

OPTIMIZACIÓN DE LA LONGITUD TOTAL DE ANCLAJES PARA EL  
SOSTENIMIENTO DE BLOQUES DE ROCA EN TALUDES

STEVEN ALONSO MENDOZA ESPITIA  
MATEO OCHOA ROJAS

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.

2017

OPTIMIZACIÓN DE LA LONGITUD TOTAL DE ANCLAJES PARA EL  
SOSTENIMIENTO DE BLOQUES DE ROCA EN TALUDES

STEVEN ALONSO MENDOZA ESPITIA  
MATEO OCHOA ROJAS

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Ingeniero Civil

Asesor Disciplinar:  
Ing. Daniel Enrique Cañas Vesga

Asesor Metodológico:  
Mag. Laura Milena Cala Cristancho

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.

2017

## CONTENIDO.

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>2</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>4. OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
<b>4.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>5</b>
<b>4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>5</b>
<b>5. MARCO REFERENCIAL</b> .....	<b>6</b>
<b>5.1 MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>6</b>
<b>5.1.1 Roca</b> .....	<b>6</b>
<b>5.1.1.1 Bloque de roca</b> .....	<b>6</b>
<b>5.1.1.2 Tipos de rocas por su formación geológica</b> .....	<b>6</b>
<b>5.1.2 Macizo rocoso</b> .....	<b>7</b>
<b>5.1.3 Mecanismos de falla</b> .....	<b>7</b>
<b>5.1.4 Discontinuidades</b> .....	<b>8</b>
<b>5.1.5 Estructuras ancladas</b> .....	<b>9</b>
<b>5.1.5.2 Eficiencia de anclajes</b> .....	<b>12</b>
<b>5.1.6 Talud</b> .....	<b>12</b>
<b>5.2 ANÁLISIS ESTÁNDAR O ANÁLISIS CONVENCIONAL</b> .....	<b>12</b>
<b>5.3 MARCO LEGAL</b> .....	<b>15</b>
<b>6. DISEÑO METODOLÓGICO</b> .....	<b>16</b>
<b>6.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>6.3 POBLACIÓN Y MUESTRA</b> .....	<b>16</b>
<b>6.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTACIÓN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN</b> .....	<b>17</b>
<b>6.5 FASES DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>18</b>
<b>7. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	<b>19</b>
<b>7.1 RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO Y FORMA DEL BLOQUE CON LA LONGITUD LIBRE DE EMPOTRAMIENTO</b> .....	<b>19</b>
<b>7.2 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE PERNOS NECESARIA PARA ESTABILIZAR BLOQUES DE ROCA EN TALUDES</b> .....	<b>22</b>
<b>7.2.1 RocPlane ® :</b> .....	<b>22</b>

7.2.2 Swedge®: .....	26
7.3 Evaluación de los componentes resistentes de los diferentes sistemas de distribución de pernos utilizados como sistema de sostenimiento de bloques.....	119
7.4 Análisis de la eficiencia de los anclajes respecto a la variación en el tamaño de los bloques. ....	122
8. CONCLUSIONES .....	123
9. RECOMENDACIONES .....	125
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
ANEXO 1.....	127
ANEXO 2.....	129

## LISTA DE FIGURAS.

FIGURA 1 Mecanismo de falla.....	8
FIGURA 2 Discontinuidades en estructuras geologicas.....	9
FIGURA 3 Esquema de longitud libre y longitud de empotramiento en un sistema de anclaje.....	11
FIGURA 4 Representación del área de influnecia en un patrón normal de anclaje. ....	13
FIGURA 5 Patrón al tres bolillo de anclaje. ....	14
FIGURA 6 Estabilización de un manto rocoso utilizando pernos. ....	19
FIGURA 7 Etapas de instalación del anclaje.....	21
FIGURA 8 Configuración de la geometría de un talud en RocPlane®. ....	22
FIGURA 9 Modelación en RocPlane® con Tension Crack. ....	23
FIGURA 10 Modelación en RocPlane® con Bench Analysis. ....	23
FIGURA 11 Modelación en RocPlane® con Water Pressure. ....	25
FIGURA 12 Modelación en RocPlane® con Seismic force. ....	25
FIGURA 13 Modelación en RocPlane® con External force.....	26
FIGURA 14 Configuración de las características de un talud en Swedge®. .	27
FIGURA 15 Modelación en Swedge® con Tension Crack.....	28
FIGURA 16 Modelación en Swedge® geometría del talud y Bench width...	28
FIGURA 17 Modelación en Swedge® con Water Pressure. ....	29
FIGURA 18 Mapa de valores de Aa vigente para el territorio nacional.....	30
FIGURA 19 Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de Aa.....	31
FIGURA 20 Modelación en Swedge® con Seismic force .....	33
FIGURA 21 Modelación en Swedge® con External force. ....	33
FIGURA 22 Representación esquemática ejercicio 1(falla planar). ....	38
FIGURA 23 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón normal. ....	41
FIGURA 24 Resultados análisis optimizado del ejercicio por falla planar con patrón normal. ....	42
FIGURA 25 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón al tres bolillo. ....	45
FIGURA 26 Resultados análisis optimizado del ejercicio por falla planar con patrón tres bolillo.....	46
FIGURA 27 Representación de patrón normal con una ancho de banca de 5 metros. ....	48
FIGURA 28 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón normal con una sepración de 1.3 metros.....	53
FIGURA 29 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón normal con una sepración de 1.2 metros.....	53

<b>FIGURA 30</b>	<b>Resultado de análisis optimizando la longitud total a 8 metros.</b>	<b>54</b>
<b>FIGURA 31</b>	<b>Distribución de pernos a tres bolillo en un ancho de banca de 5m.</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 32</b>	<b>Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón al tres bolillo.</b>	<b>61</b>
<b>FIGURA 33</b>	<b>Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón al tres bolillo.</b>	<b>61</b>
<b>FIGURA 34</b>	<b>Longitud optimizada a 9 metros con una separación de 1.2m...</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 35</b>	<b>Distribución de pernos con patrón normal y dx 1.2m dy 3m....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 36</b>	<b>Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón normal.</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 37</b>	<b>Longitud optimizada a 9m con separación de 0.9m.</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 38</b>	<b>Distribución de pernos con un ancho de banca de 5m un dx de 1.8m y dy de 1.5 m.</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 39</b>	<b>Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón al tres bolillo con separación 1.3 metros.</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 40</b>	<b>Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón al tres bolillo con separación de 0.9 metros</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 41</b>	<b>Longitud optimizada a 10m con separación de 0.9m.</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 42</b>	<b>esquema de coordenadas en el espacio que representan la forma de la cuña (Falla por cuña).</b>	<b>80</b>
<b>FIGURA 43</b>	<b>Distribución de pernos con patrón normal</b>	<b>83</b>
<b>FIGURA 44</b>	<b>Resultados análisis estándar del ejercicio por falla por cuña con patrón normal.</b>	<b>90</b>
<b>FIGURA 45</b>	<b>Resultados análisis optimizado del ejercicio de falla por cuña con patrón normal.</b>	<b>91</b>
<b>FIGURA 46</b>	<b>Distribución de pernos con patrón al tres bolillo.</b>	<b>93</b>
<b>FIGURA 47</b>	<b>Resultados análisis estándar del ejercicio de falla por cuña con patrón tres bolillo.</b>	<b>100</b>
<b>FIGURA 48</b>	<b>Resultados análisis optimizado del ejercicio de falla por cuña con patrón tres bolillo.</b>	<b>101</b>
<b>FIGURA 49</b>	<b>Distribución de pernos en una cuña con un dx 3.5 m y dy 4.8m</b>	<b>103</b>
<b>FIGURA 50</b>	<b>Resultados análisis estándar del ejercicio de falla por cuña con patrón tres bolillo.</b>	<b>109</b>
<b>FIGURA 51</b>	<b>Análisis optimizado con patron normal optimizado 8m y separacion de 1m.</b>	<b>110</b>
<b>FIGURA 52</b>	<b>Distribución de pernos con patrón al tres bolillo con un dx 3.5 m dy 4.8m</b>	<b>112</b>
<b>FIGURA 53</b>	<b>Resultados análisis estándar del ejercicio de falla por cuña con patrón tres bolillo.</b>	<b>118</b>

<b>FIGURA 54 Resultados análisis optimizado del ejercicio de falla por cuña con patrón tres bolillo.....</b>	<b>119</b>
<b>FIGURA 55 Modelación escenario inicial en RocPlane®.....</b>	<b>120</b>
<b>FIGURA 56 Modelación escenario inicial en RocPlane®.....</b>	<b>120</b>
<b>FIGURA 57 Modelación escenario inicial en RocPlane®.....</b>	<b>121</b>
<b>FIGURA 58 Esquema de longitudes en una falla planar.....</b>	<b>127</b>

## LISTA DE TABLAS.

Tabla 1 Variables de la investigación .....	17
Tabla 2 Ventajas y desventajas de estructuras ancladas.....	20
Tabla 3 Valor de $Aa$ y $Av$ para las ciudades capitales de departamento.....	32
Tabla 4 Nomenclatura de parámetros en Swedge® y RocPlane®. ....	34
Tabla 5 Combinaciones de parámetros en Swedge® y RocPlane®.....	34
Tabla 6 Coordenadas con patrón normal con un ancho de banca de 5 metros. .....	47
Tabla 7 Cálculo de las longitudes de empotramiento y libre .....	49
Tabla 8 Cálculo de las fuerzas. ....	51
Tabla 9. Cálculo de optimización con una longitud total de 8 m. ....	52
Tabla 10 Coordenadas a tres bolillo .....	55
Tabla 11 Cálculo de las longitudes de empotramiento y libre .....	57
Tabla 12 Cálculo de las fuerzas. ....	59
Tabla 13 Cálculo de optimización con una longitud total de 8 m. ....	60
Tabla 14 Cuadro con las cordenas de los pernos desplazados $dx=1.8m$ y $dy 1.5m$ .....	63
Tabla 15 Longitudes calculadas LL y LE.....	65
Tabla 16 Cálculo de fuerzas $F_i$ y $F_E$ .....	67
Tabla 17 Cálculo de optimización con una longitud total de 10 m .....	68
Tabla 18 Cuadro con las cordenas de los pernos desplazados $dx=1.8m$ y $dy 1.5m$ .....	70
Tabla 19 Longitudes calculadas LL y LE.....	71
Tabla 20 Cálculo de fuerzas $F_i$ y $F_E$ .....	73
Tabla 21 Cálculo de optimizacion con una longitud total de 10 m. ....	74
Tabla 22 Lista Cordenadas del patron sin tres bolillo .....	82
Tabla 23. Despeje de ecuación de los planos y cálculo de la longitud de empotramiento. ....	86
Tabla 24 Cálculo de la fuerza de empotramiento. ....	88
Tabla 25 Cálculo de la fuerza de empotramiento. ....	89
Tabla 26 Lista coordenadas del patron sin tres bolillo.....	92
Tabla 27 Despeje de ecuación de los planos y cálculo de la longitud de empotramiento. ....	96
Tabla 28 Cálculo de la fuerza de empotramiento. ....	98
Tabla 29 Cálculo de la fuerza de empotramiento. ....	99
Tabla 30 Lista Cordenadas del patron normal.....	102
Tabla 31 Despeje de ecuación de los planos y cálculo de la longitud de empotramiento. ....	105
Tabla 32 Cálculo de la fuerza de empotramiento. ....	106
Tabla 33 Cálculo de la fuerza de empotramiento. ....	107

<b>Tabla 34 Cálculos de fuerzas optimizadas.....</b>	<b>108</b>
<b>Tabla 35 Lista Cordenadas del patrón sin tres bolillo con dx y dy.....</b>	<b>111</b>
<b>Tabla 36 Cálculo de la longitud libre y longitud de empotramiento. ....</b>	<b>115</b>
<b>Tabla 37 Cálculo de la fuerza de empotramiento. ....</b>	<b>116</b>
<b>Tabla 38 Cálculo con longitud optimizada de 8m.....</b>	<b>117</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Los métodos actuales que se utilizan para medir la longitud total óptima de un anclaje en taludes de roca son de gran incertidumbre al no establecerse una longitud libre óptima dada una configuración particular de un sistema de discontinuidades y la orientación de un talud. En el campo de taludes rocosos aun predominan metodologías empíricas a la hora de determinar los sostenimientos que mitigan los desprendimientos de bloques, lo que debe ser contrastado con la posibilidad de formación de bloques de roca críticos que pueden afectar la estabilidad de un talud. En la actualidad existen programas computacionales que permiten la cuantificación de los factores de seguridad mediante la implementación de anclajes como sistema de sostenimiento, sin embargo, la selección de la longitud de anclaje la cual depende de la geometría del bloque inestable, la orientación y altura del talud, se debe escoger al criterio del diseñador.

La longitud de este sistema de contención se debe calcular teniendo en cuenta diversas variables como el tipo de roca, inclinación, discontinuidades, composición mineralógica, entre otros. De no realizar correctamente estos cálculos para el diseño puede presentarse un colapso en la masa rocosa.

Esta investigación pretende determinar la eficiencia de las longitudes en los sistemas de anclajes, analizando las fuerzas realmente ejercidas para diferentes tamaños de bloques de roca.

Teniendo en cuenta el tamaño del talud, la fuerza requerida por cada perno individual y el comportamiento de los diferentes materiales con los que se realizan los anclajes, se plantea la siguiente pregunta:

¿Cuál es la eficiencia óptima de la longitud total de los anclajes como sistema de sostenimiento en taludes rocosos?

## 2. ANTECEDENTES

El uso de anclajes de acero en la estabilización de taludes se ha vuelto muy popular en los últimos años. Las estructuras ancladas incluyen los pernos metálicos utilizados para sostener bloques de roca, las estructuras con tendones pretensionados, anclados en el suelo y los tendones pasivos no pretensionados<sup>1</sup>.

El proceso para determinar la longitud libre de anclaje se ve limitada por el uso de softwares especializados y en la práctica actual no se realizan estudios que evalúen la eficiencia de la longitud de anclaje en pernos, por lo cual la investigación en curso se plantea basada en la experiencia de un Ingeniero geotecnista. Análisis realizados en herramientas computacionales mundialmente reconocidas, evidencian como al cambiar el tipo de perno se alteran las condiciones de estabilidad de la excavación, ejercicio que no es usualmente desarrollado en la actualidad, por ejemplo, al cambiar de una dovela friccional a un anclaje mecánico se obtienen factores de seguridad diferentes.

Las herramientas computacionales que lideran el mercado de software en geotecnia no permiten considerar varios escenarios con distribución y longitud de pernos diferentes para revisar las condiciones de estabilidad de la excavación, y de forma simultánea, lo que dificulta la realización de análisis probabilístico de falla debido a cambios en el sistema de sostenimiento. Herramientas computacionales como Swedge® y RocPlane® de Rocscience, permiten análisis probabilísticos sobre los parámetros de resistencia de la roca y discontinuidades pero no sobre la incertidumbre generada por el sistema de sostenimiento.

A continuación se expone un problema de caso en el cual se evidencia que la implementación de pernos no fue una medida de mitigación satisfactoria:

“El caso se sitúa en la localidad de Ciudad Bolívar en Bogotá, allí se encuentra un talud de más de 25 metros de altura caracterizado por la presencia de areniscas y arcillolitas, desde los años 90 ha presentado problemas de inestabilidad con desprendimientos de grandes bloques de roca y detritos. Se realizaron trabajos para estabilizar el talud en el año 1998 en el cual se implementó un revestimiento en una capa de concreto lanzado, anclaje de pernos y enmallado en acero electro soldado. Pese a esto el terreno continuó deslizándose y se hizo más vulnerable con las épocas invernales. Es así como para el año 2004 se presenta un gran deslizamiento que se lleva consigo gran parte del recubrimiento superior del talud. Para el año 2005 se presenta otro deslizamiento que desprende completamente la

---

<sup>1</sup> SUAREZ. Jaime. Deslizamientos: Análisis geotécnico, Capítulo 14 Estructuras de contención o anclaje P.518.

malla metálica, el talud se encuentra actualmente sin ningún tipo de recubrimiento en su superficie y los anclajes instalados en el pasado se encuentran totalmente descubiertos e inservibles”<sup>2</sup>

A nivel nacional el Ing. Daniel Cañas desarrolló en el 2013, un programa que sigue el método de Rectas Principales y Secundarias para la identificación de los Bloques Críticos, durante el desarrollo del mismo pudo analizar tres sistemas de discontinuidades en secciones de excavación circular, que identifica la totalidad de los Bloques Críticos posibles y otorga la información requerida para un análisis más avanzado y personalizado del diseño de un sistema de anclaje.<sup>3</sup>

El Phd. Roberto Ucar Navarro aportó instrumentos de calculo necesarios para el dimensionamiento de los anclajes, basados en un conocimiento profundo de los fundamentos geomecánicos y de resistencia de los materiales con el fin de describir exhaustivamente las diferentes tecnicas de refuerzo del tereno, masas de suelo o rocas para garantizar su sostenimiento a lo largo de su trayectoria profesional y lo materializó en su obra “Manual de Anclajes en Ingenieria civil” en el año 2004.

Durante el XV CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTECNIA-XVCCG & II CONFERENCIA INTERNACIONAL ESPECIALIZADA EN ROCAS BLANDAS II CIERB realizado en Cartagena durante los días 5, 6 y 7 de octubre de 2016 los ingenieros Daniel Cruz, Nicholas Vlachopoulos y Bradley Forbes en su articulo “The Geo-Mechanical Response of Axially Loaded Rock Bolts using Fiber Optic Technology”<sup>4</sup>, Partieron como fundamento de su artículo que el conocimiento respecto a la respuesta mecánica del perno es corto debido a las limitaciones inherentes de los métodos convencionalmente utilizados para estimar su deformación. Por eso desarrollaron un programa de investigación que buscaba aumentar dicho conocimiento científico con la utilización de una tecnología de fibra óptica elaborada recientemente, la cual habilita el monitoreo de la deformación a una resolución espacial de 0.65 mm, a partir de las pruebas desarrolladas establecieron el estudio de varios mecanismos asociados con la carga axial de pernos con diferentes longitudes de empotramiento.

---

<sup>2</sup> El Ing. Daniel Cañas Vesga señaló esta experiencia académica como evento cercano para fundamentar el estudio de esta problemática.

<sup>3</sup>CAÑAS VESGA, Daniel Enrique. Anclajes en la mecánica de rocas con aplicación a túneles. Trabajo de investigación Maestría en Geotecnia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, 2013. 119 h.

<sup>4</sup> CRUZ Daniel, VLACHOPOULOS Nicholas, FORBES Bradley (2016) The Geo-Mechanical Response of Axially Loaded Rock Bolts using Fiber Optic Technology.12 h.

### 3. JUSTIFICACIÓN

El propósito de una estructura de contención es el resistir las fuerzas ejercidas por la tierra contenida, y transmitir esas fuerzas en forma segura a la fundación o a un sitio por fuera de la masa analizada de movimiento. Las deformaciones excesivas o movimientos de la estructura de contención deben evitarse para garantizar su estabilidad.

Las excavaciones en taludes, sobre todo en obras civiles depende en su mayoría de la topografía y de la composición geológica del macizo, lo que lleva a que se generen modelaciones que permitan conocer el comportamiento físico-mecánico de la estructura rocosa, e implementar mecanismos resistentes que mejoren la estabilidad dando un factor de seguridad establecido.

Las excavaciones de grandes terrenos lleva consigo la consecuencia de que se presenten desprendimiento por múltiples motivos como lo son la erosión por la intervención de agentes exógenos, la liberación de energía, la pérdida de confinamiento. Por tal motivo una excavación debe contar con cálculos que permitan prever dichas situaciones y replantear formas de contención una de ellas es el uso de pernos que permite transmitir las fuerzas traccionantes que son aplicadas por el terreno. El uso de pernos lleva variables que influyen en la instalación de pernos como los son: la colocación, la orientación, la separación entre pernos, la profundidad de anclaje del perno, etc.

El propósito de esta investigación es realizar un algoritmo que permita optimizar la longitud total de anclajes con pernos profundizando en la separación y la longitud de los pernos.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

- Estimar la eficiencia de la longitud total de los anclajes como sistema de sostenimiento en taludes de acuerdo con el tamaño y forma del bloque de roca, y la fuerza requerida para sostenerlo.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar la relación entre estructuras de anclaje y las características de la masa a sostener.
- Calcular la cantidad de pernos necesaria para estabilizar bloques de roca en taludes teniendo en cuenta la fuerza de soporte total identificada mediante programas computacionales existentes, para mecanismos de falla planar y en cuña.
- Evaluar los componentes resistentes de los diferentes sistemas de distribución de pernos utilizados como sistema de sostenimiento de bloques.
- Analizar la eficiencia de los anclajes respecto a la variación en el tamaño de los bloques.

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1 MARCO CONCEPTUAL

#### 5.1.1 Roca

Es un agregado de partículas minerales que se ha formado como consecuencia de un proceso natural.

##### 5.1.1.1 Bloque de roca

Es un fragmento de roca mayor que los cantos rodados pero que está suelto, de modo que puede ser movido por procesos mecánicos naturales como las corrientes de agua, los movimientos de tierra o la fuerza de la gravedad en las laderas suficientemente inclinadas.

##### 5.1.1.2 Tipos de rocas por su formación geológica

rocas endógenas: se han formado en el interior de la corteza terrestre. Los agentes transformadores son la temperatura y la presión. Se dividen en dos tipos:

- Rocas magmáticas o ígneas: originadas por la consolidación de una masa de materiales fundidos llamada magma. Son muy resistentes, isotrópicas, rígidas, frágiles, densas y de textura entrabada. Su inconveniente se da por presencia de materiales alterables y diaclasamiento. Si se solidifica lentamente se obtiene rocas ígneas plutónicas, y si se enfría rápidamente, rocas ígneas volcánicas.
  - Rocas ígneas plutónicas: Tienen minerales resistentes, entrabados, se da fallamiento en escalonado de minerales porque son diferentes.
  - Las rocas ígneas volcánicas. Muestran heterogeneidad de minerales; hay falla en poros que afectan la roca, la porosidad le da plasticidad a la masa que si es de rocas masivas resulta poco porosa
- Rocas metamórficas: Se caracterizan por una resistencia medio alta, su ortotropía, tenacidad, textura entrabada y baja porosidad, se obtienen debido a cambios en la estructura y composición de minerales de rocas preexistentes, al aumentar la presión y la temperatura ejercida sobre ellas. Presentan rigidez en el sentido paralelo y plasticidad en el perpendicular, con relación a los planos de clivaje. Su ortotropía dificulta los cálculos, las rocas metamórficas resultan elásticas por la cristalización de la masa.

rocas exógenas: se forman en la superficie terrestre como consecuencia de la acción de los procesos geológicos externos (meteorización, erosión, transporte y sedimentación), sobre rocas ya existentes.

- Rocas sedimentarias: pueden ser detríticas, químicas, bioquímicas y organógenas. Tienen resistencia media a baja son ortotrópicas, poco rígidas, dúctiles, porosas y presentan textura cementada-laminada. Su inconveniente es la ortotropía que hace difíciles los cálculos de estabilidad y comportamiento del macizo. En las rocas sedimentarias la resistencia depende del grado de cementación y de su densidad. Ella aumenta cuando los granos son finos; si hay disolución en la masa hay porosidad. Los planos de estratificación son zonas de debilidad.<sup>5</sup>

### **5.1.2 Macizo rocoso**

Está definido por la roca y la estructura que contiene:

- Planos de estratificación
- Pliegues
- Fallas
- Juntas o diaclasas

Debido a esto los macizos rocosos son discontinuos y pueden presentar propiedades heterogéneas y/o anisotrópicas.

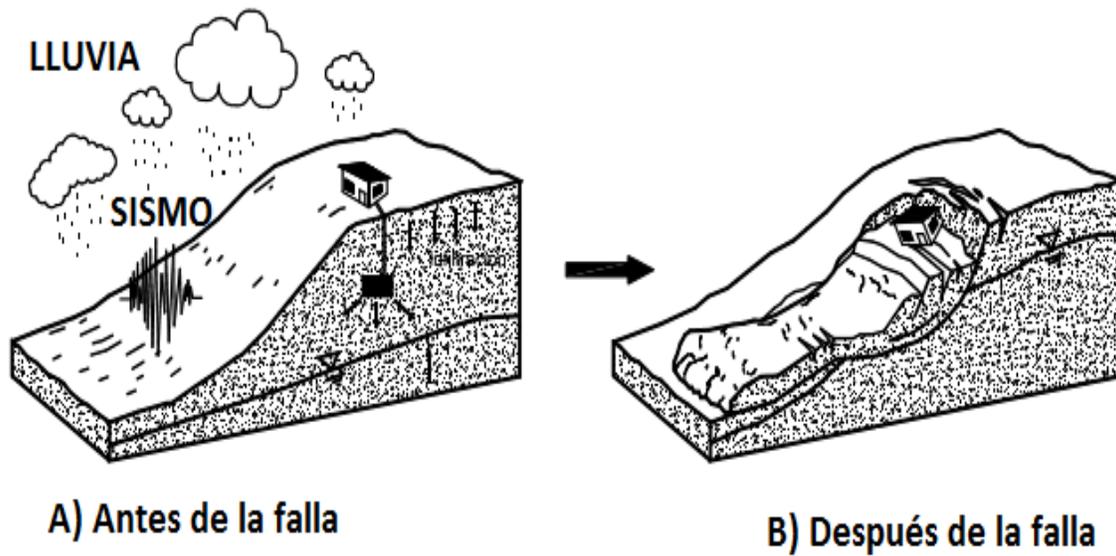
### **5.1.3 Mecanismos de falla**

El mecanismo de falla es la explicación técnica de la forma como un talud estable se convierte en inestable, por la acción del deterioro y los agentes activadores.

---

<sup>5</sup> DUQUE ESCOBAR. Gonzalo. Manual de geología para ingenieros, Capítulo 12 Macizo rocoso P.274.

FIGURA 1 Mecanismo de falla.



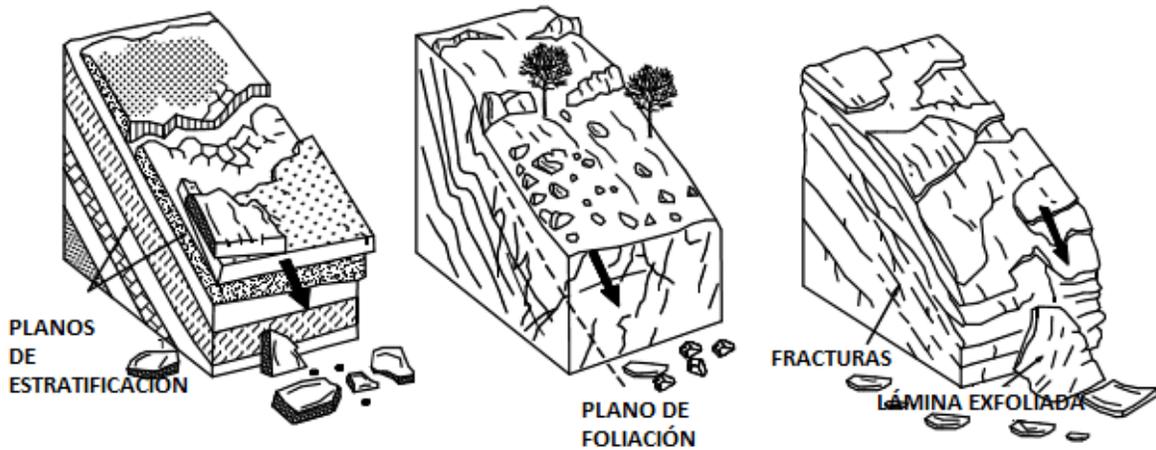
Fuente: SUAREZ. Jaime. Deslizamientos: Análisis geotécnico, Capítulo 2  
Mecanismos de falla P.37.

#### 5.1.4 Discontinuidades

Las discontinuidades están presentes en la roca y afectan la resistencia, permeabilidad y durabilidad de la masa. Es importante evaluar la geometría, naturaleza, estado y condición de las discontinuidades, porque ellas definen la fábrica estructural del macizo rocoso. Además de su génesis, la influencia en el comportamiento del macizo, exige evaluar la génesis de los rellenos, la cantidad de agua, las cicatrices y revestimientos en las paredes por materiales solubles, la abertura, rugosidad y persistencia de las discontinuidades, y el número de familias.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Adaptado de Alvaro J. González G. Universidad Nacional, 1995

FIGURA 2 Discontinuidades en estructuras geológicas.



Fuente: SUAREZ. Jaime. Deslizamientos: Análisis geotécnico, Capítulo 2  
Mecanismos de falla P.40.

#### 5.1.4.1 Clasificación de discontinuidades

De acuerdo a Duque<sup>7</sup>, las discontinuidades se clasifican en:

- Genéticas o primarias. Son discontinuidades asociadas a estructuras de flujo y a fenómenos de retracción térmica en las rocas ígneas, a la foliación en algunas rocas metamórficas y a la estratificación en las sedimentarias. Son contemporáneas con la formación de la roca.
- Termoquímicas. Estas discontinuidades, de carácter secundario, pueden ocurrir después de formada la roca por causa del medio externo, como la termofracturación por gradiente térmico, gelifracturación por agua-hielo, halifracturación por sales y argilofracturación por arcillas.
- Gravitacionales y tectónicas. Son discontinuidades secundarias asociadas a esfuerzos gravitatorios como grietas de tracción, o a esfuerzos tectónicos donde se incluyen diaclasas, fallas y estructuras de placas tectónicas.

#### 5.1.5 Estructuras ancladas

Los anclajes proveen una fuerza para resistir aquellas que producen la inestabilidad del talud. Las anclas se encuentran unidas en su parte exterior a una estructura de contención superficial. Esta estructura de contención transmite la carga al ancla y esta la transmite al bulbo. Finalmente es el bulbo del anclaje el que resiste la carga de diseño.

<sup>7</sup> DUQUE ESCOBAR. Gonzalo. op. cit, p. 259

En las estructuras ancladas se colocan varillas o tendones generalmente, de acero en perforaciones realizadas con taladro, posteriormente se inyectan con un cemento. Los anclajes pueden ser pretensados para colocar una carga sobre un bulbo cementado o pueden ser cementados simplemente sin colocarles carga activa.<sup>8</sup>

Los sistemas de anclajes constan de:

- (1) un elemento metálico usualmente de acero en forma de barra o compuesto por fibra de vidrio, cable o alambre.
- (2) material de relleno o aglutinante, usualmente lechada o resina, el cual es inyectado.
- (3) tubos o mangueras utilizados para la alineación del elemento metálico en su instalación y para la inyección del material de relleno.
- (4) sistemas metálicos en el cabezal del anclaje, los cuales distribuyen la carga en la cara libre de la roca, tales como platinas metálicas, tuercas y arandelas.

En algunas ocasiones se utilizan:

- (5) cuñas expansivas, propias de anclajes expansivos. Se consideran elementos adicionales, como los fijadores o centradores, recubrimientos lisos o vaina lisa, y elementos de traslapo.

#### **5.1.5.1 Tipos de anclaje**

En función a su forma de trabajar:

- **Anclaje activo:** Elemento pre-tensionado poco tiempo después de su instalación a un porcentaje entre el 50% y 90% de la carga de trabajo considerada en el diseño, permitiendo que el anclaje aporte gran resistencia rápidamente. Una vez instalados se presenta la armadura hasta llegar a su carga admisible comprimiendo el terreno comprendido entre zona de anclaje y placa de apoyo en la cabeza.
- **Anclaje pasivo:** No se presenta la armadura después de su instalación. El anclaje entra en tracción al empezar a comprimirse el movimiento del terreno. No se tensiona luego de su instalación, permitiendo movimientos

---

<sup>8</sup> SUAREZ. Jaime op. cit, p. 477

en el material circundante inestable hasta lograr el tensionamiento previsto durante el diseño.

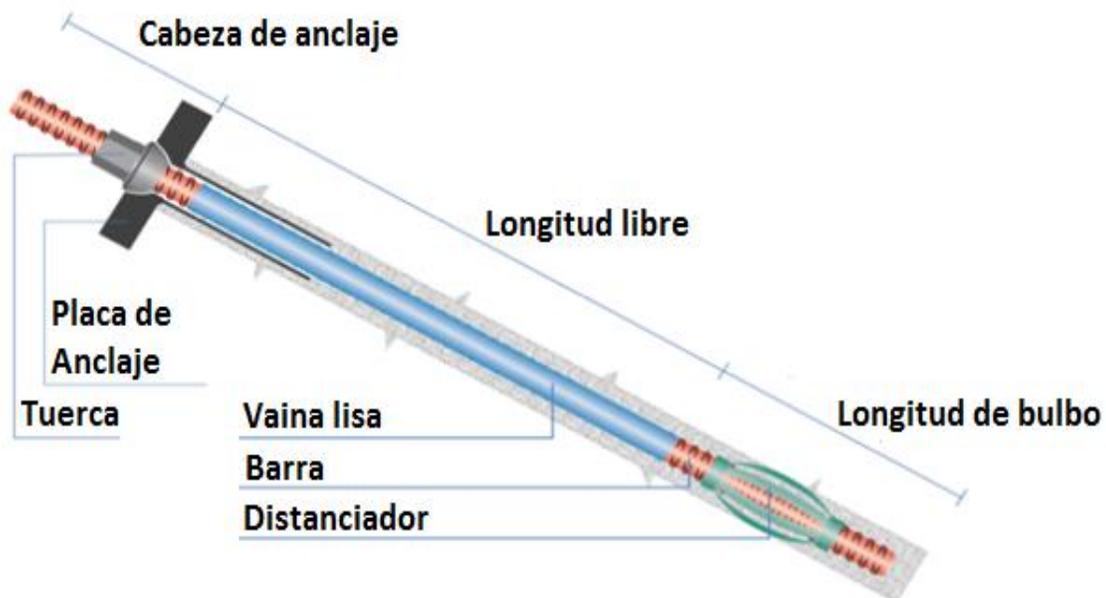
- **Anclaje mixto:** La estructura metálica se pretensa con una carga menor a la admisible, quedando una fracción de su capacidad resistente en reserva para hacer frente a posibles movimientos aleatorios del terreno.

En función de tiempo de servicio:

- **Anclajes provisionales:** tienen carácter medio auxiliar y proporcionan las condiciones de estabilidad al talud durante el tiempo necesario para disponer otros elementos resistentes que los sustituyan.
- **Anclajes permanentes:** se instalan con carácter de medida definitiva. Se dimensionan con mayores coeficientes de seguridad y han de estar proyectados y ejecutados para hacer frente a los peligros de corrosión.

La Figura 3 presenta un esquema de la longitud libre y longitud de empotramiento en un sistema de anclaje, tomado del sistema DYWIDAG o GEWI® de protección simple.

FIGURA 3 Esquema de longitud libre y longitud de empotramiento en un sistema de anclaje.



Fuente: CAÑAS VESGA, Daniel Enrique. Anclajes en la mecánica de rocas con aplicación a túneles.

### 5.1.5.2 Eficiencia de anclajes

Lo que ocurre es un refuerzo del macizo de roca por intermedio de la varilla. En esta forma se pueden evitar los caídos de roca y en ocasiones, los deslizamientos de macizos de roca fracturada con discontinuidades muy espaciadas. El diseño de los pernos generalmente es empírico basado en un análisis de las discontinuidades en el macizo y de la estabilidad de los bloques. La parte más importante del diseño es determinar la localización, ángulo de inclinación y longitud de cada perno

### 5.1.6 Talud

Es la pendiente que registra la inclinación de una superficie. La idea de paramento, por su parte, se vincula a las caras de un muro. Para la ingeniería y la arquitectura, el talud es la diferencia que existe entre el grosor del sector inferior del muro y el grosor del sector superior, creando una pendiente. Esto permite que el muro pueda resistir la presión que ejerce la tierra detrás de él.

## 5.2 ANÁLISIS ESTÁNDAR O ANÁLISIS CONVENCIONAL

Se define como análisis estándar al método convencional para calcular la longitud total de pernos para estabilizar un talud.

Para determinar las características del anclaje se usan las siguientes ecuaciones:

*Fuerza de los pernos:*

$$F_i = \sigma_y * \pi * \frac{\phi b^2}{4} \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

$F_i$  = Fuerza de un perno.

$\sigma_y$  = Resistencia a la tracción.

$\phi_b$  = Diámetro del perno.

*Área de influencia de los pernos:*

$$A_i = \frac{F_i * A_t}{F_t} = S^2 = S_l * S_t \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

$A_i$  = Área de influencia del perno.

$F_i$  = Fuerza de un perno.

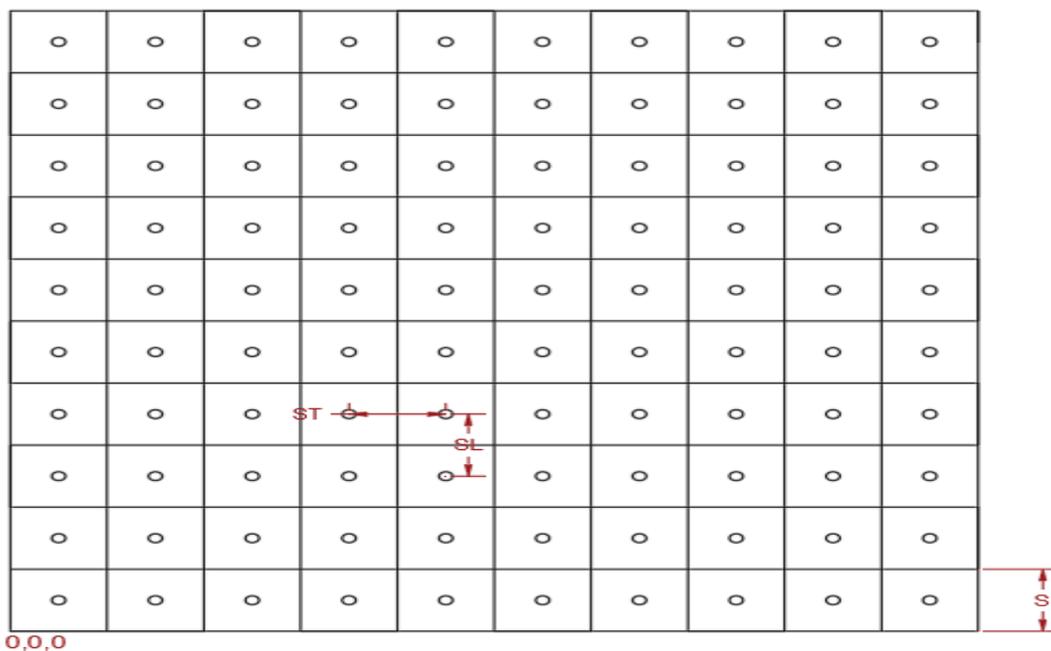
$A_t$  = Área total.

$F_t$  = Fuerza total.

$S$  = Separación.

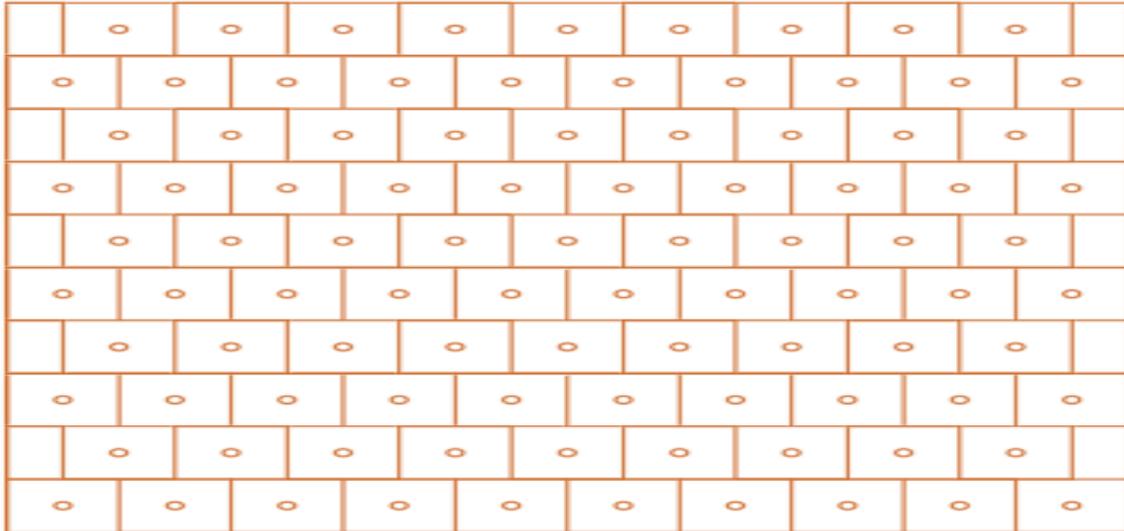
Representación del área de influencia en un patrón normal de anclaje.

FIGURA 4 Representación del área de influencia en un patrón normal de anclaje.



Fuente: Propia.

FIGURA 5 Patrón al tres bolillo de anclaje.



Fuente: Propia.

Para determinar la fuerza de empotramiento se tiene la siguiente relación:

$$F_i = \frac{F_E}{F_s} \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde:

$F_i$  = Fuerza de un perno.

$F_E$  = Fuerza de empotramiento.

$F_s$  = Factor de seguridad.

También se puede usar la siguiente expresión:

$$F_E = \pi * \phi_b * L_E * \mu \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde:

$F_E$  = Fuerza de empotramiento.

$\phi_b$  = Diámetro del perno.

$L_E$  = Longitud de empotramiento.

$\mu$  = Factor de contacto roca lechada.

### **5.3 MARCO LEGAL**

Con el fin de proveer las recomendaciones geotécnicas de diseño y construcción en este caso de estructuras ancladas para soportar los efectos por sismos y por otras amenazas geotécnicas desfavorables esta investigación se desarrolla bajo los parámetros del título H de la NSR 10, siguiendo también los artículos 26 y 27 de la ley 400 de 1997 modificada y adicionada por la ley 1229 de 2008<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> EL CONGRESO DE COLOMBIA. por el cual se adoptan normas sobre construcciones sismo resistentes. LEY 1229 de 2008.

## **6. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **6.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN**

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que plantea un problema en concreto que consiste en un proceso de análisis determinístico, en el cual se identifica y analiza la información arrojada por los softwares Swedge® y RocPlane® de Rocscience, posteriormente se realiza la programación de un algoritmo de reconocimiento y evaluación de datos con el objetivo de encontrar la longitud total de anclaje con pernos.

### **6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La metodología propuesta para el cálculo de la longitud libre de anclajes es de tipo correlativo por que se analiza la relación entre el sostenimiento de bloques de roca en taludes y la longitud de anclajes óptimos para dicho fin, proporcionando indicios de la relación que podría existir entre los conceptos anteriormente nombrados. Este indicio plantea la formulación de ecuación en un software con el fin de que arroje la longitud total del anclaje.

### **6.3 POBLACIÓN Y MUESTRA**

Las variables manejadas en la investigación tienen un patrón estadístico ya que los datos utilizados en la modelación, serán escogidos de forma predeterminada de esta manera podremos ingresar la información obtenida en el algoritmo y conocer como es el comportamiento de los pernos como sistema de anclaje.

Tabla 1 Variables de la investigación

TIPO	VARIABLE	INDICADOR	MEDICIÓN
INDEPENDIENTES	Tamaño del bloque	Geometria del talud	m <sup>2</sup>
		Fuerza requerida	N
	Caracterización del macizo rocoso	Orientación de las discontinuidad	°
		Tipo de roca	NA
DEPENDIENTES	Tipo de perno	Trabajo del anclaje	m
		Cantidad de pernos	#
		Espaciamiento de perno	m
		Tipo de perno	Mpa
	Longitud total	m	
	Factor de seguridad		N/A

Fuente: Propia.

#### 6.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTACIÓN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La investigación se desarrolla a partir los datos obtenidos de los software especializados de Rocscience, como los son RocPlane® y Swedge®. Con estos datos se procede a conocer la longitud total requerida para realizar anclajes con pernos a partir de una programación que se realizará, cuando se identifique todos los datos que arrojan los softwares mencionados anteriormente.

##### RocPlane®

Es una herramienta de software interactivo para la realización de análisis de estabilidad de taludes de roca plana y el diseño. Esta herramienta permite que sea fácil crear rápidamente modelos planos, visualizarlos, tanto en 2D y 3D, y evaluar los resultados del análisis, contiene muchas características útiles que permiten a los usuarios crear rápidamente, modificar y ejecutar modelos.

También incluye funcionalidades para analizar fácilmente los resultados, la generación de figuras y tablas, y la producción de resúmenes convenientes de modelos y resultados. Las características de generación de informes de este software son especialmente útiles para los ingenieros al escribir informes con dibujos de aspecto profesional y de alta calidad y diagramas. Ellos ayudan a los

diseñadores de pendiente para comunicarse fácilmente conclusiones a las personas con diferentes conocimientos de ingeniería pendiente.<sup>10</sup>

### Swedge®

Es una herramienta de análisis rápido, interactivo y fácil de usar para la evaluación de la geometría y la estabilidad de las cuñas de superficie en las laderas rocosas. Las cuñas se definen por dos planos que se intersectan de discontinuidad, la superficie de la pendiente y una grieta de tensión opcional. Proporciona un entorno gráfico integrado para la entrada de datos rápida y fácil y la visualización modelo 3D.

Para un análisis determinístico, calcula el factor de seguridad para una cuña específico, también calculará todas las combinaciones posibles de las intersecciones de conjuntos que pueden formar una cuña.<sup>11</sup>

## **6.5 FASES DE INVESTIGACIÓN**

Dentro de esta investigación se desarrollaron las siguientes fases.

- **Fase 1:** Establecer la geometría del talud, tamaño y forma de los bloques. Esto permite analizar la dinámica de los bloques mediante los programas RocPlane® y Swedge®.
- **Fase 2:** Calcular la cantidad de pernos necesaria para estabilizar taludes teniendo en cuenta la inclinación y separación, con la ayuda de software.

2.1 Evaluación de las diferentes variables con las que se puede hacer las simulaciones e identificar los datos que se obtienen.

2.2 Programación de algoritmo de reconocimiento y evaluación de datos con el objetivo de encontrar la longitud total de anclaje con pernos.

- **Fase 3:** Evaluar los componentes resistentes de los diferentes tipos de pernos usados para anclajes de bloques en taludes rocosos estableciendo una relación entre el tamaño y forma del bloque con la longitud libre que necesita el perno para atravesarlo.
- **Fase 4:** Analizar la eficiencia de los anclajes respecto a la variación en el tamaño de los bloques.

---

<sup>10</sup> rocscience (en línea). 2017 (Consultado el 10 de marzo de 2017). Disponible en <https://www.rocscience.com/rocscience/products/rocplane>

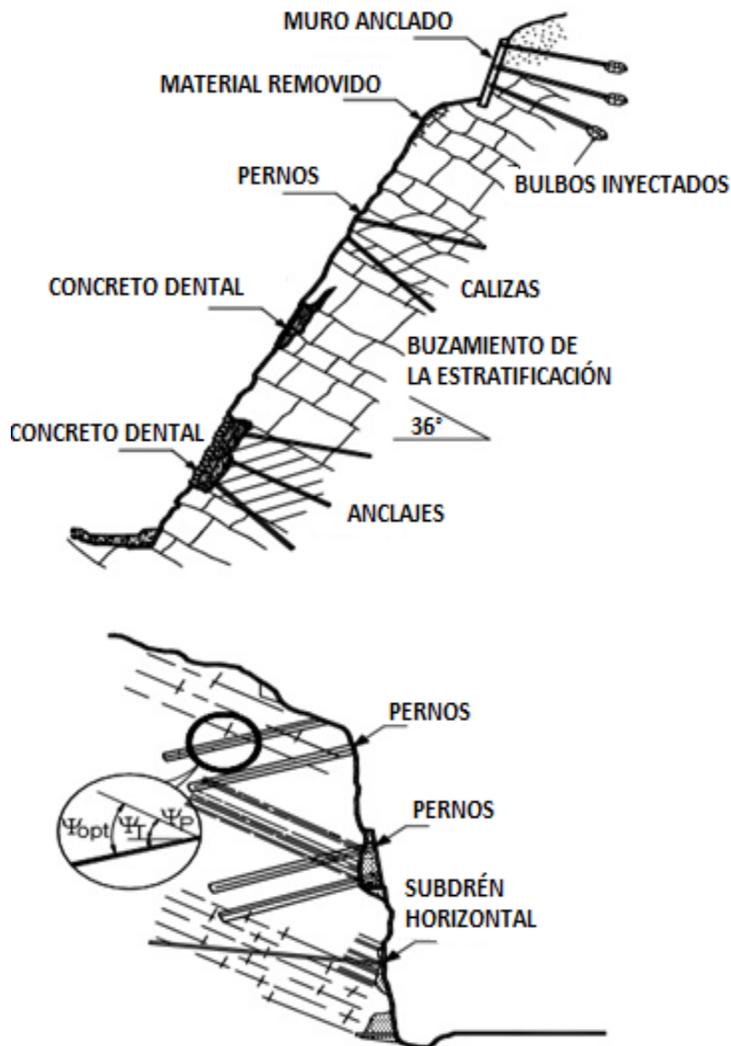
<sup>11</sup> rocscience (en línea). 2017 (Consultado el 10 de marzo de 2017). Disponible en <https://www.rocscience.com/rocscience/products/swedge>

## 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 7.1 RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO Y FORMA DEL BLOQUE CON LA LONGITUD LIBRE DE EMPOTRAMIENTO

Los pernos son elementos estructurales generalmente constituidos por varillas de acero colocadas dentro de una perforación, la cual se inyecta posteriormente con cemento para unir la varilla al macizo de roca. En la figura 4 se muestra la estabilización de un talud con diferentes métodos.

FIGURA 6 Estabilización de un manto rocoso utilizando pernos.



Fuente: Jaime Suarez, Técnicas de remediación. Capítulo 5 Pernos, Clavos y micropilotes. Pág. 174

Realmente lo que ocurre es un refuerzo del macizo de roca por intermedio de la varilla. De esta forma se pueden evitar los caídos de roca y en ocasiones, los deslizamientos de macizos de roca fracturada con discontinuidades muy espaciadas.

Los pernos tienen similitud con los anclajes pero no son pretensados. Generalmente son varillas de acero cementadas a la roca y con una platina y tuerca en la cabeza. Los pernos tienen menos de 10 metros de largo y se utilizan para reforzar bloques sueltos o mantos de roca. Su longitud depende de la geometría del macizo. Su espaciamiento típico es de 2 a 3 metros.<sup>12</sup>

Las estructuras de anclaje o refuerzo incluyen cables o varillas que se colocan dentro del suelo para reforzarlo o para transmitir cargas a los suelos o rocas a profundidad.

Tabla 2 Ventajas y desventajas de estructuras ancladas.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Refuerzos que sostienen los bloques de roca	Puede sufrir corrosión
Permite la estabilización de bloques individuales o puntos específicos dentro de un macizo de roca	Requiere rigidez del macizo rocoso

Fuente: Propia.

Los anclajes inyectados son armaduras metálicas, cementados mediante inyecciones de lechada de cemento o mortero.<sup>13</sup> Constatando en la literatura especializada sobre el tema, en general los diámetros de perforación de este tipo de anclajes están entre 75 y 110 mm y que la longitud de los anclajes puede variar entre 10 y 80 m.

Los anclajes mediante cables o grupos de cables (torones), no suelen usarse para anclajes de 2 m de longitud ya que se uso es de tipo superficial, se emplean generalmente en taludes y galerías de roca para disminuir desprendimientos y caídos producidos por fracturas o fisuras superficiales. En la figura 5 se muestra el proceso de instalación de pernos.

<sup>12</sup> SUAREZ. Jaime. Pernos, Clavos y micropilotes. En Deslizamientos: Análisis geotécnico P.174.

<sup>13</sup> UCAR NAVARRO (2004). Manual de anclajes en ingeniería civil. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid. P. 28

FIGURA 7 Etapas de instalación del anclaje.

Perforación de un barreno con o sin revestimiento de 75-150 mm de diámetro



Extracción de las barras de perforación e introducción del conjunto tensor del anclaje



Extracción de la tubería de revestimiento inyectando a presión simultáneamente lechada de cemento en toda la longitud de anclaje del elemento tensor

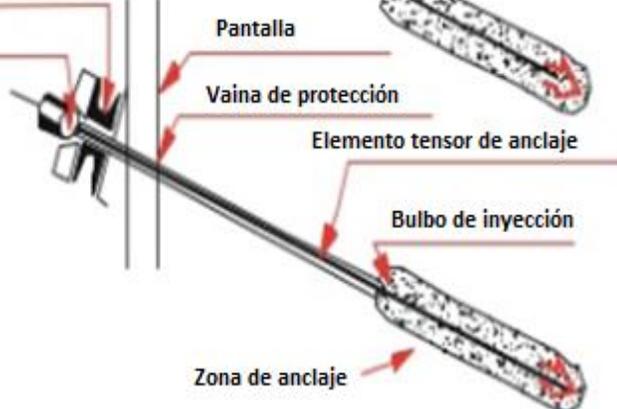


Verificación del anclaje 6-8 días aproximadamente después de su inyección



Conjunto de apoyo  
Cabeza de anclaje  
Puesta en tensión del anclaje a la carga deseada

Pantalla  
Vaina de protección  
Elemento tensor de anclaje  
Bulbo de inyección  
Zona de anclaje



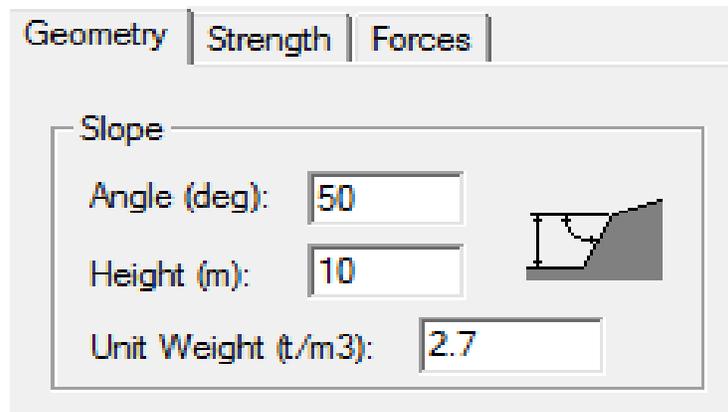
Fuente: UCAR NAVARRO. Roberto . Manual de anclajes en ingeniería civil. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid. Pág. 29

## 7.2 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE PERNOS NECESARIA PARA ESTABILIZAR BLOQUES DE ROCA EN TALUDES

Para iniciar esta fase, se estableció que a partir de las siguientes condiciones de análisis de modelos en los softwares especializados se determinan los posibles escenarios que pueden plantearse en la evaluación de masas tanto de suelos como de rocas. Cada uno de estos escenarios fueron programados dentro del algoritmo propuesto para su posterior estudio y mejoramiento.

7.2.1 RocPlane® : En la evaluación de las diferentes variables con las que se puede hacer las simulaciones se establecieron las siguientes condiciones, teniendo en cuenta que se modeló usando el criterio de Mohr Coulomb en el software RocPlane®, al momento de introducir las variables de la cuña:

FIGURA 8 Configuración de la geometría de un talud en RocPlane®.



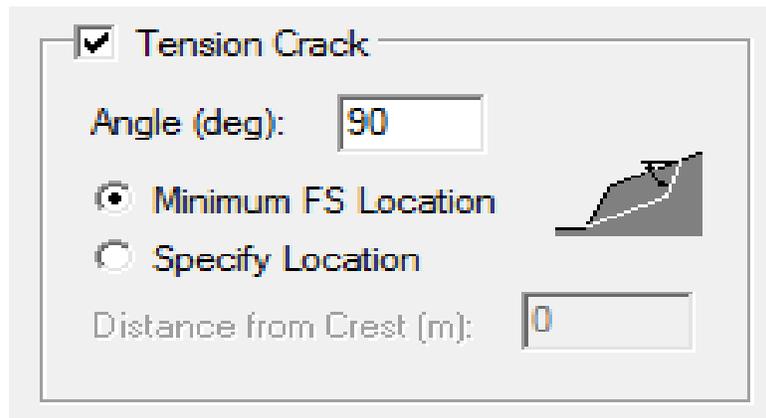
Fuente. RocPlane®.

**7.2.1.1 Tension crack:** Se usa para especificar en el modelo una grieta de tensión, se puede realizar de dos maneras:

- Ubicación mínima de Factor de Seguridad: Esta opción da la ubicación de la grieta de tensión crítica que proporciona el factor mínimo de seguridad para un modelo dado.
- Especificar ubicación: Esta opción le permite especificar una ubicación para la grieta de tensión. La ubicación se especifica como una distancia horizontal desde la cresta de la pendiente.

Se modela activando la opción tensión crack de la sección Análisis (Analysis)..

FIGURA 9 Modelación en RocPlane® con Tension Crack.

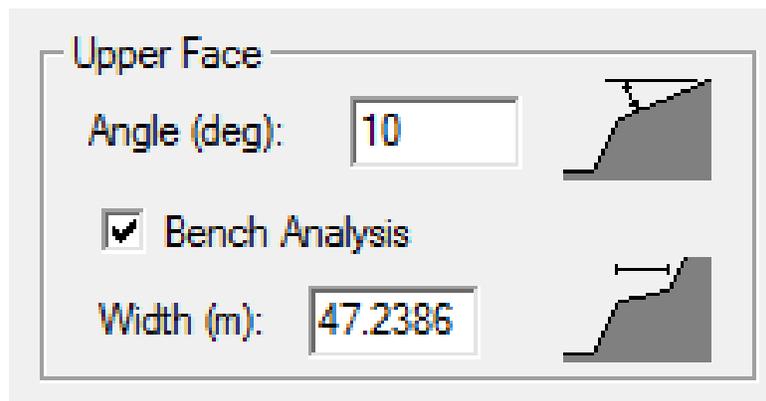


Fuente. RocPlane®.

- 7.2.1.2 Bench Width:** El tamaño de cuña determinado por RocPlane®, se basa en la altura del talud. Sin embargo, se puede escalar el tamaño de cuña de acuerdo con el ancho de banca seleccionando la casilla de verificación Anchura de banco e introduciendo un valor para el ancho.

Se modela activando la opción tensión crack de la sección Análisis (Analysis).

FIGURA 10 Modelación en RocPlane® con Bench Analysis.



Fuente. RocPlane®.

- 7.2.1.3 Water pressure:** Por defecto, la presión del agua no se aplica a un modelo de RocPlane®. Por lo tanto, el análisis por defecto supone una pendiente seca (DRY).

Para incluir la presión del agua en el análisis, se debe seleccionar la casilla Presión del agua en el cuadro de diálogo Datos de entrada. Existen cuatro modelos de distribución de presión de agua disponibles:

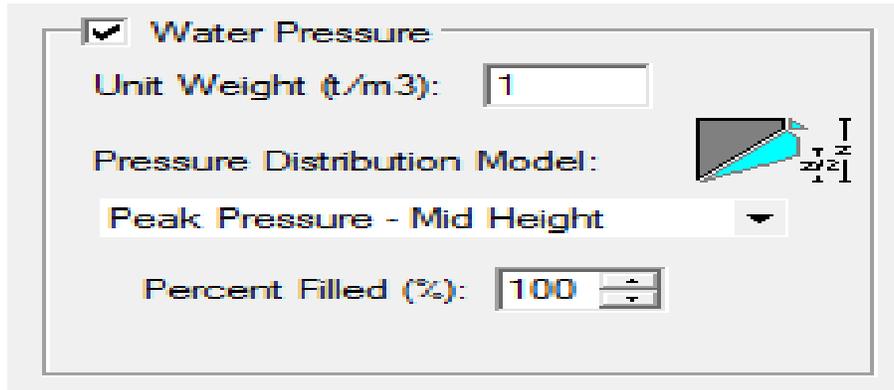
1. Presión de pico - Altura media.  
Supone que la presión máxima de agua se produce a la altura media del nivel de agua en la pendiente. Se supone que la presión es cero en la punta de la pendiente, con variación lineal de presión entre cero y la presión máxima.
2. Pico de presión – en el pie del talud.  
Supone que la presión máxima del agua ocurre en el dedo del pie de la cuña. Este es el peor de los casos, ya que dará como resultado la máxima fuerza hidrostática que se aplica a la cuña. Esto puede ocurrir si el drenaje en la punta de la pendiente se bloquea, por ejemplo por congelación de agua. La variación de presión es lineal desde el máximo en la punta, hasta cero en la parte superior del nivel de agua en la pendiente.
3. Pico de presión – en la base de la grieta de la tensión  
Supone que la presión máxima del agua se produce en la base de la grieta de tensión. Esta opción sólo es aplicable si el modelo incluye una grieta de tensión (Tension Crack). Se supone que la presión es cero al pie del talud, con una variación de presión lineal entre cero y la presión máxima, tanto en el plano de fallo como en la grieta de tensión.
4. Presión personalizada  
Permite especificar la presión de agua real (promedio) en el plano de falla y la grieta de tensión. Esto es útil si se dispone de datos reales sobre la presión del agua.

La opción Porcentaje de llenado permite especificar el nivel de agua en la pendiente en porcentaje.

La opción Peso unitario para la presión del agua permite especificar el peso unitario del agua en  $\text{ton/m}^3$ .

Se modela activando la opción Water Pressure de la sección Forces.

FIGURA 11 Modelación en RocPlane® con Water Pressure.



Fuente. RocPlane®.

**7.2.1.4 Seismic force:** La fuerza sísmica se puede aplicar a la cuña seleccionando la casilla de verificación Sísmica en el cuadro de diálogo Datos de entrada e introduciendo los siguientes datos:

- Coeficiente sísmico

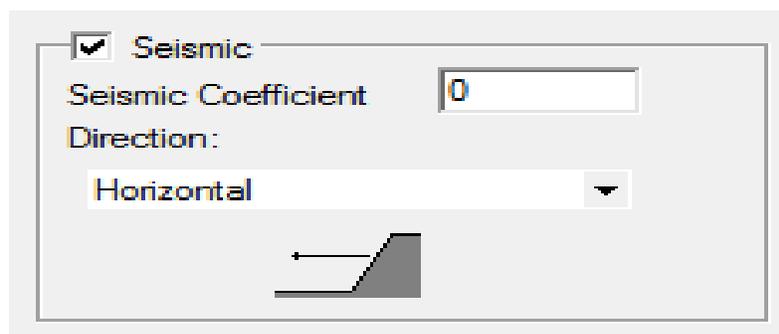
El coeficiente sísmico es un número adimensional que define la aceleración sísmica como una fracción de la aceleración debida a la gravedad. Típicamente, el Coeficiente Sísmico puede ser de alrededor de 0,1 a 0,2.

- Dirección

Por defecto la fuerza sísmica se aplicará a la cuña en la dirección HORIZONTAL. Sin embargo, se puede definir la fuerza sísmica en cualquier ángulo desde la horizontal, seleccionando la opción usuario definido (USER DEFINED) para Dirección e ingresando un ángulo.

Se modela activando la opción Seismic de la sección Forces..

FIGURA 12 Modelación en RocPlane® con Seismic force.



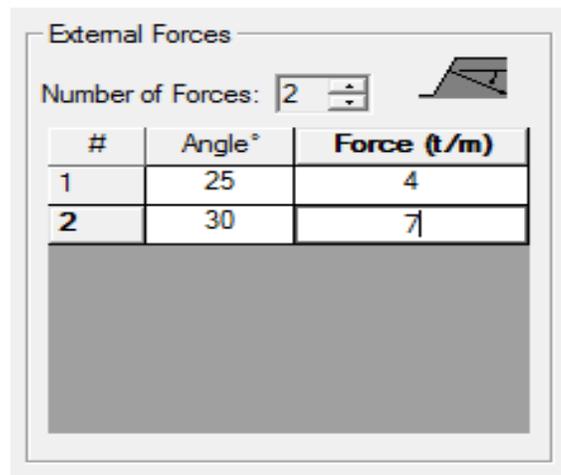
Fuente. RocPlane®.

**7.2.1.5 External force:** Las fuerzas externas (por ejemplo, una carga estructural sobre la superficie superior de una pendiente, o la fuerza aplicada por una berma de roca residual al extremo de una pendiente) se pueden aplicar al bloque deslizante, con la opción Fuerzas externas en el cuadro de diálogo Datos de entrada. Se debe incluir Fuerzas Externas en el análisis de la siguiente forma:

- Seleccionar el número de fuerzas externas que quiera modelar.
- Introducir el ángulo (de inclinación) y la magnitud de cada fuerza.
- Seleccionar el botón Aplicar para ejecutar el análisis

Se modela activando la opción fuerzas externas (External forces) de la sección fuerzas (Forces).

FIGURA 13 Modelación en RocPlane® con External force.



Fuente. RocPlane®.

**7.2.1.6 Escenario inicial:** Para la investigación se estableció esta variable como la modelación de cuña sin aplicar ninguna de las variables anteriores, sin embargo, cabe aclarar que no es como tal una opción de análisis que brinde el software. Para la programación de algoritmo de reconocimiento y evaluación de datos con el objetivo de encontrar la longitud total de anclaje con pernos, se utilizó la herramienta visual basic con el fin de simplificar el análisis de mecanismos de falla en cuña que brindan los softwares Swedge® y RocPlane® de Rocscience e incluir el valor de longitud de perno adecuado, cantidad de perno también para establecer con que variables de modelo el evento como tal.

**7.2.2 Swedge®:** Es una herramienta de análisis rápida, interactiva y fácil de usar para evaluar la geometría y la estabilidad de las cuñas superficiales

en pendientes rocosas. Las cuñas se definen por dos planos de discontinuidad que se cruzan, la superficie de la pendiente y una grieta de tensión opcional. Cabe aclarar que se modeló usando el criterio de Mohr Coulomb.

Para el software Swedge®, al momento de introducir las variables de la cuña:

FIGURA 14 Configuración de las características de un talud en Swedge®.

	Dip (deg)	Dip Direction (deg)
Joint Set 1	40	105
Joint Set 2	79	235
Upper Face	0	195
Slope Face	60	185

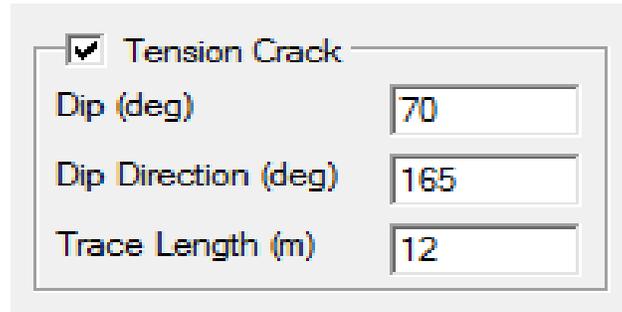
Fuente. Swedge®.

#### 7.2.2.1 Tension crack:

- Una grieta de tensión es opcional en el análisis de Swedge®. De forma predeterminada, Swedge® no considera una grieta de tensión en el análisis.
- Por definición, una grieta de tensión en Swedge®, tiene una fuerza de cizalla cero. No contribuye a las fuerzas que resisten el movimiento de la cuña, simplemente trunca el tamaño de la cuña.
- Sin embargo, si se incluye la presión de agua en el análisis, la fuerza resultante se aplicará al plano de rotura de tensión, si corresponde.

Se modela activando la opción tensión crack de la sección Analysis.

FIGURA 15 Modelación en Swedge® con Tension Crack.



<input checked="" type="checkbox"/> Tension Crack	
Dip (deg)	70
Dip Direction (deg)	165
Trace Length (m)	12

Fuente. Swedge®.

### 7.2.2.2 Bench design:

La opción de diseño de banco es una extensión de las características de análisis probabilístico en Swedge®. Suponiendo un ancho de banco constante o un ángulo inter-rampa constante, se puede introducir los parámetros de diseño y la información estadística conjunta con el fin de optimizar el ángulo de pendiente del banco según las restricciones de diseño. La salida del análisis permite interpretar los resultados de acuerdo con varios métodos, incluyendo:

- El enfoque gestionado al diseño del banco.
- El análisis cuantitativo del riesgo (QHA).

Se modela activando la opción Bench width de la sección Analysis...

FIGURA 16 Modelación en Swedge® geometría del talud y Bench width.



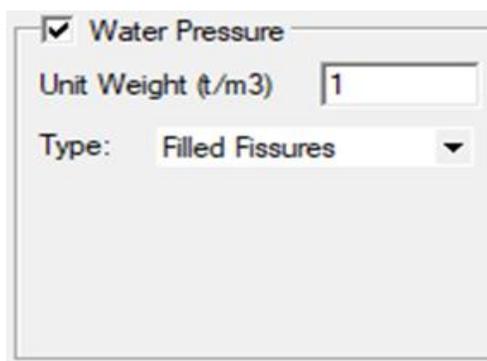
Slope Properties	
Slope Height (m)	10
Unit Weight (t/m3)	2.6
<input checked="" type="checkbox"/> Bench Width (m)	48.6303
<input type="checkbox"/> Overhanging	

Fuente. Swedge®.

**7.2.2.3 Water pressure:** Por defecto, la presión del agua NO se aplica a un modelo Swedge®, el análisis por lo tanto es aplicable a una pendiente seca.

Se modela activando la opción Water Pressure de la sección Forces.

FIGURA 17 Modelación en Swedge® con Water Pressure.



Fuente. Swedge®.

7.2.2.4 **Seismic force:** La fuerza sísmica se puede aplicar a la cuña seleccionando la casilla de verificación Sísmica en el cuadro de diálogo Datos de entrada e introduciendo los siguientes datos:

- Coeficiente sísmico

Número adimensional que define la aceleración sísmica como una fracción de la aceleración debida a la gravedad. Típicamente, el Coeficiente Sísmico puede ser de alrededor de 0,1 a 0,2. Si  $a$  = Coeficiente sísmico,  $g$  = aceleración por gravedad =  $9.81 \text{ m} / \text{s}^2$ , y  $m$  = masa de la cuña, entonces la fuerza sísmica aplicada a la cuña,  $F = m a g$ .

- Dirección
  - La Línea de Intersección aplicará la Fuerza Sísmica en la dirección (PLUNGE y TREND) deseada.
  - Horiz. & Inters. se aplicará la Fuerza Sísmica horizontalmente, pero con la misma TENDENCIA que la Línea de Intersección de los planos.

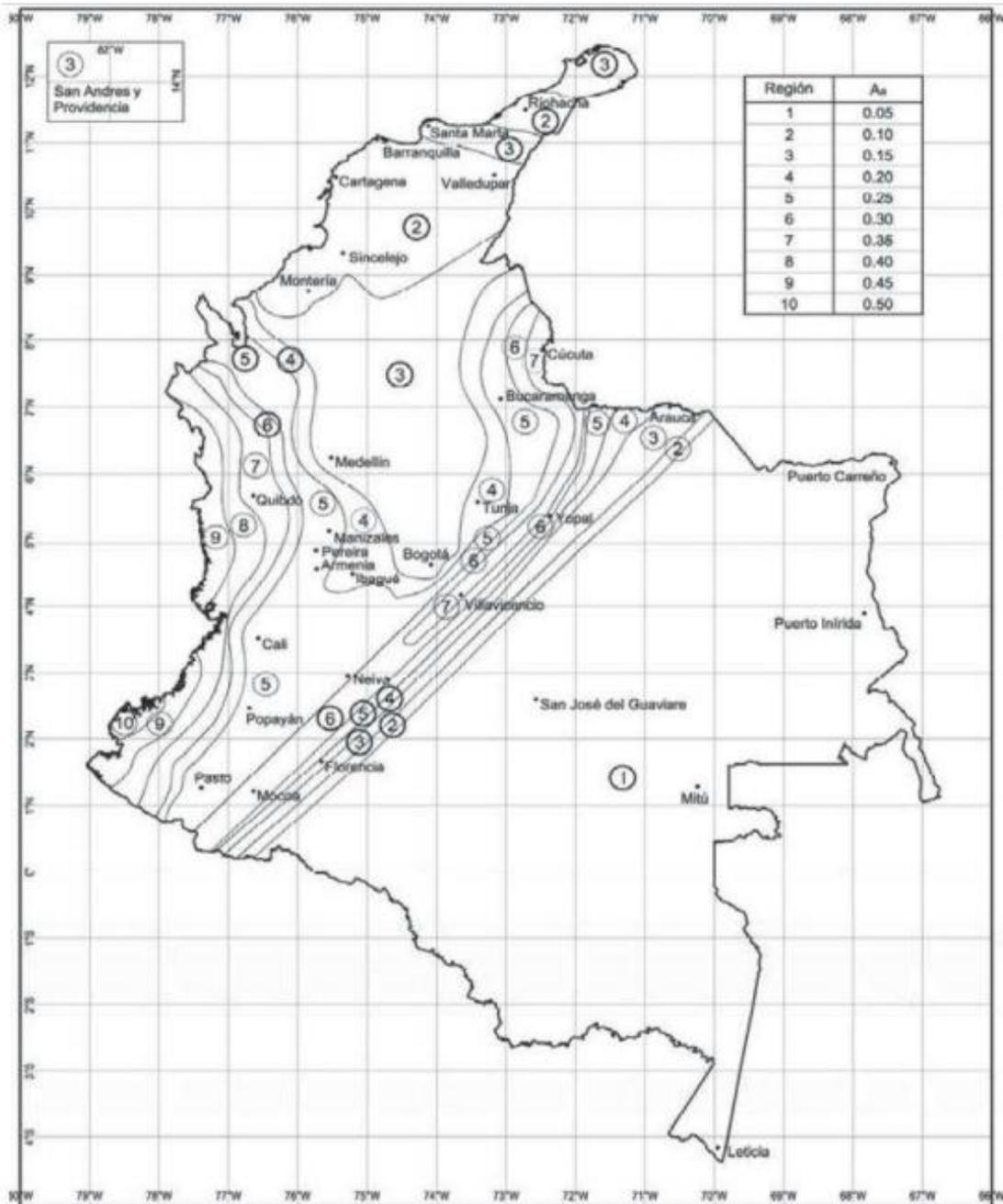
En un entorno local, de acuerdo con INGEOMINAS<sup>14</sup>, “de las cabeceras municipales, 475, correspondientes aproximadamente al 35% de la población colombiana, se encuentran en zonas de amenaza sísmica alta; 435, equivalente al 51% de la población, en zonas de amenaza sísmica intermedia; y 151, equivalente al 14% de la población, en zonas de amenaza sísmica baja”.

Con la actualización de la NSR-10, el nuevo mapa de sismicidad elaborado por la Red Sismológica Nacional adscrita a Ingeominas, que permite identificar de manera más acertada las zonas de amenaza sísmica a lo largo y ancho del país, y las cuales permiten variaciones en los diseños estructurales según la zona sea

<sup>14</sup> Tomado de la página web <http://tms.ingeominas.gov.co/web/2004/mapas/map2/leg/legend.html>

alta, intermedia o baja. En la Figura 16 se muestra el Mapa de valores de  $A_a$  vigente para el territorio nacional.

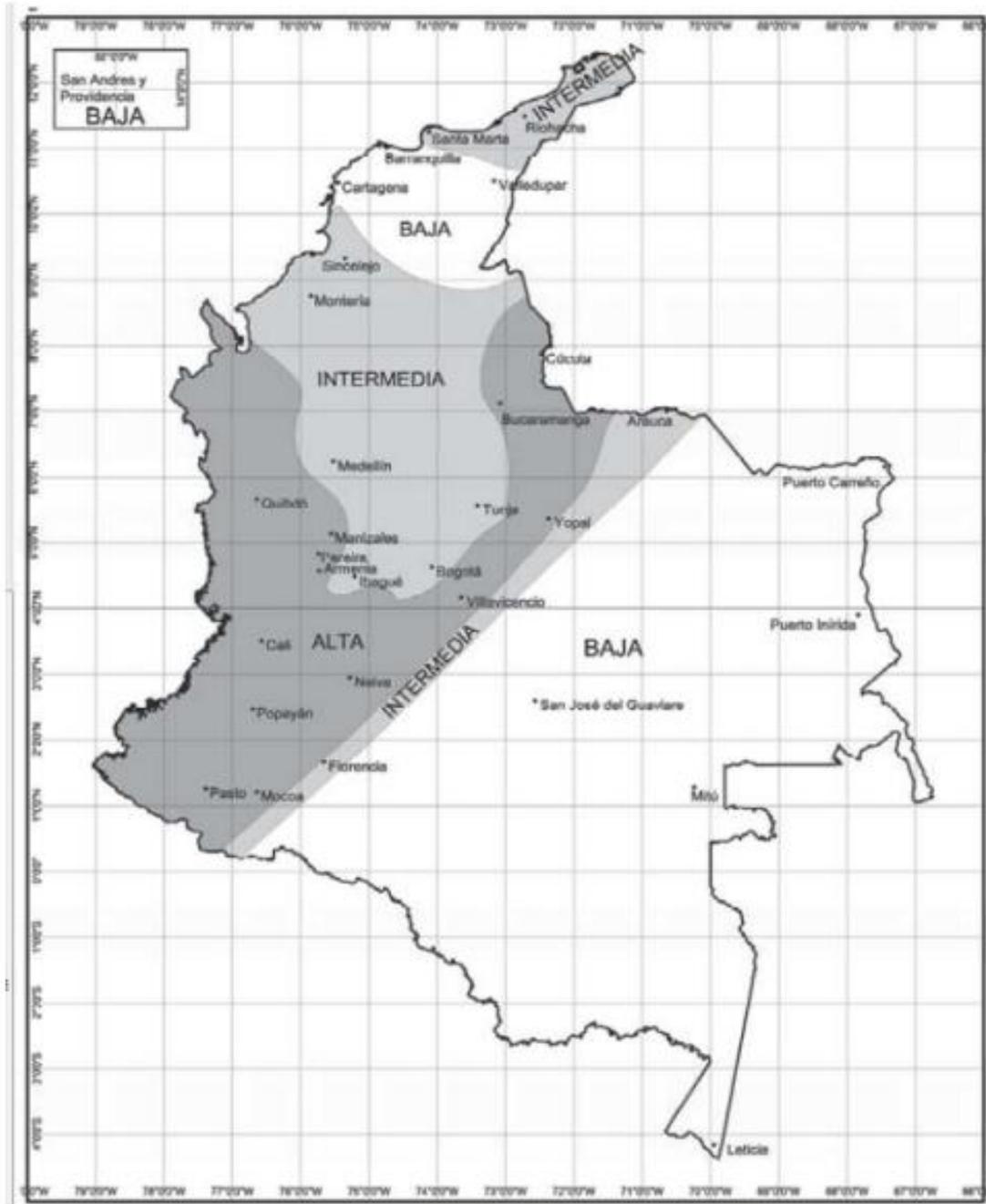
FIGURA 18 Mapa de valores de  $A_a$  vigente para el territorio nacional.



Fuente: REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE – NSR-10” (COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES, 2010).

En la Figura 17 se presentan las Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de Aa.

FIGURA 19 Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de Aa.



Fuente: REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE – NSR-10” (COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES, 2010).

En la Tabla 4. se muestran los valores de la aceleración pico efectiva para diseño  $[A_a]$  y  $[A_v]$  incluidos en la NSR-10 para las ciudades capitales de departamento.

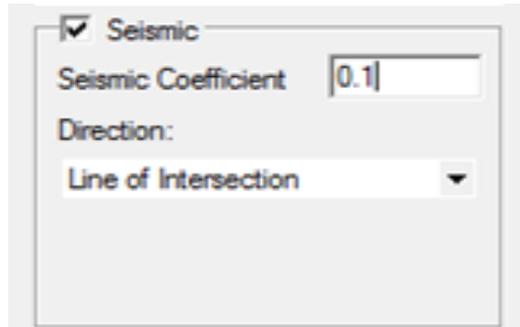
Tabla 3 Valor de  $A_a$  y  $A_v$  para las ciudades capitales de departamento.

Ciudad	$A_a$	$A_v$	Zona de Amenaza Sísmica
Arauca	0.15	0.15	Intermedia
Armenia	0.25	0.25	Alta
Barranquilla	0.10	0.10	Baja
Bogotá D. C.	0.15	0.20	Intermedia
Bucaramanga	0.25	0.25	Alta
Cali	0.25	0.25	Alta
Cartagena	0.10	0.10	Baja
Cúcuta	0.35	0.30	Alta
Florencia	0.20	0.15	Intermedia
Ibagué	0.20	0.20	Intermedia
Leticia	0.05	0.05	Baja
Manizales	0.25	0.25	Alta
Medellín	0.15	0.20	Intermedia
Mitú	0.05	0.05	Baja
Mocoa	0.30	0.25	Alta
Montería	0.10	0.15	Intermedia
Neiva	0.25	0.25	Alta
Pasto	0.25	0.25	Alta
Pereira	0.25	0.25	Alta
Popayán	0.25	0.20	Alta
Puerto Carreño	0.05	0.05	Baja
Puerto Inírida	0.05	0.05	Baja
Quibdó	0.35	0.35	Alta
Riohacha	0.10	0.15	Intermedia
San Andrés, Isla	0.10	0.10	Baja
Santa Marta	0.15	0.10	Intermedia
San José del Guaviare	0.05	0.05	Baja
Sincelejo	0.10	0.15	Intermedia
Tunja	0.20	0.20	Intermedia
Valledupar	0.10	0.10	Baja
Villavicencio	0.35	0.30	Alta
Yopal	0.30	0.20	Alta

Fuente: REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE – NSR-10” (COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES, 2010).

La anterior información es clave en el diseño de infraestructura en las diferentes zonas de la geografía nacional, en Swedge® se modela activando la opción Seismic de la sección Forces.

FIGURA 20 Modelación en Swedge® con Seismic force



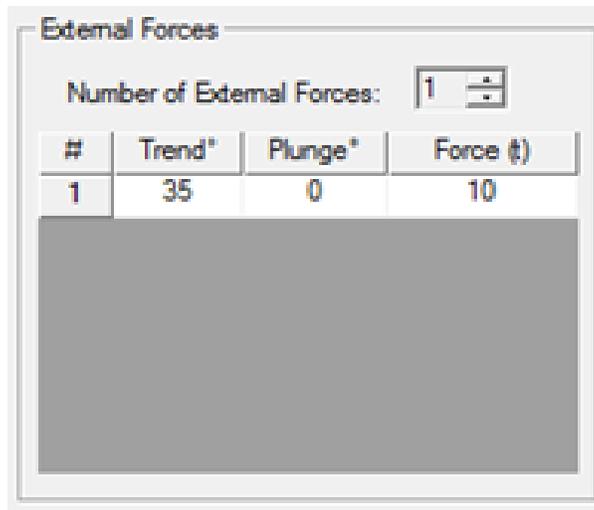
Fuente. Swedge®.

#### 7.2.2.5 External force:

Las fuerzas externas se pueden aplicar a la cuña seleccionando previamente el número de fuerzas externas. Se introduce la tendencia, la dirección, el buzamiento y la magnitud de cada fuerza. Por último se oprime el botón Aplicar para ejecutar el análisis.

Se modela activando la opción External forces de la sección Forces.

FIGURA 21 Modelación en Swedge® con External force.



Fuente. Swedge®.

**7.2.2.6 ESCENARIO INICIAL:** Para la investigación se estableció esta variable como la modelación de cuña sin aplicar ninguna de las variables anteriores, sin embargo, cabe aclarar que no es como tal una opción de análisis que brinde el software.

Para la aplicación de las diferentes variables al algoritmo, se organizan las variables de la siguiente forma:

Tabla 4 Nomenclatura de parámetros en Swedge® y RocPlane®.

Variable	ID
Original	0
tension crack	A
water pressure	B
seismic force	C
external force	D
bench width	E

Fuente. Propia.

Obteniendo las siguientes combinaciones:

Tabla 5 Combinaciones de parámetros en Swedge® y RocPlane®.

Combinaciones				
1	2	3	4	5
A	AB	ABC	ABCD	ABCDE
B	AC	ABD	ABCE	
C	AD	ABE	ABDE	
D	AE	ACD	ACDE	
E	BC	ACE	BCDE	
	BD	ADE		
	BE	BCD		
	CD	BCE		
	CE			
	DE			

Fuente. Propia.

Para el planteamiento del programa pretendido, se ha desarrollado un algoritmo en visual basic con la capacidad de interpretar la totalidad de las combinaciones presentadas en la tabla 6.

Para constatar los resultados de esta fase de la investigación se plantearon los siguientes ejercicios como base para iniciar la programación y entender de manera breve y concisa los lineamientos iniciales básicos que se pretenden llevar a cabo.

- **EJERCICIO 1 (FALLA PLANAR).**

Con el fin de estimar la eficiencia de la longitud total de pernos en una falla planar se realiza la modelación a un talud de 10 metros con el fin de facilitar los cálculos, bajo la condición de escenario original en Rocplane®. Por criterio se dejó de forma predeterminada el peso específico, el ángulo de fricción y la cohesión ; donde se obtuvieron los siguientes resultados que sirven como datos de entrada para el cálculo estándar del ejercicio.

*RocPlane Analysis Information*

Job Title:

RocPlane - Planar Wedge Stability Analysis

Analysis Results:

Analysis type = Deterministic  
Normal Force = 74.1832 t/m  
Resisting Force = 250.492 t/m  
Driving Force = 51.9437 t/m  
Factor of Safety = 1.82237

Geometry:

Slope Height = 10 m  
Wedge Weight = 90.561 t/m  
Wedge Volume = 33.5411 m<sup>3</sup>/m  
Rock Unit Weight = 2.7 t/m<sup>3</sup>  
Slope Angle = 50 °  
Failure Plane Angle = 35 °  
Upper Face Angle = 10 °  
Bench Width : Not Present  
Waviness = 0 °

Intersection Point (B) of slope and upper face = ( 8.391 , 10 )  
Intersection point (C) of failure plane and upper face = ( 16.2641 , 11.3882 )  
Failure plane length ( Origin --> C ) = 19.8548 m  
Slope length ( Origin --> B ) = 13.0409 m

Tension Crack : Not Present

Strength:

Shear Strength Model : Mohr-Coulomb  
Friction Angle = 35 °  
Cohesion = 10 t/m<sup>2</sup>  
Shear Strength: 250.492 t/m<sup>2</sup>

External Forces : Not Present

➤ **Solución estándar:**

Datos seleccionados del análisis de Rocplane® para un análisis por metro lineal:

Área total:  $10 \text{ m} * 1 \text{ m} = 10 \text{ m}^2$

Diámetro del perno = #8

Fuerza total = 90.561 T/m

$$\text{Fuerza de un perno (Fi)} = \frac{F_y * A_b}{F_s} * 100$$

en donde:

$F_y$  = Resistencia del acero.

$A_b$  = Área del perno.

$F_s$  = Factor de seguridad.

$$\text{Entonces (Fi)} = \frac{420 * 0.000506}{1.82} * 100 = 11.68 \text{ Ton}$$

$$\text{Fuerza de empotramiento (FE)} = F_i * 3$$

En donde:

$F_i$  = Fuerza del perno.

$$\text{Entonces (FE)} = 11.68 * 3 = 35.03 \text{ Ton}$$

$$\text{Separación (Sp)} = \frac{F_i * A_t}{F_t}$$

En donde:

$F_i$  = Fuerza del perno.

$A_t$  = Área total.

$F_t$  = Fuerza total.

$$\text{Entonces (Sp)} = \frac{11.68 * 10}{90.56} = 1.3 \text{ m}$$

$$\text{Longitud de empotramiento (LE)} = \frac{F_E}{\mu * d_b * \pi}$$

en donde:

$F_E$  = Fuerza de empotramiento.

$\mu$  = Factor contacto lechada.

$d_b$  = Diámetro del perno.

$$\text{Entonces (LE)} = \frac{35.03}{102 * 0.0254 * \pi} = 4.3 \text{ m}$$

$$\text{Longitud total (LT)} = L_L + L_E$$

En donde:

$L_L$  = Longitud Libre.

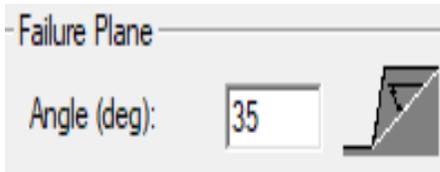
$L_E$  = Longitud de empotramiento.

Para el cálculo de la longitud libre, se tiene que:



Fuente. Rocplane®.

Ángulo del talud = 50°



Fuente. Rocplane®.

Ángulo de la falla = 35°

Aplicando ley senos :

$$\frac{a}{\text{SEN } A} = \frac{b}{\text{SEN } B} = \frac{c}{\text{SEN } C}$$

Distancia a la falla:

$$\frac{H}{\text{SEN } 35} = \frac{X}{\text{SEN } 55}$$

$$\frac{10m * \text{SEN } 55}{\text{SEN } 35} = X = 14.28 m$$

Distancia al talud :

$$\frac{H}{\text{SEN } 50} = \frac{X}{\text{SEN } 40}$$
$$\frac{10 m * \text{SEN } 40}{\text{SEN } 50} = X = 8.39$$

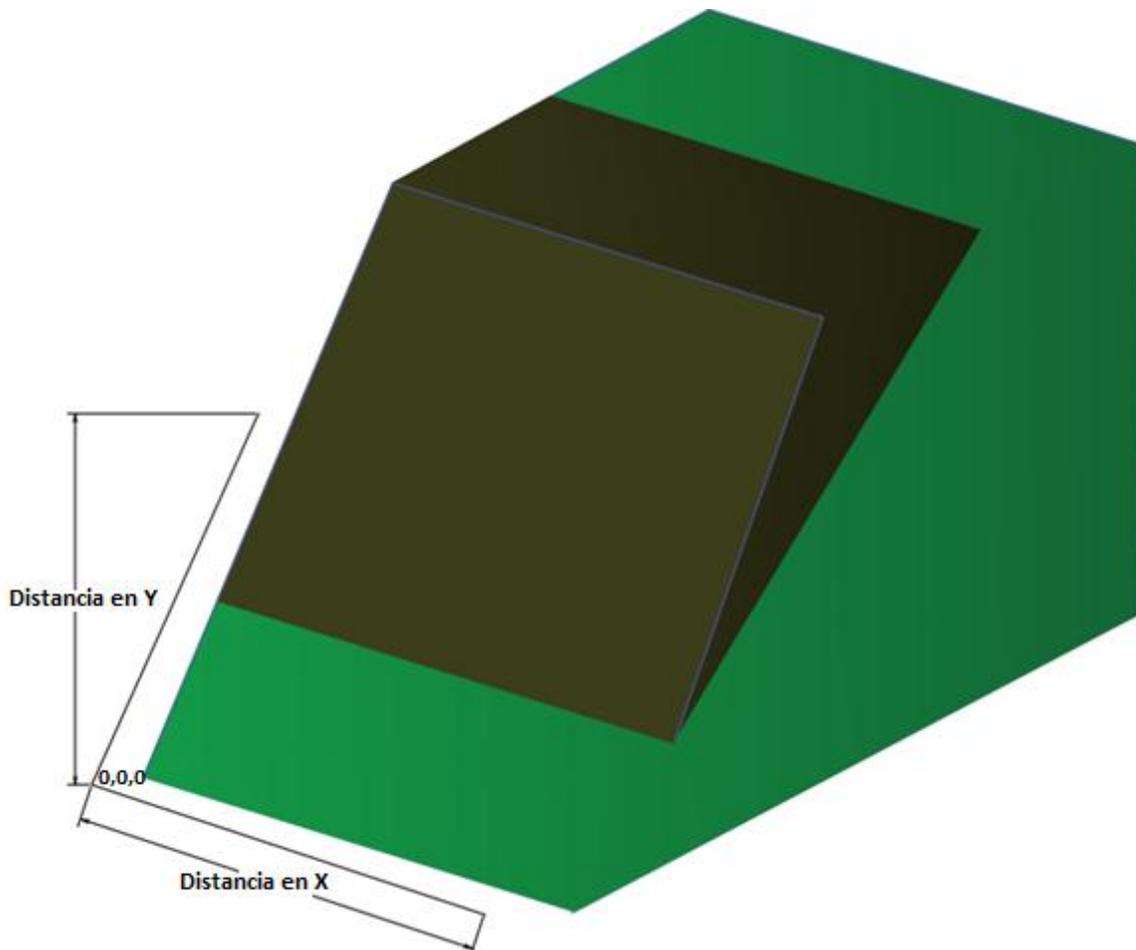
Longitud libre = 14.28 – 8.39 = 5.89 m

Entonces (LT) = 5.89 + 4.3 = 10.02 m

➤ Optimizaciones:

Con el fin de optimizar la longitud de los pernos en el ejercicio propuesto se ha estimado el origen de los pernos en 0 tanto para X como para Y.

FIGURA 22 Representación esquemática ejercicio 1(falla planar).



Fuente. Propia.

✓ *Optimización con patrón normal*

$$LE = LT - LL$$

$Sp=1.3$  metros tomada del análisis estándar

$LT=11$  recomendada del análisis estándar

$$LE_1 = 11m - 0m = 11m$$

$$LE_2 = 11m - \left[ \frac{1.3m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{1.3m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 10.23m$$

$$LE_3 = 11m - \left[ \frac{2.6m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{2.6m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 9.47m$$

$$LE_4 = 11m - \left[ \frac{3.9m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{3.9m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 8.7m$$

$$LE_5 = 11m - \left[ \frac{5.2m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{5.2m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 7.9m$$

$$LE_6 = 11m - \left[ \frac{6.5m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{6.5m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 7.1m$$

$$LE_7 = 11m - \left[ \frac{7.8m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{7.8m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 6.4$$

$$LE_8 = 11m - \left[ \frac{9.1m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{9.1m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 5.63m$$

$$FE = \pi * \Phi_{b*LE*\mu}$$

De acuerdo al análisis estándar la fuerza que soporta cada perno es de 11.68 ton calculada anteriormente para una longitud total de 11 m.

$$FE_1 = \pi * 0.0254 * 11 * 102 = 89.53ton$$

$$FE_2 = \pi * 0.0254 * 10.23 * 102 = 83.26ton$$

$$FE_3 = \pi * 0.0254 * 9.47 * 102 = 77.07ton$$

$$FE_4 = \pi * 0.0254 * 8.7 * 102 = 70.81ton$$

$$FE_5 = \pi * 0.0254 * 7.9 * 102 = 64.30ton$$

$$FE_6 = \pi * 0.0254 * 7.1 * 102 = 57.78ton$$

$$FE_7 = \pi * 0.0254 * 6.4 * 102 = 52.09ton$$

$$FE_8 = \pi * 0.0254 * 5.63 * 102 = 45.82ton$$

Cálculo de la resistencia de un perno:

$$FI = \frac{FE}{3}$$

$$FI_1 = \frac{89.53ton}{3} = 29.84ton$$

$$FI_2 = \frac{83.26ton}{3} = 27.75ton$$

$$FI_3 = \frac{77.07ton}{3} = 25.69ton$$

$$FI_4 = \frac{70.81ton}{3} = 23.60ton$$

$$FI_5 = \frac{64.30ton}{3} = 21.43ton$$

$$FI_6 = \frac{57.78ton}{3} = 19.26ton$$

$$FI_7 = \frac{52.09ton}{3} = 17.36ton$$

$$FI_8 = \frac{45.02ton}{3} = 15.00ton$$

Como los pernos tienen una resistencia mayor de la que pueden soportar porque la resistencia se da a partir de la longitud de empotramiento y si se supera la resistencia del perno este fallará por tracción, por tal motivo se estima que la fuerza total de cada perno es 11.68 toneladas resultado obtenido del análisis estándar.

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + FI_4 + FI_5 + FI_6 + FI_7 + FI_8$$

$$\sum FI = 11.68 + 11.68 + 11.68 + 11.68 + 11.68 + 11.68 + 11.68 + 11.68 = 93.44ton$$

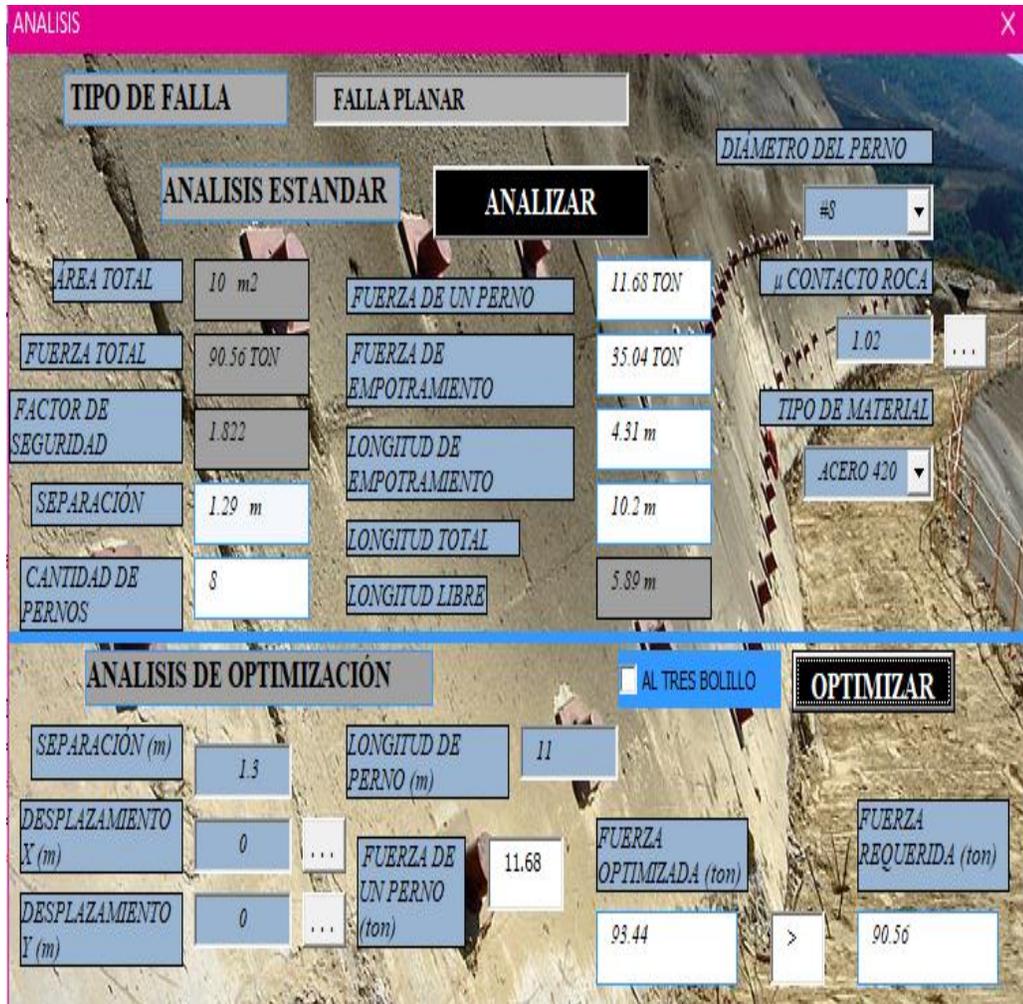
$$93.44 ton > 90.56 ton$$

➤ **Resultados utilizando el algoritmo:**

En la siguiente imagen se observa el análisis estándar y el análisis del sistema con patrón normal sin optimizar.

- Análisis estándar con patrón normal.

FIGURA 23 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón normal.

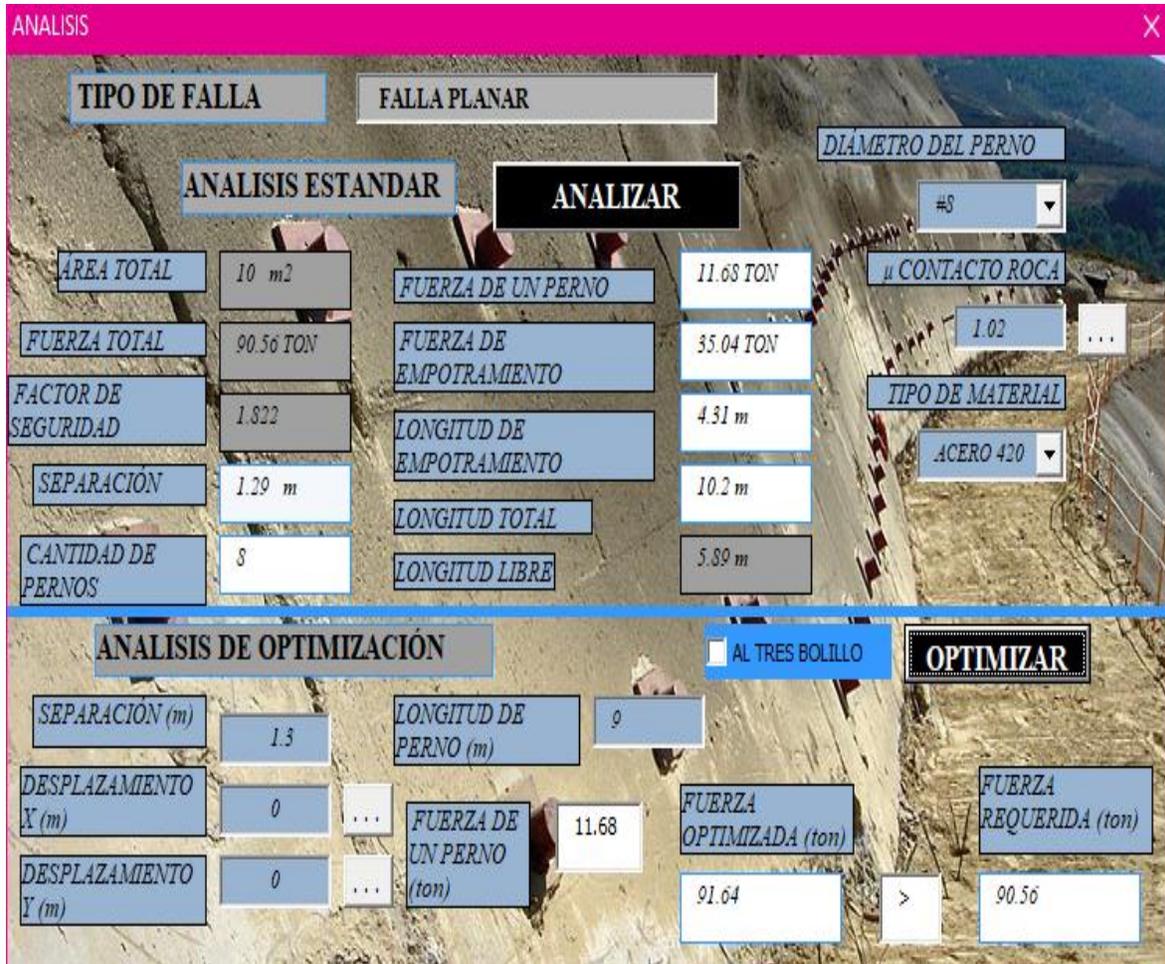


Fuente: Propia.

Para las condiciones establecidas en el ejercicio se obtuvo que es necesario utilizar 8 pernos de 10.2 m de longitud, separados 1.29 m, con una barra #8 en acero de 420 MPa cuya fuerza es de 11.68 toneladas.

- Análisis optimizado con patrón normal.

FIGURA 24 Resultados análisis optimizado del ejercicio por falla planar con patrón normal.



Fuente: Propia.

Al efectuar la optimización del sistema se obtuvo que para la misma fuerza requerida con una longitud total de 9 m cumple con la fuerza requerida teniendo en cuenta que se usó la misma fuerza del perno obtenida mediante el análisis estándar. Comparando los resultados del análisis de optimización con respecto al análisis estándar se obtuvo que:

- La longitud del perno disminuye en un 11.76%, si se adopta una longitud de perno de 9 metros.
- La fuerza optimizada se reduce en 1.92%.
- La separación no varía.

Por consiguiente se infiere que la optimización con respecto al análisis estándar es más eficiente en cuanto que la fuerza optimizada se reduce en un 1.92% y sigue cumpliendo con la fuerza requerida que exige el ejercicio planteado, lo más significativo de este ejercicio es la considerable reducción de la longitud del perno lo cual influye directamente en los costos y el diseño del anclaje.

- **Optimización con patrón al tres bolillo:**

$$LE_{x=0} = 11m - 0m = 11m$$

$$LE_{x=0} = 11m - \left[ \frac{2.6m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{2.6m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} \right] = 9.47m$$

$$LE_{x=0} = 11m - \left[ \frac{5.2m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{5.2m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} \right] = 7.9m$$

$$LE_{x=0} = 11m - \left[ \frac{7.8m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{7.8m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} \right] = 6.4m$$

$$LE_{x=0.65} = 11m - \left[ \frac{0.65m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{0.65m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} \right] = 10.61m$$

$$LE_{x=0.65} = 11m - \left[ \frac{3.25m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{3.25m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} \right] = 9.08m$$

$$LE_{x=0.65} = 11m - \left[ \frac{5.85m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{5.85m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} \right] = 7.55m$$

$$LE_{x=0.65} = 11m - \left[ \frac{8.45m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{8.45m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} \right] = 6.02m$$

$$FE = \pi * \Phi_{b*LE*\mu}$$

De acuerdo al análisis estándar la fuerza que soporta cada perno es de 11.68 ton para una longitud total de 11 m

$$FE_{x=0} = \pi * 0.0254 * 11 * 102 = 89.53ton$$

$$FE_{x=0} = \pi * 0.0254 * 9.47 * 102 = 77.07ton$$

$$FE_{x=0} = \pi * 0.0254 * 7.9 * 102 = 64.30ton$$

$$FE_{x=0} = \pi * 0.0254 * 6.4 * 102 = 52.09ton$$

$$FE_{x=0.65} = \pi * 0.0254 * 10.61 * 102 = 86.36ton$$

$$FE_{x=0.65} = \pi * 0.0254 * 9.08 * 102 = 73.9ton$$

$$FE_{x=0.65} = \pi * 0.0254 * 7.55 * 102 = 61.45ton$$

$$FE_{x=0.65} = \pi * 0.0254 * 6.02 * 102 = 49ton$$

Cálculo de la fuerza de un perno:

$$FI = \frac{FE}{3}$$

$$FI_{x=0} = \frac{89.53ton}{3} = 29.84ton$$

$$FI_{x=0} = \frac{77.07ton}{3} = 27.75ton$$

$$FI_{x=0} = \frac{64.30ton}{3} = 25.69ton$$

$$FI_{x=0} = \frac{52.09ton}{3} = 23.60ton$$

$$FI_{x=0.65} = \frac{86.36ton}{3} = 21.43ton$$

$$FI_{x=0.65} = \frac{73.9ton}{3} = 19.26ton$$

$$FI_{x=0.65} = \frac{61.45ton}{3} = 17.36ton$$

$$FI_{x=0.65} = \frac{49ton}{3} = 15.00ton$$

Como los pernos tienen un resistencia mayor de la que pueden soportar porque la resistencia se da a partir de la longitud de empotramiento y si se supera la resistencia del perno este fallará por tracción, por tal motivo se estima que la fuerza total de cada perno es 11.68 toneladas resultado obtenido del análisis estándar.

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + FI_4 + FI_5 + FI_6 + FI_7 + FI_8$$

$$\sum FI = 11.68 + 11.68 + 11.68 + 11.68 + 11.68 + 11.86 + 11.68 + 11.68 = 93.44ton$$

$$93.44 ton > 90.56 ton$$

➤ **Resultados utilizando el algoritmo:**

En la siguiente imagen se observa el análisis estándar y el análisis del sistema con patrón normal sin optimizar.

- Análisis estándar con patrón al tres bolillo.

FIGURA 25 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón al tres bolillo.



Fuente: Propia.

Para las condiciones establecidas en el ejercicio se obtuvieron las mismas características de diseño que el análisis estándar con patrón normal: 8 pernos de 10.2 m de longitud, separados 1.29 m, con una barra #8 en acero de 420 MPa cuya fuerza es de 11.68 toneladas.

- Análisis optimizado con patrón al tres bolillo

FIGURA 26 Resultados análisis optimizado del ejercicio por falla planar con patrón tres bolillo.



Fuente: Propia.

Al efectuar la optimización del sistema se obtuvo que con la misma cantidad de pernos (8) teniendo en cuenta que se usó la misma fuerza de perno (11.68 ton) cumple con la fuerza requerida, comparando los resultados del análisis de optimización con respecto al análisis estándar se obtuvo que:

- La longitud del perno disminuye en un 11.76%, si se adopta una longitud de perno de 9 metros.
- La fuerza optimizada se reduce en 0.82%.
- No varía la separación.

La fuerza requerida por el sistema es 90.56 toneladas y el análisis optimizado efectuado arroja una fuerza optimizada de 92.67 toneladas.

Por consiguiente se infiere que la optimización con respecto al análisis estándar es más eficiente en cuanto que la fuerza optimizada se reduce en un 0.83% y sigue cumpliendo con la fuerza requerida que exige el ejercicio planteado, lo más

significante de este ejercicio es la considerable reducción de la longitud del perno lo cual influye directamente en los costos y el diseño del anclaje.

El porcentaje de reducción de la fuerza optimizada es mas pequeño que en la modelación con patrón normal de anclaje, lo cual indica que la distribución patrón normal es mas eficiente en este caso.

- Con el fin de estimar la eficiencia de la longitud total de pernos en una falla planar se realiza el mismo ejercicio anterior con el mayoramiento del ancho de la banca a 5 metros.

✓ *Análisis con patrón normal sin optimizar.*

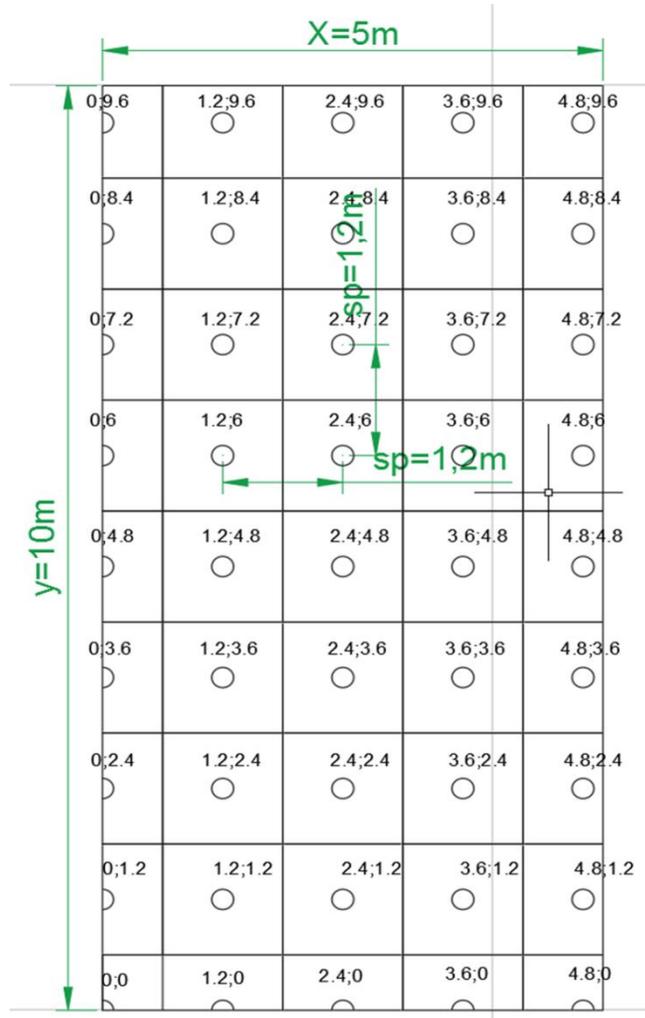
Tabla 6 Coordenadas con patrón normal con un ancho de banca de 5 metros.

#p	x	y									
1	0	0	13	1.2	3.6	25	2.4	7.2	37	4.8	0
2	0	1.2	14	1.2	4.8	26	2.4	8.4	38	4.8	1.2
3	0	2.4	15	1.2	6	27	2.4	9.6	39	4.8	2.4
4	0	3.6	16	1.2	7.2	28	3.6	0	40	4.8	3.6
5	0	4.8	17	1.2	8.4	29	3.6	1.2	41	4.8	4.8
6	0	6	18	1.2	9.6	30	3.6	2.4	42	4.8	6
7	0	7.2	19	2.4	0	31	3.6	3.6	43	4.8	7.2
8	0	8.4	20	2.4	1.2	32	3.6	4.8	44	4.8	8.4
9	0	9.6	21	2.4	2.4	33	3.6	6	45	4.8	9.6
10	1.2	0	22	2.4	3.6	34	3.6	7.2			
11	1.2	1.2	23	2.4	4.8	35	3.6	8.4			
12	1.2	2.4	24	2.4	6	36	3.6	9.6			

Fuente: Propia.

Nota: La tabla 6. Coordenadas con patrón normal con un ancho de banca de 5 metros , es estableció esa longitud para simplificar los cálculos.

FIGURA 27 Representación de patrón normal con una ancho de banca de 5 metros.



Fuente: Propia.

$$LE = LT - LL$$

Fuerza y ancho de banca mayorada 5 veces.

$Sp=1.2$  metros

$LT=11$  recomendada del análisis estándar

$$LE_1 = 11m - 0m = 11m$$

$$LE_2 = 11m - \left[ \frac{1.2m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{1.2m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 10.29m$$

Tabla 7 Cálculo de las longitudes de empotramiento y libre

#p	LL(m) Longitud libre $LL = \frac{y' * SEN(55)}{SEN(35)} - \frac{y' * SEN(40)}{SEN(50)}$	LT(m) Longitud total	LE(m) Longitud de empotramiento $LE = LT - LL$
1	0.00	11	11.00
2	0.71	11	10.29
3	1.41	11	9.59
4	2.12	11	8.88
5	2.83	11	8.17
6	3.53	11	7.47
7	4.24	11	6.76
8	4.95	11	6.05
9	5.65	11	5.35
10	0.00	11	11.00
11	0.71	11	10.29
12	1.41	11	9.59
13	2.12	11	8.88
14	2.83	11	8.17
15	3.53	11	7.47
16	4.24	11	6.76
17	4.95	11	6.05
18	5.65	11	5.35
19	0.00	11	11.00
20	0.71	11	10.29
21	1.41	11	9.59
22	2.12	11	8.88
23	2.83	11	8.17
24	3.53	11	7.47
25	4.24	11	6.76
26	4.95	11	6.05
27	5.65	11	5.35
28	0.00	11	11.00
29	0.71	11	10.29
30	1.41	11	9.59
31	2.12	11	8.88
32	2.83	11	8.17
33	3.53	11	7.47
34	4.24	11	6.76
35	4.95	11	6.05
36	5.65	11	5.35
37	0.00	11	11.00
38	0.71	11	10.29
39	1.41	11	9.59
40	2.12	11	8.88
41	2.83	11	8.17
42	3.53	11	7.47
43	4.24	11	6.76
44	4.95	11	6.05
45	5.65	11	5.35

Fuente: Propia.

$$FE = \pi * \phi_D * LE * \mu$$

De acuerdo al análisis estándar la fuerza que soporta cada perno es de 11.68 ton para una longitud total de 11 m.

$$FE_1 = \pi * 0.0254 * 11 * 102 = 89.53ton$$

$$FE_2 = \pi * 0.0254 * 10.29 * 102 = 83.78ton$$

Cálculo de la fuerza de un perno:

$$FI = \frac{FE}{3}$$

$$FI_1 = \frac{89.53ton}{3} = 29.84ton$$

$$FI_2 = \frac{83.78ton}{3} = 27.93ton$$

Como los pernos tienen un resistencia mayor de la que pueden soportar porque la resistencia se da a partir de la longitud de empotramiento y si se supera la resistencia del perno este fallará por tracción, por tal motivo se estima que la fuerza total de cada perno es 11.68 toneladas resultado obtenido del análisis estándar.

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + \dots$$

$$\sum FI = 11.68 + 11.68 + 11.68 + \dots = 525.6ton$$

$$525.6 ton > 452.8 ton$$

Tabla 8 Cálculo de las fuerzas.

#p	LE(m) Longitud de empotramiento $LE = LT - LL$	FE (ton) $FE = \pi * \phi b * \mu * LE$	Fi(ton) $Fi = LE / 3$	Fi(ton) Resistencia real sin optimizar
1	11.00	89.53	29.84	11.68
2	10.29	83.78	27.93	11.68
3	9.59	78.03	26.01	11.68
4	8.88	72.27	24.09	11.68
5	8.17	66.52	22.17	11.68
6	7.47	60.77	20.26	11.68
7	6.76	55.01	18.34	11.68
8	6.05	49.26	16.42	11.68
9	5.35	43.51	14.50	11.68
10	11.00	89.53	29.84	11.68
11	10.29	83.78	27.93	11.68
12	9.59	78.03	26.01	11.68
13	8.88	72.27	24.09	11.68
14	8.17	66.52	22.17	11.68
15	7.47	60.77	20.26	11.68
16	6.76	55.01	18.34	11.68
17	6.05	49.26	16.42	11.68
18	5.35	43.51	14.50	11.68
19	11.00	89.53	29.84	11.68
20	10.29	83.78	27.93	11.68
21	9.59	78.03	26.01	11.68
22	8.88	72.27	24.09	11.68
23	8.17	66.52	22.17	11.68
24	7.47	60.77	20.26	11.68
25	6.76	55.01	18.34	11.68
26	6.05	49.26	16.42	11.68
27	5.35	43.51	14.50	11.68
28	11.00	89.53	29.84	11.68
29	10.29	83.78	27.93	11.68
30	9.59	78.03	26.01	11.68
31	8.88	72.27	24.09	11.68
32	8.17	66.52	22.17	11.68
33	7.47	60.77	20.26	11.68
34	6.76	55.01	18.34	11.68
35	6.05	49.26	16.42	11.68
36	5.35	43.51	14.50	11.68
37	11.00	89.53	29.84	11.68
38	10.29	83.78	27.93	11.68
39	9.59	78.03	26.01	11.68
40	8.88	72.27	24.09	11.68
41	8.17	66.52	22.17	11.68
42	7.47	60.77	20.26	11.68
43	6.76	55.01	18.34	11.68
44	6.05	49.26	16.42	11.68
45	5.35	43.51	14.50	11.68
			$\Sigma Fi$	525.6

Fuente: Propia.

✓ *Análisis con patrón normal optimizado.*

Tabla 9. Cálculo de optimización con una longitud total de 8 m.

#p	LT(m) Longitud total optimizada	LE(m) Longitud de empotramiento optimizada (8m)	Fi(ton) optimizada a con 8m	Resistencia real optimizada
1	8	8.00	21.70	11.68
2	8	7.29	19.79	11.68
3	8	6.59	17.87	11.68
4	8	5.88	15.95	11.68
5	8	5.17	14.03	11.68
6	8	4.47	12.12	11.68
7	8	3.76	10.20	10.20
8	8	3.05	8.28	8.28
9	8	2.35	6.36	6.36
10	8	8.00	21.70	11.68
11	8	7.29	19.79	11.68
12	8	6.59	17.87	11.68
13	8	5.88	15.95	11.68
14	8	5.17	14.03	11.68
15	8	4.47	12.12	11.68
16	8	3.76	10.20	10.20
17	8	3.05	8.28	8.28
18	8	2.35	6.36	6.36
19	8	8.00	21.70	11.68
20	8	7.29	19.79	11.68
21	8	6.59	17.87	11.68
22	8	5.88	15.95	11.68
23	8	5.17	14.03	11.68
24	8	4.47	12.12	11.68
25	8	3.76	10.20	10.20
26	8	3.05	8.28	8.28
27	8	2.35	6.36	6.36
28	8	8.00	21.70	11.68
29	8	7.29	19.79	11.68
30	8	6.59	17.87	11.68
31	8	5.88	15.95	11.68
32	8	5.17	14.03	11.68
33	8	4.47	12.12	11.68
34	8	3.76	10.20	10.20
35	8	3.05	8.28	8.28
36	8	2.35	6.36	6.36
37	8	8.00	21.70	11.68
38	8	7.29	19.79	11.68
39	8	6.59	17.87	11.68
40	8	5.88	15.95	11.68
41	8	5.17	14.03	11.68
42	8	4.47	12.12	11.68
43	8	3.76	10.20	10.20
44	8	3.05	8.28	8.28
45	8	2.35	6.36	6.36
			ΣFi	474.6

Fuente: Propia.

➤ **Resultados utilizando el algoritmo:**

En la siguiente imagen se observa el análisis estándar y el análisis del sistema con patrón normal sin optimizar.

- Análisis estándar con patrón al tres bolillo.

FIGURA 28 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón normal con una separación de 1.3 metros.



Fuente: Propia.

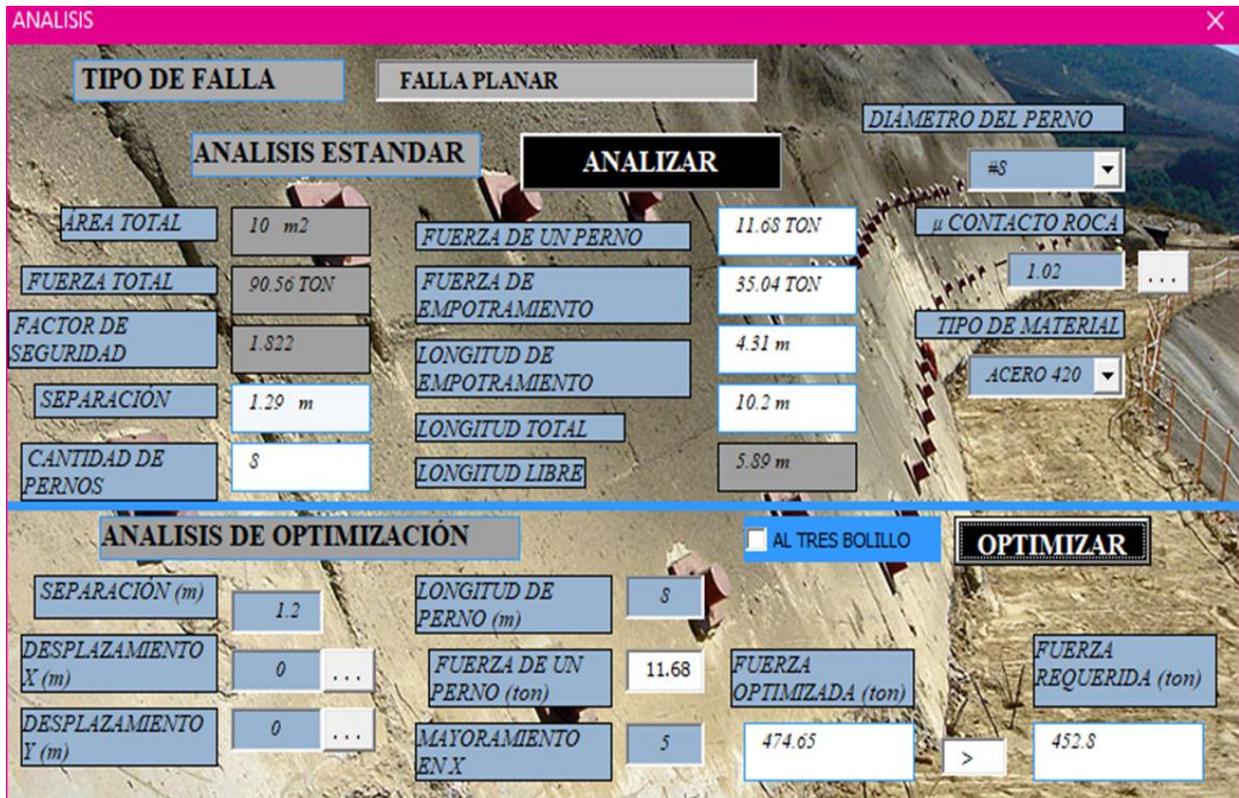
FIGURA 29 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón normal con una separación de 1.2 metros.



Fuente: Propia.

Al efectuar la optimización del sistema se obtuvo que con una separación de 1.2 y una longitud de 11 m cumple con la fuerza requerida de 452.8 toneladas mientras que el análisis estándar con una separación de 1.3 m tomada del análisis por metro y una longitud de perno de 11 m, se evidencia que no cumple con la fuerza requerida de 452.8 toneladas.

FIGURA 30 Resultado de análisis optimizando la longitud total a 8 metros.



Fuente: Propia.

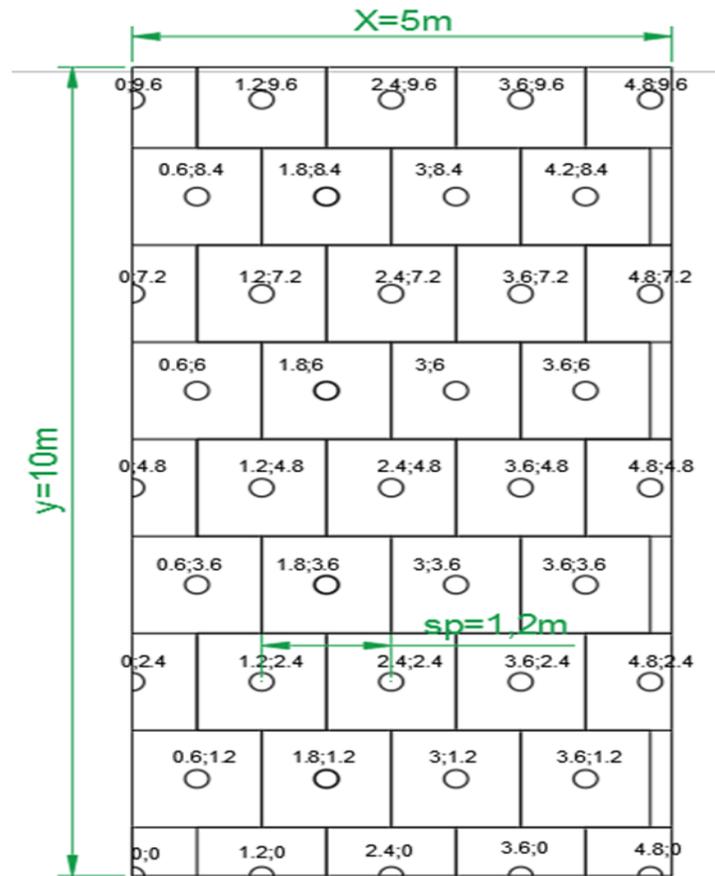
✓ *Análisis con patrón al tres bolillo sin optimizar.*

Tabla 10 Coordenadas a tres bolillo

#p	x	y									
1	0	0	13	2.4	4.8	25	4.8	9.6	37	3	8.4
2	0	2.4	14	2.4	7.2	26	0.6	1.2	38	4.2	1.2
3	0	4.8	15	2.4	9.6	27	0.6	3.6	39	4.2	3.6
4	0	7.2	16	3.6	0	28	0.6	6	40	4.2	6
5	0	9.6	17	3.6	2.4	29	0.6	8.4	41	4.2	8.4
6	1.2	0	18	3.6	4.8	30	1.8	1.2			
7	1.2	2.4	19	3.6	7.2	31	1.8	3.6			
8	1.2	4.8	20	3.6	9.6	32	1.8	6			
9	1.2	7.2	21	4.8	0	33	1.8	8.4			
10	1.2	9.6	22	4.8	2.4	34	3	1.2			
11	1.2	0	23	4.8	4.8	35	3	3.6			
12	2.4	2.4	24	4.8	7.2	36	3	6			

Fuente: Propia.

FIGURA 31 Distribución de pernos a tres bolillo en un ancho de banca de 5m.



Fuente: Propia.

$$LE = LT - LL$$

Fuerza y ancho de banca mayorada 5 veces.

$$Sp=1.2 \text{ metros}$$

$LT=11$  recomendada del análisis estándar

$$LE_1 = 11m - 0m = 11m$$

$$LE_2 = 11m - \left[ \frac{2.4 m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{2.4 m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 9.59m$$

Tabla 11 Cálculo de las longitudes de empotramiento y libre

#p	LL(m) Longitud libre $LL = \frac{y' * SEN(55)}{SEN(35)} - \frac{y' * SEN(40)}{SEN(50)}$	LT(m) Longitud total	LE(m) Longitud de empotramiento $LE = LT - LL$
1	0.00	11	11.00
2	1.41	11	9.59
3	2.83	11	8.17
4	4.24	11	6.76
5	5.65	11	5.35
6	0.00	11	11.00
7	1.41	11	9.59
8	2.83	11	8.17
9	4.24	11	6.76
10	5.65	11	5.35
11	0.00	11	11.00
12	1.41	11	9.59
13	2.83	11	8.17
14	4.24	11	6.76
15	5.65	11	5.35
16	0.00	11	11.00
17	1.41	11	9.59
18	2.83	11	8.17
19	4.24	11	6.76
20	5.65	11	5.35
21	0.00	11	11.00
22	1.41	11	9.59
23	2.83	11	8.17
24	4.24	11	6.76
25	5.65	11	5.35
26	0.71	11	10.29
27	2.12	11	8.88
28	3.53	11	7.47
29	4.95	11	6.05
30	0.71	11	10.29
31	2.12	11	8.88
32	3.53	11	7.47
33	4.95	11	6.05
34	0.71	11	10.29
35	2.12	11	8.88
36	3.53	11	7.47
37	4.95	11	6.05
38	0.71	11	10.29
39	2.12	11	8.88
40	3.53	11	7.47
41	4.95	11	6.05

Fuente: Propia.

$$FE = \pi * \phi * LE * \mu$$

De acuerdo al análisis estándar la fuerza que soporta cada perno es de 11.68 ton para una longitud total de 11 m.

$$FE_1 = \pi * 0.0254 * 11 * 102 = 89.53ton$$

$$FE_2 = \pi * 0.0254 * 9.59 * 102 = 78.03 ton$$

Cálculo de la fuerza de un perno:

$$FI = \frac{FE}{3}$$

$$FI_1 = \frac{89.53ton}{3} = 29.84ton$$

$$FI_2 = \frac{78.03 ton}{3} = 26.01 ton$$

Como los pernos tienen un resistencia mayor de la que pueden soportar porque la resistencia se da a partir de la longitud de empotramiento y si se supera la resistencia del perno este fallará por tracción, por tal motivo se estima que la fuerza total de cada perno es 11.68 toneladas resultado obtenido del análisis estándar.

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + \dots$$

$$\sum FI = 11.68 + 11.68 + 11.68 + \dots = 478.88ton$$

$$478.88ton > 452.8 ton$$

Tabla 12 Cálculo de las fuerzas.

#p	LE(m) Longitud de empotramiento <small><math>LE = L - L</math></small>	FE (ton) <small><math>FE = \pi * \phi b * \mu * LE</math></small>	Fi(ton) <small><math>Fi = LE / 3</math></small>	Fi(ton) Resistencia real sin optimizar
1	11.00	89.53	29.84	11.68
2	9.59	78.03	26.01	11.68
3	8.17	66.52	22.17	11.68
4	6.76	55.01	18.34	11.68
5	5.35	43.51	14.50	11.68
6	11.00	89.53	29.84	11.68
7	9.59	78.03	26.01	11.68
8	8.17	66.52	22.17	11.68
9	6.76	55.01	18.34	11.68
10	5.35	43.51	14.50	11.68
11	11.00	89.53	29.84	11.68
12	9.59	78.03	26.01	11.68
13	8.17	66.52	22.17	11.68
14	6.76	55.01	18.34	11.68
15	5.35	43.51	14.50	11.68
16	11.00	89.53	29.84	11.68
17	9.59	78.03	26.01	11.68
18	8.17	66.52	22.17	11.68
19	6.76	55.01	18.34	11.68
20	5.35	43.51	14.50	11.68
21	11.00	89.53	29.84	11.68
22	9.59	78.03	26.01	11.68
23	8.17	66.52	22.17	11.68
24	6.76	55.01	18.34	11.68
25	5.35	43.51	14.50	11.68
26	10.29	83.78	27.93	11.68
27	8.88	72.27	24.09	11.68
28	7.47	60.77	20.26	11.68
29	6.05	49.26	16.42	11.68
30	10.29	83.78	27.93	11.68
31	8.88	72.27	24.09	11.68
32	7.47	60.77	20.26	11.68
33	6.05	49.26	16.42	11.68
34	10.29	83.78	27.93	11.68
35	8.88	72.27	24.09	11.68
36	7.47	60.77	20.26	11.68
37	6.05	49.26	16.42	11.68
38	10.29	83.78	27.93	11.68
39	8.88	72.27	24.09	11.68
40	7.47	60.77	20.26	11.68
41	6.05	49.26	16.42	11.68
			$\Sigma Fi$	478.88

Fuente: Propia.

- *Análisis con patrón al tres bolillo optimizado.*

Tabla 13 Cálculo de optimización con una longitud total de 8 m.

#p	LT(m) Longitud total optimizada	LE(m) Longitud de empotramiento optimizada (9m)	Fi(ton) optimizada con 9m	Resistencia real optimizada
1	9	9.00	24.42	11.68
2	9	7.59	20.58	11.68
3	9	6.17	16.75	11.68
4	9	4.76	12.91	11.68
5	9	3.35	9.08	9.08
6	9	9.00	24.42	11.68
7	9	7.59	20.58	11.68
8	9	6.17	16.75	11.68
9	9	4.76	12.91	11.68
10	9	3.35	9.08	9.08
11	9	9.00	24.42	11.68
12	9	7.59	20.58	11.68
13	9	6.17	16.75	11.68
14	9	4.76	12.91	11.68
15	9	3.35	9.08	9.08
16	9	9.00	24.42	11.68
17	9	7.59	20.58	11.68
18	9	6.17	16.75	11.68
19	9	4.76	12.91	11.68
20	9	3.35	9.08	9.08
21	9	9.00	24.42	11.68
22	9	7.59	20.58	11.68
23	9	6.17	16.75	11.68
24	9	4.76	12.91	11.68
25	9	3.35	9.08	9.08
26	9	8.29	22.50	11.68
27	9	6.88	18.66	11.68
28	9	5.47	14.83	11.68
29	9	4.05	10.99	10.99
30	9	8.29	22.50	11.68
31	9	6.88	18.66	11.68
32	9	5.47	14.83	11.68
33	9	4.05	10.99	10.99
34	9	8.29	22.50	11.68
35	9	6.88	18.66	11.68
36	9	5.47	14.83	11.68
37	9	4.05	10.99	10.99
38	9	8.29	22.50	11.68
39	9	6.88	18.66	11.68
40	9	5.47	14.83	11.68
41	9	4.05	10.99	10.99
			ΣFi	463.1

Fuente: Propia.

➤ **Resultados utilizando el algoritmo:**

En la siguiente imagen se observa el análisis estándar y el análisis del sistema con patrón al tres bolillo sin optimizar.

- Análisis estándar con patrón al tres bolillo.

FIGURA 32 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón al tres bolillo.



Fuente: Propia.

FIGURA 33 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón al tres bolillo.



Fuente: Propia.

Al efectuar la optimización del sistema se obtuvo que con una separación de 1.2 y una longitud de 11 m cumple con la fuerza requerida de 452.8 toneladas mientras que el análisis estándar con una separación de 1.3 m tomada del análisis por metro y una longitud de perno de 11 m, se evidencia que no cumple con la fuerza requerida de 452.8 ton

FIGURA 34 Longitud optimizada a 9 metros con una separación de 1.2m.

**ANÁLISIS**

**TIPO DE FALLA** FALLA PLANAR

**ANÁLISIS ESTÁNDAR** **ANALIZAR**

ÁREA TOTAL	10 m <sup>2</sup>	FUERZA DE UN PERNO	11.68 TON	DIÁMETRO DEL PERNO	#8
FUERZA TOTAL	90.56 TON	FUERZA DE EMPOTRAMIENTO	35.04 TON	μ CONTACTO ROCA	1.02
FACTOR DE SEGURIDAD	1.822	LONGITUD DE EMPOTRAMIENTO	4.31 m	TIPO DE MATERIAL	ACERO 420
SEPARACION	1.29 m	LONGITUD TOTAL	10.2 m		
CANTIDAD DE PERNOS	8	LONGITUD LIBRE	5.89 m		

**ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN**  AL TRES BOLILLO **OPTIMIZAR**

SEPARACIÓN (m)	1.2	LONGITUD DE PERNO (m)	9	FUERZA DE UN PERNO (ton)	11.68	FUERZA OPTIMIZADA (ton)	463.17	FUERZA REQUERIDA (ton)	452.8
DESPLAZAMIENTO X (m)	0								
DESPLAZAMIENTO Y (m)	0	MAYORAMIENTO EN X	5						

Fuente: Propia.

- Evaluando otras opciones del algoritmo, al ejercicio resuelto anteriormente se adicionan un  $dx$  y  $dy$  al origen de la distribución de pernos.

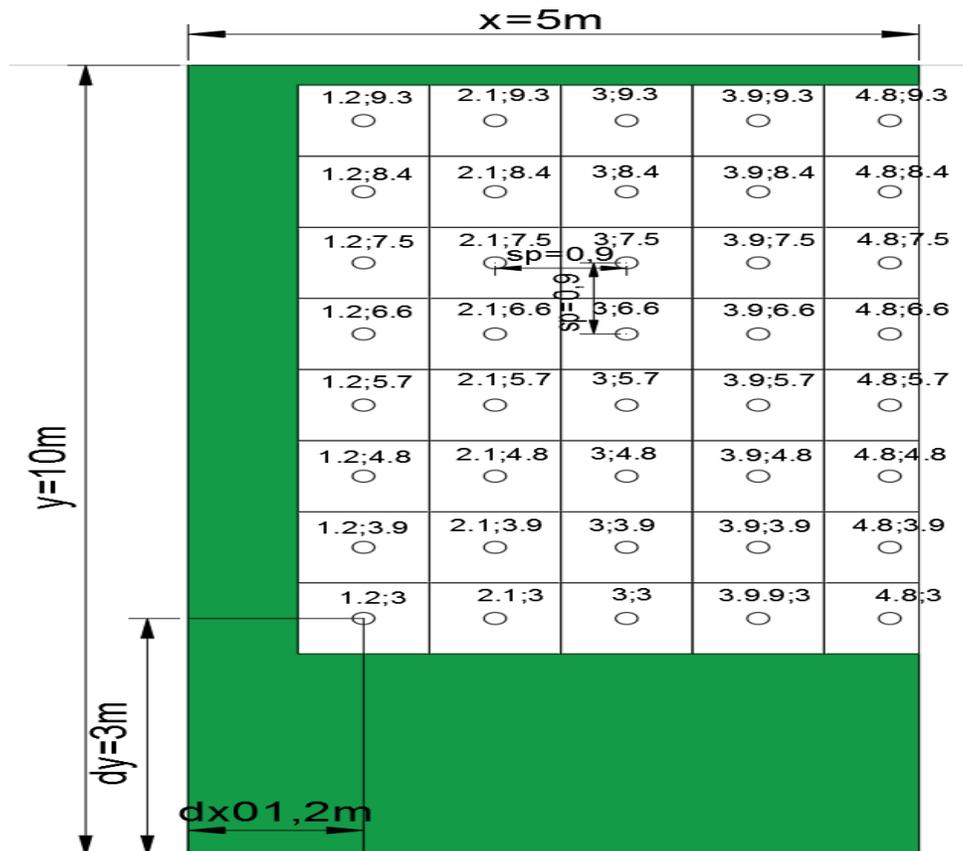
✓ *Analisis con patron normal sin optimizar*

Tabla 14 Cuadro con las cordenadas de los pernos desplazados  $dx=1.8m$  y  $dy=1.5m$ .

#p	x	y									
1	1.2	3	11	2.1	4.8	21	3	6.6	31	3.9	8.4
2	1.2	3.9	12	2.1	5.7	22	3	7.5	32	3.9	9.3
3	1.2	4.8	13	2.1	6.6	23	3	8.4	33	4.8	3
4	1.2	5.7	14	2.1	7.5	24	3	9.3	34	4.8	3.9
5	1.2	6.6	15	2.1	8.4	25	3.9	3	35	4.8	4.8
6	1.2	7.5	16	2.1	9.3	26	3.9	3.9	36	4.8	5.7
7	1.2	8.4	17	3	3	27	3.9	4.8	37	4.8	6.6
8	1.2	9.3	18	3	3.9	28	3.9	5.7	38	4.8	7.5
9	2.1	3	19	3	4.8	29	3.9	6.6	39	4.8	8.4
10	2.1	3.9	20	3	5.7	30	3.9	7.5	40	4.8	9.3

Fuente: Propia.

FIGURA 35 Distribución de pernos con patrón normal y  $dx=1.2m$   $dy=3m$ .



Fuente: Propia.

$$LE = LT - LL$$

$$Sp=0.9m$$

*LT=11 recomendada del análisis estándar*

$$LE_1 = 11m - \left[ \frac{3.5m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{3.5m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 9.23m$$

$$LE_2 = 11m - \left[ \frac{4.4m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{4.4m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 8.70m$$

Tabla 15 Longitudes calculadas LL y LE

#p	LL(m) Longitud libre $LL = \frac{y' * SEN(55)}{SEN(35)} - \frac{y' * SEN(40)}{SEN(50)}$	LT(m) Longitud total	LE(m) Longitud de empotramiento $LE = LT - LL$
1	1.77	11	9.23
2	2.30	11	8.70
3	2.83	11	8.17
4	3.36	11	7.64
5	3.89	11	7.11
6	4.42	11	6.58
7	4.95	11	6.05
8	5.48	11	5.52
9	1.77	11	9.23
10	2.30	11	8.70
11	2.83	11	8.17
12	3.36	11	7.64
13	3.89	11	7.11
14	4.42	11	6.58
15	4.95	11	6.05
16	5.48	11	5.52
17	1.77	11	9.23
18	2.30	11	8.70
19	2.83	11	8.17
20	3.36	11	7.64
21	3.89	11	7.11
22	4.42	11	6.58
23	4.95	11	6.05
24	5.48	11	5.52
25	1.77	11	9.23
26	2.30	11	8.70
27	2.83	11	8.17
28	3.36	11	7.64
29	3.89	11	7.11
30	4.42	11	6.58
31	4.95	11	6.05
32	5.48	11	5.52
33	1.77	11	9.23
34	2.30	11	8.70
35	2.83	11	8.17
36	3.36	11	7.64
37	3.89	11	7.11
38	4.42	11	6.58
39	4.95	11	6.05
40	5.48	11	5.52

Fuente: Propia.

$$FE = \pi * \phi_{D*LE*\mu}$$

De acuerdo al análisis estándar la fuerza que soporta cada perno es de 11.68 ton para una longitud total de 11 m.

$$FE_1 = \pi * 0.0254 * 9.23 * 102 = 75.15ton$$

$$FE_2 = \pi * 0.0254 * 8.70 * 102 = 70.83ton$$

Cálculo de la resistencia de cada perno:

$$FI_1 = \frac{75.15ton}{3} = 25.05ton$$

$$FI_2 = \frac{70.83ton}{3} = 23.61ton$$

De acuerdo a los cálculos los pernos tienen una resistencia mayor a la que puede soportar el perno que es de 11.68 toneladas se calculará la resistencia con las 11.68 toneladas.

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + \dots$$

$$\sum FI = 11.68 + 11.68 + 11.68 + \dots = 467.20ton$$

$$467.20 ton > 452.8ton ton$$

Tabla 16 Cálculo de fuerzas Fi y FE

#p	LE(m) Longitud de empotramiento <i>LE =LT-LL</i>	FE (ton) <i>FE = π * Øb * μ * LE</i>	Fi(ton) <i>Fi = LE/3</i>	Fi(ton) Resistencia real sin optimizar
1	9.23	75.15	25.05	11.68
2	8.70	70.83	23.61	11.68
3	8.17	66.52	22.17	11.68
4	7.64	62.20	20.73	11.68
5	7.11	57.89	19.30	11.68
6	6.58	53.57	17.86	11.68
7	6.05	49.26	16.42	11.68
8	5.52	44.94	14.98	11.68
9	9.23	75.15	25.05	11.68
10	8.70	70.83	23.61	11.68
11	8.17	66.52	22.17	11.68
12	7.64	62.20	20.73	11.68
13	7.11	57.89	19.30	11.68
14	6.58	53.57	17.86	11.68
15	6.05	49.26	16.42	11.68
16	5.52	44.94	14.98	11.68
17	9.23	75.15	25.05	11.68
18	8.70	70.83	23.61	11.68
19	8.17	66.52	22.17	11.68
20	7.64	62.20	20.73	11.68
21	7.11	57.89	19.30	11.68
22	6.58	53.57	17.86	11.68
23	6.05	49.26	16.42	11.68
24	5.52	44.94	14.98	11.68
25	9.23	75.15	25.05	11.68
26	8.70	70.83	23.61	11.68
27	8.17	66.52	22.17	11.68
28	7.64	62.20	20.73	11.68
29	7.11	57.89	19.30	11.68
30	6.58	53.57	17.86	11.68
31	6.05	49.26	16.42	11.68
32	5.52	44.94	14.98	11.68
33	9.23	75.15	25.05	11.68
34	8.70	70.83	23.61	11.68
35	8.17	66.52	22.17	11.68
36	7.64	62.20	20.73	11.68
37	7.11	57.89	19.30	11.68
38	6.58	53.57	17.86	11.68
39	6.05	49.26	16.42	11.68
40	5.52	44.94	14.98	11.68
			ΣFi	467.2

Fuente: Propia.

- Analisis a tres bolillo optimizado.

Tabla 17 Cálculo de optimización con una longitud total de 10 m

#p	LT(m) Longitud total optimizada	LE(m) Longitud de empotramiento optimizada (8m)	Fi(ton) optimizada a con 8m	Resistencia real optimizada
1	9	7.23	19.62	11.68
2	9	6.70	18.18	11.68
3	9	6.17	16.75	11.68
4	9	5.64	15.31	11.68
5	9	5.11	13.87	11.68
6	9	4.58	12.43	11.68
7	9	4.05	10.99	10.99
8	9	3.52	9.56	9.56
9	9	7.23	19.62	11.68
10	9	6.70	18.18	11.68
11	9	6.17	16.75	11.68
12	9	5.64	15.31	11.68
13	9	5.11	13.87	11.68
14	9	4.58	12.43	11.68
15	9	4.05	10.99	10.99
16	9	3.52	9.56	9.56
17	9	7.23	19.62	11.68
18	9	6.70	18.18	11.68
19	9	6.17	16.75	11.68
20	9	5.64	15.31	11.68
21	9	5.11	13.87	11.68
22	9	4.58	12.43	11.68
23	9	4.05	10.99	10.99
24	9	3.52	9.56	9.56
25	9	7.23	19.62	11.68
26	9	6.70	18.18	11.68
27	9	6.17	16.75	11.68
28	9	5.64	15.31	11.68
29	9	5.11	13.87	11.68
30	9	4.58	12.43	11.68
31	9	4.05	10.99	10.99
32	9	3.52	9.56	9.56
33	9	7.23	19.62	11.68
34	9	6.70	18.18	11.68
35	9	6.17	16.75	11.68
36	9	5.64	15.31	11.68
37	9	5.11	13.87	11.68
38	9	4.58	12.43	11.68
39	9	4.05	10.99	10.99
40	9	3.52	9.56	9.56
			$\Sigma F_i$	453.1

Fuente: Propia.

➤ **Resultados utilizando el algoritmo:**

En la siguiente imagen se observa el análisis estándar y el análisis del sistema con patrón normal sin optimizar.

- Análisis estándar con patrón normal..

FIGURA 36 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón normal.



Fuente: Propia.

- Análisis con patrón normal optimizado.

FIGURA 37 Longitud optimizada a 9m con separación de 0.9m.



Fuente: Propia.

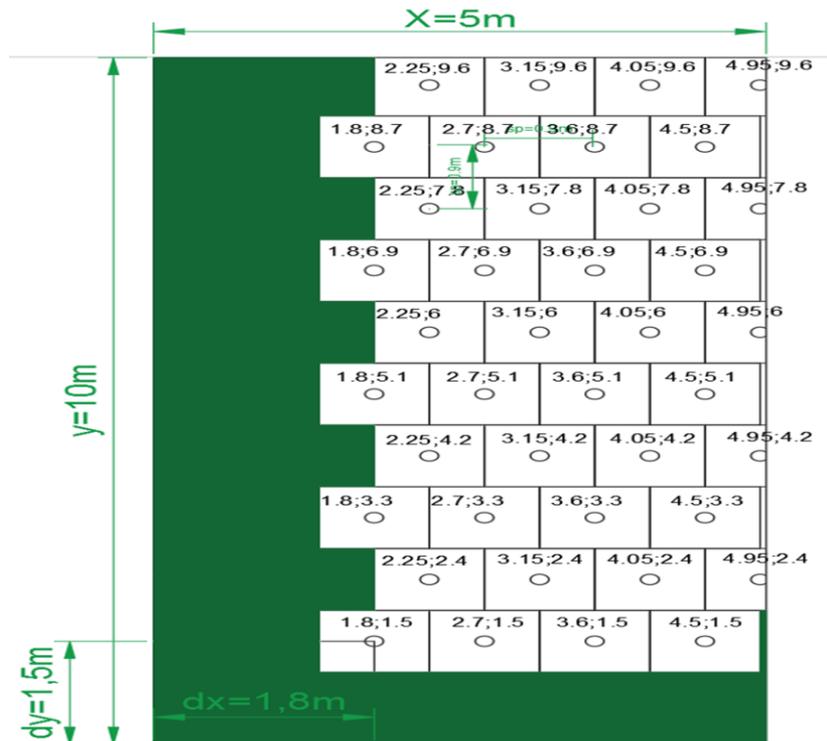
- Analisis con patrón a tres bolillo sin optimizar

Tabla 18 Cuadro con las cordenasadas de los pernos desplazados  $dx=1.8m$  y  $dy=1.5m$ .

#p	x	y	#p	x	y	#p	x	y
1	1.8	1.5	15	3.6	8.7	29	3.15	7.8
2	1.8	3.3	16	4.5	1.5	30	3.15	9.6
3	1.8	5.1	17	4.5	3.3	31	4.05	2.4
4	1.8	6.9	18	4.5	5.1	32	4.05	4.2
5	1.8	8.7	19	4.5	6.9	33	4.05	6
6	2.7	1.5	20	4.5	8.7	34	4.05	7.8
7	2.7	3.3	21	2.25	2.4	35	4.05	9.6
8	2.7	5.1	22	2.25	4.2	36	4.95	2.4
9	2.7	6.9	23	2.25	6	37	4.95	4.2
10	2.7	8.7	24	2.25	7.8	38	4.95	6
11	3.6	1.5	25	2.25	9.6	39	4.95	7.8
12	3.6	3.3	26	3.15	2.4	40	4.95	9.6
13	3.6	5.1	27	3.15	4.2			
14	3.6	6.9	28	3.15	6			

Fuente: Propia.

FIGURA 38 Distribución de pernos con un ancho de banca de 5m un  $dx$  de 1.8m y  $dy$  de 1.5 m



Fuente: Propia.

$$LE = LT - LL$$

$$Sp=1.9$$

LT=11 recomendada del análisis estándar

$$LE_1 = 11m - \left[ \frac{1.5m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{1.5m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 10.12m$$

$$LE_2 = 11m - \left[ \frac{3.3m * \text{sen } 55}{\text{sen } 35} - \frac{3.3m * \text{sen } 40}{\text{sen } 50} \right] = 9.06m$$

Tabla 19 Longitudes calculadas LL y LE

#p	LL(m) Longitud libre $LL = \frac{y' * SEN(55)}{SEN(35)} - \frac{y' * SEN(40)}{SEN(50)}$	LT(m) Longitud total	LE(m) Longitud de empotramiento $LE = LT - LL$
1	0.88	11	10.12
2	1.94	11	9.06
3	3.00	11	8.00
4	4.06	11	6.94
5	5.12	11	5.88
6	0.88	11	10.12
7	1.94	11	9.06
8	3.00	11	8.00
9	4.06	11	6.94
10	5.12	11	5.88
11	0.88	11	10.12
12	1.94	11	9.06
13	3.00	11	8.00
14	4.06	11	6.94
15	5.12	11	5.88
16	0.88	11	10.12
17	1.94	11	9.06
18	3.00	11	8.00
19	4.06	11	6.94
20	5.12	11	5.88
21	1.41	11	9.59
22	2.47	11	8.53
23	3.53	11	7.47
24	4.59	11	6.41
25	5.65	11	5.35
26	1.41	11	9.59
27	2.47	11	8.53
28	3.53	11	7.47
29	4.59	11	6.41
30	5.65	11	5.35
31	1.41	11	9.59
32	2.47	11	8.53
33	3.53	11	7.47
34	4.59	11	6.41
35	5.65	11	5.35
36	1.41	11	9.59
37	2.47	11	8.53
38	3.53	11	7.47
39	4.59	11	6.41
40	5.65	11	5.35

Fuente: Propia.

$$FE = \pi * \phi * LE * \mu$$

De acuerdo al análisis estándar la fuerza que soporta cada perno es de 11.68 ton para una longitud total de 11 m.

$$FE_1 = \pi * 0.0254 * 10.12 * 102 = 82.34ton$$

$$FE_2 = \pi * 0.0254 * 9.06 * 102 = 73.71ton$$

Calculo de la resistencia de cada perno:

$$FI_1 = \frac{82.34ton}{3} = 27.45ton$$

$$FI_2 = \frac{73.71ton}{3} = 24.57ton$$

De acuerdo a los cálculos los pernos tienen una resistencia mayor a la que puede soportar el perno que es de 11.68 toneladas se calculará la resistencia con las 11.68 ton

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + \dots$$

$$\sum FI = 11.68 + 11.68 + 11.68 + \dots = 467.20ton$$

$$467.20 ton > 452.8ton$$

Tabla 20 Cálculo de fuerzas Fi y FE

#p	LE(m) Longitud de empotramiento <small><math>LE = L - L</math></small>	FE (ton) <small><math>FE = \pi * \phi b * \mu * LE</math></small>	Fi(ton) <small><math>Fi = LE / 3</math></small>	Fi(ton) Resistencia real sin optimizar
1	10.12	82.34	27.45	11.68
2	9.06	73.71	24.57	11.68
3	8.00	65.08	21.69	11.68
4	6.94	56.45	18.82	11.68
5	5.88	47.82	15.94	11.68
6	10.12	82.34	27.45	11.68
7	9.06	73.71	24.57	11.68
8	8.00	65.08	21.69	11.68
9	6.94	56.45	18.82	11.68
10	5.88	47.82	15.94	11.68
11	10.12	82.34	27.45	11.68
12	9.06	73.71	24.57	11.68
13	8.00	65.08	21.69	11.68
14	6.94	56.45	18.82	11.68
15	5.88	47.82	15.94	11.68
16	10.12	82.34	27.45	11.68
17	9.06	73.71	24.57	11.68
18	8.00	65.08	21.69	11.68
19	6.94	56.45	18.82	11.68
20	5.88	47.82	15.94	11.68
21	9.59	78.03	26.01	11.68
22	8.53	69.40	23.13	11.68
23	7.47	60.77	20.26	11.68
24	6.41	52.14	17.38	11.68
25	5.35	43.51	14.50	11.68
26	9.59	78.03	26.01	11.68
27	8.53	69.40	23.13	11.68
28	7.47	60.77	20.26	11.68
29	6.41	52.14	17.38	11.68
30	5.35	43.51	14.50	11.68
31	9.59	78.03	26.01	11.68
32	8.53	69.40	23.13	11.68
33	7.47	60.77	20.26	11.68
34	6.41	52.14	17.38	11.68
35	5.35	43.51	14.50	11.68
36	9.59	78.03	26.01	11.68
37	8.53	69.40	23.13	11.68
38	7.47	60.77	20.26	11.68
39	6.41	52.14	17.38	11.68
40	5.35	43.51	14.50	11.68
			$\Sigma Fi$	467.20

Fuente: Propia.

- **Análisis a tres bolillo optimizado.**

Tabla 21 Cálculo de optimización con una longitud total de 10 m.

#p	LT(m) Longitud total optimizada	LE(m) Longitud de empotramiento optimizada (9m)	Fi(ton) optimizada a con 9m	Resistencia real optimizada
1	10	9.12	24.73	11.68
2	10	8.06	21.86	11.68
3	10	7.00	18.98	11.68
4	10	5.94	16.10	11.68
5	10	4.88	13.23	11.68
6	10	9.12	24.73	11.68
7	10	8.06	21.86	11.68
8	10	7.00	18.98	11.68
9	10	5.94	16.10	11.68
10	10	4.88	13.23	11.68
11	10	9.12	24.73	11.68
12	10	8.06	21.86	11.68
13	10	7.00	18.98	11.68
14	10	5.94	16.10	11.68
15	10	4.88	13.23	11.68
16	10	9.12	24.73	11.68
17	10	8.06	21.86	11.68
18	10	7.00	18.98	11.68
19	10	5.94	16.10	11.68
20	10	4.88	13.23	11.68
21	10	8.59	23.30	11.68
22	10	7.53	20.42	11.68
23	10	6.47	17.54	11.68
24	10	5.41	14.67	11.68
25	10	4.35	11.79	11.68
26	10	8.59	23.30	11.68
27	10	7.53	20.42	11.68
28	10	6.47	17.54	11.68
29	10	5.41	14.67	11.68
30	10	4.35	11.79	11.68
31	10	8.59	23.30	11.68
32	10	7.53	20.42	11.68
33	10	6.47	17.54	11.68
34	10	5.41	14.67	11.68
35	10	4.35	11.79	11.68
36	10	8.59	23.30	11.68
37	10	7.53	20.42	11.68
38	10	6.47	17.54	11.68
39	10	5.41	14.67	11.68
40	10	4.35	11.79	11.68
			ΣFi	467.2

Fuente: Propia.

➤ **Resultados utilizando el algoritmo:**

En la siguiente imagen se observa el análisis estándar y el análisis del sistema con patrón normal sin optimizar.

- Análisis estándar con patrón al tres bolillo.

FIGURA 39 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón al tres bolillo con separación 1.3 metros.



Fuente: Propia.

FIGURA 40 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla planar con patrón al tres bolillo con separación de 0.9 metros



Fuente: Propia.

- Análisis con patrón al tres bolillo optimizado.

FIGURA 41 Longitud optimizada a 10m con separación de 0.9m.

ANALISIS

**TIPO DE FALLA** FALLA PLANAR

**ANÁLISIS ESTÁNDAR** **ANALIZAR**

DIÁMETRO DEL PERNO #8

μ CONTACTO ROCA 1.02

TIPO DE MATERIAL ACERO 420

ÁREA TOTAL	10 m <sup>2</sup>	FUERZA DE UN PERNO	11.68 TON
FUERZA TOTAL	90.56 TON	FUERZA DE EMPOTRAMIENTO	35.04 TON
FACTOR DE SEGURIDAD	1.822	LONGITUD DE EMPOTRAMIENTO	4.51 m
SEPARACIÓN	1.29 m	LONGITUD TOTAL	10.2 m
CANTIDAD DE PERNOS	8	LONGITUD LIBRE	5.89 m

**ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN**  AL TRES BOLILLO **OPTIMIZAR**

SEPARACIÓN (m)	0.9	LONGITUD DE PERNO (m)	10	FUERZA DE UN PERNO (ton)	11.68	FUERZA OPTIMIZADA (ton)	467.2	FUERZA REQUERIDA (ton)	452.8
DESPLAZAMIENTO Dx (m)	1.8	MAYORAMIENTO EN X	5						
DESPLAZAMIENTO Dy (m)	1.5								

Fuente: Propia.

## ➤ EJERCICIO 2 (FALLA POR CUÑA).

Para estimar la eficiencia de la longitud total de pernos en una falla por cuña se realiza la modelación a un talud de 10 metros ®. Por criterio se dejó de forma predeterminada el peso específico, el ángulo de fricción y la cohesión ; donde se obtuvieron los siguientes resultados que sirven como datos de entrada para el cálculo estándar del ejercicio.

### *Swedge Analysis Information*

Document Name:

Swedge1

Job Title:

SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis

Analysis Results:

Analysis type=Deterministic  
Safety Factor=**1.69427**  
Wedge height(on slope)=**10 m**  
Wedge width(on upper face)=**8.64294 m**  
Wedge volume=126.421 m<sup>3</sup>  
Wedge weight=**328.695 tonnes**  
Wedge area (joint1)=68.2673 m<sup>2</sup>  
Wedge area (joint2)=57.4686 m<sup>2</sup>  
Wedge area (slope)=**50.6698 m<sup>2</sup>**  
Wedge area (upper face)=37.9264 m<sup>2</sup>  
Normal force (joint1)=287.407 tonnes  
Normal force (joint2)=137.276 tonnes  
Driving force=164.509 tonnes  
Resisting force=607.742 tonnes

*Failure Mode:*

Sliding on intersection line (joints 1&2)

*Joint Sets 1&2 line of Intersection:*

plunge=30.0325 deg, trend=151.452 deg  
length=19.9804 m

*Trace Lengths:*

Joint1 on slope face=16.0054 m  
Joint2 on slope face=11.7752 m  
Joint1 on upper face=8.77627 m  
Joint2 on upper face=11.2826 m

*Maximum Persistence:*

Joint1=19.9804 m

Joint2=19.9804 m

*Intersection Angles:*

J1&J2 on slope face = 32.5274 deg

J1&Crest on slope face = 46.1737 deg

J1&Crest on upper face = 80 deg

J2&Crest on slope face = 101.299 deg

J2&Crest on upper face = 50 deg

J1&2 on upper face = 50 deg

Joint Set 1 Data:

dip=40 deg, dip direction=105 deg

cohesion=2 tonnes/m<sup>2</sup>, friction angle=20 deg

Joint Set 2 Data:

dip=79 deg, dip direction=235 deg

cohesion=5 tonnes/m<sup>2</sup>, friction angle=30 deg

Slope Data:

dip=60 deg, dip direction=185 deg

slope height=10 meters

rock unit weight=2.6 tonnes/m<sup>3</sup>

Water pressures in the slope=NO

Overhanging slope face=NO

Externally applied force=NO

Tension crack=NO

Upper Face Data:

dip=0 deg, dip direction=195 deg

Wedge Vertices:

*Coordinates in Easting,Northing,Up Format*

*1=Joint1, 2=Joint2, 3=Upper Face, 4=Slope*

Point 124: 0, 0, 0

Point 134: -10.5, 6.72, 10

Point 234: -1.8, 5.95, 10

Point 123: -8.27, 15.2, 10

➤ **Solución estándar:**

Área total: 50.67 m<sup>2</sup>

Diámetro del perno = #8

Fuerza total = 328.65 Ton

$$\text{Fuerza de un perno (F}_i\text{)} = \frac{F_y * A_b}{F_s} * 100$$

en donde:

$F_y$  = Resistencia del acero.

$A_b$  = Área del perno.

$F_s$  = Factor de seguridad.

$$\text{Entonces (F}_i\text{)} = \frac{420 * 0.000506}{1.69} * 100 = 12.57 \text{ Ton}$$

$$\text{Fuerza de empotramiento (F}_E\text{)} = F_i * 3$$

En donde:

$F_i$  = Fuerza del perno.

$$\text{Entonces (F}_E\text{)} = 12.57 * 3 = 37.71 \text{ Ton}$$

$$\text{Separación (S}_p\text{)} = \frac{F_i * A_t}{F_t}$$

En donde:

$F_i$  = Fuerza del perno.

$A_t$  = Área total.

$F_t$  = Fuerza total.

$$\text{Entonces (S}_p\text{)} = \frac{12.57 * 50.67}{328.65} = 1.94 \text{ m}$$

$$\text{Longitud de empotramiento (L}_E\text{)} = \frac{F_E}{\mu * d_b * \pi}$$

en donde:

$F_E$  = Fuerza de empotramiento.

$\mu$  = Factor contacto lechada.

$d_b$  = Diámetro del perno.

$$\text{Entonces (L}_E\text{)} = \frac{37.71}{102 * 0.0254 * \pi} = 4.63 \text{ m}$$

$$\text{Longitud total (L}_T\text{)} = L_L + L_E$$

En donde:

$L_L$  = Longitud Libre.

$L_E$  = Longitud de empotramiento.

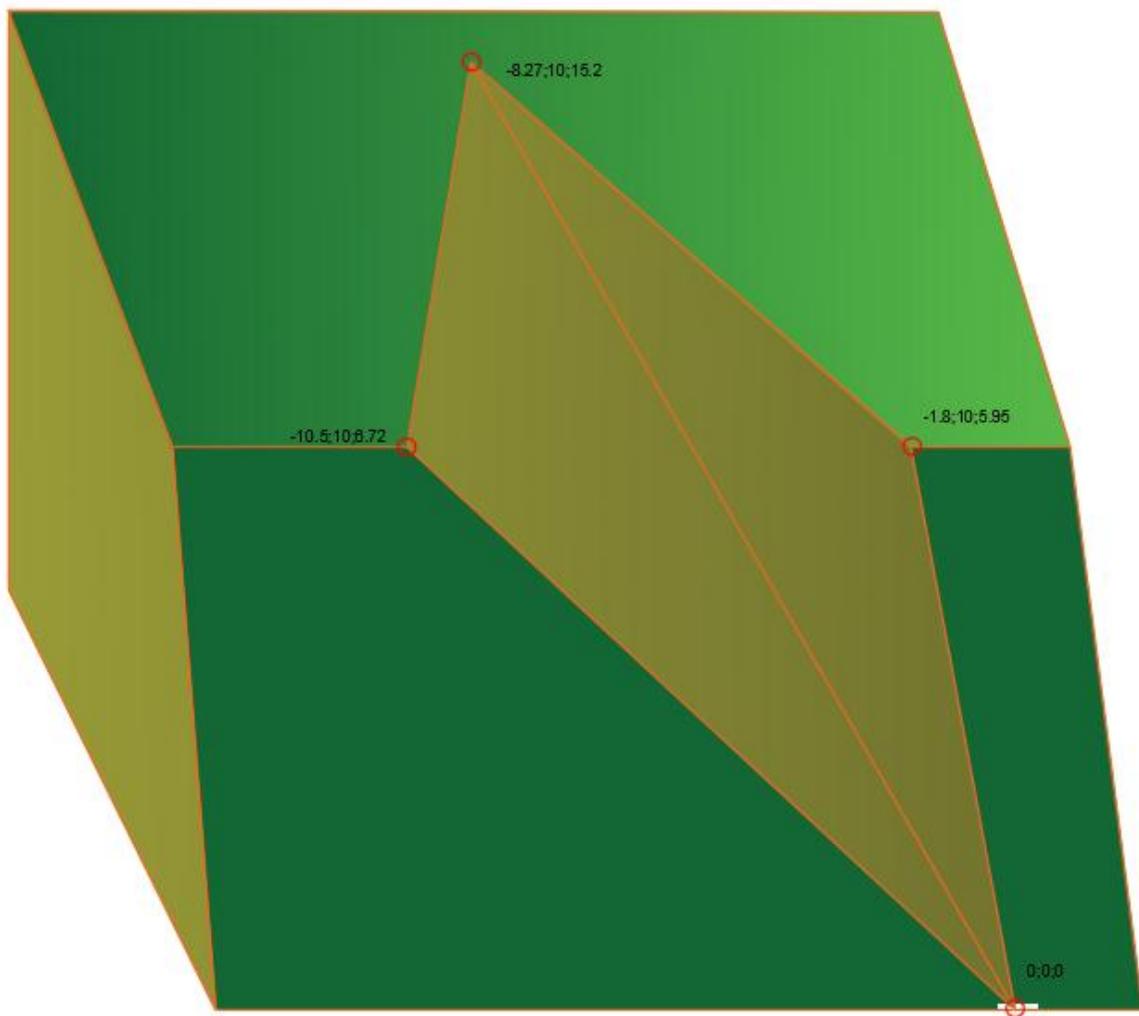
Longitud libre = 8.64m

$$\text{Entonces (LT)} = 8.64 + 4.63 = 13.27\text{m}$$

➤ **Solución manual optimizado:**

Para este ejercicio se ha estimado el origen de los pernos en 0 tanto para X como para Y.

FIGURA 42 esquema de coordenadas en el espacio que representan la forma de la cuña (Falla por cuña).



Fuente: Propia.

Coordenadas de la falla, donde se estima que se encuentra tres planos.

A: 0, 0, 0

B: -1.8, 5.95, 10

C: -8.27, 15.2, 10

D: -10.5, 6.72, 10

Plano 1 conformado por las coordenadas a,b y c

Plano 2 conformado por las coordenadas a,c y d

Plano de la cara del talud a,b y d.

Cálculo de la ecuación del plano 1

$$BA = -1.8i + 10j + 5.95k$$

$$CA = -8.27i + 10j + 15.2k$$

$$BA * CA = \begin{vmatrix} i & j & k \\ -1.8 & 10 & 5.95 \\ -8.27 & 10 & 15.2 \end{vmatrix}$$

$$= i(10 * 15.2 - 5.96 * 10) - j((-1.8) * 15.2 - 596(-8.27)) \\ + k((-1.8) * 10 - 10(-8.27)) =$$

$$= (152 - 59.6) - j((-27.36) - (-49.28)) + k((-18) - (-82.7)) =$$

$$= \{92.4i; -21.93j; 64.7k\} \text{ Ecuación del plano 1}$$

Cálculo de la ecuación del plano2

$$CA = -8.27i + 10j + 15.2k$$

$$DA = -10.5i + 10j + 6.72k$$

$$BA * CA = \begin{vmatrix} i & j & k \\ -8.27 & 10 & 15.2 \\ -10.5 & 10 & 6.72 \end{vmatrix}$$

$$= i(10 * 6.72 - 15.2 * 10) - j((-8.27) * 6.72 - 15.2(-10.5)) \\ + k((-8.27) * 10 - 10(-10.5)) =$$

$$= (67.2 - 152) - j((-55.57) - (-159.6)) + k((-82.7) - (-105)) =$$

$$= \{-84.8i; -104.02j; 22.3k\} \text{ Ecuación del plano 2}$$

Cálculo de a ecuación de la cara del talud.

$$BA = -1.8i + 10j + 5.95k$$

$$DA = -10.5i + 10j + 6.72k$$

$$BA * CA = \begin{vmatrix} i & j & k \\ -1.8 & 10 & 5.95 \\ -10.5 & 10 & 6.72 \end{vmatrix}$$

$$= i(10 * 6.72 - 5.95 * 10) - j((-1.8) * 6.72 - 5.95(-10.5))$$

$$+ k((-1.8) * 10 - 10(-10.5)) =$$

$$= (67.2 - 59.5) - j((-12.09) - (-62.47)) + k((-18) - (-105)) =$$

$$= \{7.7i; -50.38j; 87k\} \text{ Ecuación de la cara del talud.}$$

Cálculo de la longitud libre en la cuña por análisis optimizado:

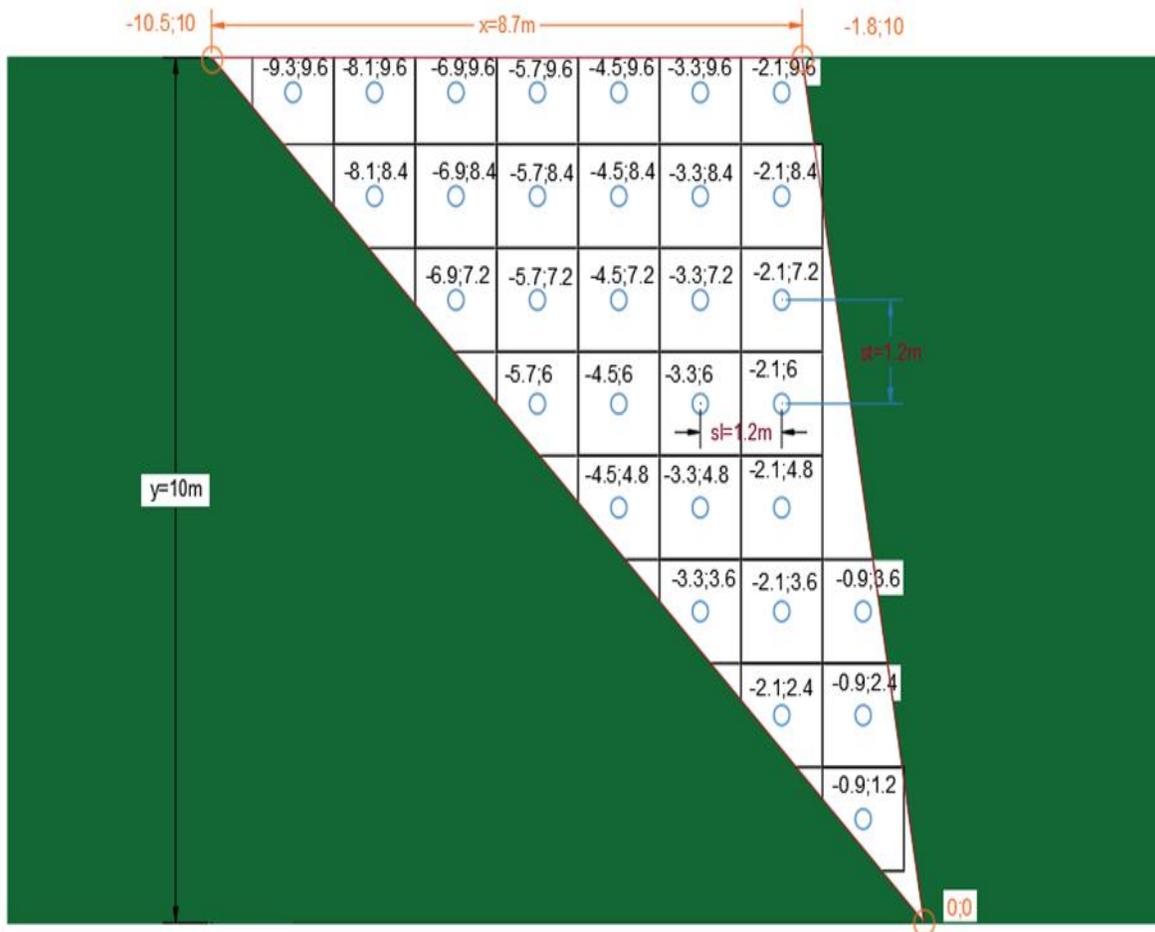
- *Análisis con patrón normal sin optimizar:*

Tabla 22 Lista Cordenadas del patron sin tres bolillo

#	x	y	#	x	y	#	x	y
1	-9.3	9.6	12	-4.5	6	23	-2.1	3.6
2	-8.1	8.4	13	-4.5	7.2	24	-2.1	4.8
3	-8.1	9.6	14	-4.5	8.4	25	-2.1	6
4	-6.9	7.2	15	-4.5	9.6	26	-2.1	7.2
5	-6.9	8.4	16	-3.3	3.6	27	-2.1	8.4
6	-6.9	9.6	17	-3.3	4.8	28	-2.1	9.6
7	-5.7	6	18	-3.3	6	29	-0.9	1.2
8	-5.7	7.2	19	-3.3	7.2	30	-0.9	2.4
9	-5.7	8.4	20	-3.3	8.4	31	-0.9	3.6
10	-5.7	9.6	21	-3.3	9.6	32	-0.9	4.7
11	-4.5	4.8	22	-2.1	2.4			

Fuente: Propia.

FIGURA 43 Distribución de pernos con patrón normal



Fuente: Propia.

Nota : Estas cordenadas se evaluan por las tres ecuaciones con el fin de hallar la longitud libre de cada perno.

Evaluación de las cordenadas con la ecuación del plano 1:

$$LP1_{z1} = \{92.4X; -21.93Y; 64.7Z\} = \left[ \frac{92.4 * (-9.3) - 21.93 * 9.6}{-64.7} \right] = z1$$

$$= 16.54m$$

$$LP1_{z2} = \{92.4X; -21.93Y; 64.7Z\} = \left[ \frac{92.4 * (-8.1) - 21.93 * 8.4}{-64.7} \right] = z1$$

$$= 14.42m$$

Evaluación de las cordenas con la ecuacion del plano 2:

$$LP2_{z1} = \{-84.8i; -104.02j; 22.3k\} = \left[ \frac{-84.8 * (-9.3) - 104.02 * 9.6}{-22.3} \right] = z1$$

$$= 9.41m$$

$$LP2_{z2} = \{-84.8i; -104.02j; 22.3k\} = \left[ \frac{-84.8 * (-8.1) - 104.02 * 8.4}{-22.3} \right] = z1$$

$$= 8.38m$$

Evaluación de las cordenas con la cara del talud:

$$L_{z1} = \{7.7i; -50.38j; 87k\} = \left[ \frac{7.7 * (-9.3) - 50.38 * 9.6}{-87} \right] = z1 = 6.38m$$

$$L_{z2} = \{7.7i; -50.38j; 87k\} = \left[ \frac{7.7 * (-8.1) - 50.38 * 8.4}{-87} \right] = z1 = 5.58m$$

Longitud libre calculada

LL= (LP1 o PL2) – Lptalud

LL: Longitud libre del perno

LP1:Longitud del perno en el plano 1

LP2:Longitud del perno en el plano 2

En las ecuaciones de los planos se remplazan los valores de las coordenadas X y Y obtenidas de la separación entre pernos y su origen en 0.Como se obtienen dos valores para la misma coordenada en el plano 1 y 2 se escoge el de menor valor, ya que este representa la distancia desde el eje cero a la falla, si se le resta la inclinación del talud es decir el resultado del despeje de la ecuación de la cara del talud se puede encontrar la longitud real libre de cada perno.

Comparación de longitudes de los planos 1 y 2 para seleccionar la menor.

$$LP1_{z1} <> LP2_{z1} = 16.53m > 9.41m$$

$$LP1_{z2} <> LP2_{z2} = 14.41m > 8.38m$$

A la longitud menor se le debe quitar la distancia desde la cara del talud hasta eje de referencia cero.

$$LL = LP - LCT$$

LL=Longitud libre

LP=longitud Plano hasta la falla

LCT= Longitud hasta la cara del talud

$$LL_1 = 9.41m - 6.38m = 3.03m$$

$$LL_2 = 8.38m - 5.58m = 2.80m$$

De acuerdo al análisis estándar la fuerza que soporta cada perno es de 12.57 ton para una longitud total de 13 m

Cálculo de la longitud de empotramiento

$$LE_1 = 13m - 3.03m = 9.97m$$

$$LE_2 = 13m - 2.80m = 10.20m$$

Tabla 23. Despeje de ecuación de los planos y cálculo de la longitud de empotramiento.

#p	PL1(m) {92.4i; -21.93j; 64.7k}	PL2(m) {-84.8i; -104.02j; 22.3k}	CT (m) {7.7i; -50.38j; 87k}	Longitud menor entre PL1 y PL2	libre LL=(PL1oPL2)- CT	LT(m) Longitud total	LE(m) Longitud de empotramiento
1	16.54	9.41	6.38	9.41	3.03	13	9.97
2	14.42	8.38	5.58	8.38	2.80	13	10.20
3	14.82	13.98	6.28	13.98	7.70	13	5.30
4	12.29	7.35	4.78	7.35	2.57	13	10.43
5	12.70	12.94	5.47	12.70	7.23	13	5.77
6	13.11	18.54	6.17	13.11	6.94	13	6.06
7	10.17	6.31	3.98	6.31	2.33	13	10.67
8	10.58	11.91	4.67	10.58	5.91	13	7.09
9	10.99	17.51	5.37	10.99	5.62	13	7.38
10	11.39	23.10	6.06	11.39	5.33	13	7.67
11	8.05	5.28	3.18	5.28	2.10	13	10.90
12	8.46	10.88	3.87	8.46	4.59	13	8.41
13	8.87	16.47	4.57	8.87	4.30	13	8.70
14	9.27	22.07	5.26	9.27	4.01	13	8.99
15	9.68	27.67	5.96	9.68	3.72	13	9.28
16	5.93	4.24	2.38	4.24	1.87	13	11.13
17	6.34	9.84	3.07	6.34	3.27	13	9.73
18	6.75	15.44	3.77	6.75	2.98	13	10.02
19	7.15	21.04	4.46	7.15	2.69	13	10.31
20	7.56	26.63	5.16	7.56	2.40	13	10.60
21	7.97	32.23	5.85	7.97	2.12	14	11.88
22	3.81	3.21	1.58	3.21	1.63	15	13.37
23	4.22	8.81	2.27	4.22	1.95	16	14.05
24	4.63	14.40	2.97	4.63	1.66	17	15.34
25	5.03	20.00	3.66	5.03	1.37	18	16.63
26	5.44	25.60	4.36	5.44	1.08	19	17.92
27	5.85	31.20	5.05	5.85	0.80	20	19.20
28	6.25	36.79	5.75	6.25	0.51	21	20.49
29	1.69	2.18	0.77	1.69	0.92	22	21.08
30	2.10	7.77	1.47	2.10	0.63	23	22.37
31	2.51	13.37	2.16	2.51	0.34	24	23.66
32	2.88	18.50	2.80	2.88	0.08	25	24.92

Fuente: Propia.

Cálculo de la fuerza de empotramiento.

$$FE_1 = \pi * 0.0254 * 9.97 * 102 = 81.13ton$$

$$FE_2 = \pi * 0.0254 * 10.20 * 102 = 83.02ton$$

Cálculo de la fuerza de cada perno:

$$FI_1 = \frac{81.13ton}{3} = 27.04ton$$

$$FI_2 = \frac{83.02ton}{3} = 27.67ton$$

De acuerdo a los cálculos los pernos tienen un resistencia mayor a la que puede soportar el perno que es de 11.68 toneladas se calculará la resistencia con las 11.68 toneladas.

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + \dots$$

$$\sum FI_{\text{todos los pernos con 13 m}} = 12.57 + 12.57 + 12.57 + \dots = 351.96ton$$

Tabla 24 Cálculo de la fuerza de empotramiento.

	LE(m) Longitud de empotramiento	FE (ton) $FE = \pi * \phi b * \mu * LE$	Fi(ton) $Fi = LE/3$	Fi(ton) Resistencia real sin optimizar
1	9.97	81.13	27.04	12.56
2	10.20	83.02	27.67	12.56
3	5.30	43.12	14.37	12.56
4	10.43	84.92	28.31	12.56
5	5.77	46.99	15.66	12.56
6	6.06	49.34	16.45	12.56
7	10.67	86.82	28.94	12.56
8	7.09	57.73	19.24	12.56
9	7.38	60.08	20.03	12.56
10	7.67	62.42	20.81	12.56
11	10.90	88.72	29.57	12.56
12	8.41	68.47	22.82	12.56
13	8.70	70.82	23.61	12.56
14	8.99	73.16	24.39	12.56
15	9.28	75.51	25.17	12.56
16	11.13	90.62	30.21	12.56
17	9.73	79.21	26.40	12.56
18	10.02	81.56	27.19	12.56
19	10.31	83.90	27.97	12.56
20	10.60	86.25	28.75	12.56
21	11.88	96.73	32.24	12.56
22	13.37	108.79	36.26	12.56
23	14.05	114.37	38.12	12.56
24	15.34	124.85	41.62	12.56
25	16.63	135.34	45.11	12.56
26	17.92	145.82	48.61	12.56
27	19.20	156.31	52.10	12.56
28	20.49	166.79	55.60	12.56
29	21.08	171.60	57.20	12.56
30	22.37	182.08	60.69	12.56
31	23.66	192.56	64.19	12.56
32	24.92	202.85	67.62	12.56
			$\sum Fi$	401.92

Fuente: Propia.

- Análisis con patrón a tres bolillo optimizado.

Tabla 25 Cálculo de la fuerza de empotramiento.

#p	LT(m) Longitud total optimizada	LE(m) Longitud de empotramiento optimizada (8m)	Fi(ton) optimizada con 8m	Resistencia real optimizada
1	8	4.97	13.48	12.56
2	8	5.20	14.11	12.56
3	8	0.30	0.81	0.81
4	8	5.43	14.74	12.56
5	8	0.77	2.10	2.10
6	8	1.06	2.88	2.88
7	8	5.67	15.37	12.56
8	8	2.09	5.68	5.68
9	8	2.38	6.46	6.46
10	8	2.67	7.24	7.24
11	8	5.90	16.01	12.56
12	8	3.41	9.26	9.26
13	8	3.70	10.04	6.55
14	8	3.99	10.82	10.82
15	8	4.28	11.60	11.60
16	8	6.13	16.64	12.56
17	8	4.73	12.84	12.56
18	8	5.02	13.62	12.56
19	8	5.31	14.40	12.56
20	8	5.60	15.18	12.56
21	8	5.88	15.97	12.56
22	8	6.37	17.27	12.56
23	8	6.05	16.42	12.56
24	8	6.34	17.20	12.56
25	8	6.63	17.98	12.56
26	8	6.92	18.76	12.56
27	8	7.20	19.54	12.56
28	8	7.49	20.33	12.56
29	8	7.08	19.22	12.56
30	8	7.37	20.00	12.56
31	8	7.66	20.78	12.56
32	8	7.92	21.50	12.56
			$\sum F_i$	339.72

Fuente: Propia.

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + \dots$$

$$\sum \text{FIlongitud optimizada a 10 m} = 12.57 + 12.57 + 12.57 + \dots = 334.17\text{ton}$$

➤ **Resultados utilizando el algoritmo:**

- Análisis estándar con patrón normal sin optimizar

FIGURA 44 Resultados análisis estándar del ejercicio por falla por cuña con patrón normal.

**ANÁLISIS ESTÁNDAR**

TIPO DE FALLA	FALLA DE CUÑA	DIÁMETRO DEL PERNO	#8
ÁREA TOTAL	50.67 m <sup>2</sup>	FUERZA DE UN PERNO	12.56 TON
FUERZA TOTAL	328.7 TON	FUERZA DE EMPOTRAMIENTO	37.68 TON
FACTOR DE SEGURIDAD	1.69427	LONGITUD DE EMPOTRAMIENTO	4.63 m
SEPARACIÓN	1.94 m	LONGITUD TOTAL	13.27 m
CANTIDAD DE PERNOS	13	LONGITUD LIBRE	8.64 m
		CONTACTO ROCA	1.02
		TIPO DE MATERIAL	ACERO 420

**ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN**

SEPARACIÓN (m)	1.2	LONGITUD DE PERNO (m)	13
DESPLAZAMIENTO X (m)	0	FUERZA DE UN PERNO (ton)	12.56
DESPLAZAMIENTO Y (m)	0	FUERZA OPTIMIZADA (ton)	401.92
		FUERZA REQUERIDA (ton)	328.7

Fuente: Propia.

Para las condiciones establecidas en el ejercicio se obtuvo que es necesario utilizar 13 pernos de 13.27 m de longitud, separados 1.94 m, con una barra #8 en acero de 420 MPa cuya fuerza es de 12.56 toneladas.

- Análisis con patrón normal optimizado:

FIGURA 45 Resultados análisis optimizado del ejercicio de falla por cuña con patrón normal.

**ANÁLISIS ESTANDAR**

TIPO DE FALLA	FALLA DE CUÑA	DIÁMETRO DEL PERNO	#8
ÁREA TOTAL	50.67 m <sup>2</sup>	FUERZA DE UN PERNO	12.56 TON
FUERZA TOTAL	328.7 TON	FUERZA DE EMPOTRAMIENTO	37.68 TON
FACTOR DE SEGURIDAD	1.69427	LONGITUD DE EMPOTRAMIENTO	4.63 m
SEPARACIÓN	1.94 m	LONGITUD TOTAL	13.27 m
CANTIDAD DE PERNOS	13	LONGITUD LIBRE	8.64 m

**ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN**

SEPARACIÓN (m)	1.2	LONGITUD DE PERNO (m)	8
DESPLAZAMIENTO X (m)	0	FUERZA DE UN PERNO (ton)	12.56
DESPLAZAMIENTO Y (m)	0	FUERZA OPTIMIZADA (ton)	340.3
		FUERZA REQUERIDA (ton)	328.7

Fuente: Propia.

Al efectuar la optimización del sistema se obtuvo que para la misma fuerza requerida con una longitud total de 8 m cumple con la fuerza requerida teniendo en cuenta que se usó la misma fuerza del perno obtenida mediante el análisis estándar. Comparando los resultados del análisis de optimización con respecto al análisis estándar se obtuvo que:

- La separación se reduce 0.74 cm si se toma una separación de 1.2 m.
- La longitud del perno disminuye en un 39.71% si se adopta una longitud de perno de 8 metros.
- La fuerza optimizada se reduce en 15.33%.

Por consiguiente se infiere que la optimización con respecto al análisis estándar es más eficiente en cuanto que la fuerza optimizada se reduce en un 15.33% y sigue cumpliendo con la fuerza requerida que exige el ejercicio planteado, lo más significativo de este ejercicio es la considerable reducción de la longitud del perno lo cual influye directamente en los costos y el diseño del anclaje.

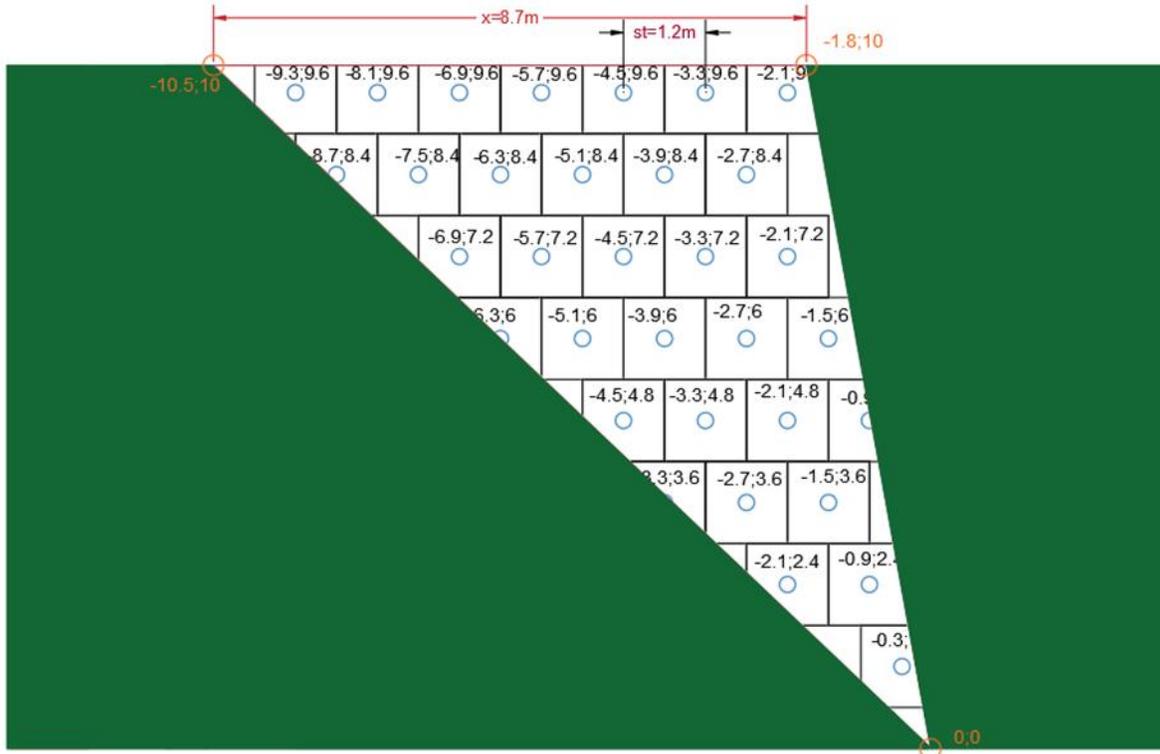
- *Análisis con patrón al tres bolillo sin optimizar:*

Tabla 26 Lista coordenadas del patron sin tres bolillo

#	x	y	#	x	y	#	x	y
1	-9.3	9.6	12	-3.3	9.6	23	-5.1	6
2	-8.1	9.6	13	-2.1	2.4	24	-5.1	8.4
3	-6.9	7.2	14	-2.1	4.8	25	-3.9	6
4	-6.9	9.6	15	-2.1	7.2	26	-3.9	8.4
5	-5.7	7.2	16	-2.1	9.6	27	-2.7	3.6
6	-5.7	9.6	17	-0.9	2.4	28	-2.7	6
7	-4.5	4.8	18	-0.9	4.8	29	-2.7	8.4
8	-4.5	7.2	19	-8.7	8.4	30	-1.5	3.6
9	-4.5	9.6	20	-7.5	8.4	31	-1.5	6
10	-3.3	4.8	21	-6.3	6	32	-0.3	1.2
11	-3.3	7.2	22	-6.3	8.4			

Fuente: Propia.

FIGURA 46 Distribución de pernos con patrón al tres bolillo.



Fuente: Propia.

Evaluación de las coordenadas con la ecuación del plano 1:

$$LP1_{z1} = \{92.4X; -21.93Y; 64.7Z\} = \left[ \frac{92.4 * (-9.3) - 21.93 * 9.6}{-64.7} \right] = z1$$

$$= 16.54m$$

$$LP1_{z2} = \{92.4X; -21.93Y; 64.7Z\} = \left[ \frac{92.4 * (-8.1) - 21.93 * 9.1}{-64.7} \right] = z1$$

$$= 14.82m$$

Evaluación de las coordenadas con la ecuación del plano 2:

$$LP2_{z1} = \{-84.8i; -104.02j; 22.3k\} = \left[ \frac{-84.8 * (-9.3) - 104.02 * 9.6}{-22.3} \right] = z1$$

$$= 9.41m$$

$$LP2_{z2} = \{-84.8i; -104.02j; 22.3k\} = \left[ \frac{-84.8 * (-8.1) - 104.02 * 9.1}{-22.3} \right] = z1$$

$$= 13.94m$$

Evaluacion de las cordenadas con la cara del talud´:

$$L_{z1} = \{7.7i; -50.38j; 87k\} = \left[ \frac{7.7 * (-9.3) - 50.38 * 9.6}{-87} \right] = z1 = 6.38m$$

$$L_{z2} = \{7.7i; -50.38j; 87k\} = \left[ \frac{7.7 * (-8.1) - 50.38 * 9.1}{-87} \right] = z1 = 6.28m$$

Longitud libre calculada

LL= (LP1 o PL2) – Lptalud

LL: Longitud libre del perno

LP1:Longitud del perno en el plano 1

LP2:Longitud del perno en el plano 2

En las ecuaciones de los planos se remplazan los valores de las coordenadas X y Y obtenidas de la separación entre pernos y su origen en 0. Como se obtienen dos valores para la misma coordenada en el plano 1 y 2 se escoge el de menor valor, ya que este representa la distancia desde el eje cero a la falla, si se le resta la inclinación del talud es decir el resultado del despeje de la ecuación de la cara del talud se puede encontrar la longitud real libre de cada perno.

Comparación de longitudes de los planos 1 y 2 para seleccionar la menor.

$$LP1_{z1} <> LP2_{z1} = 16.54m > 9.41m$$

$$LP1_{z2} <> LP2_{z2} = 14.82m > 13.94m$$

A la longitud menor se le debe quitar la distancia desde la cara del talud hasta eje de referencia cero.

$$LL=LP-LCT$$

LL=Longitud libre

LP=longitud Plano hasta la falla

LCT= Longitud hasta la cara del talud

$$LL_1 = 9.41m - 6.38m = 3.03m$$

$$LL_2 = 13.94m - 6.28m = 7.70m$$

De acuerdo al análisis estándar la fuerza que soporta cada perno es de 12.57 ton para una longitud total de 13 m

Calculo de la longitud de empotramiento

$$LE_1 = 13m - 3.03m = 9.97m$$

$$LE_2 = 13m - 7.70m = 5.30m$$

Tabla 27 Despeje de ecuación de los planos y cálculo de la longitud de empotramiento.

#p	PL1(m) {92.4i; -21.93j; 64.7k}	PL2(m) {-84.8i; -104.02j; 22.3k}	CT (m) {7.7i; -50.38j; 87k}	Longitud menor entre PL1 y PL2	libre LL=(PL1oPL2)- CT	LT(m) Longitud total	LE(m) Longitud de empotramiento
1	16.54	9.41	6.38	9.41	3.03	13	9.97
2	14.82	13.98	6.28	13.98	7.70	13	5.30
3	12.29	7.35	4.78	7.35	2.57	13	10.43
4	13.11	18.54	6.17	13.11	6.94	13	6.06
5	10.58	11.91	4.67	10.58	5.91	13	7.09
6	11.39	23.10	6.06	11.39	5.33	13	7.67
7	8.05	5.28	3.18	5.28	2.10	13	10.90
8	8.87	16.47	4.57	8.87	4.30	13	8.70
9	9.68	27.67	5.96	9.68	3.72	13	9.28
10	6.34	9.84	3.07	6.34	3.27	13	9.73
11	7.15	21.04	4.46	7.15	2.69	13	10.31
12	7.97	32.23	5.85	7.97	2.12	13	10.88
13	3.81	3.21	1.58	3.21	1.63	13	11.37
14	4.63	14.40	2.97	4.63	1.66	13	11.34
15	5.44	25.60	4.36	5.44	1.08	13	11.92
16	6.25	36.79	5.75	6.25	0.51	13	12.49
17	2.10	7.77	1.47	2.10	0.63	13	12.37
18	2.91	18.97	2.86	2.91	0.05	13	12.95
19	15.27	6.10	5.63	6.10	0.46	13	12.54
20	13.56	10.66	5.53	10.66	5.13	13	7.87
21	11.03	4.03	4.03	4.03	0.00	13	13.00
22	11.84	15.23	5.42	11.84	6.42	13	6.58
23	9.32	8.59	3.93	8.59	4.67	13	8.33
24	10.13	19.79	5.32	10.13	4.81	13	8.19
25	7.60	13.16	3.82	7.60	3.78	13	9.22
26	8.42	24.35	5.21	8.42	3.21	13	9.79
27	5.08	6.53	2.32	5.08	2.75	13	10.25
28	5.89	17.72	3.71	5.89	2.18	13	10.82
29	6.70	28.92	5.10	6.70	1.60	13	11.40
30	3.36	11.09	2.22	3.36	1.14	13	11.86
31	4.18	22.28	3.61	4.18	0.57	13	12.43
32	0.84	4.46	0.72	0.84	0.11	13	12.89

Fuente: Propia.

Cálculo de la fuerza de empotramiento:

$$FE_1 = \pi * 0.0254 * 9.97 * 102 = 81.13ton$$

$$FE_2 = \pi * 0.0254 * 10.20 * 102 = 83.02ton$$

Cálculo de la fuerza de cada perno:

$$FI_1 = \frac{81.13ton}{3} = 27.04ton$$

$$FI_2 = \frac{83.02ton}{3} = 27.67ton$$

Como los pernos tienen una resistencia mayor de la que pueden soportar porque la resistencia se da a partir de la longitud de empotramiento y si se supera la resistencia del perno este fallará por tracción, por tal motivo se estima que la fuerza total de cada perno es 11.68 toneladas resultado obtenido del análisis estándar.

Tabla 28 Cálculo de la fuerza de empotramiento.

	LE(m) Longitud de empotramiento	FE (ton) $FE = \pi * \phi b * \mu * LE$	Fi(ton) $Fi = LE/3$	Fi(ton) Resistencia real sin optimizar
1	9.97	81.13	27.04	12.56
2	5.30	43.12	14.37	12.56
3	10.43	84.92	28.31	12.56
4	6.06	49.34	16.45	12.56
5	7.09	57.73	19.24	12.56
6	7.67	62.42	20.81	12.56
7	10.90	88.72	29.57	12.56
8	8.70	70.82	23.61	12.56
9	9.28	75.51	25.17	12.56
10	9.73	79.21	26.40	12.56
11	10.31	83.90	27.97	12.56
12	10.88	88.59	29.53	12.56
13	11.37	92.51	30.84	12.56
14	11.34	92.29	30.76	12.56
15	11.92	96.99	32.33	12.56
16	12.49	101.68	33.89	12.56
17	12.37	100.69	33.56	12.56
18	12.95	105.38	35.13	12.56
19	12.54	102.03	34.01	12.56
20	7.87	64.02	21.34	12.56
21	13.00	105.82	35.27	12.56
22	6.58	53.54	17.85	12.56
23	8.33	67.82	22.61	12.56
24	8.19	66.62	22.21	12.56
25	9.22	75.01	25.00	12.56
26	9.79	79.70	26.57	12.56
27	10.25	83.41	27.80	12.56
28	10.82	88.10	29.37	12.56
29	11.40	92.79	30.93	12.56
30	11.86	96.49	32.16	12.56
31	12.43	101.18	33.73	12.56
32	12.89	104.88	34.96	12.56
			$\sum Fi$	401.92

Fuente: Propia.

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + \dots$$

$$\sum FI \text{ todos los pernos con } 13 \text{ m} = 12.57 + 12.57 + 12.57 + \dots = 401.92 \text{ ton}$$

- Análisis con patrón al tres bolillo optimizado.

Tabla 29 Cálculo de la fuerza de empotramiento.

#p	LT(m) Longitud total optimizada	LE(m) Longitud de empotramiento optimizada (8m)	Fi(ton) optimizada con 8m	Resistencia real optimizada
1	8	4.97	13.48	12.56
2	8	0.30	0.81	0.81
3	8	5.43	14.74	12.56
4	8	1.06	2.88	2.88
5	8	2.09	5.68	5.68
6	8	2.67	7.24	7.24
7	8	5.90	16.01	12.56
8	8	3.70	10.04	10.04
9	8	4.28	11.60	11.60
10	8	4.73	12.84	12.56
11	8	5.31	14.40	12.56
12	8	5.88	15.97	12.56
13	8	6.37	17.27	9.07
14	8	6.34	17.20	12.56
15	8	6.92	18.76	12.56
16	8	7.49	20.33	12.56
17	8	7.37	20.00	12.56
18	8	7.95	21.56	12.56
19	8	7.54	20.44	12.56
20	8	2.87	7.78	7.78
21	8	8.00	21.71	12.56
22	8	1.58	4.28	4.28
23	8	3.33	9.04	9.04
24	8	3.19	8.64	8.64
25	8	4.22	11.44	11.44
26	8	4.79	13.00	12.56
27	8	5.25	14.24	12.56
28	8	5.82	15.80	12.56
29	8	6.40	17.36	12.56
30	8	6.86	18.60	12.56
31	8	7.43	20.16	12.56
32	8	7.89	21.40	12.56
			$\sum Fi$	339.70

Fuente: Propia.

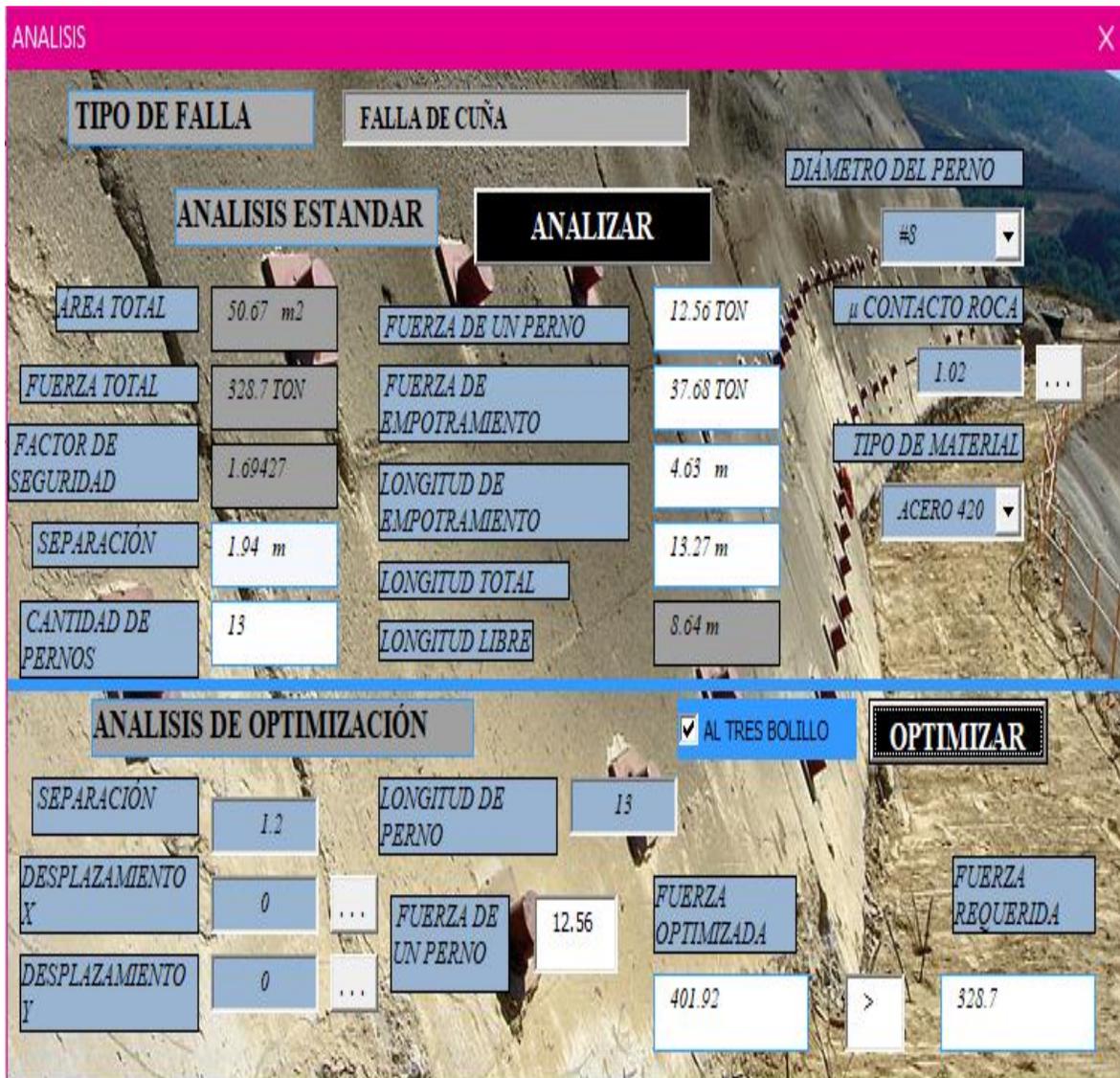
$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + \dots$$

$$\sum F \text{ longitud optimizada a } 8 \text{ m} = 12.57 + 12.57 + 12.57 + \dots = 339.7 \text{ ton}$$

➤ **Resultados utilizando el algoritmo:**

- Análisis estándar con patrón al tres bolillo:

FIGURA 47 Resultados análisis estándar del ejercicio de falla por cuña con patrón tres bolillo.



Fuente: Propia.

Para las condiciones establecidas en el ejercicio se obtuvieron las mismas características de diseño que el análisis estándar sin tres bolillo: 13 pernos de 13.27 m de longitud, separados 1.94 m, con una barra #8 en acero de 420 MPa cuya fuerza es de 12.56 toneladas.

- Análisis con patrón al tres bolillo optimizado:

FIGURA 48 Resultados análisis optimizado del ejercicio de falla por cuña con patrón tres bolillo.

**ANÁLISIS ESTÁNDAR**

TIPO DE FALLA	FALLA DE CUÑA		
DIÁMETRO DEL PERNO	#8		
ÁREA TOTAL	50.67 m <sup>2</sup>	FUERZA DE UN PERNO	12.56 TON
FUERZA TOTAL	328.7 TON	FUERZA DE EMPOTRAMIENTO	37.68 TON
FACTOR DE SEGURIDAD	1.69427	LONGITUD DE EMPOTRAMIENTO	4.63 m
SEPARACIÓN	1.94 m	LONGITUD TOTAL	13.27 m
CANTIDAD DE PERNOS	13	LONGITUD LIBRE	8.64 m
		CONTACTO ROCA	1.02
		TIPO DE MATERIAL	ACERO 420

**ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN**

SEPARACIÓN	1.2	LONGITUD DE PERNO	8
DESPLAZAMIENTO X	0	FUERZA DE UN PERNO	12.56
DESPLAZAMIENTO Y	0	FUERZA OPTIMIZADA	339.7
		FUERZA REQUERIDA	328.7

AL TRES BOLILLO

Fuente: Propia.

Al efectuar la optimización del sistema se obtuvo que con la misma cantidad de pernos (13) teniendo en cuenta que se usó la misma fuerza de perno (12.56 ton) cumple con la fuerza requerida, comparando los resultados del análisis de optimización con respecto al análisis estándar se obtuvo que:

- La separación se reduce 0.74 cm si se toma una separación de 1.2 m.
- La longitud del perno disminuye en un 39.71% si se toma una longitud de perno de 8 metros.
- La fuerza optimizada se reduce en 15.48%.

La fuerza requerida por el sistema es 328.7 toneladas y el análisis optimizado efectuado arroja una fuerza optimizada de 339.7 toneladas.

Por consiguiente se infiere que la optimización con respecto al análisis estándar es más eficiente en cuanto que la fuerza optimizada se reduce en un 15.48% y sigue cumpliendo con la fuerza requerida que exige el ejercicio planteado, lo más significativo de este ejercicio es la considerable reducción de la longitud del perno lo cual influye directamente en los costos y el diseño del anclaje.

El porcentaje de reducción de la fuerza optimizada es más pequeño en la modelación con patrón normal de anclaje, lo cual indica que la distribución patrón tres bolillo es mas eficiente en este caso.

- Evaluando otras opciones del algoritmo, al ejercicio resuelto anteriormente se adicionan un dx y dy al origen de la distribución de pernos.
- *Análisis con patrón normal para un dx y dy .*

$$Sp=1m$$

$$Dx=3.5m$$

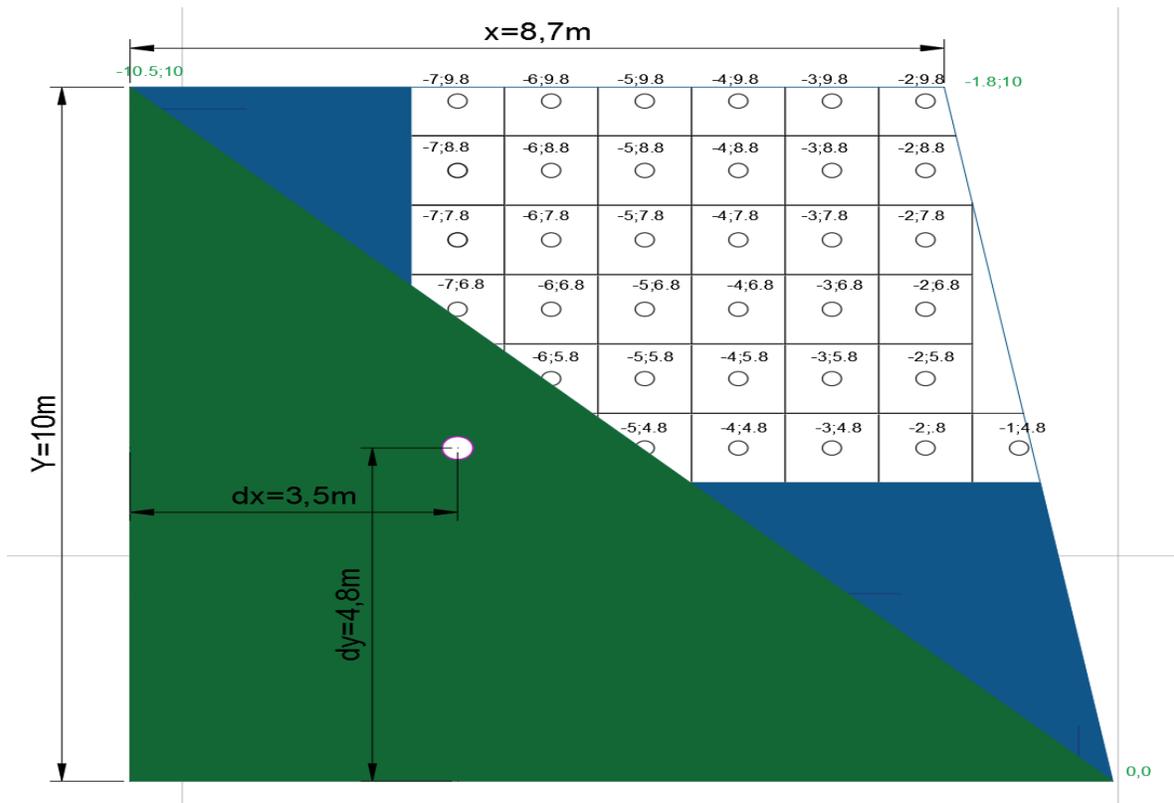
$$Dy=4.8m$$

Tabla 30 Lista Cordenadas del patron normal.

#p	x	y	#p	x	y	#p	x	y
1	-7	6.8	12	-5	6.8	23	-3	5.8
2	-7	7.8	13	-5	7.8	24	-3	6.8
3	-7	8.8	14	-5	8.8	25	-3	7.8
4	-7	9.8	15	-5	9.8	26	-3	8.8
5	-6	5.8	16	-4	4.8	27	-3	9.8
6	-6	6.8	17	-4	5.8	28	-2	4.8
7	-6	7.8	18	-4	6.8	29	-2	5.8
8	-6	8.8	19	-4	7.8	30	-2	6.8
9	-6	9.8	20	-4	8.8	31	-2	7.8
10	-5	4.8	21	-4	9.8	32	-2	8.8
11	-5	5.8	22	-3	4.8	33	-2	9.8
						34	-1	4.8

Fuente: Propia.

FIGURA 49 Distribución de pernos en una cuña con un dx 3.5 m y dy 4.8m



Fuente: Propia.

Evaluación de las cordenadas con la ecuación del plano 1:

$$LP1_{z1} = \{92.4X; -21.93Y; 64.7Z\} = \left[ \frac{92.4 * (-7) - 21.93 * 6.8}{-64.7} \right] = z1 = 12.30m$$

$$LP1_{z2} = \{92.4X; -21.93Y; 64.7Z\} = \left[ \frac{92.4 * (-7) - 21.93 * 7.8}{-64.7} \right] = z1 = 12.64m$$

Evaluación de las cordenadas con la ecuacion del plano 2:

$$LP2_{z1} = \{-84.8i; -104.02j; 22.3k\} = \left[ \frac{-84.8 * (-7) - 104.02 * 6.8}{-22.3} \right] = z1 = 5.1$$

$$LP2_{z2} = \{-84.8i; -104.02j; 22.3k\} = \left[ \frac{-84.8 * (-7) - 104.02 * 7.8}{-22.3} \right] = z1 = 9.76m$$

Evaluación de las cordenadas con la cara del talud:

$$L_{z1} = \{7.7i; -50.38j; 87k\} = \left[ \frac{7.7 * (-7) - 50.38 * 6.8}{-87} \right] = z1 = 4.56m$$

$$L_{z2} = \{7.7i; -50.38j; 87k\} = \left[ \frac{7.7 * (-7) - 50.38 * 6.8}{-87} \right] = z1 = 5.14m$$

Longitud libre calculada

$$LL = (LP1 \text{ o } PL2) - L_{ptalud}$$

LL: Longitud libre del perno

LP1: Longitud del perno en el plano 1

LP2: Longitud del perno en el plano 2

Comparación de longitudes de los planos 1 y 2 paa seleccionar la menor.

$$LP1_{z1} <> LP2_{z1} = 12.30m > 5.10m$$

$$LP1_{z2} <> LP2_{z2} = 12.64m > 9.76m$$

A la longitud menor se le debe quitar la distancia desde la cara del talud hasta eje de referencia cero.

$$LL = LP - LCT$$

LL=Longitud libre

LP=longitud Plano hasta la falla

LCT= Longitud hasta la cara del talud

$$LL_1 = 5.10m - 4.56m = 0.54m$$

$$LL_2 = 9.76m - 5.14m = 4.63m$$

De acuerdo al análisis estándar la fuerza que soporta cada perno es de 12.56 ton para una longitud total de 14 m

Cálculo de la longitud de empotramiento

$$LE_1 = 14m - 0.54m = 13.46m$$

$$LE_2 = 14m - 4.63m = 9.37m$$

Tabla 31 Despeje de ecuación de los planos y cálculo de la longitud de empotramiento.

#p	PL1(m) {92.4i; -21.93j; 64.7k}	PL2(m) {-84.8i; -104.02j; 22.3k}	CT (m) {7.7i; -50.38j; 87k}	Longitud menor entre PL1 y PL2	LL(m) Longitud libre LL=(PL1oPL2)-CT	LT(m) Longitud total	LE(m) Longitud de
1	12.30	5.10	4.56	5.10	0.54	14	13.46
2	12.64	9.76	5.14	9.76	4.63	14	9.37
3	12.98	14.43	5.72	12.98	7.26	14	6.74
4	13.32	19.09	6.29	13.32	7.02	14	6.98
5	10.53	4.24	3.89	4.24	0.35	14	13.65
6	10.87	8.90	4.47	8.90	4.43	14	9.57
7	11.21	13.57	5.05	11.21	6.16	14	7.84
8	11.55	18.23	5.63	11.55	5.92	14	8.08
9	11.89	22.90	6.21	11.89	5.68	14	8.32
10	8.77	3.38	3.22	3.38	0.15	14	13.85
11	9.11	8.04	3.80	8.04	4.24	14	9.76
12	9.45	12.71	4.38	9.45	5.07	14	8.93
13	9.78	17.37	4.96	9.78	4.83	14	9.17
14	10.12	22.03	5.54	10.12	4.58	14	9.42
15	10.46	26.70	6.12	10.46	4.34	14	9.66
16	7.34	7.18	3.13	7.18	4.05	14	9.95
17	7.68	11.84	3.71	7.68	3.97	14	10.03
18	8.02	16.51	4.29	8.02	3.73	14	10.27
19	8.36	21.17	4.87	8.36	3.49	14	10.51
20	8.70	25.84	5.45	8.70	3.25	14	10.75
21	9.03	30.50	6.03	9.03	3.01	14	10.99
22	5.91	10.98	3.05	5.91	2.87	14	11.13
23	6.25	15.65	3.62	6.25	2.63	14	11.37
24	6.59	20.31	4.20	6.59	2.39	14	11.61
25	6.93	24.98	4.78	6.93	2.15	14	11.85
26	7.27	29.64	5.36	7.27	1.91	14	12.09
27	7.61	34.30	5.94	7.61	1.67	14	12.33
28	4.48	14.78	2.96	4.48	1.53	14	12.47
29	4.82	19.45	3.54	4.82	1.29	14	12.71
30	5.16	24.11	4.11	5.16	1.05	14	12.95
31	5.50	28.78	4.69	5.50	0.81	14	13.19
32	5.84	33.44	5.27	5.84	0.57	14	13.43
33	6.18	38.11	5.85	6.18	0.33	14	13.67
34	3.06	18.59	2.87	3.06	0.19	14	13.81

Fuente: Propia.

Cálculo de la fuerza de empotramiento.

$$FE_1 = \pi * 0.0254 * 13.46 * 102 = 109.53ton$$

$$FE_2 = \pi * 0.0254 * 9.37 * 102 = 76.28ton$$

Cálculo de la fuerza de un perno:

$$FI_1 = \frac{109.53ton}{3} = 36.51ton$$

$$FI_2 = \frac{76.28ton}{3} = 25.43ton$$

Como los pernos tienen una resistencia mayor de la que pueden soportar porque la resistencia se da a partir de la longitud de empotramiento y si se supera la resistencia del perno este fallará por tracción, por tal motivo se estima que la fuerza total de cada perno es 11.68 toneladas resultado obtenido del análisis estándar.

Tabla 32 Cálculo de la fuerza de empotramiento.

	LE(m) Longitud de empotramiento	FE (ton) $FE = \pi * \phi b * \mu * LE$	Fi(ton) $Fi = LE/3$	Fi(ton) Resistencia real sin optimizar
1	9.97	81.13	27.04	12.56
2	10.20	83.02	27.67	12.56
3	5.30	43.12	14.37	12.56
4	10.43	84.92	28.31	12.56
5	5.77	46.99	15.66	12.56
6	6.06	49.34	16.45	12.56
7	10.67	86.82	28.94	12.56
8	7.09	57.73	19.24	12.56
9	7.38	60.08	20.03	12.56
10	7.67	62.42	20.81	12.56
11	10.90	88.72	29.57	12.56
12	8.41	68.47	22.82	12.56
13	8.70	70.82	23.61	12.56
14	8.99	73.16	24.39	12.56
15	9.28	75.51	25.17	12.56
16	11.13	90.62	30.21	12.56
17	9.73	79.21	26.40	12.56
18	10.02	81.56	27.19	12.56
19	10.31	83.90	27.97	12.56
20	10.60	86.25	28.75	12.56
21	11.88	96.73	32.24	12.56
22	13.37	108.79	36.26	12.56
23	14.05	114.37	38.12	12.56
24	15.34	124.85	41.62	12.56
25	16.63	135.34	45.11	12.56
26	17.92	145.82	48.61	12.56
27	19.20	156.31	52.10	12.56
28	20.49	166.79	55.60	12.56
29	21.08	171.60	57.20	12.56
30	22.37	182.08	60.69	12.56
31	23.66	192.56	64.19	12.56
32	24.92	202.85	67.62	12.56
			$\sum Fi$	401.92

Fuente: Propia.

Tabla 33 Cálculo de la fuerza de empotramiento.

#p	LE(m) Longitud de empotramiento	FE (ton) $FE = \pi * \emptyset b * \mu * LE$	Fi(ton) $Fi = LE/3$	Fi(ton) Resistencia real sin optimizar
1	13.46	109.53	36.51	12.56
2	9.37	76.28	25.43	12.56
3	6.74	54.82	18.27	12.56
4	6.98	56.78	18.93	12.56
5	13.65	111.11	37.04	12.56
6	9.57	77.86	25.95	12.56
7	7.84	63.77	21.26	12.56
8	8.08	65.73	21.91	12.56
9	8.32	67.68	22.56	12.56
10	13.85	112.69	37.56	12.56
11	9.76	79.44	26.48	12.56
12	8.93	72.72	24.24	12.56
13	9.17	74.68	24.89	12.56
14	9.42	76.63	25.54	12.56
15	9.66	78.59	26.20	12.56
16	9.95	81.02	27.01	12.56
17	10.03	81.67	27.22	12.56
18	10.27	83.63	27.88	12.56
19	10.51	85.58	28.53	12.56
20	10.75	87.53	29.18	12.56
21	10.99	89.49	29.83	12.56
22	11.13	90.62	30.21	12.56
23	11.37	92.57	30.86	12.56
24	11.61	94.53	31.51	12.56
25	11.85	96.48	32.16	12.56
26	12.09	98.44	32.81	12.56
27	12.33	100.39	33.46	12.56
28	12.47	101.52	33.84	12.56
29	12.71	103.48	34.49	12.56
30	12.95	105.43	35.14	12.56
31	13.19	107.39	35.80	12.56
32	13.43	109.34	36.45	12.56
33	13.67	111.30	37.10	12.56
34	13.81	112.43	37.48	12.56
			$\Sigma Fi$	427.04

Fuente: Propia.

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + \dots$$

$$\sum FI_{\text{todos los pernos con 14 m}} = 12.57 + 12.57 + 12.57 + \dots = 427.04 \text{ ton}$$

- Análisis con patrón normal optimizado.

Tabla 34 Cálculos de fuerzas optimizadas.

#p	LT(m) Longitud total optimizada	LE(m) a (8m)	Fi(ton) optimizada con 8m	Resistenci a real optimizad
1	8	7.46	20.23	12.56
2	8	3.36	9.12	9.12
3	8	0.74	2.00	2.00
4	8	0.98	2.65	2.65
5	8	7.65	20.76	12.56
6	8	3.56	9.66	9.66
7	8	1.84	4.98	4.98
8	8	2.08	5.63	5.63
9	8	2.32	6.28	6.28
10	8	7.84	21.27	12.56
11	8	3.76	10.20	10.20
12	8	2.93	7.96	7.96
13	8	3.17	8.61	8.61
14	8	3.42	9.27	9.27
15	8	3.66	9.92	9.92
16	8	3.95	10.73	10.03
17	8	4.03	10.95	10.95
18	8	4.27	11.60	11.60
19	8	4.51	12.25	12.25
20	8	4.75	12.90	12.56
21	8	4.99	13.55	12.56
22	8	5.13	13.93	12.56
23	8	5.37	14.58	12.56
24	8	5.61	15.23	12.56
25	8	5.85	15.88	12.56
26	8	6.09	16.53	12.56
27	8	6.33	17.19	12.56
28	8	6.47	17.56	12.56
29	8	6.71	18.21	12.56
30	8	6.95	18.87	12.56
31	8	7.19	19.52	12.56
32	8	7.43	20.17	12.56
33	8	7.67	20.82	12.56
34	8	7.81	21.20	12.56
			$\Sigma F_i$	352.69

Fuente: Propia.

$$\sum \text{Fllongitud optimizada a 8 m} = 12.57 + 12.57 + 12.57 + \dots = 352.46\text{ton}$$

➤ **Resultados utilizando el algoritmo:**

- Análisis estándar con patrón normal

FIGURA 50 Resultados análisis estándar del ejercicio de falla por cuña con patrón tres bolillo.

**ANÁLISIS**

**TIPO DE FALLA** FALLA DE CUÑA

**ANÁLISIS ESTÁNDAR** **ANALIZAR**

DIÁMETRO DEL PERNO #8

μ CONTACTO ROCA 1.02

TIPO DE MATERIAL ACERO 420

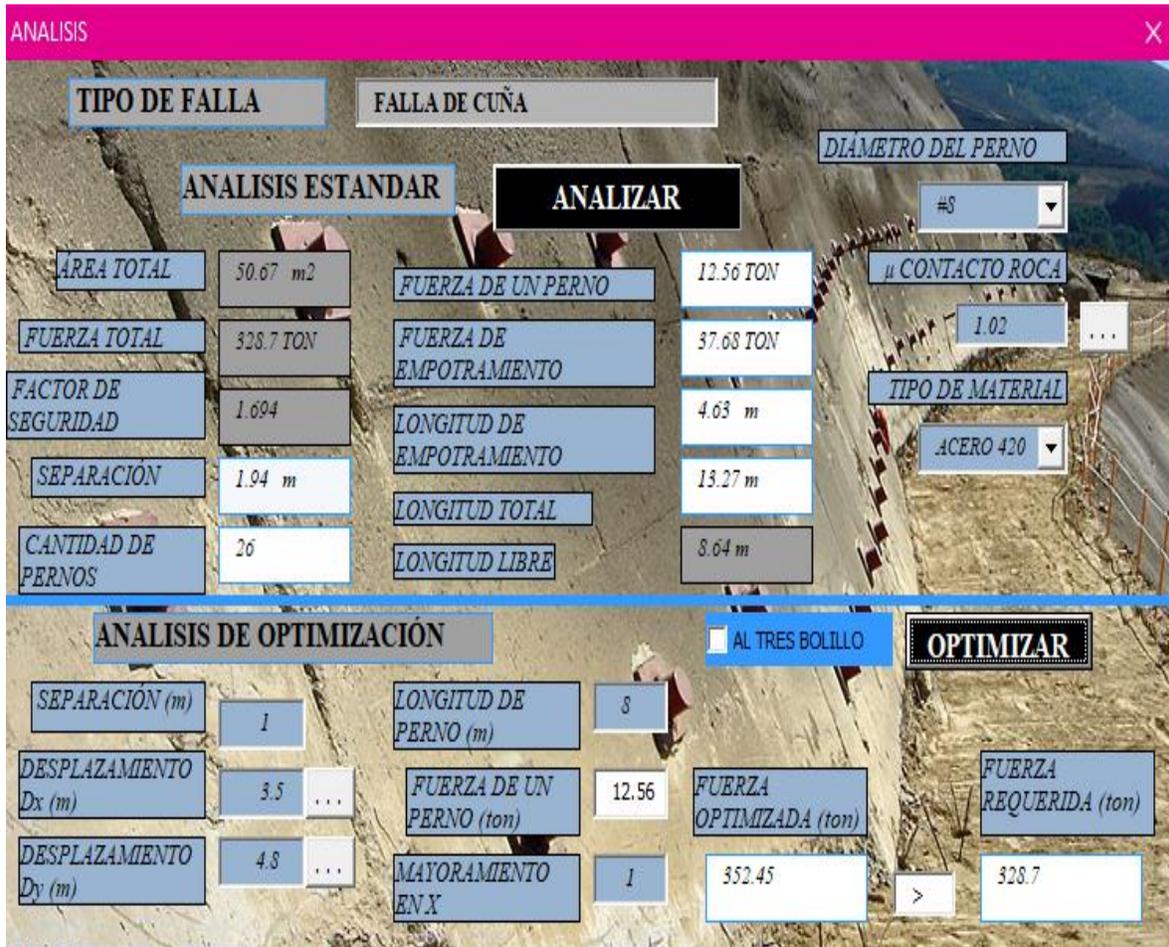
AREA TOTAL	50.67 m <sup>2</sup>	FUERZA DE UN PERNO	12.56 TON
FUERZA TOTAL	328.7 TON	FUERZA DE EMPOTRAMIENTO	37.68 TON
FACTOR DE SEGURIDAD	1.694	LONGITUD DE EMPOTRAMIENTO	4.63 m
SEPARACION	1.94 m	LONGITUD TOTAL	13.27 m
CANTIDAD DE PERNOS	26	LONGITUD LIBRE	8.64 m

**ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN**  AL TRES BOLILLO **OPTIMIZAR**

SEPARACION (m)	1	LONGITUD DE PERNO (m)	14
DESPLAZAMIENTO Dx (m)	3.5 ...	FUERZA DE UN PERNO (ton)	12.56
DESPLAZAMIENTO Dy (m)	4.8 ...	MAYORAMIENTO EN X	1
		FUERZA OPTIMIZADA (ton)	427.04
		FUERZA REQUERIDA (ton)	328.7

Fuente: Propia.

FIGURA 51 Análisis optimizado con patron normal optimizado 8m y separacion de 1m.



Fuente: Propia.

Al realizar un movimiento en la colocación de pernos original se observa que la separacion de los pernos se debe disminuir con el fin de que se puedan ubicar mas pernos en el area de falla delimitada.

- Análisis al tres bolillo sin optimizar

$$Sp=1$$

$$Dx=3.5m$$

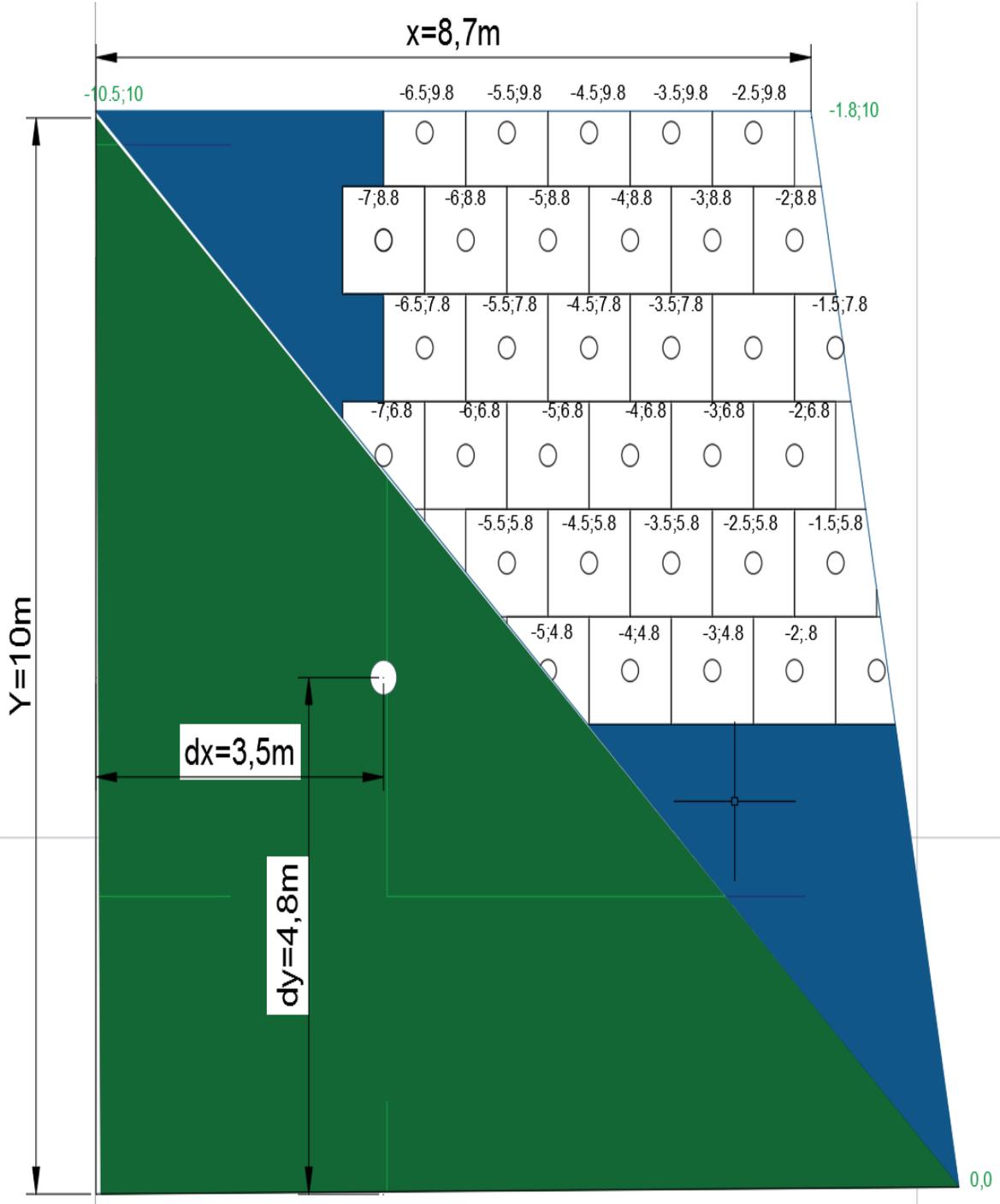
$$Dy=4.8m$$

Tabla 35 Lista Cordenadas del patrón sin tres bolillo con dx y dy.

#p	x	y	#p	x	y	#p	x	y
1	-7	6.8	11	-3	4.8	21	-5.5	9.8
2	-7	8.8	12	-3	6.8	22	-4.5	5.8
3	-6	6.8	13	-3	8.8	23	-4.5	7.8
4	-6	8.8	14	-2	4.8	24	-4.5	9.8
5	-5	4.8	15	-2	6.8	25	-3.5	5.8
6	-5	6.8	16	-2	8.8	26	-3.5	7.8
7	-5	8.8	17	-6.5	7.8	27	-3.5	9.8
8	-4	4.8	18	-6.5	9.8	28	-2.5	5.8
9	-4	6.8	19	-5.5	5.8	29	-2.5	7.8
10	-4	8.8	20	-5.5	7.8	30	-2.5	9.8
						31	-1.5	5.8
						32	-1.5	7.8

Fuente: Propia.

FIGURA 52 Distribución de pernos con patrón al tres bolillo con un dx 3.5 m dy 4.8m



Fuente: Propia.

Evaluación de las cordenas con la ecuación del plano 1:

$$LP1_{z1} = \{92.4X; -21.93Y; 64.7Z\} = \left[ \frac{92.4 * (-7) - 21.93 * 6.8}{-64.7} \right] = z1 = 12.30m$$

$$LP1_{z2} = \{92.4X; -21.93Y; 64.7Z\} = \left[ \frac{92.4 * (-7) - 21.93 * 8.8}{-64.7} \right] = z1 = 12.98m$$

Evaluación de las cordenas con la ecuación del plano 2:

$$LP2_{z1} = \{-84.8i; -104.02j; 22.3k\} = \left[ \frac{-84.8 * (-7) - 104.02 * 6.8}{-22.3} \right] = z1$$

**= 5.10m**

$$LP2_{z2} = \{-84.8i; -104.02j; 22.3k\} = \left[ \frac{-84.8 * (-7) - 104.02 * 8.8}{-22.3} \right] = z1$$

**= 14.43m**

Evaluación de las cordenas con la cara del talud´:

$$L_{z1} = \{7.7i; -50.38j; 87k\} = \left[ \frac{7.7 * (-7) - 50.38 * 6.8}{-87} \right] = z1 = 4.56m$$

$$L_{z2} = \{7.7i; -50.38j; 87k\} = \left[ \frac{7.7 * (-7) - 50.38 * 8.8}{-87} \right] = z1 = 5.72m$$

Longitud libre calculada

LL= (LP1 o PL2) – Lptalud

LL: Longitud libre del perno

LP1:Longitud del perno en el plano 1

LP2:Longitud del perno en el plano 2

Comparación de longitudes de los planos 1 y 2 para seleccionar la menor.

$$LP1_{z1} <> LP2_{z1} = 12.30m > 5.10m$$

$$LP1_{z2} <> LP2_{z2} = 12.98m < 14.43m$$

A la longitud menor se le debe quitar la distancia desde la cara del talud hasta eje de referencia cero.

$$LL=LP-LCT$$

LL=Longitud libre

LP=longitud Plano hasta la falla

LCT= Longitud hasta la cara del talud

$$LL_1 = 5.10 m - 4.56m = 0.54m$$

$$LL_2 = 12.98m - 12.98m = 7.26m$$

Cálculo de la longitud de empotramiento con una longitud de 14m

$$LE_1 = 14m - 0.54m = 13.46m$$

$$LE_2 = 14m - 7.26m = 6.74m$$

Tabla 36 Cálculo de la longitud libre y longitud de empotramiento.

#p	PL1(m) {92.4i; -21.93j; 64.7k}	PL2(m) {-84.8i; -104.02j; 22.3k}	CT (m) {7.7i; -50.38j; 87k}	Longitud menor entre PL1 y PL2	LL(m) Longitud libre LL=(PL1oPL2)-CT	LT(m) Longitud total	LE(m) Longitud de empotrami
1	12.30	5.10	4.56	5.10	0.54	14	13.46
2	12.98	14.43	5.72	12.98	7.26	14	6.74
3	10.87	8.90	4.47	8.90	4.43	14	9.57
4	11.55	18.23	5.63	11.55	5.92	14	8.08
5	8.77	3.38	3.22	3.38	0.15	14	13.85
6	9.45	12.71	4.38	9.45	5.07	14	8.93
7	10.12	22.03	5.54	10.12	4.58	14	9.42
8	7.34	7.18	3.13	7.18	4.05	14	9.95
9	8.02	16.51	4.29	8.02	3.73	14	10.27
10	8.70	25.84	5.45	8.70	3.25	14	10.75
11	5.91	10.98	3.05	5.91	2.87	14	11.13
12	6.59	20.31	4.20	6.59	2.39	14	11.61
13	7.27	29.64	5.36	7.27	1.91	14	12.09
14	4.48	14.78	2.96	4.48	1.53	14	12.47
15	5.16	24.11	4.11	5.16	1.05	14	12.95
16	5.84	33.44	5.27	5.84	0.57	14	13.43
17	11.93	11.67	5.09	11.67	6.57	14	7.43
18	12.60	21.00	6.25	12.60	6.35	14	7.65
19	9.82	6.14	3.85	6.14	2.29	14	11.71
20	10.50	15.47	5.00	10.50	5.49	14	8.51
21	11.18	24.80	6.16	11.18	5.01	14	8.99
22	8.39	9.94	3.76	8.39	4.64	14	9.36
23	9.07	19.27	4.92	9.07	4.16	14	9.84
24	9.75	28.60	6.07	9.75	3.68	14	10.32
25	6.96	13.75	3.67	6.96	3.30	14	10.70
26	7.64	23.07	4.83	7.64	2.82	14	11.18
27	8.32	32.40	5.98	8.32	2.34	14	11.66
28	5.54	17.55	3.58	5.54	1.96	14	12.04
29	6.21	26.88	4.74	6.21	1.48	14	12.52
30	6.89	36.21	5.90	6.89	1.00	14	13.00
31	4.11	21.35	3.49	4.11	0.62	14	13.38
32	4.79	30.68	4.65	4.79	0.14	14	13.86
33	3.06	18.59	2.87	3.06	0.19	14	13.81

Fuente: Propia.

Cálculo de la fuerza de empotramiento:

$$FE_1 = \pi * 0.0254 * 13.46 * 102 = 109.53ton$$

$$FE_2 = \pi * 0.0254 * 6.74 * 102 = 54.82on$$

Calculo de la fuerza de cada perno.

$$FI_1 = \frac{109.53ton}{3} = 36.51ton$$

$$FI_2 = \frac{54.82ton}{3} = 18.27ton$$

Tabla 37 Cálculo de la fuerza de empotramiento.

#p	LE(m) Longitud de empotramiento	FE (ton) $FE = \pi * \emptyset b * \mu * LE$	Fi(ton) $Fi = LE/3$	Fi(ton) Resistencia real sin optimizar
1	16.25	132.28	44.09	12.56
2	16.73	136.19	45.40	12.56
3	16.16	131.56	43.85	12.56
4	16.64	135.47	45.16	12.56
5	15.60	126.93	42.31	12.56
6	16.08	130.84	43.61	12.56
7	16.56	134.75	44.92	12.56
8	15.51	126.21	42.07	12.56
9	15.99	130.12	43.37	12.56
10	16.47	134.03	44.68	12.56
11	15.42	125.49	41.83	12.56
12	15.90	129.40	43.13	12.56
13	16.38	133.31	44.44	12.56
14	15.33	124.77	41.59	12.56
15	15.81	128.68	42.89	12.56
16	16.29	132.59	44.20	12.56
17	16.45	133.88	44.63	12.56
18	16.93	137.79	45.93	12.56
19	15.88	129.25	43.08	12.56
20	16.36	133.16	44.39	12.56
21	16.84	137.07	45.69	12.56
22	15.79	128.53	42.84	12.56
23	16.27	132.44	44.15	12.56
24	16.75	136.34	45.45	12.56
25	15.70	127.81	42.60	12.56
26	16.18	131.72	43.91	12.56
27	16.66	135.62	45.21	12.56
28	15.61	127.09	42.36	12.56
29	16.09	131.00	43.67	12.56
30	16.57	134.90	44.97	12.56
31	15.53	126.37	42.12	12.56
32	16.01	130.27	43.42	12.56
33	16.23	132.12	44.04	12.56
			$\Sigma Fi$	414.48

Fuente: Propia.

$$\sum FI = FI_1 + FI_2 + FI_3 + \dots$$

$$\sum FI \text{ todos los pernos con } 14 \text{ m} = 12.57 + 12.57 + 12.57 + \dots = 414.48 \text{ ton}$$

- Análisis con patrón al tres bolillo optimizado.

Tabla 38 Cálculo con longitud optimizada de 8m.

#p	LT(m) Longitud total optimizada	LE(m) a (8m)	Fi(ton) optimizada con 8m	Resistencia real optimizada
1	8	7.46	20.23	12.56
2	8	0.74	2.00	2.00
3	8	3.57	9.67	9.67
4	8	2.08	5.63	5.63
5	8	7.85	21.29	12.56
6	8	2.93	7.96	7.96
7	8	3.42	9.27	9.27
8	8	3.95	10.73	10.73
9	8	4.27	11.60	11.60
10	8	4.75	12.90	12.56
11	8	5.13	13.93	12.56
12	8	5.61	15.23	12.56
13	8	6.09	16.53	12.56
14	8	6.47	17.56	12.56
15	8	6.95	18.87	12.56
16	8	7.43	20.17	12.56
17	8	1.43	3.87	3.87
18	8	1.65	4.47	4.47
19	8	5.71	15.48	12.56
20	8	2.51	6.80	6.80
21	8	2.99	8.10	8.10
22	8	3.36	9.13	9.13
23	8	3.84	10.43	10.43
24	8	4.32	11.73	11.73
25	8	4.70	12.76	12.56
26	8	5.18	14.07	12.56
27	8	5.66	15.37	12.56
28	8	6.04	16.40	12.56
29	8	6.52	17.70	12.56
30	8	7.00	19.00	12.56
31	8	7.38	20.03	12.56
32	8	7.86	21.33	12.56
33	8	7.81	21.20	12.56
			$\Sigma F_i$	350.02

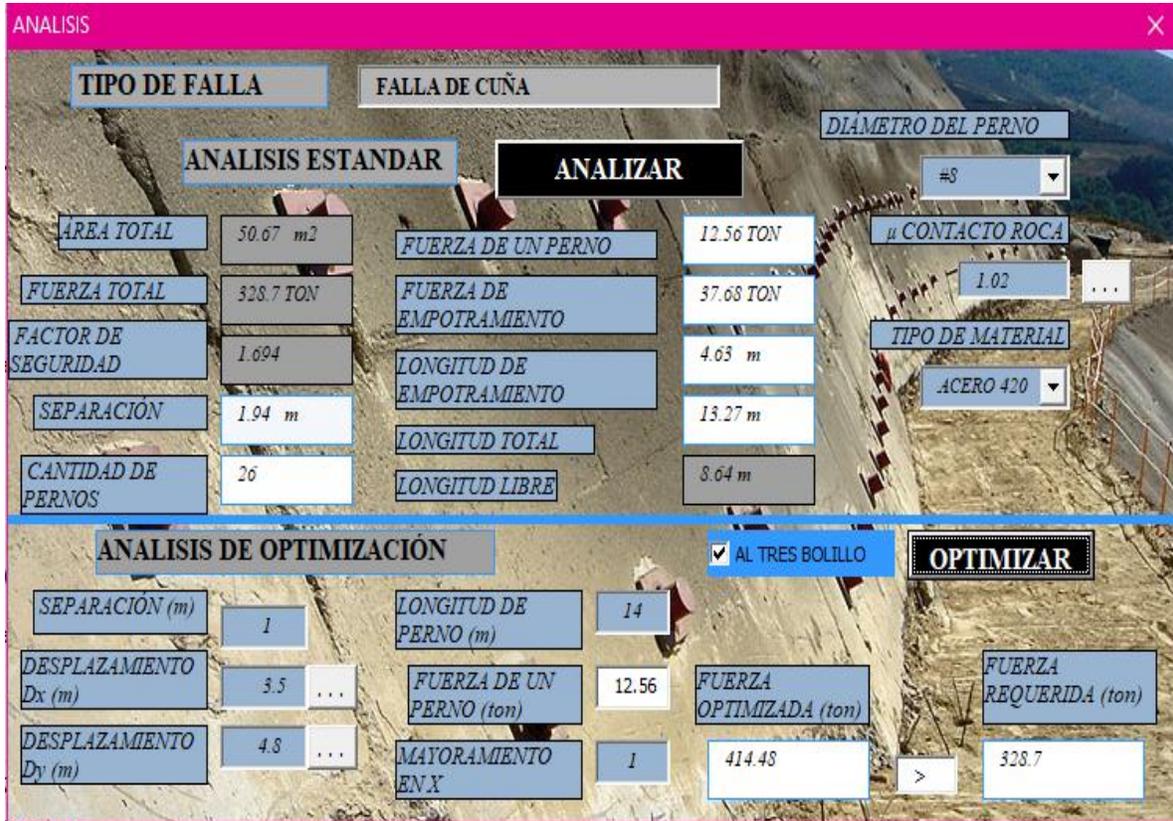
Fuente: Propia.

$$\sum F \text{ longitud optimizada a } 8 \text{ m} = 12.57 + 2 + 9.67 + \dots = 650.02 \text{ ton}$$

➤ **Resultados utilizando el algoritmo:**

- Análisis estándar con patrón al tres bolillo.

FIGURA 53 Resultados análisis estándar del ejercicio de falla por cuña con patrón tres bolillo.



Fuente: Propia.

- Analisis con patrón al tres bolillo optimizado.

FIGURA 54 Resultados análisis optimizado del ejercicio de falla por cuña con patrón tres bolillo



Fuente: Propia.

### 7.3 Evaluación de los componentes resistentes de los diferentes sistemas de distribución de pernos utilizados como sistema de sostenimiento de bloques.

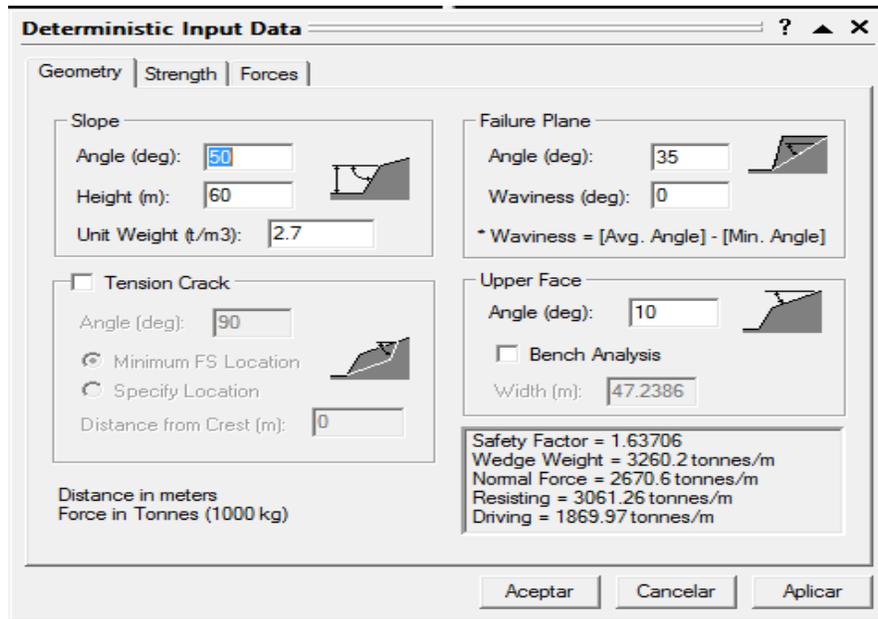
En primer lugar, para determinar el bloque de roca potencialmente inestable se utilizan las expresiones matemáticas que definen las orientaciones de las discontinuidades y de las intersecciones entre discontinuidades.

Los anclajes presentan gran fiabilidad en el sostenimiento de taludes ante distintos mecanismos de falla, esto se debe a:

- La densificación que realiza sobre el material inestable circundante a la sección de excavación.
- La modificación de la superficie de falla inducida por la redistribución de esfuerzos luego de realizada la excavación subterránea.

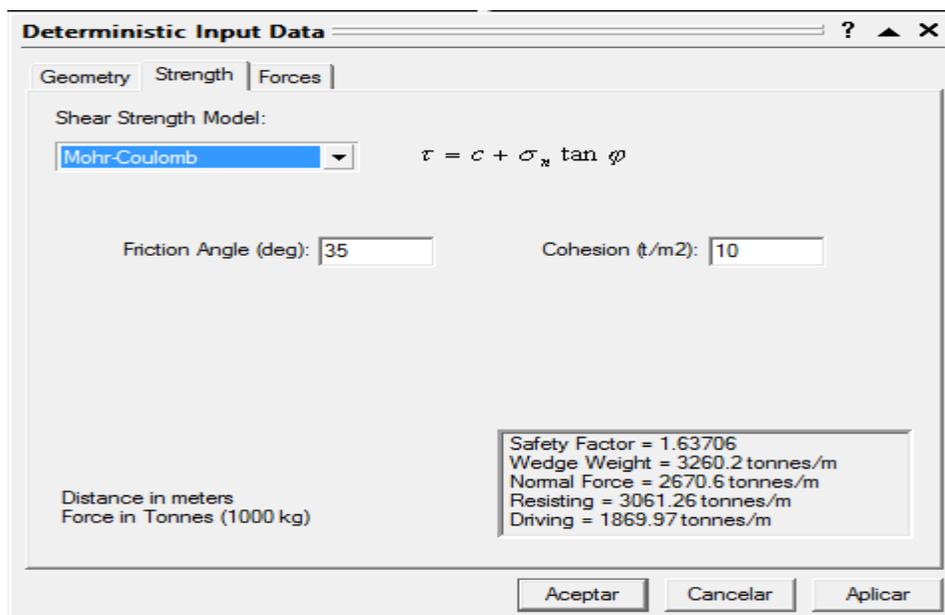
Se modeló en el algoritmo programado el siguiente ejercicio, el cual corresponde a una modelación en RocPlane® bajo la condición que se ha denominado escenario inicial así:

FIGURA 55 Modelación escenario inicial en RocPlane®



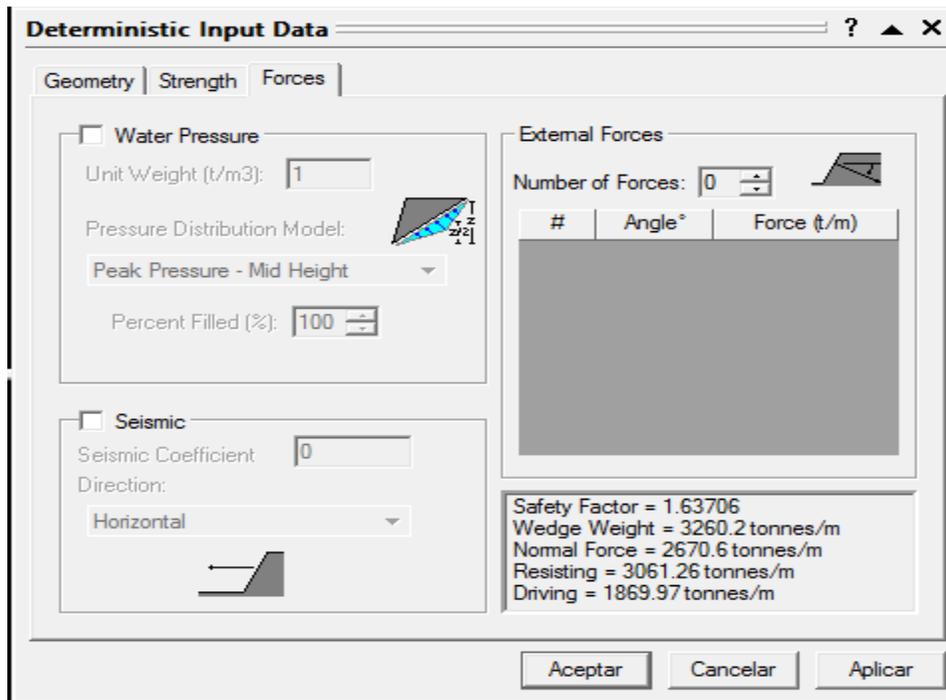
Fuente: Propia.

FIGURA 56 Modelación escenario inicial en RocPlane®



Fuente: Propia.

FIGURA 57 Modelación escenario inicial en RocPlane®



Fuente: Propia.

Posteriormente al ejecutar el comando optimizar se obtuvieron los siguientes resultados:

En la optimización tiene que para una separación de 2m, se debe utilizar una longitud libre de 24 m para cumplir con la estabilización , trabajando con el mismo diámetro y el mismo material.

Comparando los 2 resultados , en cuanto a las longitudes de los pernos obtenidas se evidencia una reducción considerable en la longitud total utilizando la opción optimizar del programa, esto cambia la separación del sistema de anclaje.

#### **7.4 Análisis de la eficiencia de los anclajes respecto a la variación en el tamaño de los bloques.**

El diseño de anclajes con la finalidad de mitigar el mecanismo de falla en cuña, finaliza con la revisión y chequeo del patrón de anclajes adoptado. La programación de la técnica para determinar los bloques críticos junto con las consideraciones particulares de las fuerzas inestabilizantes y resistentes, permiten un análisis de patrón de anclajes óptimo durante la etapa de revisión y chequeo del sistema de anclajes. Algunas de las fuerzas activas que actúan sobre la cuña de roca son: peso propio de la cuña, peso propio del concreto lanzado, empuje del agua, empuje de la roca circundante y aceleración sísmica.

Con el uso del método convencional a mayor tamaño se tiene una mayor longitud libre y es constante sin importar la altura del talud, considerando un pie de talud infinito.

Con la revisión de los sistemas de anclaje calculada por el programa, se tiene con mayor certeza el funcionamiento de los anclajes en el área de influencia de la falla. Se tuvo una distribución del anclaje únicamente en el área de influencia de la falla. A manera de ejemplo, en los ejercicios realizados, se pudo concluir que la instalación al tres bolillo se distribuye mejor el sistema de anclaje.

## 8. CONCLUSIONES

Con la elaboración del documento investigativo, se desarrolló un programa que analiza de forma convencional, usada para estimar la cantidad de pernos, separación y longitud, adicionalmente la programación realizada ofrece la posibilidad de optimizar o revisar distintas configuraciones de los sistemas de anclaje. Dentro de las opciones de chequeo está la posibilidad de constatar las instalaciones de los anclajes al tres bolillo y debido a la certeza en la geometría del bloque se puede considerar la fuerza de trabajo mayor a la comunmente utilizada, dado que en la actualidad los programas de cómputo se limitan a entregar datos procesados a través de consideraciones predefinidas, sin permitir un análisis particular diferente al planteado por el desarrollador del programa.

Se logró determinar al momento de optimizar que la longitud total de pernos se ahorra en términos de costos en el sistema de sostenimiento ya que el trabajo de cada perno varia de acuerdo a la posición y la longitud de empotramiento.

El análisis de optimización cuenta con la incorporación de cálculos trigonométricos que permiten determinar las longitudes libres y posiciones de pernos en fallas planares, a su vez se aplican cálculos matriciales para definir las ecuaciones del plano y conocer las longitudes libres y posiciones de pernos en cuñas.

Cuando en el ejercicio profesional se estudia este sistema de soportes en masas rocosas heterogéneas se presentan limitaciones , ya que actualmente la teoría de elasticidad es insuficiente para el análisis de estos casos.

Resultados del ejercicio 1, al efectuar el análisis por metro lineal se puede concluir que ambos métodos tienen la misma separación y se puede optimizar la longitud total reduciéndola de 11 metros a 9 metros.

Cuando se utiliza un ancho de talud de 5 metros y mayorando la carga requerida 5 veces, la separación se ve afectada 10 centímetros ya que en el análisis por metro lineal se obtuvo una separación de 1.3 metros y en el análisis con un ancho de banca de 5 metros se obtuvo una separación de 1.2 metros, lo cual implica mayor cantidad de pernos como sistema de sostenimiento porque se estaría adicionando 1 perno por metro lineal. Por otra parte se pudo optimizar aún más la longitud total pasando de 9 metros a 8 metros.

Al efectuar el análisis con patrón al tres bolillo se obtuvo una reducción de 4 pernos con la misma separación de 1.2 metros y con una longitud total de 9 metros. Por consiguiente con el patrón normal se obtuvo una fuerza optimizada de

474.65 toneladas producto de 45 pernos con 8 metros de longitud y con el patrón al tres bolillo se obtuvo una fuerza optimizada de 463.17 toneladas producto de 41 pernos con 9 metros de longitud.

Con el fin de conocer el comportamiento del sistema de anclaje se modificó el punto de origen a 1.2 metros en X y 3 metros en Y, para el análisis con patrón normal la separación disminuyó a 0.9 metros con una longitud optimizada de 9 metros aportando una fuerza optimizada de 453.1 toneladas producto de 40 pernos. De lo cual se puede concluir que la reducción en la separación influye directamente en el aumento de la fuerza optimizada. Para el análisis con patrón al tres bolillo se modificó el punto de origen a 1.8 metros en X y 1.5 metros en Y, se obtuvo una separación de 0.9 metros con una longitud optimizada de 10 metros aportando una fuerza optimizada de 467.2 toneladas producto de 40 pernos. De lo cual se infiere que al reducir el área de aplicación de los pernos se limita la optimización solo a 1 metro.

Con la optimización en la falla planar se identificó que con el análisis con patrón normal y con la misma longitud total de pernos tiene mayor eficiencia la fuerza requerida y de esta manera reducir la cantidad de pernos.

En el ejercicio 2 al efectuar el análisis estándar se calcula una separación de 1.94 metros con una fuerza de perno de 12.56 toneladas, al realizar los análisis de optimización la separación se reduce considerablemente a 1.2 metros con una longitud optimizada de 8 metros aportando una fuerza optimizada de 340.3 toneladas producto de 32 pernos. Por otra parte el análisis con patrón al tres bolillo se obtuvo la misma separación, fuerza optimizada y fuerza requerida esto indica que tienen el mismo comportamiento como sistema de anclaje.

Al realizar una modificación en el punto de origen de los pernos a 3.5 metros en X y 4.8 metros en Y, para el análisis con el patrón normal se obtuvo una separación de 1 metro con una longitud optimizada de 8 metros con una fuerza optimizada 352.45 toneladas producto de 34 pernos. Por otra parte con el análisis con el patrón al tres bolillo se obtuvo una separación de 1 metro con una longitud optimizada de 8 metros y una fuerza requerida de 345.05 toneladas producto de 33 pernos, de lo cual se puede concluir que con el análisis con patrón al tres bolillo cumple con la fuerza requerida con un perno menos. Cuando se identificó la relación entre la estructura de los anclajes y las características de la masa a sostener se pudo establecer que los anclajes distribuidos con un patrón al tres bolillo se optimizan mejor y los anclajes con patrón normal presentan mayor resistencia dado que al patrón al tres bolillo se usan menos anclajes y mayor longitud total en cambio con el patrón normal utiliza mayor cantidad de pernos con una longitud menor.

## 9. RECOMENDACIONES

Al diseñar un sistema de anclajes la premisa fundamental es realizar un análisis profundo del tipo de anclaje que mejor se acomode a las condiciones del terreno, de esta manera se puede asegurar que los elementos diseñados mejorarán las condiciones de seguridad del talud construido.

Se sabe que la tensión de prueba se conserva durante cierto tiempo y que al asegurar la armadura de la estructura se produce un desplazamiento de la misma que corresponde a una pérdida de tensión<sup>15</sup>. En los anclajes instalados en suelos de buena calidad las pérdidas oscilan entre el 2% y 3% de la carga máxima.

Se debe tener particular cuidado para el uso indiscriminado de esta herramienta debido a que no tiene las suficientes corridas y comparaciones con ejercicios para poder garantizar el correcto funcionamiento del algoritmo.

El algoritmo permite conocer la fuerza de trabajo de un perno ubicado en posición X y modificar las fuerzas a las cuales trabaja.

---

<sup>15</sup> UCAR NAVARRO. Roberto . Manual de anclajes en ingeniería civil. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid. Pág. 35

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYALA. Francisco. Manual de Taludes. Instituto geologico y minero de España, 1991.
- BIENIAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. Trans S Afr Inst Civ Eng, 1973. 15, 335-342.
- CAÑAS VESGA, Daniel Enrique. Anclajes en la mecánica de rocas con aplicación a túneles. Trabajo de investigación Maestría en Geotecnia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, 2013. 119 h
- CRUZ Daniel, VLACHOPOULOS Nicholas, FORBES Bradley (2016) The Geo-Mechanical Response of Axially Loaded Rock Bolts using Fiber Optic Technology. 12 h.
- DUQUE ESCOBAR. Gonzalo. Manual de geología para ingenieros
- EL CONGRESO DE COLOMBIA. Gestión del riesgo, responsabilidad, principios, definiciones y Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. LEY 1229. 2008.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Reglamento Colombiano de construcciónsismo resistente. NSR-10, Segunda actualización, Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010.
- PALLEROLA COMAMALA. Joan. Las macros en Microsoft Excel. Alfaomega, 2007.
- SÁNCHEZ C. CÉSAR, URREGO H. LUIS, Metodología para la Evaluación de Riesgo en Corredores Viales. Universidad Javeriana, 2011.
- SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá: Imprenta nacional de Colombia, 2015.
- SUAREZ. Jaime. Pernos, Clavos y micropilotes. Deslizamientos: Análisis geotécnico
- UCAR NAVARRO. Roberto . Manual de anclajes en ingeniería civil. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2004.

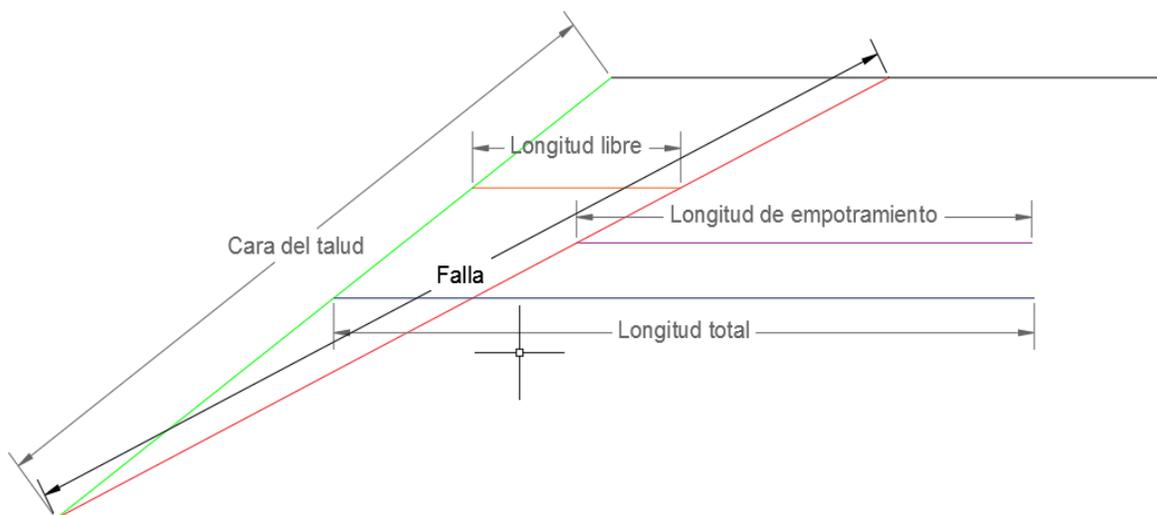
## ANEXO 1.

### Explicación de como funciona el algoritmo en su programación:

El algoritmo en su programación cuenta con la incorporación de la ecuaciones anteriormente descritas en el numeral 5.2, las cuales permiten calcular los resultados de fuerzas de pernos (FI) y las longitudes total (LT) como de empotramiento (LE), esto para el analisis estandar.

El análisis optimizado utiliza la trigonometría para el cálculo de las longitudes libres y posiciones de los pernos definiendo las coordenadas de cada perno en el espacio de influencia de la falla esto para la falla planar.

FIGURA 58 Esquema de longitudes en una falla planar.



Fuente: Propia.

En las fallas por cuña se determinana la posicion espacial del perno X y Y, la longitud libre es el producto del despeje de las tres ecuaciones de los planos que conforman la cuña, estas ecuaciones se obtienes del desarrollo de matrices de cordenadas, facilitadas por el software especializado Sewdge y resueltas mediante el producto cruz.

$$Ax + By * Cz + d = 0$$

Ecuación 1 :Ecuación del plano

Remplazando los valores de X y Y en la anterior ecuación se obtienen valores de Z que viene siendo la profundida desde el plano hasta el eje de referencia cero.

El algritmo como sistema de formulacion y programacion tiene incorporado las formulas como la función =Si() y la función =extrae() como sistema de

reconocimiento y selección de datos, a su vez se utilizan formulas básicas como suma, resta, división y multiplicación.

En la parte de programación se utilizan condicionales de si=IF.

IF A>B THEN (si A es mayor que B entonces.

A="Es verdadero"

ELSE (si no)

B= " Es verdadero"

END IF (fin de la condicion si)

Esta condicion es utilizada con el fin de que los resultados cumplan con los requisitos que generan los cálculos.

El ciclo FOR que cumple la función de buscar cordenadas que se encuentren en el área de influencia de las fallas.

FOR i =i + dx TO x STEP sp

END i

i= Acumulador de datos

dx= Donde empieza el cilo a contar datos

x= hasta donde se cuenta los datos

sp= separación de los datos dentro del ciclo.

END i= fin del ciclo

Esta ecuacion que es un ciclo FOR al combinarla con otro ciclo FOR genera el bucle, que pemite generar las cordenadas de X y Y, de esta forma se conocen cuantas Y hay por cada X.( X1,Y1; X1,Y2; X1,Y3...)

FOR i = i + dx TO x STEP sp

FOR k = k + dy TP y STEP sp

END k

END i

Para el ingreso de datos y extracción de información se incorporan botes de texto definidos de acuerdo a lo requerido.

## **ANEXO 2.**

### **MANUAL DE USO PARA EL ALGORÍTMO OPTIMIZACIÓN DE LA LONGITUD TOTAL DE ANCLAJES PARA EL SOSTENIMIENTO DE BLOQUES DE ROCA EN TALUDES**

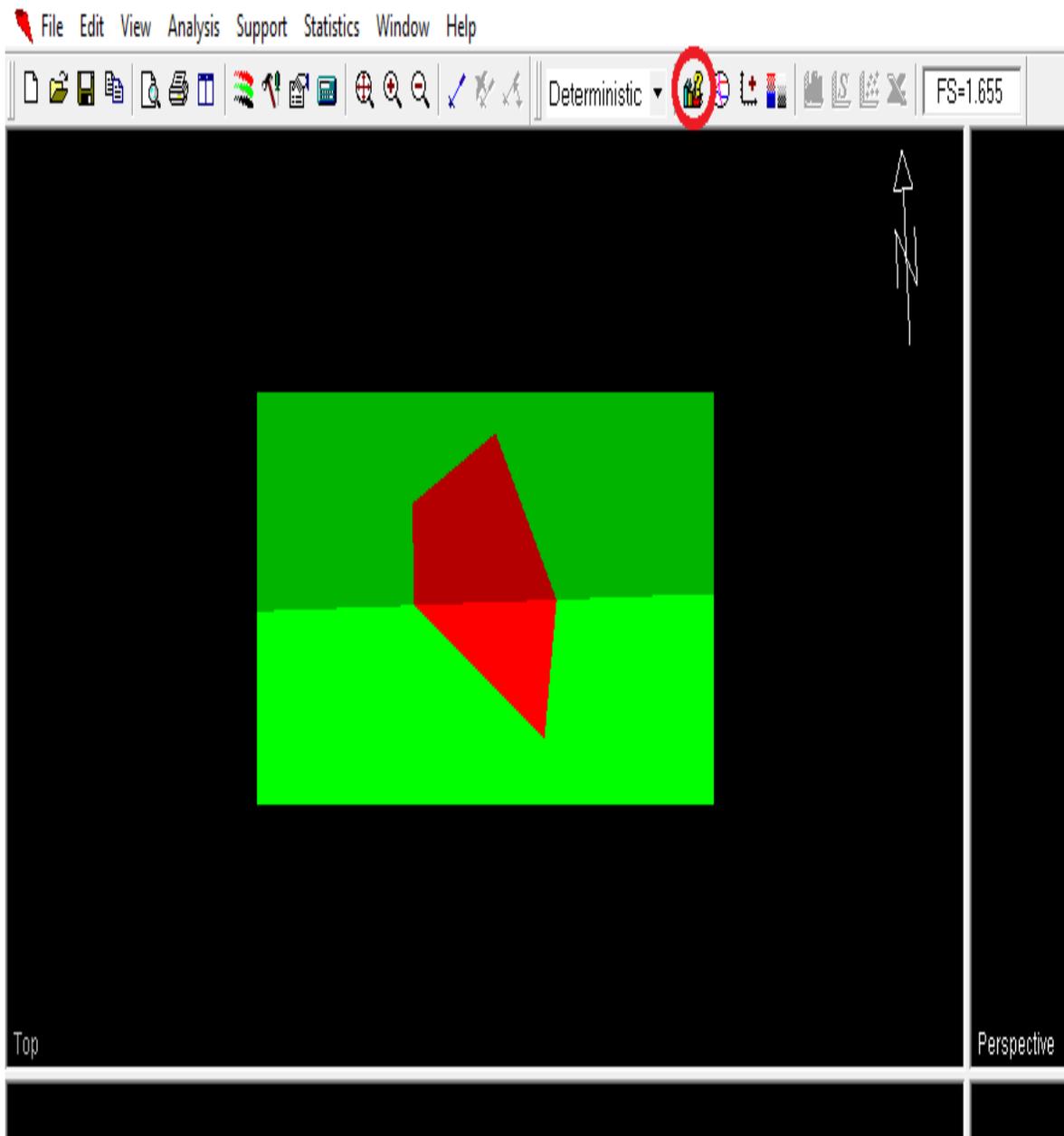
#### ***Recomendaciones de uso***

1. El algoritmo se debe ejecutar en equipos cuya configuración regional este dada por cambio de caracteres entres puntos y comas.
2. Para las cuñas se recomienda optimizar con cálculos que esten bajo el ESCENARIO INICIAL, descrito en el numeral 7.2 del cuerpo de la monografía, ya que las demás condiciones deforman el terreno gradualmente.
3. Para las fallas planares se debe tener en cuenta que el análisis de área total se está estimando un talud con ancho de banca a 10 metros.
4. Para el manejo como tal del algoritmo se recomienda emplear el siguiente manual de instrucciones.
5. Los datos que se encuentran sombreados son datos que se han estimado por defecto, pero pueden ser modificados a conveniencia del usuario.

**MANUAL:**

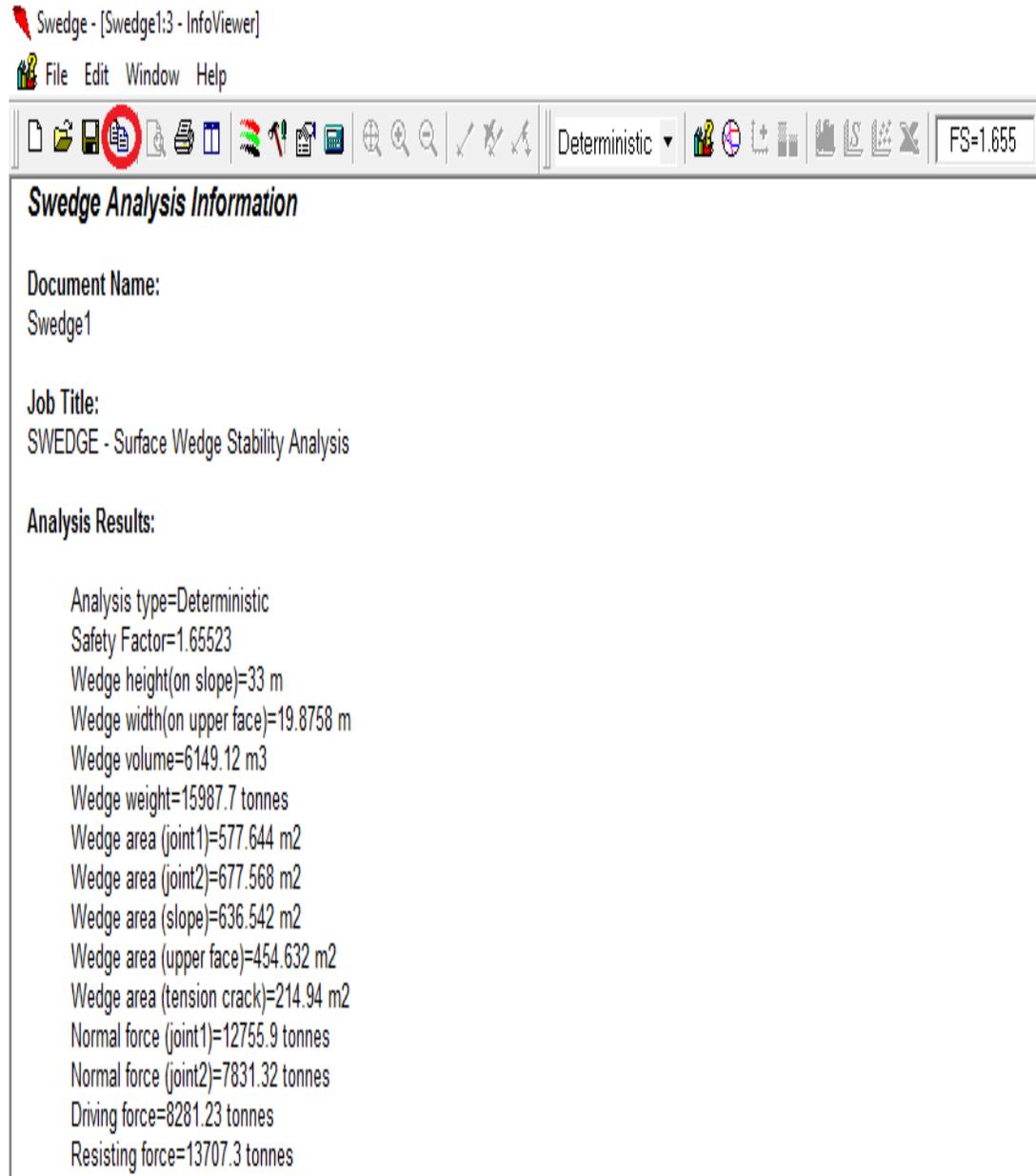
1. Ejecutar la modelación en Swedge o Rocplane de acuerdo a las características del ejercicio.

Imagen 1. Después de la modelación, ingresar a la pestaña señalada en el círculo rojo (Boton Info viewer) para obtener los resultados del modelo.



## 2. Exportar de los software especializados, los resultados de la modelación así:

Imagen 2. Con los resultados de la modelación, exportar con la pestaña señalada en el círculo rojo (Boton Copy picture) los mismos para ingresarlos al algoritmo.



The image shows a screenshot of the Swedge software interface. The title bar reads "Swedge - [Swedge1:3 - InfoViewer]". The menu bar includes "File", "Edit", "Window", and "Help". The toolbar contains various icons, with the "Copy picture" icon (a red circle around a document icon) highlighted. The main window displays "Swedge Analysis Information" with the following details:

**Document Name:**  
Swedge1

**Job Title:**  
SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis

**Analysis Results:**

- Analysis type=Deterministic
- Safety Factor=1.65523
- Wedge height(on slope)=33 m
- Wedge width(on upper face)=19.8758 m
- Wedge volume=6149.12 m<sup>3</sup>
- Wedge weight=15987.7 tonnes
- Wedge area (joint1)=577.644 m<sup>2</sup>
- Wedge area (joint2)=677.568 m<sup>2</sup>
- Wedge area (slope)=636.542 m<sup>2</sup>
- Wedge area (upper face)=454.632 m<sup>2</sup>
- Wedge area (tension crack)=214.94 m<sup>2</sup>
- Normal force (joint1)=12755.9 tonnes
- Normal force (joint2)=7831.32 tonnes
- Driving force=8281.23 tonnes
- Resisting force=13707.3 tonnes

3. Pegar los datos de la modelación en el algoritmo en la celda que se especifica a continuación:

Imagen 3. Anexo de datos en celda B6, para que el algoritmo pueda reconocer los datos

The image shows a spreadsheet interface with a data export window titled "Datos exportados de roscience". The window is overlaid on a grid with columns A through J and rows 1 through 38. Cell B6 is highlighted in yellow and contains the text "RocPlane Analysis Information". The data export window contains the following information:

**Datos exportados de roscience**

RocPlane Analysis Information

Document Name:  
RocPlane1

Job Title:  
RocPlane - Planar Wedge Stability Analysis

Analysis Results:

Analysis type = Deterministic  
Normal Force = 2670.6 t/m  
Resisting Force = 3061.26 t/m  
Driving Force = 1869.97 t/m  
Factor of Safety = 1.63706

Geometry:

Slope Height = 20 m  
Wedge Weight = 3260.2 t/m  
Wedge Volume = 1207.48 m<sup>3</sup>/m  
Rock Unit Weight = 2.7 t/m<sup>3</sup>  
Slope Angle = 50°  
Failure Plane Angle = 35°  
Upper Face Angle = 10°  
Bench Width : Not Present  
Waviness = 0°

Intersection Point (B) of slope and upper face = ( 50.346 , 60 )  
Intersection point (C) of failure plane and upper face = ( 97.5845 , 68.3294 )  
Failure plane length ( Origin --> C ) = 119.129 m  
Slope length ( Origin --> B ) = 78.2455 m

#### 4. Ejecutar el análisis de resultados en algoritmo de la siguiente manera:

Imagen 4. Inicio de análisis en el algoritmo, haciendo click en el botón ANALIZAR señalado en la imagen dentro del círculo rojo.

The image shows a software interface for RocPlane Analysis Information. The dialog box is titled "Datos exportados de roscience" and contains the following information:

**RocPlane Analysis Information**

Document Name:  
RocPlane1

Job Title:  
RocPlane - Planar Wedge Stability Analysis

Analysis Results:

- Analysis type = Deterministic
- Normal Force = 2670.6 t/m
- Resisting Force = 3061.26 t/m
- Driving Force = 1869.97 t/m
- Factor of Safety = 1.63706

Geometry:

- Slope Height = 20 m
- Wedge Weight = 3260.2 t/m
- Wedge Volume = 1207.48 m<sup>3</sup>/m
- Rock Unit Weight = 2.7 t/m<sup>3</sup>
- Slope Angle = 50°
- Failure Plane Angle = 35°
- Upper Face Angle = 10°
- Bench Width : Not Present
- Waviness = 0°

Intersection Point (B) of slope and upper face = ( 50.346 , 60 )  
Intersection point (C) of failure plane and upper face = ( 97.5845 , 68.3294 )  
Failure plane length ( Origin --> C ) = 119.129 m  
Slope length ( Origin --> B ) = 78.2455 m

Buttons: ANALIZAR (circled in red), BORRAR

Imagen 5. Se despliega esta nueva ventana, diligenciar los datos correspondientes al diseño deseado y hacer click en el boton ANALIZAR señalado en la imagen dentro del circulo rojo nuevamente para que se efectue el cálculo.

ANALISIS

TIPO DE FALLA

ANALISIS ESTANDAR

**ANALIZAR**

DIAMETRO DEL PERNO: #8

$\mu$  CONTACTO ROCA: 1.02

TIPO DE MATERIAL: ACERO 420

AREA TOTAL

FUERZA TOTAL

SEPARACION

FACTOR DE SEGURIDAD

CANTIDAD DE PERNOS

FUERZA DE UN PERNO

FUERZA DE EMPOTRAMIENTO

LONGUID DE EMPOTRAMIENTO

LONGUITUD TOTAL

LONGUITUD LIBRE

ESTIMACION DE PERNOS

SEPARACION: 2

LONGITUD DE PERNO: 20

DESPLAZAMIENTO X: 0

DESPLAZAMIENTO Y: 0

AL TRES BOLILLO

OPTIMIZAR

FUERZA OPTIMIZADA

FUERZA REQUERIDA

Imagen 6. Resultados finales de acuerdo a datos de entrada y modelo de diseño seleccionado por el usuario.

ANALISIS

TIPO DE FALLA: FALLA PLANAR

ANALISIS ESTANDAR

ANALIZAR

DIAMETRO DEL PERNO: #8

$\mu$  CONTACTO ROCA: 1.02

TIPO DE MATERIAL: ACERO 420

AREA TOTAL: 20 m<sup>2</sup>

FUERZA TOTAL: 3260.2 TON

SEPARACION: 0.08 m

FACTOR DE SEGURIDAD: 1,637

CANTIDAD DE PERNOS: 3125

FUERZA DE UN PERNO: 13 TON

FUERZA DE EMPOTRAMIENTO: 39 TON

LONGUID DE EMPOTRAMIENTO: 4.79 m

LONGUITUD TOTAL: 16.57 m

LONGUITUD LIBRE: 11.78 m

ESTIMACION DE PERNOS

SEPARACION: 2

LONGITUD DE PERNO: 20

DESPLAZAMIENTO X: 0

DESPLAZAMIENTO Y: 0

AL TRES BOLILLO

OPTIMIZAR

FUERZA OPTIMIZADA

FUERZA REQUERIDA

Imagen 7. Resultados finales de acuerdo a datos de entrada y modelo de diseño seleccionado por el usuario, utilizando la función de optimización que ofrece el algoritmo para mayor eficiencia en el diseño.

ANALISIS X

TIPO DE FALLA		FALLA PLANAR	
ANALISIS ESTANDAR <span style="margin-left: 100px;">ANALIZAR</span>			
AREA TOTAL	20 m <sup>2</sup>	FUERZA DE UN PERNO	13 TON
FUERZA TOTAL	3260.2 TON	FUERZA DE EMPOTRAMIENTO	39 TON
SEPARACION	0.08 m	LONGUID DE EMPOTRAMIENTO	4.79 m
FACTOR DE SEGURIDAD	1,637	LONGIITUD TOTAL	16.57 m
CANTIDAD DE PERNOS	3125	LONGIITUD LIBRE	11.78 m

ESTIMACION DE PERNOS		AL TRES BOLILLO <input type="checkbox"/>	
SEPARACION	2	LONGITUD DE PERNO	20
DESPLAZAMINTO X	0 ...	FUERZA OPTIMIZADA	398,78
DESPLAZAMIENTO Y	0 ...	FUERZA REQUERIDA	3260,2

DIAMETRO DEL PERNO: #8  
 μ CONTACTO ROCA: 1.02 ...  
 TIPO DE MATERIAL: ACERO 420

**OPTIMIZAR**