geométricos que no son activos en la situación inicial. Además, pueden ser generadas las tensiones efectivas iniciales utilizando el procedimiento K_0 (K_0 -procedure).

4.15.1 DESACTIVACIÓN DE CARGAS Y OBJETOS GEOMÉTRICOS

En proyectos en los que haya que construir terraplenes o estructuras, el modelo geométrico contendrá algunos componentes (tales como cargas, placas, geotextiles, anclajes, interfaces o dominios de suelo por encima de la superficie inicial del terreno) que son inicialmente inactivos. Los dominios de suelo por encima de la superficie inicial del terreno deben ser desactivados por el usuario.

PLAXIS desactivará automáticamente todas las cargas y objetos estructurales de la configuración inicial de la geometría dado que, en general, dichos objetos han de ser aplicados en una fase posterior y no están presentes en la situación inicial. Téngase en cuenta que el procedimiento K_0 para la generación de tensiones iniciales no toma en consideración las cargas externas ni pesos externos de elementos estructurales.

La activación o la desactivación de componentes geométricos puede ser efectuada simplemente haciendo clic sobre el componente en el modelo geométrico. Téngase en cuenta que, en contraste con versiones anteriores de PLAXIS, las interfaces pueden también ser activadas o desactivadas de forma individual.

4.15.2 GENERACIÓN DE ESFUERZOS INICIALES (PROCEDIMIENTO K0)



Los esfuerzos iniciales en una capa de suelo están influenciados por el peso del material y por su historia previa. Este estado tensional viene usualmente caracterizado por un esfuerzo efectivo vertical $\sigma'_{v,0}$. El esfuerzo efectivo horizontal inicial $\sigma'_{h,0}$, está relacionada con el esfuerzo efectivo vertical inicial por medio del coeficiente de empuje al reposo, K_0 . ($\sigma'_{h,0} = K_0 \sigma'_{v,0}$).

En PLAXIS se pueden generar esfuerzos iniciales especificando K_0 o bien utilizando la Carga de gravedad (*Gravity loading*).

La generación de tensiones iniciales basada en el procedimiento K_0 puede ser seleccionada haciendo clic en el botón de *Generate initial stresses* (cruces rojas) de la barra de herramientas o bien seleccionado *Initial stresses* en el submenú *Generate*. Como resultado de ello, aparece una ventana con una tabla en la que, junto con otros varios parámetros, se pueden introducir los valores de K_0 de cada dominio (Figura 4-18). El significado de esos parámetros es el que a continuación se describe.

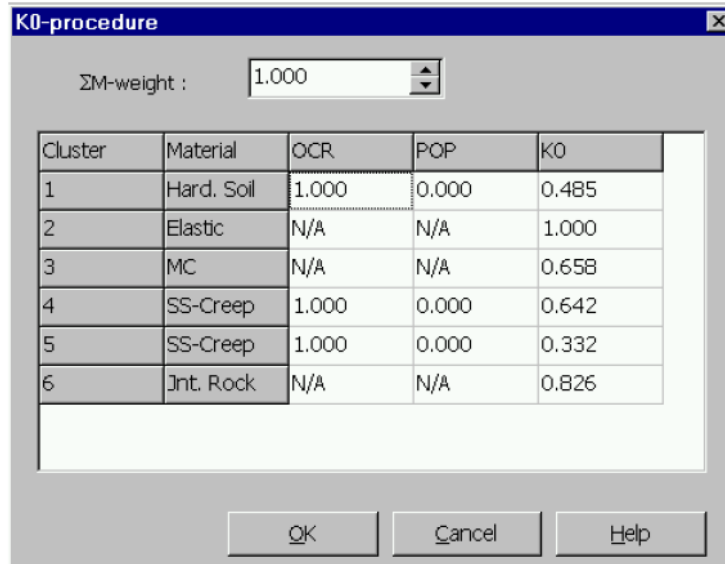


Figura 4-18. Ventana de generación de tensiones iniciales (Procedimiento K0)

ΣMweight: Antes de introducir los valores en la tabla, se deberá dar un valor para el parámetro $\Sigma Mweight$. Este parámetro representa la proporción de la gravedad que se aplica. En general, se puede aceptar el valor por defecto de 1,0, lo cual implica que se activa el peso total del suelo. Para poner a cero las tensiones iniciales generadas con anterioridad, se deberá poner a cero $\Sigma Mweight$ y se deben volver a generar las tensiones iniciales.

Dominio (Cluster): En la primera columna aparece el número del dominio. Cuando se introduce un valor en la tabla, el dominio correspondiente aparece indicado en la ventana principal en el fondo (con rayado cruzado de color rojo). Si es necesario, se

puede desplazar a otra posición la ventana de generación de las tensiones iniciales para poder ver el dominio indicado.

Modelo (Model): En la segunda columna se muestra el modelo de material que se utiliza en el dominio en particular (Elastic = Modelo elástico; MC = Modelo de Mohr-Coulomb; Hard Soil = Modelo de Suelo con Endurecimiento; SS = Modelo de Suelo Blando; SS-Creep = Modelo de Suelo Blando con fluencia; Jnt.Rock = Modelo de Roca Fracturada.

OCR y POP: La tercera y la cuarta columnas se utilizan para la introducción de un grado de sobreconsolidación (OCR) o de una presión de preconsolidación (POP). Uno u otro de dichos valores se utiliza para generar las tensiones de preconsolidación cuando se trabaja con el modelo de Suelo Blando con fluencia y/o el modelo de Suelo con Endurecimiento. Cuando se utilizan otros modelos de material, la introducción de OCR y de POP no es aplicable.

K_0 : La quinta columna se utiliza para introducir el valor de K_0 para cada dominio de manera individual. El valor por defecto de K_0 está basado en la fórmula de Jaky ($1 - \sin\phi$), pero este valor puede ser reemplazado por el usuario.

La introducción de un valor negativo para K_0 restaurará el valor por defecto. Debe ponerse mucho cuidado con los valores muy bajos o muy altos de K_0 , dado que dichos valores pueden causar plasticidad inicial. Al pulsar el botón de OK da comienzo la generación de las tensiones iniciales.

El procedimiento K_0 considera solamente el peso del suelo y calcula sólo tensiones efectivas y presiones intersticiales en elementos de suelo e interfaces.

Las cargas externas y el peso de los elementos estructurales no son tenidos en cuenta. La activación de cargas y de objetos estructurales en la configuración inicial no tiene, por lo tanto, ningún efecto.

RESULTADOS DE LA GENERACIÓN DE LOS ESFUERZOS INICIALES

Después de la generación de esfuerzos iniciales se activa automáticamente el programa de Resultados (Output) y se muestra un gráfico de esfuerzos efectivos iniciales. En general, el esfuerzo inicial en un punto de tensión se sigue del peso del material encima de dicho punto y del valor de $\Sigma Mweight$:

$$\sigma'_{v,0} = \sum Mweight \left(\sum_i \gamma_i \cdot h_i - p_w \right) \quad \sigma'_{h,0} = K_0 \sigma'_{v,0} \quad (10)$$

donde γ_i es el peso unitario de las capas individuales, h_i es la profundidad de la capa y p_w es la presión intersticial inicial en el punto de tensión.

La utilización de valores de K_0 que difieran substancialmente de la unidad, puede a veces dar lugar a un estado de tensiones inicial que viola el criterio de Coulomb. Aun cuando PLAXIS corrige dichos estados de tensión para dar cumplimiento al criterio de Coulomb, el estado de esfuerzos resultante puede ser diferente del esperado. El usuario puede ver fácilmente si se da esta situación inspeccionando el gráfico de Puntos plásticos (*Plastic points*), que puede ser seleccionado en el menú *Stresses* del programa de Resultados (Output). Si este gráfico muestra muchos puntos plásticos rojos (Puntos de Coulomb), el valor de K_0 deberá ser sustituido por uno más cercano a 1.0. Si hay un número pequeño de puntos plásticos es aconsejable llevar a cabo un paso nulo plástico.

Cuando se utiliza el modelo de Suelo con Endurecimiento o el modelo de Suelo Blando y se define un estado de tensiones iniciales correspondiente a una situación de suelo normalmente consolidado ($OCR = 1.0$ y $POP = 0.0$), el gráfico de puntos plásticos muestra muchos puntos de casquete azules. Los usuarios no tienen que preocuparse por dichos puntos plásticos ya que sólo indican un estado de tensiones correspondiente a un suelo normalmente consolidado.

Para retornar al programa de Introducción (Input) después de ver los resultados de la generación de las tensiones iniciales, deberá pulsarse el botón de *Update*.

4.15.3 INICIO DE LOS CÁLCULOS

Con la generación de las tensiones iniciales se completa la generación de la situación inicial del modelo de elementos finitos. Haciendo clic sobre el botón de *Calculate* de la barra de herramientas, aparece un recuadro de diálogo en el que se pide al usuario que guarde los datos. Esto puede hacerse utilizando un nombre de fichero ya existente (pulsar simplemente <Yes>) o bien utilizando un nombre nuevo (pulsar <Save as>).

Esta última opción puede ser utilizada también para la creación de una copia de un modelo generado anteriormente. Como resultado de ello, aparece el gestor de ficheros, en el cual puede especificarse el nombre del fichero. Cuando se haya creado un modelo nuevo que ha sido guardado con anterioridad, debe dársele un nombre de fichero en ambas opciones de guardado. Pulsando el botón de *No*, los datos no serán guardados; como resultado de ello, se perderán todos los datos introducidos después de la anterior acción de guardar.

4.16 CÁLCULOS

Después de la generación de un modelo de elementos finitos puede empezar la fase de cálculo. Por lo tanto, se hace necesario definir qué tipos de cálculos se han de llevar a cabo y qué tipo de cargas o de etapas de construcción se han de activar durante los cálculos. Todo ello puede hacerse dentro del programa de Cálculos (*Calculations*).

PLAXIS permite realizar diferentes tipos de cálculos mediante el método de los elementos finitos. Todo lo que respecta al flujo fue expuesto en el capítulo anterior en referencia al programa de Introducción (*Input*), dado que por lo general se utiliza un cálculo de flujo para generar la distribución de presiones de agua correspondiente al estado inicial en un análisis de deformación. El programa de Cálculo se centra exclusivamente en los análisis de deformación y distingue entre un cálculo plástico (*Plastic*), un análisis de Consolidación (*Consolidation*), un análisis de Seguridad (*Phi-reduction*) y un cálculo Dinámico (*Dynamic*). Esta última opción requiere la presencia del módulo Dynamics de PLAXIS, que se encuentra disponible como una extensión de la Versión 8. Los tres primeros tipos de cálculos (*Plastic*, *Consolidation*, *Phi-reduction*) permiten con carácter opcional resolver el problema dentro del contexto de grandes deformaciones. Esto se denomina Malla actualizada (*Updated mesh*), y se encuentra disponible como opción avanzada.

En la práctica de la ingeniería, los proyectos constan de diferentes fases. De manera similar, un proceso de cálculo de PLAXIS se divide también en fases del cálculo. Son ejemplos de fases de un cálculo la activación de una carga en particular en un determinado momento, la simulación de una etapa de construcción, la introducción de un período de consolidación, el cálculo de un factor de seguridad, etc. Cada fase de

cálculo se divide por lo general en un cierto número de pasos de cálculo. Esto es necesario porque el comportamiento no lineal del suelo requiere que las cargas sean aplicadas en pequeñas proporciones (llamadas pasos de carga). En la mayor parte de los casos, sin embargo, es suficiente especificar la situación que se ha de alcanzar al final de una fase de cálculo. Los procedimientos robustos y automáticos de PLAXIS se ocuparán de la subdivisión en pasos de carga apropiados.

4.16.1 EL PROGRAMA DE CÁLCULOS



Este icono representa el programa de Cálculos (*Calculations*). Este programa contiene todos los dispositivos para definir e iniciar cálculos a realizar mediante el método de los elementos finitos. Al principio del programa de Cálculos, el usuario ha de seleccionar el proyecto para el cual se han de definir los cálculos. La ventana principal del programa de Cálculos contiene los elementos siguientes (Figura 4-19)

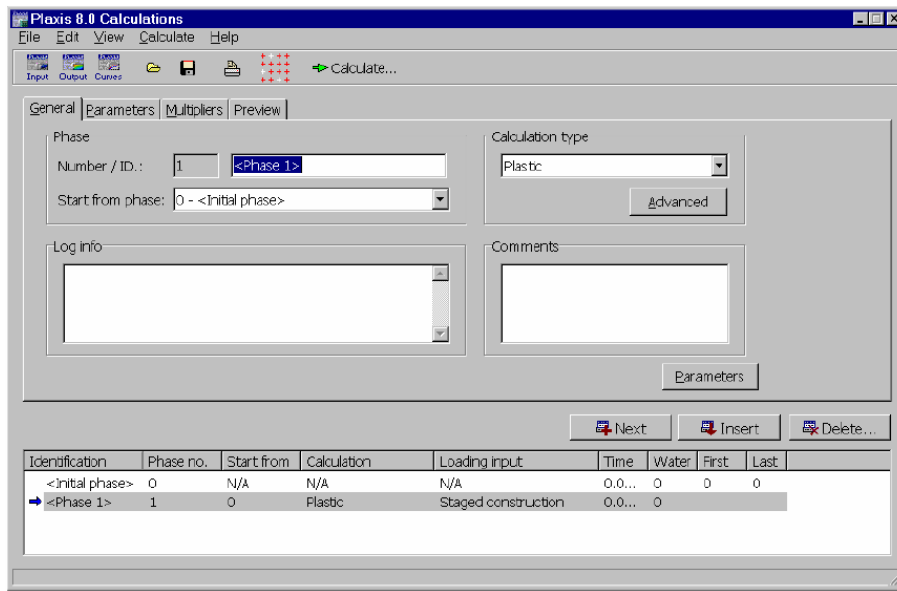


Figura 4-19. Ventana principal del programa de Cálculos (*Calculations*)

El menú de cálculos: El menú de Cálculos contiene todos los dispositivos operativos del programa de Cálculos. La mayor parte de las opciones se encuentran también disponibles bajo la forma de iconos en la barra de herramientas.

La barra de herramientas: La barra de herramientas contiene iconos que pueden ser utilizados para activar de forma rápida los dispositivos del menú. El significado de cada icono en particular aparece indicado cuando se coloca el puntero sobre el icono en cuestión.

Las pestañas (parte superior de la ventana): Las pestañas se utilizan para la definición y la visión previa de una fase del cálculo.

Lista de las fases de cálculo (parte inferior): Esta lista contiene todas las fases de cálculo de un proyecto. Cada línea corresponde a una fase por separado. Para cada una de las fases se muestra la correspondiente cadena de identificación, el número de la fase, un número que hace referencia a la fase desde donde hay que empezar, el tipo de cálculo, el tipo de aplicación de cargas, el intervalo de tiempo, la situación de presiones de agua a utilizar y el número de los pasos primero y último. Si la fase no

ha sido todavía ejecutada no se muestra información sobre los pasos primero y último. Una fase de cálculo que haya sido seleccionada para su ejecución aparecerá indicada por medio de una flecha azul (→) delante de la línea que le corresponda. Las fases de cálculo que hayan concluido satisfactoriamente se marcarán con una señal verde (√), mientras que las fases que no hayan finalizado de manera satisfactoria aparecen marcadas por medio de un aspa roja (×).

4.16.2 EL MENÚ DE CÁLCULOS

El menú principal del programa de Cálculos (*Calculations*) contiene submenús desplegables que incluyen la mayor parte de las opciones para el tratamiento de los ficheros, la definición de las fases de cálculo y la ejecución de los cálculos. El menú de Cálculos está constituido por los submenús *File*, *Edit*, *View*, *Calculate* y *Help*. A continuación se describen algunos de los componentes de cada submenú.

El submenú File:

Work directory: Determina el directorio en el que se han de almacenar los ficheros de proyectos de PLAXIS.

(*recent projects*): Abre de forma rápida uno de los cuatro proyectos más recientes.

El submenú Edit:

Next phase: Permite pasar a la siguiente fase de la lista de cálculos. Si no existe una fase siguiente, añade una nueva fase de cálculo.

Insert phase: Permite insertar una nueva fase de cálculo en la posición de la fase en la que se está.

Delete phase: Borra la fase o fases de cálculo seleccionadas.

Copy to clipboard: Copia la lista de fases de cálculo en la tablilla.

El submenú View:

Calculation manager: Abre la ventana del gestor de cálculos, a partir de la cual se controlan todos los procesos de cálculo activos.

Select points for curves: Permite seleccionar nodos y puntos de tensión para la generación de curvas de carga-desplazamiento y trayectorias de tensión.

El submenú Calculate:

Current project: Inicia el proceso de cálculo del proyecto actual.

Multiple projects: Permite seleccionar el proyecto cuyo proceso de cálculo quiere ser iniciado. Aparece el gestor de ficheros. Después de la selección de un proyecto, éste es añadido a la ventana del gestor de cálculos.

4.16.3 DEFINICIÓN DE UNA FASE DE CÁLCULO

Consideremos un proyecto nuevo para el que no se ha definido ninguna fase de cálculo. En este caso, la lista de cálculos contiene sólo una línea, indicada como Fase inicial (*Initial phase*) con el número de fase 0. Esta línea representa la situación inicial del proyecto tal como se ha definido en el módulo de las condiciones iniciales del programa de Introducción (*Input*). La fase inicial es el punto de partida para los cálculos subsiguientes. Para introducir la primera fase de cálculo del proyecto actual, deberá pulsarse el botón de *Next* que está justo encima de la lista de cálculos,

después de lo cual aparecerá una nueva línea. Alternativamente, se puede proceder a la selección de la opción de *Next phase* en el menú *Edit*. Cuando se ha iniciado el programa de Cálculos (*Calculations*) haciendo clic en el botón de *Calculate* del módulo de condiciones iniciales del programa de Introducción (*Input*), se introduce de forma automática una primera fase de cálculo sin definir.

Después de la introducción de la nueva fase de cálculo, ésta ha de ser definida. Esto deberá ser llevado a cabo utilizando las pestañas *General*, *Parameters* y *Multipliers* de la parte superior de la ventana principal. Pulsando la tecla de *Enter* o la de *Tab* después de introducir cada nuevo parámetro, el usuario será guiado a través de todos ellos. La mayor parte de los parámetros tienen un valor por defecto, lo cual simplifica la introducción. En general, sólo hay que tener en cuenta algunos de los parámetros para definir una fase de cálculo. En las siguientes secciones se facilitan más detalles acerca de los diferentes parámetros.

Cuando se han establecido todos los parámetros, el usuario puede elegir entre definir otra fase de cálculo o dar inicio al proceso de cálculo. La introducción y la definición de otra fase de cálculo puede hacerse como se ha descrito anteriormente. Puede darse inicio al proceso de cálculo haciendo clic en el botón de *Calculate* de la barra de herramientas o, alternativamente, seleccionando la opción de *Current project* en el menú *Calculate*. No es necesario definir todas las fases de cálculo antes de dar comienzo al proceso de cálculo dado que el programa permite la definición de nuevas fases después de que las fases previas hayan sido calculadas.

4.16.4 INSERCIÓN Y ELIMINACIÓN DE FASES DE CÁLCULO

Cuando se insertan y se eliminan fases de cálculo se ha de tener presente que las condiciones iniciales para las siguientes fases cambiarán y que deben volver a ser especificadas manualmente.

En general, se define una nueva fase de cálculo al final de la lista de cálculos haciendo uso del botón *Next*. Es posible, sin embargo, insertar una nueva fase de cálculo entre dos fases ya existentes. Esto se hace pulsando el botón *Insert* mientras la línea en la que la nueva fase ha de ser insertada se encuentra seleccionada. Por defecto, la nueva fase se iniciará a partir de los resultados de la fase anterior de la lista, según lo indicado por el valor de Iniciar desde (*Start from*). Esto significa que se adopta el estatus de dominios activos, objetos estructurales, cargas, condiciones del agua y multiplicadores de la fase anterior.

El usuario ha de definir los valores de todos los parámetros para la fase insertada de una manera similar a como se hace durante la definición de una nueva fase al final de la lista de cálculos.

La fase siguiente, que originariamente se iniciaba a partir de la fase anterior, mantendrá el valor existente de *Start from* y no se iniciará de forma automática a partir de la fase insertada. Si se desea que la fase siguiente se inicie desde la fase insertada, esto deberá ser especificado manualmente cambiando el parámetro de Iniciar desde la fase (*Star from phase*) en la pestaña *General*. En este caso se requiere que la fase siguiente sea completamente redefinida, dado que se han modificado las condiciones iniciales.

Además de intercalar fases de cálculo, es posible también eliminar fases. Esto se lleva a cabo seleccionando la fase a eliminar y haciendo clic sobre el botón de Eliminar (*Delete*). Antes de suprimir una fase, deberá comprobarse en la columna de *Start from* cuáles de las fases subsiguientes se remiten a la fase a eliminar. Después de la

confirmación de la operación de eliminación, todas las fases en las que el valor de *Start from phase* se remitía a la fase eliminada, serán modificadas de manera automática de forma que ahora se remitan a la predecesora de la fase eliminada. Sin embargo, es necesario redefinir todas las fases modificadas, ya que sus condiciones iniciales han cambiado.

4.17 CONSIDERACIONES GENERALES ACERCA DE LOS CÁLCULOS

IDENTIFICACIÓN Y ORDENACIÓN DE LA FASES

El apartado *Phase* de la pestaña *General* muestra el número de fase y una cadena de caracteres de identificación de la fase de cálculo actual. PLAXIS asigna de forma automática a cada fase de cálculo un número que no puede ser cambiado por el usuario.

La cadena de identificación está establecida, por defecto, en <Phase #>, en donde # es el número de la fase, si bien esta cadena puede ser modificada por el usuario para darle un nombre más apropiado. La cadena de caracteres de la identificación y el número de la fase aparecen en la lista de las fases de cálculo en la parte inferior de la ventana.

Además, debe seleccionarse el parámetro de *Start from phase* en el recuadro de conjunto del apartado *Phase*. Este parámetro se refiere a la fase desde la cual deberá iniciarse la fase de cálculo actual (denominada fase de referencia). Por defecto, se selecciona aquí la fase anterior, pero si se han definido ya más fases de cálculo, la fase de referencia puede ser también una fase previa. No puede seleccionarse una fase que aparezca más abajo en la lista de cálculos.

Cuando se define una única fase de cálculo, es obvio que el cálculo deberá iniciarse desde la situación que haya sido generada dentro del módulo de condiciones iniciales del programa de Introducción (*Input*). Sin embargo, fases de cálculo posteriores pueden iniciarse también desde la fase inicial. Éste podría ser el caso si hubiera que considerar diferentes cargas o secuencias de carga separadamente para el mismo proyecto.

Otro ejemplo en el que la ordenación de fases no es directa es en los cálculos en los que se realicen análisis de seguridad para etapas de construcción intermedias. Los análisis de seguridad en PLAXIS están basados en el método de *Phi-c reduction*, que da como resultado un estado de rotura. Cuando se continúa el proceso de construcción, la etapa siguiente deberá iniciarse a partir de la etapa de construcción anterior en lugar de hacerlo desde los resultados del análisis de seguridad. Alternativamente, pueden realizarse análisis de seguridad para cada fase al final del proceso de cálculo. En ese caso, el parámetro de *Start from phase* de los cálculos de seguridad deberá referirse a las etapas de construcción correspondientes.

4.17.1 PARÁMETROS DE CONTROL DEL CÁLCULO

La pestaña *Parameters* se utiliza para definir los parámetros de control de una fase de cálculo en particular y del procedimiento de resolución correspondiente (Figura 4-20). Dicha pestaña contiene los elementos siguientes:

Los pasos adicionales (Additional steps)

Este parámetro especifica el número máximo de pasos de cálculo (pasos de carga) que se llevan a cabo en una fase de cálculo en particular.

Si se selecciona un cálculo plástico (*Plastic*) o un análisis de consolidación (*Consolidation*) como tipo del cálculo y la introducción de la carga está puesta en *Staged construction*, en *Total multipliers* o en *Minimum pore pressure*, el número de pasos adicionales es un límite superior con respecto al número efectivo de pasos que serán ejecutados. Si un cálculo de este tipo alcanza el número máximo de pasos adicionales, ello suele significar que el nivel último no ha sido alcanzado. Por defecto, el parámetro *Additional steps* está fijado en 250, lo cual resulta por lo general suficiente para completar la fase de cálculo.

Sin embargo, este número puede ser modificado dentro de un margen comprendido entre 1 y 1000. Si se selecciona un cálculo plástico (*Plastic*) o un análisis de consolidación (*Consolidation*) y la introducción de la carga está puesta en *Incremental multipliers*, el número de pasos adicionales deberá ser fijado en un número entero que represente el número de pasos requerido para esta fase de cálculo. En este caso, el número de pasos adicionales es siempre ejecutado exactamente. Por defecto, el parámetro *Additional steps* está fijado en 250, pero este número puede ser modificado dentro de un margen comprendido entre 1 y 1000. Esto mismo es también aplicable al cálculo de *Phi-c reduction*, exceptuando que el parámetro *Additional steps* está fijado por defecto en 30.

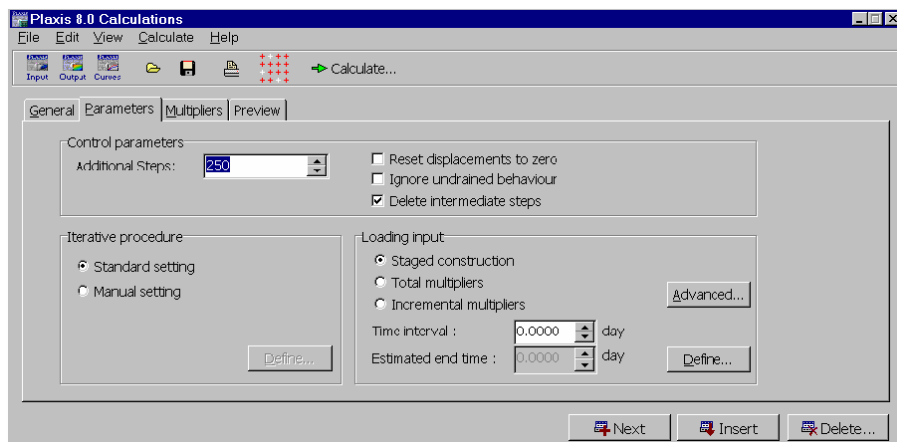


Figura 4-20. Pestaña *Parameters* de la ventana de Cálculos

Puesta a cero de los desplazamientos (*Reset displacements to zero*)

Esta opción deberá ser seleccionada cuando desplazamientos irrelevantes de pasos de cálculo anteriores han de ser anulados al principio de la fase de cálculo actual de forma que el nuevo cálculo se inicie a partir de un campo de desplazamientos cero. Por ejemplo, las deformaciones debidas a la carga de la gravedad carecen de interés práctico. Por lo tanto, puede elegirse esta opción después de la carga de la gravedad para eliminar los desplazamientos debidos al peso propio. Si no se selecciona la opción, los desplazamientos incrementales que se produzcan en la fase de cálculo actual serán añadidos a los de la fase anterior. La selección de la opción de *Reset displacements to zero* no influye en el campo de tensiones.

La opción de *Reset displacements to zero* no puede ser utilizada en una secuencia de cálculos en la que se use la opción de Malla Actualizada (*Updated Mesh*). Sin embargo, si el cálculo de Malla Actualizada se inicia a partir de otro cálculo en el que

no se utilice la opción de Malla Actualizada, debe utilizarse la opción de *Reset displacements to zero* en este cálculo de Malla Actualizada.

Ignorar el comportamiento no drenado (Ignore undrained behaviour)

Deberá seleccionarse esta opción si se desea excluir temporalmente los efectos del comportamiento no drenado en situaciones en las que el Tipo de material (*Material type*) está puesto en No drenado (*Undrained*). Como resultado de ello, todos los grupos de material no drenado pasan a estar temporalmente drenados. Los excesos de presión intersticial existentes que hayan sido generados anteriormente permanecerán, pero no se generarán nuevos excesos de presión intersticial en esa fase de cálculo en particular.

La aplicación de la carga de gravedad a materiales no drenados dará como resultado unos excesos de presión intersticial que no son realistas. Las tensiones debidas al propio peso del suelo, por ejemplo, están basadas en un proceso a largo plazo en el que la aparición de excesos de presión intersticial es irrelevante. La opción de *Ignore undrained behaviour* permite al usuario especificar desde el principio el tipo de material como no drenado para las etapas de carga principales sin tener en cuenta el comportamiento no drenado durante la etapa de carga de la gravedad, ya que el comportamiento de todos los grupos no drenados sea considerado como drenado durante este cálculo preliminar.

La opción de *Ignore undrained behaviour* no está disponible para los análisis de consolidación, dado que en un análisis de consolidación no se tiene en cuenta el Tipo de material *Material type* (drenado o no drenado) especificado en los conjuntos de datos de material.

Eliminar pasos intermedios (Delete intermediate steps)

Esta opción está seleccionada por defecto para ahorrar espacio en el disco. Como resultado de ello, los resultados de todos los pasos adicionales dentro de la fase de cálculo, exceptuando el último, son eliminados cuando la fase de cálculo ha finalizado de forma satisfactoria. En general, es el último paso el que contiene el resultado más relevante de la fase de cálculo, mientras que los pasos intermedios son menos importantes. Si así se desea, la opción puede ser des-seleccionada para retener todos los pasos intermedios. Si una fase de cálculo no finaliza de forma satisfactoria, todos los pasos de cálculo quedan retenidos, tanto si la opción de Eliminar los pasos intermedios está seleccionada como si no lo está. Esto permite detectar la causa que ha dado lugar al problema.

4.17.2 PARÁMETROS DE CONTROL DE LOS PROCEDIMIENTOS ITERATIVOS

Los procedimientos iterativos, en particular los procedimientos de avance de la carga, están influenciados por algunos parámetros de control. Dichos parámetros pueden ser establecidos en el apartado Procedimiento iterativo (*Iterative procedure*). PLAXIS adopta por defecto una configuración estándar (*Standard setting*) para dichos parámetros, lo que proporciona en la mayor parte de los casos un buen funcionamiento de los procedimientos iterativos. Se aconseja a los usuarios que no estén familiarizados con la influencia de los parámetros de control sobre los procedimientos iterativos que seleccionen el *Standard setting*. En algunas situaciones, sin embargo, podría ser deseable o incluso necesario cambiar la configuración estándar. En este caso, el usuario deberá seleccionar la opción de Configuración manual (*Manual setting*) y hacer clic en el botón de *Define* del apartado *Iterative procedure*. Como resultado de ello, se abre una ventana en la que aparecen los parámetros de control con sus valores vigentes (Figura 4-21).

Error tolerado (Tolerated error)

En cualquier análisis no lineal en el que se utilice un número finito de pasos de cálculo, habrá una cierta desviación con respecto de la solución exacta, tal como se muestra en la Figura 4-22. El objetivo de un algoritmo de resolución es asegurar que los errores de equilibrio permanezcan, tanto local como globalmente, dentro de unos límites aceptables.

Los límites de error adoptados por PLAXIS están estrechamente relacionados con el valor especificado para el Error tolerado (*Tolerated error*). Dentro de cada paso, el programa de cálculo continúa llevando a cabo iteraciones hasta que los errores calculados son menores que el valor especificado. Si el error tolerado se fija en un valor elevado, el cálculo será relativamente rápido, pero puede ser inexacto. Si se adopta un error tolerado bajo, el tiempo de cálculo puede llegar a ser excesivo. En general, el valor estándar de 0.03 resulta adecuado para la mayor parte de los cálculos.

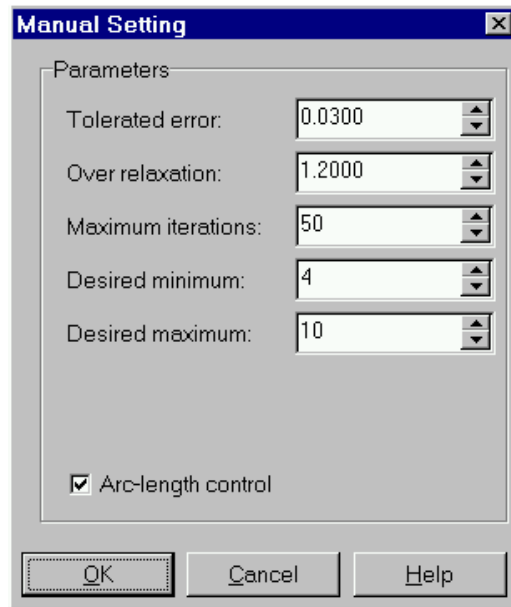


Figura 4-21. Ventana de los parámetros de control de los procedimientos iterativos

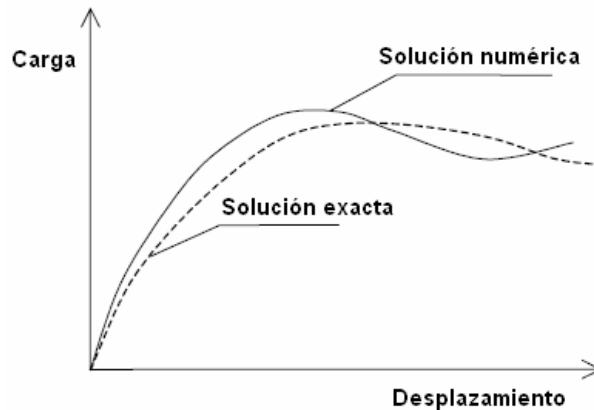


Figura 4-22. Solución calculada frente a solución exacta

Si un cálculo plástico da cargas de rotura que tienden a reducirse inesperadamente con el aumento del desplazamiento, ésta es una posible indicación de desviación excesiva de los resultados obtenidos mediante el método de los elementos finitos con respecto a la solución exacta. En estos casos, deberá repetirse el cálculo haciendo uso de un valor más bajo del error tolerado. Para más detalles acerca de los procedimientos de comprobación de errores utilizados en PLAXIS.

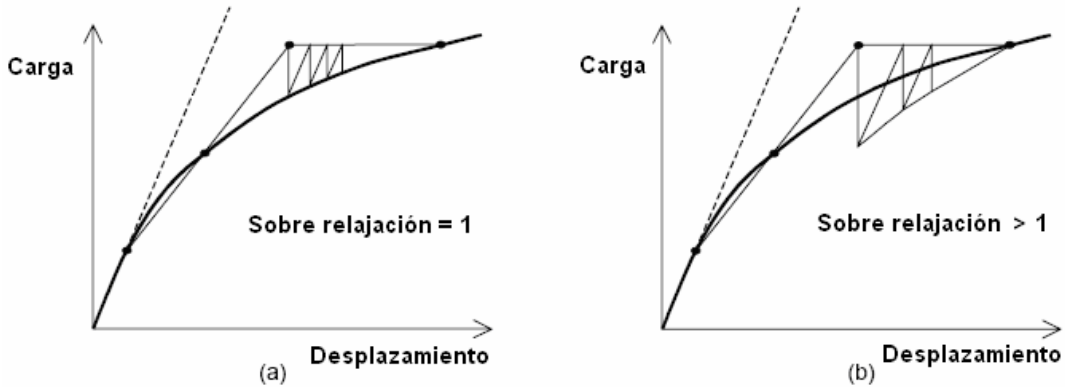


Figura 4-23. Proceso de iteración con sobre-relajación (a) y sin sobre-relajación (b)

Sobre-relajación (Over-relaxation)

Para reducir el número de iteraciones necesarias para convergencia, PLAXIS hace uso de un procedimiento de sobre-relajación, tal como se indica en la Figura 4-23. El parámetro que controla el grado de sobre-relajación es el factor de sobre-relajación. El valor del límite superior teórico es 2.0, pero este valor no debe ser utilizado nunca. En el caso de ángulos de fricción del suelo bajos, por ejemplo de $\phi < 20^\circ$, un factor de sobre-relajación de alrededor de 1.5 tiende a optimizar el procedimiento iterativo. Sin embargo, si el problema contiene materiales con ángulos de fricción más elevados, puede ser necesario utilizar un valor más bajo. El valor estándar asignado por defecto es 1.2 y resulta aceptable en la mayor parte de cálculos.

Máximo de iteraciones (Maximum iterations)

Este valor representa el número máximo admisible de iteraciones dentro de cualquier paso de cálculo individual. En general, el procedimiento de resolución restringirá el número de iteraciones que tienen lugar. Este parámetro se encarga de asegurar que el tiempo de cálculo no resulte excesivo debido a errores en la especificación de los parámetros que lo definen. El valor estándar de *Maximum iterations* es de 50, pero este número puede ser modificado dentro de un margen comprendido entre 1 y 100.

Si se alcanza el número máximo admisible en el paso final de una fase de cálculo, el resultado final puede ser inexacto. Cuando esto sucede aparece el mensaje '*Maximum iterations reached in final step*' (Máximo de iteraciones alcanzado en el paso final) en el recuadro de *Log info* de la pestaña *General*. Esta situación se produce en ocasiones cuando el proceso iterativo no converge. Esto puede tener diversas causas, pero la mayor parte de las veces indica un error en la introducción de los datos.

Mínimo deseado y máximo deseado (Desired minimum and desired maximum)

Si el tipo de cálculo seleccionado es *Plastic* o *Phi-c reduction*, PLAXIS hace uso de un algoritmo de tamaño de paso automático (*Load advancement ultimate level* o bien *Number of steps*). Este procedimiento está controlado por medio de los dos parámetros *Desired minimum* y *Desired maximum*, que especifican respectivamente

el número deseado mínimo y máximo de iteraciones por paso. Los valores estándar de dichos parámetros son 4 y 10 respectivamente, aunque pueden ser modificados dentro de un margen comprendido entre 1 y 100.

En ocasiones es necesario que el usuario ajuste los valores del mínimo y el máximo deseados con respecto de sus valores estándar. Esto sucede, por ejemplo, cuando el procedimiento de tamaño del paso automático genera unos pasos que son demasiado grandes para dar una curva desplazamiento-carga suficientemente suave. Muchas veces sucede también cuando se modelizan suelos con ángulos de fricción muy bajos. Para generar una respuesta carga-desplazamiento más uniforme en estos casos, deberán repetirse los cálculos con unos valores más pequeños para dichos parámetros, por ejemplo:

Mínimo deseado = 3

Máximo deseado = 7

Si los ángulos de fricción del suelo son relativamente altos, o si se utilizan modelos de suelo de un orden elevado, puede resultar apropiado incrementar el mínimo y el máximo con respecto a sus valores estándar para llegar a la solución en un tiempo de cálculo no excesivo. En estos caso, se sugiere utilizar los valores siguientes:

Mínimo deseado = 7

Máximo deseado = 15

En este caso, se recomienda incrementar el Máximo de iteraciones (*Maximum iterations*) hasta 75.

4.18 CONSTRUCCIÓN POR ETAPAS

La Construcción por etapas (*Staged construction*) es el procedimiento de Introducción de carga (*loading input*) más importante. Mediante este dispositivo especial de PLAXIS es posible cambiar la configuración de la geometría y de la carga desactivando o reactivando cargas, dominios de suelo u objetos estructurales que hayan sido creados durante la definición de la geometría. La construcción por etapas permite una simulación precisa y realista de diversos procesos de carga, construcción y excavación. Esta opción puede también ser utilizada para reasignar conjuntos de datos de material o para cambiar la distribución de presiones de agua en la geometría.

Para llevar a cabo un cálculo de construcción por etapas es necesario en primer lugar crear un modelo geométrico que incluya la totalidad de los objetos que han de ser utilizados durante el cálculo. Los objetos que no son necesarios al inicio del cálculo deberán ser desactivados al final del programa de Introducción (*Input*).

Haciendo clic a continuación sobre el botón de *Define*, se da inicio al programa de Introducción y aparece la ventana de la construcción por etapas. Esta ventana es similar a la de las condiciones iniciales, exceptuando el hecho de que no pueden ser activadas las opciones que sólo sirven para generar el estado inicial (como por ejemplo el procedimiento *K0*). Tampoco es posible entrar en el módulo de creación de la geometría del programa de Introducción (*Input*) desde la ventana de construcción por etapas. Por otra parte, se encuentran disponibles opciones específicas de la construcción por etapas.

De manera similar a lo que ocurre en la ventana de las condiciones iniciales, la ventana de la construcción por etapas está constituida por dos módulos diferentes: el

módulo de configuración de la geometría y el módulo de las condiciones referentes al flujo. El módulo de configuración de la geometría puede ser utilizado para activar o desactivar cargas, dominios de suelo y objetos estructurales, así como para reasignar conjuntos de datos de material a dominios y a objetos estructurales. Además de estos dispositivos, la construcción por etapas permite aplicar tensiones de pretensado a los anclajes. El módulo para las condiciones referentes al flujo puede ser utilizado para generar una nueva distribución de presiones de agua basada en la introducción de un nuevo conjunto de niveles freáticos o en un cálculo de flujo utilizando un nuevo conjunto de condiciones de contorno.



El paso del módulo de las condiciones referentes al flujo al de configuración de la geometría y viceversa se consigue mediante el 'conmutador' de la barra de herramientas.

Una vez se ha definido la nueva situación, deberá pulsarse el botón de *Update* para guardar la información y regresar al programa de Cálculos (*Calculations*).

A continuación es posible definir una nueva fase o iniciar el proceso de cálculo. Los cambios en la configuración de la geometría o en las condiciones referentes al flujo dan lugar por lo general a fuerzas no equilibradas de magnitud no despreciable. Estas fuerzas no equilibradas son aplicadas paso a paso a la malla de elementos finitos utilizando un procedimiento de Nivel último de avance de la carga (*Load advancement ultimate level*).

Durante un cálculo de construcción por etapas, un multiplicador que controla el proceso de la construcción por etapas ($\Sigma Mstage$) se incrementa desde cero hasta el nivel último (generalmente 1.0). Además, se actualiza un parámetro que representa la proporción activa de la geometría, ($\Sigma Marea$).

4.18.1 CAMBIOS EN LA CONFIGURACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Igual que sucede durante la creación de la geometría inicial, los dominios o los objetos estructurales pueden ser reactivados o desactivados para simular un proceso de construcción o de excavación. Esto puede conseguirse haciendo clic sobre el objeto en el modelo geométrico. Cuando se hace clic una vez sobre un objeto, éste pasará de activo a inactivo y viceversa. Si están presentes más de un objeto sobre una línea geométrica (por ejemplo placas y cargas repartidas), aparece una ventana de selección en la que se puede seleccionar el objeto que se desee.

Los dominios de suelo activos adquieren el color del conjunto de datos del material correspondiente mientras que los dominios desactivados aparecen en el color del fondo (blanco). Los objetos estructurales activos se muestran en su color original, mientras que las estructuras desactivadas están dibujadas en gris.

Cuando se hace doble clic en un objeto estructural, aparece la correspondiente ventana de propiedades y éstas pueden ser modificadas. En la ventana de selección que aparece después de hacer doble clic sobre un dominio de suelo se pueden cambiar las propiedades del material o bien aplicar una deformación de volumen al dominio seleccionado.

4.18.2 ACTIVACIÓN Y DESACTIVACIÓN DE DOMINIOS O DE OBJETOS ESTRUCTURALES

Los dominios de suelo y los objetos estructurales pueden ser activados o desactivados haciendo clic una vez sobre el dominio o el objeto estructural en el modelo

geométrico. Los anclajes sólo pueden estar activos si por lo menos uno de los dominios de suelo o placas a los que van conectados está también activo; en caso contrario, el programa de cálculo los desactiva de forma automática.

4.18.3 ACTIVACIÓN O MODIFICACIÓN DE CARGAS

Las cargas que fueron creadas durante la generación de la geometría están desactivadas en la situación inicial, pero pueden ser reactivadas utilizando un proceso de construcción por etapas. Al igual que en el caso de los objetos estructurales, las cargas pueden ser activadas o desactivadas haciendo clic una vez sobre ellas en el modelo geométrico. Las cargas activas se dibujan en su color original, mientras que las cargas inactivas son de color gris.

Cuando se activan cargas, el valor real de la carga que se aplica durante un cálculo viene determinado por el valor introducido de la carga y el multiplicador de carga correspondiente ($\Sigma MloadA$ o $\Sigma MloadB$).

Valor introducido de una carga

Por defecto, el valor introducido de una carga es el valor que se haya dado durante la creación de la geometría. El valor introducido de la carga puede ser modificado en cada fase de cálculo en el marco de la Construcción por etapas (*Staged construction*). Basta con hacer doble clic sobre la carga. Como resultado de ello, aparece una ventana en la que se pueden modificar los valores introducidos de las cargas.

- Después de hacer doble clic sobre una carga puntual aparece una ventana en la que pueden introducirse directamente las componentes x e y (Figura 4-24).
- Después de hacer doble clic sobre una carga repartida aparece una ventana en la que pueden introducirse directamente las componentes x e y en sus dos extremos (Figura 4-25).

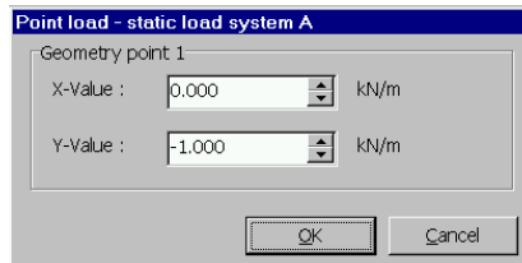


Figura 4-24. Ventana de introducción para una carga puntual

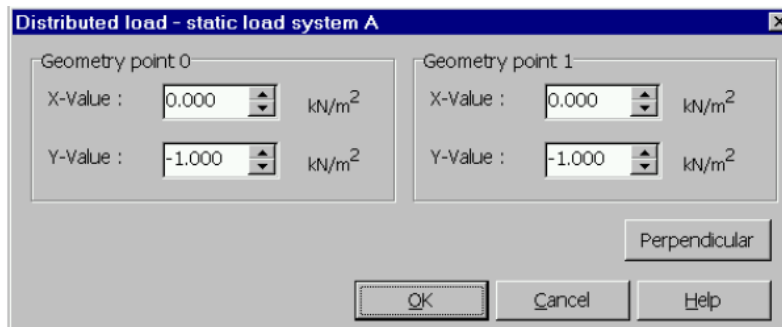


Figura 4-25. Ventana de introducción para una carga repartida

Multiplicador de carga (Load multiplier)

El valor real de la carga que es aplicada durante un cálculo viene determinado por el producto del valor introducido de la carga por el multiplicador de carga correspondiente ($\Sigma MloadA$ o $\Sigma MloadB$). El multiplicador $\Sigma MloadA$ se utiliza para aumentar (o disminuir) globalmente todas las cargas de un sistema de cargas A (cargas puntuales y cargas repartidas), mientras que $\Sigma MloadB$ se utiliza para modificar todas las carga del sistema de cargas B. Sin embargo, no es necesario por regla general modificar los multiplicadores de carga cuando se aplican o se modifican cargas en el marco de la construcción por etapas, dado que el programa fijará automáticamente el multiplicador correspondiente en la unidad en el caso de que sea cero. Téngase en cuenta que si el valor existente del multiplicador no es cero ni tampoco es igual a la unidad, ese valor se conserva y la carga que se aplica efectivamente en el cálculo es diferente del valor de entrada de la carga que haya sido introducido en el marco de la construcción por etapas.

4.18.4 CONSTRUCCIÓN POR ETAPAS CON $\Sigma Mstage < 1$

En general, el multiplicador total asociado a un proceso de construcción por etapas, $\Sigma Mstage$, va de cero a la unidad en cada fase de cálculo en la que se ha seleccionado la construcción por etapas como procedimiento de introducción de la carga. En algunas situaciones muy especiales puede ser de utilidad llevar a cabo sólo una parte de una etapa de construcción. Esto puede conseguirse haciendo clic en el botón de *Advanced* de la pestaña *Parameters* y especificando un nivel último de $\Sigma Mstage$ menor que 1.0. El valor de entrada más bajo permitido es 0.001. Si $\Sigma Mstage$ es inferior a este valor se considera que la carga es despreciable y no se realiza ningún cálculo. Normalmente no se utilizan valores superiores a 1.0. Introduciendo el valor por defecto de 1.0, el procedimiento de la construcción por etapas se lleva a cabo de forma estándar.

En general, debe ponerse cuidado cuando se usen valores de $\Sigma Mstage$ inferiores a 1.0, dado que ello conduce a la existencia de fuerzas no equilibradas al final de la fase de cálculo. Una fase de cálculo de este tipo debe ir siempre seguida por otro cálculo de construcción por etapas. Si $\Sigma Mstage$ no es especificado por el usuario, se adopta siempre el valor por defecto de 1.0, incluso en el caso de que se hubiera introducido un valor menor en la fase de cálculo anterior.

4.19 MULTIPLICADORES DE CARGA

Durante un análisis de deformación es necesario controlar la magnitud de todos los tipos de cargas. En general, las cargas son activadas en el marco de la construcción por etapas introduciendo un valor de entrada apropiado. Sin embargo, las cargas a aplicar se calculan a partir del producto del valor de entrada de la carga por el multiplicador correspondiente. Así, como alternativa a la construcción por etapas, las cargas puedan ser incrementadas globalmente cambiando el multiplicador correspondiente. Se hace distinción entre los Multiplicadores incrementales (*Incremental multipliers*) y los Multiplicadores totales (*Total multipliers*). Los multiplicadores incrementales representan el incremento de carga para un paso de cálculo individual, mientras que los multiplicadores totales representan el nivel total de la carga en un paso o una fase de cálculo en particular. La forma en que se utilizan los diversos multiplicadores depende del tipo de *Loading input* que haya sido seleccionado en la pestaña *Parameters*. Tanto los multiplicadores incrementales como los multiplicadores totales correspondientes a una fase de cálculo en particular aparecen indicados en la pestaña *Multipliers* (Figura 4-26).

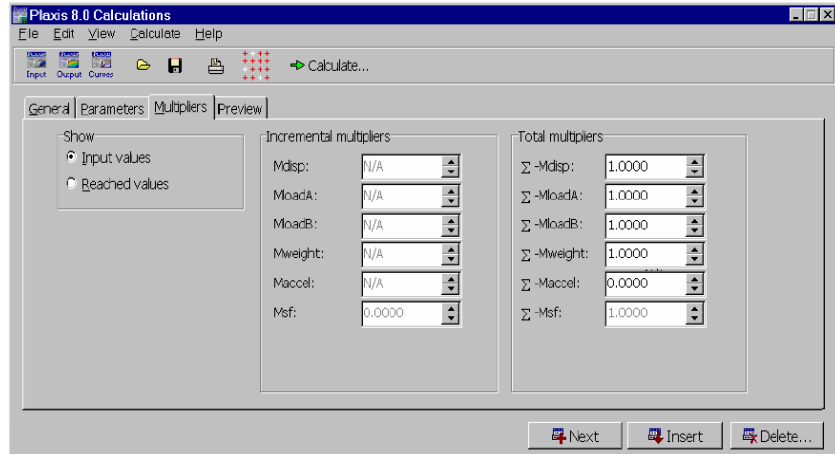


Figura 4-26. Pestaña *Multipliers* de la ventana de Cálculos

Todos los multiplicadores incrementales están indicados con *M...* mientras que todos los multiplicadores totales lo están por medio de $\Sigma M...$. Un multiplicador no tiene unidades asociadas, dado que se trata de un factor adimensional. A continuación se describen los diferentes multiplicadores de carga.

4.19.1 REDUCCIÓN FI-C (PHI-C-REDUCTION)

Phi-c reduction es una opción que se encuentra disponible en PLAXIS para el cálculo de factores de seguridad. Esta opción puede ser seleccionada como un Tipo de cálculo (*Calculation type*) aparte en la pestaña *General*. El procedimiento *Phi-c reduction* consiste en reducir progresivamente los parámetros de resistencia $\tan\phi$ y c del suelo hasta que se produce la rotura de la estructura. La resistencia de las interfaces, si están activas, se reduce de la misma manera. Sin embargo, la resistencia de los objetos estructurales como placas y anclajes no se modifica dentro de un cálculo del tipo *Phi-c reduction*.

El multiplicador total ΣMsf se utiliza para definir el valor de los parámetros de resistencia del suelo en una etapa dada del análisis:

$$\sum Msf = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}} \quad (11)$$

donde los parámetros de resistencia con el subíndice 'input' hacen referencia a las propiedades introducidas en los conjuntos de datos de los materiales y los parámetros con el subíndice 'reduced' se refieren a los valores reducidos utilizados en el análisis. Al inicio del cálculo ΣMsf vale 1.0, con lo que todas las resistencias de los materiales se fijan en sus valores no reducidos.

Un cálculo del tipo *Phi-c reduction* se lleva a cabo utilizando el procedimiento de Número de pasos de avance de la carga (*Load advancement number of steps*). El multiplicador incremental *Msf* se utiliza para especificar el incremento de la reducción de la resistencia correspondiente al primer paso de cálculo. Este incremento se fija por defecto en 0.1, que resulta ser por regla general un buen valor inicial. Los parámetros de resistencia se reducen sucesivamente de forma automática hasta que se han realizado todos los Pasos adicionales (*Additional steps*). Por defecto, el número de pasos adicionales está fijado en 30, pero se puede dar aquí un valor

mayor, hasta un máximo de 1000, si es necesario. Debe comprobarse siempre si el paso final ha dado como resultado un mecanismo de rotura completamente desarrollado. Si éste es el caso, el factor de seguridad viene dado por:

$$SF = \frac{\text{resistencia disponible}}{\text{resistencia en ruptura}} = \text{valor de } \sum Msf \text{ en rotura} \quad (12)$$

Si no se ha desarrollado completamente un mecanismo de rotura debe repetirse el cálculo con un número mayor de pasos adicionales. Para captar con precisión la rotura de la estructura es conveniente utilizar la opción de Control de la longitud de arco (*Arclength control*) en el procedimiento iterativo. También se requiere el uso de un Error tolerado (*Tolerated error*) de no más del 3%. Se cumplen ambos requerimientos cuando se utiliza la configuración estándar (*Standard setting*) del Procedimiento iterativo (*Iterative procedure*).

Cuando se utiliza *Phi-c reduction* en combinación con modelos de suelo avanzados, dichos modelos se comportarán de hecho como un modelo de Mohr-Coulomb estándar, dado que la dependencia de la rigidez con el estado tensional y el endurecimiento quedan excluidos. Durante un cálculo del tipo reducción fi-c se utiliza como rigidez constante la correspondiente al estado tensional existente al final de la fase anterior. El procedimiento *Phi-c reduction* se parece al método de cálculo de factores de seguridad que se ha adoptado convencionalmente en los análisis de círculos de deslizamiento.

4.20 SELECCIÓN DE PUNTOS PARA CURVAS

Una vez se hayan definido las diferentes fases y antes de que se dé inicio al proceso de cálculo, el usuario puede seleccionar algunos puntos de la geometría para la generación de curvas de carga-desplazamiento o de trayectorias de tensiones. Durante los cálculos, la información correspondiente a dichos puntos seleccionados es almacenada en un fichero aparte. Después del cálculo, puede utilizarse el programa Curvas (*Curves*) para la generación de curvas de carga-desplazamiento o de trayectorias de tensiones. La generación de dichas curvas está basada en la información almacenada en el fichero aparte. Por lo tanto, no es posible generar curvas para puntos que no han sido seleccionados previamente.



Los puntos pueden ser escogidos mediante la opción de Seleccionar puntos para curvas (*Select points for curves*) del menú *View* o bien haciendo clic en el correspondiente icono de la barra de herramientas. Como resultado de ello, se abre el programa de Resultados (*Output*) en el que se muestra la malla de elementos finitos con todos los nodos. Se pueden seleccionar hasta 10 nodos para la generación de curvas de carga-desplazamiento. La selección tiene lugar desplazando el puntero del ratón hasta el nodo deseado y haciendo clic con el botón izquierdo del mismo. Los nodos seleccionados están indicados por medio de caracteres en orden alfabético. Estos caracteres volverán a aparecer en el programa *Curves* para identificar los puntos para los cuales se han de generar las curvas de carga-desplazamiento. Se puede anular la selección de un nodo volviendo a hacer clic de nuevo sobre él.

Además de los nodos, se pueden seleccionar puntos de tensión para la generación de trayectorias de tensiones, trayectorias de deformaciones y diagramas tensióndeformación. Al hacer clic sobre el botón de Seleccionar puntos de tensión

para curvas de tensión/deformación (*Select stress points for stress/strain curves*) situado en la esquina superior derecha, un gráfico muestra todos los puntos de tensión de la malla de elementos finitos. Se pueden seleccionar hasta 10 puntos de tensión para la generación de curvas de tensiones y de deformaciones. Al igual que en el caso de los nodos, los puntos de tensión vienen indicados por medio de caracteres en orden alfabético.

Si se desea seleccionar nodos adicionales, es posible reutilizar el botón de Seleccionar nodos para curvas de carga-desplazamiento (*Select nodes for load-displacement curves*), después de lo cual volverá a aparecer el gráfico con los nodos y se podrán seleccionar los nodos adicionales. Sin embargo, cuando se seleccionan nodos adicionales después de que se hayan llevado a cabo los cálculos, debe volverse a ejecutar de nuevo el proceso del cálculo desde la primera fase de cálculo de la lista. Para anular la selección de todos los nodos seleccionados, puede hacerse clic en el botón de Des-seleccionar todos los nodos o puntos de tensión (*Deselect all nodes o stress points*). Si se hace clic en este botón cuando está presentado el gráfico que muestra los nodos, sólo será anulada la selección de los nodos, mientras que los puntos de tensión que hayan sido seleccionados mantendrán su condición. Por otra parte, si se hace clic sobre dicho botón cuando está presentado el gráfico que muestra los puntos de tensión sólo se anulará la selección de dichos puntos mientras que los nodos que hayan sido seleccionados mantendrán su condición.

Una vez hayan sido seleccionados todos los nodos y puntos de tensión que se desee deberá pulsarse el botón de *Update* situado en la esquina superior izquierda para guardar la información y volver al programa de Cálculos. Si se regenera la malla de elementos finitos (después de haber sido refinada o modificada), la posición de los nodos y de los puntos de tensión cambiará. Como resultado de ello, los nodos y los puntos de tensión anteriormente seleccionados pueden aparecer en posiciones completamente diferentes. Por lo tanto, los nodos y los puntos de tensión deberán volver a ser seleccionados después de una regeneración de malla. Cuando se inician los cálculos sin haber seleccionado nodos o puntos de tensión para curvas, el programa le preguntará al usuario si desea hacerlo. El usuario podrá entonces decidir si selecciona los puntos o si, alternativamente, inicia los cálculos sin seleccionar ningún punto. En este último caso no será posible generar curvas de carga-desplazamiento o curvas de tensión-deformación.

4.21 EJECUCIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO

Una vez se han definido las fases de cálculo y se han seleccionado los puntos para curvas, se puede proceder a la ejecución del proceso del cálculo. Antes de dar inicio al proceso, sin embargo, es recomendable llevar a cabo una comprobación de la lista de fases de cálculo. En principio, todas las fases de señaladas con una flecha de color azul (→) serán ejecutadas durante el proceso de cálculo. Por defecto, cuando se defina una nueva fase de cálculo se marcará automáticamente como fase a ejecutar. Las fases de cálculo ya ejecutadas pueden estar señaladas mediante una marca de color verde (√) o mediante un aspa de color rojo (×) dependiendo de si su cálculo resultó o no satisfactorio. Para seleccionar o eliminar la selección de una fase de cálculo para su ejecución, deberá hacerse doble clic sobre la línea correspondiente. Alternativamente, puede pulsarse el botón derecho del ratón sobre la línea correspondiente y seleccionar la opción de Fase a calcular (*Mark calculate*) o su contraria (*Unmark calculate*) del menú del cursor.

4.21.1 INICIO DEL PROCESO DEL CÁLCULO

Puede iniciarse el proceso del cálculo pulsando el botón de Calcular (*Calculate*) de la barra de herramientas. Este botón sólo está visible si está destacada alguna fase de cálculo que haya sido seleccionada para ser ejecutada –lo que, como se ha dicho, se indicará mediante una flecha de color azul-. Alternativamente, se puede seleccionar la opción de *Current project* en el menú *Calculate*. Como resultado de ello, el programa lleva a cabo en primer lugar una comprobación de la ordenación y la coherencia de las fases de cálculo. Además, determinará la primera fase de cálculo a ejecutar y ejecutará a continuación todas las fases de cálculo seleccionadas para ello siempre y cuando no tenga lugar la rotura. Para informar al usuario acerca del progreso del proceso de cálculo, la fase de cálculo que se esté ejecutando en un momento dado aparecerá destacada en la lista.

4.22 RESULTADOS GENERADOS DURANTE LOS CÁLCULOS

Durante un análisis de deformación mediante el método de los elementos finitos la información acerca del proceso iterativo es presentada en una ventana por separado. Dicha información incluye los valores actuales de los multiplicadores de carga totales y otros parámetros correspondientes a la fase de cálculo que se está ejecutando. Además, esa ventana muestra la siguiente información:

Curva carga-desplazamiento: Durante cada fase de cálculo se presenta una curva carga-desplazamiento a partir de la cual puede estimarse la situación del problema (entre totalmente elástica y rotura). Por defecto, se representa el desplazamiento del primer nodo preseleccionado en función del multiplicador total del sistema de cargas activado. Si hay prescripciones de desplazamientos activas, se utilizará el parámetro de fuerza más importante (*Force-X* o *Force-Y*) en lugar del multiplicador $\Sigma Mdisp$. Si así se desea, se puede elegir otro de los nodos preseleccionados en el recuadro de selección que hay debajo de la curva.

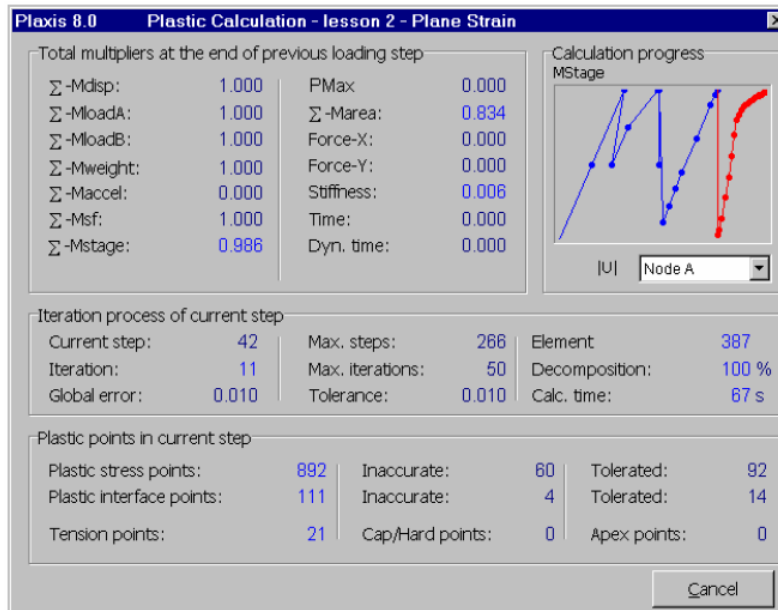


Figura 4-27. Ventana de cálculos

Números de paso y de iteración: Los valores de *Current step* y de *Iteration* indican el número de paso e iteración respectivamente del cálculo actual. El valor de *Maximum steps* indica el número del último paso de la fase de cálculo actual según el parámetro *Additional steps*. El valor de *Maximum iterations* se corresponde con el parámetro *Maximum iterations*, que interviene en el control del proceso iterativo.

Error global: El Error global (*Global error*) es una medida de los errores de equilibrio globales dentro de un paso de cálculo. Estos errores tienden a reducirse a medida que aumenta el número de iteraciones.

Tolerancia: La Tolerancia (*Tolerance*) es el error de equilibrio máximo total que está permitido. El valor de la tolerancia se corresponde con el valor del Error tolerado (*Tolerated error*), que interviene en control del proceso iterativo. El proceso iterativo continuará como mínimo mientras el error global sea mayor que la tolerancia.

Puntos de tensión plásticos (*Plastic stress points*): Se trata del número total de puntos de tensión de elementos del suelo que están en un estado plástico. Además de los puntos en los que el círculo de Mohr toca la envolvente de rotura de Coulomb, se incluyen los puntos en los que tiene lugar una plastificación con endurecimiento.

Puntos de interfaz plásticos (*Plastic interface points*): Esto da el número total de puntos de tensión en elementos de interfaz que han pasado a ser plásticos.

Puntos de tensión inexactos (*Inaccurate stress points*): Los valores de *Inaccurate* dan el número de puntos de tensión plásticos de los elementos de suelo y de los elementos de interfaz para los cuales el error local excede del error tolerado.

Número tolerado (*Tolerated*) de puntos de tensión inexactos: Es el número máximo de puntos de tensión inexactos de elementos de suelo y de elementos de interfaz, respectivamente, que están permitidos. El proceso iterativo continuará como mínimo mientras el número de puntos de tensión inexactos sea mayor que el número tolerado.

Puntos de Tracción (*Tension points*): Un Punto de tracción (*Tension point*) es un punto de tensión que llega a rotura por tracción. Estos puntos pueden aparecer cuando se utiliza la supresión de tracciones en algunos de los conjuntos de datos de materiales.

4.23 POST-PROCESO DE LOS RESULTADOS

Los principales resultados que proporciona un cálculo mediante elementos finitos son los desplazamientos en los nodos y las tensiones en los puntos de tensión. Además, cuando un modelo de elementos finitos incluye elementos estructurales, se calculan los esfuerzos estructurales en dichos elementos. En PLAXIS existe una amplia gama de dispositivos para la presentación de los resultados de un análisis mediante elementos finitos. El conjunto de los dispositivos que pueden ser seleccionados en el programa de Resultados (*Output*) se describe a continuación.

4.23.1 EL PROGRAMA DE RESULTADOS (OUTPUT)



Este icono representa el programa de Resultados (*Output*). Dicho programa contiene todos los dispositivos para ver y elaborar listas de resultados correspondientes a la situación inicial y a cada fase de cálculo. El usuario debe empezar seleccionando el modelo y la fase de cálculo o el número de paso apropiados cuyos resultados se desea ver. Después de esta selección, se abre una primera ventana de resultados en la que se representa la malla deformada.

La ventana principal del programa de Resultados (*Output*) contiene los elementos siguientes (Figura 4-28)



Figura 4-28. Barra de herramientas de la ventana principal del programa de Resultados

Menú de Resultados: El menú de Resultados contiene todos los dispositivos de funcionamiento y de presentación del programa de Resultados. Los elementos del menú pueden variar dependiendo del tipo de formato de resultados que esté activo en cada instante. Algunas de las opciones están también disponibles en forma de iconos en la barra de herramientas.

Ventanas de resultados: Se trata de ventanas en las que se presenta un resultado en particular. Las ventanas de resultados pueden contener gráficos del modelo completo, gráficos de objetos especiales del modelo o tablas de resultados. Se pueden abrir de manera simultánea múltiples ventanas de resultados.

Barra de herramientas: La barra de herramientas contiene iconos que pueden ser utilizados para escoger de manera rápida una de las opciones del menú. Además, se incluye un recuadro de selección que puede ser utilizado para elegir de manera directa el tipo de presentación del resultado de interés. Por ejemplo, los desplazamientos pueden ser presentados como Flechas (*Arrows*), Curvas de Nivel (*Contours*) o Sombreados (*Shadings*). Otros resultados pueden ser presentados de otras maneras.

Línea de estado: La barra de estado contiene información acerca del tipo de análisis (deformación plana o axisimetría) y la posición del cursor (ratón) en el modelo.

4.23.2 EL MENÚ DEL PROGRAMA DE RESULTADOS

El menú principal del programa de Resultados (*Output*) contiene submenús desplegables que cubren la mayor parte de las opciones para la gestión de ficheros, la transferencia de datos y el visionado de gráficos y tablas. En general, los resultados más importantes de un cálculo mediante elementos finitos son las deformaciones y las tensiones. Es por ello que una gran parte del menú del programa resultados hace referencia a ellas. Cuando se visualiza un modelo geométrico completo, el menú total está constituido por los submenús *File*, *Edit*, *View*, *Geometry*, *Deformations*, *Stresses*, *Window* y *Help*. El menú depende del tipo resultado que se presente. A continuación se describen algunos de los elementos de los submenús.

El submenú File:

Work directory: Para establecer el directorio por defecto en el que se guardarán los ficheros de un proyecto PLAXIS.

Report generation: Para generar un informe de un proyecto con los datos de entrada y los resultados de los cálculos.

(*recent projects*) :Para abrir de una manera rápida uno de los cuatro proyectos más recientes.

El submenú Edit:

Scale: Para modificar la escala de dibujo del resultado presentado.

Internal: Para modificar la gama de valores del resultado presentado en los gráficos de líneas de contorno y en los gráficos con sombreados.

Scan line: Para cambiar la línea de exploración con el fin de visualizar las etiquetas de las curvas de nivel. Después de escoger esta opción, la línea de exploración debe ser seleccionada mediante el ratón. Hay que pulsar el botón izquierdo del ratón sobre uno de los extremos de la línea, mantenerlo pulsado y desplazar el ratón hasta el otro extremo. Aparecerá entonces una etiqueta en cada cruce entre una curva de nivel y la línea de exploración.

El submenú View:

Reset view: Para restaurar el gráfico original.

Cross-Section: Para realizar un corte de la geometría y obtener una distribución del resultado deseado a lo largo del mismo. El corte se define mediante el ratón. Hay que pulsar el botón izquierdo del ratón sobre uno de los extremos del corte, mantenerlo pulsado y desplazar el ratón hasta el otro extremo.

Table: Para ver una tabla de valores numéricos del resultado presentado.

Rulers: Para mostrar u ocultar las reglas a lo largo del gráfico activo.

Legend: Para mostrar u ocultar la leyenda de curvas de nivel o de sombreados.

Grid: Para mostrar u ocultar la cuadrícula en el gráfico activo.

General info: Para ver la información general del proyecto.

Material info: Para ver los datos de los materiales.

Calculation info: Para ver la información de cálculo del paso presentado.

Create animation: Para crear una animación (película) de una serie de pasos de cálculo.

El submenú Geometry:

Structures: Para la presentación de todos los objetos estructurales del modelo.

Materials: Para la presentación de los colores de los materiales en el modelo.

Phreatic level: Para la presentación del nivel freático general del modelo.

Loads: Para la presentación de las cargas externas del modelo.

Fixities: Para la presentación de las fijaciones del modelo.

Presc. Displacements: Para la presentación de los las prescripciones en desplazamientos del modelo.

Connectivity plot: Para ver el gráfico de conectividades.

Elements: Para la presentación de los elementos de suelo del modelo.

Nodes: Para la presentación de los nodos del modelo.

Stress points: Para la presentación de los puntos de tensión del modelo.

Element numbers: Para la presentación de los números de los elementos de suelo. Sólo es posible cuando los elementos se muestran en el gráfico.

Node numbers: Para la presentación de los números de los nodos. Sólo es posible cuando los nodos se muestran en el gráfico.

Stress point numbers: Para la presentación de los números de los puntos de tensión. Sólo es posible cuando los puntos de tensión se muestran en el gráfico.

Material set numbers: Para la presentación de los números de los conjuntos de material en los elementos de suelo.

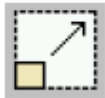
Cluster numbers: Para la presentación de los números de dominio en los elementos de suelo.

El submenú Stresses:

El submenú *Stresses* contiene diversas opciones para la visualización del estado de tensiones al que está sometido el modelo de elementos finitos

4.23.3 DEFORMACIONES (DEFORMATIONS)

El submenú *Deformations* contiene diferentes opciones para la visualización de los desplazamientos y las deformaciones del modelo de elementos finitos. Por defecto, los resultados representados son afectados automáticamente por un factor de escala (1, 2 o 5) *10ⁿ con el objetivo de facilitar su visualización.



El factor de escala puede ser modificado haciendo clic en el botón de Scale factor de la barra de herramientas o bien seleccionando la opción de Scale en el submenú Editar (Edit). El factor de escala para las deformaciones se refiere a un valor de referencia de deformación que se obtiene como un determinado porcentaje de las dimensiones de la geometría. Para comparar gráficos de deformaciones de diferentes fases de cálculo, deben igualarse sus factores de escala.

Si se ha seleccionado Curvas de Nivel (Contours) o Sombreados (Shadings) en el recuadro de presentaciones de la barra de herramientas, la gama de valores del resultado presentado puede ser ampliada o reducida bien sea seleccionando la opción de Interval en el submenú de Editar (Edit) o haciendo clic sobre la leyenda. El valor máximo de la variable en cuestión está incluido en el título que hay debajo del gráfico y puede ser visto seleccionando la opción de Title en el submenú de Ver (View).

4.23.3.1 DESPLAZAMIENTOS TOTALES, HORIZONTALES Y VERTICALES

Los Desplazamientos totales (*Total displacements*) son los desplazamientos acumulados absolutos $|u|$. Se obtienen a partir de las componentes de desplazamiento horizontal (x) y vertical (y) en todos los nodos al final del paso de

cálculo actual y se representan sobre un gráfico de la geometría. De manera similar, los Desplazamientos horizontales (*Horizontal displacements*) y los Desplazamientos verticales (*Vertical displacements*) son, respectivamente, las componentes acumuladas de desplazamiento horizontal (x) y vertical (y) en todos los nodos al final del paso de cálculo actual. Estas opciones pueden ser seleccionadas en el submenú *Deformations*. Los desplazamientos pueden ser presentados como Flechas (*Arrows*), como Curvas de Nivel (*Contours*) o como Sombreados (*Shadings*) seleccionando la opción apropiada en el cuadro de presentación de la barra de herramientas.

4.23.3.2 DESPLAZAMIENTOS INCREMENTALES

Los Incrementos totales (*Total increments*) son los incrementos de desplazamiento absolutos del paso actual $|\Delta u|$. Se obtienen a partir de los incrementos de desplazamiento horizontal y vertical en todos los nodos tal como han sido calculados para el paso actual y se representan sobre un gráfico de la geometría. De manera similar, los Incrementos horizontales (*Horizontal increments*) y los Incrementos verticales (*Vertical increments*) son, respectivamente, los incrementos de desplazamiento horizontal (x) y vertical (y) en todos los nodos tal como han sido calculados para el paso actual. Estas opciones pueden ser seleccionadas en el submenú *Deformations*. Los incrementos de desplazamiento pueden ser presentados como Flechas (*Arrows*), como Curvas de Nivel (*Contours*) o como Sombreados (*Shadings*) seleccionando la opción apropiada en el cuadro de presentación de la barra de herramientas. Las curvas de nivel de incrementos totales resultan particularmente útiles cuando se pretende observar la localización de deformaciones en ciertas zonas del dominio durante una rotura plástica.

4.23.3.3 DEFORMACIONES TOTALES

Las Deformaciones totales (*Total strains*) son las deformaciones acumuladas de la geometría en los puntos de tensión al final del paso de cálculo actual representadas en un gráfico de la geometría. Esta opción puede ser seleccionada en el submenú *Deformations*.

Las deformaciones totales pueden ser representadas según las opciones Direcciones principales (*Principal directions*) (deformaciones principales), Deformaciones volumétricas (*Volumetric strains*) (ϵ_v) o Deformaciones de corte (*Shear strains*) (ϵ_s) tal como se indica en el recuadro de presentaciones de la barra de herramientas. Las deformaciones volumétricas y las de corte pueden ser visualizadas como Curvas de Nivel (*Contours*) o Sombreados (*Shadings*).

Las deformaciones principales se representan como cruces en los puntos de tensión de los elementos. Cuando se utilizan elementos de 15 nodos se muestran tres puntos de tensión por elemento. Cuando se utilizan elementos de 6 nodos sólo se muestra un punto por elemento, que representa el promedio del total de deformaciones principales en el elemento. La longitud de cada línea representa la magnitud de la deformación principal y la dirección indica la dirección principal. Las deformaciones que representan extensión están indicadas por medio de una flecha en lugar de por una línea. Téngase en cuenta que se considera que las contracciones son negativas.

4.23.3.4 DEFORMACIONES INCREMENTALES

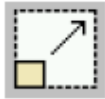
Las Deformaciones incrementales (*Incremental strains*) son los incrementos de deformación de la geometría en los puntos de tensión que han sido calculados en el paso de cálculo actual, y se representan sobre un gráfico de la geometría. Esta opción puede ser seleccionada en el submenú *Deformations*.

Las deformaciones incrementales pueden ser representadas como Direcciones principales (*Principal directions*) (incrementos de deformación principales), Deformaciones volumétricas (*Volumetric strains*) (deformaciones volumétricas incrementales $\Delta\varepsilon_v$) o Deformaciones de corte (*Shear strains*) equivalentes (deformaciones de corte equivalentes incrementales $\Delta\varepsilon_s$) seleccionando la opción apropiada en el recuadro de presentaciones de la barra de herramientas. Las deformaciones volumétricas y las de corte pueden ser visualizadas como Curvas de Nivel (*Contours*) o Sombreados (*Shadings*).

Los incrementos de las deformaciones principales se representan como cruces en los puntos de tensión de los elementos. Cuando se utilizan elementos de 15 nodos se muestran tres puntos de tensión por elemento. Cuando se utilizan elementos de 6 nodos sólo se muestra un punto por elemento, que representa el promedio de los incrementos de las deformaciones principales en el elemento. La longitud de cada línea representa la magnitud de la deformación principal y la dirección indica la dirección principal. Las deformaciones que representan extensión están indicadas por medio de una flecha en lugar de por una línea. Téngase en cuenta que se considera que las contracciones son negativas.

4.23.4 ESFUERZOS

El submenú de Esfuerzos (*Stresses*) contiene diversas opciones para visualizar el estado de esfuerzos en el modelo de elementos finitos. Por defecto, los resultados representados son afectados automáticamente por un factor de escala $(1, 2 \text{ o } 5) \cdot 10^n$ con el objetivo de facilitar su visualización.



El factor de escala puede ser modificado haciendo clic en el botón de Scale factor de la barra de herramientas o bien seleccionando la opción de Scale en el submenú Editar (*Edit*). El factor de escala para las deformaciones se refiere a un valor de referencia de deformación que se obtiene como un determinado porcentaje de las dimensiones de la geometría. Para comparar gráficos de deformaciones de diferentes fases de cálculo, deben igualarse sus factores de escala.

4.23.4.1 ESFUERZOS EFECTIVOS

Effective stresses son los esfuerzos efectivos en la geometría al final del paso de cálculo actual, y se representan sobre un gráfico de la geometría. Esta opción puede ser seleccionada en el submenú *Stresses*. Los esfuerzos efectivos pueden ser representadas como Direcciones principales (*Principal directions*) (esfuerzos principales), esfuerzos de corte (*Mean*) (p') o esfuerzos tangenciales relativos (*Relative shear*) (τ_{rel}) seleccionando la opción apropiada en el recuadro de presentaciones de la barra de herramientas. Los esfuerzos medios y los esfuerzos tangenciales relativos pueden ser visualizados bajo la forma de Curvas de Nivel (*Contours*) o de Sombreados (*Shadings*).

Los esfuerzos efectivos principales se representan como cruces en los puntos de tensión de los elementos. Cuando se utilizan elementos de 15 nodos se muestran tres puntos de tensión por elemento. Cuando se utilizan elementos de 6 nodos sólo se muestra un punto por elemento, que representa el promedio de las tensiones efectivas principales en el elemento. La longitud de cada línea representa la magnitud del esfuerzo principal y la dirección indica la dirección principal. Los esfuerzos de

tracción se representan por medio de una flecha en lugar de por una línea. Téngase en cuenta que se considera que las compresiones son negativas. La opción de esfuerzos tangenciales relativas da una indicación de la proximidad del punto de esfuerzo a la envolvente de rotura. El esfuerzo tangencial relativo, τ_{rel} , se define como:

$$\tau_{rel} = \frac{\tau}{\tau_{max}} \quad (13)$$

donde τ es el valor máximo del esfuerzo tangencial (es decir, el radio del círculo de tensiones de Mohr). El parámetro τ_{max} es el valor máximo del esfuerzo tangencial que actuaría si el círculo de Mohr se llevara a rotura incrementando su radio exterior pero manteniendo constante la tensión principal intermedia.

4.23.4.2 ESFUERZOS TOTALES

Total stresses son los esfuerzos totales (es decir, los esfuerzos efectivos + las presiones intersticiales activas) en la geometría al final del paso de cálculo actual, y se representan sobre un gráfico de la geometría. Esta opción puede seleccionarse en el submenú *Stresses*.

Los esfuerzos totales pueden ser representadas como Direcciones principales (*Principal directions*) (esfuerzos principales), esfuerzos medios (*Mean*) (p) o esfuerzos desviadores (*Deviatoric*) (q) seleccionando la opción apropiada en el recuadro de presentaciones de la barra de herramientas. Los esfuerzos medios y desviadores pueden ser representados como Curvas de Nivel (*Contours*) o como Sombreados (*Shadings*).

Los esfuerzos totales principales se representan como cruces en los puntos de tensión de los elementos. Cuando se utilizan elementos de 15 nodos se muestran tres puntos de tensión por elemento. Cuando se utilizan elementos de 6 nodos sólo se muestra un punto por elemento, que representa el promedio de los esfuerzos principales totales en el elemento. La longitud de cada línea representa la magnitud del esfuerzo principal y la dirección indica la dirección principal. Los esfuerzos que representan tracción están indicados por medio de una flecha en lugar de por una línea. Téngase en cuenta que se considera que las compresiones son negativas.

4.24 ESTRUCTURAS E INTERFACES

Por defecto, las estructuras (es decir, placas, geomallas, anclajes) y las interfaces se representan con el resto de la geometría. Con carácter opcional, dichos objetos pueden ser ocultados o reactivados mediante la opción de Estructuras (*Structures*) del submenú *Geometry*. Los resultados correspondientes a estos tipos de objetos pueden obtenerse haciendo doble clic sobre los mismos. Como resultado de ello, se muestra un nuevo gráfico en el que aparece únicamente el objeto seleccionado. Al mismo tiempo, el menú de opciones es modificado para facilitar la selección de los resultados propios del objeto en cuestión.

Si se desea visualizar resultados de múltiples estructuras del mismo tipo en un único gráfico, todos estos objetos, excepto el último, deberán ser seleccionados por medio de un solo clic mientras se mantiene apretada la tecla de las mayúsculas (*Shift*); al seleccionar el último objeto deberá hacerse doble clic.

4.24.1 PLACAS

PLAXIS proporciona información sobre los desplazamientos y los esfuerzos correspondientes a las placas activas en el modelo. A partir del submenú *Deformations*, el usuario puede seleccionar los desplazamientos absolutos acumulados, $|u|$, al final del paso de cálculo, o las componentes individuales de los desplazamientos acumulados u_x y u_y . En el submenú *Forces* se encuentran disponibles las opciones de Esfuerzos axiales (*Axial forces*). Esfuerzos cortantes (*Shear forces*) y Momentos Flectores (*Bending moments*). En el caso de los modelos axisimétricos el submenú *Force* incluye también los esfuerzos en dirección perpendicular al plano (*Hoop forces*). Estos esfuerzos son los reales al final del paso de cálculo.

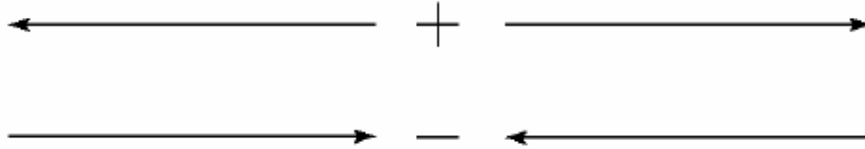


Figura 4-29. Convención de signos para esfuerzos axiales y esfuerzos perpendiculares al plano en placas, geomallas y anclajes

4.25 TABLA DE RESULTADOS



PLAXIS proporcionará los valores numéricos de los resultados correspondientes a cada gráfico en forma de tabla sin más que hacer clic en el botón de *Table* de la barra de herramientas o bien seleccionando la opción de *Table* en el menú *View*. Como resultado de ello, se abrirá una nueva ventana en la cual los valores numéricos de las variables correspondientes se presentarán en unas tablas. Al mismo tiempo se adaptará el menú para permitir la selección de otros resultados para ser vistos en tablas.

TABLAS DE DESPLAZAMIENTOS

Al seleccionar la opción de *Table* cuando está siendo visualizado un gráfico de desplazamientos aparece una tabla en el que se presentan las componentes de los vectores de desplazamiento de cada nodo. Los desplazamientos totales u_x y u_y son los desplazamientos acumulados de todas las fases de cálculo anteriores, mientras que los desplazamientos incrementales Δu_x y Δu_y son los desplazamientos incrementales en el paso actual.

TABLAS DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

Cuando se miran tablas de tensiones o deformaciones en elementos de suelo, las tablas muestran las componentes cartesianas en todos los puntos de tensión. Téngase en cuenta que las compresiones se consideran negativas.

La columna de *Status* de la tabla de tensiones indica si un punto de tensión es un punto Elástico (*Elastic*), un punto Plástico (*Plastic*), un punto de Tracción (*Tension*), un punto de Vértice (*Apex*), un punto de Endurecimiento (*Hardening*), o un punto de Casquete (*Cap*). Un punto *Elastic* es un punto de tensión en régimen elástico. Un punto *Plastic* es un punto de tensión en el que el círculo de tensiones de Mohr toca la envolvente de rotura de Coulomb. Un punto de *Tension* es un punto de tensión que ha

sufrido rotura por tracción según el criterio de supresión de tracciones. Un punto de Vértice (*Apex*) es un punto de tensión en el vértice de la envolvente de rotura. Un punto de endurecimiento (*Hardening*) es un punto de tensión en el que el estado tensional corresponde al máximo ángulo de fricción que ha sido alcanzado con anterioridad (sólo en el modelo de Suelo con Endurecimiento). Un punto de Casquete (*Cap*) es un punto de tensión en el que el estado tensional es equivalente al producido por la aplicación de la presión de preconsolidación, es decir, el máximo nivel de tensiones que ha sido alcanzado con anterioridad.

TABLAS DE NODOS Y PUNTOS DE TENSION

Cuando se muestran tablas de tensiones o deformaciones, el menú incluye el submenú *Geometry*. Este submenú contiene opciones para ver la posición y la numeración de los nodos y los puntos de tensión de los elementos. La opción de Puntos de tensión de los elementos (*Element stress points*) muestra también el módulo de rigidez elástica efectivo, E , la cohesión efectiva, c , y el grado de sobreconsolidación efectivo, OCR . Este dispositivo resulta particularmente interesante cuando se utilizan modelos en los que la rigidez o la cohesión se incrementan con la profundidad o cuando se utilizan modelos con una rigidez dependiente del estado tensional. En la tabla se muestra qué rigidez y cohesión han sido efectivamente aplicadas en todos los puntos de tensión en el paso de cálculo actual.

TENSIONES Y ESFUERZOS EN INTERFACES Y ESTRUCTURAS

Cuando se miran tablas de tensiones de interfaz, se presentan en la tabla las tensiones normales efectivas (σ'_n), las tensiones tangenciales (τ), la presión intersticial activa (*active*) y el exceso de presión intersticial (*pexcess*) en todos los puntos de tensión de interfaz. Cuando se miran tablas de esfuerzos de placas, se presenta en la tabla el esfuerzo axil (N), el esfuerzo cortante (Q) y el momento flector (M) en los nodos. En el caso de las geomallas, sólo se presenta en la tabla el esfuerzo en su dirección axial (N).

En el caso de los anclajes no hay más tabla disponible que aquella que es presentada después de hacer doble clic sobre el anclaje en la geometría.

4.26 CURVAS DE CARGA-DESPLAZAMIENTO Y TRAYECTORIAS DE TENSIONES

El programa Curvas (*Curves*) puede ser utilizado para el trazado de curvas de carga-desplazamiento o de tiempo-desplazamiento, diagramas esfuerzo-deformación y trayectorias de tensión o de deformación de puntos previamente seleccionados de la geometría. En estas curvas se visualiza la evolución de ciertas variables de interés a lo largo del proceso de cálculo, lo que proporciona una mejor comprensión del comportamiento global y local del suelo.

4.26.1 EL PROGRAMA DE CURVAS



Este icono representa el programa de Curvas (*Curves*). El programa de Curvas contiene todos los dispositivos para generar curvas de carga-desplazamiento, trayectorias de tensión y diagramas esfuerzo-deformación.

Al iniciar el programa de Curvas deberá elegirse entre la selección de un gráfico ya existente y la creación de un gráfico nuevo.

Cuando se selecciona Gráfico nuevo (*New chart*) aparece la ventana de Generación de curvas (*Curve generation*) en la que pueden establecerse los parámetros para la

generación de una curva (Sección 6.2). Cuando se selecciona Gráfico existente (*Existing chart*), la ventana de selección permite elegir de una manera rápida uno de los cuatro gráficos más recientes. Si se ha de seleccionar un gráfico ya existente que no aparezca en la lista, puede utilizarse la opción de <<<More files>>> (más ficheros). Como resultado de ello, aparece el gestor de ficheros general que permite al usuario navegar a través de todos los directorios que están disponibles y seleccionar el fichero de gráfico PLAXIS deseado (*.G## en donde ## es un número cualquiera entre 00 y 99). Después de la selección de un proyecto existente, el gráfico que corresponda será presentado en la ventana principal. La ventana principal del programa de Curvas contiene los elementos siguientes (Figura 4-30):

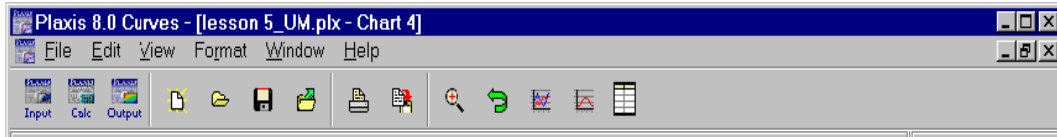


Figura 4-30. Barra de herramientas de la ventana principal del programa de Curvas

4.26.2 GENERACIÓN DE CURVAS

Se puede generar una nueva curva iniciando el programa de Curvas (*Curves*) o bien seleccionando la opción de *New* en el menú *File*. Como resultado de ello, aparece el gestor de ficheros y se ha de proceder a la selección del proyecto para el cual se ha de generar la curva. Después de la selección del proyecto aparece la ventana de Generación de curvas (*Curve generation*), tal como se muestra en la Figura 4-31.

Se muestran dos recuadros similares con diversos elementos, uno para el eje de las *x* y el otro para el eje de las *y*. En general, el eje de las *x* corresponde al eje horizontal y el eje de las *y* corresponde al eje vertical. Sin embargo, esta convención puede ser modificada utilizando el dispositivo de Intercambiar ejes (*Exchange axes*) en la ventana de Configuración del marco (*Frame settings*). Para cada uno de los ejes, deberá efectuarse una combinación de selecciones para definir qué variable es llevada sobre dicho eje. Puede seleccionarse la opción de Invertir signo (*Invert sign*) para multiplicar por -1 todos los valores de la variable *x* o de la variable *y*. Esta opción puede ser utilizada, por ejemplo, para la representación de tensiones (que son generalmente negativas) como valores positivos.

La combinación de los valores de la variable *x* y de la variable *y* de los pasos de cálculo, forman los puntos de la curva a trazar. El número de puntos de la curva corresponden al número de pasos de cálculo más uno. El primer punto de la curva (correspondiente al paso 0) es numerado con el 1. Cuando ambas variables han sido definidas y se pulsa el botón de *OK*, se genera la curva y se presenta en una ventana de gráficos.

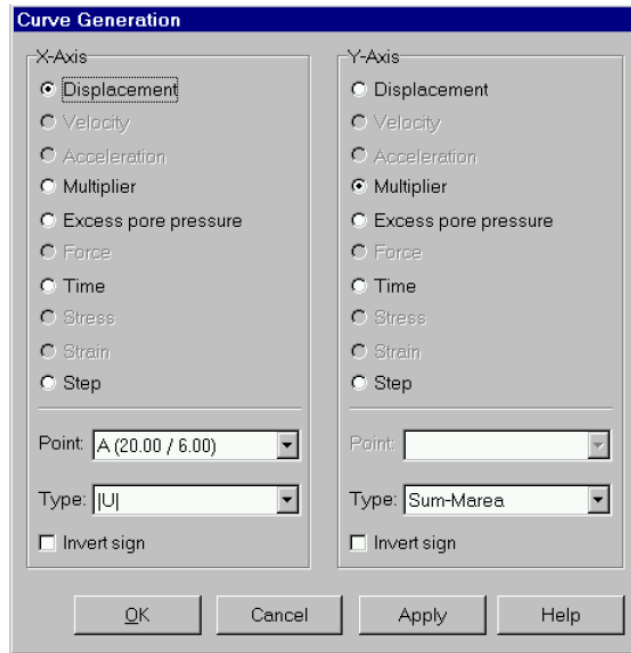


Figura 4-31. Ventana de generación de curvas

CAPÍTULO 5. RESULTADO DE LOS MODELOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de este proyecto de grado y, con el fin de alcanzar los objetivos propuestos, se plantean a continuación dos problemas que pueden presentarse en la práctica de la geotecnia.

Cada uno de estos problemas será modelado tanto en el software PLAXIS como en el SLOPE/W. A partir de los resultados obtenidos para cada caso se plantearán las ventajas y desventajas de cada método y posteriormente se plantearán las conclusiones y recomendaciones respectivas.

La información de los estudios geotécnicos realizados a cada uno de los problemas que se presentan a continuación fue proporcionada por la empresa *Geotecnología Ltda.*

A continuación en este capítulo se hará una descripción de los problemas, así como se presentarán los resultados obtenidos de los modelos hechos para cada uno de ellos tanto en el software PLAXIS como en el SLOPE/W.

5.2 ESTUDIO Y DISEÑO GEOTÉCNICO: ESTABILIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO PR9 + 0200 CARRETERA CÚCUTA – SAN FAUSTINO – LA CHINA RUTA 55 NS 09

5.2.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Los problemas inherentes a los deslizamientos de los suelos que conforman la banca y los taludes de la vía se presentaron en el sitio PR 9+0200 de la ruta 55 NS 09, carretera Cúcuta – San Faustino – La China, en el sector de la finca El Peñón, municipio de Cúcuta, departamento de Norte de Santander. La carretera comunica la capital del departamento de Norte de Santander con el Municipio de San Faustino en la frontera de Colombia con Venezuela.

El proyecto consiste en el estudio y diseño de las obras de estabilización de la banca y taludes de la vía en el sitio. En este sector la vía ha presentado en varias ocasiones problemas de deslizamientos importantes de la banca. Con frecuencia se desliza la totalidad de la banca de la vía en un tramo de aproximadamente 160 metros de longitud, quedando fuera de servicio por varios días.

El problema actual existe desde el mismo momento de la construcción de la vía y se agravó en el mes de febrero de 2005, debido a las precipitaciones extraordinarias relacionadas con la llegada de un frente frío.

En varias ocasiones han ocurrido deslizamientos, los cuales han impedido el tránsito normal por la vía.

El Instituto Nacional de Vías ha modificado la localización de la banca, y construido variantes. En una oportunidad se construyó una variante de más de 2 kilómetros de longitud por encima de la corona del deslizamiento. Posteriormente a la construcción de la variante se presentó un nuevo deslizamiento, el cual afectó la variante.



Foto 1. Deslizamiento en el sitio Cúcuta - La china.



Foto 2. Panorámica nivel alto del río Pamplonita y falla de la vía.

El sector de vía está conformado mediante rellenos a media ladera, sobre suelos coluviales susceptibles a deslizamientos. La inestabilidad está relacionada con el deslizamiento de un depósito aluvial en una terraza alta arriba de la corona del deslizamiento actual y del coluvión resultante de los deslizamientos superiores activados por la infiltración de aguas lluvias y corrientes estacionarias superficiales, las cuales no poseen cauces definidos y se concentran en la zona del deslizamiento; Adicionalmente se presenta socavación del pie del talud provocada por el río Pamplonita.

El objeto del estudio es analizar las causas y mecanismos del deslizamiento y diseñar las obras de estabilización.

5.2.2 GEOLOGÍA

En la zona de estudio la vía transcurre básicamente sobre depósitos coluviales y suelos removidos por el deslizamiento, los cuales descansan sobre lodolitas y limolitas grises laminadas, fracturadas y sueltas de la formación Carbonera.



Foto 3. Afloramiento de lodolitas grises, laminadas y fracturadas, ligeramente plegadas en la zanja norte que limita el deslizamiento.

Las condiciones estructurales de la zona de estudio son complejas ya que se presentan fallas de cabalgamiento y pliegues invertidos, lo cual ha generado un alto fracturamiento de las formaciones presentes en la zona y facilitan la generación de grandes fenómenos de remoción en masa y por ende coluviones.

DEPÓSITOS DE DESLIZAMIENTO

Se denominan así a todos aquellos materiales que han sido desplazados recientemente por fenómenos de remoción en masa. Comprenden los deslizamientos activos e inactivos que se presentan en la zona de estudio.

En el sitio los depósitos de deslizamientos están constituidos de grandes bloques de areniscas blancas, cuarzosas, cremas y verdes glauconíticas, muy angulares, con formas irregulares en matriz de gravas de lodolitas y limolitas grises fracturadas y húmedas.

Particularmente en la zona de estudio los deslizamientos presentan varios factores que favorecen su desarrollo como son: presencia de litologías finas afectadas por fracturamiento, plegamiento y fallas geológicas, presencia de capas competentes de areniscas muy fracturadas en las partes altas del talud, gran capacidad de infiltración de los suelos y transporte de aguas subterráneas, presencia de drenajes estacionarios

sin cauce definido que drenan a la zona del deslizamiento y la acción de socavación en el pie del movimiento por el Río Pamplonita.

DEPÓSITOS DE COLUVIÓN (Qc)

Constituyen los depósitos de ladera que han sido removidos en el pasado cercano de su fuente original y están constituidos por grandes bloques de areniscas blancas, duras, cremas y verdes muy angulares, irregulares con disposición caótica en matriz de gravas de lodolitas y limolitas grises fracturadas. Se localizan en grandes áreas de la zona de estudio siendo principalmente significativo el localizado en la ladera sobre la que transcurre la vía, desde el PR 9+070 hasta el PR 9+560.



Foto 4. Depósito de Coluvión localizado en la parte alta de la zona del deslizamiento, el cual presenta en la parte superior una corona de desprendimiento antigua.

DEPÓSITOS ALUVIALES

Bloques, Cantos, Guijos y gravas de areniscas grises subredondeados, lodolitas grises, calizas y algunas rocas ígneas en matriz limo arenosa gris, depositados en el cauce de las quebradas Principales y el Río Pamplonita. Los depósitos aluviales están representados principalmente por aluvial reciente, planicie de inundación y terrazas aluviales bajas.



Foto 5. Panorámica del sector norte del deslizamiento, foto en dirección al oriente. Al fondo se observan los depósitos aluviales del Río Pamplonita.

CONDICIONES DE LA SUBRASANTE Y EL TERRAPLÉN

La subrasante de la vía se encuentra en su totalidad sobre depósitos de coluvión constituidos por bloques, cantos y hasta gravas de areniscas y lodolitas grises, duras, fracturadas, húmedas y en estado suelto.

5.2.3 HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

La influencia de eventos meteorológicos que salen del marco hidrológico local de la zona en estudio es muy marcada en zonas del Piedemonte de la cordillera.

Eventos como el presentado en las primeras semanas del mes de Febrero de 2005, se caracterizan por presentar precipitaciones muy fuertes durante tiempos prolongados, contribuyendo a la saturación súbita de las masas de suelo y consecuentemente a la falla de taludes.

Se analizaron los parámetros hidrológicos e hidráulicos de la zona para evaluar el comportamiento hídrico del río Pamplonita y establecer la profundidad máxima de socavación esperada el lecho y riberas del río.

Una vez realizados todos estos estudios y tras un análisis de la información recolectada, se llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El caudal máximo calculado para el río Pamplonita en el sitio del deslizamiento es de: 693 m³/seg.
- La altura de agua máxima es de 5.2 Metros.

- La velocidad máxima calculada del agua es de 3.8 m/seg.
- La socavación teórica esperada en el lecho del río Pamplonita es de 2.39 metros.
- Debe esperarse socavación fuerte de los materiales de suelo suelto de relleno en el pie del deslizamiento, junto al río Pamplonita.

5.2.4 SONDEOS Y ENSAYOS DE CAMPO

Se realizaron sondeos empleando equipo de perforación a rotación con punta de diamante y realizando ensayos de penetración estándar cada 3.0 metros

Para la realización de los sondeos se utilizó un equipo operado por un motor de 16 HP, polea y pesa sobre una guía tubular.

Número total de sondeos: 3

Ensayos de campo: Penetración estándar (SPT) Norma AS TM D 1586, I.N.V.E. 111.
Tipo de muestras obtenidas: Muestras en tubo partido.

Una vez realizados los sondeos se realizó la descripción detallada de las muestras obtenidas de acuerdo a los siguientes criterios:

- Litología
- Textura
- Tamaño de los granos
- Minerales presentes
- Estructura
- Color
- Presencia de materiales orgánicos y raíces
- Porosidad
- Consistencia o resistencia

Para la descripción de los perfiles de los sondeos se utilizó el Software Geotechnical Graphics versión 5.0. Este Software comercial permite presentar en forma gráfica la información de los sondeos incluyendo los resultados de los ensayos de campo y laboratorio, la formación geológica y la localización de los niveles freáticos.

ENSAYOS DE CAMPO

Ensayos de penetración estándar SPT

Se realizaron ensayos de penetración estándar utilizando la norma ASTM D 1586, equivalente a la norma I.N.V.E. 111.

- Peso del martillo: 140 libras
- Altura de caída: 76 centímetros
- Penetración: 3 intervalos de 15 centímetros cada uno (6")
- N de diseño: Sumatoria de los golpes de los últimos 30 centímetros (12")
- Diámetro exterior del tubo: 50.8 mm
- Diámetro interior del muestreador en la punta: 34.93 mm
- Longitud del tubo: 75 centímetros
- Sistema de hincado: Malacate y polea
- Motor del equipo: B & S 16 HP

- Rechazo: Más de 50 golpes para 15 centímetros (6")



Foto 6. Equipo de perforación a rotación en el sitio del sondeo 1

5.2.5 ENSAYOS DE LABORATORIO

Las muestras obtenidas fueron transportadas al laboratorio de suelos de Geotecnología Ltda., en la ciudad de Bucaramanga.

Después de descritas las muestras obtenidas en los sondeos se identificaron las muestras típicas y se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

Tabla 1. Ensayos de laboratorio realizados.

ENSAYO	NORMA	No. DE ENSAYOS
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422-63 – AASHTO T88 INV-E. 123	4
Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) en suelo, roca y mezcla de suelo-agregado	ASTM D 2216 INV-E. 122	4
Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	ASTM D 4318 – AASHTO T 89-90 INV-E. 126	3
Clasificación de suelos	ASTM D 2487	4
Corte directo drenado	ASTM D 3080 – AASHTO T236 – INV-E 154	2

Los resultados obtenidos de estos exámenes fueron los siguientes:

Tabla 2. Resultados de los ensayos de laboratorio realizados.

SONDEO	PROF. (m)	% W	% FINOS	% L.L	% L.P	% I.P	CLASIFICACIÓN SUCS
1	6.90	12.61	50.32				CL
2	8.00	8.63	25.24	24.29	18.18	6.11	SC
3	5.20	15.07	57.50	30.98	17.92	13.06	CL
3	11.50			28.99	20.53	8.46	CL

Tabla 3. Resultados del ensayo de Corte Directo

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	COHESIÓN (Kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
2	8.0	0.011	27.976
3	4.0	0.189	14.877

Convenciones:

- W = humedad%
- Finos = pasantes del tamiz ASTM 200
- L.L. = Límite Líquido
- L.P. = Límite Plástico
- I.P. = Índice Plástico
- S.U.C.S. = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

5.2.6 CÁLCULO DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES

Para el análisis del modelo geotécnico del deslizamiento se utilizó, como ya es sabido, el software para computador SLOPE/W, Versión 5 de GEO-SLOPE International Ltd, Calgary Alberta, Canadá. Este programa es una solución gráfica de 32 bits, la cual opera dentro de la interfase gráfica de Microsoft Windows.

De igual manera se realizaron análisis de esfuerzo-deformación para analizar el comportamiento no lineal de la masa de suelo. Para llevar a cabo este análisis se empleó el software PLAXIS versión 8.0, desarrollado por la Universidad de Delft, en Holanda. PLAXIS es un software que emplea el método de los Elementos Finitos para calcular los esfuerzos y deformaciones en estructuras geotécnicas.

5.2.6.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA EQUILIBRIO LÍMITE

Aunque el programa permite trabajar con doce diferentes métodos de análisis, para objeto del presente estudio se trabajó conjuntamente con los siguientes cuatro métodos:

- Método ordinario o de Fellenius
- Método Bishop simplificado
- Método de Janbú simplificado
- Método de Spencer

Los resultados de los factores de seguridad se presentan para cada uno de los métodos indicados.

GEOMETRÍA Y ESTRATIGRAFÍA

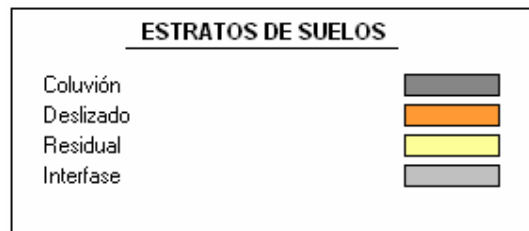
El modelo geotécnico se trabajó con los tipos de material de suelo y roca identificados en campo. Las propiedades de los suelos y rocas fueron obtenidas en el laboratorio de Geotecnología Ltda., en Bucaramanga.

SUPERFICIES DE FALLA

Se empleó la opción de auto-localización de superficie crítica de falla, para lo cual se analizan 1331 superficies probables dentro de la masa de suelo.

PRESIONES DE PORO

Se supuso la masa de suelo saturada como escenario crítico.



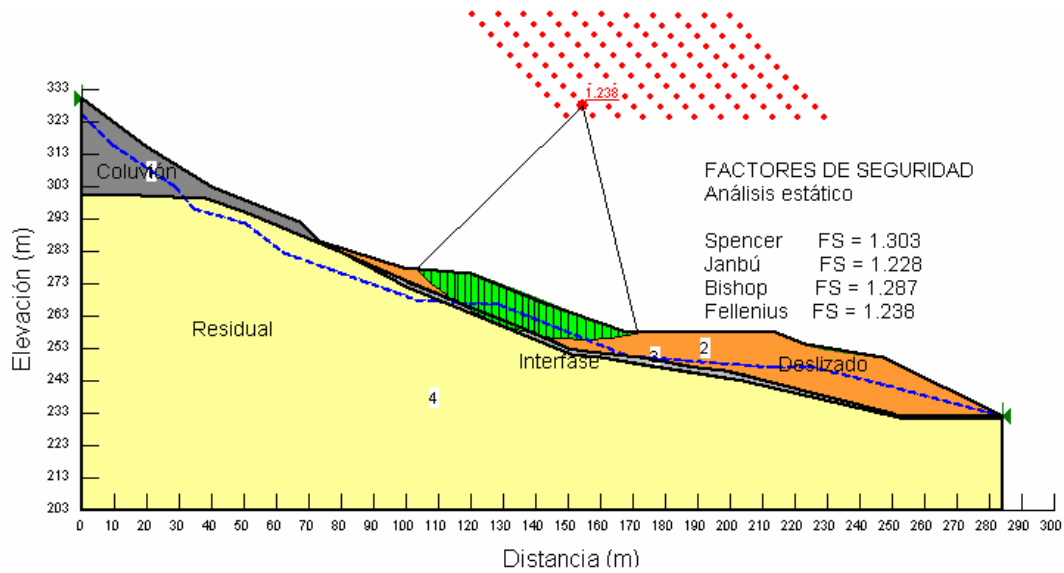


Figura 5-1. Resultados del análisis por SLOPE/W

RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS

Tabla 4. Factores de seguridad obtenidos

MÉTODOS DE ANÁLISIS	FACTORES DE SEGURIDAD
Método de Fellenius	1.238
Método de Bishop	1.287
Método de Janbú	1.228
Método de Spencer	1.303

Vemos que la falla presentada en el sitio estudiado es una falla compuesta con componentes rotacionales y traslacionales, influenciada por factores geológicos.

Las superficies de falla obtenidas por medio de este procedimiento presentan los valores críticos en el contacto de la masa coluvial blanda con el suelo residual de mayor resistencia.

Hay que tener en cuenta que la saturación del perfil es un elemento determinante en la estabilidad de la ladera. En las perforaciones geotécnicas realizadas no se detectaron niveles freáticos en el perfil, el modelo se analizó con saturación parcial de la masa de suelo; debido a que la falla ocurrió después de los eventos lluviosos ocurridos la segunda semana del mes de febrero de 2005.

5.2.6.2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

A continuación se establecerá el modelo por medio del análisis de los elementos finitos para estudiar la estabilidad del talud.

Además, para analizar las obras propuestas en el diseño, y estudiar su comportamiento bajo diversas condiciones, se analizará el perfil geotécnico como un

medio continuo cuyo comportamiento se analiza en particiones de este medio continuo, estudiando su comportamiento no lineal de esfuerzo y deformación.

Este análisis permite determinar la interacción suelo-estructura, y por consiguiente las ventajas o desventajas que el diseño planteado pueda tener.

PERFIL GEOTÉCNICO

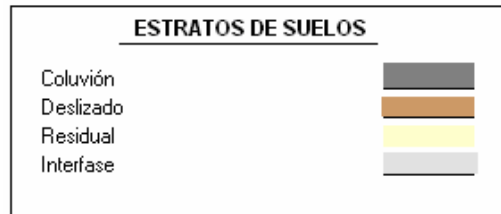
El modelo geotécnico se trabajó con los tipos de material de suelo y roca identificados en campo. Las propiedades de los suelos y rocas fueron obtenidas en el laboratorio de Geotecnología Ltda., en Bucaramanga.

PROPIEDADES DE SUELO

Las propiedades de los suelos usadas en un análisis esfuerzo-deformación son las siguientes:

- Peso unitario
- Ángulo de fricción
- Ángulo de dilatación
- Cohesión
- Permeabilidad primaria y secundaria
- Rigidez (Módulo de Young)
- Coeficiente de Poisson

Hay que aclarar que los valores del coeficiente de Poisson ν y de los módulos de elasticidad E_{ref} fueron tomados de un rango de valores sugeridos por Joseph Bowles en su libro *Foundation análisis and design* en las tablas 2-7 y 2-8, páginas 123 y 125.



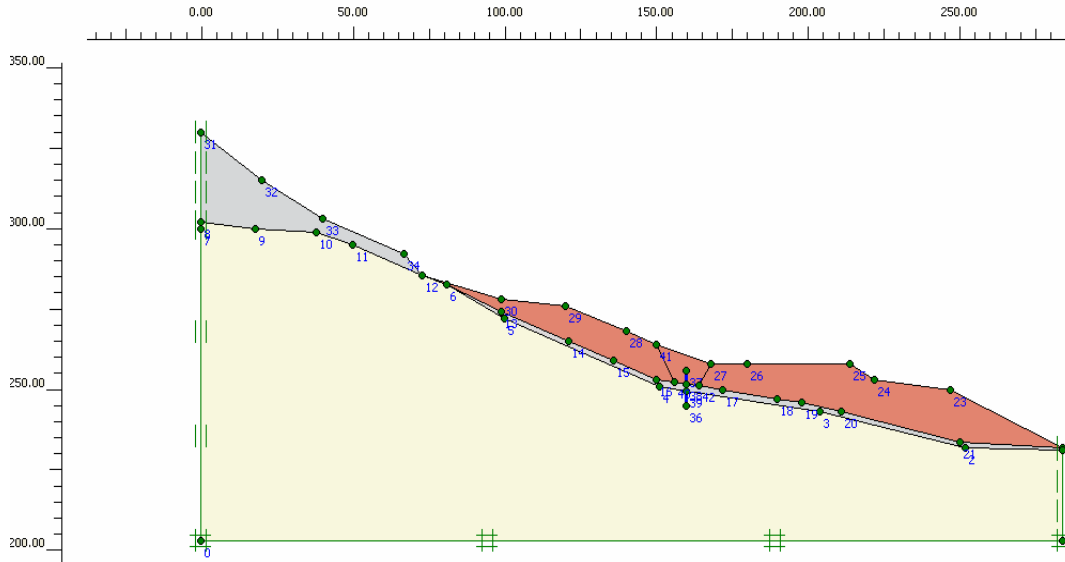


Figura 5-2. Geometría y estratigrafía del modelo

Tabla 5. Parámetros del suelo utilizados en el análisis de esfuerzo – deformación

ID	NOMBRE	TIPO	γ_{Unsat}	γ_{Sat}	k_x	k_y	ν	E_{ref}	C_{ref}	ϕ
			[kN/m ³]	[kN/m ³]	[m/día]	[m/día]				
1	Deslizado	Drenado	19.0	20.0	2.00E-04	5.00E-03	0.30	3500	18	20
2	Interfase	Drenado	17.0	17.5	1.00E-08	1.00E-08	0.40	5000	20	10
3	Residual	Drenado	21.0	21.5	5.00E-06	5.00E-06	0.32	76600	20	28
4	Coluvión	Drenado	20.1	21.0	1.00E-06	1.00E-06	0.30	25000	19	15

MODELO CONSTITUTIVO DE LOS MATERIALES

Se utilizó el modelo de Mohr-Coulomb para determinar el comportamiento de los materiales y los paquetes de ecuaciones que determinan los estados de esfuerzos.

Para calcular el factor de seguridad de la masa de suelo se empleó el modelo de reducción de fricción y cohesión ($\phi - c$ reduction), el cual consiste en disminuir los parámetros de resistencia al cortante hasta llegar al estado crítico de esfuerzos que producen una falla en el talud.

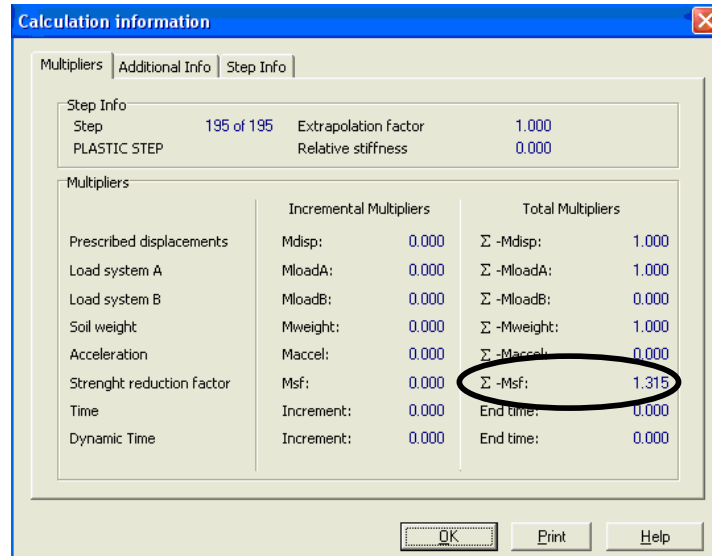


Figura 5-3. Cálculo del factor de seguridad

ELEMENTOS Y MALLADO

Se emplearon elementos triangulares de 15 nodos, es decir, el continuo se dividió en clusters triangulares con 15 puntos internos donde se aplicó el respectivo procedimiento matemático para calcular los esfuerzos y deformaciones.

El mallado es una función automática del software. Se ha seleccionado la mayor densidad posible de elementos dentro del modelo, haciendo refinamiento automático en los contornos de las estructuras planteadas e interfaces de estratos de suelo.

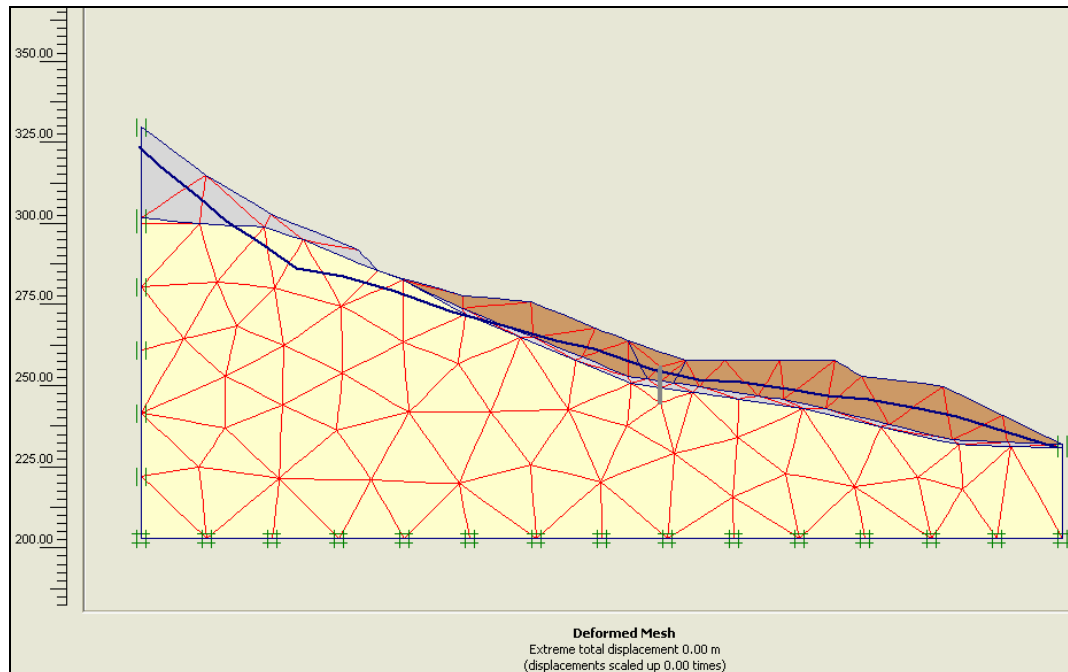


Figura 5-4. Malla de elementos finitos

FASES DE CONSTRUCCIÓN

El modelo de elementos finitos pretende simular las fases constructivas de las obras recomendadas, a saber:

- Estado original del talud. Deslizamiento ocurrido.
- Excavación para la construcción de la obra.
- Construcción de la obra planteada y relleno con suelo perteneciente al coluvión.

Fase 1. Estado original del talud.

Los cálculos muestran la tendencia de la masa de suelo coluvial a deslizar sobre el estrato residual. Estos desplazamientos son detonados por fuerzas gravitacionales propias de las masas de suelo saturado.

La inclinación del estrato residual es un factor que acelera el proceso de movimiento. Los valores de desplazamiento máximo dentro del modelo superan los 2.0 metros en la corona del coluvión.

La superficie de falla presenta componentes rotacionales en la corona y pie del movimiento, esto se evidencia en la grada en el inicio del movimiento, y en el abultamiento presentado en el pié del mismo.

La componente traslacional de movimiento se encuentra en el contacto coluvión – suelo residual, donde la trayectoria del deslizamiento es controlada por la interfase de contacto.

Los esfuerzos calculados en el modelo superan los 1600KN/m² en el fondo del modelo (cota 200msnm), y los 150 KN/m² en la superficie de falla bajo el sitio actual de la vía.

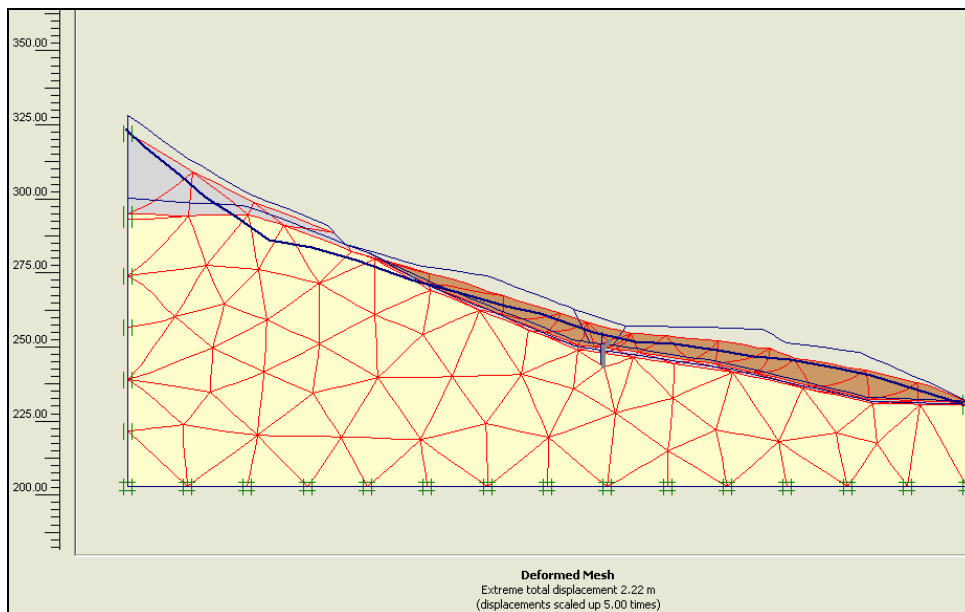


Figura 5-5. Malla de elemento finitos deformada para la Fase 1

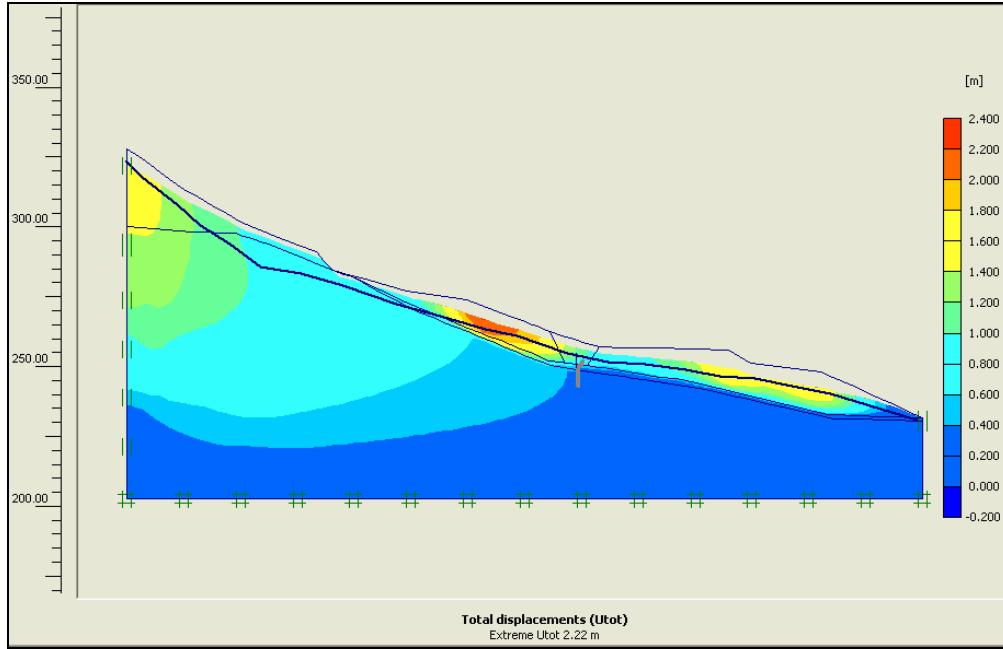


Figura 5-6. Contornos relativos de desplazamiento dentro de la masa de suelo. Los colores amarillos y rojos indican deformaciones mayores a un metro. Se observa que estos ocurren talud arriba de la vía actual.

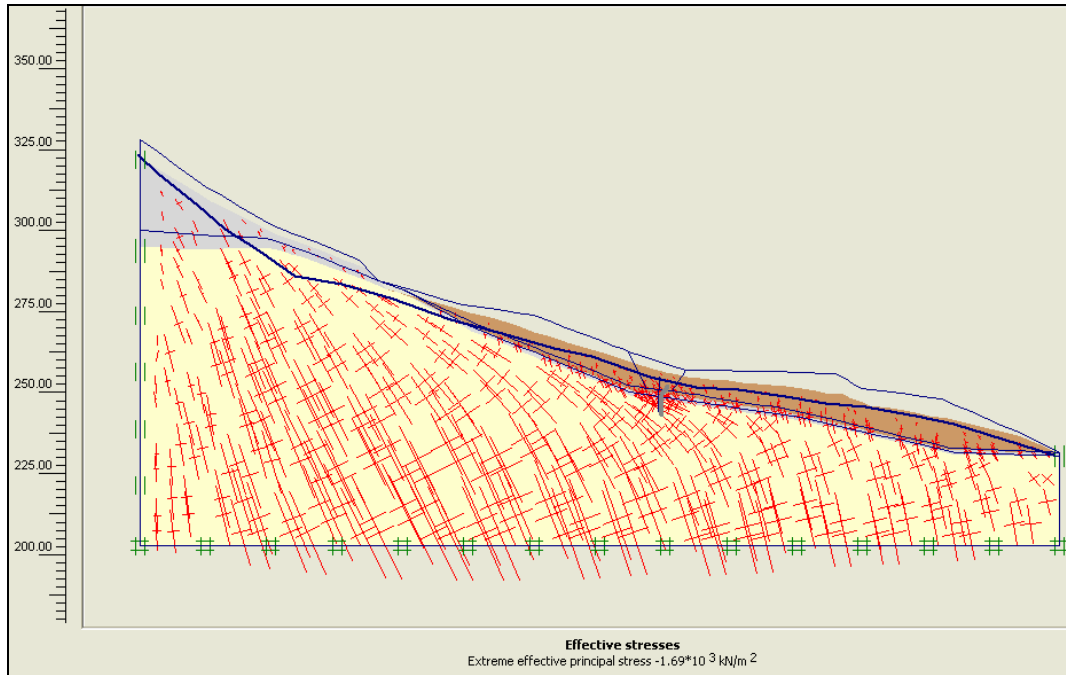


Figura 5-7. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = $1.69 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$

Fase 2. Excavación para construir la estructura de estabilización.

La excavación consiste en un cajón trapezoidal paralelo a la vía actual. Los cálculos realizados evidencian claramente la desestabilización de la masa coluvial arriba de la excavación, debido a la pérdida de esfuerzos de confinamiento.

Los desplazamientos y trayectorias de esfuerzos se concentran en el contacto del coluvión – residual y se enfilan ladera abajo, generando una probable superficie de falla con pié en el corte superior de la excavación. Los desplazamientos esperados en esta masa varían entre 1 y 2 metros.

Sobre el tramo de coluvión abajo de la excavación los esfuerzos y deformaciones disminuyen considerablemente al remover considerablemente los valores de carga sobre el pié del deslizamiento.

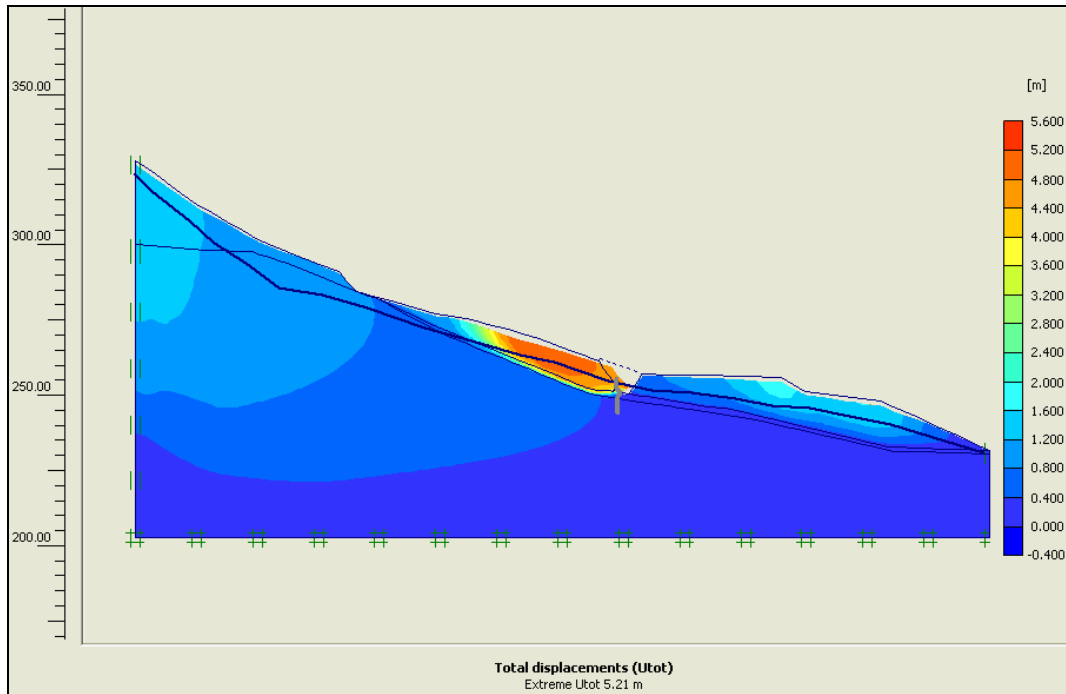


Figura 5-8. Contornos relativos de deformación en el modelo. El coluvión excavado presenta una gran posibilidad de falla, especialmente si se encuentra en estado saturado o muy húmedo.

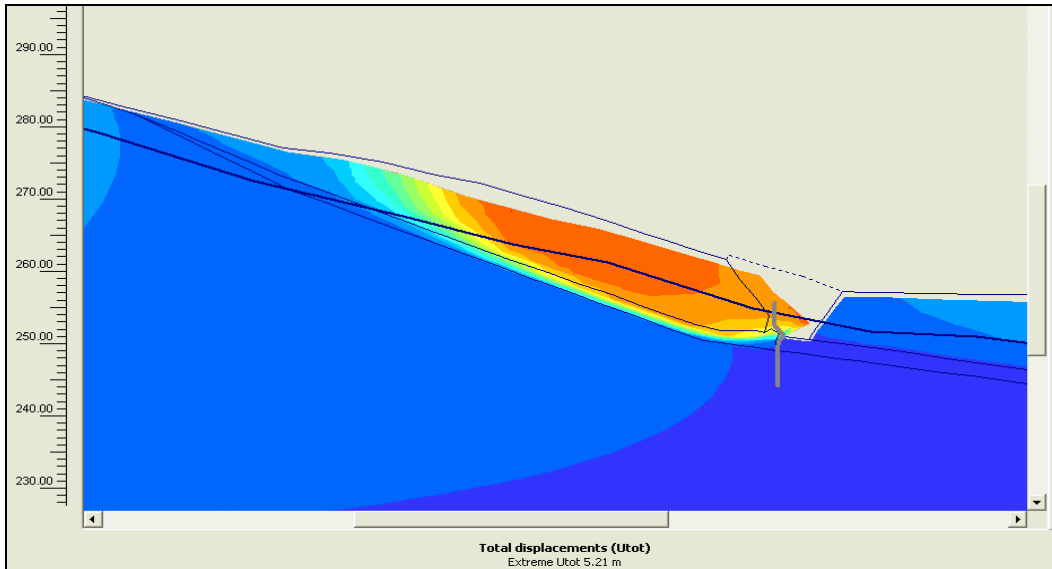


Figura 5-9. Detalle de los desplazamientos en el área de la excavación

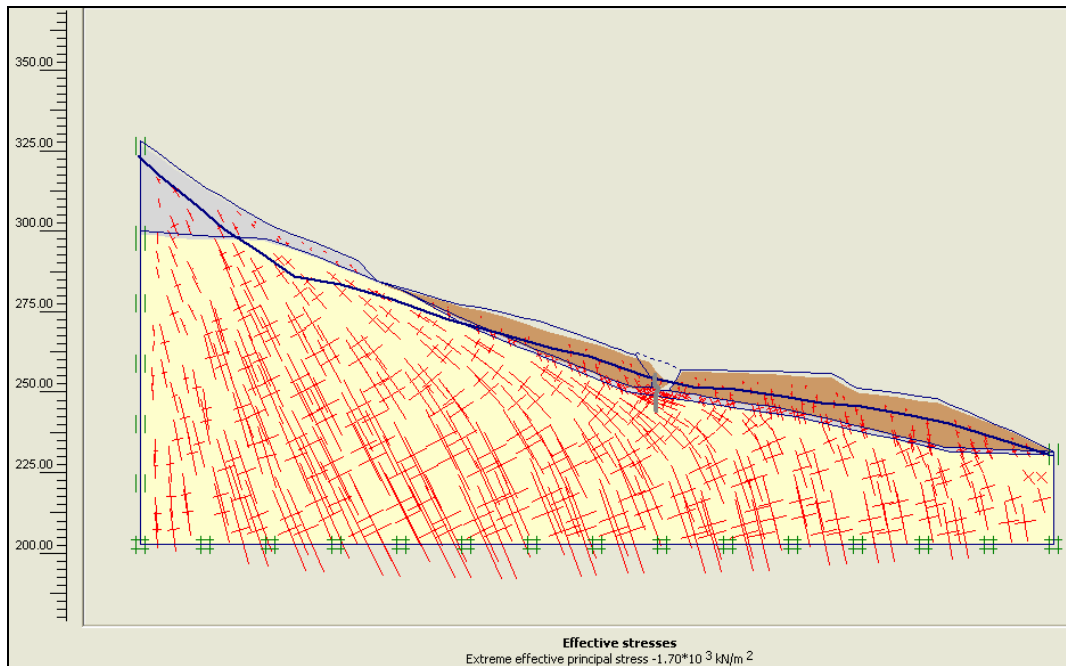


Figura 5-10. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = $1.70 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$

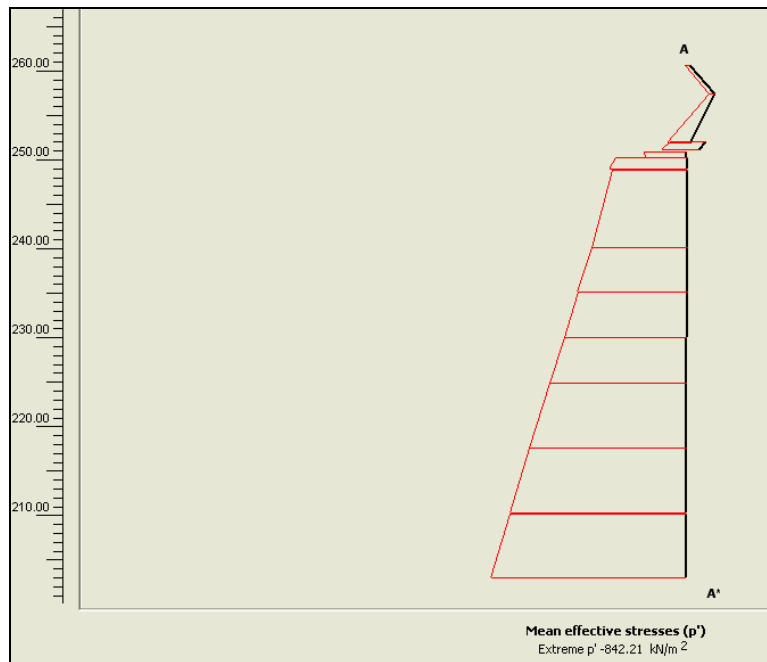


Figura 5-11. Sección transversal de esfuerzos. Distribución no lineal debido a la estratificación del suelo

Fase 3. Construcción de la estructura de estabilización.

La construcción de una estructura de alta rigidez arriba de la vía tiene por objeto disminuir los esfuerzos y desplazamientos del coluvión en el área aledaña a la vía.

La estructura consiste en una pantalla de concreto ciclópeo reforzado, de 9.0 metros de altura, empotrada 4.0 metros dentro del estrato residual para garantizar su estabilidad.

Para modelar este elemento se calcularon sus propiedades inerciales y elásticas, las cuales fueron incluidas dentro del software.

La concepción de esta estructura es la de levantar la superficie de falla, imponiéndole una restricción que simule un levantamiento o prolongación de la roca que obligue a la zona inestable a salir a superficie antes de llegar a la zona de la vía.

Al correr el modelo se observa que los desplazamientos disminuyen considerablemente ladera abajo de la estructura. En los metros superiores a la estructura los desplazamientos y esfuerzos continúan presentando valores relativamente altos, hasta llegar a la estructura y el relleno conformado, donde la resistencia impuesta por estos elementos logra el objetivo de elevar la zona inestable y disminuir las deformaciones.

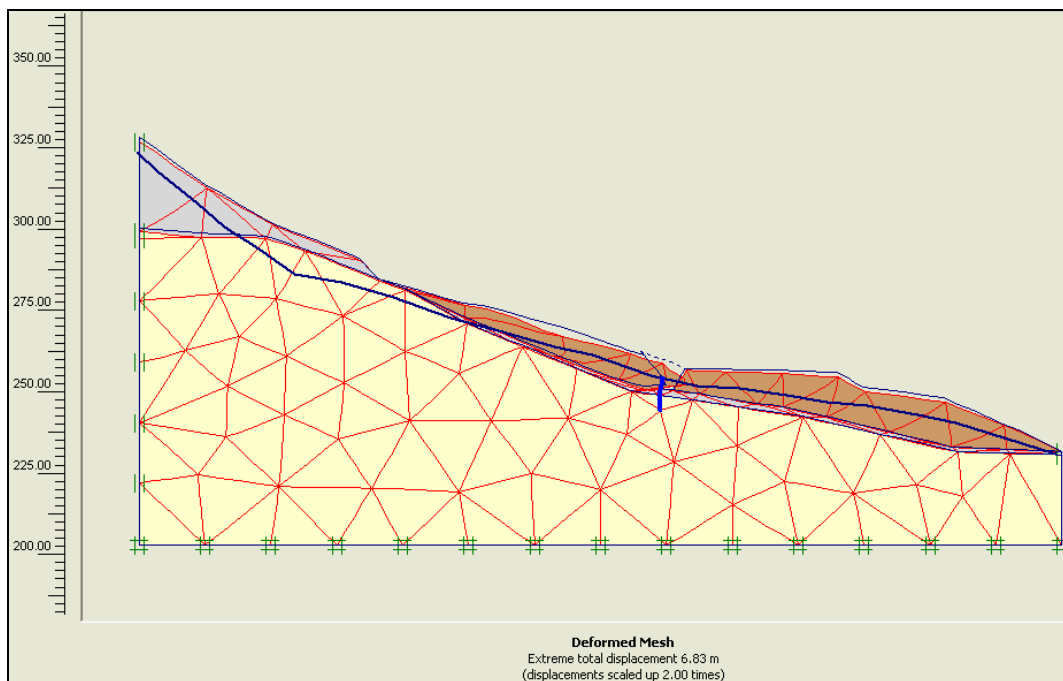


Figura 5-12. Malla de elemento finitos deformada antes de realizar el relleno de la excavación

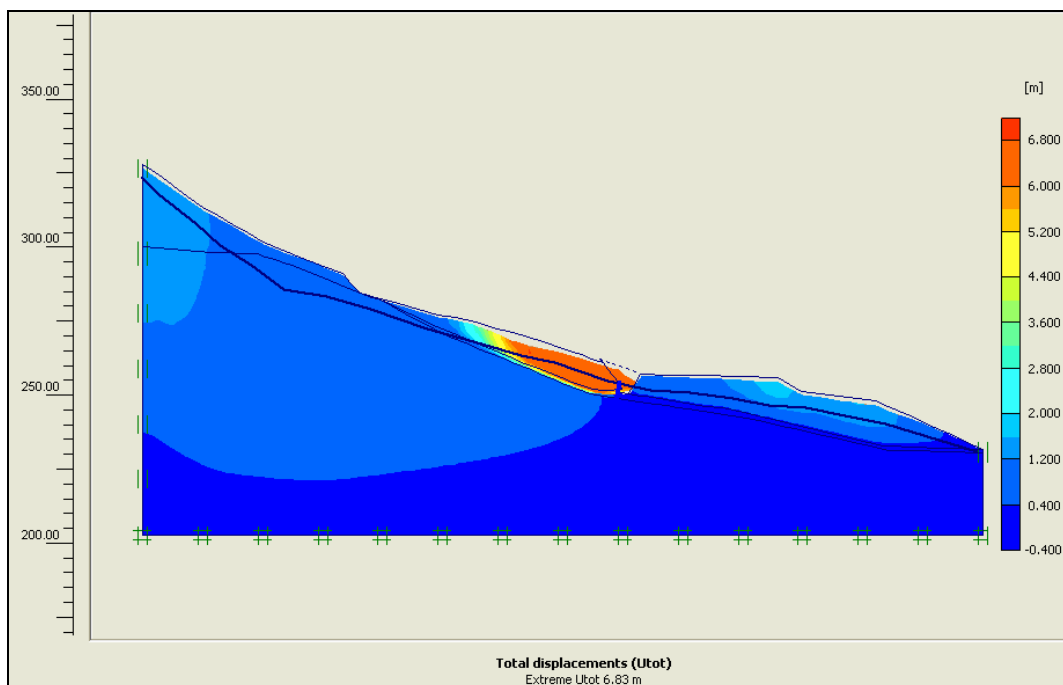


Figura 5-13. Desplazamientos totales

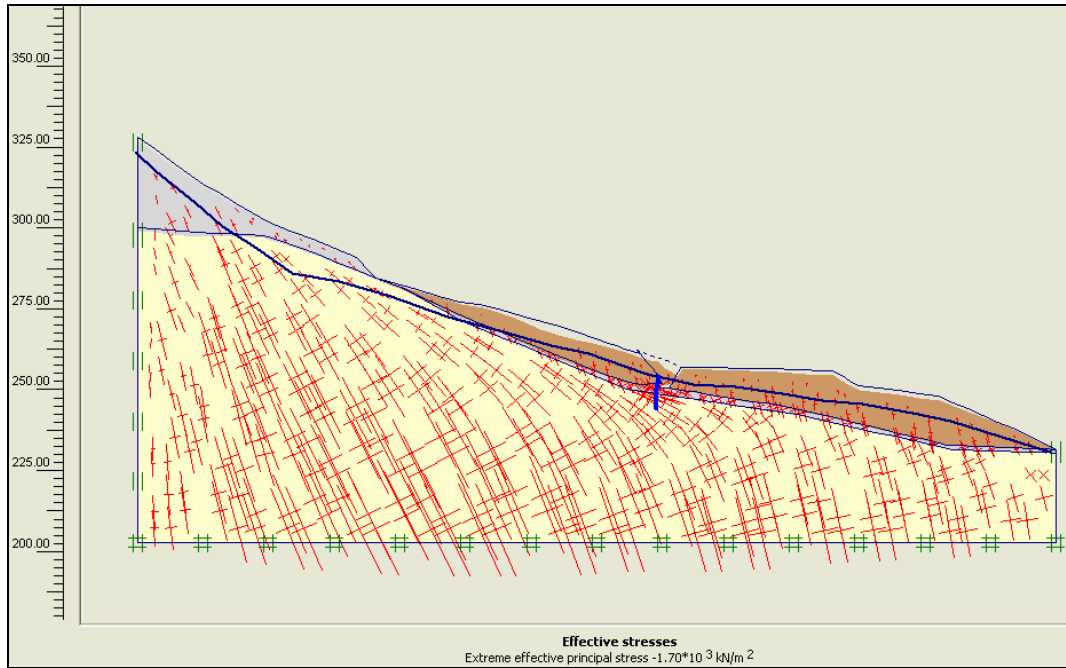


Figura 5-14. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = $1.7 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$

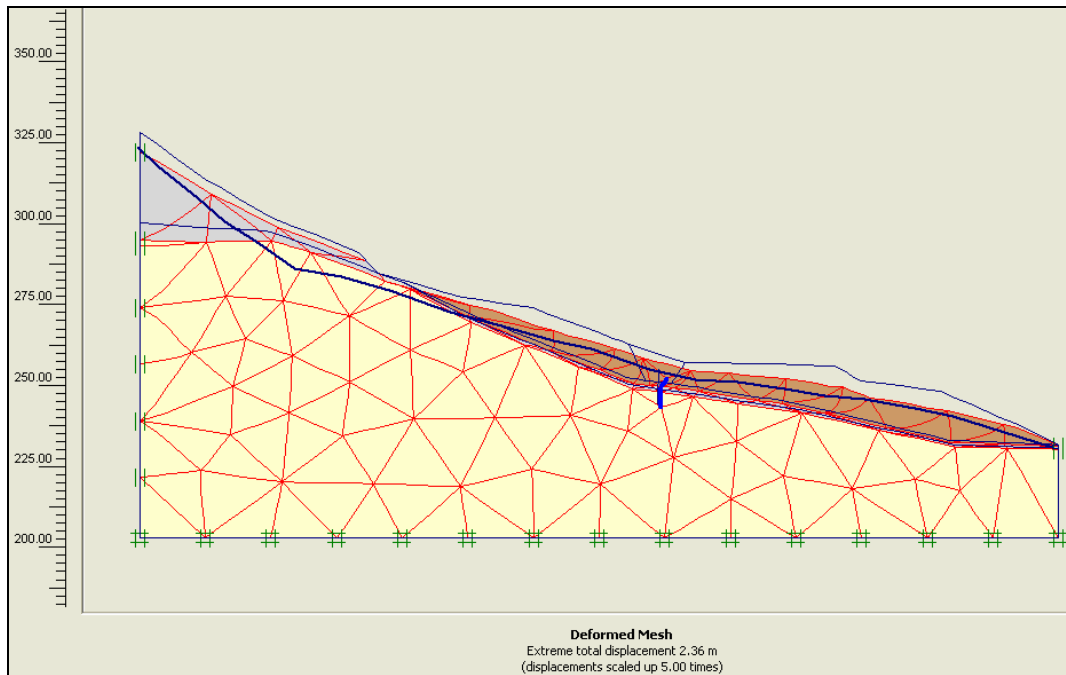


Figura 5-15. Malla de elementos finitos deformada después de la tercera fase de cálculo. En esta modelación la estructura ha sido construida y la excavación rellena con suelo retirado ladera arriba del coluvión.

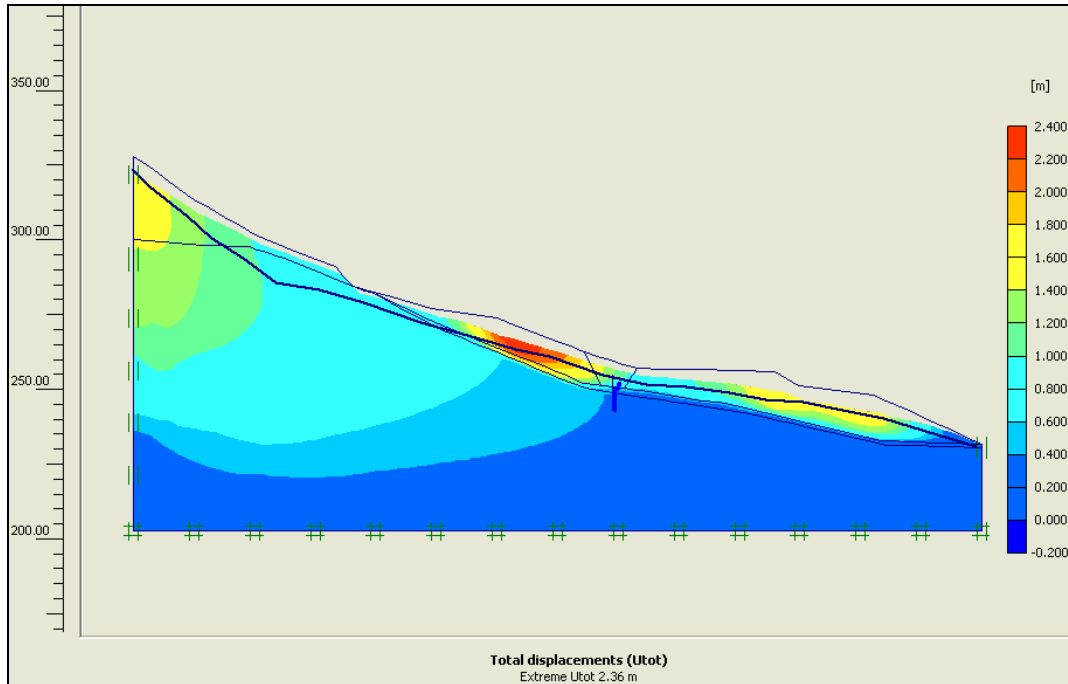


Figura 5-16. Contornos relativos de deformación en el modelo. La superficie de falla se ha levantado sobre la estructura construida y su influencia sobre la vía ha disminuido considerablemente.

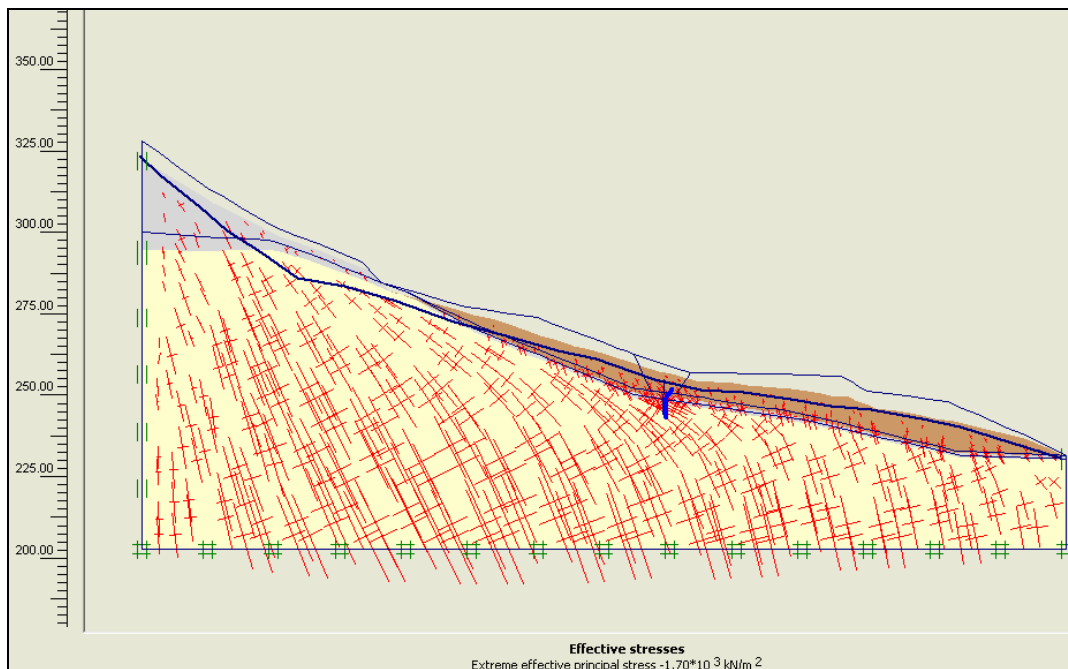


Figura 5-17. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = $1.7 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$

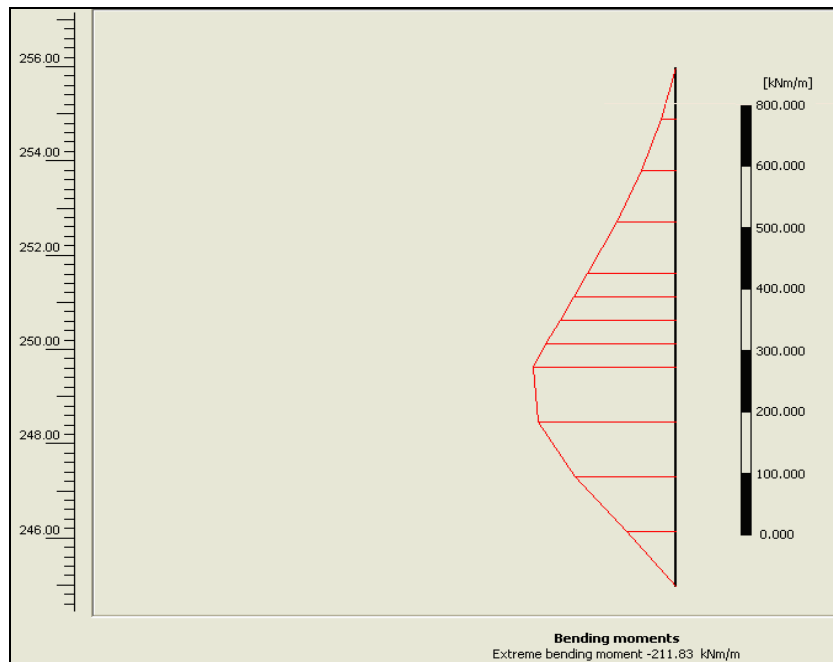


Figura 5-18. Momentos en la pantalla de concreto ciclópeo = 211.83 kNm/m

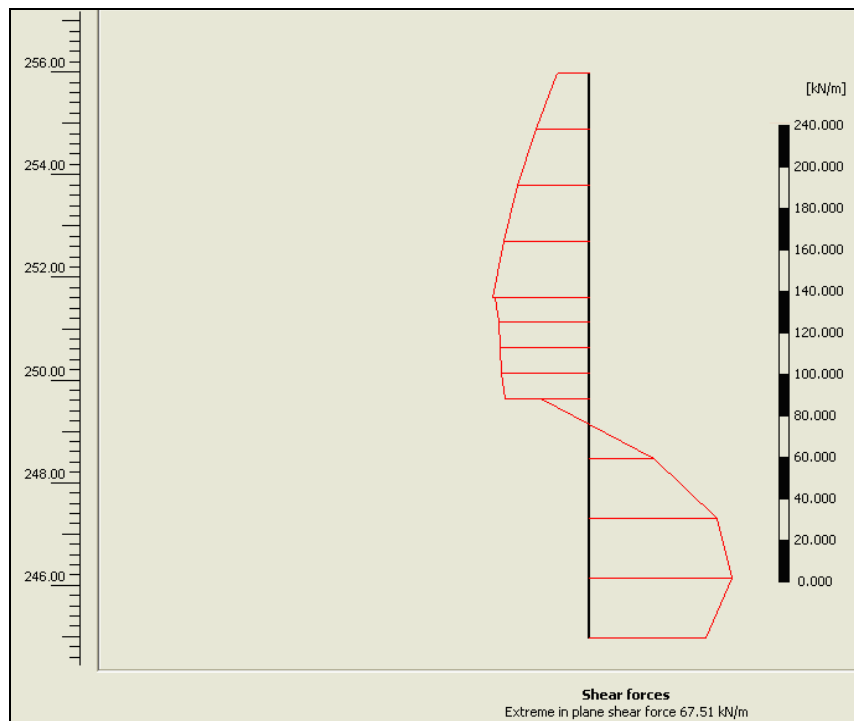


Figura 5-19. Fuerzas cortantes en la pantalla. Fuerza cortante extrema = 67.51 kN/m

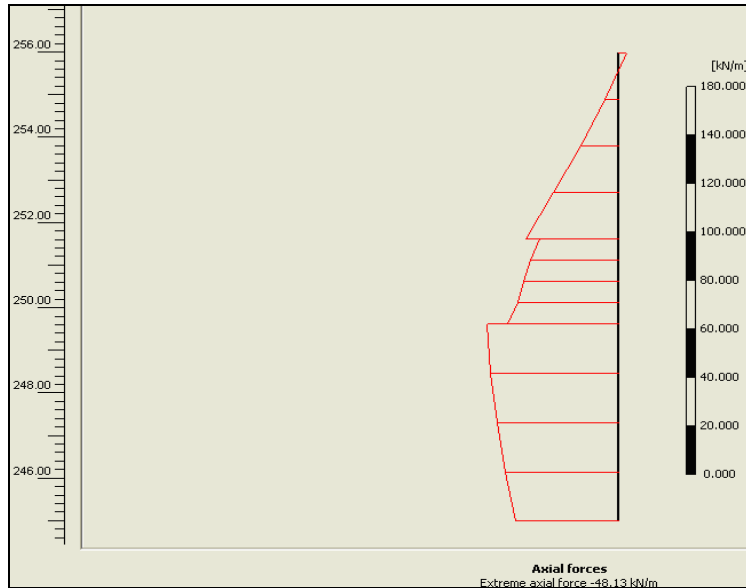


Figura 5-20. Fuerzas normales en la pantalla. Fuerza cortante extrema = 48.13 kN/m

5.3 LOTE CALLE 55A CARRERA 29 ESQUINA SURORIENTAL BUCARAMANGA

5.3.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Este estudio geotécnico se realiza con el fin de definir la viabilidad técnica del lote para la construcción del proyecto planteado, identificar los problemas de cimentación inherentes a la formación geológica, los materiales del suelo, la topografía del lote y la hidrología subterránea. Luego de esto se debe recomendar obras geotécnicas que se requieren para mitigar los efectos de los problemas geotécnicos identificados.

El lote se encuentra localizado en la esquina suroriental de la calle 55A con carrera 29, identificado con el número 29 – 26 sobre la calle 55A, en el municipio de Bucaramanga, departamento de Santander. El área aproximada del lote estudiado es de 1.000 metros cuadrados.

El proyecto consiste en la construcción de torres de acuerdo a las siguientes características:

- Torres: 1
- Altura en niveles: 12
- Sótanos: 3
- Sistema estructural: Sistema tradicional
- Sistema probable de cimentación: Cimientos individuales combinados o corridos unidos por vigas de amarre.

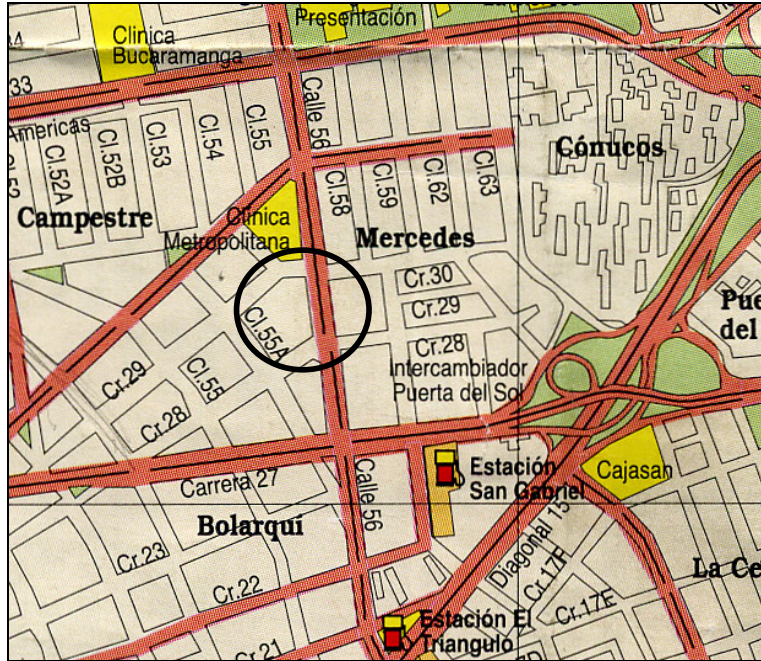


Figura 5-21. Esquema de Localización del lote estudiado

5.3.2 GEOLOGÍA

LITOLOGÍA GENERAL

De acuerdo al estudio de Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga realizado por Ingeominas, el lote está localizado geológicamente sobre el *Miembro Limos Rojos (Qbl)*. Nivel definido por Julivert (1963).

Está constituido por arenas arcillosas gravosas y limos arcillosos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Se observó la presencia esporádica de bloques angulares de arenisca, asociados superficialmente a este miembro; estos cantos pueden estar embebidos dentro de limos rojos y se caracterizan por estar meteorizados. Suprayace al segmento gravoso y su contacto con éste es gradacional.

FORMACIÓN GEOLÓGICA

El miembro Limos Rojos corresponde al manto superior del abanico aluvial de Bucaramanga o formación Bucaramanga de edad Cuaternario.

La formación Bucaramanga fue descrita inicialmente por De Porta (1958). Se trata de un importante depósito sedimentario de edad Cuaternario que morfológicamente corresponde a un abanico aluvial erosionado, posiblemente asociado en su mayor parte al río Suratá, acumulado sobre una depresión de origen tectónico, sobre el cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga.

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS GENERALES DEL ÁREA (INGEOMINAS, 2001)

El lote estudiado no presenta amenazas geotécnicas importantes y se clasifica dentro de la zona geotécnica: ZONA 3A Limos Rojos del Abanico Aluvial de Bucaramanga.

Los suelos del manto de Limos Rojos corresponden a arenas gravo-arcillosas, cementadas por óxidos de hierro sobre mantos gravosos y algo conglomeráticos; estos suelos presentan generalmente cohesiones y capacidades de soporte altos.

LIMITACIONES GEOTÉCNICAS DEL ÁREA (INGEOMINAS, 2001)

Ingeominas indica las siguientes limitaciones:

- A profundidades generalmente superiores a los 5 metros aparecen niveles freáticos localizados por encima de los mantos arcillosos o de finos del abanico de Bucaramanga. Estos niveles freáticos afloran en el pié de los escarpes verticales generando focos de erosión acelerada.

En el lote estudiado no se detectaron afloramientos de agua subterránea en la cañada contigua, sin embargo, en época de lluvias intensas podrían presentarse afloramientos pequeños, los cuales no representan una amenaza para el proyecto.

- Ingeominas recomienda identificar áreas de relleno con suelos sueltos o basuras y regular su utilización para obras de ingeniería.

5.3.3 INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS REALIZADAS

CRITERIOS UTILIZADOS

Para la planeación de las investigaciones geotécnicas se utilizaron los criterios generales del capítulo H de la norma NSR-98. De acuerdo a la experiencia en Bucaramanga en el manto de Limos Rojos el suelo competente corresponde al manto duro en el cual aparecen cantos duros de arenisca en matriz de materiales muy bien cementados; los sondeos programados bajan hasta este manto y lo identifican plenamente.

INVESTIGACIONES PRELIMINARES

Se realizó una visita de inspección preliminar al lote estudiado con el objeto de determinar las características físicas, geológicas y geotécnicas generales del lote y las limitantes geotécnicas principales; y en esta forma programar los trabajos de campo y de laboratorio. Se investigaron los textos y planos del estudio de Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga realizado por Ingeominas y los estudios geotécnicos realizados por Geotecnología Ltda., en las zonas cercanas al lote estudiado.

5.3.4 SONDEOS Y ENSAYOS DE CAMPO

Se realizaron dos sondeos continuos a percusión en tramos de 50 centímetros de longitud realizando ensayos de penetración estándar SPT en cada uno de los tramos y 2 sondeos a rotación realizando ensayos de penetración estándar cada 3.0 metros con punta de diamante. Para la realización de los sondeos a percusión se utilizó un equipo operado por un motor de 16 HP, polea y pesa sobre una guía tubular.

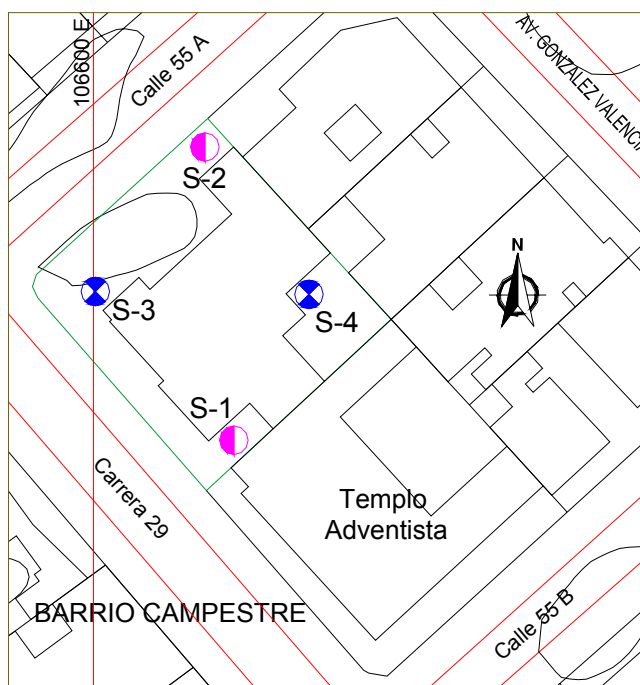
Número total de sondeos: 4

Ensayos de campo: Penetración estándar (SPT) Norma AS TM D 1586, I.N.V.E. 111.

Tipo de muestras obtenidas: Muestras en tubo partido

Tabla 6. Características y localización de los sondeos

PERFORACIÓN No.	EQUIPO	LOCALIZACIÓN	PROFUNDIDAD (mts)
1	Percusión continuo	Sector sur	6.0
2	Percusión continuo	Sector norte	5.0
3	Rotación y percusión	Sector occidental	12.0
4	Rotación y percusión	Sector oriental	12.0





-  Sondeo a rotación
-  Sondeo a percusión

Figura 5-22. Plano de Localización de Sondeos

Una vez realizados los sondeos se realizó la descripción detallada de las muestras obtenidas de acuerdo a los siguientes criterios:

- Litología
- Textura
- Tamaño de los granos
- Minerales presentes
- Estructura
- Color
- Presencia de materiales orgánicos y raíces
- Porosidad
- Consistencia o resistencia

Para la descripción de los perfiles de los sondeos se utilizó el Software Geotechnical Graphics versión 5.0. Este Software comercial permite presentar en forma gráfica la información de los sondeos incluyendo los resultados de los ensayos de campo y laboratorio, la formación geológica y la localización de los niveles freáticos.

ENSAYOS DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR SPT

Se realizaron ensayos de penetración estándar utilizando la norma ASTM D 1586, equivalente a la norma I.N.V.E. 111.

- Peso del martillo: 140 libras
- Altura de caída: 76 centímetros
- Penetración: 3 intervalos de 15 centímetros cada uno (6")
- N de diseño: Sumatoria de los golpes de los últimos 30 centímetros (12")
- Diámetro exterior del tubo: 50.8 mm
- Diámetro interior del muestreador en la punta: 34.93 mm
- Longitud del tubo: 75 centímetros
- Sistema de hincado: Malacate y polea
- Motor del equipo: B & S 16 HP
- Rechazo: Más de 50 golpes para 15 centímetros (6")

5.3.5 ENSAYOS DE LABORATORIO

Las muestras obtenidas fueron transportadas al laboratorio de suelos de Geotecnología Ltda., en la ciudad de Bucaramanga.

Después de descritas las muestras obtenidas en los sondeos se identificaron las muestras típicas y se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

Tabla 7. Ensayos de laboratorio realizados

ENSAYO	NORMA	No. DE ENSAYOS
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422-63 – AASHTO T88 I.N.V.E. 123	5
Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) en suelo, roca y mezcla de suelo-agregado	ASTM D 2216 I.N.V.E. 122	5
Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	ASTM D 4318 – AASHTO T 89-90 I.N.V.E. 126	3
Clasificación de suelos	ASTM D 2487	5
Resistencia al Corte Directo consolidado drenado	ASTM D 3080 – AASHTO T 236 I.N.V.E. 154	1

Los resultados obtenidos de estos exámenes fueron los siguientes:

Tabla 8. Resultados de los ensayos de laboratorio realizados.

SONDEO	PROF. (m)	W%	% FINOS	% L.L.	% L.P.	% I. P.	CLASIFICACIÓN S.U.C.S.
1	4.00			42.66	24.76	17.89	ML
1	6.00	24.02	44.06				SM
2	4.00	21.15	44.89				SM
3	6.00			46.26	28.89	17.37	SM
3	9.50	23.52	42.50				SM
4	5.20	24.60	47.69				SM
4	7.20			47.90	31.05	16.85	ML
4	10.00	27.45	43.16				ML

Tabla 9. Resultados de los ensayos de corte directo.

SONDEO	PROFUNDIDAD (metros)	ANGULO DE FRICCIÓN (ϕ)	COHESIÓN (kg/cm^2)
4	6.20	29.733	0.132

Convenciones:

W = humedad

% Finos = pasantes del tamiz ASTM 200

L.L. = Límite Líquido

L.P. = Límite Plástico

I.P. = Índice Plástico

S.U.C.S. = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

5.3.6 CÁLCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD DE LAS EXCAVACIONES

Durante el desarrollo de este proyecto se presentaron problemas al querer aumentar el número de sótanos de 3 a 5. Esto obligo a que las excavaciones fueran mayores a 5 metros, profundidad a partir de la cual entran en juego estratos de suelos muy deficientes y de baja competencia. Al no manejar un sistema de entibación adecuada, se presento un derrumbe que ocasionó pérdidas tanto humanas como económicas.



Foto 7. Zona de excavación.



Foto 8. Zona de excavación con apreciación del nivel freático.

Por esta razón, se analizara el talud de la excavación vertical y varias alternativas de taludes que hubiese podido brindar cierta seguridad en el proceso de remoción de materiales.

Nuevamente se hará uso del software SLOPE/W para hacer el análisis por medio de los métodos de equilibrio límite y el software PLAXIS para el análisis esfuerzo-deformación de las excavaciones.

5.3.6.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA EQUILIBRIO LÍMITE

Los métodos de análisis con los que se trabajarán son:

- Método ordinario o de Fellenius
- Método Bishop simplificado
- Método de Janbú simplificado
- Método de Spencer

Los resultados de los factores de seguridad se presentan para cada uno de los métodos indicados.

Los resultados de las alternativas se presentarán para cada una de las inclinaciones del talud. Se trabajó con taludes 1V:1H, 1V:0.5H y 1V:3/4H.

GEOMETRÍA Y ESTRATIGRAFÍA

El modelo geotécnico se trabajó con los tipos de material de suelo identificados en los sondeos realizados. Las propiedades de los suelos fueron obtenidas en el laboratorio de Geotecnología Ltda., en Bucaramanga.

De igual manera, los espesores de los estratos fueron determinados a partir de los sondeos geotécnicos realizados.

SUPERFICIES DE FALLA



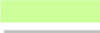

Se utilizó el criterio de la falla circular, generando una malla automática de 1331 superficies probables de falla.

PRESIONES DE PORO

Para modelar las presiones de poro se supuso la línea de nivel freático dependiendo de la información obtenida en los sondeos.

PROPIEDADES DEL SUELO

Se utilizó el sistema de parámetros totales de resistencia, de acuerdo al sistema de Mohr-Coulomb obtenidos en los ensayos de Corte Directo Drenado.

ESTRATOS DE SUELOS	
Suelo suelto orgánico	
Limos rojos blandos	
Limos rojos duros	
Arcilla	

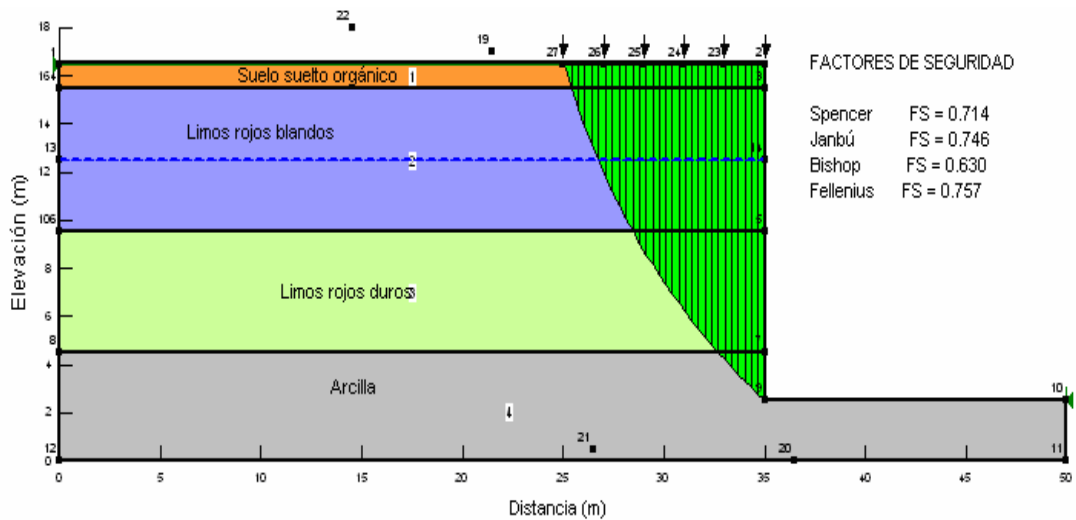


Figura 5-23. Resultados arrojados por SLOPE/W para el Talud vertical

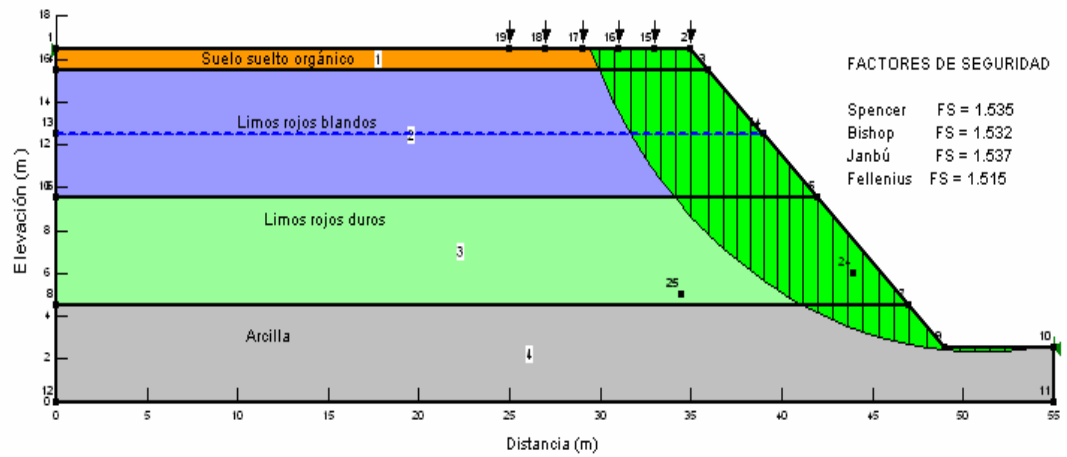


Figura 5-24. Resultados arrojados por SLOPE/W para el Talud 1V:1H

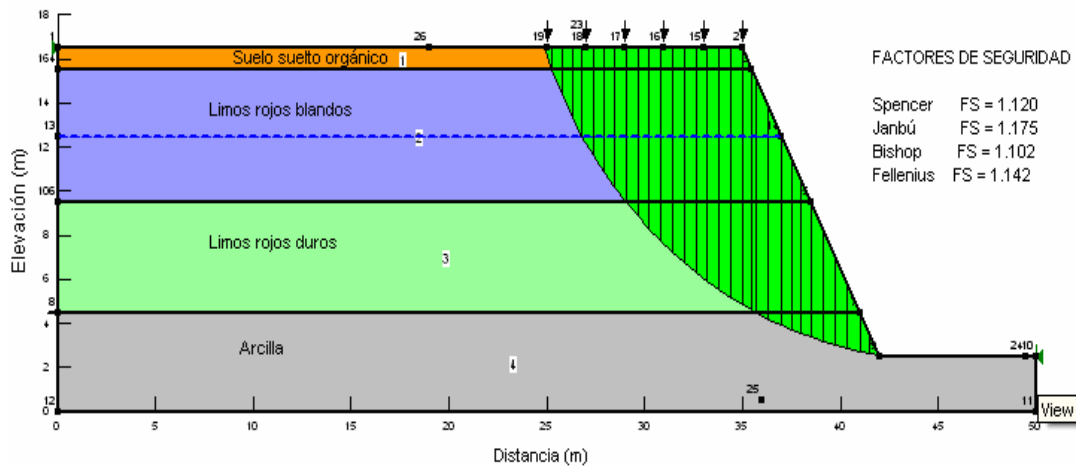


Figura 5-25. Resultados arrojados por SLOPE/W para el Talud 1V:0.5H

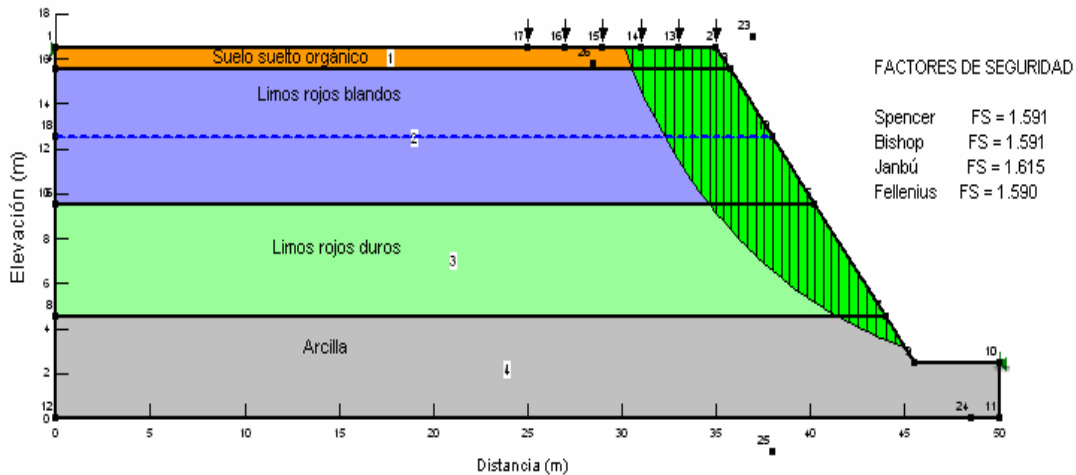


Figura 5-26. Resultados arrojados por SLOPE/W para el Talud 1V:3/4H

5.3.6.2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

A continuación se establecerá el modelo por medio del análisis de los elementos finitos para estudiar la estabilidad de la excavación.

PERFIL GEOTÉCNICO

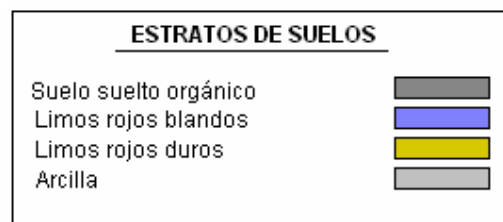
El modelo geotécnico se trabajó con los tipos de material de suelo y roca identificados en campo. Las propiedades de los suelos y rocas fueron obtenidas en el laboratorio de Geotecnología Ltda., en Bucaramanga.

PROPIEDADES DE SUELO

Las propiedades de los suelos usadas en un análisis esfuerzo-deformación son las siguientes:

- Peso unitario
- Ángulo de fricción
- Ángulo de dilatancia
- Cohesión
- Permeabilidad primaria y secundaria
- Rigidez (Módulo de Young)
- Coeficiente de Poisson

Hay que aclarar que los valores del coeficiente de Poisson ν y de los módulos de elasticidad E_{ref} fueron tomados de un rango de valores sugeridos por Joseph Bowles en su libro *Fundation análisis and design* en las tablas 2-7 y 2-8, páginas 123 y 125.



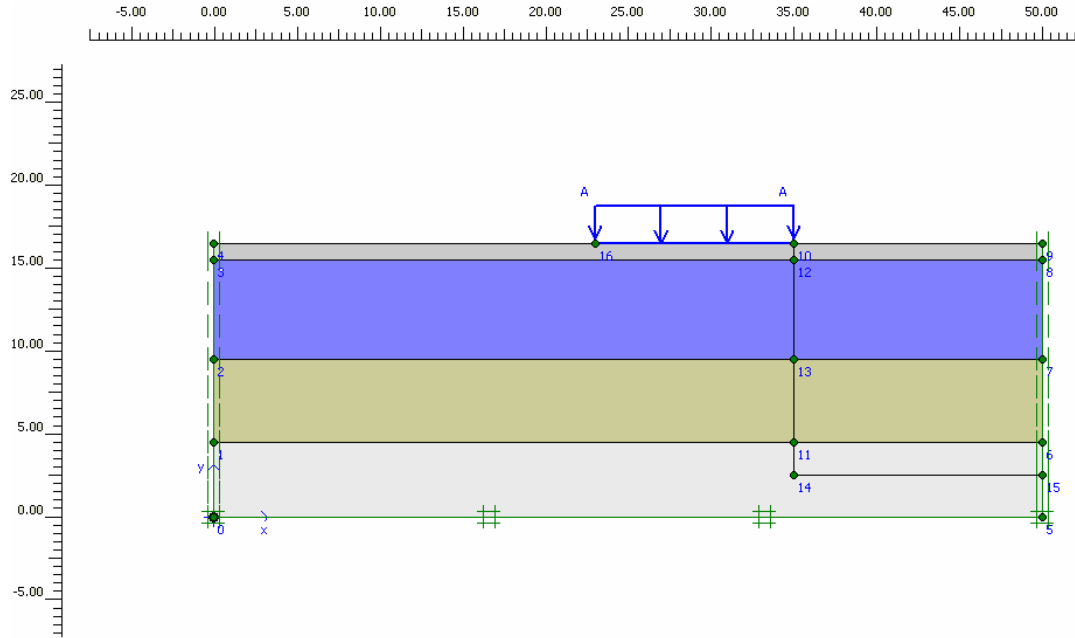


Figura 5-27. Geometría de la excavación

Tabla 10. Parámetros del suelo utilizados en el análisis de esfuerzo – deformación

ID	NOMBRE	TIPO	γ_{Unsat} [kN/m ³]	γ_{Sat} [kN/m ³]	k_x [m/día]	k_y [m/día]	ν [-]	E_{ref} [kN/m ²]	C_{ref} [kN/m ²]	ϕ [°]
1	Arcilla	Drenado	15.0	16.0	1.00E-06	1.00E-06	0.40	3000	15	10
2	Limos rojos duro	Drenado	19.0	21.0	1.00E-04	1.00E-04	0.32	25000	50	30
3	Limos rojos blandos	Drenado	18.0	19.0	1.90E-04	1.90E-04	0.30	20000	40	25
4	Suelo suelto orgánico	Drenado	17.0	18.0	2.50E-04	2.50E-04	0.32	10000	10	25

MODELO CONSTITUTIVO DE LOS MATERIALES

Se utilizó el modelo de Mohr-Coulomb para determinar el comportamiento de los materiales y los paquetes de ecuaciones que determinan los estados de esfuerzos.

Para calcular el factor de seguridad de la masa de suelo nuevamente se empleó el modelo de reducción de fricción y cohesión ($\phi - c$ reduction).

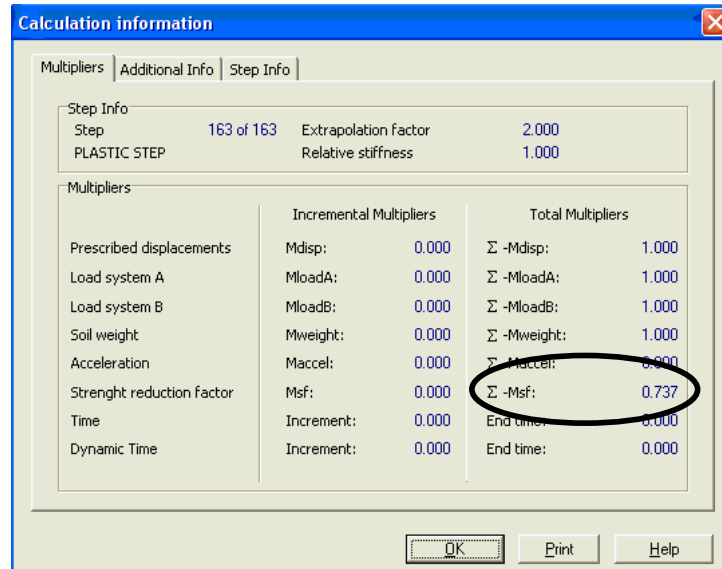


Figura 5-28. Cálculo del factor de seguridad

ELEMENTOS Y MALLADO

Se emplearon elementos triangulares de 15 nodos, es decir, el continuo se dividió en clusters triangulares con 15 puntos internos donde se aplicó el respectivo procedimiento matemático para calcular los esfuerzos y deformaciones.

El mallado es una función automática del software. Se ha seleccionado la mayor densidad posible de elementos dentro del modelo, haciendo refinamiento automático en los contornos de las estructuras planteadas e interfaces de estratos de suelo.

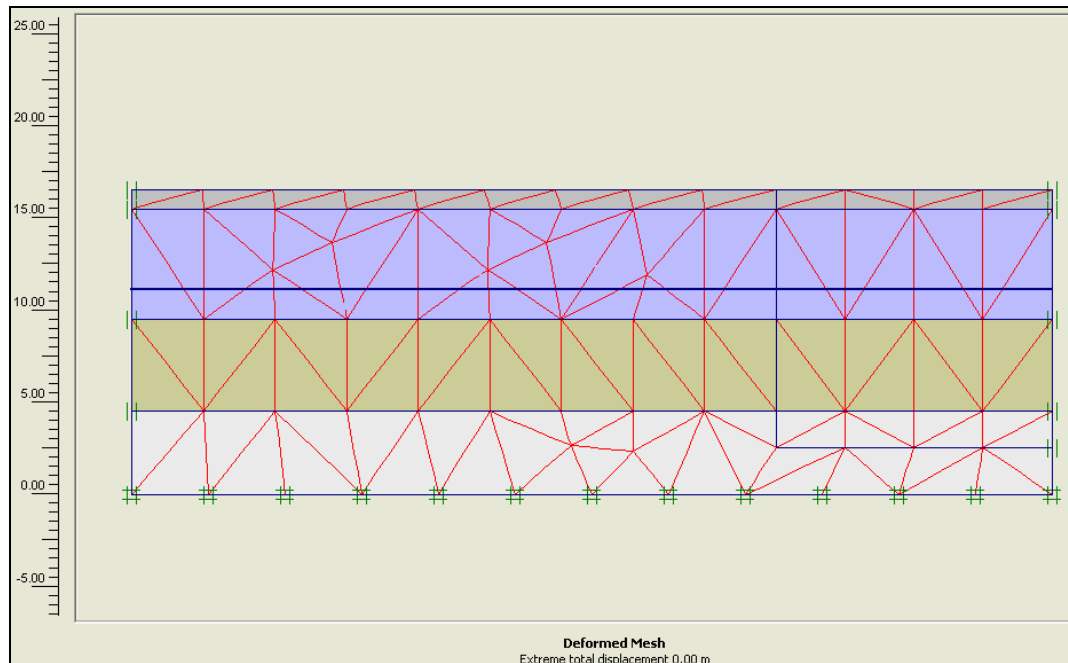


Figura 5-29. Malla de elementos finitos

FASES DE CONSTRUCCIÓN

El proceso de excavación fue modelado teniendo en cuenta cinco fases de construcción que simula la forma como fueron removidos los diferentes estratos.

A medida que se avanza en las fases de construcción se nota una disminución de los esfuerzos totales actuantes sobre el suelo y un aumento en los desplazamientos debido a que al suelo se le redujo su presión de confinamiento observándose desplazamientos en el orden de los 50 cm en el estrato menos competente (arcilla).

Cabe mencionar que la excavación presenta un buen comportamiento hasta el manto de limos rojos duros puesto que presenta unas buenas características geotécnicas que la hacen competente ante los esfuerzos inducidos en el proceso constructivo de la excavación.

La sobrecarga que se tuvo en cuenta para la modelación de la excavación representa la carga ejercida por las edificaciones adyacentes a ella.

Fase 1. Activación de la carga

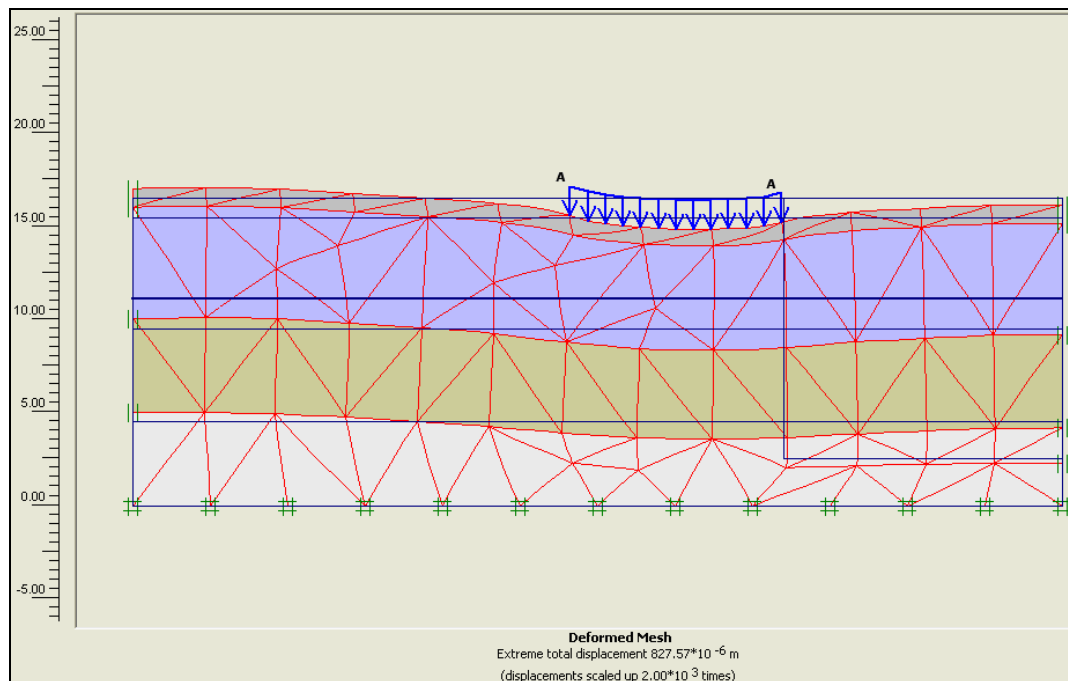


Figura 5-30. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 1

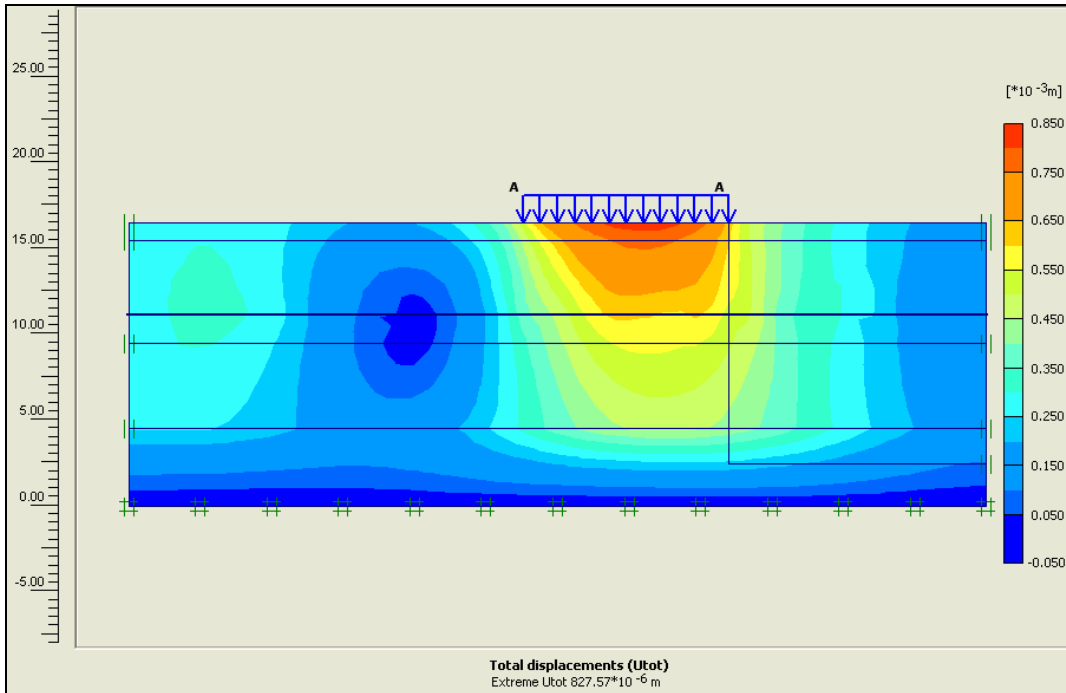


Figura 5-31. Desplazamientos totales

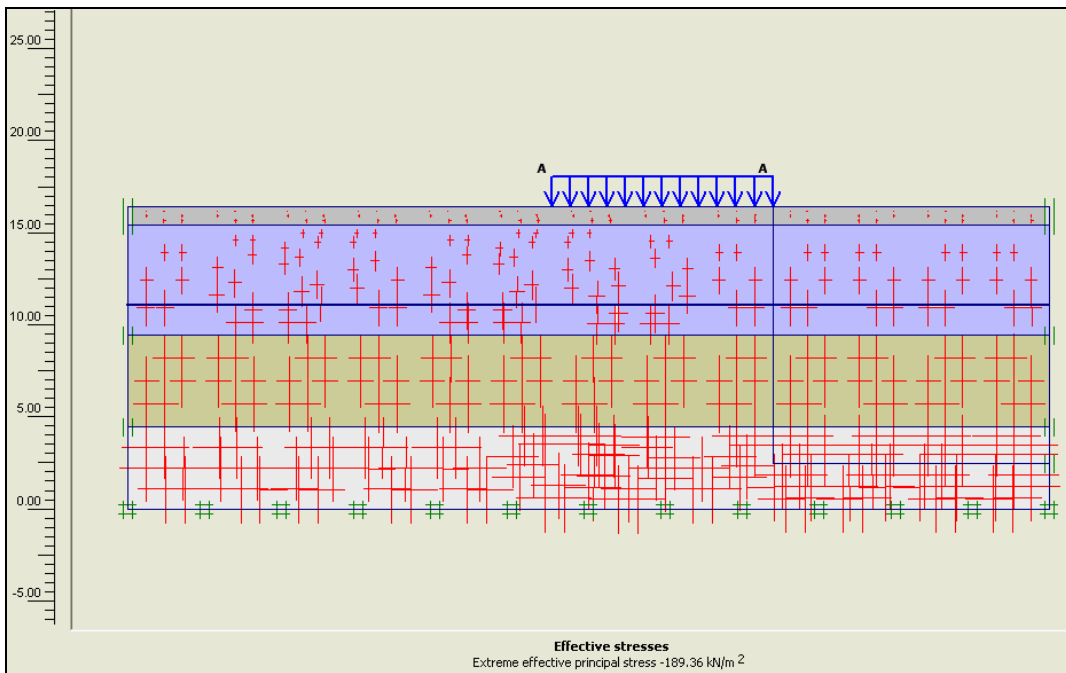


Figura 5-32. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 189.36 kN/m^2

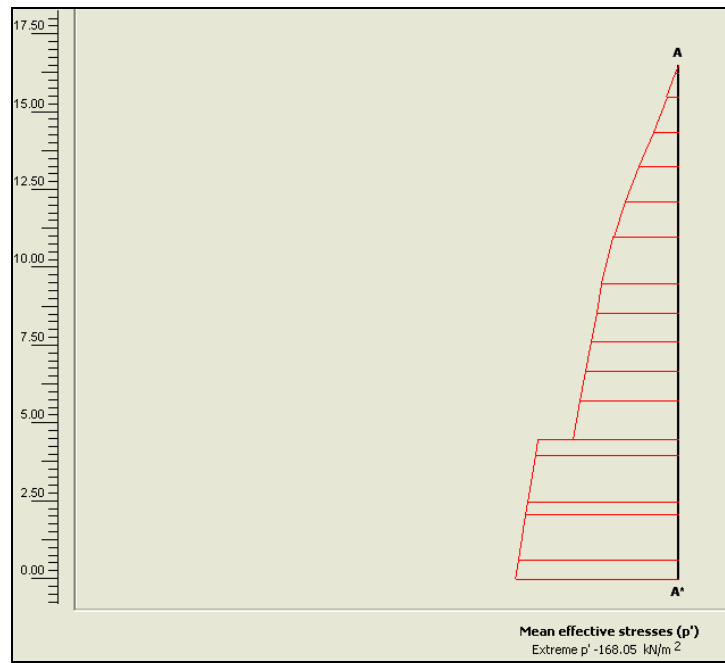


Figura 5-33. Sección transversal de esfuerzos. Distribución no lineal debido a la estratificación del suelo

Fase 2: Remoción del primer estrato de suelo

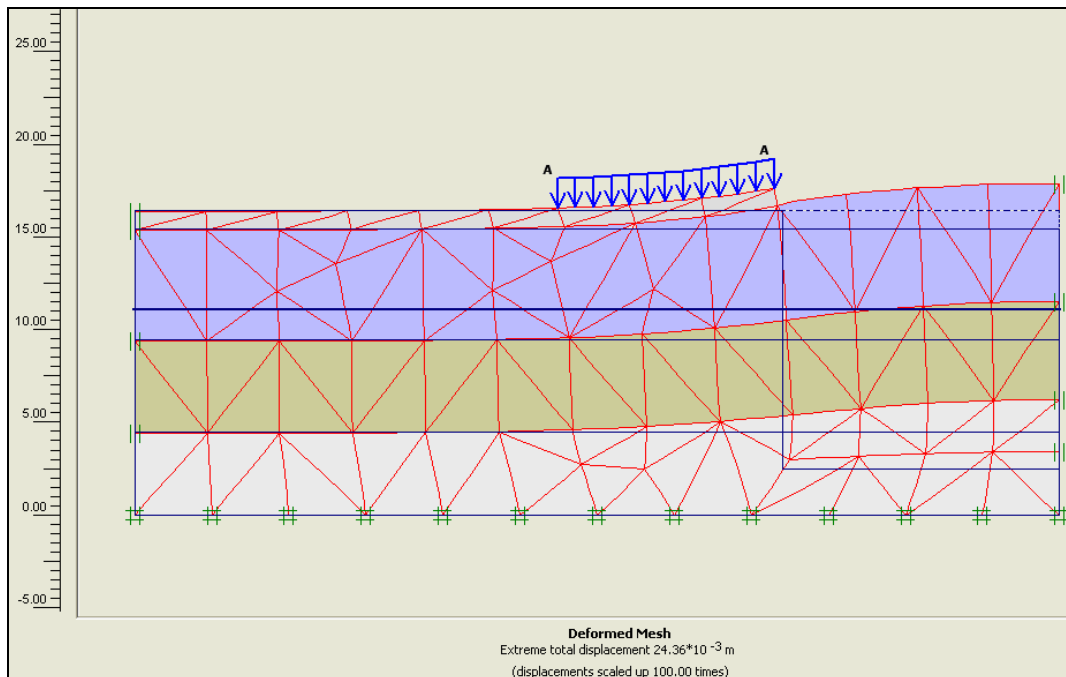


Figura 5-34. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 2

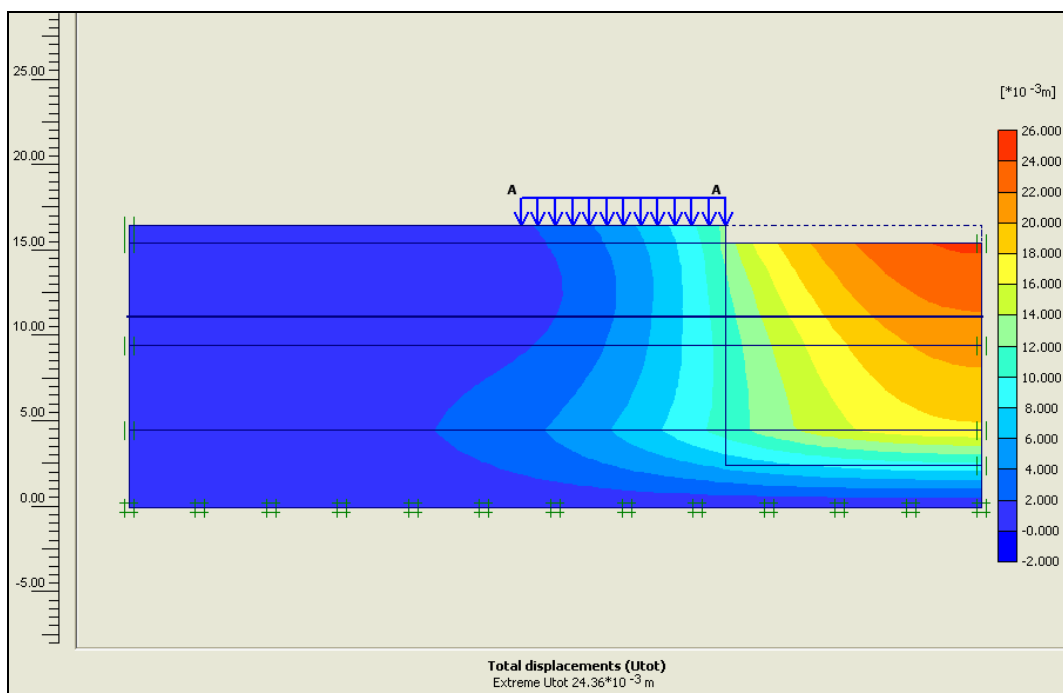


Figura 5-35. Desplazamientos totales

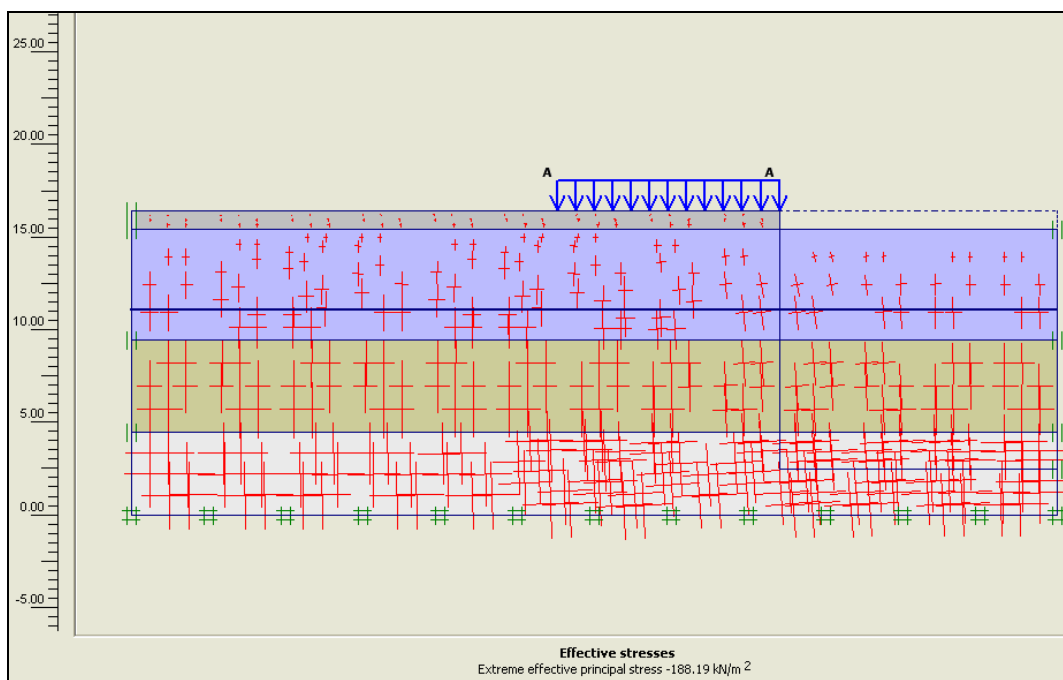


Figura 5-36. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 188.19 kN/m²

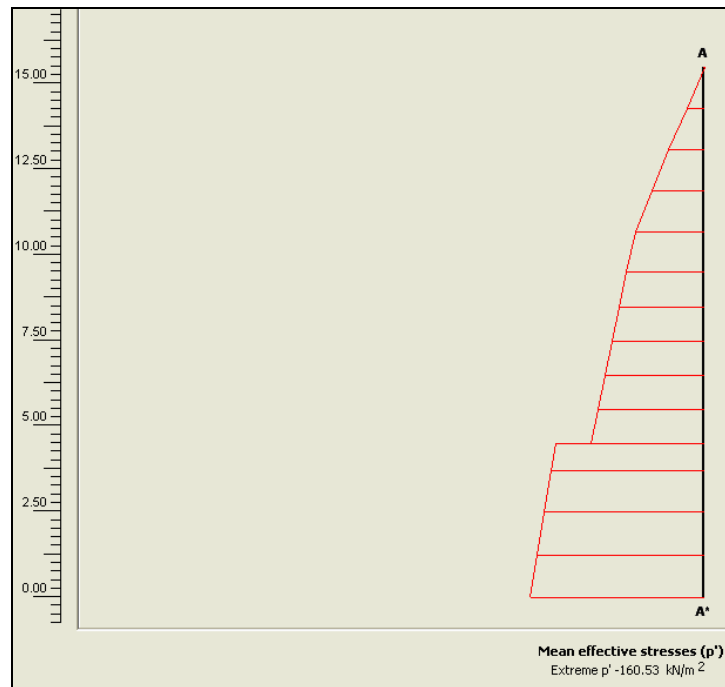


Figura 5-37. Sección transversal de esfuerzos.

Fase 3: Remoción del segundo estrato de suelo

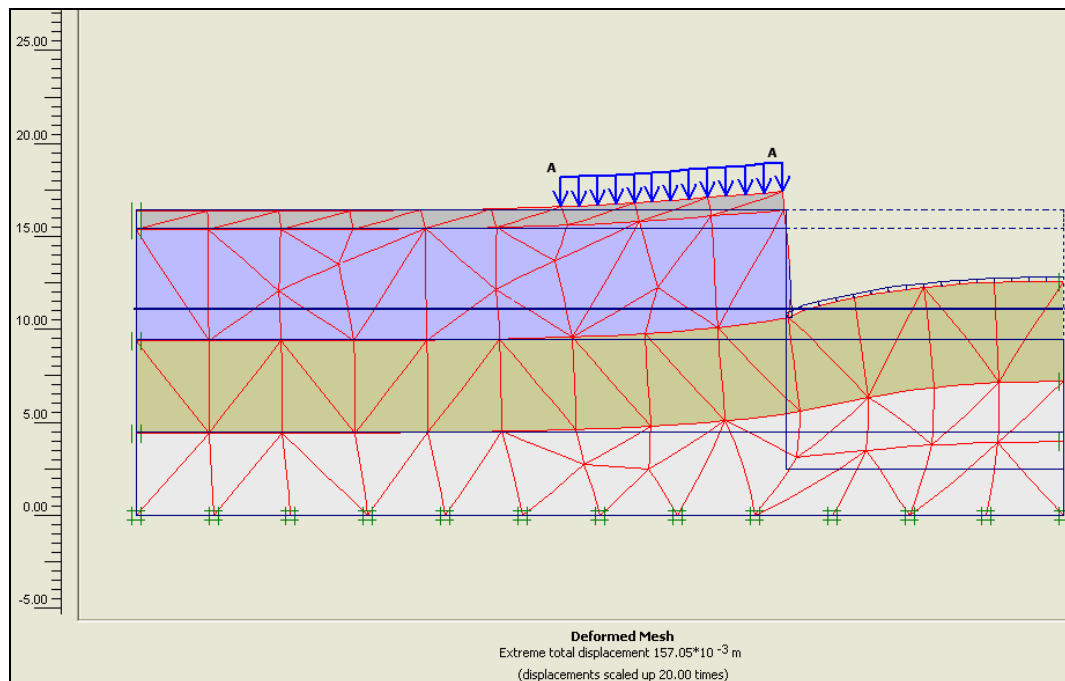


Figura 5-38. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 3

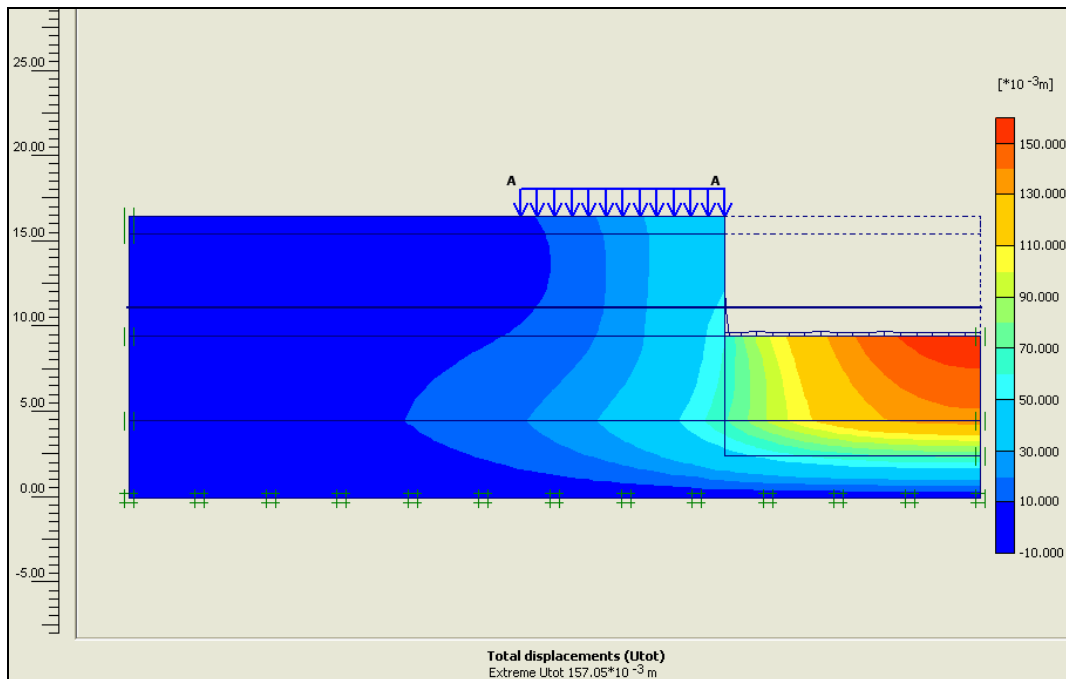


Figura 5-39. Deformaciones totales

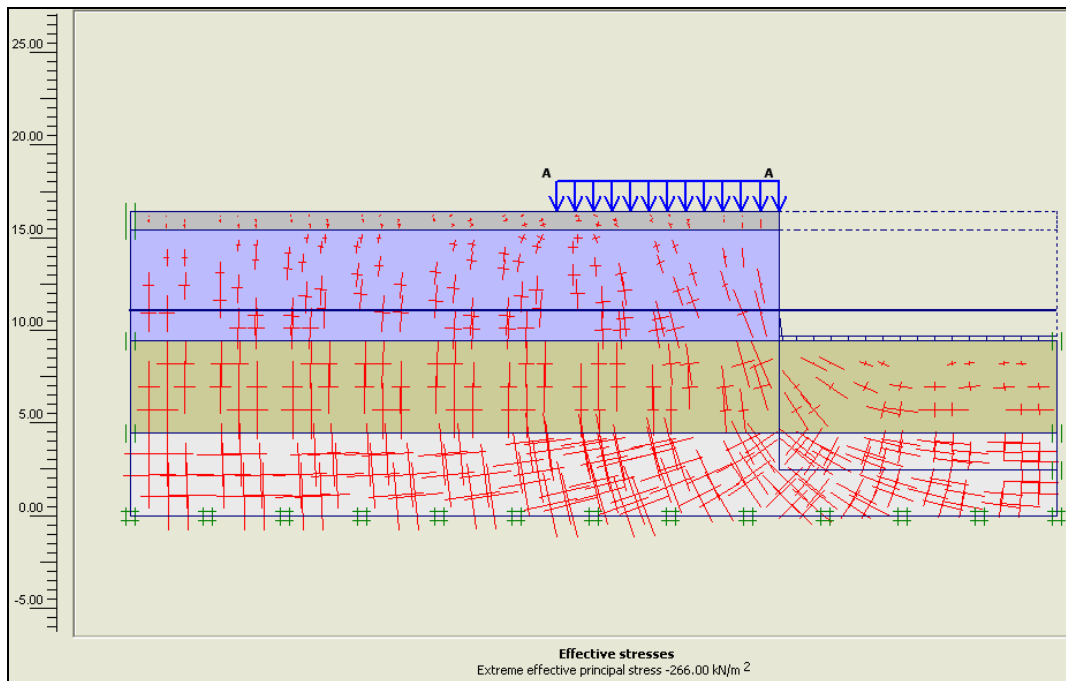


Figura 5-40. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 266 kN/m²

Fase 4: Remoción del tercer estrato de suelo

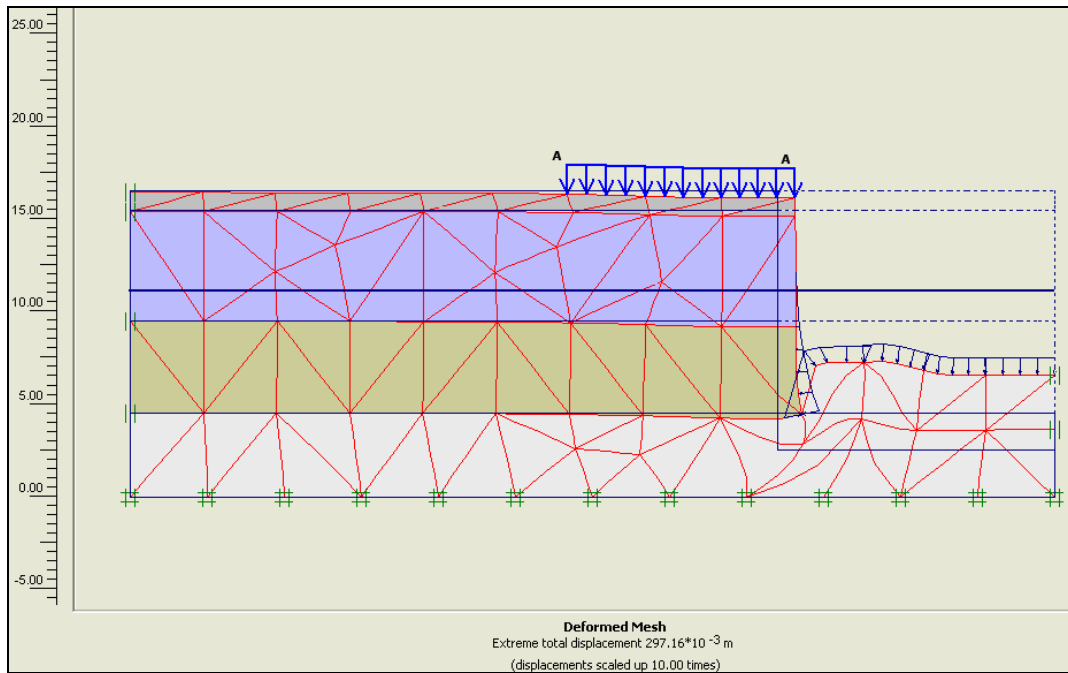


Figura 5-41. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 4

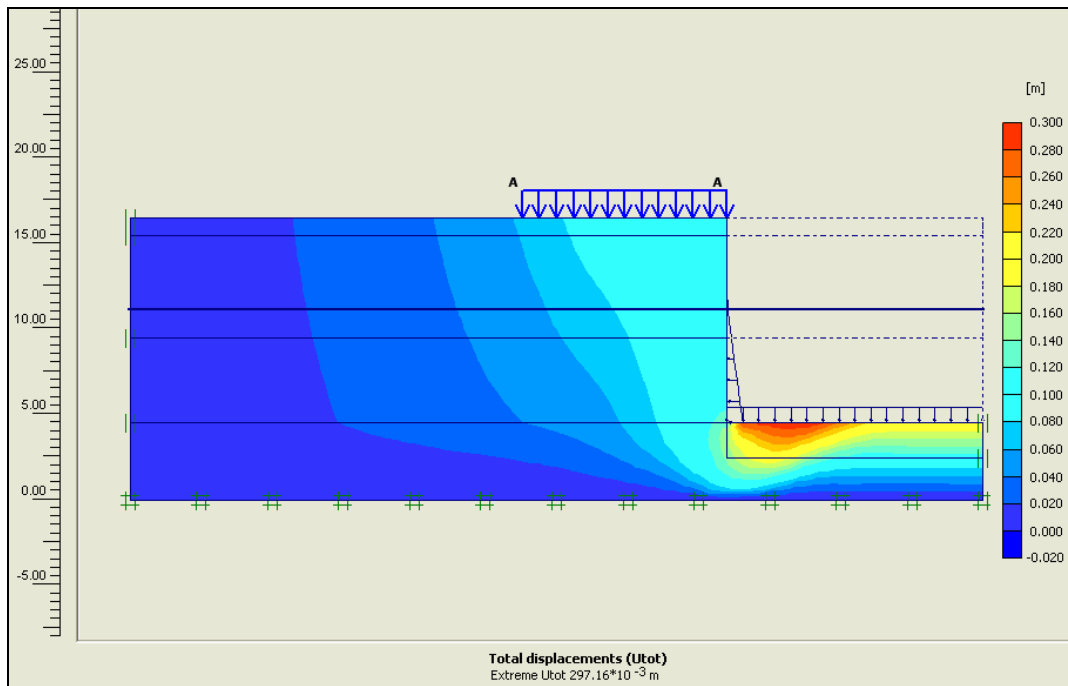


Figura 5-42. Deformaciones totales

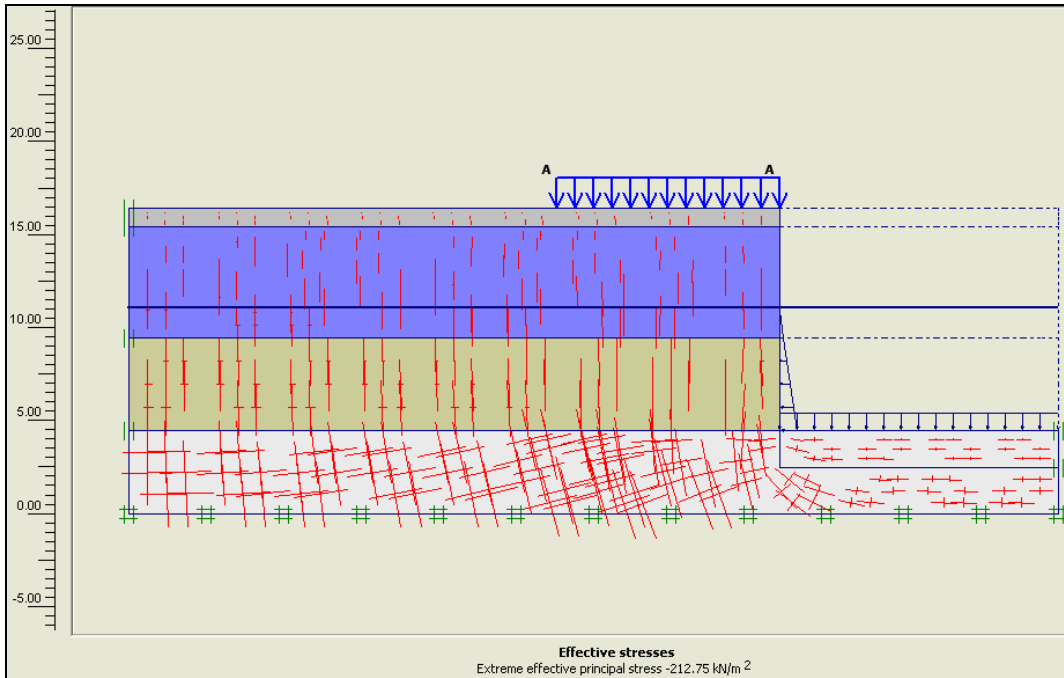


Figura 5-43. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 212.75 kN/m²

Fase 5: Remoción del cuarto estrato de suelo

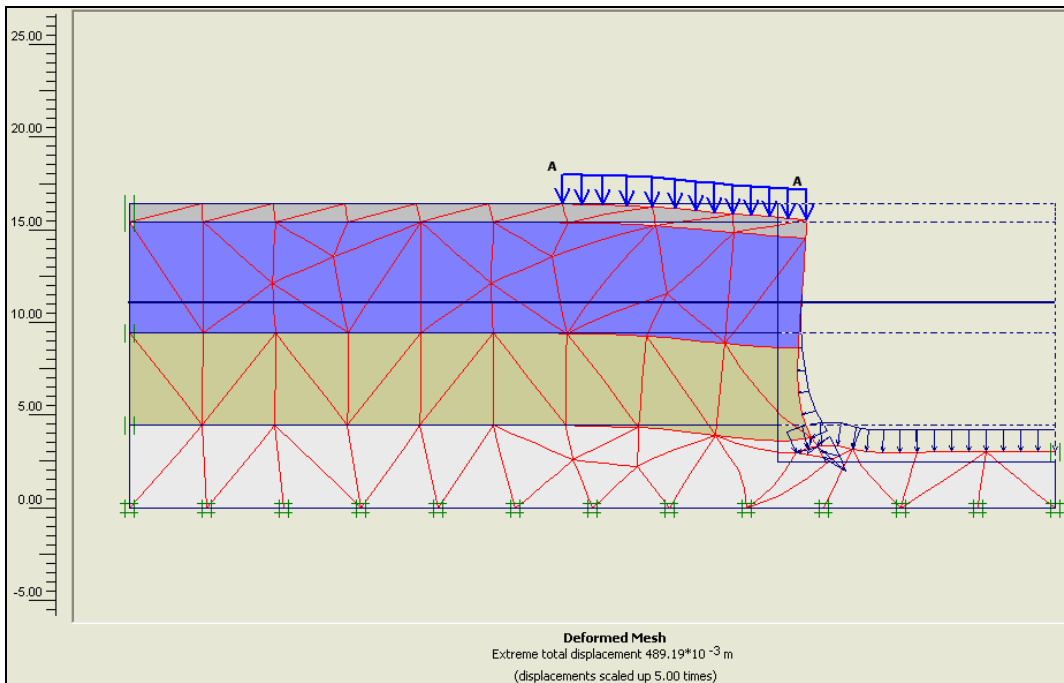


Figura 5-44. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 5

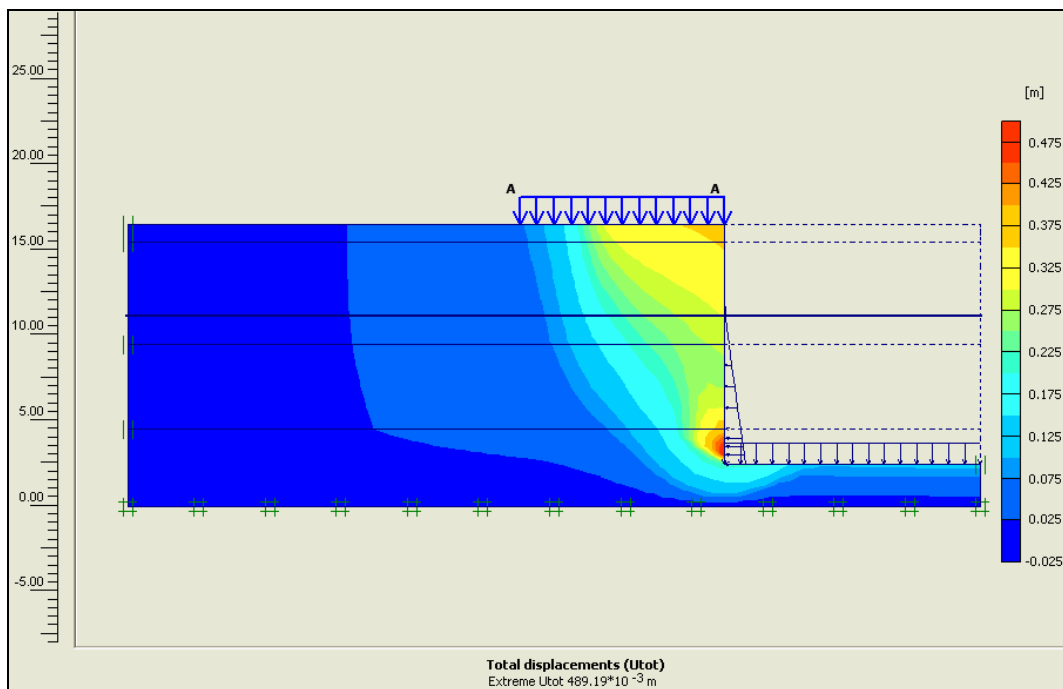


Figura 5-45. Deformaciones totales

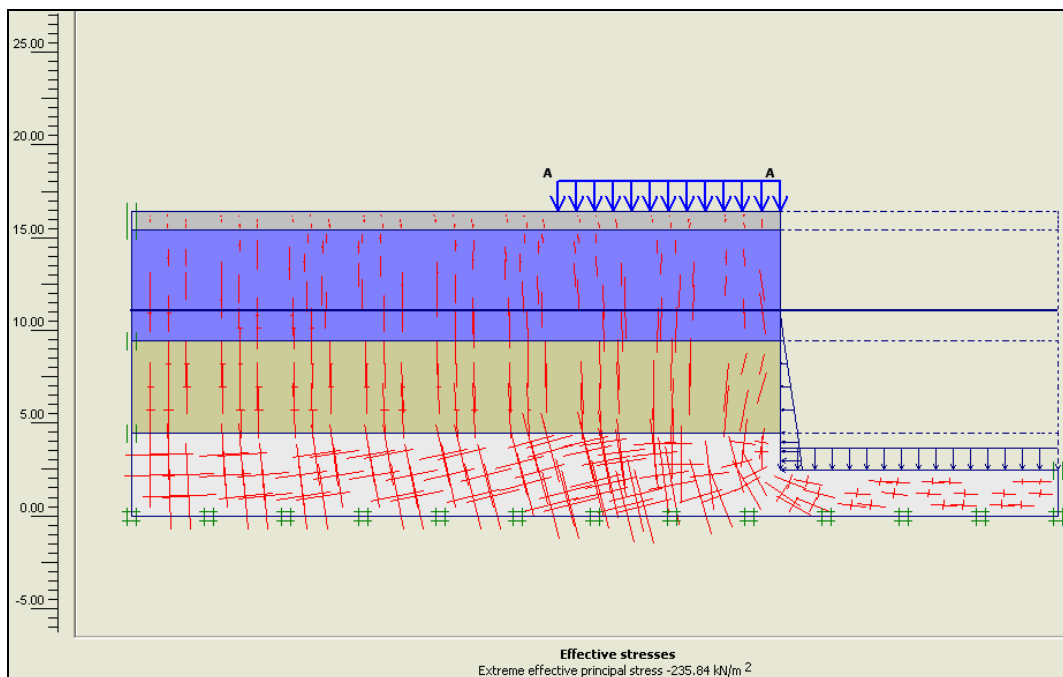


Figura 5-46. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 235.84 kN/m²

A continuación se presentan los resultados obtenidos para este modelo variando la inclinación del talud.

PROYECTO EXCAVACIÓN TALUD 1 (1V:1H)

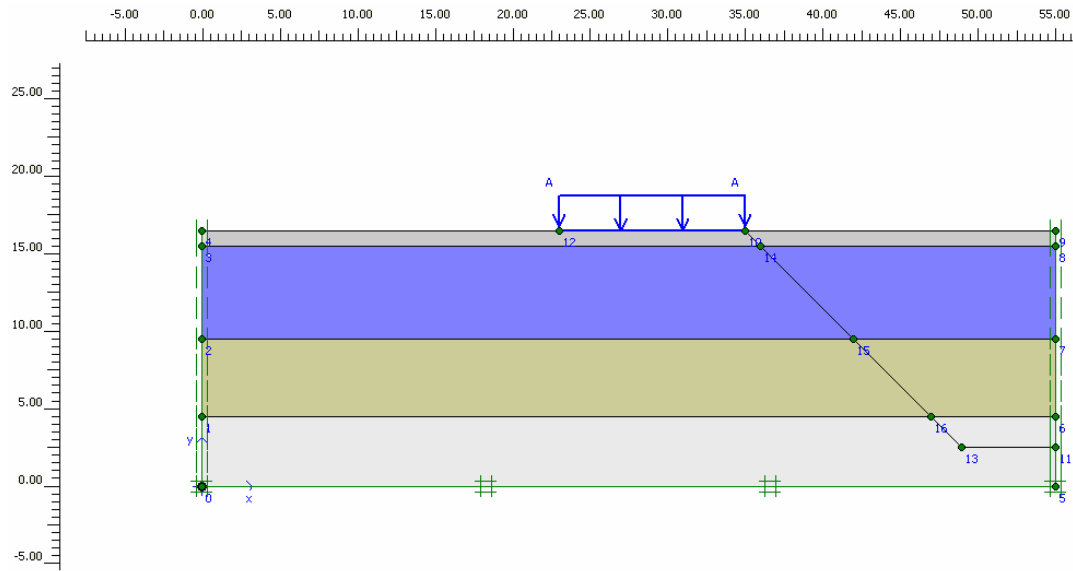


Figura 5-47. Geometría del modelo

Fase 2: Remoción del primer estrato de suelo

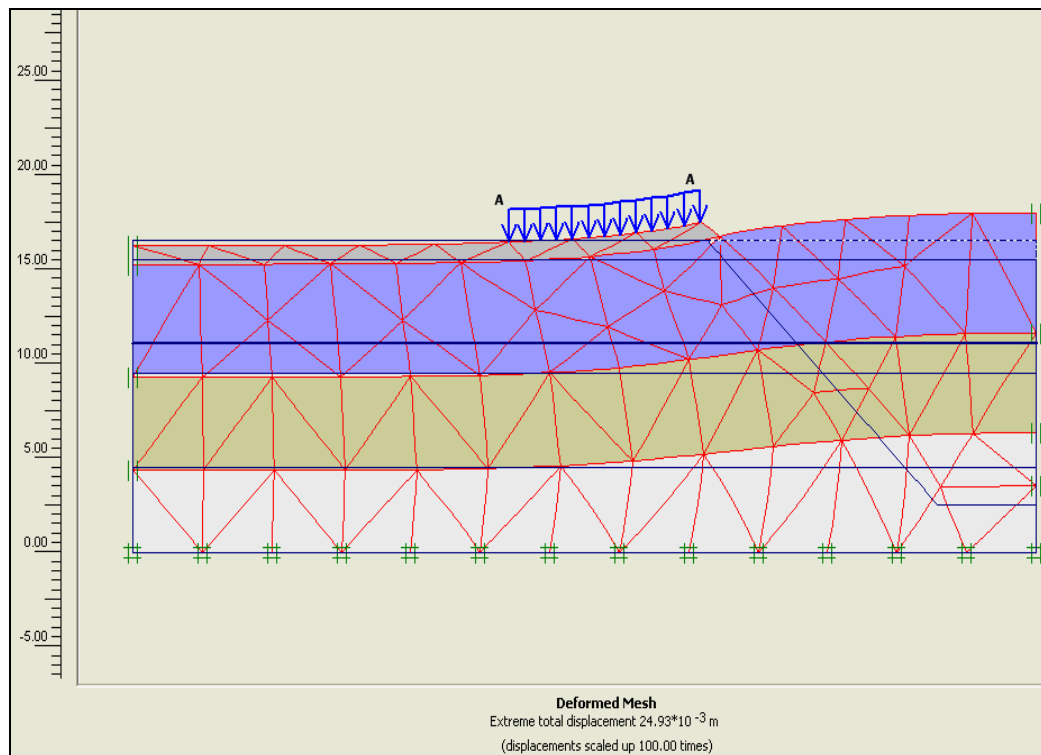


Figura 5-48. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 2

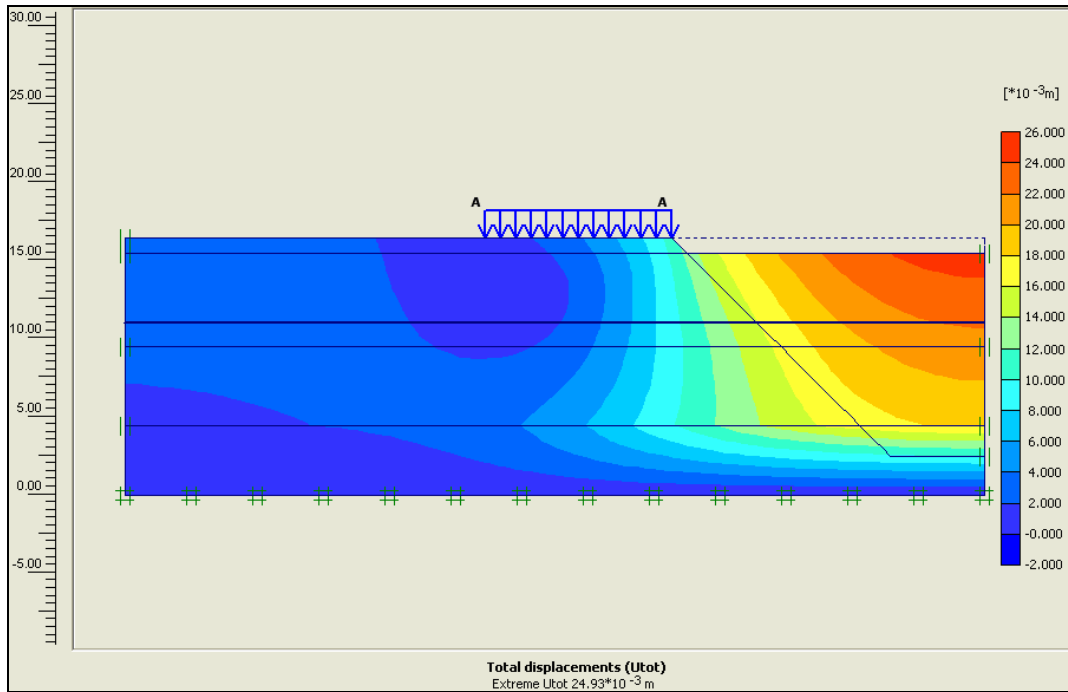


Figura 5-49. Deformaciones totales

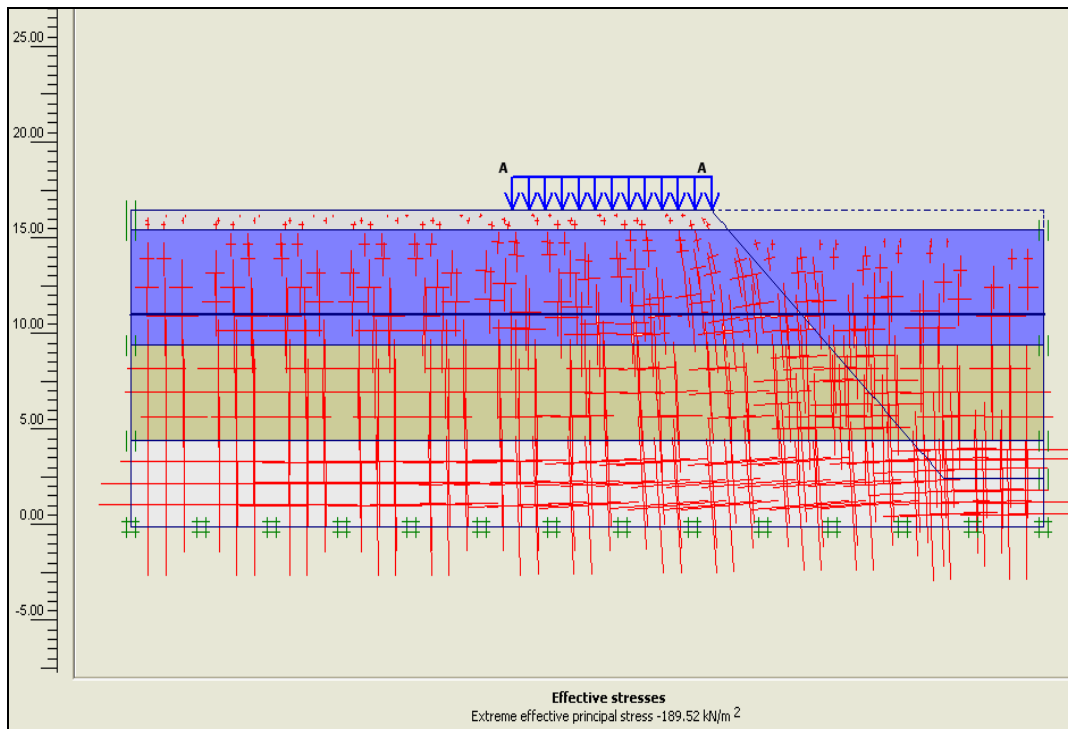


Figura 5-50. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 189.52 kN/m^2

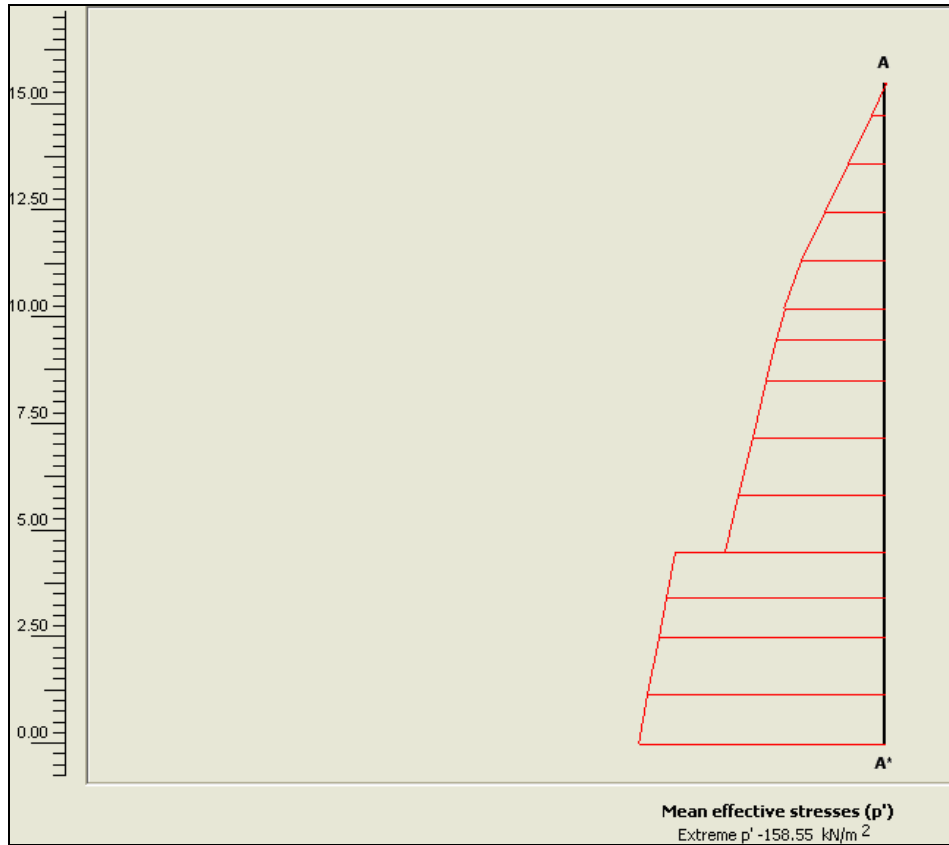


Figura 5-51. Sección transversal de esfuerzos

Fase 3: Remoción del segundo estrato de suelo

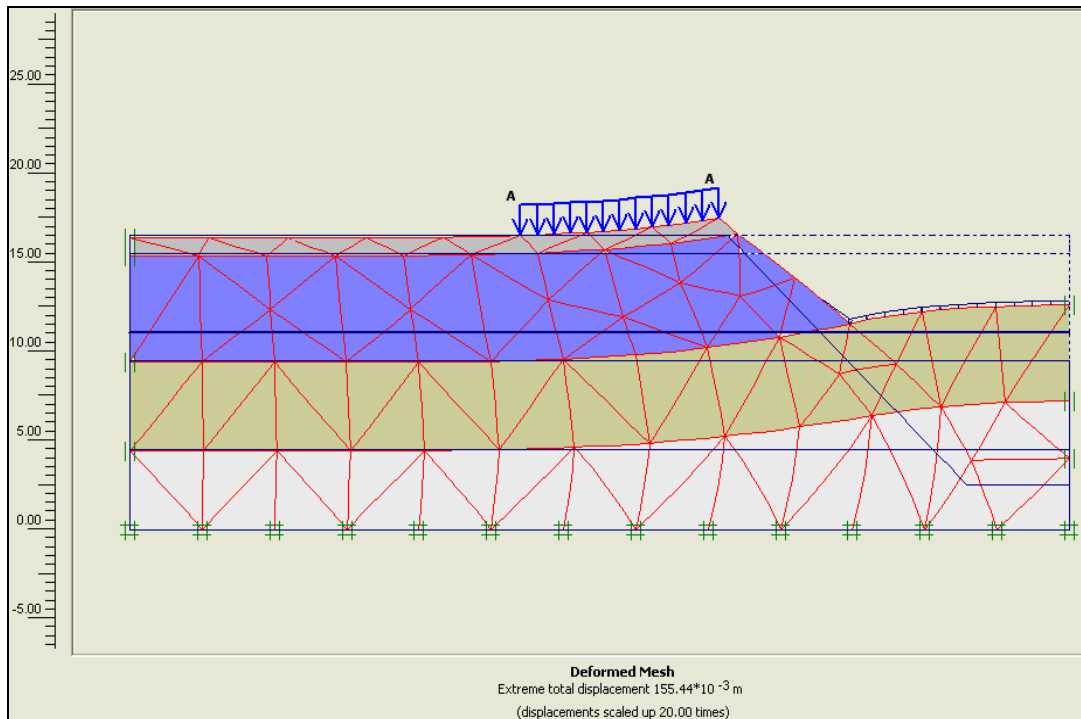


Figura 5-52. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 3

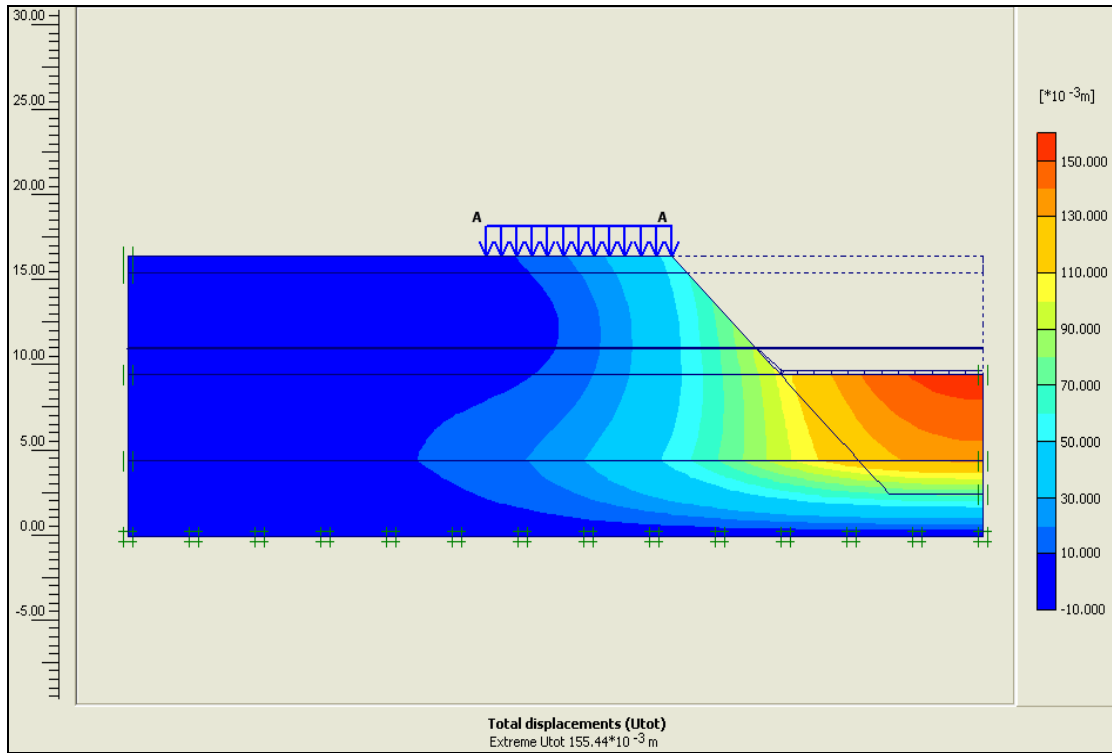


Figura 5-53. Deformaciones totales

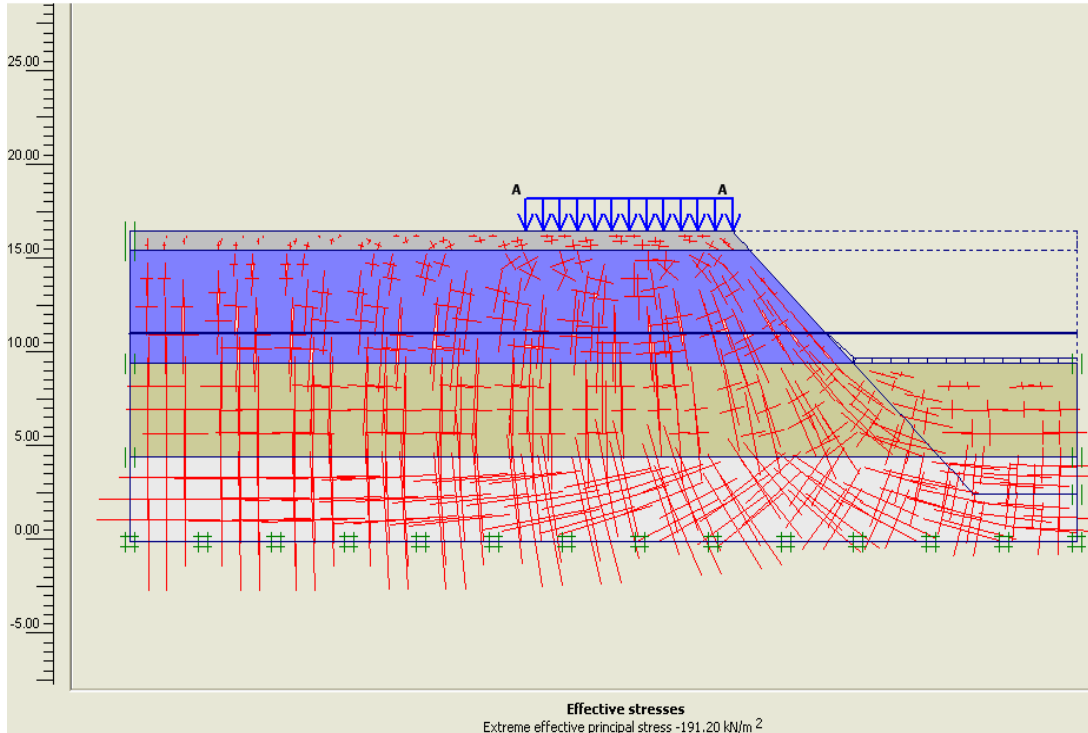


Figura 5-54. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 191.20 kN/m²

Fase 4: Remoción del tercer estrato de suelo

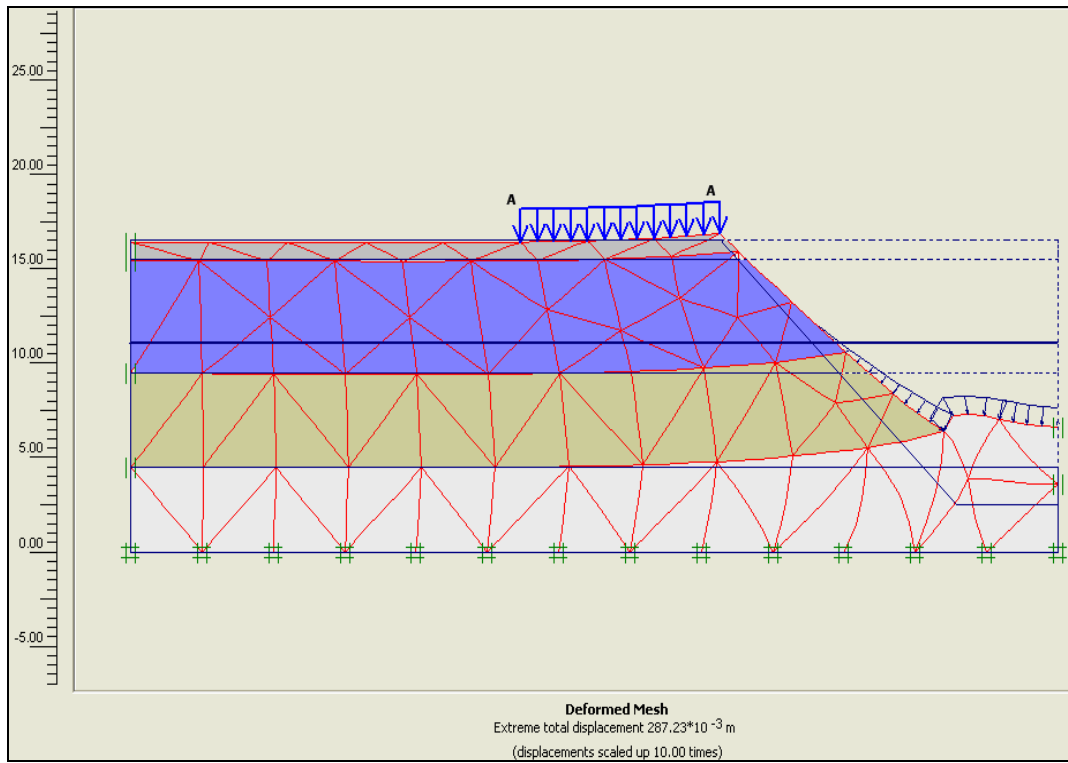


Figura 5-55. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 4

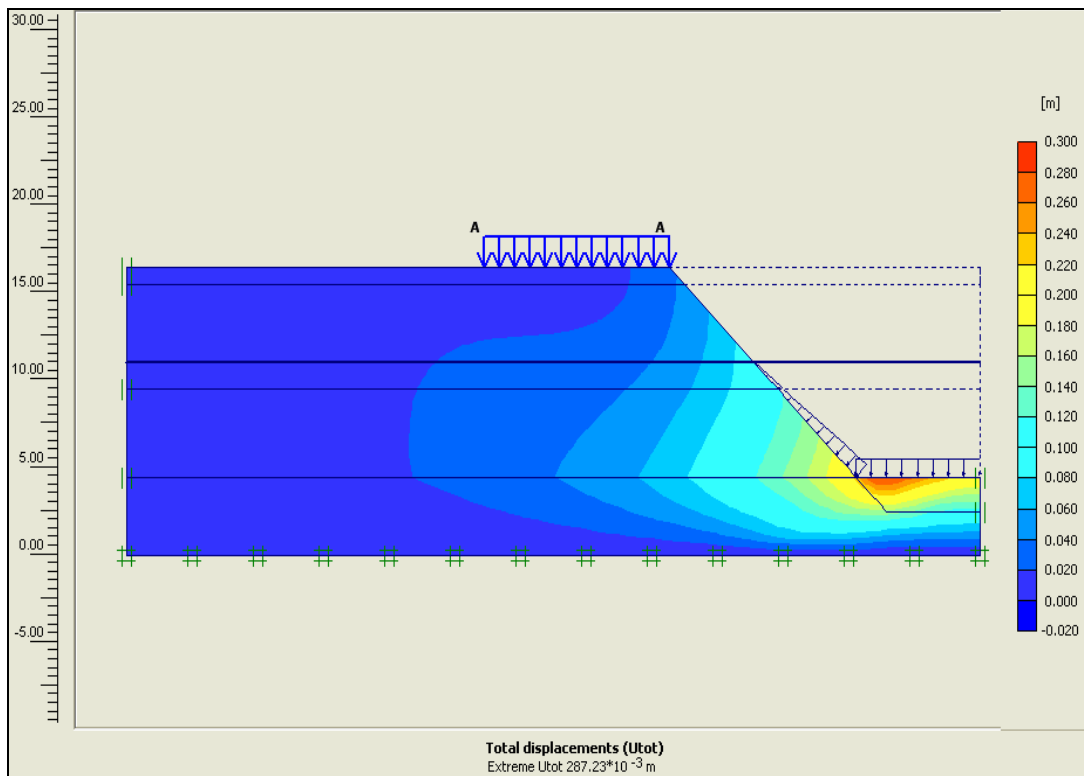


Figura 5-56. Deformaciones totales

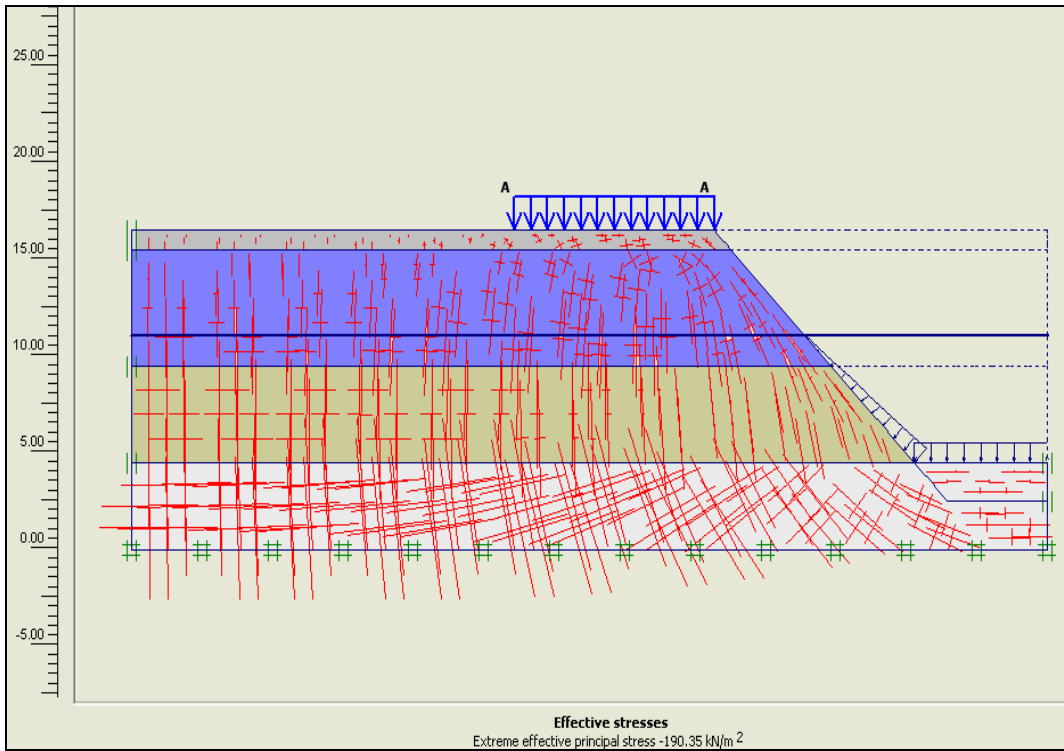


Figura 5-57. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 191.20 kN/m²

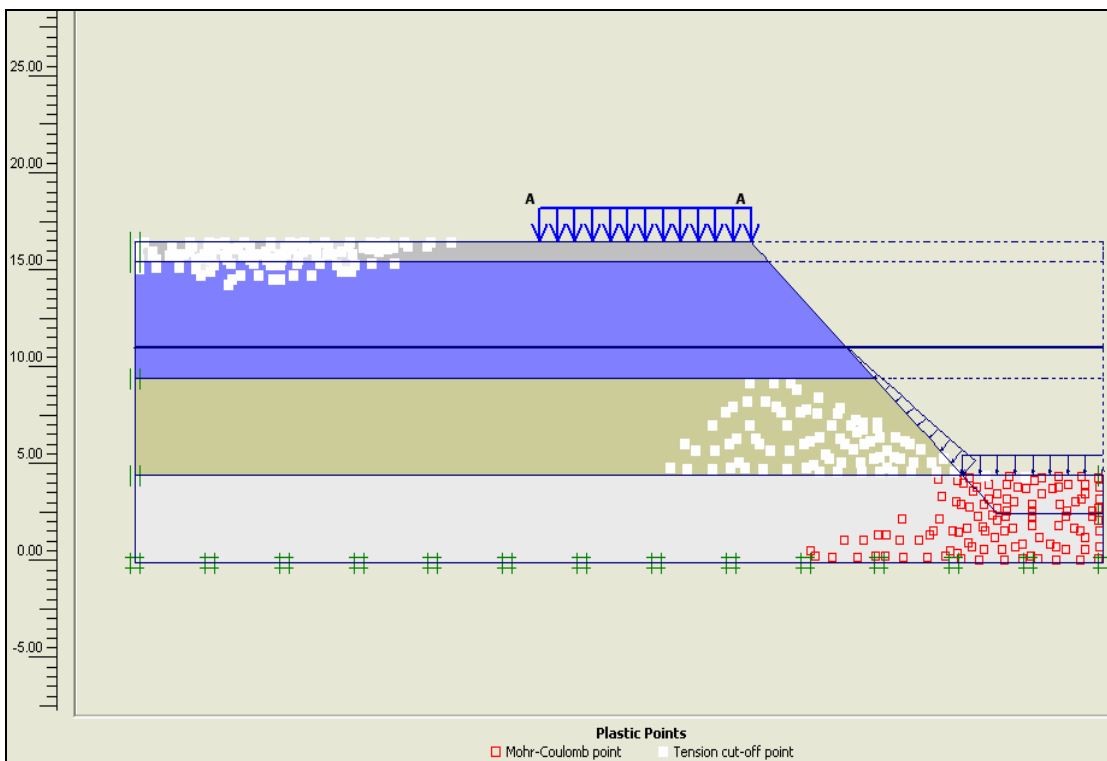


Figura 5-58. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión

Fase 5: Remoción del cuarto estrato de suelo

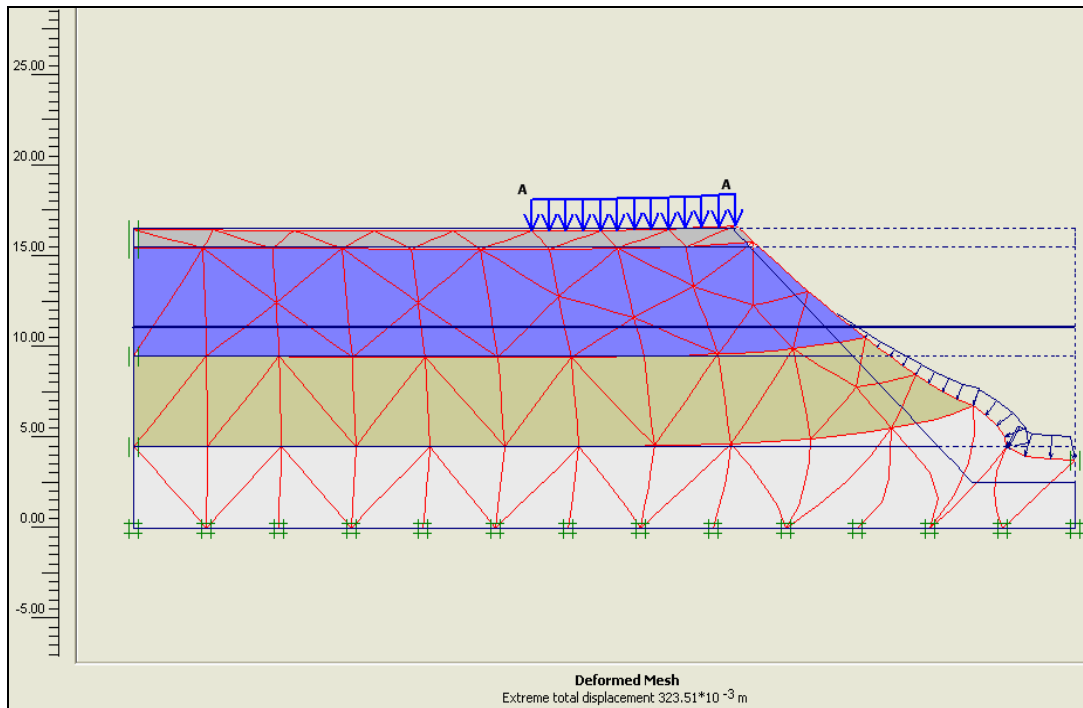


Figura 5-59. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 5

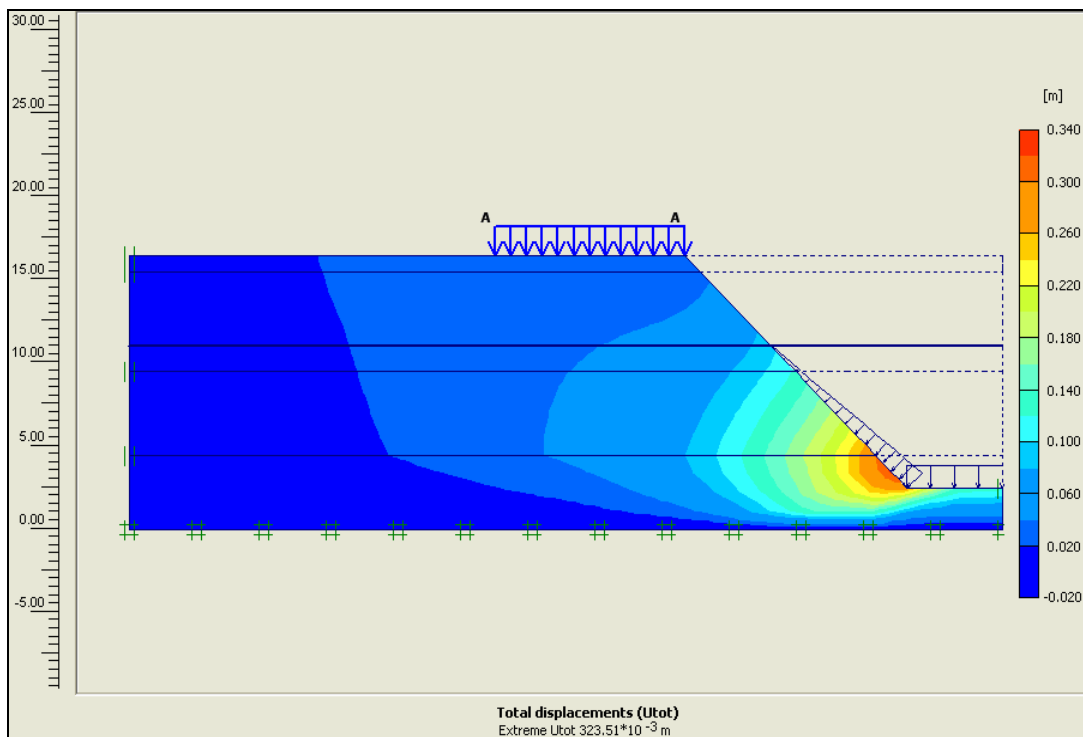


Figura 5-60. Deformaciones totales

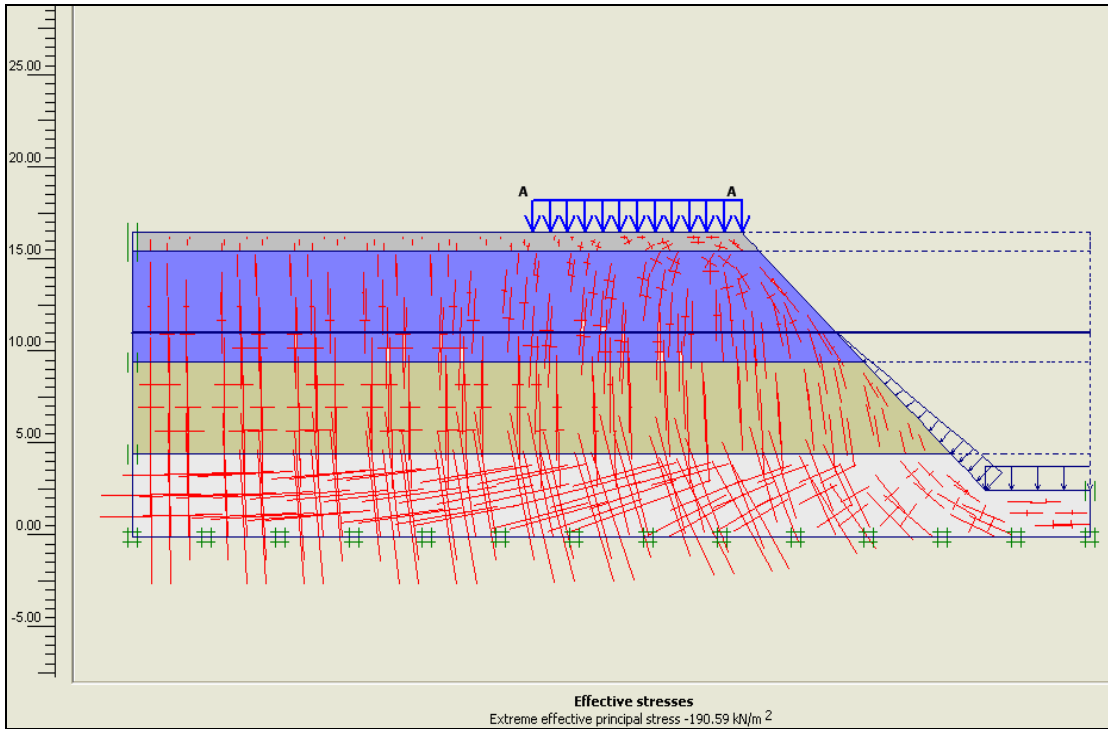


Figura 5-61. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 190.59 kN/m²

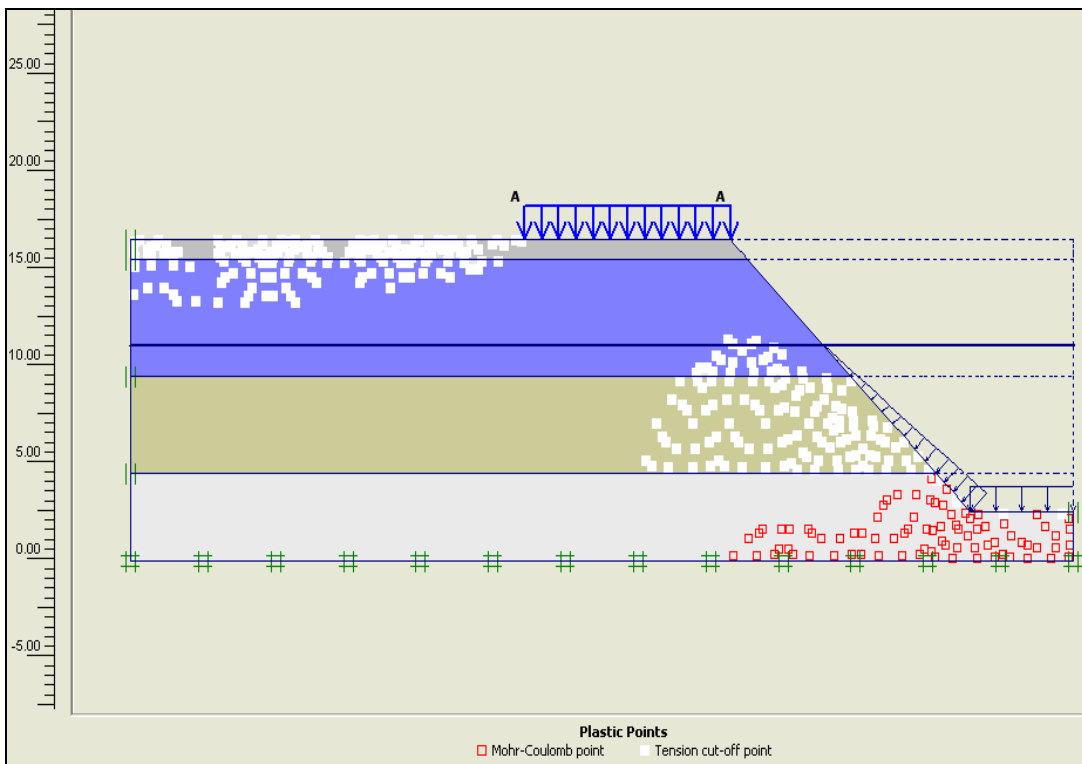


Figura 5-62. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión

Valor del factor de seguridad

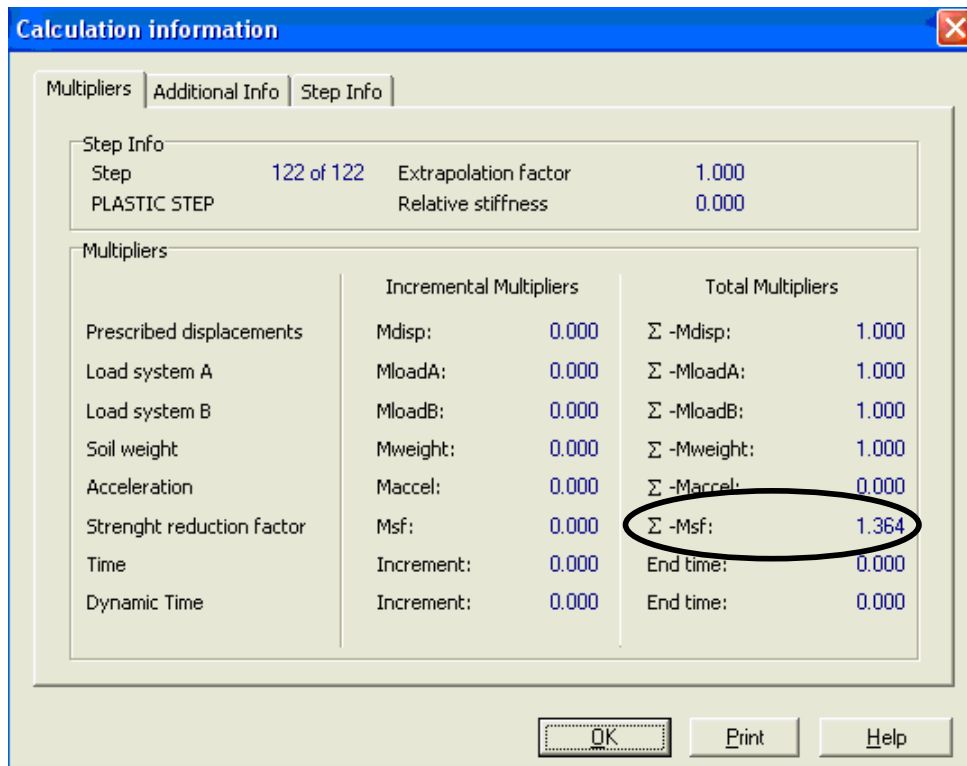


Figura 5-63. Cálculo del factor de seguridad

PROYECTO EXCAVACIÓN TALUD 1 (1V:0.5H)

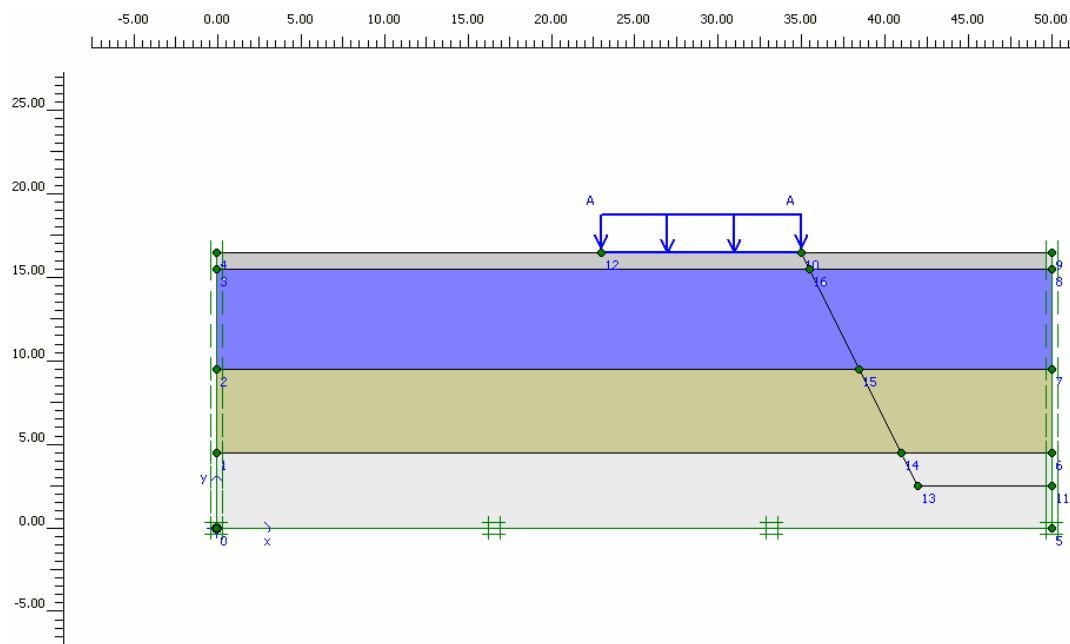


Figura 5-64. Geometría del modelo

Fase 2: Remoción del primer estrato de suelo

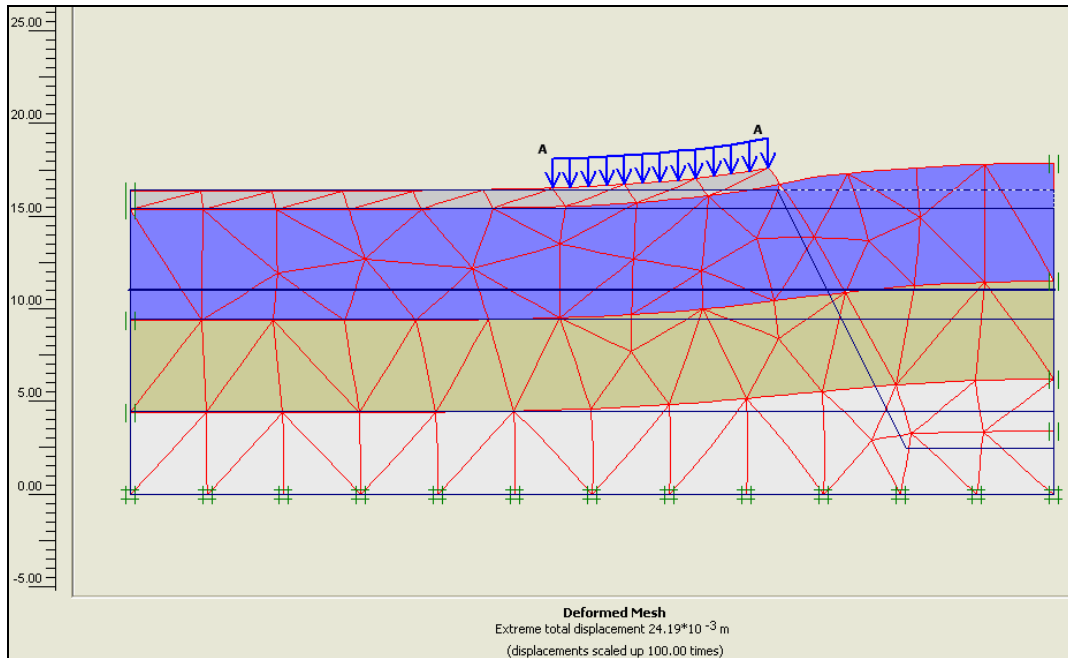


Figura 5-65. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 2

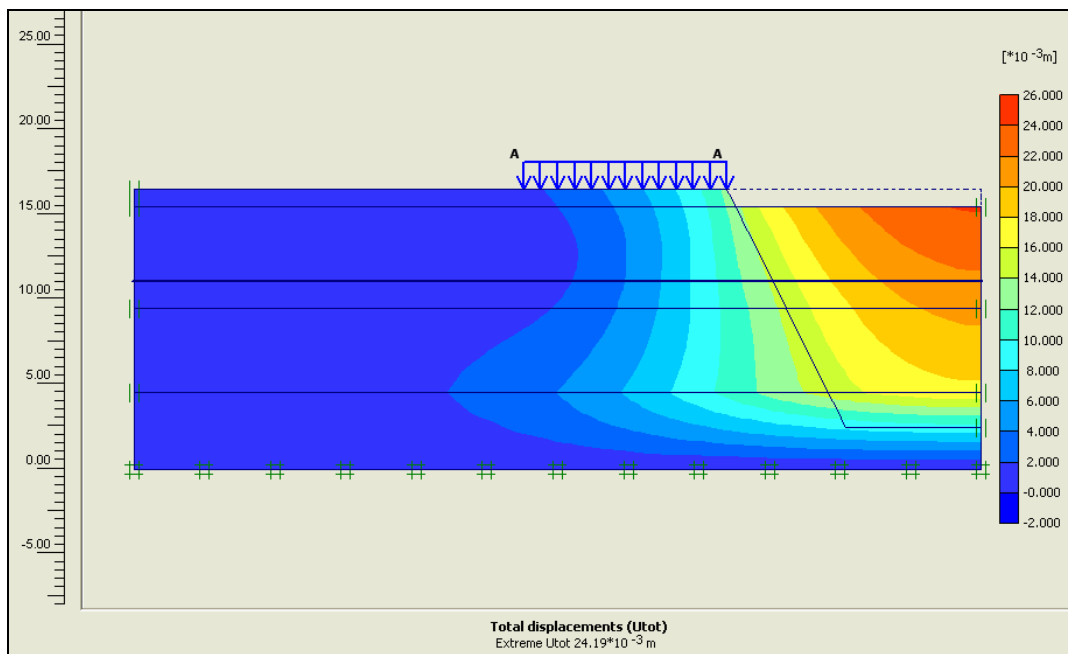


Figura 5-66. Deformaciones totales

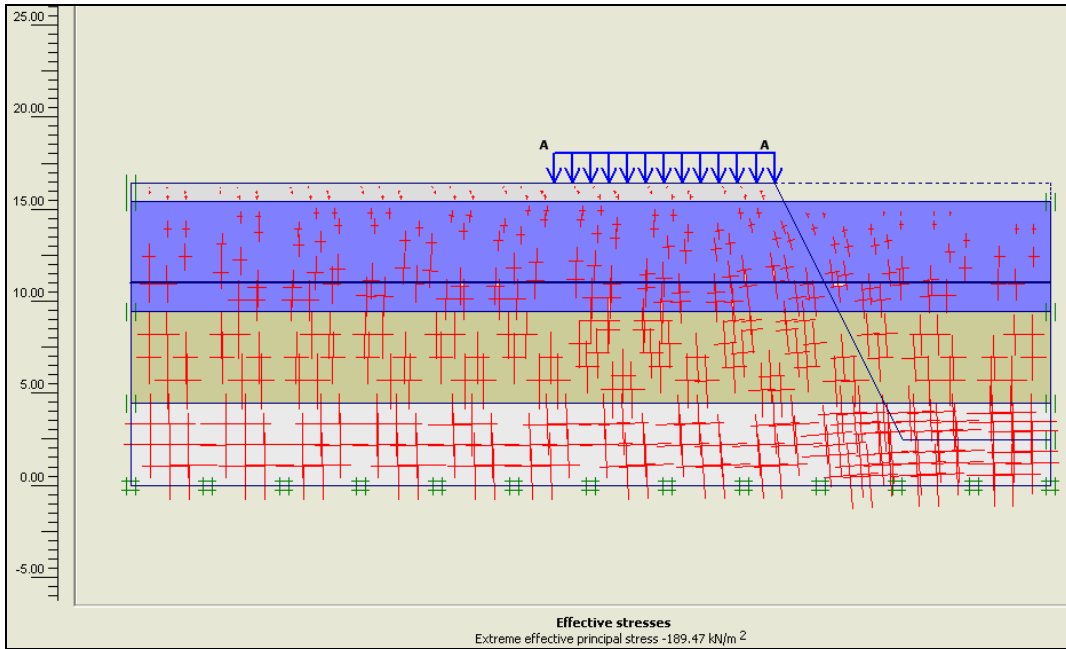


Figura 5-67. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 189.47 kN/m^2

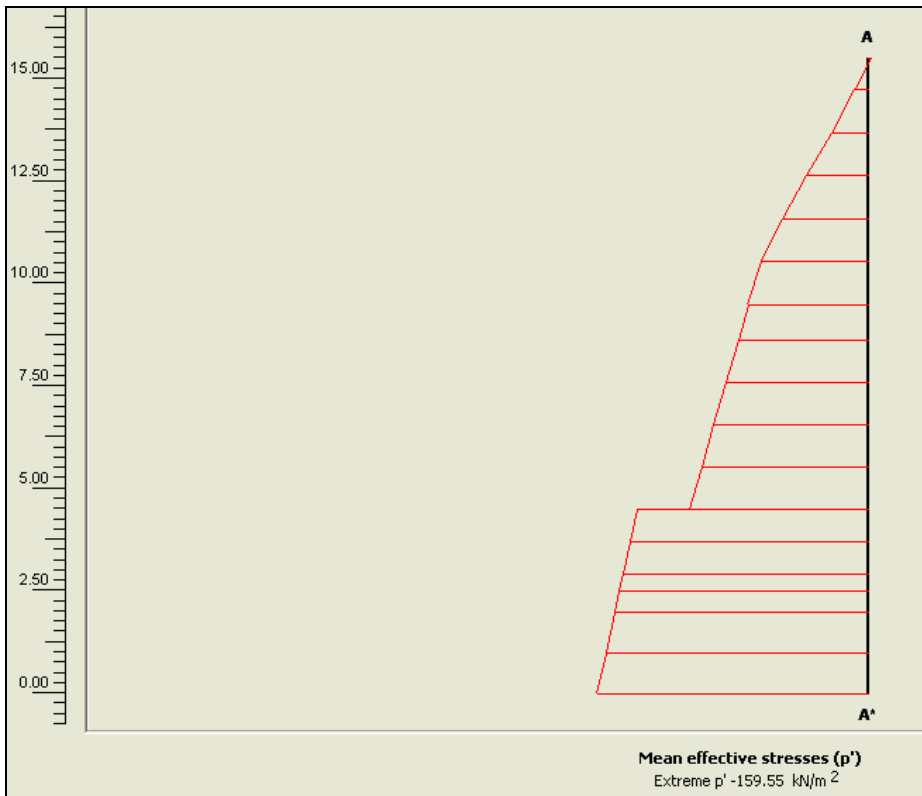


Figura 5-68. Sección transversal de esfuerzos

Fase 3: Remoción del segundo estrato de suelo

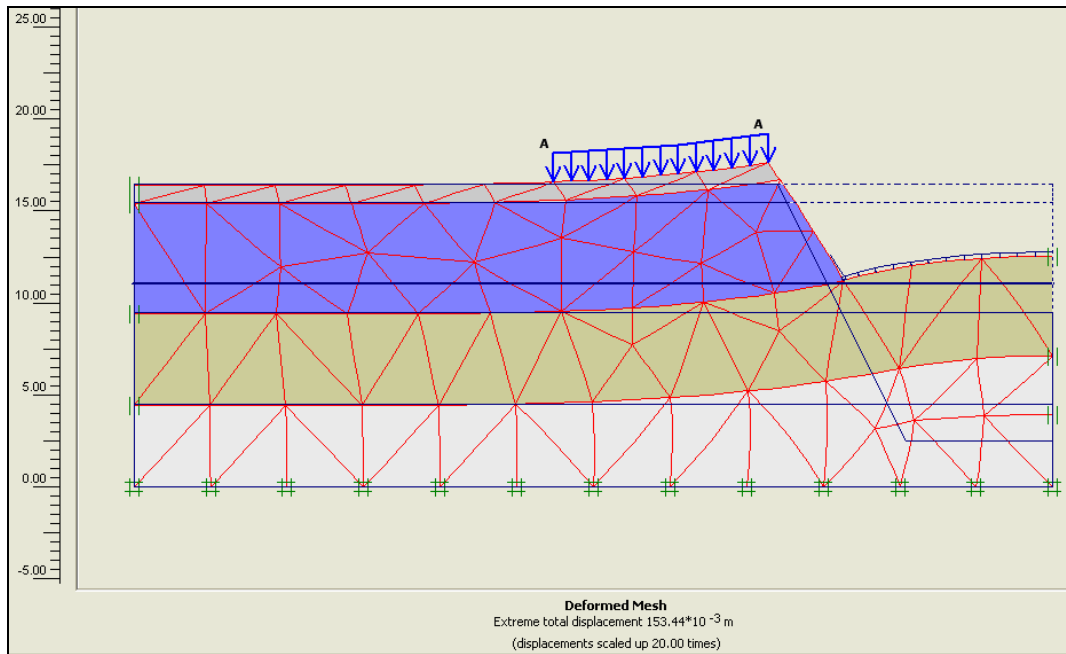


Figura 5-69. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 3

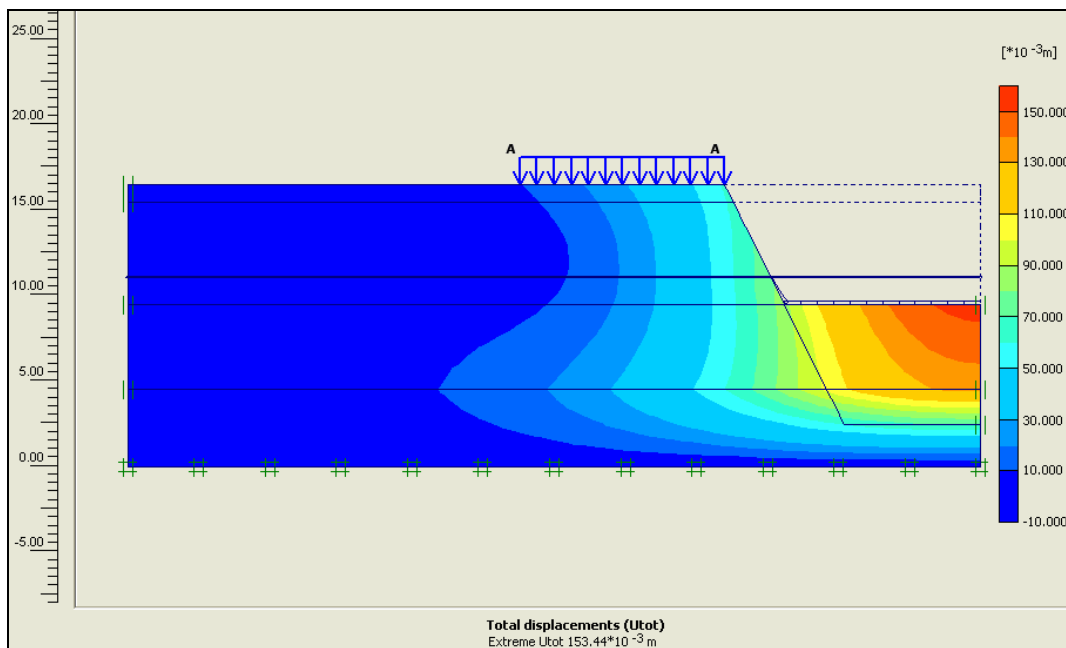


Figura 5-70. Deformaciones totales

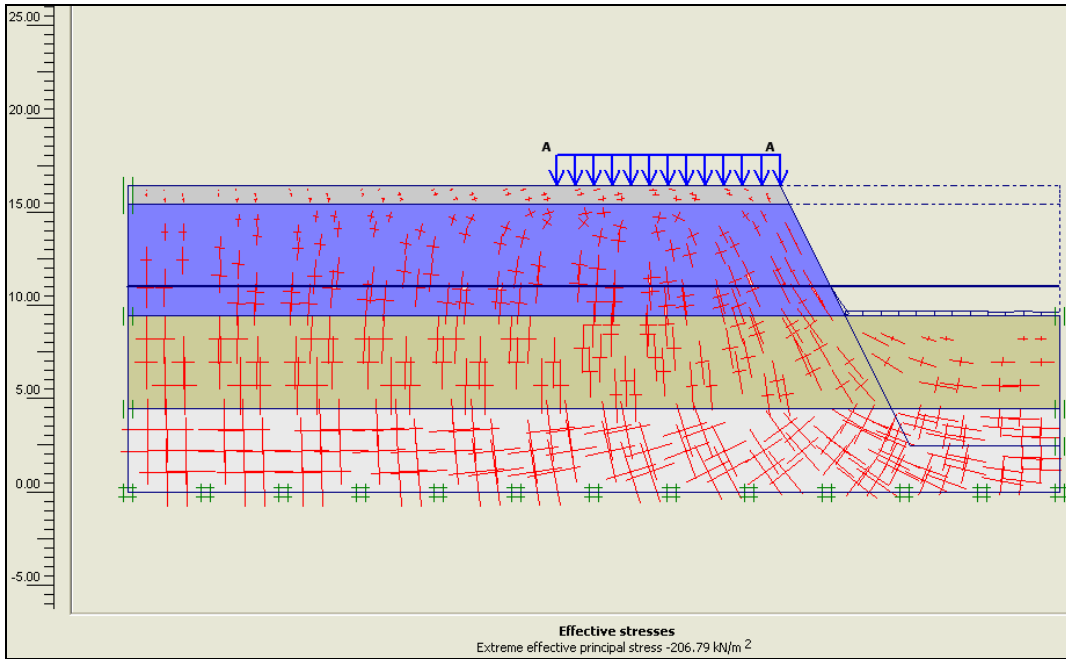


Figura 5-71. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 206.79 kN/m²

Fase 4: Remoción del tercer estrato de suelo

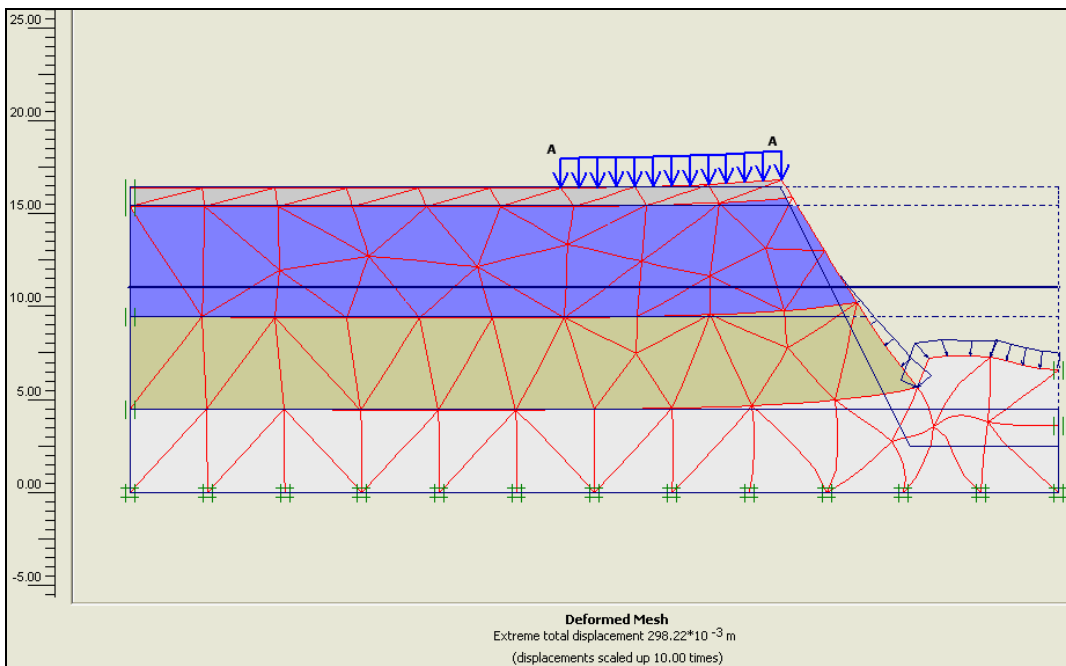


Figura 5-72. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 4

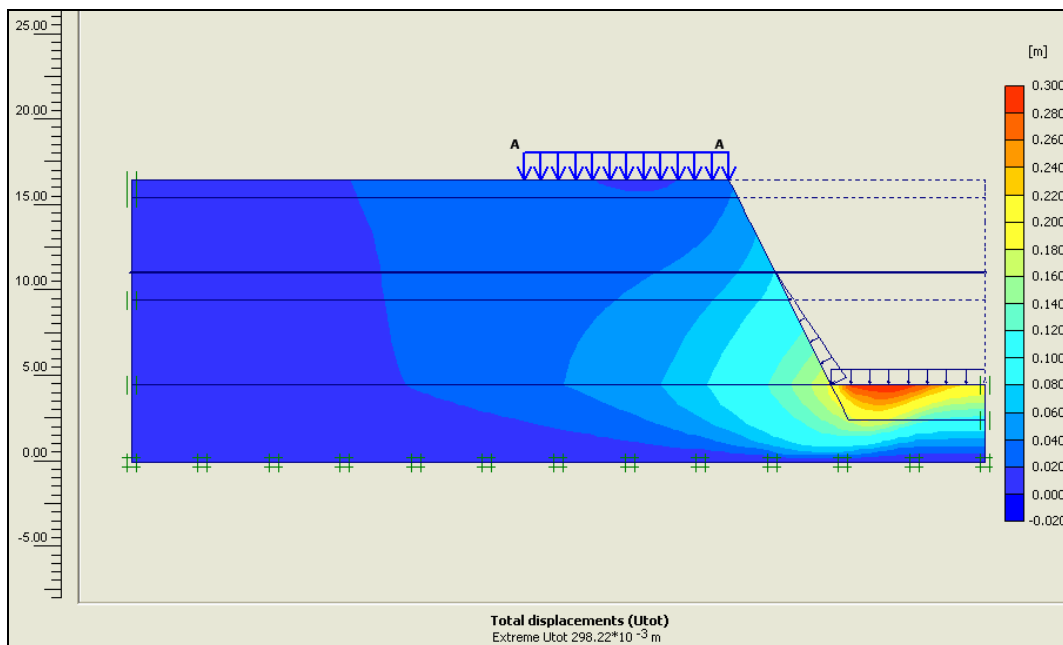


Figura 5-73. Deformaciones totales

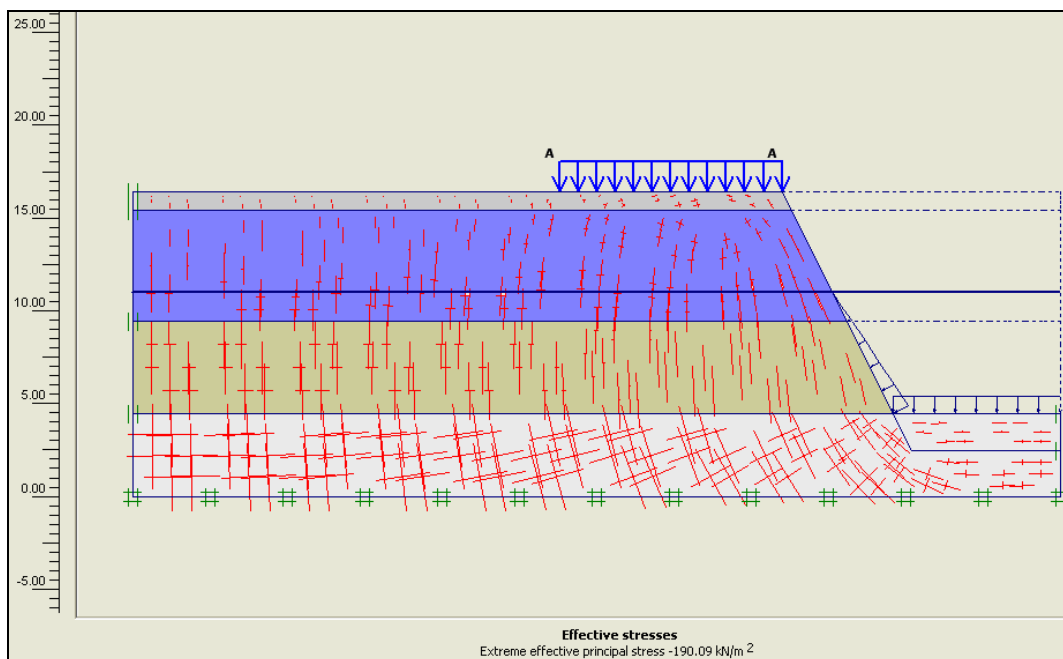


Figura 5-74. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 190.09 kN/m²

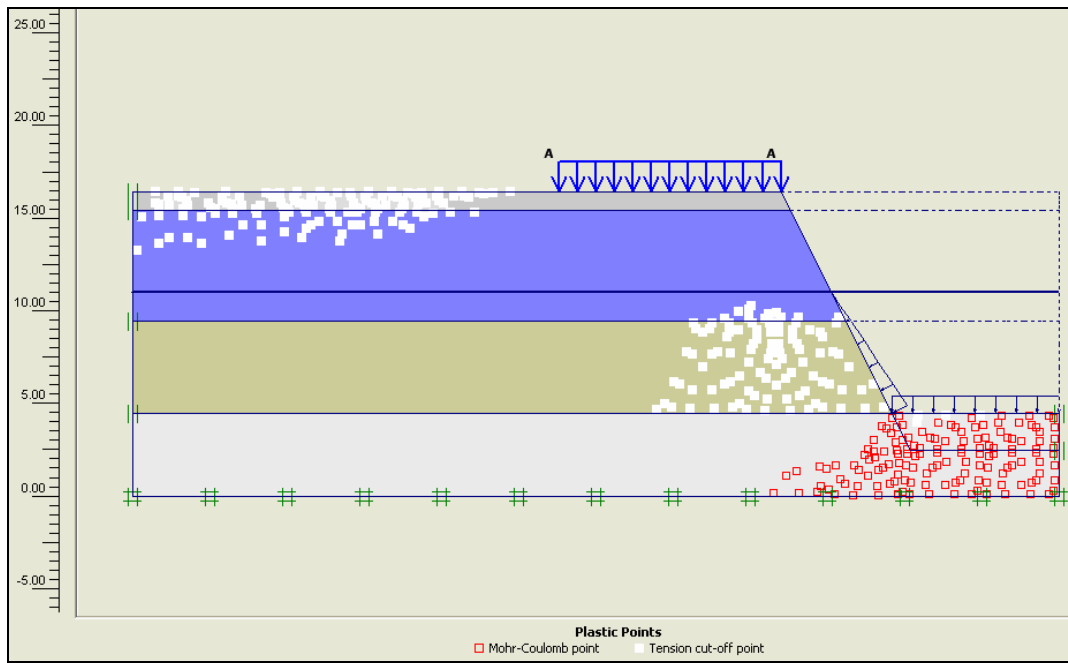


Figura 5-75. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión

Fase 5: Remoción del cuarto estrato de suelo

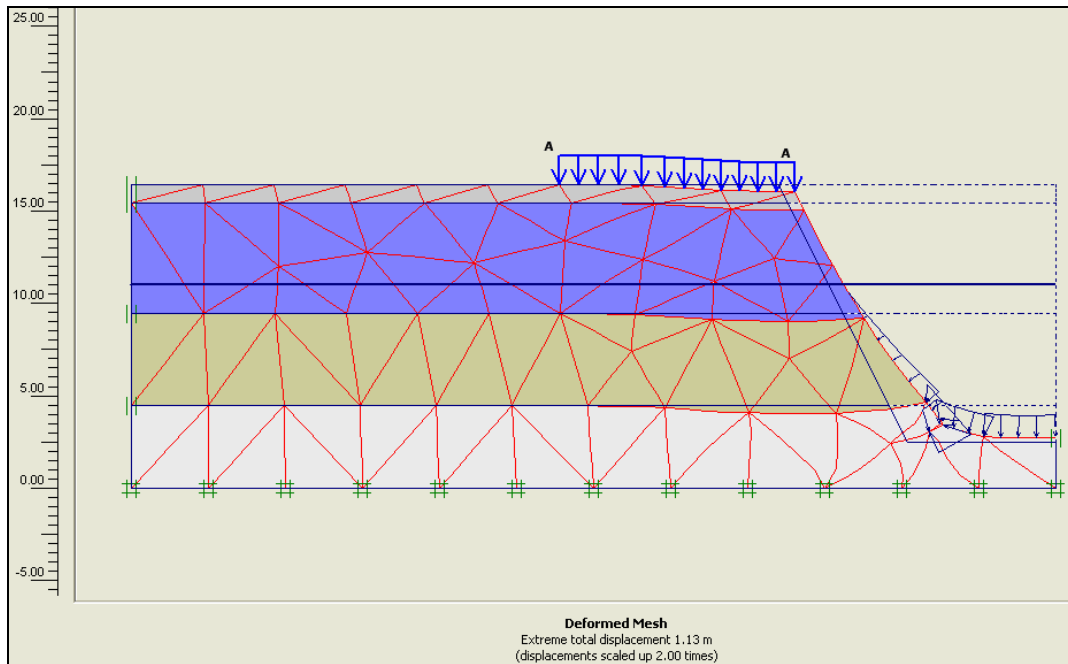


Figura 5-76. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 5

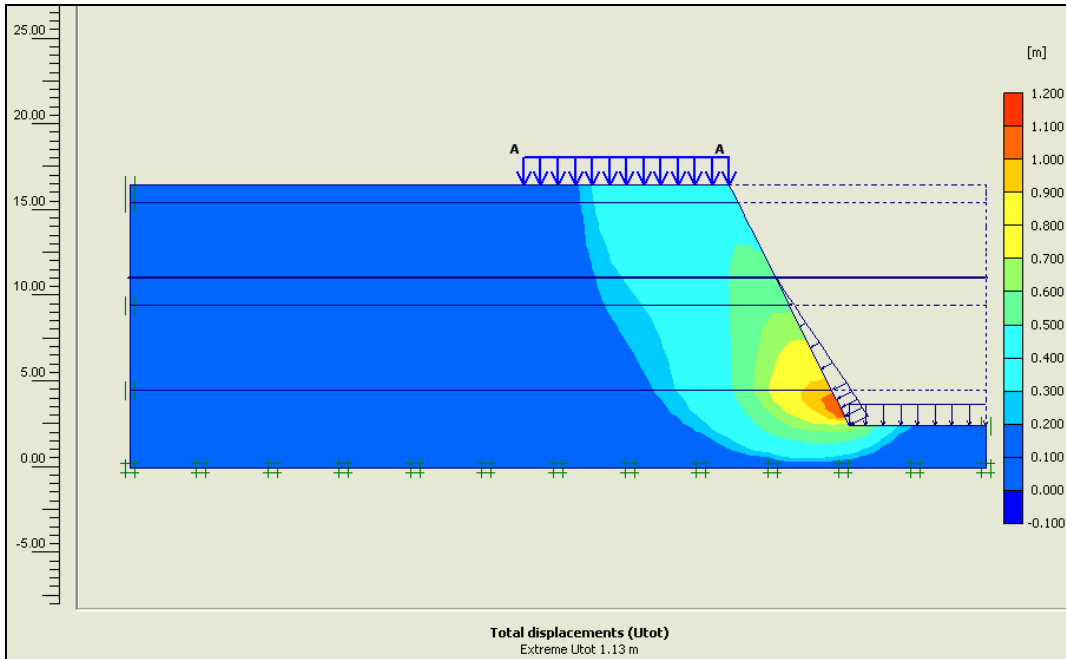


Figura 5-77. Deformaciones totales

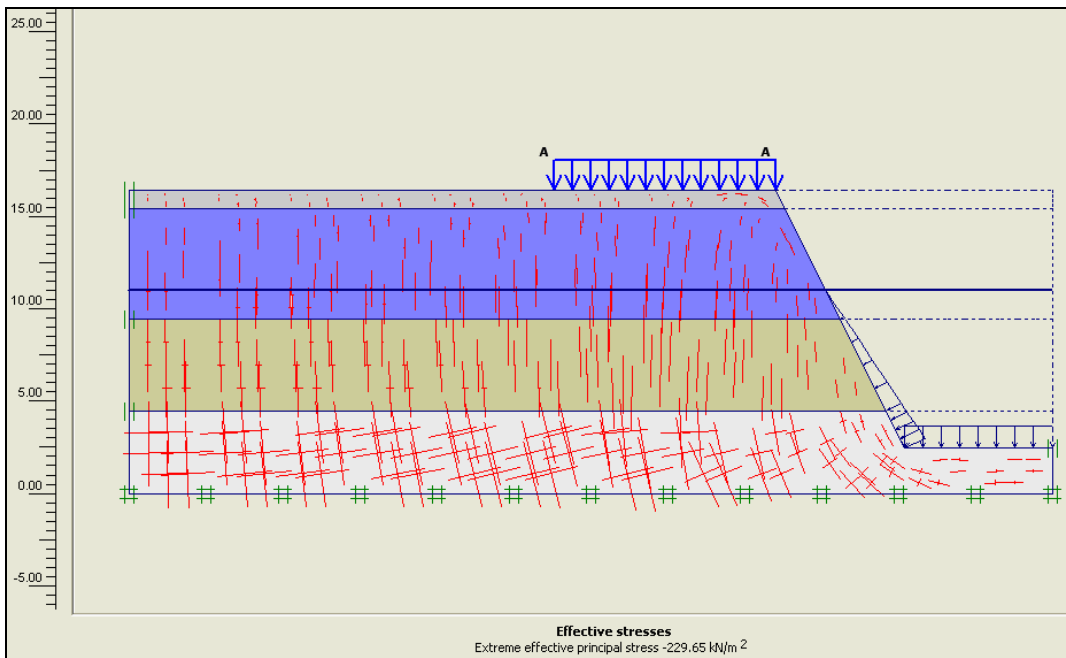


Figura 5-78. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 229.65 kN/m^2

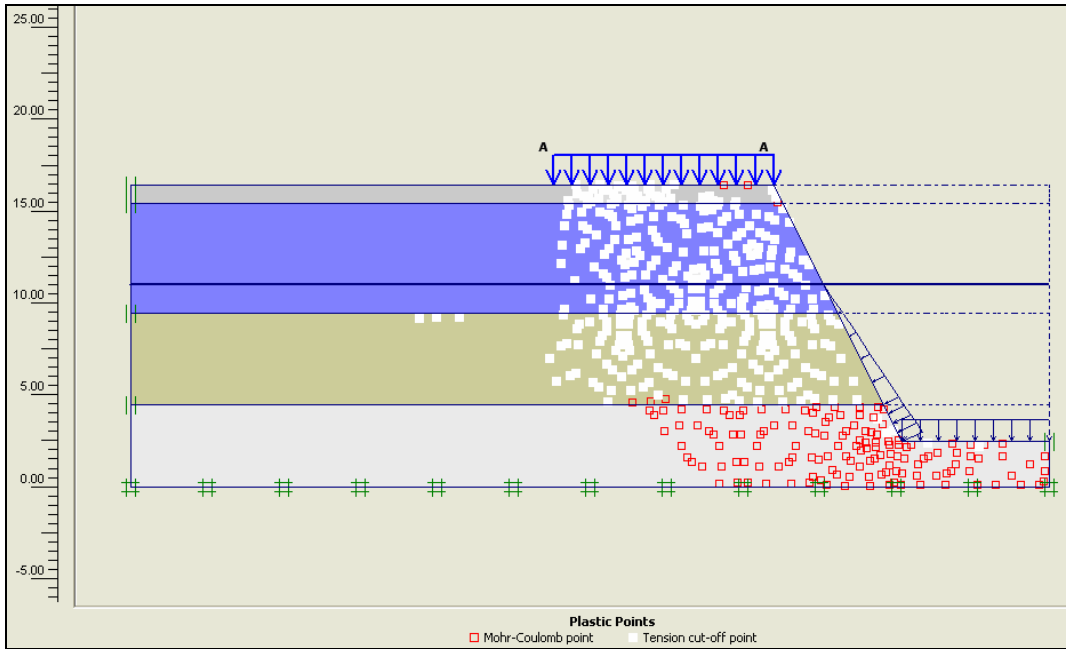


Figura 5-79. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión

Valor del factor de seguridad

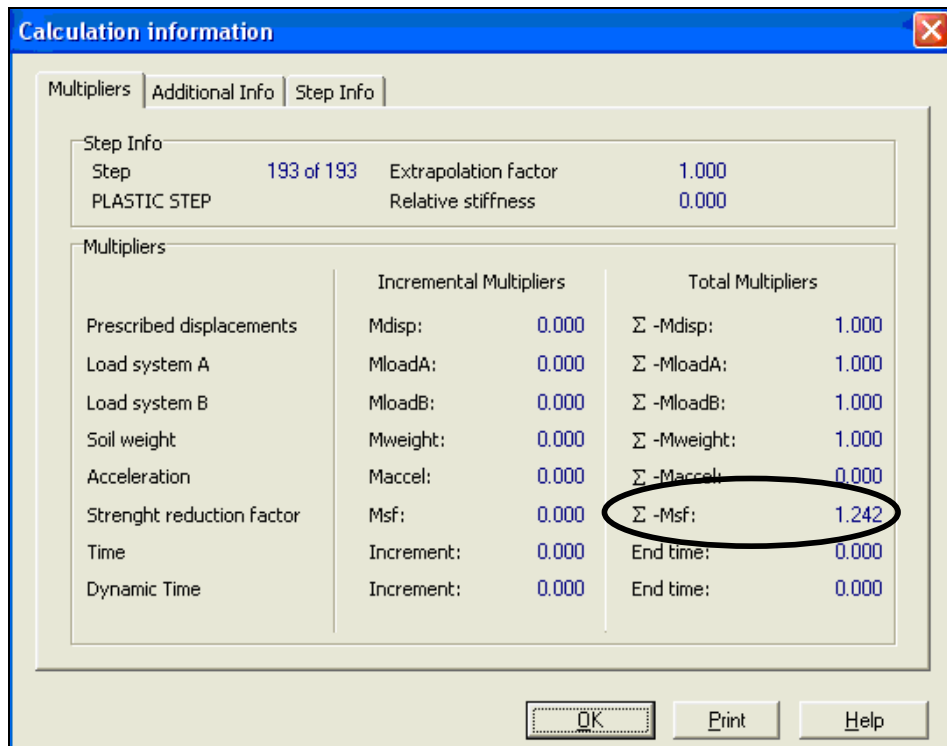


Figura 5-80. Cálculo del factor de seguridad

PROYECTO EXCAVACIÓN TALUD 1 (1V:3/4H)

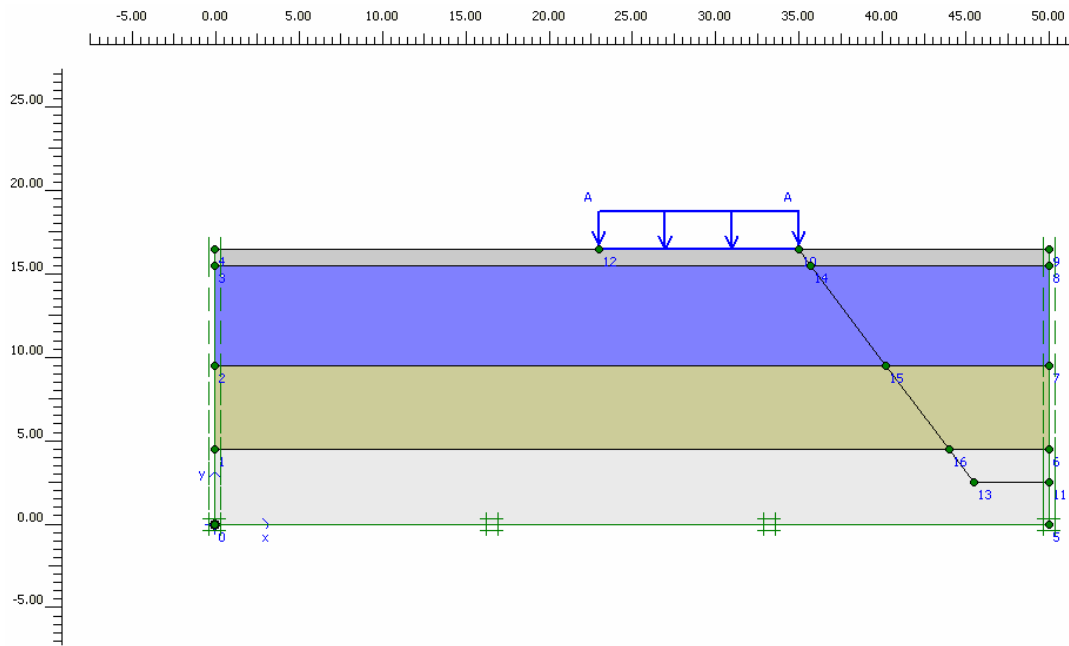


Figura 5-81. Geometría del modelo

Fase 2: Remoción del primer estrato de suelo

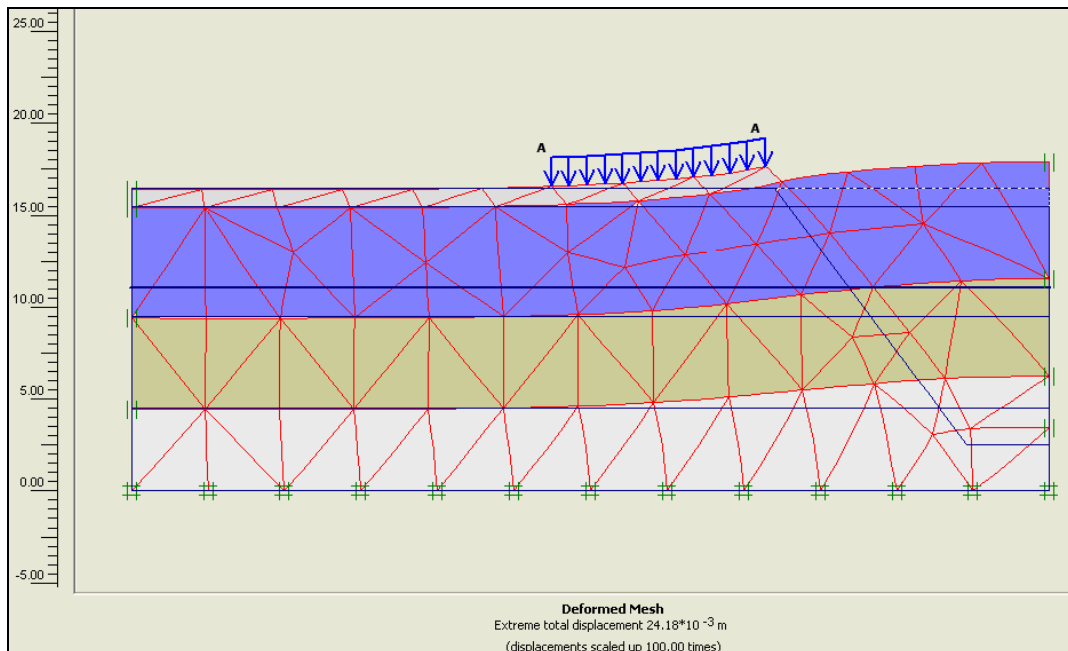


Figura 5-82. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 2

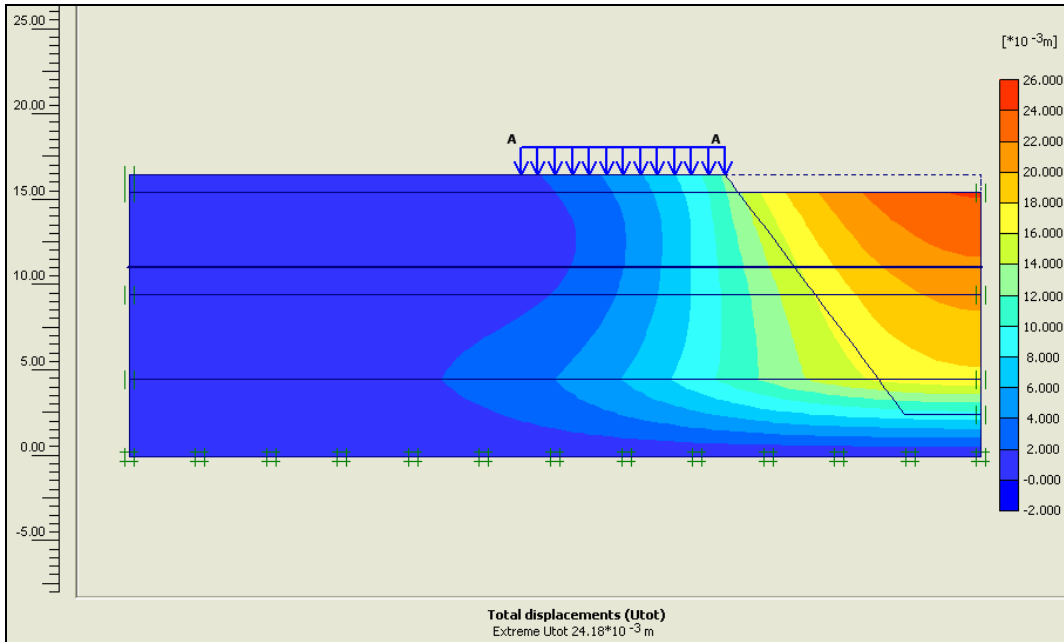


Figura 5-83. Deformaciones totales

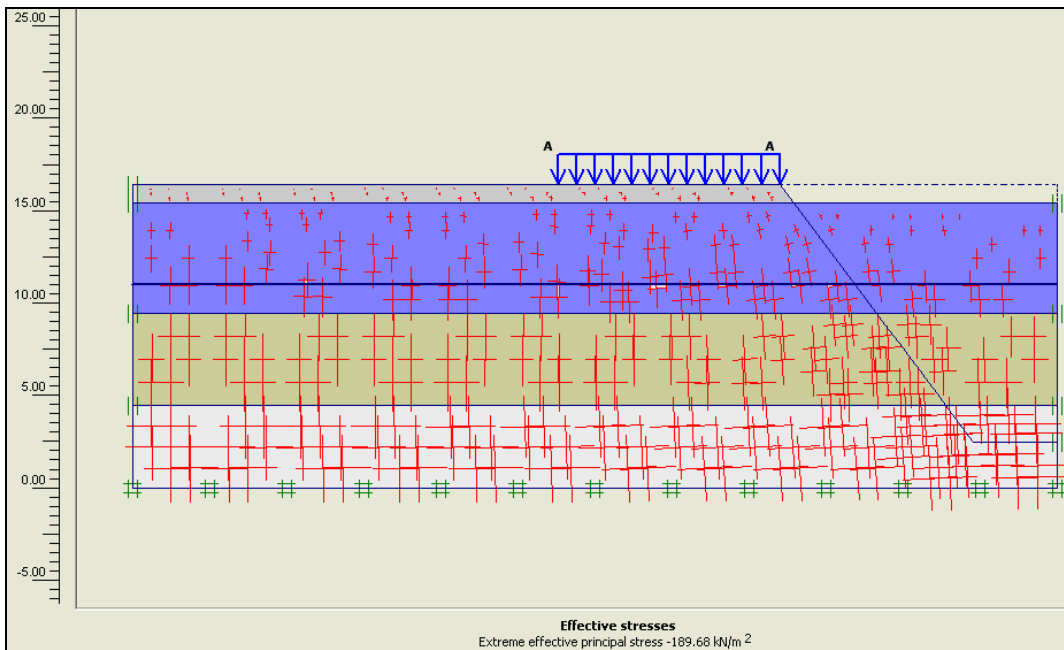


Figura 5-84. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 189.68 kN/m^2

Fase 3: Remoción del segundo estrato de suelo

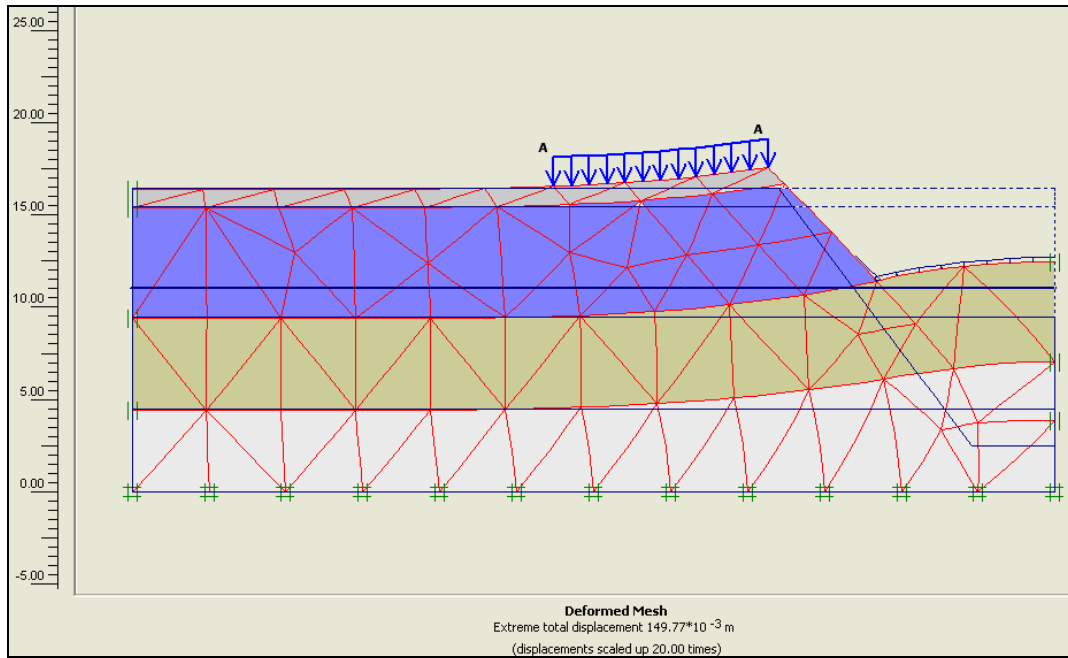


Figura 5-85. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 3

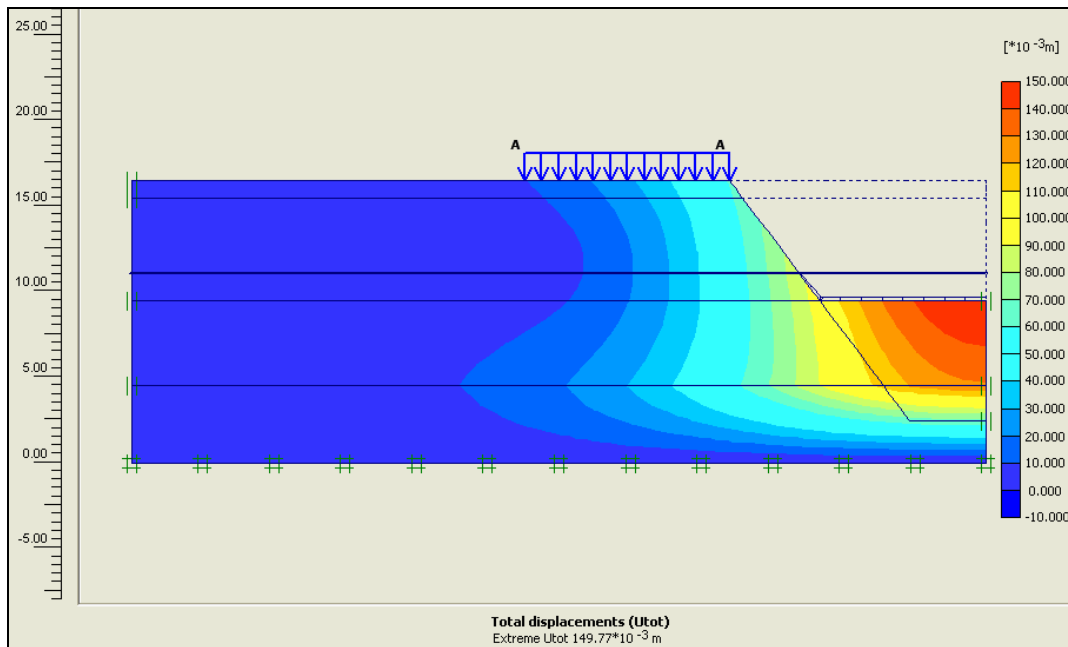


Figura 5-86. Deformaciones totales

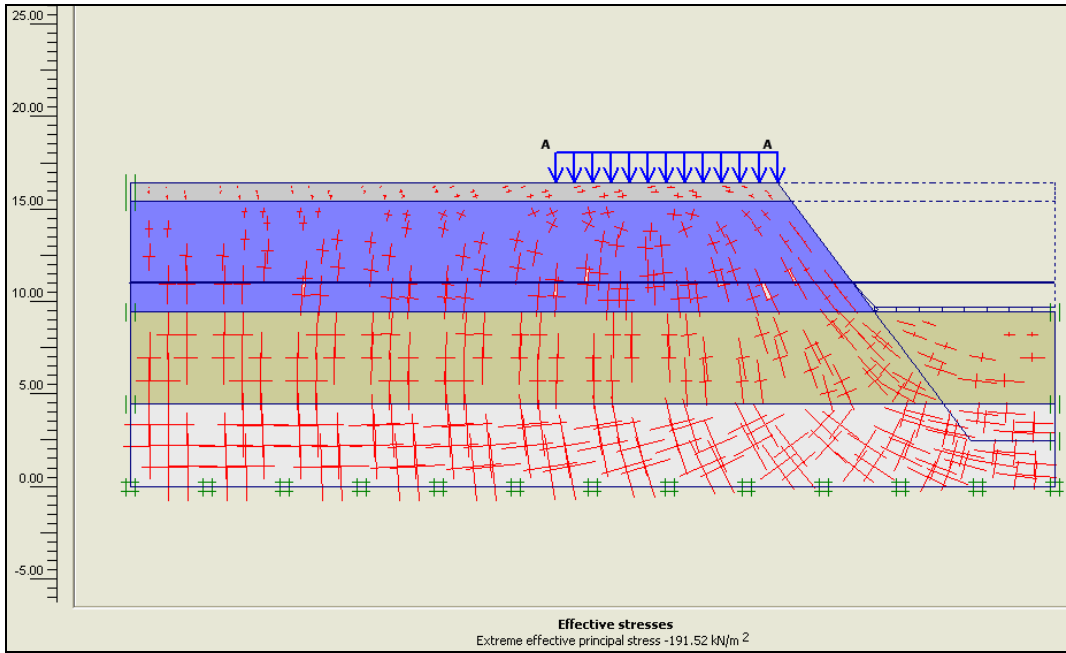


Figura 5-87. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 191.52 kN/m²

Fase 4: Remoción del tercer estrato de suelo

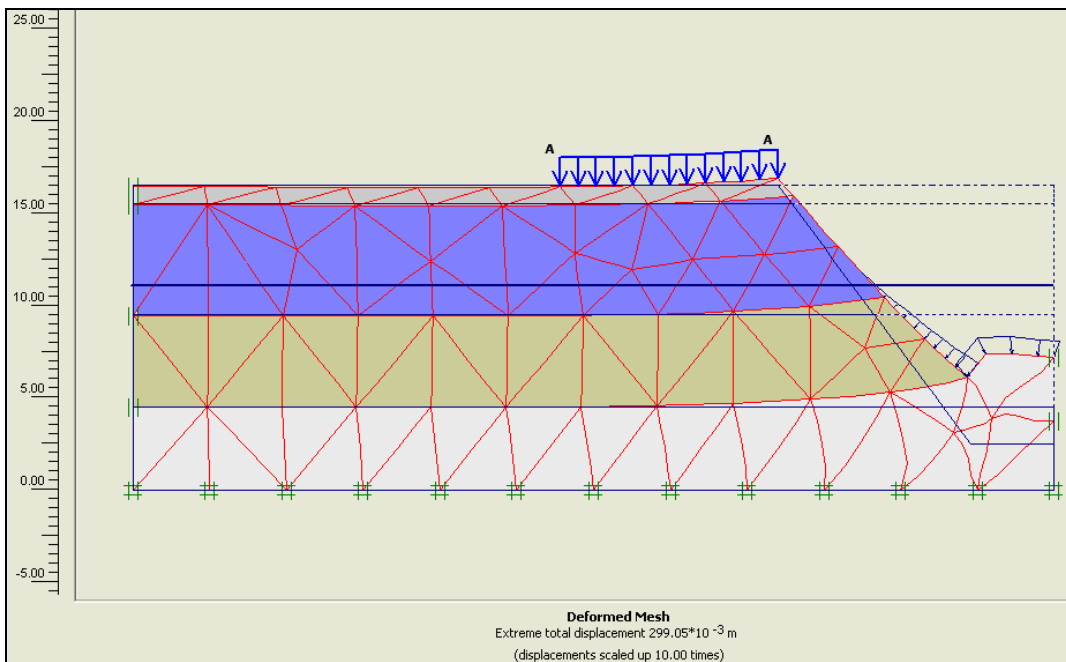


Figura 5-88. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 4

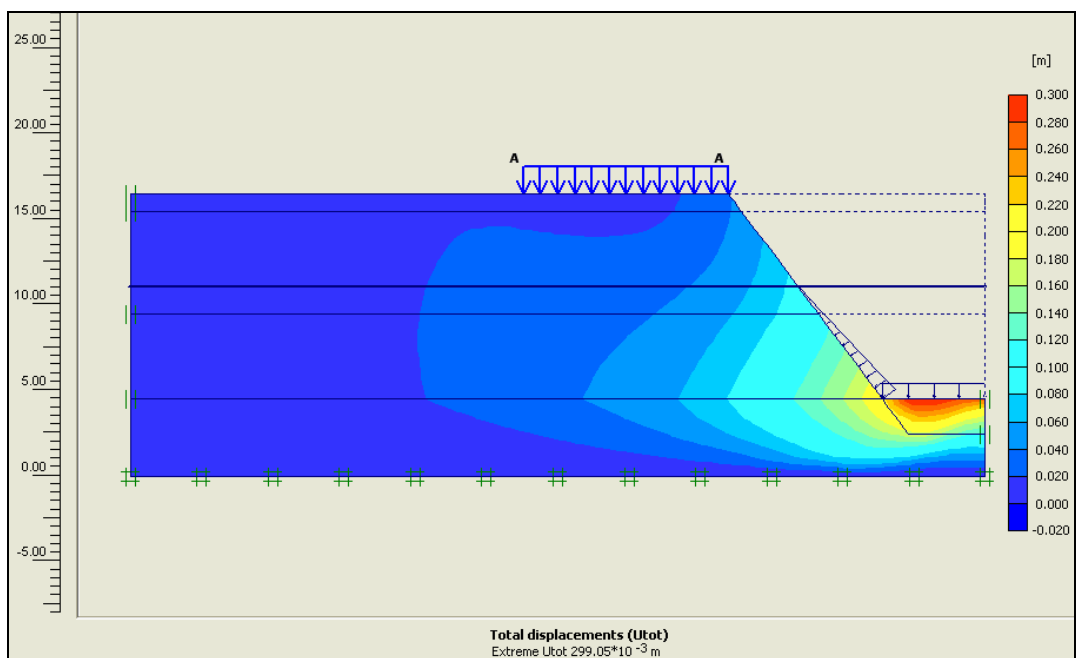


Figura 5-89. Deformaciones totales

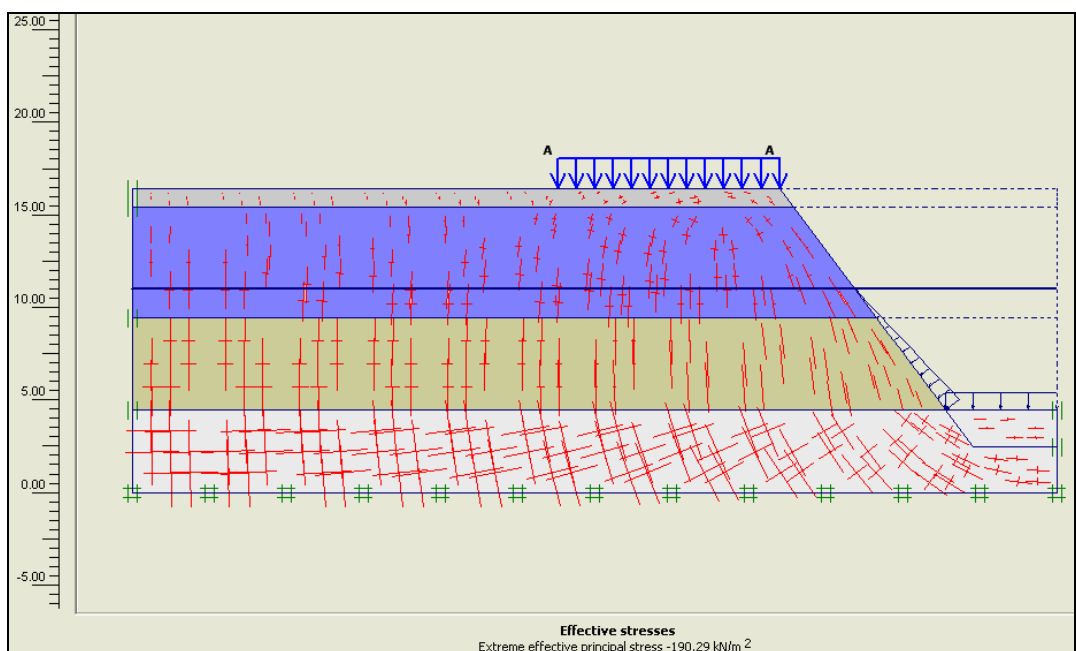


Figura 5-90. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 190.29 kN/m²

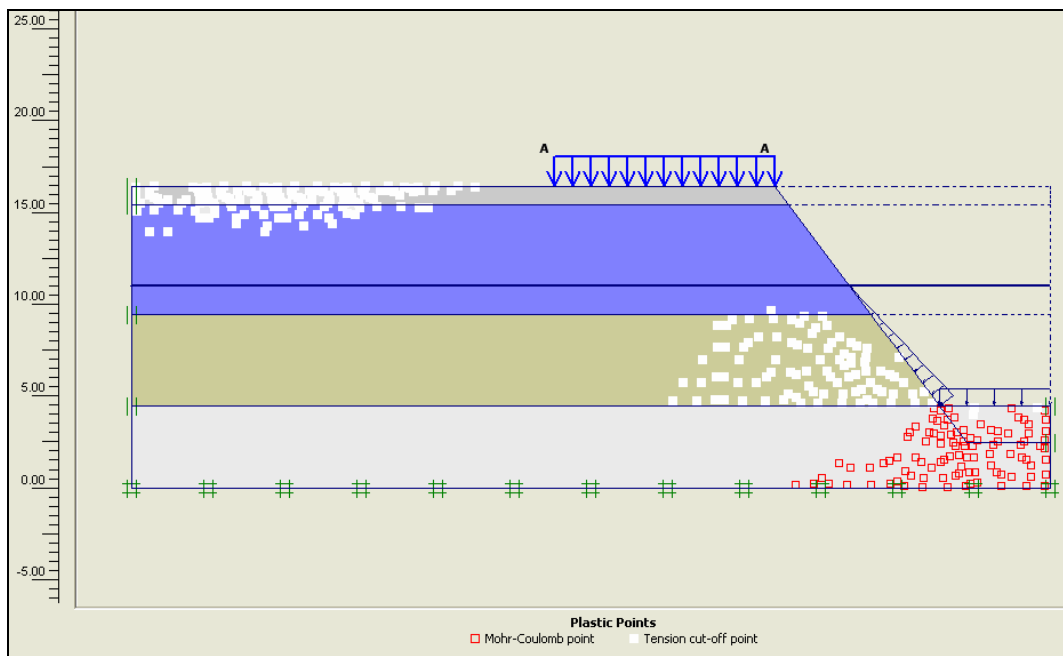


Figura 5-91. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión

Fase 5: Remoción del cuarto estrato de suelo

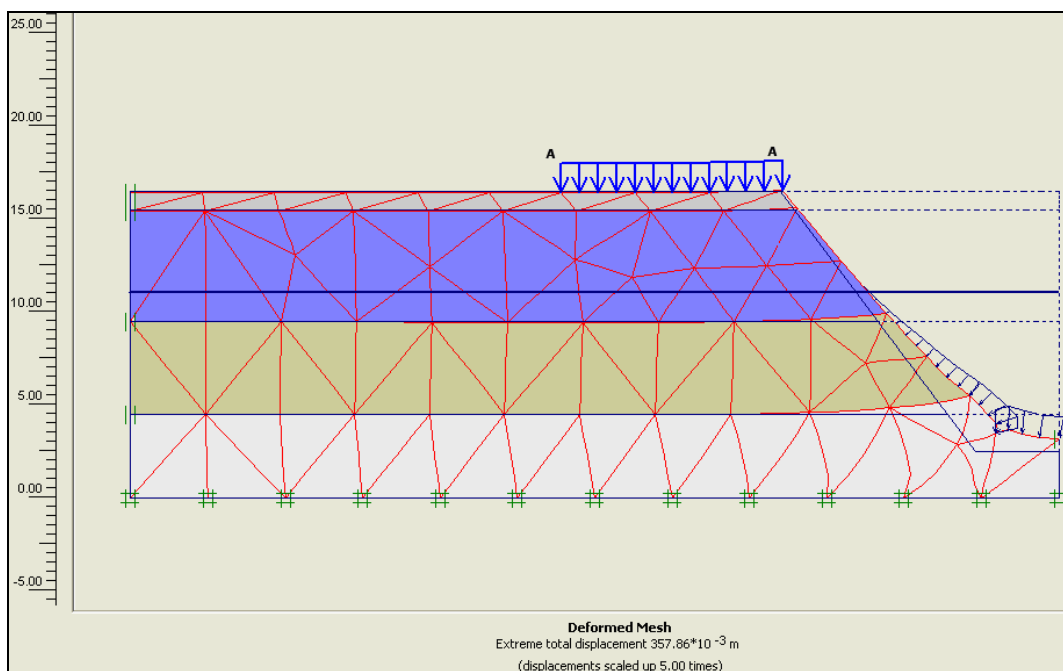


Figura 5-92. Malla de elementos finitos deformada para la Fase 5

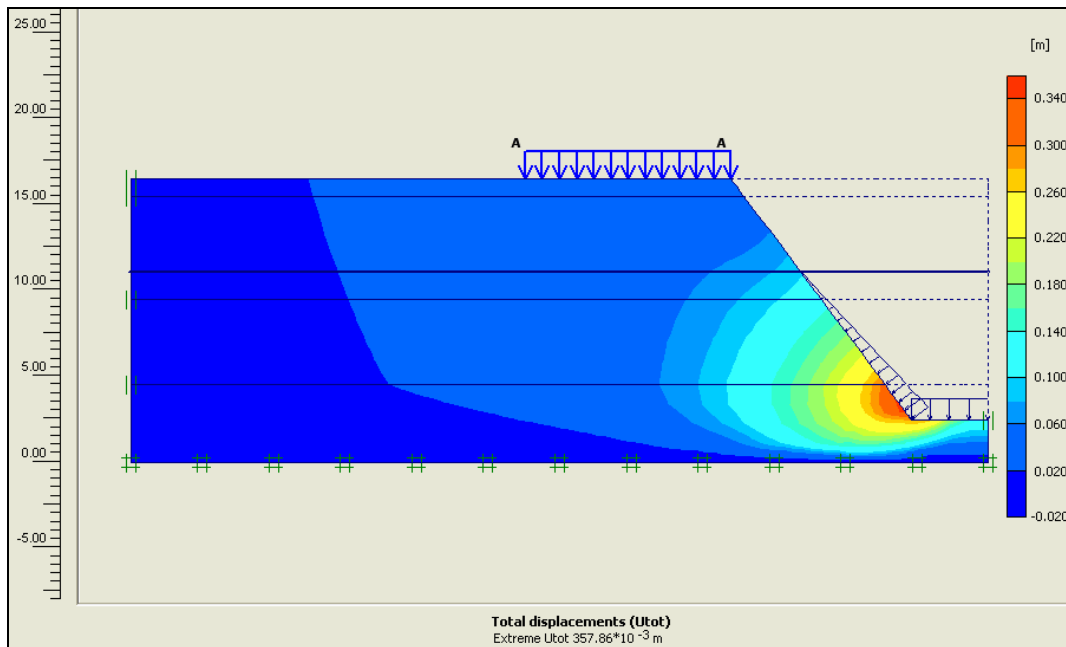


Figura 5-93. Deformaciones totales

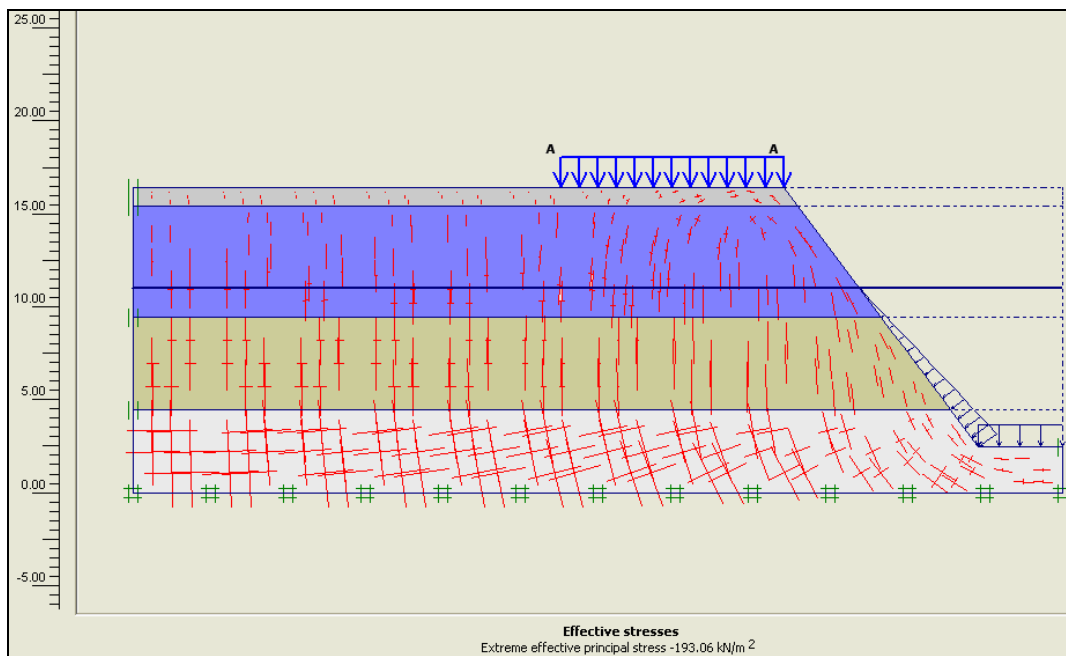


Figura 5-94. Dirección de los esfuerzos efectivos principales. Valor del esfuerzo principal en la base del modelo = 193.06 kN/m^2

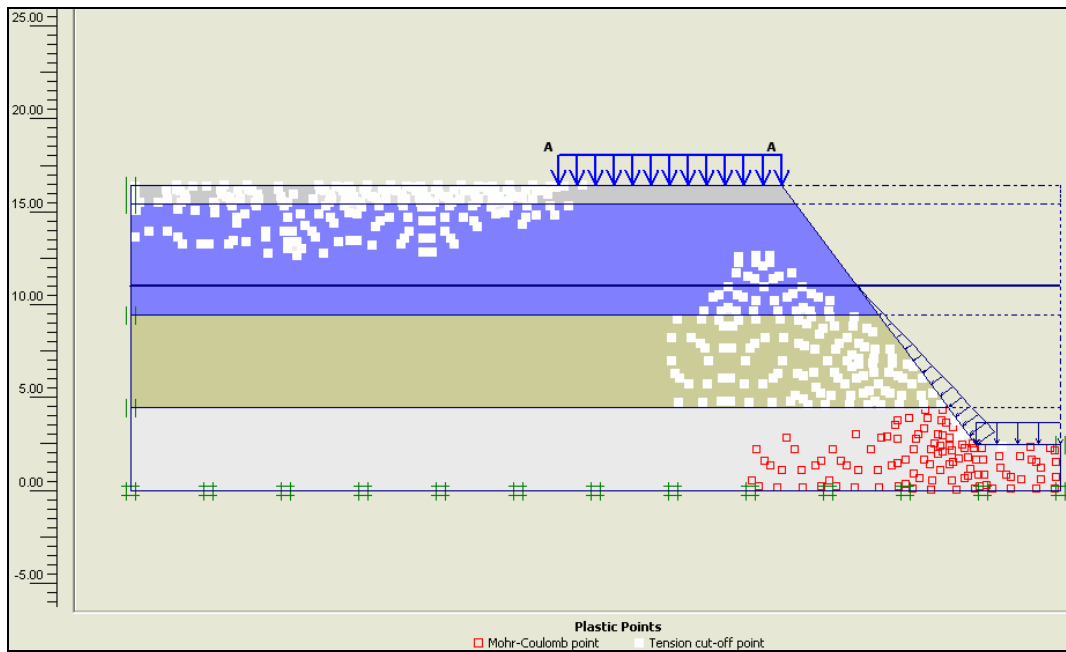


Figura 5-95. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión

Valor del factor de seguridad

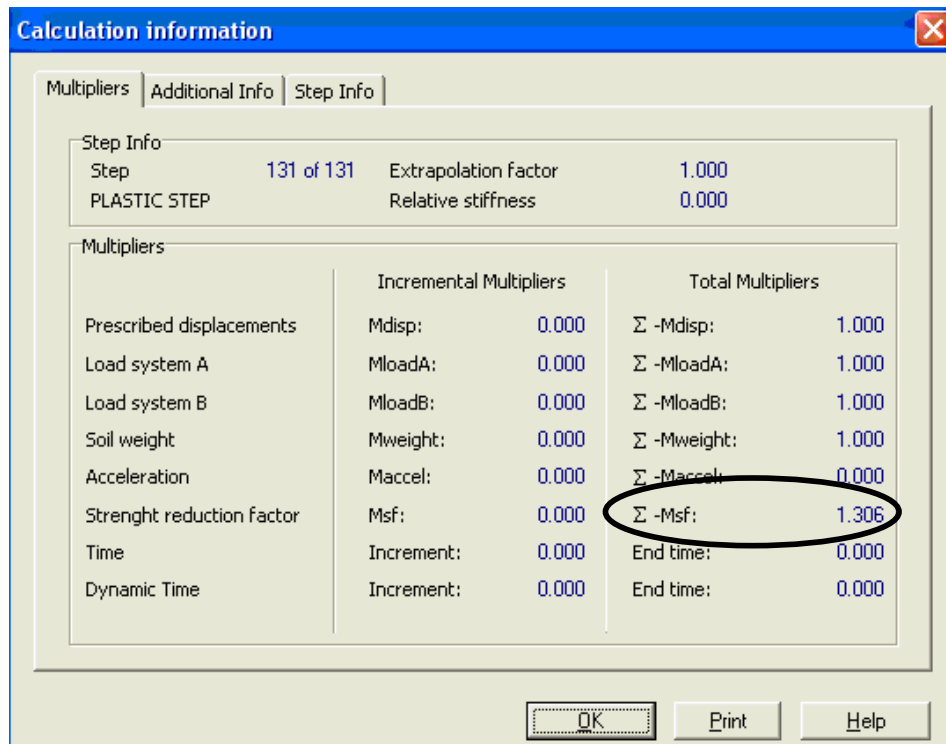


Figura 5-96. Cálculo del factor de seguridad

CAPÍTULO 6. OBSERVACIONES y ANALISIS DE LOS MODELOS

6.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo 1 se trataron los conceptos que manejan los diferentes métodos de análisis de equilibrio límite, nombrando cada uno de ellos a fin de tratar de establecer diferencias en la forma como calculan los factores de seguridad de una estructura de suelo.

Posteriormente en el capítulo 2 se presenta la teoría de los elementos finitos como una nueva herramienta para el análisis de estabilidad de taludes a partir de la información de los esfuerzos y deformaciones que se presentan en la masa de suelo bajo acciones estáticas.

El presente capítulo trata de comparar los diferentes resultados arrojados por los programas utilizados en la modelación de los problemas geotécnicos planteados en el capítulo 5 así como algunos detalles a tener en cuenta con el fin de plantear luego las conclusiones y recomendaciones al respecto que son el objetivo principal de este proyecto.

6.2 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE

La cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

Ahora, pretendemos hacer un “*mano a mano*” entre los distintos métodos utilizados para calcular el factor de seguridad de los dos problemas geotécnicos planteados y modelados en el capítulo anterior por medio del software SLOPE/W.

El método Ordinario o de fellenius en sus análisis plantea superficies de fallas circulares y cumple únicamente equilibrio de momentos puesto que no tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas. No satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa de suelo como para las dovelas individuales. Tiene la particularidad de ser muy impreciso para taludes de baja pendiente con niveles freáticos elevados, como es el caso del talud de la vía a Cúcuta ($F_s = 1.228$) y del proyecto de la excavación de la calle 55a carrera 29 esquina con taludes 1V:1H, 1V:3/4H con factores de seguridad de 1.515 y 1.590 respectivamente.

En contraste con el método anterior que no tiene en cuenta ninguna de las fuerzas actuantes (normales y cortantes), el método de Bishop simplificado si tiene en cuenta las fuerzas normales en su análisis pero ignora las cortantes. Además al igual que fellenius el análisis de estabilidad lo hace a partir de superficies de fallas circulares y cumple con el equilibrio de momentos, asumiendo que todas las fuerzas cortantes entre dovelas son cero, condición que produce subdeterminación del factor de seguridad, especialmente en taludes de gran pendiente. Esto se pudo comprobar en la excavación con taludes 1V:1H, 1V:0.5H con factores de seguridad de 0.630 y 1.102.

El método Simplificado de Janbú es similar al método Simplificado del Bishop sólo que el método Simplificado de Janbú satisface sólo equilibrio de fuerza horizontal global, pero no el equilibrio del momento global. Se observa en el modelo de la vía Cúcuta-La china que el valor de seguridad arrojado por Janbú es de 1.228, diferente al de Bishop que es de 1.287. La diferencia radica en que desde que el equilibrio de fuerza es sensible al cortante entre dovelas supuesto, depreciar estos cortantes hace que el factor de seguridad resultante sea bajo para las superficies de falla redondas.

Spencer al considerar las fuerzas entre dovelas manifiesta un valor en el factor de seguridad mayor que el expuesto por el resto de los métodos, el cual para el caso de la vía Cúcuta - La china es de 1.303.

Hay que tener en cuenta que los métodos de equilibrio límite de dovelas exigen técnicas iterativas para resolver ecuaciones no lineales de factor de seguridad. En el método de Spencer, se exige un segundo nivel de iteraciones para encontrar las fuerzas de la dovela que producen el mismo F_m y F_f . Fundamentalmente, en las iteraciones se exige encontrar dos condiciones, a saber:

- Encontrar las fuerzas que actúan en cada dovela para que esté en el equilibrio, y
- Encontrar las fuerzas en cada dovela que hará el factor de seguridad sea el mismo para cada dovela.

6.3 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS Y EL ESTADO DE EQUILIBRIO LÍMITE

Una vez realizados los modelos de los problemas analizados notamos grandes diferencias en los resultados obtenidos por cada una de las metodologías tanto en el caso de la vía Cúcuta – La china como para el de la excavación de la calle 55a carrera 29 esquina.

Para el caso de la vía Cúcuta – La china vemos que el valor del factor de seguridad obtenido por el análisis de equilibrio límite a través del método de Spencer es de 1.303 y el de Janbú es de 1.228, que son valores menores al calculado por medio de los elementos finitos a partir del análisis esfuerzo – deformación el cual es de 1.315.

Para el caso de la excavación los resultados difieren un poco. Vemos que para los taludes vertical y 1V:0.5H, los valores de los factores de seguridad obtenidos por los elementos finitos son mayor que el obtenido por medio de los métodos de equilibrio límite, pero en el caso de las excavaciones con taludes 1V:1H y 1V:3/4H sucede lo contrario.

Aunque los valores registrados por cada una de las metodologías son diferentes, notamos que en general coinciden en la determinación de la superficie de falla ya que los modelos de equilibrio límite definen las mismas zonas inestables reconocidas en el modelo de elementos finitos pero con sus limitantes, por supuesto.

En el momento de definir la superficie de falla, tanto el PLAXIS como el SLOPE/W muestran las mismas zonas posibles de ocurrencia de la falla de la estructura, con la diferencia que el modelo de elementos finitos nos permite ver los posibles desplazamientos así como las zonas donde se presentan los mayores esfuerzos

efectivos, los puntos de falla de Mohr – Coulomb y grietas de tensión generadas por el desplazamiento de la masa deslizada.

6.4 OBSERVACIONES

Para el caso del análisis de los modelos por medio de los elementos finitos, se establecieron varias etapas con el fin de observar lo que ocurría en la estructura de suelo a medida que se ejecuta el proceso de construcción.

Tanto para el caso de la vía como para el de la excavación, a medida que avanzamos en las etapas de construcción se observa que los valores de esfuerzo no varían mucho entre las etapas caso contrario a lo que ocurre con los valores de los desplazamientos los cuales varían de forma considerable.

Viendo de cerca el modelo de la vía Cúcuta - La china, se nota una marcada diferencia en el comportamiento de la estructura entre las fases 1 y 3. En la fase 1 surgen grietas de tensión que se presentan en el área de la calzada de la vía producto del deslizamiento. Ya en la etapa de construcción de la estructura de estabilización (fase 3) vemos que las grietas de tensión y los puntos de plastificación desaparecen de la zona de la vía. A demás en esta tercera fase la superficie de falla se desplaza de tal forma que no afecta la banca, lo cual era el objeto de la obra de estabilización.

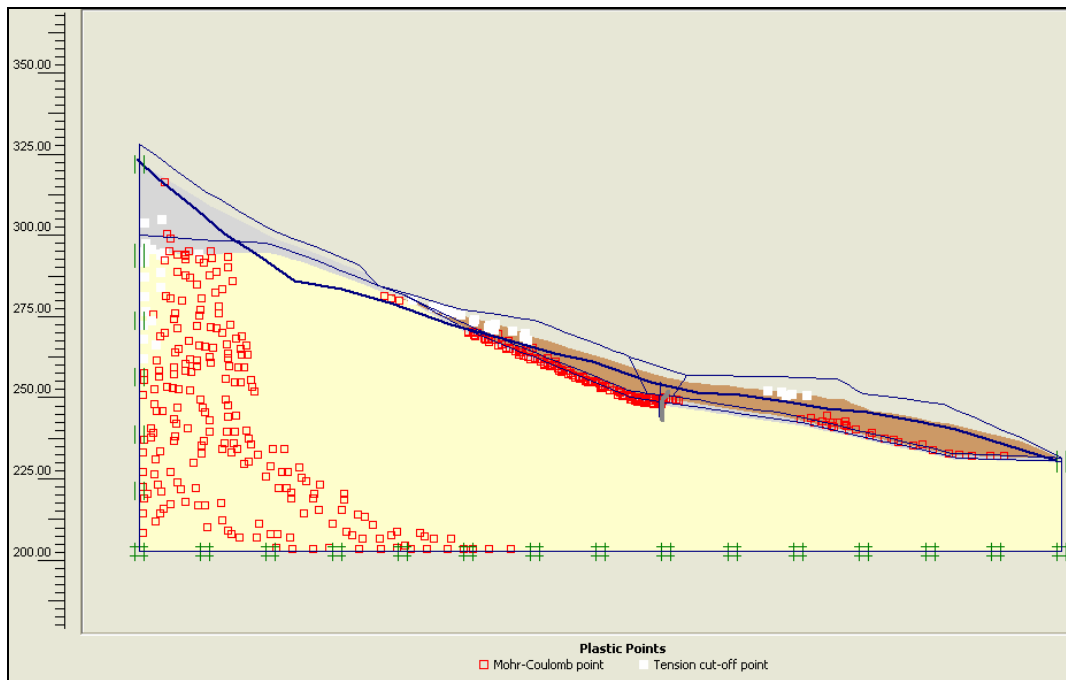


Figura 6-1. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión para la fase 1

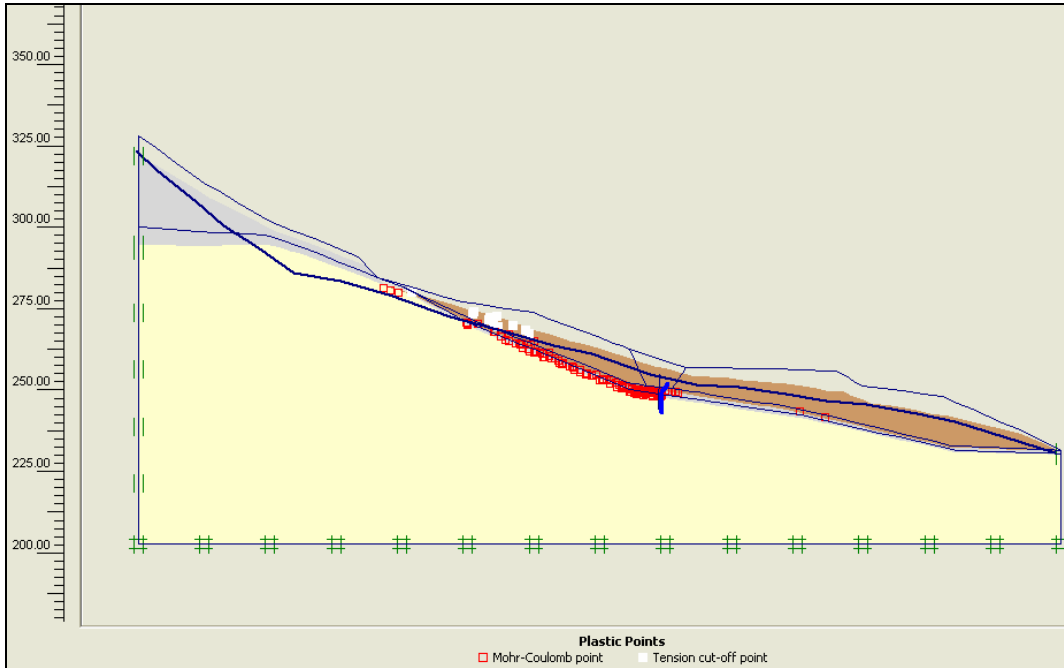


Figura 6-2. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión para la fase 3

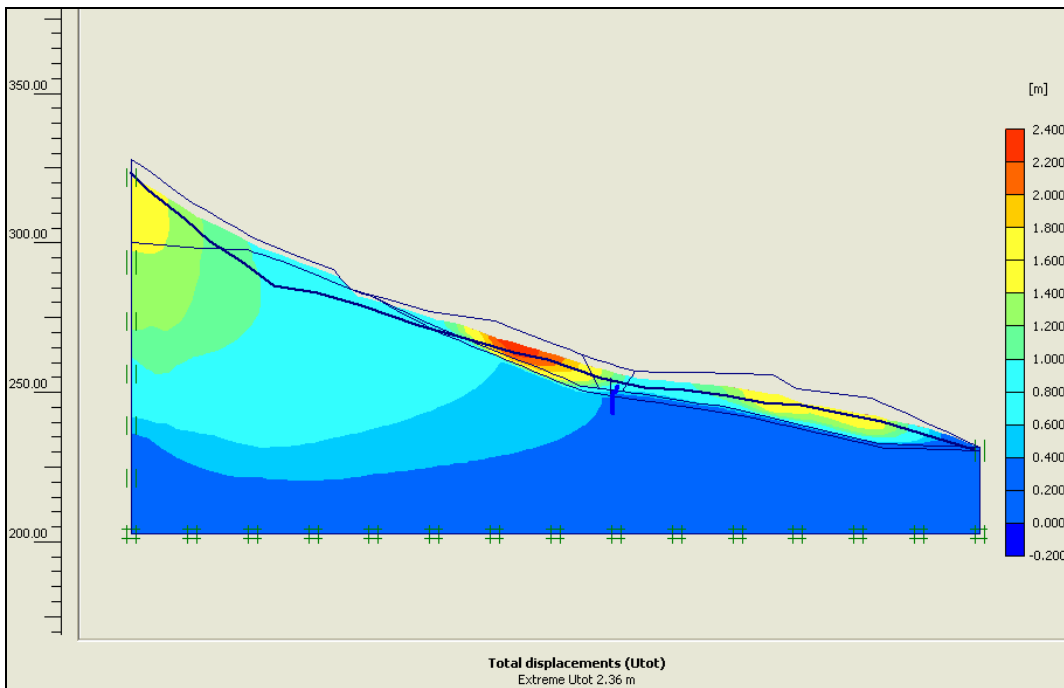


Figura 6-3. Superficie de falla una vez construida la contención

Para el caso de la excavación es en la fase 5 donde las grietas de tensión se concentran con mayor influencia en los tres primeros estratos y los puntos de plastificación de Mohr – Coulomb en el estrato inferior (arcilla). Este modelo muestra la susceptibilidad del colapso de la excavación en la interfase entre el estrato de Limos rojos duros y el estrato de arcilla tal como se presentó en realidad.

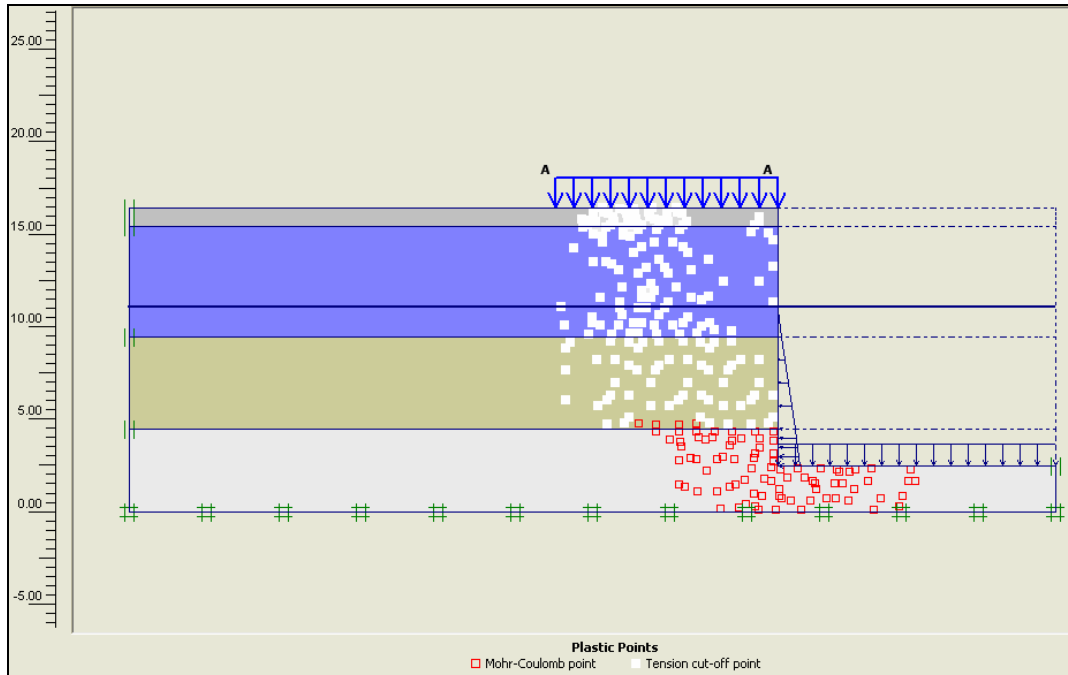


Figura 6-4. Puntos plásticos (falla de Mohr-Coulomb) y grietas de tensión para la fase 5

A diferencia del SLOPE/W el software PLAXIS nos muestra gráficamente las grietas de tensión que son muy importantes y profundas en cortes de taludes donde existe un alivio de presiones de confinamiento al ejecutarse la excavación. La existencia de grietas de tensión aumenta la tendencia de un suelo a fallar, la longitud de la superficie de falla a lo largo de la cual se genera resistencia es reducida y adicionalmente la grieta puede llenarse con agua, en el caso de lluvias o niveles freáticos.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 INTRODUCCIÓN

Durante el desarrollo de los primeros capítulos de este proyecto se presentaron las características y el proceder de cada una de las dos metodologías (equilibrio límite y MEF) con el fin de llegar a comprender la forma como trabajan y determinar algunos de sus defectos y virtudes.

En el 2003, en la Conferencia geotécnica canadiense en Calgary, Alberta, Krahn fue uno de los conferencistas con su tema, *Los Límites del Análisis de Equilibrio de Límite*.

El mensaje principal de la conferencia era que el uso rutinario en la práctica de los métodos de equilibrio límite para evaluar la estabilidad de estructuras de tierra. A pesar de este uso extenso, los principios de los métodos no están a menudo bien entendidos y las expectativas exceden lo que los métodos pueden proporcionar. Una apreciación llena de las implicaciones revela que el método tiene limitaciones serias. Para usar los métodos de equilibrio de límite eficazmente, es importante entender y comprender las limitaciones inherentes.

En esta sección plantearemos las conclusiones a las que se llegaron con el análisis de los problemas modelados y presentaremos algunas recomendaciones que creemos deben tenerse en cuenta para el complemento de este estudio.

7.2 CONCLUSIONES

El más común y “práctico” análisis consiste en el principio de equilibrio límite técnica que resulta en la asignación de un factor de seguridad dependiendo de los balances de fuerzas actuantes y resistentes dentro de un talud. El método tiene la ventaja de ser simple y directo, pero no presta una posibilidad de análisis profundo.

El método de equilibrio límite de dovelas esta puramente basado en el principio de estática; es decir, la suma de momentos, fuerzas verticales, y las fuerzas horizontales. El método no dice nada sobre los esfuerzos y desplazamientos, y como resultado no satisface la compatibilidad del desplazamiento.

Los análisis de equilibrio límite son usados en la valoración de la estabilidad de estructuras geotécnicas. Sin embargo, este método de análisis no provee ninguna oportunidad de conocer la distribución de esfuerzos dentro del talud. Un análisis por elementos finitos es la mejor opción para determinar la forma como se presentan los esfuerzos y las deformaciones en la masa deslizante. El concepto de equilibrio límite no provee información en cuanto a deformaciones se refiere, no permitiendo la inferencia de la condición de falla apropiada.

Como se había mencionado en el capítulo 6, métodos mas rigurosos como el de spencer se preocupan por encontrar las fuerzas que actúan en cada dovela para que esté en equilibrio y que a la vez hará que el factor de seguridad sea el mismo para cada dovela, lo que significa que las fuerzas entre dovelas y las fuerzas de superficie de falla no son necesariamente representante de la condición real in situ.

Basados en los resultados del estudio, concluimos que un análisis de elementos finitos por etapas, en la cual capas de elementos son removidas del modelo o donde

elementos son agregados al modelo para simular construcción por etapas, es crucial para predecir deformaciones durante la construcción de una estructura y nos lleva a una mayor precisión en el cálculo de los esfuerzos.

El método de los elementos finitos resulta ser un modelo muy acertado del comportamiento de estructuras geotécnicas bajo unas variadas condiciones de carga. Su procedimiento es más preciso y científico que el convencional estado de equilibrio límite (sin restar méritos a éste último), sin embargo, es nuestro pensar que el modelo de los elementos finitos se ajusta mejor a la realidad del problema, siendo sus resultados mucho más óptimos.

En el momento de modelar la excavación, un análisis de elementos finitos para la excavación ya conformada nos permite estimar la distribución de esfuerzos de forma adecuada y simple, pero para estimar los desplazamientos un modelo de esta excavación por etapas, en el cual se reducen los esfuerzos de acuerdo a la secuencia de excavación, se hace necesario para obtener una precisión razonable.

Los resultados obtenidos por el uso de las dos metodologías presentan diferencias marcadas por cuanto el análisis de equilibrio límite no tiene en cuenta la rigidización del suelo, el método de los elementos finitos "rigidiza" el suelo a medida que la carga se aplica. De esto se entiende porque los valores arrojados por el software PLAXIS sean mayores que los que se obtienen con SLOPE/W. Por consiguiente, en la actualidad los análisis de problemas sencillos pueden estar siendo considerados inestables cuando en realidad no lo son.

Una desventaja que presenta la aplicación del método de los elementos finitos en el estudio de estructuras geotécnicas es la consecución de los parámetros de resistencia de los suelos que participan en el problema, ya que a demás de los convencionales cohesión, ángulo de fricción y rigidez; los cuales son obtenidos de los ensayos de corte directo y consolidación, se requieren parámetros de coeficiente de Poisson y la rigidez con eodómetro. Estos ensayos no son de amplia difusión en el medio y su costo es elevado. Para los modelos incluidos en este trabajo, estos parámetros fueron encontrados en literatura especializada, especialmente en lo referente a los coeficientes de Poisson y los módulos de elasticidad.

Ahora debe tenerse especial cuidado cuando se considera que la resistencia del suelo es un parámetro del mismo lo cual no es cierto. La resistencia del suelo es la suma total de un número de diferentes efectos, y para entenderla, se hace necesario entender los elementos individuales que constituyen la fuerza resistente. Los suelos se componen de partículas y el fenómeno conocido como resistencia es la suma total de muchas interacciones partícula a partícula.

Si se toma una sección que atraviese el suelo, y las fuerzas producidas en los contactos entre partículas se considera, será evidente que el efecto de presiones de fluido en los poros es el reducir las cargas de contacto intersticial. Ya que la resistencia friccionante al movimiento depende en cierta medida en la diferencia numérica entre el esfuerzo total aplicado y la presión en los poros; la parte de los esfuerzos totales que realmente genera los esfuerzos cortantes es el esfuerzo efectivo. Por lo tanto se encuentra entonces que la resistencia cortante es proporcional al esfuerzo efectivo.

Los parámetros de resistencia del suelo presentan uno de los principales inconvenientes en el modelamiento, iniciando con la errónea suposición de la homogeneidad de estos valores a lo largo del perfil estratigráfico del talud; perfiles del

mismo materiales no presentan valores constantes de cohesión y ángulo de fricción, caso similar ocurre con la rigidez del suelo la cual aumenta con la profundidad.

De lo anterior se desprende que la responsabilidad es únicamente del analista para escoger que método es el más apropiado para el análisis del problema, a demás de los parámetros de fuerza cortante y resistencia. Por consiguiente el analista debe reconocer que los datos de salida del modelo aplicado *no representan* la verdad absoluta del problema analizado; existen una infinidad de factores que no se incluyen dentro del modelo.

Dicho de otro modo el modelo representa una pieza útil en el momento de estudiar el problema pero la intuición y la experiencia del geotecnista juegan un papel importante y por lo tanto deben tener peso dentro del estudio.

7.3 RECOMENDACIONES

La precisión de un análisis lineal elástico de elementos finitos depende del tipo de elemento, finura de la malla, disposición de la misma y la geometría del problema. Por esto creemos que es necesario profundizar en la forma más eficaz de manejar estas variables para obtener resultados óptimos en un análisis de elementos finitos.

La precisión y confiabilidad de los datos de entrada para un modelo dependen en gran medida de los ensayos de laboratorio realizados para determinar los parámetros de resistencia del suelo analizado. Es importante que la caracterización del perfil sea hecha lo más detalladamente posible para determinar las zonas débiles y resistentes, saturadas, bloques o fragmentos de formaciones rocosas remanentes, posibles detonadoras de movimientos de remoción en masa.

Dada la complejidad de la estructura de suelo se hace necesario tener una metodología más precisa en su modelamiento, para tal fin proponemos para futuras investigaciones en esta área trabajar con el modelo de suelo rigidizante ya que presenta una mayor aproximación al comportamiento real del suelo. El inconveniente que presenta esta metodología es que requiere de unos parámetros geotécnicos muy costosos de obtener.

Para taludes en los cuales la causa de la falla es el aumento de la presión de poros debido a lluvias el problema debe analizarse como condición drenada. PLAXIS ofrece la facilidad de modelar esta condición en las estructuras de suelo, permitiendo obtener información acerca del comportamiento de la estructura por efecto de los esfuerzos efectivos.

BIBLIOGRAFÍA

- SUÁREZ DÍAZ Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Ediciones UIS Bucaramanga – Colombia. 1998.
- BRAJA M. Das (1994). “Principles of Geotechnical Engineering”. Boston.
- BADILLO E. Juárez, RODRÍGUEZ A. Rico. Mecánica de suelos. Tomo 1. Editorial Limusa S.A. México. 2002.
- Bowles E. Joseph. Foundation analysis and design. 4ª edición. Editorial McGraw – Hill. 1988.
- Abramson, L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M. Slope stability and stabilization methods. Wiley – Interscience. 1996
- Clough, R.W. , Woodward R.J. Analysis of Embankment Stresses and deformations. Journal of geotechnical division, ASCE. 1967.
- Duncan J.M. Soil slope stability analysis. Landslides investigation and mitigation. Special report 247. Transportation research Board. National research council. 1996.
- Brinkgreve & W. Broere. PLAXIS 2D - Version 8 R.B.J. Delft University of Technology & PLAXIS b.v. The Netherlands. D. Waterman.
- GeoStudio Tutorials. includes student edition lessons. First Edition. Printed in Canada. 2004.
- KRAHN John. Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology. First Edition. Printed in Canada. 2004.
- GARNICA ANGUAS Paul, GÓMEZ LÓPEZ José Antonio, FLORES FLORES Mayra, PÉREZ SALAZAR Alfonso, LÓPEZ BAZÁN José Islam. Estabilidad de taludes sumergidos aplicación a la estabilidad de escolleras en puertos mexicanos. Secretaria de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte. Publicación Técnica No. 199. Sanfandila, Qro, 2002
- PLAXIS Version 8 Material Models Manual
- PLAXIS Version 8 Scientific Manual
- PLAXIS Version 8 Tutorial Manual
- PLAXIS Version 8 Reference Manual

