

**MODELOS NUMÉRICOS PARA EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD PORTANTE EN
CIMENTOS CORRIDOS**

**JHON JAIRO BAUTISTA GUERRERO
NELSON ENRIQUE CORZO SUAREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**MODELOS NUMÉRICOS PARA EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD PORTANTE EN
CIMIENTOS CORRIDOS**

**JHON JAIRO BAUTISTA GUERRERO
NELSON ENRIQUE CORZO SUAREZ**

Trabajo de grado como requisito para optar el título de Ingeniero Civil

**DIRECTOR
JORGE ALEJANDRO MENDOZA RIZO
MSc. en Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 21 |
| 1. OBJETIVOS..... | 23 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 23 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 23 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 24 |
| 2.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS | 24 |
| 2.2 MODELOS CONSTITUTIVOS | 26 |
| 2.3 MODELO DE MOHR – COULOMB | 27 |
| 2.4 MODELO DE HARDENING SOIL..... | 28 |
| 3. MODELOS A ESTUDIAR..... | 30 |
| 4. RESULTADOS..... | 31 |
| 4.1 GEOMETRÍA | 31 |
| 4.2 CIMIENTO CORRIDO SOBRE ARENAS SECAS. | 32 |
| 4.3 CIMIENTO CORRIDO SOBRE ARENAS SATURADAS. | 37 |
| 4.4 CIMIENTO CORRIDO SOBRE ARENAS CON NIVEL FREÁTICO A 2 [M]..... | 40 |
| 4.5 CIMIENTO CORRIDO SOBRE ARCILLAS SATURADAS..... | 44 |
| 4.6 CIMIENTO CORRIDO SOBRE LIMOS SECOS. | 47 |
| 4.7 CIMIENTO CORRIDO SOBRE LIMOS SATURADOS..... | 51 |
| 4.8 CIMIENTO CORRIDO SOBRE LIMOS CON NIVEL FREÁTICO A 2 [M]. | 54 |
| 5. CONCLUSIONES | 58 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 61 |
| ANEXOS..... | 63 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Capacidad portante última, en Plaxis 2D y teorías clásicas..... | 63 |
| Tabla 2. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arenas secas y saturadas. M-C | 66 |
| Tabla 3. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arenas con nivel freático a 2 [m]. M-C | 67 |
| Tabla 4. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para limos secos, saturados y con nivel freático a 2 [m]. M-C | 67 |
| Tabla 5. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arcillas saturadas M-C. | 68 |
| Tabla 6. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arenas secas y saturadas. H-S | 68 |
| Tabla 7. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arenas | 69 |
| Tabla 8. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para limos secos, saturados y con nivel freático a 2 [m]. H-S | 69 |
| Tabla 9. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arcillas saturadas H-S | 70 |
| Tabla 10. Resultados de la comparación de capacidad portante para arenas secas. | 71 |
| Tabla 11. Resultados de la comparación de capacidad portante para arenas saturadas. | 74 |
| Tabla 12. Resultados de la comparación de capacidad portante para arenas con nivel freático a 2 [m]..... | 77 |
| Tabla 13. Resultados de la comparación de capacidad portante para limos secos. | 80 |

Tabla 14. Resultados de la comparación de capacidad portante para arcillas saturadas.84

Tabla 15. Resultados de la comparación de capacidad portante para limos saturados.87

Tabla 16. Resultados de la comparación de capacidad portante para limos con nivel freático a 2 [m].90

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Proceso de discretización de un FEM..... | 24 |
| Figura 2. Sistema a estudiar. | 26 |
| Figura 3. Formulación básica del modelo elastoplástico perfecto (M-C)..... | 27 |
| Figura 4. Relación hiperbólica tensión-deformación para ensayos triaxiales consolidados drenados. | 29 |
| Figura 5. Desplazamientos totales, CON interferencia del medio..... | 64 |
| Figura 6. Desplazamientos totales, SIN interferencia del medio..... | 64 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Gráfica 1. Variación de la capacidad portante última, variando el espesor del suelo de estudio. | 32 |
| Gráfica 2. Influencia de la malla Mohr Coulomb para arenas secas. | 33 |
| Gráfica 3. Influencia de la malla Hardening Soil para arenas secas. | 34 |
| Gráfica 4. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) puntos de falla según el modelo Mohr-Coulomb, (c) puntos plásticos según el modelo Hardening Soil para arenas secas. | 34 |
| Gráfica 5. Comparación de la capacidad portante con las teorías clásicas para arenas secas. | 36 |
| Gráfica 6. Comparación de capacidad portante entre modelos constitutivos para arenas secas. | 36 |
| Gráfica 7. Influencia de la malla para arena saturada. (a) Mohr-Coulomb, (b) Hardening Soil. | 37 |
| Gráfica 8. Comparación de capacidad portante para arenas saturadas mediante modelos constitutivos. | 38 |
| Gráfica 9. (a) Incremento de esfuerzos, (b) Puntos plásticos M-C, (c) Puntos plásticos H-S para arenas saturadas. | 39 |
| Gráfica 10. (a) Puntos plásticos MC, (b) Incremento de los esfuerzos desviadores, (c) Puntos plásticos HS para arenas con nivel freático a 2 [m]. | 41 |
| Gráfica 11. Comparación de capacidad portante según el tipo de malla HSM para arenas con nivel freático a 2 [m]. | 42 |
| Gráfica 12. Comparación de capacidad portante según tipo de malla MC para arenas con nivel freático a 2 [m]. | 43 |
| Gráfica 13. Comparación de la capacidad portante entre la teoría clásica y los modelos constitutivos para arenas con nivel freático a 2 [m]. | 43 |

| | |
|---|----|
| Gráfica 14. Influencia de la malla para arcillas saturadas – (a) Mohr Coulomb, (b) Hardening Soil para arcillas saturadas. | 45 |
| Gráfica 15. (a) Puntos plásticos - Mohr Coulomb, (b) Incremento de lo esfuerzos desviadores para arcillas saturadas..... | 46 |
| Gráfica 16. Comparación de la capacidad portante mediante modelos constitutivos y las teorías clásicas para arcillas saturadas..... | 47 |
| Gráfica 17. Capacidad de carga para diferentes valores de cohesión. (a) Modelo Hardening, $\phi = 20^\circ$, (b) Modelo Mohr Coulomb, $\phi=20^\circ$, limos secos..... | 48 |
| Gráfica 18. (a) Falla por punzonamiento Mohr Coulomb, (b) Puntos de esfuerzos desviadores, (c) Puntos plásticos según modelo Hardening Soil, limos secos. | 49 |
| Gráfica 19. (a) Resultados capacidad de soporte modelo Hardening Soil $\phi=30^\circ$, diferentes valores de cohesión y malla. (b) Resultados capacidad de soporte modelo Mohr Coulomb $\phi=30^\circ$, diferentes valores de cohesión y malla, limos secos. | 50 |
| Gráfica 20. Comparación de la capacidad portante mediante modelos constitutivos para limos secos. | 51 |
| Gráfica 21. Influencia de la malla - (a) Mohr Coulomb, (b) Hardening Soil para limos saturados..... | 52 |
| Gráfica 22. Comparación de la capacidad portante con las teorías clásicas, para $\phi = 30^\circ$, limos saturados. | 53 |
| Gráfica 23. (a). Puntos de falla Mohr Coulomb. (b). Esfuerzos desviadores (c). Puntos de falla Hardening Soil, limos saturados..... | 53 |
| Gráfica 24. Comparación teorías clásicas con Método Elementos Finitos para limos con nivel freático a 2 [m]...... | 55 |
| Gráfica 25. Influencia de la malla en la capacidad portante, (a) modelos Mohr Coulomb, (b) Hardening Soil para limos con nivel freático a 2 [m]...... | 56 |
| Gráfica 26. (a) Esfuerzos desviadores, (b) puntos de falla Mohr Coulomb, (c) puntos de falla Hardening Soil, para limos con nivel freático a 2 [m]...... | 57 |
| Gráfica 27. Influencia del espesor de suelo. | 64 |

| | |
|---|----|
| Gráfica 28. Comparación de capacidad portante para arenas secas, por medio de modelos constitutivos..... | 71 |
| Gráfica 29. Influencia de la malla según M-C; arenas secas..... | 72 |
| Gráfica 30. Influencia de la malla según H-S; arenas secas..... | 72 |
| Gráfica 31. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse; arenas secas. | 72 |
| Gráfica 32. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium; arenas secas..... | 73 |
| Gráfica 33. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; arenas secas..... | 73 |
| Gráfica 34. Comparación de capacidad portante para arenas saturadas, por medio de modelos constitutivos..... | 74 |
| Gráfica 35. Influencia de la malla según M-C; arenas saturadas..... | 75 |
| Gráfica 36. Influencia de la malla según H-S; arenas saturadas. | 75 |
| Gráfica 37. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse; arenas saturadas..... | 75 |
| Gráfica 38. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium; arenas saturadas. | 76 |
| Gráfica 39. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; arenas saturadas. | 76 |
| Gráfica 40. Comparación de capacidad portante para arenas con nivel freático a 2 [m], por medio de modelos constitutivos..... | 77 |
| Gráfica 41. Influencia de la malla según M-C; arenas con nivel freático a 2 [m]... | 78 |
| Gráfica 42. Influencia de la malla según H-S; arenas con nivel freático a 2 [m]. ... | 78 |
| Gráfica 43. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; arenas con nivel freático a 2 [m]. | 78 |
| Gráfica 44. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium; arenas con nivel freático a 2 [m]. | 79 |
| Gráfica 45. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse; arenas con nivel freático a 2 [m]..... | 79 |

| | |
|---|----|
| Gráfica 46. Comparación de capacidad portante para Limos secos, por medio de modelos constitutivos (a) Hardening Soil, (b) Mohr Coulomb. | 81 |
| Gráfica 47. Influencia de la malla según M-C; Limos secos, $\phi = 20^\circ$ | 81 |
| Gráfica 48. Influencia de la malla según M-C; Limos secos, $\phi = 25^\circ$ | 82 |
| Gráfica 49. Influencia de la malla según M-C; Limos secos, $\phi = 30^\circ$ | 82 |
| Gráfica 50. Influencia de la malla según H-S; Limos secos, $\phi = 20^\circ$ | 82 |
| Gráfica 51. Influencia de la malla según H-S; Limos secos, $\phi = 25^\circ$ | 83 |
| Gráfica 52. Influencia de la malla según H-S; Limos secos, $\phi = 30^\circ$ | 83 |
| Gráfica 53. Comparación de capacidad portante para arcillas saturadas, por medio de modelos constitutivos. | 84 |
| Gráfica 54. Influencia de la malla según M-C; arcillas saturadas. | 85 |
| Gráfica 55. Influencia de la malla según H-S; arcillas saturadas. | 85 |
| Gráfica 56. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; arcillas saturadas. | 85 |
| Gráfica 57. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium; arcillas saturadas. | 86 |
| Gráfica 58. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse; arcillas saturadas. | 86 |
| Gráfica 59. Comparación de capacidad portante para limos saturados, por medio de modelos constitutivos. | 88 |
| Gráfica 60. Influencia de la malla según M-C; Limos saturados. | 88 |
| Gráfica 61. Influencia de la malla según H-S; Limos saturados. | 88 |
| Gráfica 62. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; limos saturados. | 89 |
| Gráfica 63. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium; arcillas saturadas. | 89 |
| Gráfica 64. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse; arcillas saturadas. | 89 |
| Gráfica 65. Comparación de capacidad portante para limos con nivel freático 2 [m], por medio de modelos constitutivos. | 91 |

| | |
|--|----|
| Gráfica 66. Influencia de la malla según M-C; Limos con nivel freático 2 [m]. | 91 |
| Gráfica 67. Influencia de la malla según H-S; Limos con nivel freático 2 [m]. | 91 |
| Gráfica 68. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; limos nivel freático 2 [m]. | 92 |
| Gráfica 69. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium limos nivel freático 2 [m]. | 92 |
| Gráfica 70. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse limos nivel freático 2 [m]. | 93 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | Pág. |
|--|-------------|
| Ilustración 1. Tipo de malla Very Fine – M - C. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos..... | 94 |
| Ilustración 2. Tipo de malla Medium – M - C. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos..... | 95 |
| Ilustración 3. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 96 |
| Ilustración 4. Tipo de malla Very Fine – H - S. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos..... | 97 |
| Ilustración 5. Tipo de malla Medium – H - S. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos..... | 98 |
| Ilustración 6. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 99 |
| Ilustración 7. Tipo de malla Very Fine – M - C. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 100 |
| Ilustración 8. Tipo de malla Medium – M - C. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 101 |
| Ilustración 9. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 102 |
| Ilustración 10. Tipo de malla Very Fine – H - S. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 103 |
| Ilustración 11. Tipo de malla Medium – H - S. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 104 |
| Ilustración 12. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 105 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 13. Tipo de malla Very Fine – M - C. Arenas con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 106 |
| Ilustración 14. Tipo de malla Medium – M - C. Arenas con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 107 |
| Ilustración 15. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Arenas con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 108 |
| Ilustración 16. Tipo de malla Very Fine – H - S. Arenas con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 109 |
| Ilustración 17. Tipo de malla Medium – H - S. Arenas con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 110 |
| Ilustración 18. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Arenas con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 111 |
| Ilustración 19. Tipo de malla Very Fine – M - C. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 112 |
| Ilustración 20. Tipo de malla Medium – M - C. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 113 |
| Ilustración 21. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 114 |
| Ilustración 22. Tipo de malla Very Fine – H - S. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 115 |
| Ilustración 23. Tipo de malla Medium – H - S. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 116 |
| Ilustración 24. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 117 |
| Ilustración 25. Tipo de malla Very Fine – M - C. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 118 |
| Ilustración 26. Tipo de malla Medium – M - C. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 119 |
| Ilustración 27. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 120 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 28. Tipo de malla Very Fine – H - S. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos..... | 121 |
| Ilustración 29. Tipo de malla Medium – H - S. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos..... | 122 |
| Ilustración 30. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 123 |
| Ilustración 31. Tipo de malla Very Fine – M - C. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 124 |
| Ilustración 32. Tipo de malla Medium – M - C. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 125 |
| Ilustración 33. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 126 |
| Ilustración 34. Tipo de malla Very Fine – H - S. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 127 |
| Ilustración 35. Tipo de malla Medium – H - S. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 128 |
| Ilustración 36. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 129 |
| Ilustración 37. Tipo de malla Very Fine – M - C. Limos con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 130 |
| Ilustración 38. Tipo de malla Medium – M - C. Limos con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 131 |
| Ilustración 39. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Limos con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 132 |
| Ilustración 40. Tipo de malla Very Fine – H - S. Limos con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 133 |
| Ilustración 41. Tipo de malla Medium – H - S. Limos con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 134 |
| Ilustración 42. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Limos con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos. | 135 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Anexo A. Definición de la geometría de trabajo | 63 |
| Anexo B. Parámetros de los modelos a estudiar | 66 |
| Anexo C. Resultado de los modelos numéricos | 71 |
| Anexo D. Resultado de puntos plásticos e incremento de esfuerzos desviadores para los suelos de estudio. | 94 |

RESUMEN

TITULO: MODELOS NUMÉRICOS PARA EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD PORTANTE EN CIMIENTOS CORRIDOS.*

AUTOR(ES): JHON JAIRO BAUTISTA GUERRERO**
NELSON ENRIQUE CORZO SUAREZ

PALABRAS CLAVE: FEM, Cimiento corrido, Capacidad portante, Modelos constitutivos.

DESCRIPCIÓN:

Las cargas que se transmiten por medio de las cimentaciones generan compresiones en el suelo, por lo que éste tiende a deformarse produciendo asentamientos. Es por esto que las cimentaciones juegan un papel muy importante dentro de la construcción ya que distribuyen los efectos producidos y así soportan la estructura. La estimación de la capacidad portante es un problema común en la ingeniería geotécnica debido a que encabeza el análisis y diseño de muchas estructuras de cimentación. En particular para analizar la resistencia del suelo a rotura, se continúa trabajando con la solución de Prandtl (1920), la cual supone que el suelo de cimentación está compuesto por tres cuñas rígidas y, por consiguiente, la resistencia se establece en términos de equilibrio entre las fuerzas deslizantes y las fuerzas resistentes las cuales impiden el movimiento de las cuñas planteadas. En la actualidad, al realizar proyectos de ingeniería civil referentes al campo de la geotecnia es más común aplicar métodos numéricos, Por lo tanto, este proyecto tiene como objetivo realizar una comparación de la estimación de la capacidad portante en cimientos corridos usando teorías clásicas y análisis numéricos mediante el uso de modelos constitutivos, además de estudiar la influencia de la malla y propiedades del suelo de cimentación. Se pudo establecer que el dominio en PLAXIS 2D afecta directamente la capacidad de soporte, además la influencia de la malla es otro factor que se debe tener en cuenta, puesto que afecta directamente la magnitud de la capacidad de soporte de los suelos estudiados.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías físico mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director Mendoza R. Jorge Alejandro.

ABSTRACT

TITLE: NUMERICAL MODELS FOR THE BEARING CAPACITY ANALYSIS IN STRIP FOUNDATIONS.*

AUTHOR(S): JHON JAIRO BAUTISTA GUERRERO**
NELSON ENRIQUE CORZO SUAREZ

KEYWORDS: FEM, Strip foundation, Bearing capacity, Constitutive models.

DESCRIPTION:

The loads that are transmitted by foundations generate compression in the soil, so it tends to deform producing settlements. For this reason, foundations play an important role in construction since those distribute the produced effects and support the structure. The bearing capacity estimation is a common issue in the geotechnical engineering due to the leading of the analysis and the design of many foundations structures. In particular, to analyze the rupture soil resistance it is necessary to continue working with the Prandtl solution (1920). This solution implies that the foundation soil is composed by three rigid wedges; thereby, the resistance is established in equilibrium terms between the sliding and the resistance forces that impede the planted chocks movement. Currently, when carrying out civil engineering projects regarding the geotechnical field, it's common to apply numerical methods; therefore, this project aims to conduct a comparison of the bearing capacity estimation in strip foundations using the classic theories and numerical analysis through constitutive models; apart from studying the mesh influence and the soil foundations properties. it was established that the domain in 2D PLAXIS directly affects the support capacity; in addition, the influence of the mesh is another factor that must be taken into account, since it directly affects the magnitude of the bearing capacity of the soils studied.

* Project of grade.

** Faculty of Engineering Physical Mechanical. School of Civil Engineering. Director Mendoza R. Jorge Alejandro.

INTRODUCCIÓN

Un adecuado estudio del suelo sobre el cual se pretende levantar una construcción facilita al ingeniero los datos necesarios para determinar el tipo y diseño más apropiado y económico de la cimentación, y es, además, un requerimiento obligatorio para garantizar la estabilidad de una edificación. Otro efecto relevante es la posibilidad de que el suelo de cimentación presente rotura durante el proceso de carga y asentamientos excesivos. Por lo anterior, siempre es necesario analizar ambos efectos.

En este trabajo se compara las metodologías convencionales para la estimación de la capacidad portante última en un cimiento corrido, propuesta clásica de Terzaghi, Meyerhof y Hansen, contra soluciones numéricas, mediante el método de los elementos finitos, haciendo uso del software de elementos finitos Plaxis 2D; la cual es una técnica numérica que históricamente se ha utilizado para establecer el comportamiento esfuerzo-deformación de materiales. Sin embargo, en los últimos 10 años ha sido posible implementar criterios de rotura, particularmente en suelos y rocas para analizar la posibilidad de falla o rotura. La comparación se realiza a un cimiento corrido de 10 m de base, para diferentes casos básicos de suelos de fundación, donde se varían algunos de sus parámetros, observando que tan sensible es la capacidad de carga última ante esos cambios y cuál es su similitud con las propuestas teóricas. Para los modelos de elementos finitos se asume el suelo como un material elastoplástico con el criterio de falla de Mohr-Coulomb. Además, se realizan algunas comparaciones de la capacidad de carga última si se cambia el modelo de Mohr-Coulomb a Hardening Soil. Al realizar simulaciones en un programa de elementos finitos, el cual está basado para trabajar con la mecánica del medio continuo, se busca aumentar la carga aplicada a la cimentación hasta que

ocurra la plastificación en algunos elementos del modelo por haber alcanzado la condición de rotura propuesta por Mohr Coulomb.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento de la capacidad portante para cimientos corridos, mediante un modelo numérico basado en la simulación de Elementos Finitos y compararlo con las teorías clásicas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

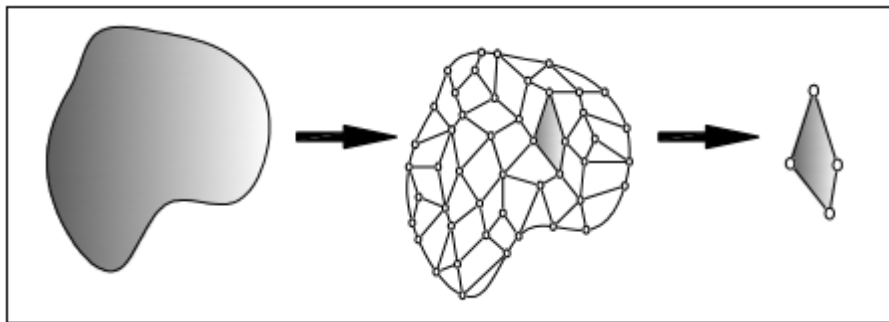
- Analizar la influencia de la malla en la capacidad de soporte del suelo estudiado.
- Analizar mediante un modelo constitutivo de Mohr Coulomb y Hardening-Soil el comportamiento que tiene un suelo para la determinación de la capacidad portante que presenta y comparar dicha capacidad de soporte con las teorías de Terzaghi, Meyerhof y Hansen.
- Estudiar la influencia de los parámetros de resistencia del suelo de cimentación en los valores de capacidad portante última.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos está basado en división de un medio continuo, caracterizado por elementos pequeños que se interconectan entre si llamados nodos. (Ver Fig.1).

Figura 1. Proceso de discretización de un FEM.



Fuente: curso de “Mecánica computacional de Geotecnia, introducción al método de los elementos finitos”.

El método de elementos finitos (FEM) es un método numérico para la solución de ecuaciones diferenciales, utilizado en diversos problemas de ingeniería. El método se basa en dividir el cuerpo o estructura sobre el que están definidas ciertas ecuaciones que caracterizan el comportamiento físico del problema en una serie de subdominios o elementos llamados elementos finitos. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamado nodos y el conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se conoce como malla. Los

cálculos se realizan sobre una malla creada a partir del dominio con programas generadores de malla ¹.

Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento continuo, también deben regir a cada elemento, para así, tener un análisis homogéneo del dominio. De esta manera se logra pasar de un sistema de infinitos grados de libertad a uno con varios grados, permitiendo ser desarrollados por ecuaciones ya conocidas en la teoría. En cualquier dominio de análisis se podrá distinguir:

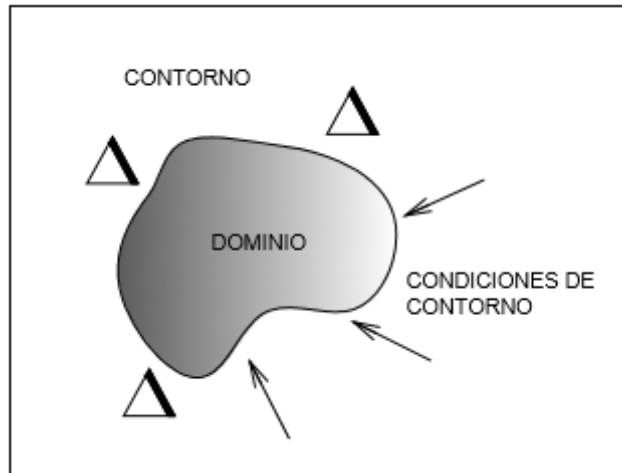
- Dominio: Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno: Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema (cargas, desplazamientos, temperaturas, etc.).
- Incógnitas: Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema (desplazamientos, tensiones, temperaturas, etc.) ². (Ver Fig. 2)

Por otra parte, el FEM, para poder solucionar el problema que fue planteado, supone que el dominio este discretizado en subdominios permitiendo una generación de elementos para poder analizar cada uno de ellos. La zona de trabajo o en este caso suelo de estudio, es llamado dominio, dicho dominio se divide mediante puntos esto sucede cuando está en un caso lineal.

1 CHANDRUPATLA, Tirupathi R. BELEGUNDU, Ashok D. Introduction to finite elements in engineering. 4^a Edición. Upper Saddle river, NJ. Pearson, 2012.

2 DIAZ, Yamyle; LOPEZ ALVARADO, Elizabeth. Plaxis como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad punta arenas. Punta Arenas. 2008, p. 14.

Figura 2. Sistema a estudiar.



Fuente: curso de “Mecánica computacional de Geotecnia, introducción al método de los elementos finitos”.

En el caso de un problema estructural se busca encontrar sus incógnitas: desplazamiento, deformación y tensión. Debido a que el tipo de planteamiento que tiene este continuo es imposible encontrar las ecuaciones que entreguen soluciones analíticas, por lo tanto, es necesario efectuar una aproximación discreta donde se considera la posibilidad de resolver el problema en forma correcta, únicamente en ciertos puntos, es decir, se calcula la solución en desplazamientos, deformación y tensiones en ciertos puntos, y se interpolan estos valores a cualquier otro punto 3.

2.2 MODELOS CONSTITUTIVOS

“Los modelos constitutivos materiales reflejan las relaciones existentes entre tensiones, deformaciones y velocidades de deformación, expresando las

3 DIAZ DIAZ, Yamyle; LOPEZ ALVARADO, Elizabeth. Plaxis como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad punta arenas. Punta Arenas. 2008, p. 15.

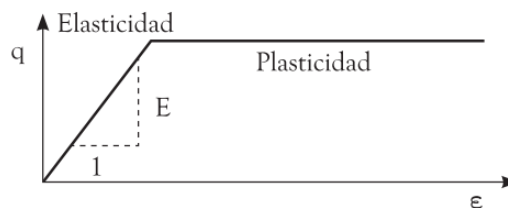
características internas del material en forma de propiedades macroscópicas que intervienen en dichas relaciones” 4.

Para la utilización de un modelo numérico basado en elementos finitos (FEM), es necesario basarse de modelos constitutivos para dar solución al problema presentado; es por eso que en la geotecnia se han implementado los modelos de Mohr – Coulomb, Hardening Soil Model y otros más.

2.3 MODELO DE MOHR – COULOMB

El modelo constitutivo Mohr-Coulomb es considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo. Se trata de un modelo elastoplástico perfecto (isotrópico) desarrollado a partir de la composición de la ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de falla Mohr-Coulomb.

Figura 3. Formulación básica del modelo elastoplástico perfecto (M-C)



El modelo constitutivo de Mohr – Coulomb puede simular el comportamiento de suelos granulares sueltos o finos normalmente consolidados y se debe tener en cuenta que no representa el comportamiento elastoplástico progresivo, sino que es un modelo elástico y luego plástico perfecto (Ver Fig. 3). Su formulación involucra

4 GUBERT, Xavier; BALLESTER, Miquel. Mecánica del medio continuo en la ingeniería. Teorías y problemas resueltos. Barcelona, 2012. p. 215.

dos elementos generales: la elasticidad perfecta y la plasticidad asociada al desarrollo de deformaciones plásticas o irreversibles 5.

2.4 MODELO DE HARDENING SOIL

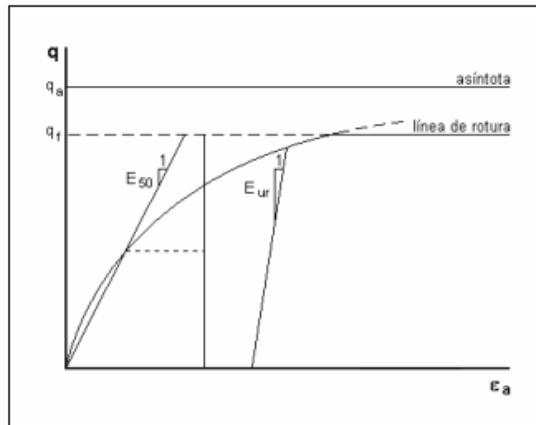
El comportamiento mecánico de los suelos puede ser modelado con diferentes grados de precisión, con la que se simularán algunas de las trayectorias triaxiales efectuadas, cuenta con los modelos elasto-plástico perfecto de Mohr-Coulomb y Hardening-Soil de plasticidad endurecible, entre otros.

Cuando una probeta de suelo se somete a una tensión desviadora, el suelo muestra un decrecimiento de rigidez y simultáneamente se desarrollan deformaciones plásticas irreversibles. En el caso especial de un ensayo triaxial drenado, la relación observada entre la deformación axial y la tensión desviadora puede ser bastante aproximada a una hipérbola. Esta relación fue formulada en primer lugar por Kondner (1963) y usada posteriormente en el modelo de Duncan & Chang (1970). El modelo Hardening-Soil supera a este primer modelo hiperbólico en tres aspectos: por usar la teoría de la plasticidad en vez de la teoría de la elasticidad, por incluir la dilatancia del suelo y por introducir un yield cap (cierre de la superficie de fluencia sobre el eje de tensión isotrópica p' del espacio de Cambridge).

5 R.B.J. Brinkgreve. Manual de referencia PLAXIS 2D. Primera edición. Países Bajos: PLAXIS b.v. P.O. Box 572, 2600 AN DELFT. 2004.

Figura 4. Relación hiperbólica tensión-deformación para ensayos triaxiales consolidados drenados.

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2 E_{s0}} \cdot \frac{q}{1 - q/q_a} \quad \text{para } q < q_f$$



Fuente. Manual de Plaxis 2D.

La idea básica para la formulación del modelo Hardening-Soil es la relación hiperbólica entre la deformación axial ε_a y la tensión desviadora q , que se muestra en la figura 4.

3. MODELOS A ESTUDIAR

En el presente trabajo se analizarán los siguientes tipos de suelos:

Suelos homogéneos:

- Arenas secas
- Limos secos
- Arenas saturadas
- Limos saturados
- Arcillas saturadas

Suelos homogéneos con nivel freático:

- Arenas N.F.2 [m]
- Limos N.F.2 [m]

Todos los casos anteriores se analizarán en condiciones drenadas, excepto en arcillas saturadas que se analizarán en condiciones no drenadas.

4. RESULTADOS

En esta sección se presenta los resultados más relevantes de los análisis de sensibilidad realizados al variar los parámetros del tipo de suelo, los resultados son comparados con las teorías clásicas. En el anexo C de este trabajo se encuentra todos los resultados y gráficos obtenidos de estos análisis.

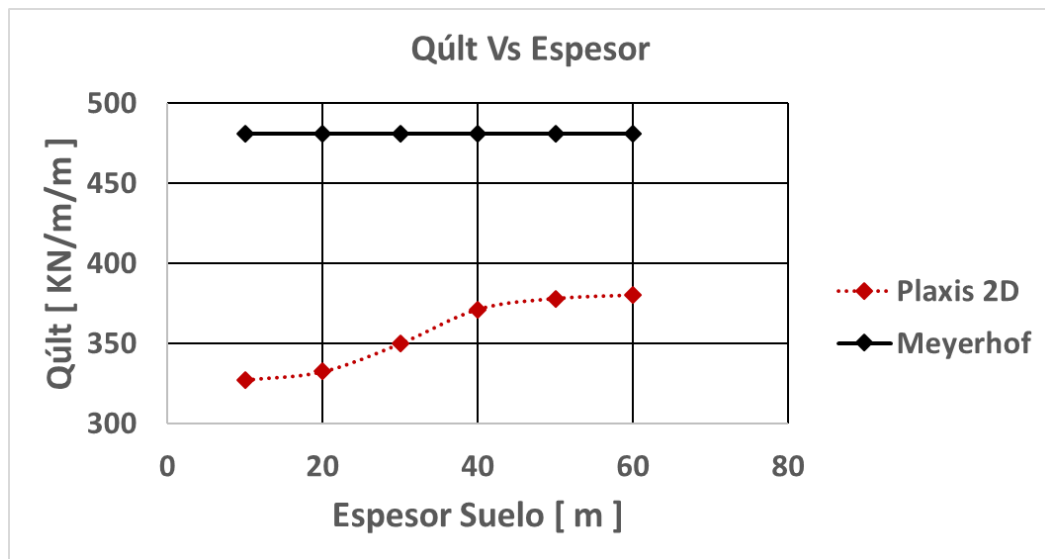
De manera general en todos los análisis realizados se encontró que al incrementar el número de elementos y nodos del modelo en Plaxis 2D, la capacidad portante disminuía, esto se ve reflejado en las gráficas 2 & 3 tanto para el modelo de Mohr-Coulomb como para Hardening Soil. También en todos los casos se ve que la magnitud de la capacidad portante es menor que la presentada por las teorías, excepto para arcillas saturadas, esto se debe a que el modelo está basado en elementos finitos y por consiguiente necesita unos parámetros de entrada adicionales como es el módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν) y ángulo de dilatación (ψ), mientras que en las teorías clásicas se asumía un material rígido, despreciando dichas variables que si asume el modelo en Plaxis 2D. Por otra parte, en este trabajo no se tendrá en cuenta los efectos de desplante, D_f , (D_f igual a cero), puesto que no se va a estudiar los efectos que produce la sobrecarga a la cimentación.

4.1 GEOMETRÍA

Para la simulación de los casos a estudiar en este trabajo, se tomará un cimiento corrido de $B = 10$ m de ancho, y para determinar la geometría de trabajo (suelo) en el software Plaxis 2D, se procede a variar la distancia vertical como se muestra en la gráfica 1, y también se procede a encontrar una distancia lateral óptima para que

se desarrolle bien la cuña de falla, con los parámetros $\phi = 20^\circ$, $E = 150 \text{ MPa}$, $C' = 15 \text{ KN/m}^2$ constantes. Para realizar una aproximación más rápida del espesor del suelo, se sugiere tomar seis veces el ancho del cimiento ($e \geq 6B$). En el anexo A de este trabajo se encuentra el estudio completo que se realizó.

Gráfica 1. Variación de la capacidad portante última, variando el espesor del suelo de estudio.



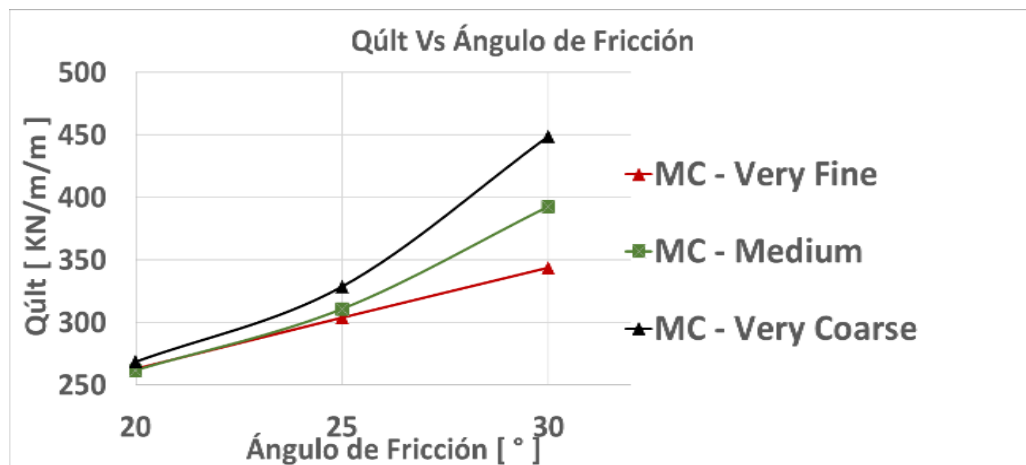
4.2 CIMIENTO CORRIDO SOBRE ARENAS SECAS.

Para el caso del cimiento corrido en arenas secas, al incrementar el ángulo de fricción del suelo, aumenta la capacidad portante. Con un modelo de Mohr-Coulomb la magnitud de la capacidad portante es menor que utilizando un modelo de Hardening Soil, esto se debe a que el modelo de Mohr-Coulomb trabaja en un estado Elástico-lineal, mientras que Hardening Soil asume que cuando un elemento alcanza la condición de plasticidad, no implica que este falle como el modelo M-C. Por otra parte, se encontró que el tipo de malla para modelar en Plaxis 2D es representativo, puesto que al ir incrementando el número de elementos la capacidad portante disminuye de acuerdo al modelo constitutivo de M-C como se puede ver

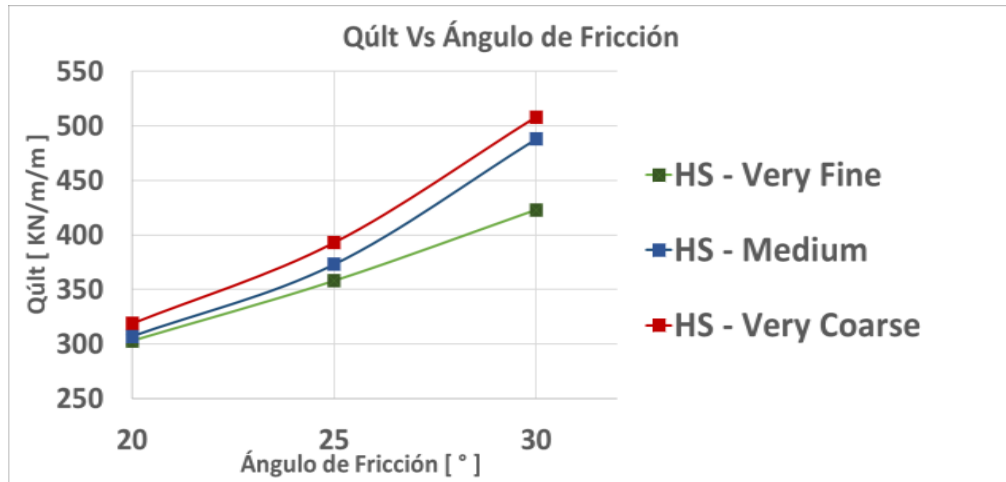
en la figura 2, esta influencia también se ve reflejada en el modelo de H-S (Ver gráfica. 3).

Como se puede observar en la gráfica 4(a), la superficie de falla está bien definida y se puede identificar como falla de corte por punzonamiento, esto concuerda con los estudios realizados por Vesic (1973), en la gráfica 4(b) se puede apreciar los puntos de falla según el modelo Mohr Coulomb que se extienden a lo largo y profundo del modelo, mientras que en la gráfica 4(c), los puntos de falla rojos se reducen en comparación al modelo Mohr Coulomb, esto sucede al cambiar de modelo constitutivo Mohr Coulomb a Hardening Soil.

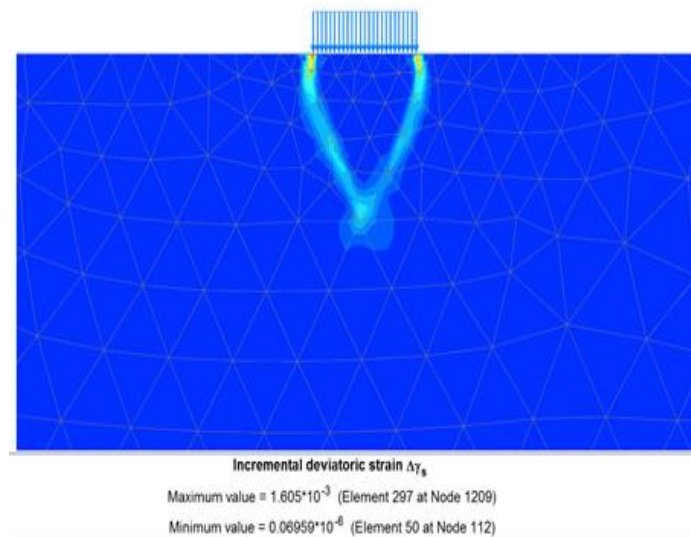
Gráfica 2. Influencia de la malla Mohr Coulomb para arenas secas.



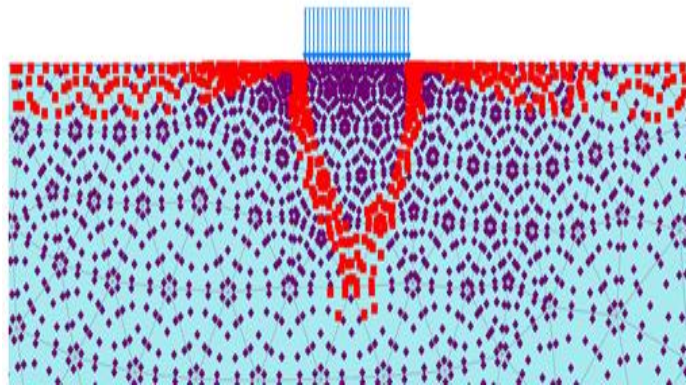
Gráfica 3. Influencia de la malla Hardening Soil para arenas secas.



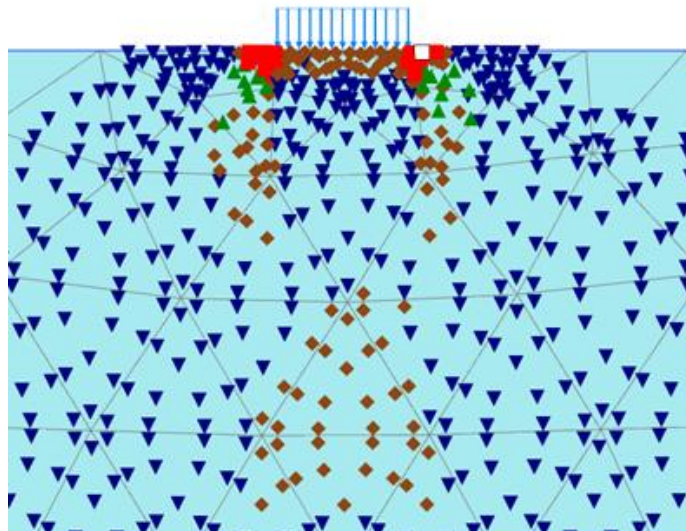
Gráfica 4. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) puntos de falla según el modelo Mohr-Coulomb, (c) puntos plásticos según el modelo Hardening Soil para arenas secas.



(a)



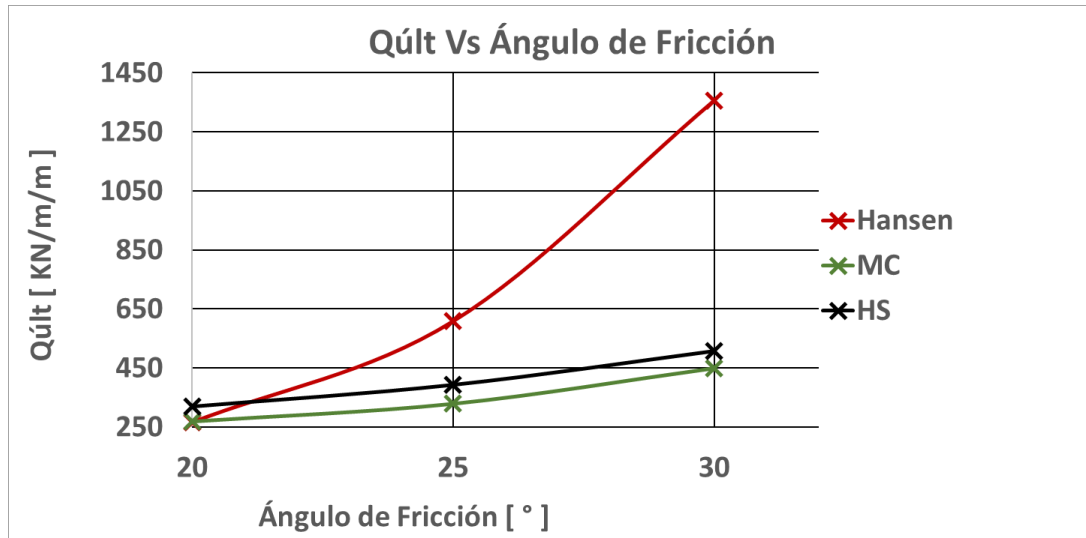
(b)



(c)

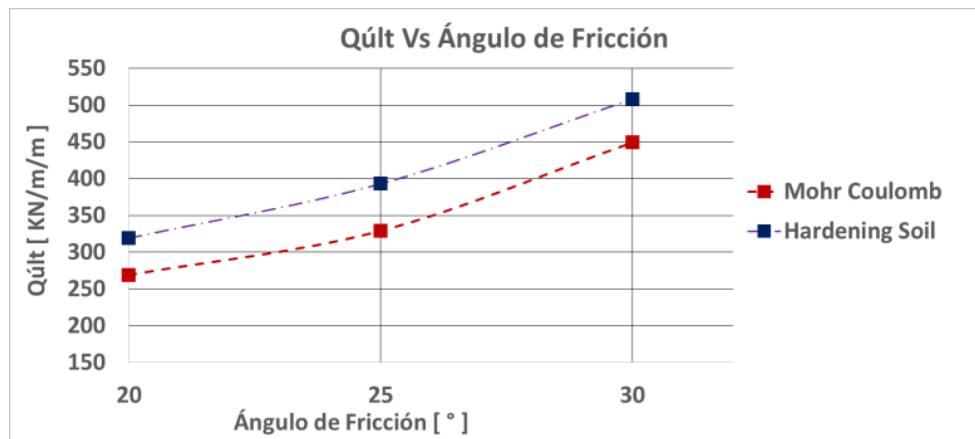
Los resultados obtenidos por las teorías clásicas dan muchos mayores que con un modelo constitutivo, esto se debe a que en la teoría se asume un módulo elástico infinitamente rígido y por consiguiente en un modelo de elementos finitos no solo se tiene que cumplir el equilibrio sino también la compatibilidad de deformaciones. (Ver gráfica. 5). En el anexo C se encuentran las tablas con la comparación con las otras teorías (Terzaghi, Meyerhof).

Gráfica 5. Comparación de la capacidad portante con las teorías clásicas para arenas secas.



El valor de capacidad portante tiene un incremento promedio del 19% cuando se pasa de un modelo elástico lineal a un modelo de endurecimiento por deformación como se puede apreciar en la gráfica 6 y presentan una tendencia exponencial a medida que se van cambiando los parámetros de resistencia del suelo.

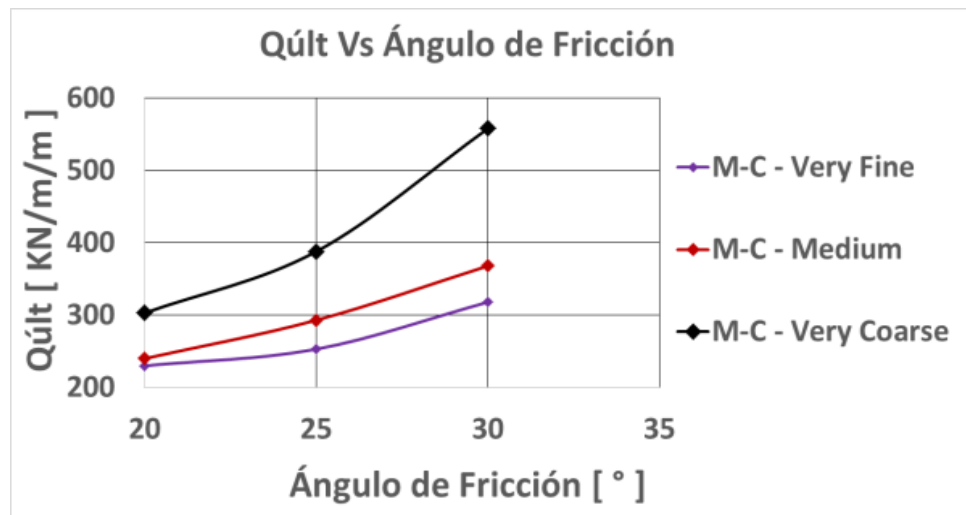
Gráfica 6. Comparación de capacidad portante entre modelos constitutivos para arenas secas.



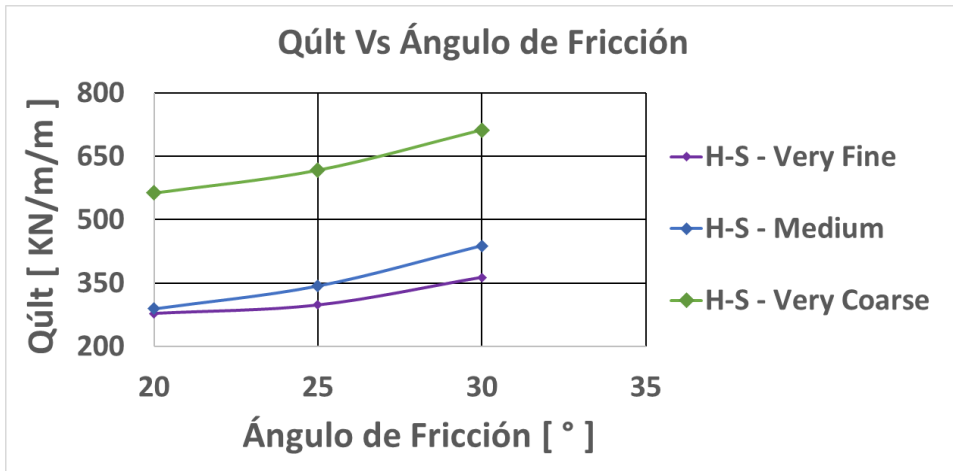
4.3 CIMIENTO CORRIDO SOBRE ARENAS SATURADAS.

En cimientos corridos sobre arenas saturadas de 10 [m] de ancho, se encontró que con el modelo constitutivo de Mohr Coulomb (M-C), con un tipo de malla muy gruesa (Very Coarse), el incremento de la capacidad portante tiende hacer exponencial, (Ver gráfica. 7(a)), y por ende necesita menos incrementos de esfuerzos que una arena seca, para que ocurra la falla de corte por punzonamiento, (Ver gráfica. 9(a)). También los valores obtenidos por teorías clásicas, tienen tendencia exponencial y son menores para ángulos de fricción $\varphi < 26^\circ$, con un modelo elástico lineal (M-C) (Ver gráfica. 8); cuando se cambia al modelo de endurecimiento por deformación (H-S) ocurre que los valores de capacidad portante incrementan considerablemente para ángulos de fricción menores a 29° (Ver gráfica. 8), esto se debe a que el modelo de endurecimiento necesita más incremento de esfuerzos para que ocurra la falla.

Gráfica 7. Influencia de la malla para arena saturada. (a) Mohr-Coulomb, (b) Hardening Soil.

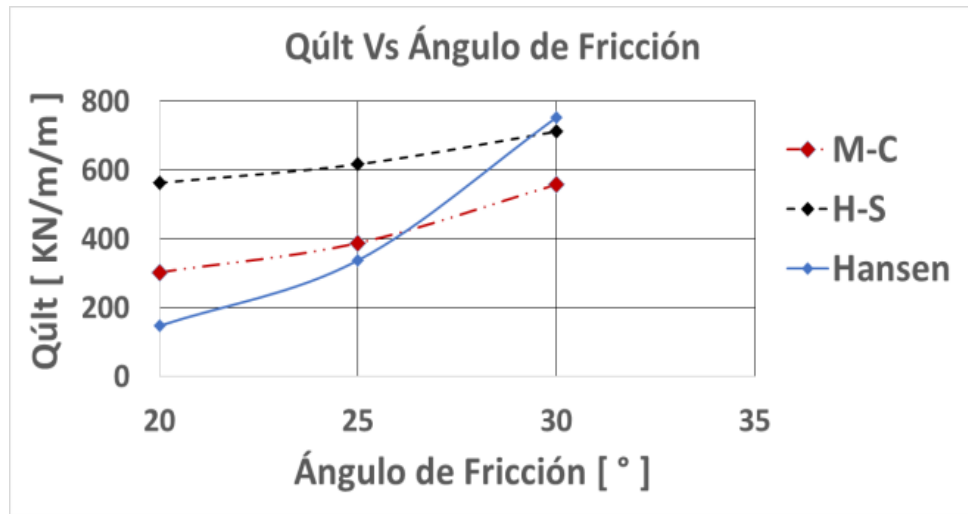


(a)



(b)

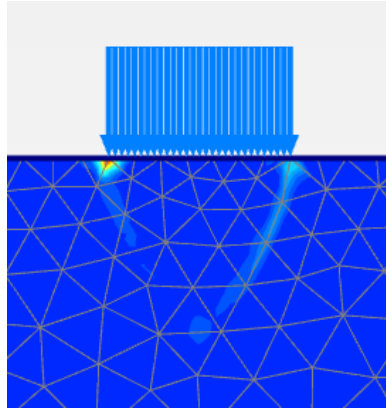
Gráfica 8. Comparación de capacidad portante para arenas saturadas mediante modelos constitutivos.



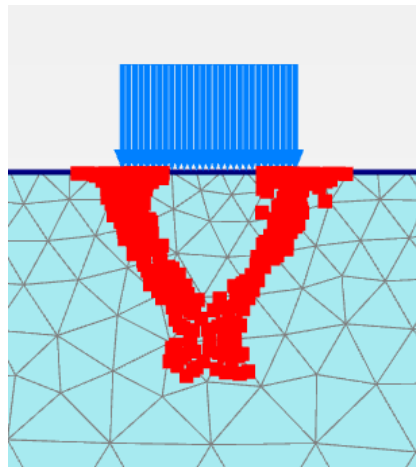
De acuerdo a la gráfica 7, la influencia de la malla está ligada con el valor de capacidad portante puesto que cuando se trabaja con un tipo de malla Very Fine y se pasa a Medium el incremento promedio de la capacidad portante es de 10% para M-C y 11% para HS, pero pasa algo interesante cuando se pasa de Very Fine a Very Coarse, este incremento promedio en la capacidad portante aumenta significativamente de 34% para M-C y 50% para HS; pero cuando se maneja una

tipo de malla Medium y se pasa a Very Coarse el incremento promedio es del 26% M-C (Ver gráfica. 7(a)) y 44% HS (Ver gráfica. 7(b)), esto indica que se debe tener mucho cuidado con el tipo de malla para modelar.

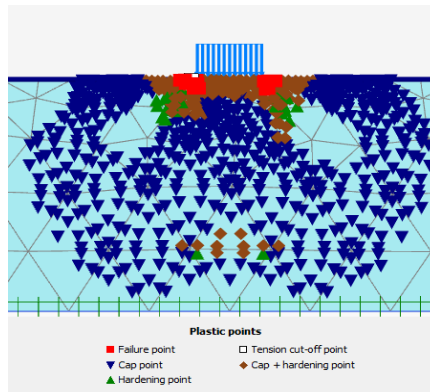
Gráfica 9. (a) Incremento de esfuerzos, (b) Puntos plásticos M-C, (c) Puntos plásticos H-S para arenas saturadas.



(a)



(b)

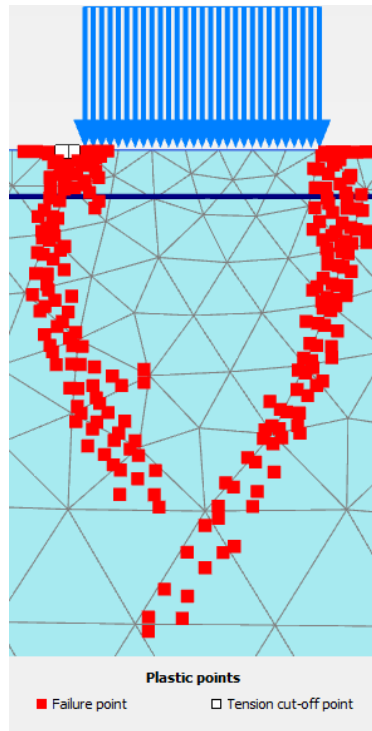


(c)

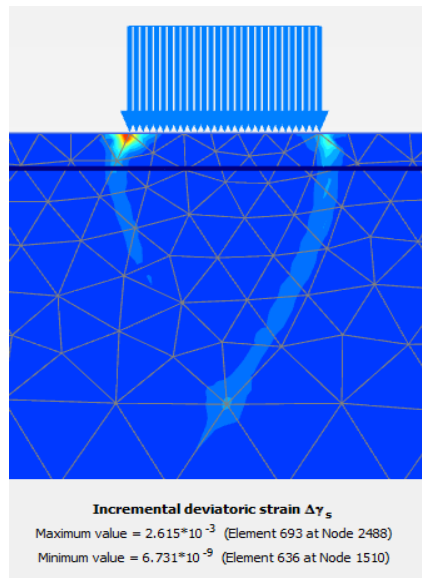
4.4 CIMIENTO CORRIDO SOBRE ARENAS CON NIVEL FREÁTICO A 2 [m].

Para arenas con nivel freático a 2 metros de profundidad, según la gráfica 10(a), la falla se trata de formar de corte por punzonamiento; según la gráfica 11, existe un incremento promedio del 20% de la capacidad de carga a medida en que se disminuyen el número de elementos y nodos en el modelo de elementos finitos; cuando se pasa al modelo elástico lineal este incremento disminuye en un 14% (Ver gráfica. 12), esto se debe a que el modelo de endurecimiento lleva el material a un estado plástico y por consiguiente necesita un incremento mayor de esfuerzos para que ocurra la falla (Ver gráfica. 10(b)). También se puede apreciar en la gráfica 11 que la capacidad portante tiene un crecimiento exponencial mientras que en el modelo elástico lineal (M-C) tiende a logarítmico, es decir, tiende a disminuir la capacidad de carga (Ver gráfica. 12).

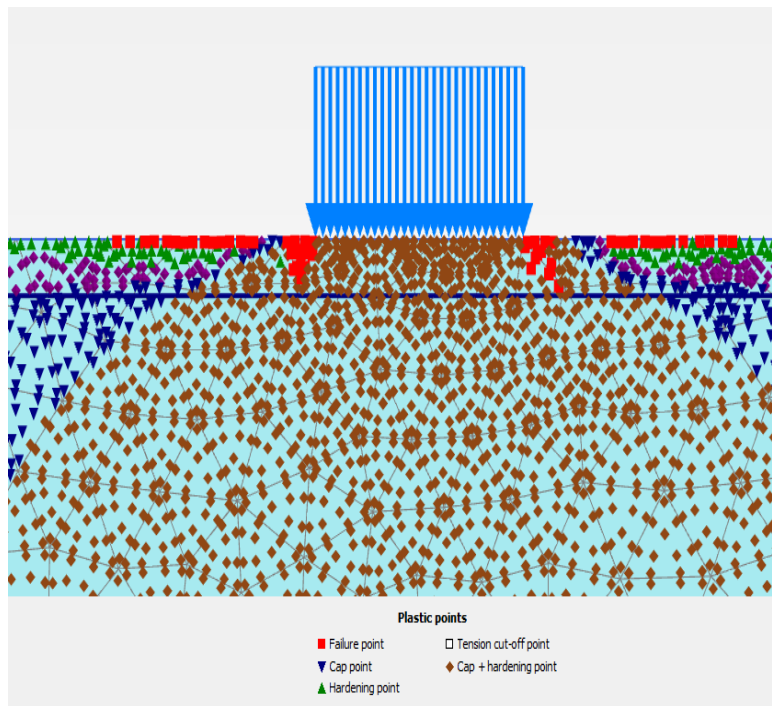
Gráfica 10. (a) Puntos plásticos MC, (b) Incremento de los esfuerzos desviadores, (c) Puntos plásticos HS para arenas con nivel freático a 2 [m].



(a)

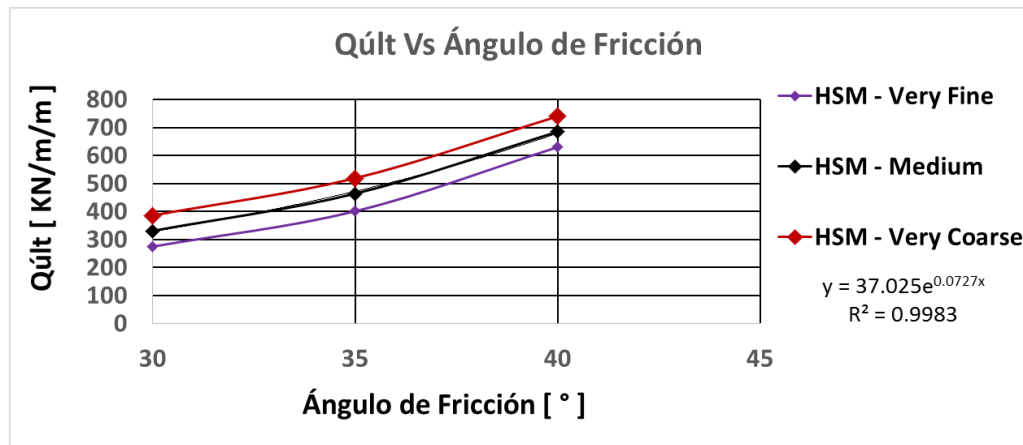


(b)

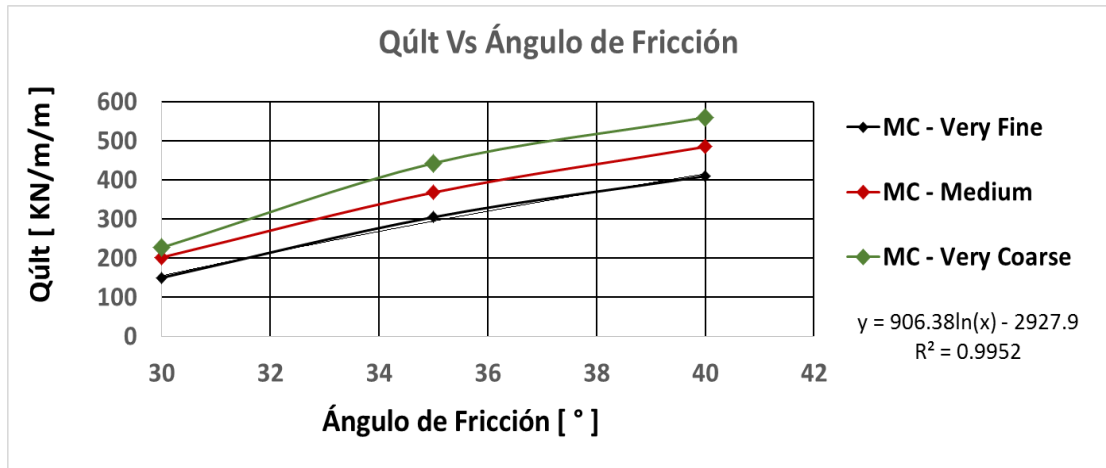


(c)

Gráfica 11. Comparación de capacidad portante según el tipo de malla HSM para arenas con nivel freático a 2 [m].

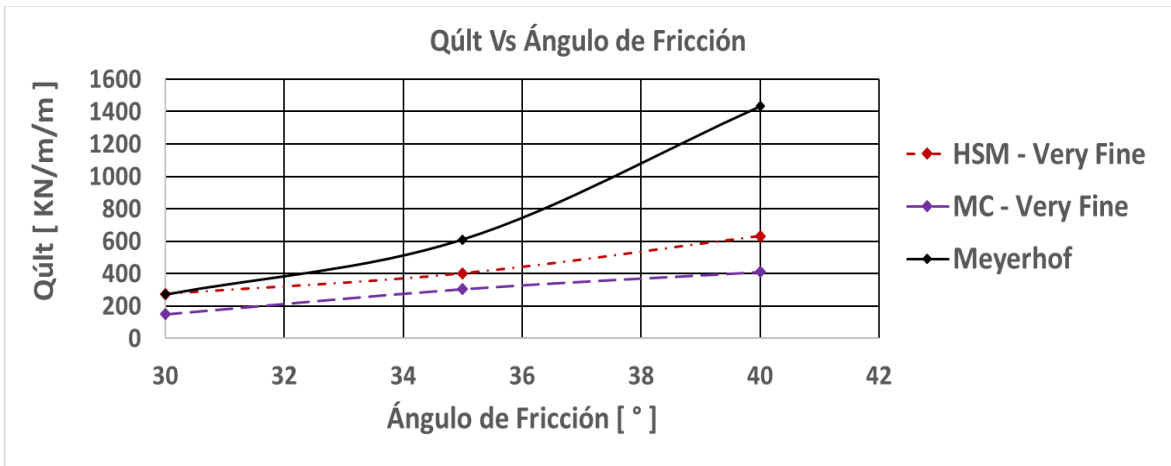


Gráfica 12. Comparación de capacidad portante según tipo de malla MC para arenas con nivel freático a 2 [m].



Por otra parte, la gráfica 10(c), muestra cómo se producen los puntos de falla locales llegando solamente hasta el nivel freático.

Gráfica 13. Comparación de la capacidad portante entre la teoría clásica y los modelos constitutivos para arenas con nivel freático a 2 [m].



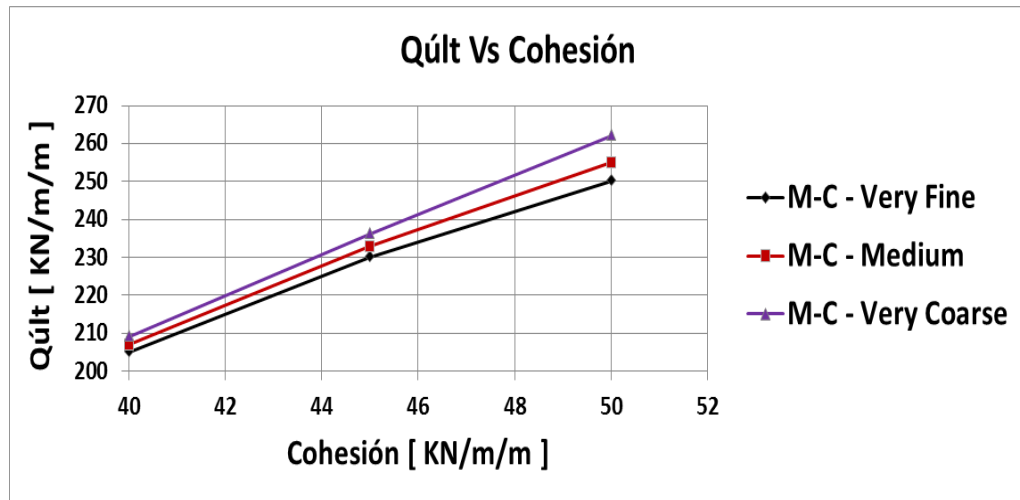
4.5 CIMIENTO CORRIDO SOBRE ARCILLAS SATURADAS.

Para el caso de arcillas saturadas el ajuste a las teorías clásicas es casi perfecto, con un tipo de malla “Medium” se obtiene por medio del modelo Mohr-Coulomb un porcentaje de error menor a 1%, esto se debe a que para este tipo de suelo homogéneo se trabajó en condición no drenada. A medida que se aumenta la resistencia no drenada la capacidad portante también lo hace (Ver gráfica. 14(a)). También cuando se cambió al modelo de endurecimiento se obtuvo errores menores del 1% para la capacidad portante para un tipo de malla Very Coarse (muy gruesa) (Ver gráfica. 14 (b)). Por otra parte, como se puede apreciar en la gráfica 15(a) se trata de formar las 3 cuñas de falla propuestas por Terzaghi (1943).

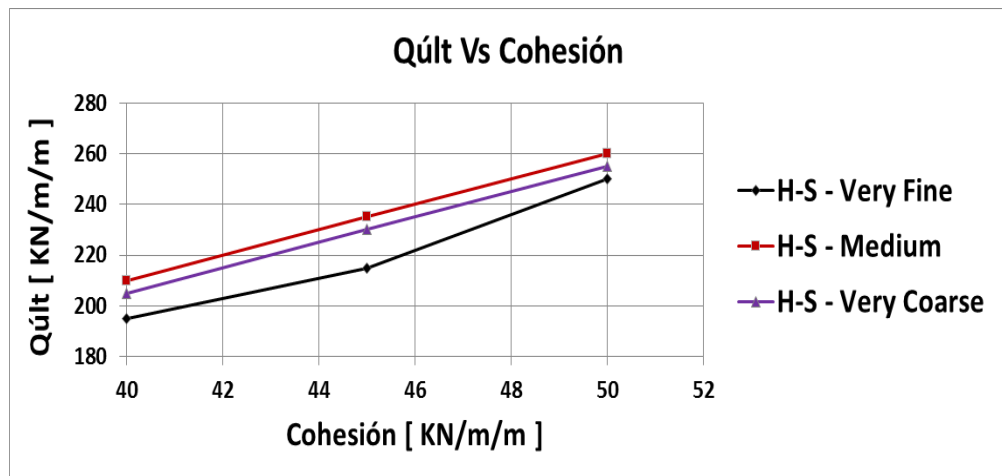
De acuerdo con la gráfica 16 la capacidad portante da igual tanto por el método de Hansen como Meyerhof, y presenta un error entre 1.5% y 2% con el modelo constitutivo de Mohr Coulomb para un tipo de malla Very Coarse (muy gruesa), mientras que con Hardening Soil el porcentaje de error es menor del 1%. En el anexo C se encuentran todos los resultados de los modelos.

La influencia de la malla para este tipo de suelos no se ve tan reflejada, puesto que cuando se analiza un modelo con tipo de malla Very Fine y se pasa luego a Very Coarse, el incremento promedio de la magnitud de la capacidad portante es del 3% con un modelo elástico lineal, y pasando a un modelo de endurecimiento por deformación es del 4.5% como se puede observar en la gráfica 14.

Gráfica 14. Influencia de la malla para arcillas saturadas – (a) Mohr Coulomb, (b) Hardening Soil para arcillas saturadas.

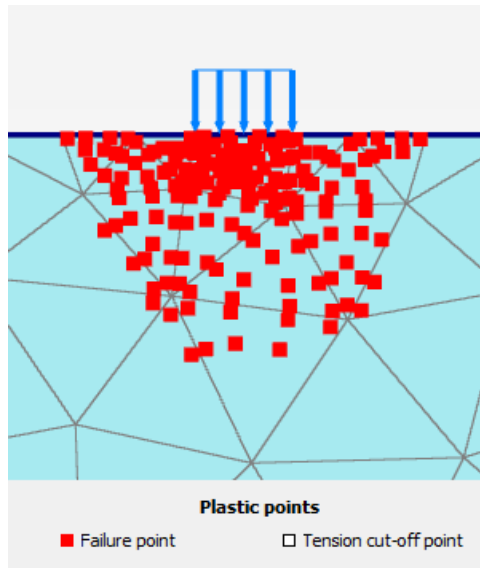


(a)

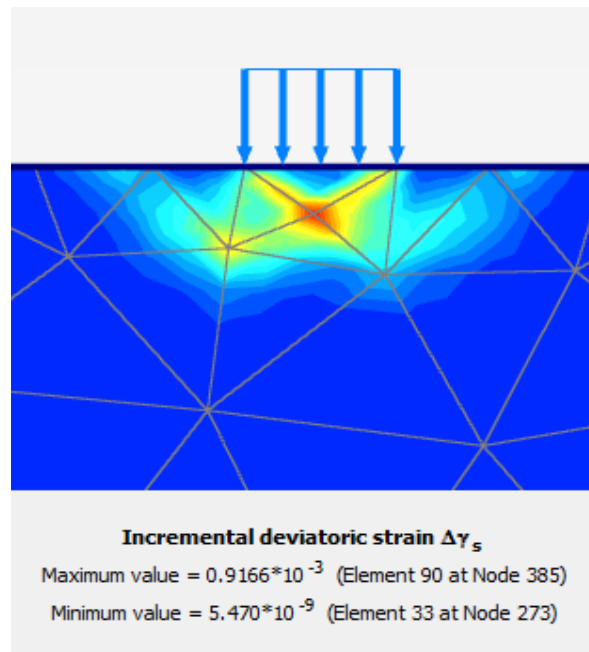


(b)

Gráfica 15. (a) Puntos plásticos - Mohr Coulomb, (b) Incremento de lo esfuerzos desviadores para arcillas saturadas.

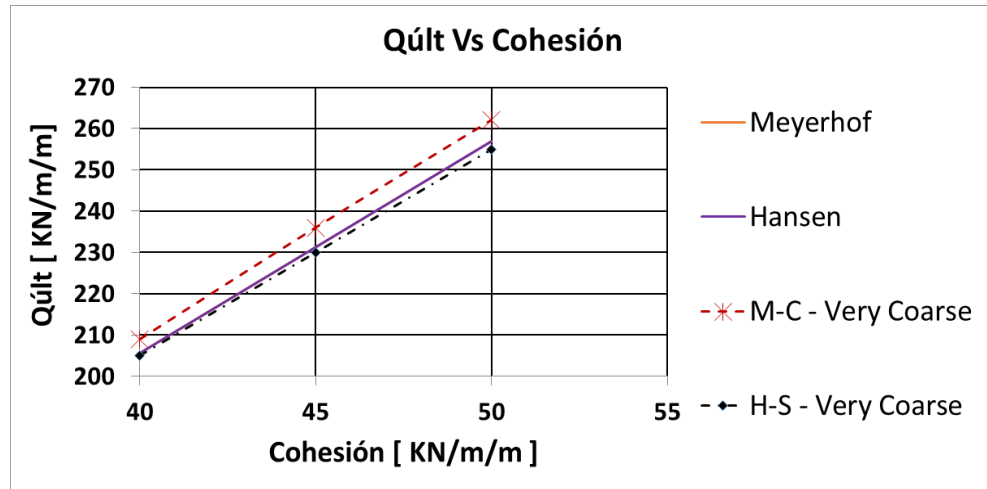


(a)



(b)

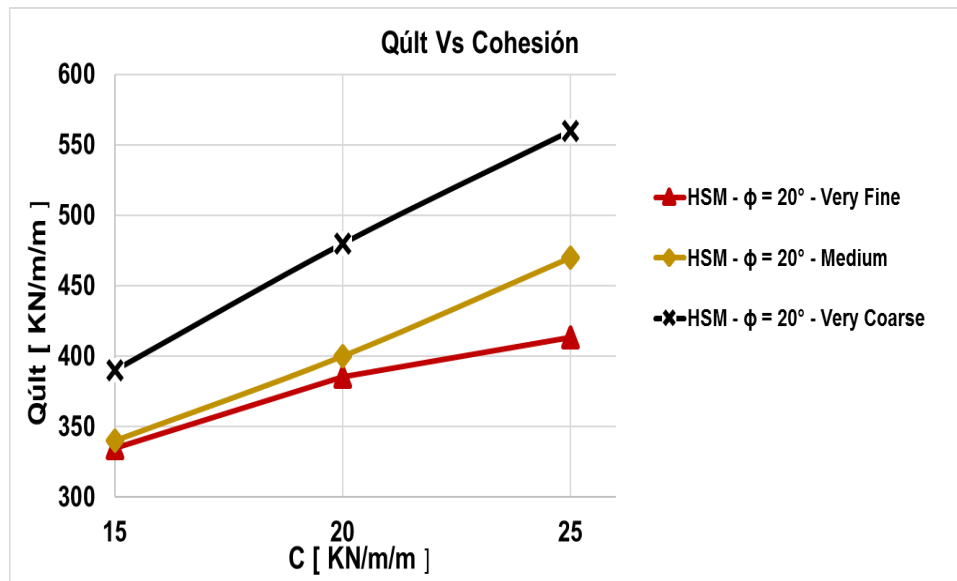
Gráfica 16. Comparación de la capacidad portante mediante modelos constitutivos y las teorías clásicas para arcillas saturadas.



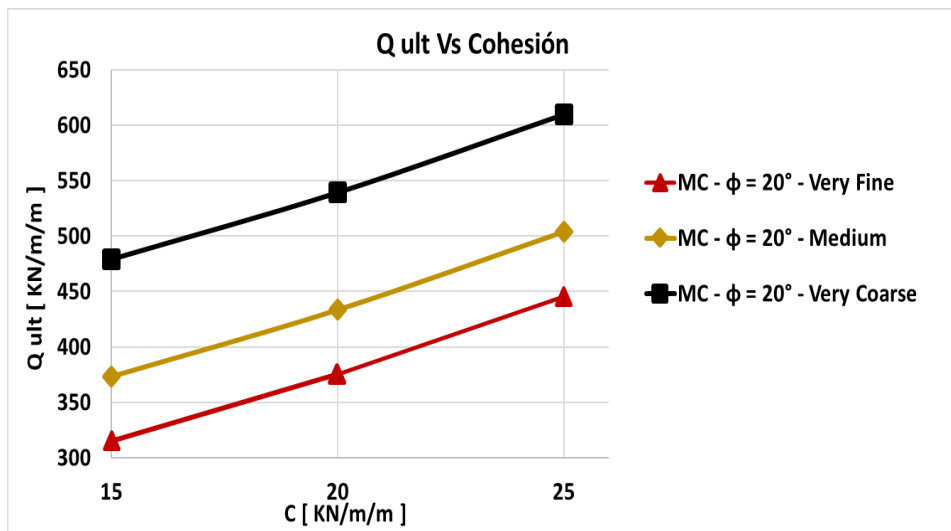
4.6 CIMIENTO CORRIDO SOBRE LIMOS SECOS.

Para el caso del cimiento corrido sobre limos secos, al aumentar sus parámetros de resistencia aumenta la capacidad de carga (Ver gráfica. 17), cuando se está modelando el suelo con diferentes tipos de refinado de malla, la capacidad portante varia, mostrando mayor capacidad con una malla gruesa, (Ver gráfica. 17), al hacer el análisis por medio del modelo constitutivo Mohr Coulomb para un ángulo de fricción $\phi = 20^\circ$ se tiene que la capacidad portante es más alta en comparación con el modelo Hardening Soil, dado que el modelo Mohr Coulomb asume un estado de falla del suelo elástico-lineal, mientras que Hardening Soil asume la falla como endurecimiento por deformación al alcanzar su estado plástico.

Gráfica 17. Capacidad de carga para diferentes valores de cohesión. (a) Modelo Hardening, $\phi = 20^\circ$, (b) Modelo Mohr Coulomb, $\phi=20^\circ$, limos secos.

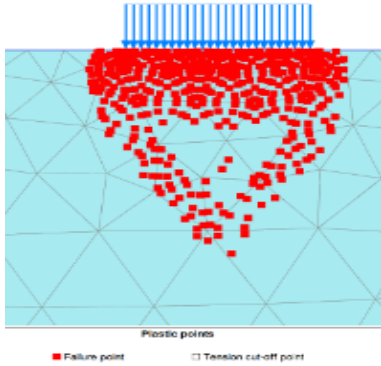


(a)

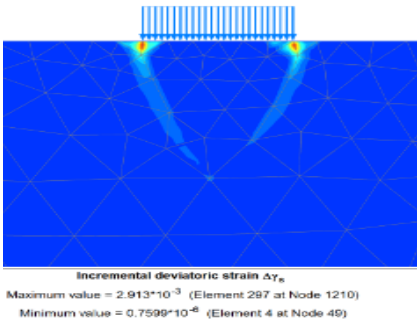


(b)

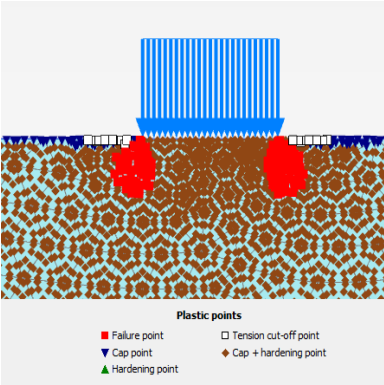
Gráfica 18. (a) Falla por punzonamiento Mohr Coulomb, (b) Puntos de esfuerzos desviadores, (c) Puntos plásticos según modelo Hardening Soil, limos secos.



(a)



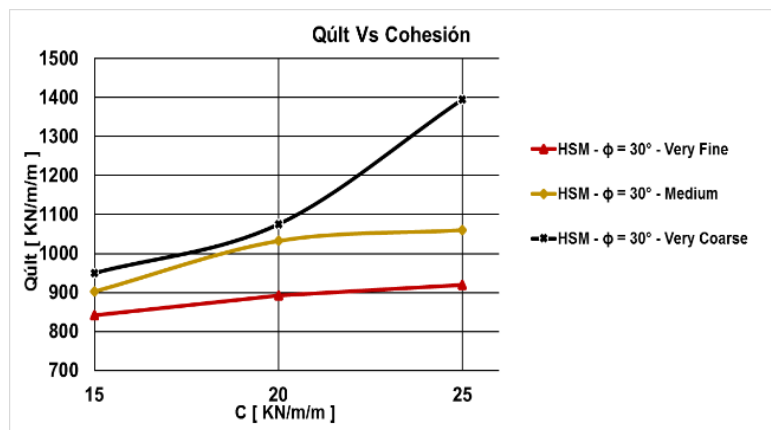
(b)



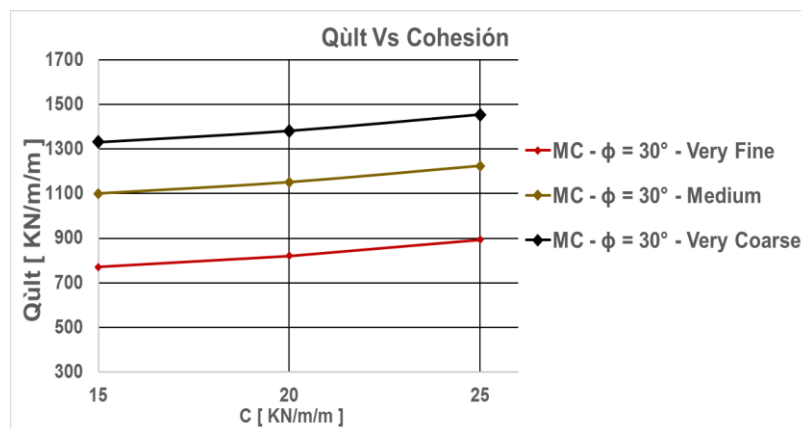
(c)

Según la gráfica 18(a), con el modelo constitutivo de M-C, el mecanismo de falla que se genera es la cuña de falla de corte por punzonamiento, mientras que en la gráfica 18(c) se están generando solamente puntos locales (puntos plásticos rojos), esto obedece a que se está trabajando con el modelo de endurecimiento por deformación. Para un ángulo de fricción $\phi = 30^\circ$ se tiene un aumento sustancial en la capacidad de soporte; entre los modelos constitutivos se tiene una diferencia en los resultados, esto se debe a los criterios de falla que utiliza cada modelo.

Gráfica 19. (a) Resultados capacidad de soporte modelo Hardening Soil $\phi=30^\circ$, diferentes valores de cohesión y malla. (b) Resultados capacidad de soporte modelo Mohr Coulomb $\phi=30^\circ$, diferentes valores de cohesión y malla, limos secos.



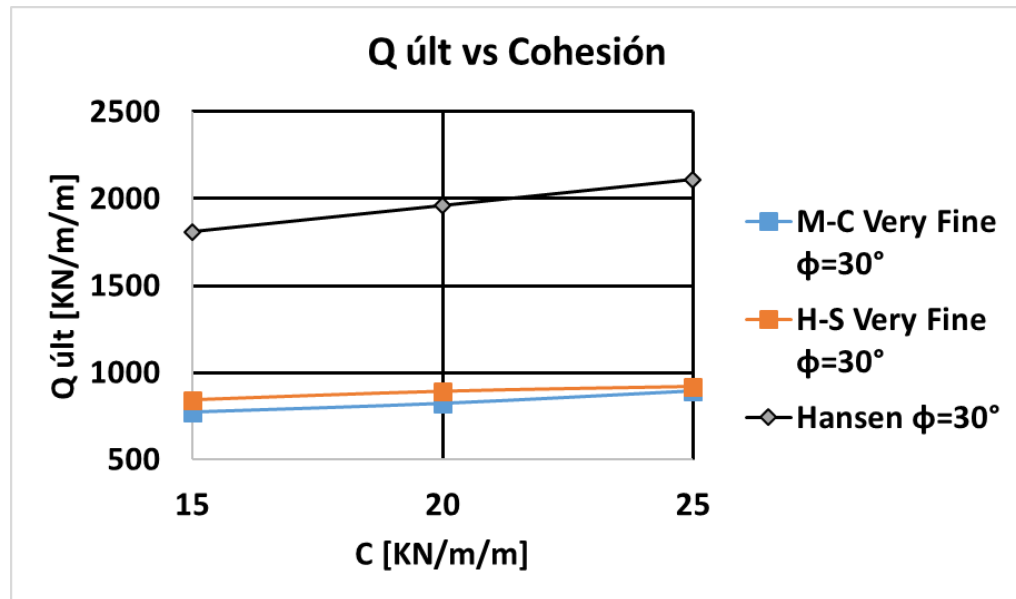
(a)



(b)

La capacidad de soporte calculada con las teorías clásicas propuestas, siempre va a ser mayor a las calculadas por medio de elementos finitos (Ver gráfica. 20), esto se debe a que las teorías clásicas asumen un suelo isotrópico e infinitamente rígido, por ende, se generan las tres cuñas de falla del suelo, como lo propuesto por Terzaghi (1943), mientras que el método de elementos finitos está basado para deformaciones pequeñas y por ende tiene en cuenta parámetros adicionales como el módulo de Young. En el anexo C se encuentra un estudio detallado sobre este efecto.

Gráfica 20. Comparación de la capacidad portante mediante modelos constitutivos para limos secos.

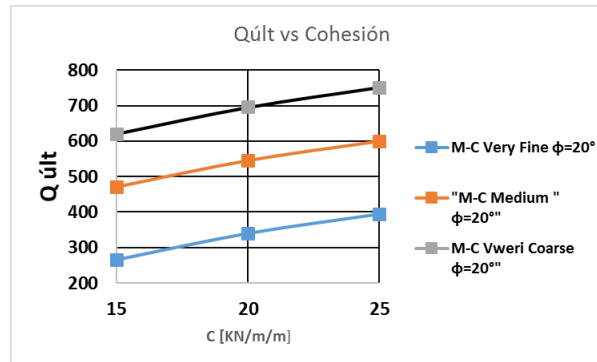


4.7 CIMIENTO CORRIDO SOBRE LIMOS SATURADOS.

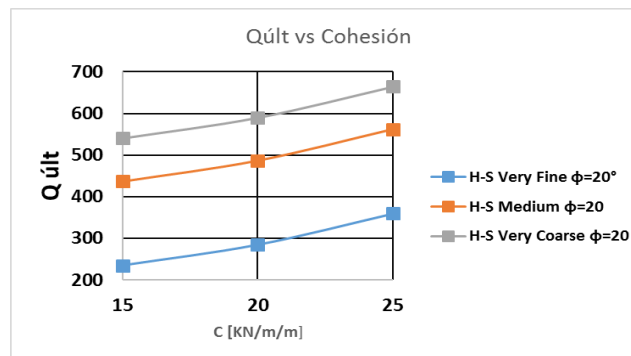
Para el caso de cimientos corridos sobre limos saturados, se presentó que la capacidad de soporte aumenta con forme se aumenta su ángulo de fricción y la cohesión (Ver gráfica. 21), También se refleja la influencia de la malla sobre los resultados, dado que se tiene una buena diferencia sobre los datos, por ende, un

considerable porcentaje de error promedio que esta alrededor del 13%, sobre los modelos constitutivos usados para el análisis, como se puede ver en la gráfica 22, Mohr Coulomb presento capacidades de soporte mayores a Hardening Soil.

Gráfica 21. Influencia de la malla - (a) Mohr Coulomb, (b) Hardening Soil para limos saturados.



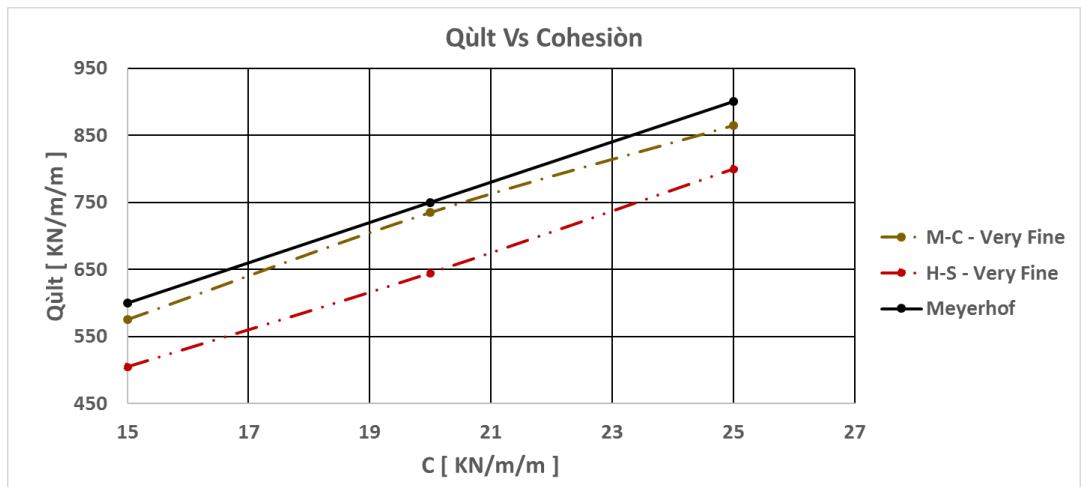
(a)



(b)

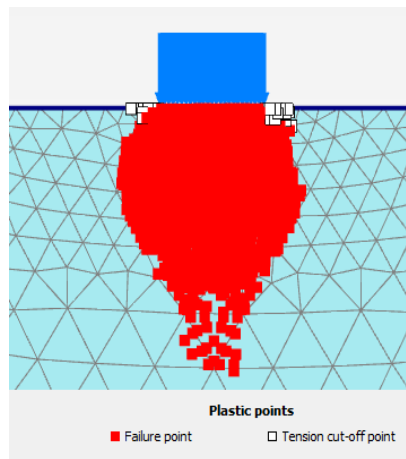
Como se puede ver en la gráfica 22, la capacidad portante presenta un error promedio de 3% con respecto al modelo constitutivo de Mohr Coulomb y del 14% con Hardening Soil, esto sucede por la influencia que tiene el agua sobre el modelo.

Gráfica 22. Comparación de la capacidad portante con las teorías clásicas, para $\phi = 30^\circ$, limos saturados.

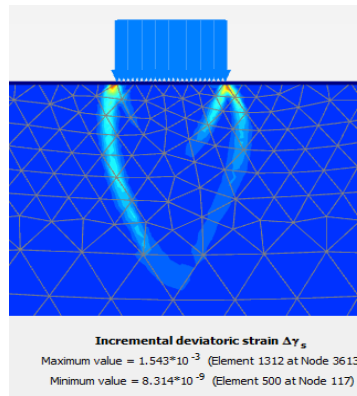


En los resultados se puede ver que el análisis del suelo obedece a un tipo de falla clásica, en este caso se presenta una falla por punzonamiento.

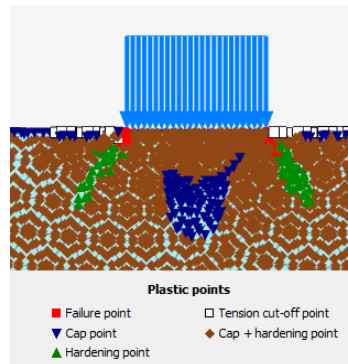
Gráfica 23. (a). Puntos de falla Mohr Coulomb. (b). Esfuerzos desviadores (c). Puntos de falla Hardening Soil, limos saturados.



(a)



(b)



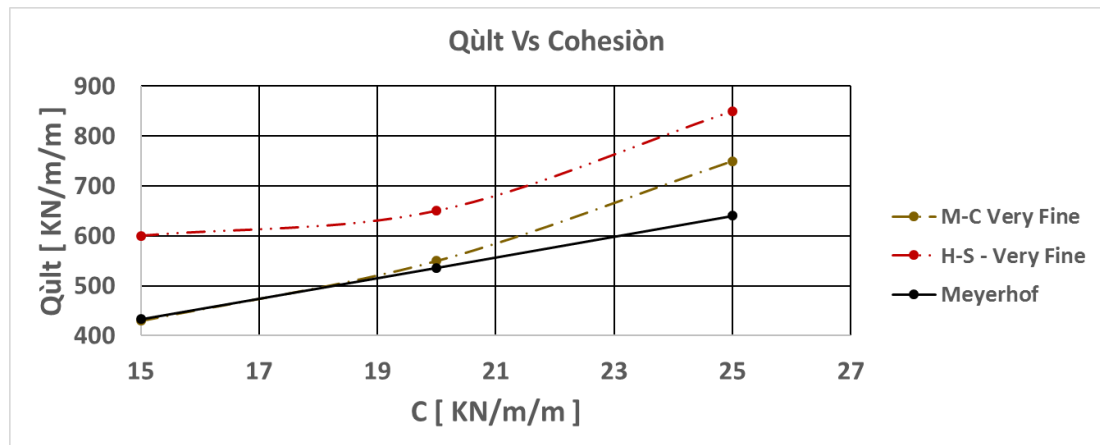
(c)

4.8 CIMIENTO CORRIDO SOBRE LIMOS CON NIVEL FREÁTICO A 2 [m].

Los cimientos corridos sobre limos con nivel freático próximo a la cimentación tienen efecto sobre la capacidad de soporte, en este caso se presentan los resultados obtenidos al modelar esta situación con método de elementos finitos y su respectiva comparación con teorías clásicas. Según la gráfica 24, para cohesiones menores a 20 [KN/m/m], la tendencia teórica y numérica por medio de M-C, es lineal con un error menor a 1%, y de ahí en adelante pierde esta tendencia y se vuelve más conservativa la capacidad portante por teoría clásica. También hay un desfase en

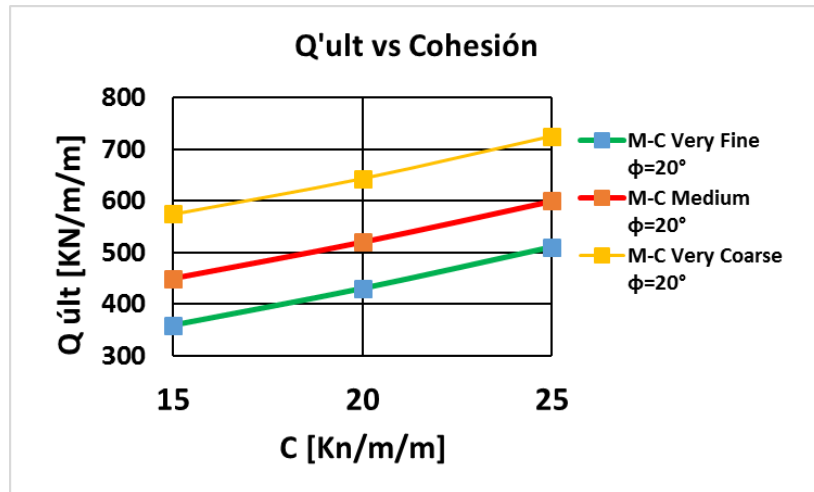
la capacidad portante considerable cuando se ha cambiado al modelo de endurecimiento por deformación del 31%. Ver gráfica. (24).

Gráfica 24. Comparación teorías clásicas con Método Elementos Finitos para limos con nivel freático a 2 [m].

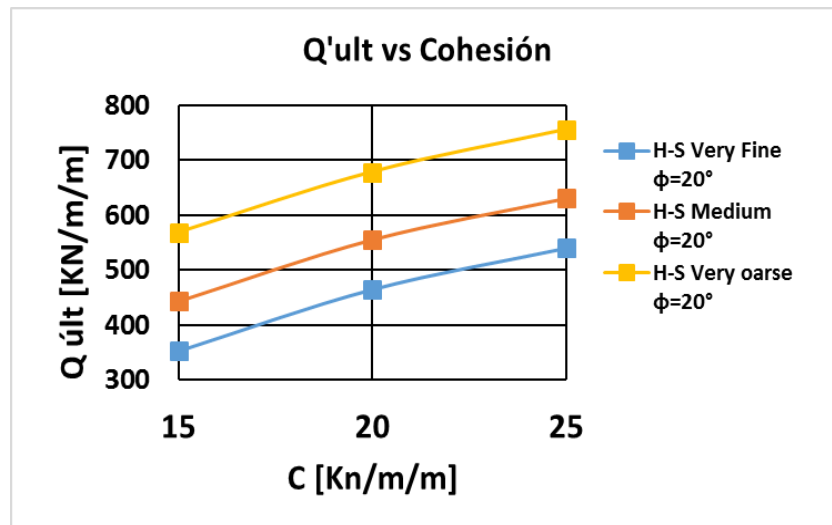


La influencia de la malla se refleja en la gráfica 25 donde los resultados distan en buena proporción dependiendo del refinado de la malla escogida para el análisis, teniendo en cuenta un ángulo de fricción $\phi = 30^\circ$; en cuanto a los modelos Mohr Coulomb y Hardening Soil los resultados de la capacidad de soporte obtenidos fueron similares gráfica 25. Por otro parte los tipos de falla para este caso de estudio se presentan en la gráfica 26, donde se alcanza a formar una falla general, pero predomina una cuña de falla por punzonamiento.

Gráfica 25. Influencia de la malla en la capacidad portante, (a) modelos Mohr Coulomb, (b) Hardening Soil para limos con nivel freático a 2 [m].

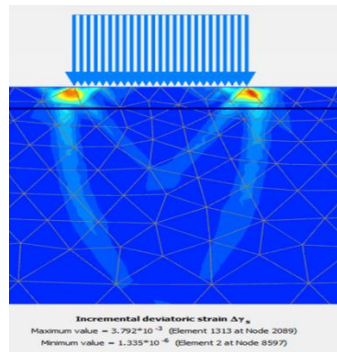


(a)

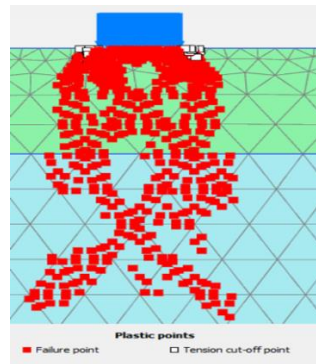


(b)

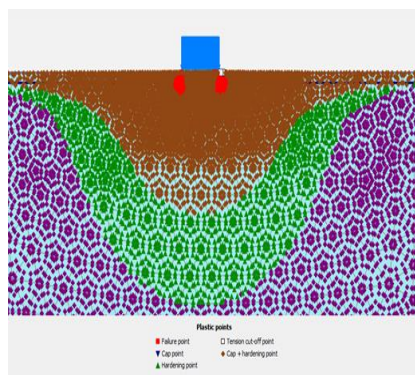
Gráfica 26. (a) Esfuerzos desviadores, (b) puntos de falla Mohr Coulomb, (c) puntos de falla Hardening Soil, para limos con nivel freático a 2 [m].



(a)



(b)



(c)

5. CONCLUSIONES

Vesic (1973), propuso que para arenas sueltas el mecanismo de falla se presentaba por punzonamiento, esto se pudo evidenciar cuando se utilizó los modelos constitutivos de Mohr Coulomb y Hardening Soil, además este mecanismo de falla también se dio en los demás suelos analizados; esto se debía a que el modelo numérico se basa para deformaciones pequeñas. Los resultados obtenidos de la capacidad portante por teorías eran bastantes cercanos para arcillas saturadas excepto para los otros tipos de suelos.

Por otra parte, al tener en cuenta el nivel freático en arenas la capacidad de carga ultima disminuye, esto se debió a que el modelo numérico tiene en cuenta considerablemente los efectos del agua, es decir, la envolvente de resistencia trabaja en términos de esfuerzos efectivos y por ende el suelo se acerca más a la envolvente de rotura, para limos pasa lo contrario, es decir, aumenta la capacidad de carga.

Dentro de las observaciones generales encontradas, está el tipo de malla para la simulación en Plaxis 2D, mostrando una variación de la capacidad portante cuando se hace un cambio de estas, por otra parte se han realizado estudios usando elementos finitos y se ha encontrado que para los casos de arcillas saturadas es ajeno si se usa un modelo numérico o teórico, sin embargo para los otros tipos de suelos, lo predilecto para el análisis de capacidad portante en cimientos corridos continua siendo las teorías clásicas, que si bien en muchos casos son conservadoras también son muy simplificadas y muchos parámetros que pueden influir son ignorados, como por ejemplo el Modulo de Young, coeficiente de Poisson, ángulo de dilatancia que si tienen en cuenta al utilizar un modelo constitutivo.

Se realizó un estudio sobre el comportamiento de la capacidad portante sobre cimientos corridos comparado los resultados con las teóricas clásicas y los resultados de soluciones numéricas usando el método de los elementos finitos, para diferentes tipos de suelo, donde se seleccionaron rangos en los parámetros de ϕ , c' , con el fin de identificar la influencia de estas propiedades del suelo en la capacidad portante y además estudiar la influencia de la malla para el modelo.

En general para las arcillas saturadas a corto plazo, la magnitud de la capacidad portante calculadas numéricamente y teóricamente resultaron ser aproximadamente iguales, excepto para los otros tipos de suelo, donde dicha magnitud variaba considerablemente, esto se debió al tipo de malla y refinado de la misma y otras propiedades que si involucra el modelo numérico.

Analizando la sensibilidad de la malla para arcillas saturadas se encontró que a diferencia con los otros tipos de suelos estudiados, el tipo de malla no tenía gran influencia sobre la magnitud de la capacidad portante, es decir, cuando se analizó una arcilla saturada y con un tipo de malla Very Fine y luego se pasa a Very Coarse el incremento de la capacidad portante es del 3% para Mohr Coulomb y 4.45% para Hardening Soil, mientras que para los otros tipos de suelo con estas mismas condiciones de malla los incrementos eran mayores de 34% para Mohr Coulomb y 50% para Hardening Soil.

Se concluyó con este trabajo que a diferencia del modelo Mohr Coulomb el modelo de endurecimiento (Hardening Soil), representa la realidad de forma un poco más realística ya que una vez se alcanza la condición de plasticidad de un elemento, no implica que falle como en el modelo Mohr Coulomb.

Se observó que en los suelos limosos la magnitud de la capacidad portante con los modelos constitutivos era menor que aplicando las teorías clásicas; este efecto se debe a que la teoría supone una falla de tipo general y, por otra parte, el modelo

numérico solo fue capaz de predecir una falla de tipo local, la cual se alcanzó a mucho menos valor de la falla general, esa es la razón de tal diferencia en los valores. El modelo numérico no pudo alcanzar tales valores porque el módulo elástico era bajo y no infinitamente rígido como se supone en la teoría, y, por otra parte, el modelo numérico debe cumplir con condiciones no solo de equilibrio sino de compatibilidad de deformaciones y, por lo tanto, sostiene cargas hasta donde el equilibrio de esfuerzos y los desplazamientos son relativamente razonables.

Para modelar en PLAXIS 2D se debe tener en cuenta la dimensión del dominio que se desea estudiar, puesto que al variar dichas dimensiones se presenta un incremento en la capacidad portante muy considerable; para escoger el área óptima de trabajo se debe observar que las condiciones de contorno no influyan sobre los desplazamientos totales. Otro criterio para escoger el dominio es cuando la capacidad de carga permanece constante y no dependería del espesor del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

BOWLES, Joseph E. Foundation analysis and design. 4ª Edición. EEUU Editorial McGraw Hill, 1988.

BRAJA M. Das. Principios de ingeniería de cimentaciones. 4ª Edición. México, Internacional Thomson Editores, 2001.

BRINKGREVE R.B.J.. Manual de referencia PLAXIS 2D. Primera edición. Países Bajos: PLAXIS b.v. P.O. Box 572, 2600 AN DELFT. 2004.

CHANDRUPATLA, Tirupathi R. BELEGUNDU, Ashok D. Introduction to finite elements in engineering. 4ª Edición. Upper Saddle river, NJ. Pearson, 2012.

COOK R., Finite element modeling for stress analysis, New York: John Wiley & Sons, 1995.

DIAZ DIAZ, Yamyle; LOPEZ ALVARADO, Elizabeth. Plaxis como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad punta arenas. Punta Arenas. 2008, p. 15.

GUBERT, Xavier; BALLESTER, Miquel. Mecánica del medio continuo en la ingeniería. Teorías y problemas resueltos. Barcelona, 2012. p. 215.

HARR, M. E. Foundations of theoretical soil mechanics. New York, McGraw-Hill, 1966.

LEE, Ian K. Geotechnical engineering. 1ª Edición; EEUU Editorial Pitman, 1983.

MEYERHOF G.G. "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", Geotechnique, Vol. 2, No. 4. 1952

NAVFAC DM-7 "Design Manual Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures", Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, U.S. Navy. 1982

PECK, Ralph B. Ingeniería de cimentaciones. 2ª Edición, México, Editorial LIMUSA, 1996.

SUAREZ D. Jaime., Ingeniería civil – Diseño de cimientos. Segunda Edición. Publicaciones UIS. Bucaramanga, 1992.

TERZAGHI K. "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley, New York. 1943

ANEXOS

Anexo A. Definición de la geometría de trabajo

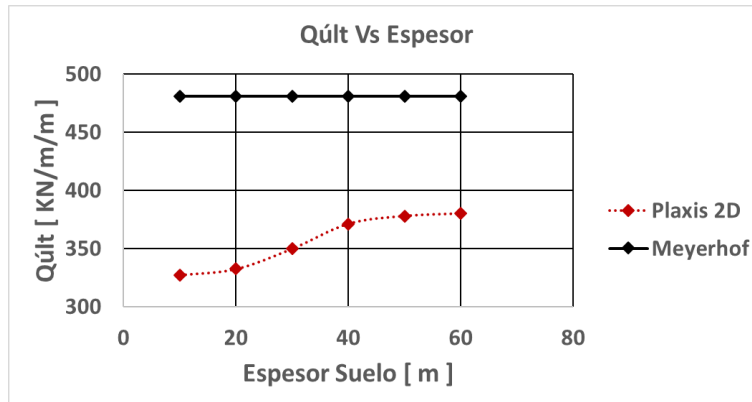
Para la simulación de los casos a estudiar en este trabajo, se tomó un cimiento corrido de $B = 10$ m de ancho, y para determinar la geometría de trabajo (suelo) en el software Plaxis 2D, se procede a variar la distancia vertical como se muestra en la tabla 1, con los parámetros $\phi = 20^\circ$, $E = 150$ MPa, $C' = 15$ KN/m² constantes.

Tabla 1. Capacidad portante última, en Plaxis 2D y teorías clásicas.

| Espesor Suelo | Qúlt | | | |
|---------------|------------|------------|------------|------------|
| | Plaxis 2D | Terzaghi | Meyerhof | Hansen |
| [m] | [KN/m/m] | [KN/m/m] | [KN/m/m] | [KN/m/m] |
| 10 | 327 | 746 | 481 | 488 |
| 20 | 332 | 746 | 481 | 488 |
| 30 | 350 | 746 | 481 | 488 |
| 40 | 371 | 746 | 481 | 488 |
| 50 | 378 | 746 | 481 | 488 |
| 60 | 379 | 746 | 481 | 488 |

Las ecuaciones clásicas para la determinación de capacidad portante en cimientos corridos no tienen en cuenta las dimensiones del medio, en el cual está la losa de cimentación, pero en el software Plaxis 2D la distancia horizontal tiene importancia solamente para que la superficie de falla se desarrolle, mientras que el espesor del suelo en profundidad si es relevante para el estudio en Plaxis 2D, como se puede observar en la gráfica 27, al incrementar el espesor del suelo, la capacidad portante tiene una tendencia lineal entre un rango de espesor de suelo de 20 a 40 m y luego se torna constante para espesores mayores de 50 m, mientras que por las teorías permanece constante.

Gráfica 27. Influencia del espesor de suelo.



Para saber cuál será la profundidad (espesor) óptima para la modelación se tuvo en cuenta los desplazamientos totales que presentaba el suelo ante la carga impuesta. En un modelo se deben establecer las condiciones de frontera o contornos generales, que establecen en los bordes del modelo geométrico desplazamientos nulos, es decir, $U_x = U_y = 0$.

Figura 5. Desplazamientos totales, CON interferencia del medio.

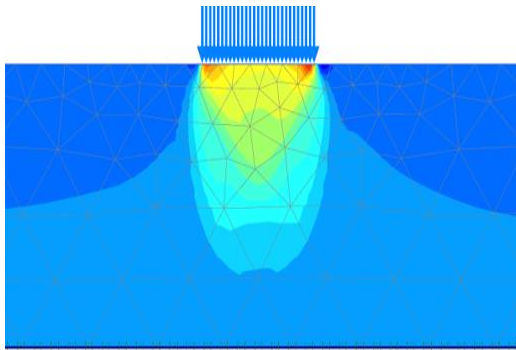
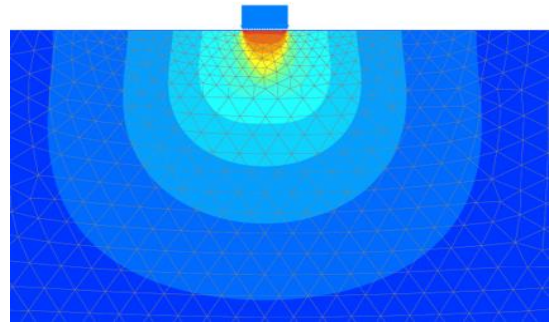


Figura 6. Desplazamientos totales, SIN interferencia del medio.



En la figura 5 se puede apreciar que el espesor del suelo no puede permitir que se desarrolle bien el bulbo de desplazamientos, puesto que existe una fuerza que contrarresta dicho desplazamiento y hace devolver la fuerza y por consiguiente la capacidad portante disminuirá, por ende se llegó a un sistema homogéneo como el

de la figura 6 donde esta fuerza que actúa no hace efecto sobre el bulbo de desplazamientos, dando de esta manera un medio de trabajo de 100 [m] de largo X 60 [m] de profundidad; se sugiere que para hacer un modelo en Plaxis 2D el espesor del suelo tiene que ser mayor o igual a cinco veces el ancho del cimiento corrido, según grafica 27.

Anexo B. Parámetros de los modelos a estudiar

A continuación se muestran las tablas con las propiedades de los parámetros geo mecánicos como geotécnicos para los diferentes tipos de suelos a estudiar, teniendo en cuenta los modelos constitutivos de Mohr-Coulomb y Hardening Soil.

Tabla 2. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arenas secas y saturadas. M-C

| Propiedades del suelo (Mohr - Coulomb) | | | | |
|--|-------------------------------------|-----------|-------------------|-----------------|
| | Parámetro | Nombre | Unidad | Valor |
| Constante | Modelo de Material | Model | -- | Mohr Coulomb |
| | Tipo de comportamiento del material | Type | -- | Drained |
| | Peso específico saturado del suelo | γ | KN/m ³ | 20 |
| | Peso específico del suelo | γ | KN/m ³ | 18 |
| | Coefficiente de Poisson | μ | -- | 0.3 |
| | Cohesión | c' | KN/m ² | 0 |
| | Ángulo de dilatancia | φ | ° | 0 |
| | Módulo de Young | E | MPa | 100 |
| Variable | Ángulo de fricción | φ | ° | (20° - 30°) |

Tabla 3. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arenas con nivel freático a 2 [m]. M-C

| Propiedades del suelo (Mohr - Coulomb) | | | | |
|---|--|---------------|-------------------|-----------------|
| | Parámetro | Nombre | Unidad | Valor |
| Constante | Modelo de Material | Model | -- | Mohr Coulomb |
| | Tipo de comportamiento del material | Type | -- | Drained |
| | Peso específico saturado del suelo | γ | KN/m ³ | 20 |
| | Peso específico del suelo | γ | KN/m ³ | 18 |
| | Coefficiente de Poisson | μ | -- | 0.3 |
| | Cohesión | c' | KN/m ² | 0 |
| | Ángulo de dilatancia | φ | ° | 0 |
| | Módulo de Young | E | MPa | 100 |
| Variable | Ángulo de fricción | φ | ° | (30° - 40°) |

Tabla 4. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para limos secos, saturados y con nivel freático a 2 [m]. M-C

| Propiedades del suelo (Mohr - Coulomb) | | | | |
|---|--|------------------------|-------------------|-----------------|
| | Parámetro | Nombre | Unidad | Valor |
| Constante | Modelo de Material | Model | -- | Mohr Coulomb |
| | Tipo de comportamiento del material | Type | -- | Drained |
| | Peso específico saturado del suelo | γ_{Sat} | KN/m ³ | 20 |
| | Peso específico del suelo | γ | KN/m ³ | 18 |
| | Coefficiente de Poisson | μ | -- | 0.3 |
| | Ángulo de dilatancia | ψ | ° | 0 |
| | | Módulo de Young | E | MPa |
| Variable | Ángulo de fricción | φ | ° | (20° - 30°) |
| | Cohesión | c' | KN/m ² | (15° - 25°) |

Tabla 5. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arcillas saturadas M-C.

| Propiedades del suelo (Mohr - Coulomb) | | | | |
|--|-------------------------------------|-----------|-------------------|-----------------|
| | Parámetro | Nombre | Unidad | Valor |
| Constante | Modelo de Material | Model | -- | Mohr Coulomb |
| | Tipo de comportamiento del material | Type | -- | Undrained |
| | Peso específico saturado del suelo | γ | KN/m ³ | 20 |
| | Peso específico del suelo | γ | KN/m ³ | 18 |
| | Coefficiente de Poisson | μ | -- | 0.5 |
| | Ángulo de fricción | c' | KN/m ² | 0 |
| | Ángulo de dilatancia | φ | ° | 0 |
| Variable | Módulo de Young | E | MPa | 120 |
| | Cohesión | φ | ° | (40° - 50°) |

Tabla 6. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arenas secas y saturadas. H-S

| Propiedades del suelo (Hardening Soil) | | | | |
|--|-------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | Parámetro | Nombre | Unidad | Valor |
| Constante | Modelo de Material | Model | -- | Hardening Soil |
| | Tipo de comportamiento del material | Type | -- | Drained |
| | Peso específico saturado del suelo | γ | KN/m ³ | 20 |
| | Peso específico del suelo | γ | KN/m ³ | 18 |
| | E_{50}^{ref} | E_{50}^{ref} | MPa | 30 |
| | E_{oed}^{ref} | E_{oed}^{ref} | MPa | 24 |
| | E_{ref} | E_{ref} | MPa | 90 |
| | Cohesión | c' | KN/m ² | 0 |
| | Ángulo de dilatancia | φ | ° | 0 |
| Variable | Ángulo de fricción | φ | ° | (20° - 30°) |

Tabla 7. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arenas con nivel freático a 2 [m]. H-S

| Propiedades del suelo (Hardening Soil) | | | | |
|--|-------------------------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| | Parámetro | Nombre | Unidad | Valor |
| Constante | Modelo de Material | Model | -- | Hardening Soil |
| | Tipo de comportamiento del material | Type | -- | Drained |
| | Peso específico saturado del suelo | γ | KN/m ³ | 20 |
| | Peso específico del suelo | γ | KN/m ³ | 18 |
| | E_{50}^{ref} | E_{50}^{ref} | MPa | 30 |
| | E_{oed}^{ref} | E_{oed}^{ref} | MPa | 24 |
| | E_{ref} | E_{ref} | MPa | 90 |
| | Cohesión | c' | KN/m ² | 0 |
| | Ángulo de dilatancia | φ | ° | 0 |
| Variable | Ángulo de fricción | φ | ° | (30° - 40°) |

Tabla 8. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para limos secos, saturados y con nivel freático a 2 [m]. H-S

| Propiedades del suelo (Hardening Soil) | | | | |
|--|-------------------------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| | Parámetro | Nombre | Unidad | Valor |
| Constante | Modelo de Material | Model | -- | Hardening Soil |
| | Tipo de comportamiento del material | Type | -- | Drained |
| | Peso específico saturado del suelo | γ_{Sat} | KN/m ³ | 20 |
| | Peso específico del suelo | γ | KN/m ³ | 18 |
| | E_{50}^{ref} | E_{50}^{ref} | MPa | 30 |
| | E_{oed}^{ref} | E_{oed}^{ref} | MPa | 24 |
| | E_{ref} | E_{ref} | MPa | 90 |
| | Ángulo de dilatancia | ψ | ° | 0 |
| Variable | Ángulo de fricción | φ | ° | (20° - 30°) |
| | Cohesión | c' | KN/m ² | (15° - 25°) |

Tabla 9. Propiedades usadas en los análisis de elementos finitos para arcillas saturadas H-S

| Propiedades del suelo (Hardening Soil) | | | | |
|---|--|-----------------|-------------------|----------------|
| | Parámetro | Nombre | Unidad | Valor |
| Constante | Modelo de Material | Model | -- | Hardening Soil |
| | Tipo de comportamiento del material | Type | -- | Undrained |
| | Peso específico saturado del suelo | γ | KN/m ³ | 20 |
| | Peso específico del suelo | γ | KN/m ³ | 18 |
| | E_{50}^{ref} | E_{50}^{ref} | MPa | 30 |
| | E_{oed}^{ref} | E_{oed}^{ref} | MPa | 24 |
| | E_{ref} | E_{ref} | MPa | 90 |
| | Ángulo de fricción | c' | KN/m ² | 0 |
| | Ángulo de dilatancia | φ | ° | 0 |
| Variable | Cohesión | φ | ° | (40° - 50°) |

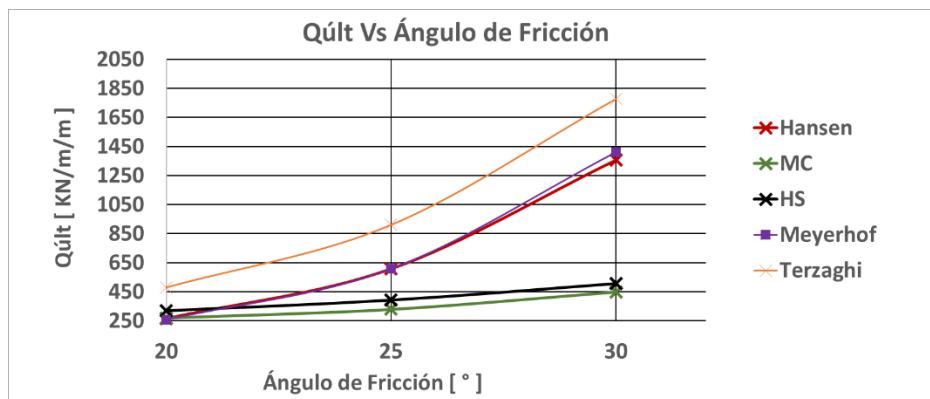
Anexo C. Resultado de los modelos numéricos

- Cimientos corridos sobre arenas secas.

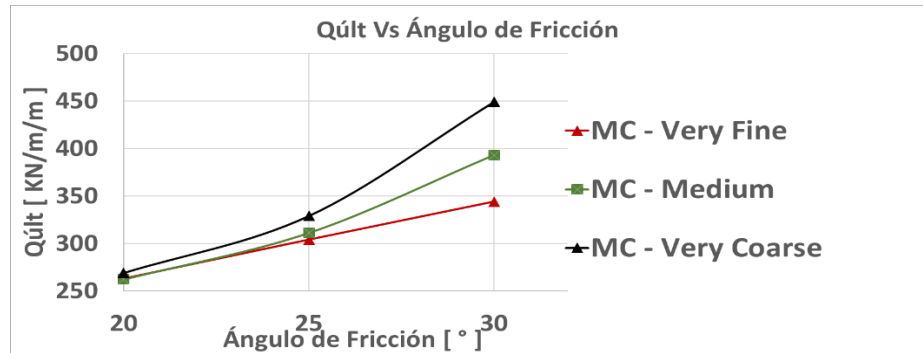
Tabla 10. Resultados de la comparación de capacidad portante para arenas secas.

| Tipo de Malla | Ángulo [°] | Capacidad de Carga [KN/m/m] | | | | | Error [%] | | | | | |
|---------------|--------------|-------------------------------|-----|---------|------|------|-------------|-----|----------|-----|--------|-----|
| | | Plaxis 2D | | Teórico | | | Terzaghi | | Meyerhof | | Hansen | |
| | | MC | HSM | T | M | H | MC | HSM | MC | HSM | MC | HSM |
| Very Fine | 20 | 263 | 303 | 481 | 258 | 265 | 45 | 37 | -2 | -17 | 1 | -14 |
| | 25 | 304 | 358 | 911 | 609 | 608 | 67 | 61 | 50 | 41 | 50 | 41 |
| | 30 | 344 | 423 | 1777 | 1410 | 1356 | 81 | 76 | 76 | 70 | 75 | 69 |
| Medium | 20 | 262 | 307 | 481 | 258 | 265 | 45 | 36 | -1 | -19 | 1 | -16 |
| | 25 | 311 | 373 | 911 | 609 | 608 | 66 | 59 | 49 | 39 | 49 | 39 |
| | 30 | 393 | 488 | 1777 | 1410 | 1356 | 78 | 73 | 72 | 65 | 71 | 64 |
| Very Coarse | 20 | 269 | 319 | 481 | 258 | 265 | 44 | 34 | -4 | -23 | -1 | -20 |
| | 25 | 329 | 393 | 911 | 609 | 608 | 64 | 57 | 46 | 35 | 46 | 35 |
| | 30 | 449 | 508 | 1777 | 1410 | 1356 | 75 | 71 | 68 | 64 | 67 | 63 |

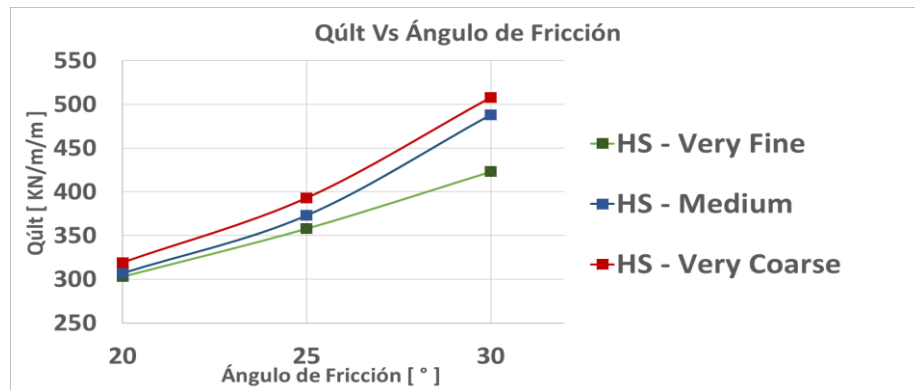
Gráfica 28. Comparación de capacidad portante para arenas secas, por medio de modelos constitutivos.



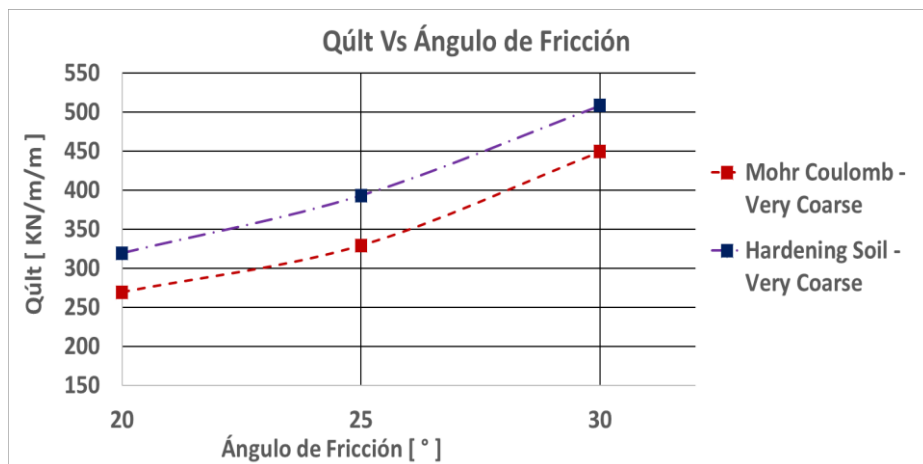
Gráfica 29. Influencia de la malla según M-C; arenas secas.



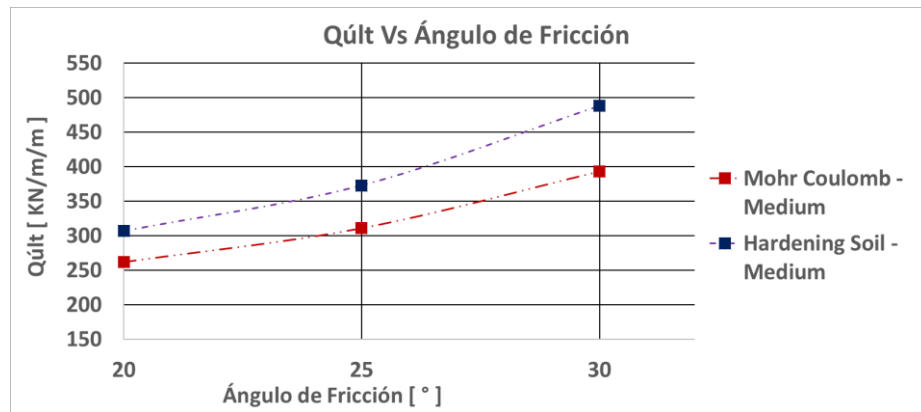
Gráfica 30. Influencia de la malla según H-S; arenas secas.



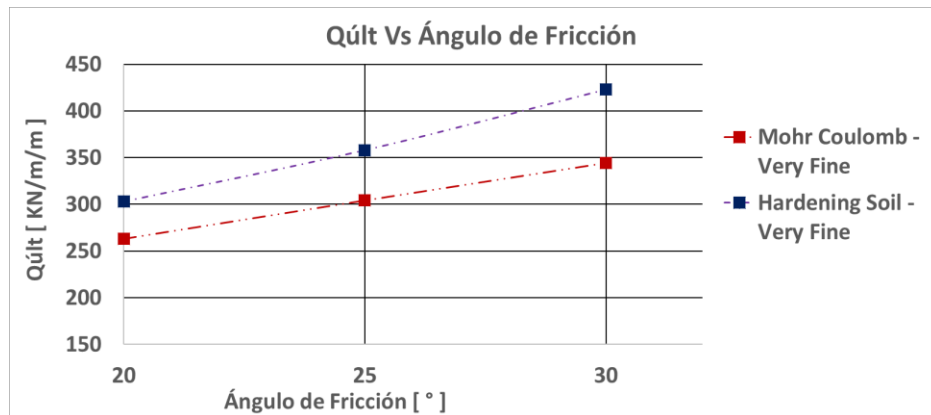
Gráfica 31. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse; arenas secas.



Gráfica 32. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium; arenas secas.



Gráfica 33. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; arenas secas.

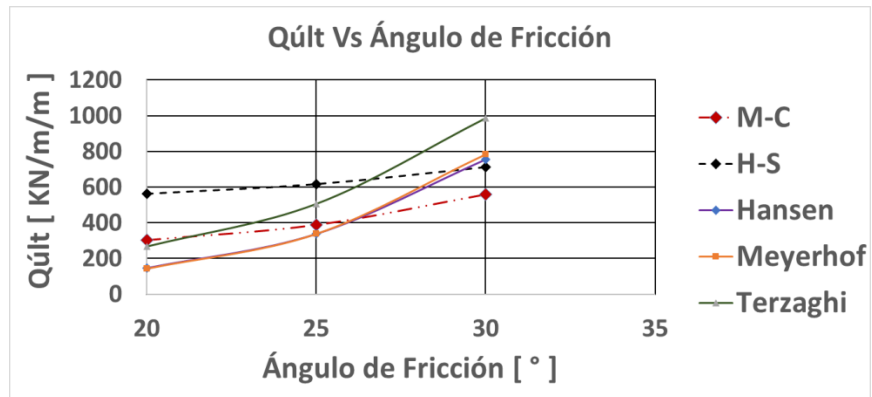


- Cimiento corrido sobre arenas saturadas.

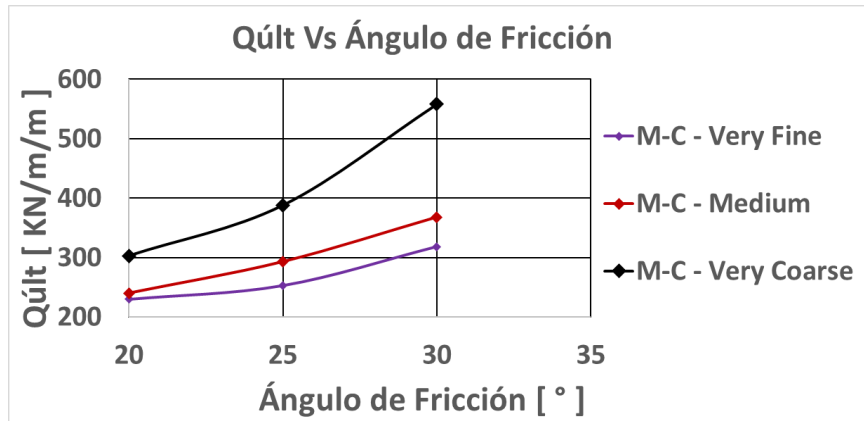
Tabla 11. Resultados de la comparación de capacidad portante para arenas saturadas.

| Tipo de Malla | Ángulo [°] | Capacidad de Carga [KN/m/m] | | | | | Error [%] | | | | | |
|---------------|--------------|-------------------------------|-----|---------|-----|-----|-------------|-----|----------|------|--------|-----|
| | | Plaxis 2D | | Teórico | | | Terzaghi | | Meyerhof | | Hansen | |
| | | MC | HSM | T | M | H | MC | HSM | MC | HSM | MC | HSM |
| Very Fine: | 20 | 230 | 278 | 267 | 144 | 147 | 14 | -4 | -60 | -94 | -56 | -89 |
| | 25 | 253 | 298 | 506 | 338 | 338 | 50 | 41 | 25 | 12 | 25 | 12 |
| | 30 | 318 | 363 | 987 | 783 | 753 | 68 | 63 | 59 | 54 | 58 | 52 |
| Medium: | 20 | 240 | 289 | 267 | 144 | 147 | 10 | -8 | -67 | -101 | -63 | -96 |
| | 25 | 293 | 343 | 506 | 338 | 338 | 42 | 32 | 13 | -1 | 13 | -2 |
| | 30 | 368 | 438 | 987 | 783 | 753 | 63 | 56 | 53 | 44 | 51 | 42 |
| Very Coarse: | 20 | 303 | 563 | 267 | 144 | 147 | -13 | 111 | 111 | 292 | 106 | 282 |
| | 25 | 388 | 617 | 506 | 338 | 338 | 23 | -22 | -15 | -82 | -15 | -83 |
| | 30 | 558 | 712 | 987 | 783 | 753 | 43 | 28 | 29 | 9 | 26 | 6 |

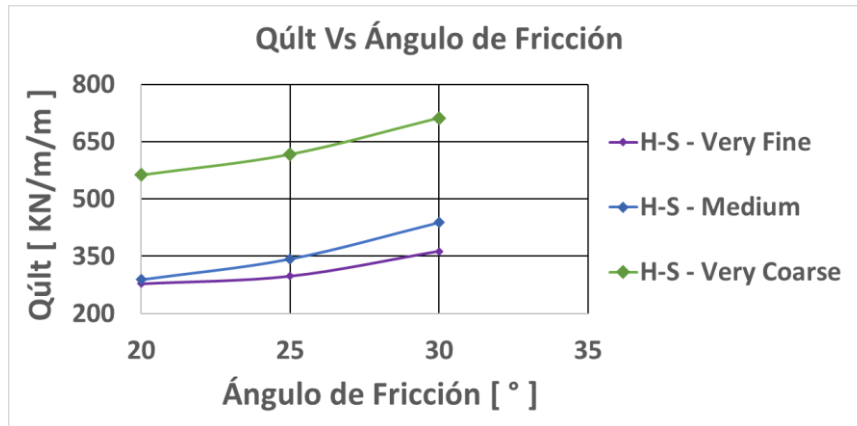
Gráfica 34. Comparación de capacidad portante para arenas saturadas, por medio de modelos constitutivos.



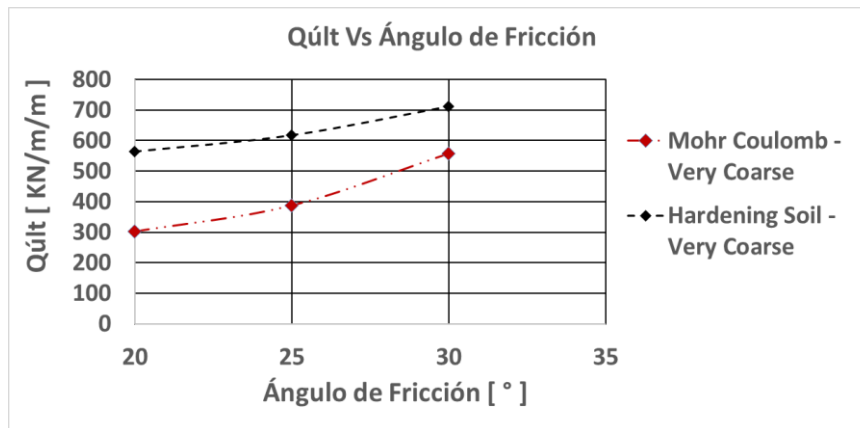
Gráfica 35. Influencia de la malla según M-C; arenas saturadas.



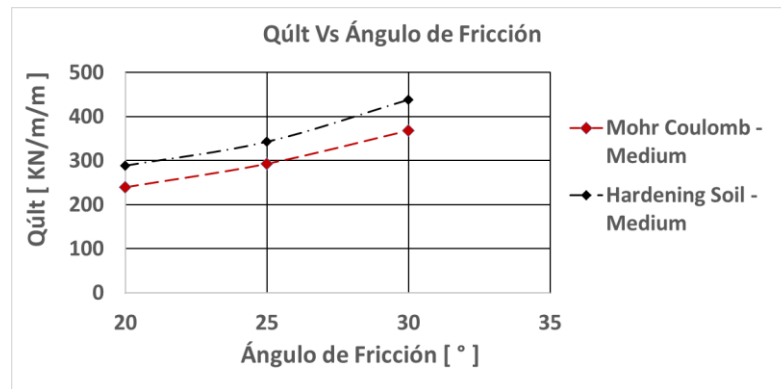
Gráfica 36. Influencia de la malla según H-S; arenas saturadas.



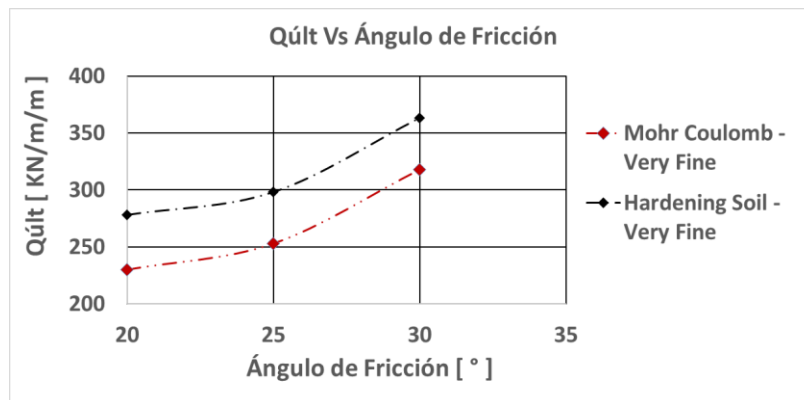
Gráfica 37. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse; arenas saturadas.



Gráfica 38. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium; arenas saturadas.



Gráfica 39. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; arenas saturadas.

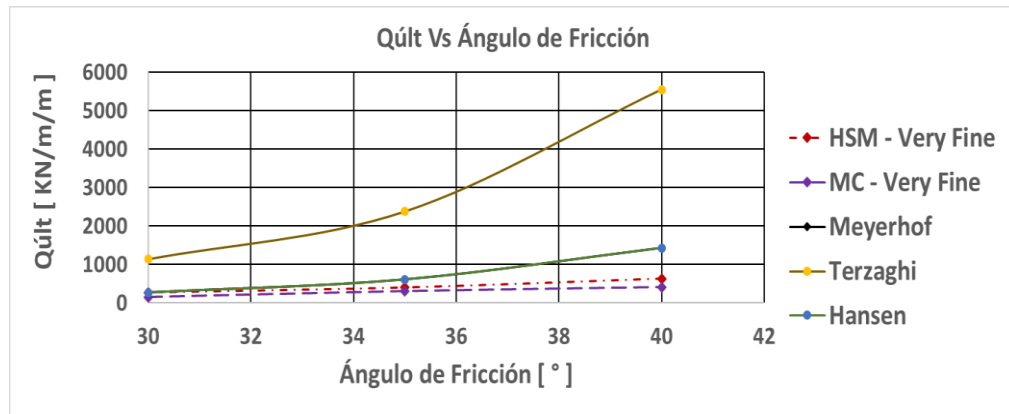


- Cimiento corrido sobre arenas con nivel freático igual a dos metros.

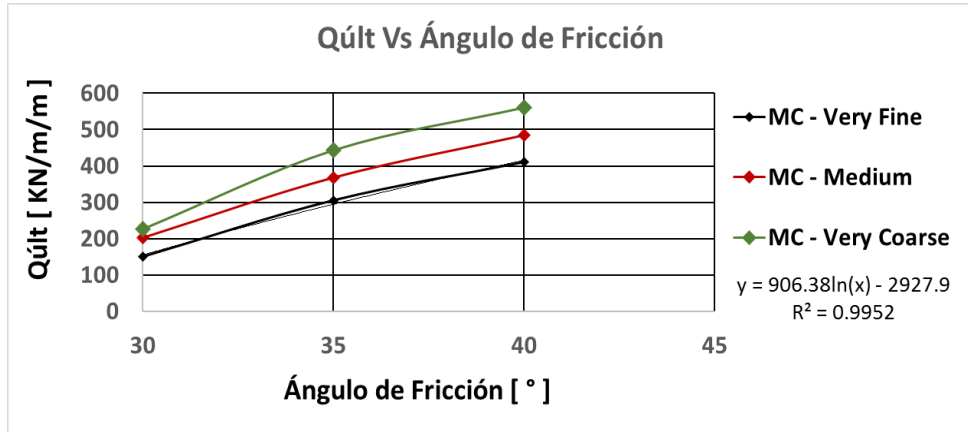
Tabla 12. Resultados de la comparación de capacidad portante para arenas con nivel freático a 2 [m].

| Tipo de Malla | Ángulo [°] | Capacidad de Carga | | | | | Error [%] | | | | | |
|---------------|--------------|--------------------|-----|---------|------|------|-------------|-----|----------|-----|--------|-----|
| | | Plaxis 2D | | Teórico | | | Terzaghi | | Meyerhof | | Hansen | |
| | | MC | HSM | T | M | H | MC | HSM | MC | HSM | MC | HSM |
| Very Fine: | 30 | 150 | 275 | 1145 | 282 | 271 | 87 | 76 | 47 | 2 | 45 | -1 |
| | 35 | 305 | 401 | 2382 | 669 | 611 | 87 | 83 | 54 | 40 | 50 | 34 |
| | 40 | 410 | 630 | 5545 | 1686 | 1432 | 93 | 89 | 76 | 63 | 71 | 56 |
| Medium: | 30 | 202 | 331 | 1145 | 282 | 271 | 82 | 71 | 28 | -17 | 25 | -22 |
| | 35 | 368 | 464 | 2382 | 669 | 611 | 85 | 81 | 45 | 31 | 40 | 24 |
| | 40 | 485 | 685 | 5545 | 1686 | 1432 | 91 | 88 | 71 | 59 | 66 | 52 |
| Very Coarse: | 30 | 227 | 386 | 1145 | 282 | 271 | 80 | 66 | 20 | -37 | 16 | -42 |
| | 35 | 443 | 519 | 2382 | 669 | 611 | 81 | 78 | 34 | 22 | 27 | 15 |
| | 40 | 560 | 740 | 5545 | 1686 | 1432 | 90 | 87 | 67 | 56 | 61 | 48 |

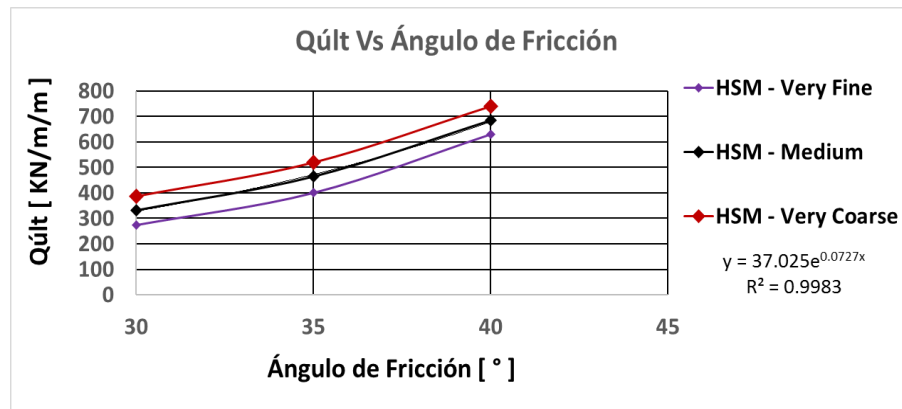
Gráfica 40. Comparación de capacidad portante para arenas con nivel freático a 2 [m], por medio de modelos constitutivos.



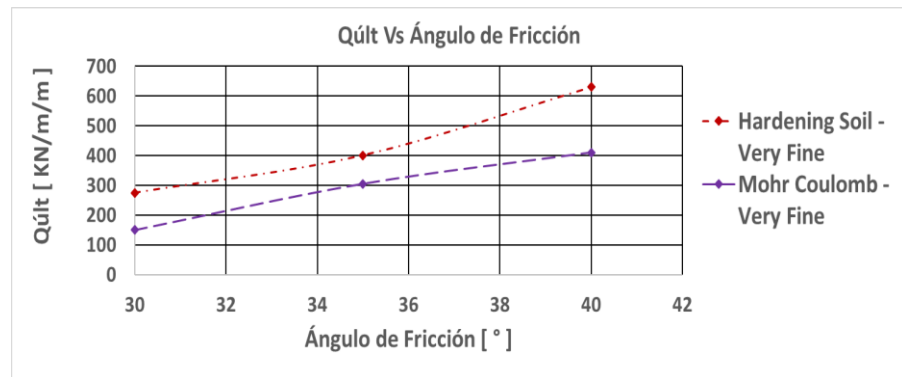
Gráfica 41. Influencia de la malla según M-C; arenas con nivel freático a 2 [m].



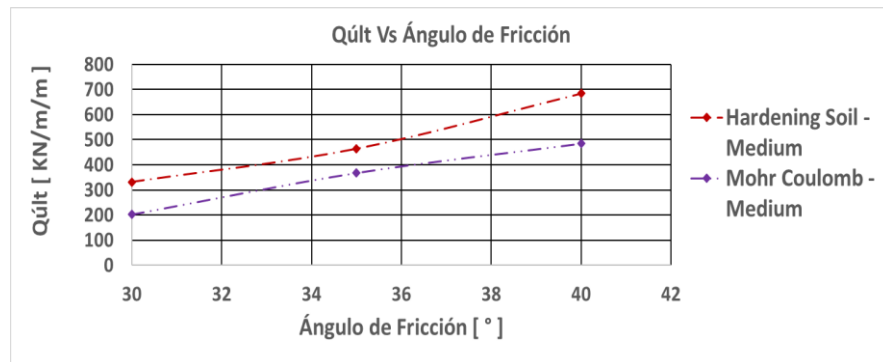
Gráfica 42. Influencia de la malla según H-S; arenas con nivel freático a 2 [m].



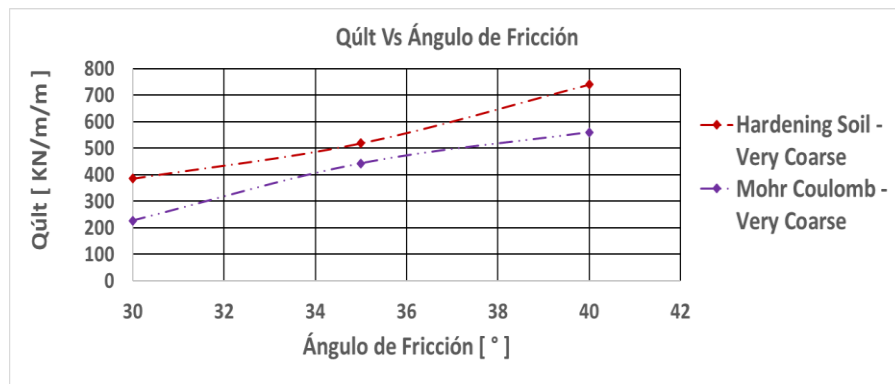
Gráfica 43. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; arenas con nivel freático a 2 [m].



Gráfica 44. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium; arenas con nivel freático a 2 [m].



Gráfica 45. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse; arenas con nivel freático a 2 [m].

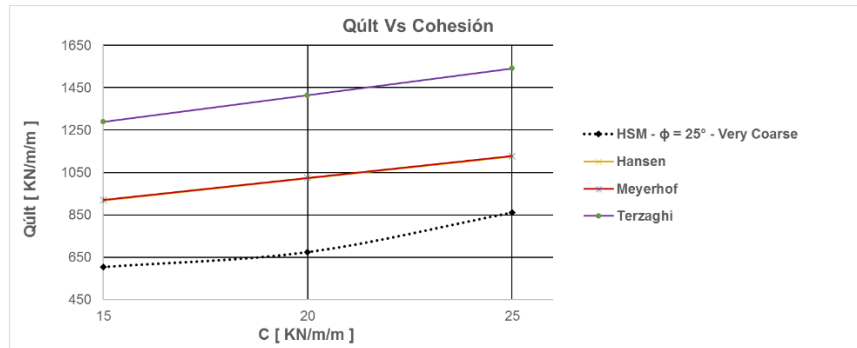


- Cimiento corrido sobre limos secos.

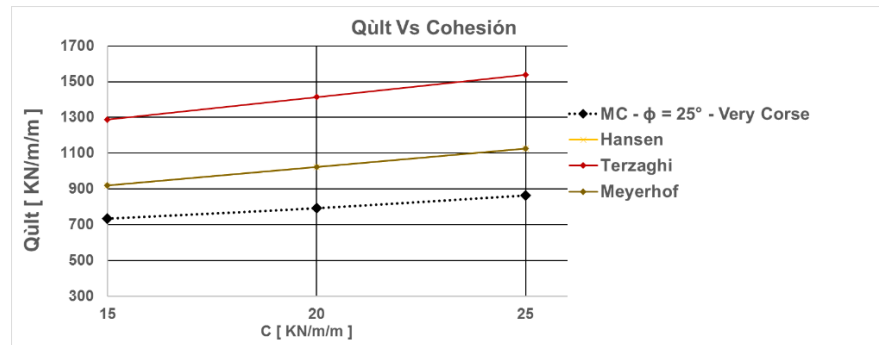
Tabla 13. Resultados de la comparación de capacidad portante para limos secos.

| Tipo de Malla | Φ | C' | Capacidad de Carga [KN/m/m] | | | | | Error [%] | | | | | |
|---------------|--------|----|-------------------------------|------|---------|------|------|-------------|-----|----------|-----|--------|-----|
| | | | Plaxis 2D | | Teórico | | | Terzaghi | | Meyerhof | | Hansen | |
| | | | MC | HSM | T | M | H | MC | HSM | MC | HSM | MC | HSM |
| Very Fine: | 20 | 15 | 315 | 335 | 746 | 481 | 488 | 58 | 55 | 34 | 30 | 35 | 31 |
| | | 20 | 375 | 386 | 834 | 555 | 562 | 55 | 54 | 32 | 31 | 33 | 31 |
| | | 25 | 446 | 413 | 923 | 629 | 636 | 52 | 55 | 29 | 34 | 30 | 35 |
| | 25 | 15 | 464 | 508 | 1288 | 920 | 919 | 64 | 61 | 50 | 45 | 50 | 45 |
| | | 20 | 523 | 558 | 1414 | 1023 | 1023 | 63 | 61 | 49 | 45 | 49 | 45 |
| | | 25 | 594 | 585 | 1539 | 1127 | 1126 | 61 | 62 | 47 | 48 | 47 | 48 |
| | 30 | 15 | 771 | 842 | 2334 | 1862 | 1808 | 67 | 64 | 59 | 55 | 57 | 53 |
| | | 20 | 821 | 892 | 2520 | 2013 | 1959 | 67 | 65 | 59 | 56 | 58 | 54 |
| | | 25 | 894 | 920 | 2706 | 2164 | 2110 | 67 | 66 | 59 | 57 | 58 | 56 |
| Medium: | 20 | 15 | 374 | 340 | 746 | 481 | 488 | 50 | 54 | 22 | 29 | 23 | 30 |
| | | 20 | 434 | 400 | 834 | 555 | 562 | 48 | 52 | 22 | 28 | 23 | 29 |
| | | 25 | 504 | 470 | 923 | 629 | 636 | 45 | 49 | 20 | 25 | 21 | 26 |
| | 25 | 15 | 553 | 525 | 1288 | 920 | 919 | 57 | 59 | 40 | 43 | 40 | 43 |
| | | 20 | 612 | 625 | 1414 | 1023 | 1023 | 57 | 56 | 40 | 39 | 40 | 39 |
| | | 25 | 684 | 700 | 1539 | 1127 | 1126 | 56 | 55 | 39 | 38 | 39 | 38 |
| | 30 | 15 | 1101 | 903 | 2334 | 1862 | 1808 | 53 | 61 | 41 | 52 | 39 | 50 |
| | | 20 | 1152 | 1032 | 2520 | 2013 | 1959 | 54 | 59 | 43 | 49 | 41 | 47 |
| | | 25 | 1224 | 1060 | 2706 | 2164 | 2110 | 55 | 61 | 43 | 51 | 42 | 50 |
| Very Coarse: | 20 | 15 | 480 | 390 | 746 | 481 | 488 | 36 | 48 | 0 | 19 | 2 | 20 |
| | | 20 | 540 | 480 | 834 | 555 | 562 | 35 | 42 | 3 | 14 | 4 | 15 |
| | | 25 | 610 | 560 | 923 | 629 | 636 | 34 | 39 | 3 | 11 | 4 | 12 |
| | 25 | 15 | 734 | 605 | 1288 | 920 | 919 | 43 | 53 | 20 | 34 | 20 | 34 |
| | | 20 | 793 | 675 | 1414 | 1023 | 1023 | 44 | 52 | 23 | 34 | 22 | 34 |
| | | 25 | 865 | 860 | 1539 | 1127 | 1126 | 44 | 44 | 23 | 24 | 23 | 24 |
| | 30 | 15 | 1331 | 950 | 2334 | 1862 | 1808 | 43 | 59 | 29 | 49 | 26 | 47 |
| | | 20 | 1328 | 1075 | 2520 | 2013 | 1959 | 47 | 57 | 34 | 47 | 32 | 45 |
| | | 25 | 1454 | 1395 | 2706 | 2164 | 2110 | 46 | 48 | 33 | 36 | 31 | 34 |

Gráfica 46. Comparación de capacidad portante para Limos secos, por medio de modelos constitutivos (a) Hardening Soil, (b) Mohr Coulomb.

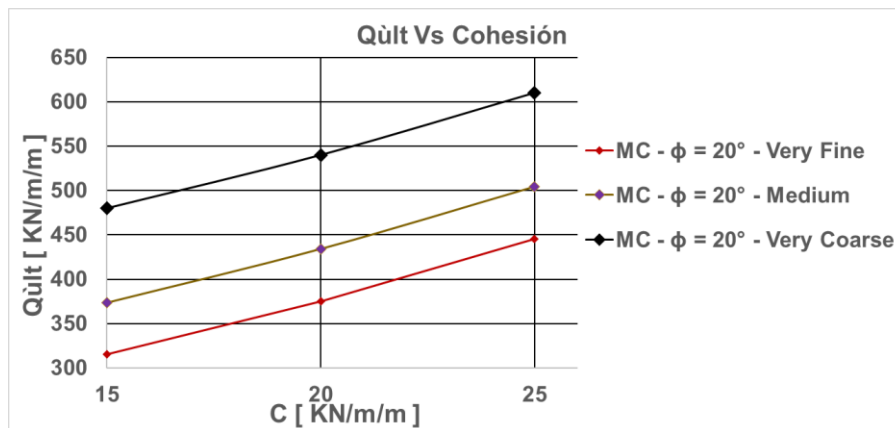


(a)

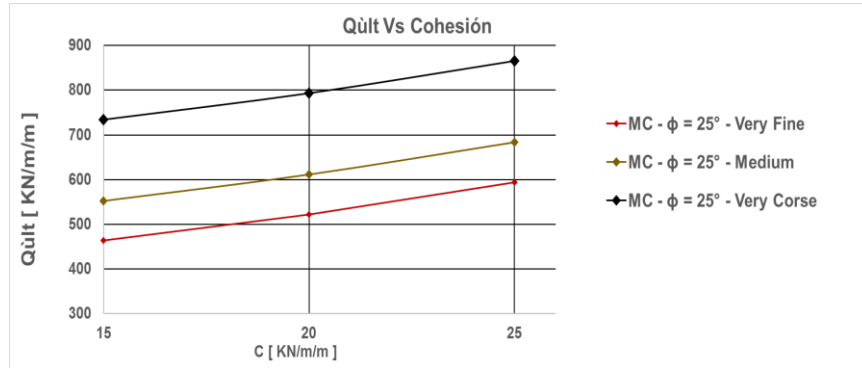


(b)

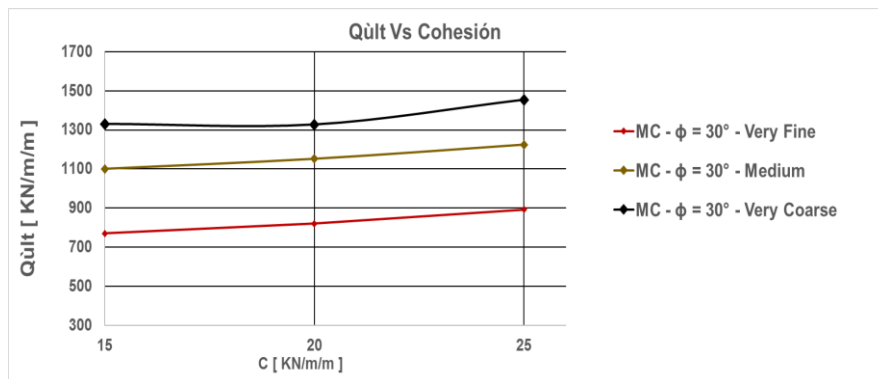
Gráfica 47. Influencia de la malla según M-C; Limos secos, $\phi = 20^\circ$



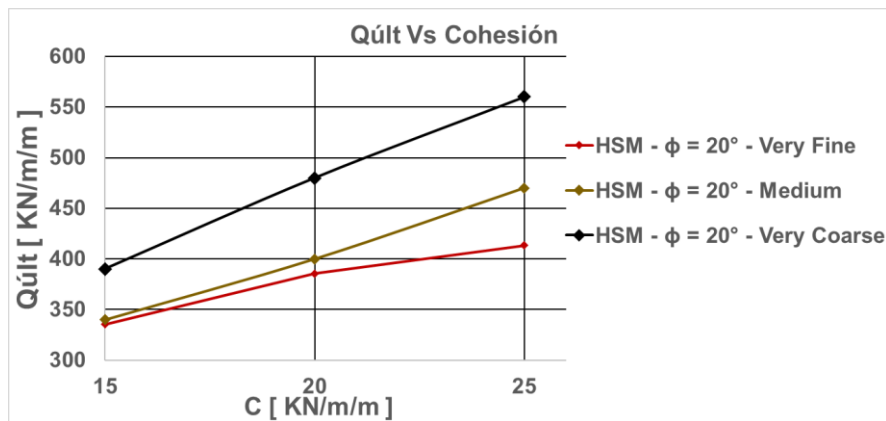
Gráfica 48. Influencia de la malla según M-C; Limos secos, $\phi = 25^\circ$



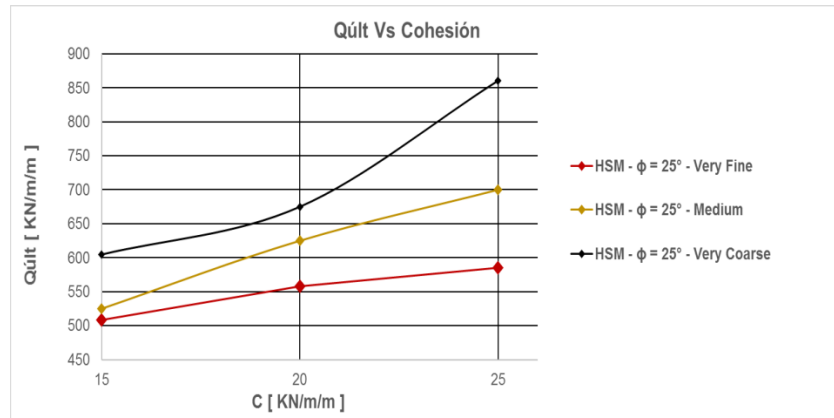
Gráfica 49. Influencia de la malla según M-C; Limos secos, $\phi = 30^\circ$



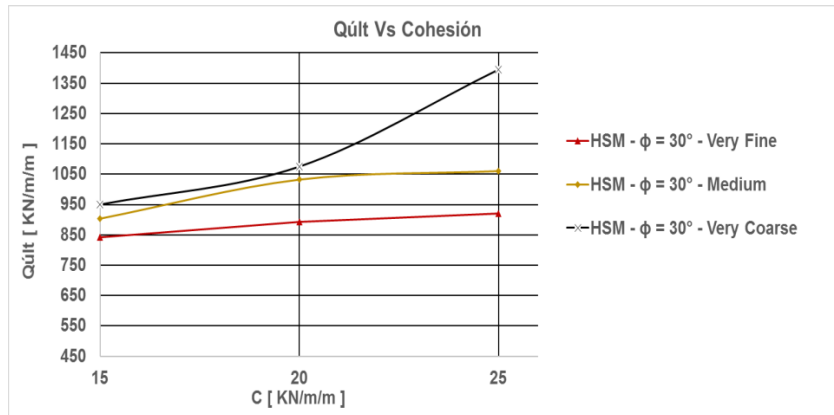
Gráfica 50. Influencia de la malla según H-S; Limos secos, $\phi = 20^\circ$



Gráfica 51. Influencia de la malla según H-S; Limos secos, $\phi = 25^\circ$



Gráfica 52. Influencia de la malla según H-S; Limos secos, $\phi = 30^\circ$

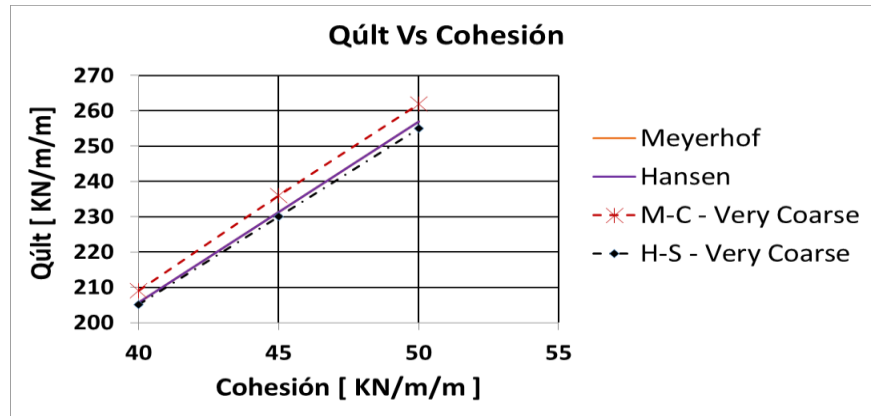


- Cimiento corrido sobre arcillas saturadas

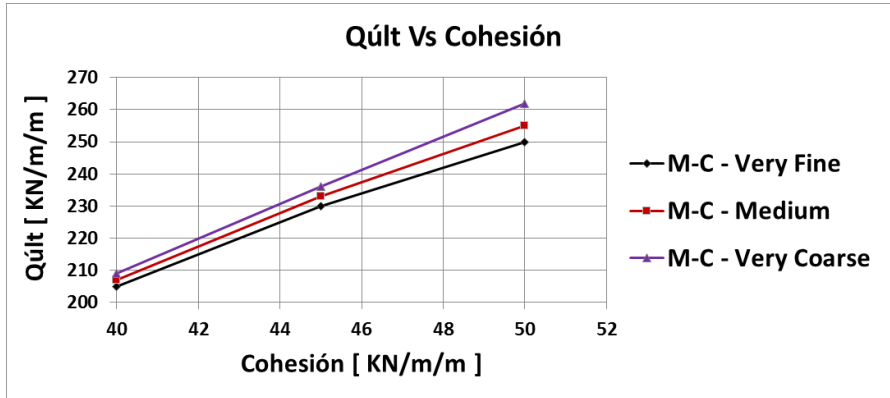
Tabla 14. Resultados de la comparación de capacidad portante para arcillas saturadas.

| Tipo de Malla | Cu [KN/m/m] | Capacidad de Carga [KN/m/m] | | | | | Error [%] | | | | | |
|---------------|-------------|-------------------------------|-----|---------|-----|-----|-------------|-----|----------|-----|--------|-----|
| | | Plaxis 2D | | Teórico | | | Terzaghi | | Meyerhof | | Hansen | |
| | | MC | HSM | T | M | H | MC | HSM | MC | HSM | MC | HSM |
| Very Fine: | 40 | 205 | 195 | 228 | 206 | 206 | 10 | 14 | 0 | 5 | 0 | 5 |
| | 45 | 230 | 215 | 257 | 231 | 231 | 11 | 16 | 1 | 7 | 1 | 7 |
| | 50 | 250 | 247 | 285 | 257 | 257 | 12 | 13 | 3 | 4 | 3 | 4 |
| Medium: | 40 | 207 | 210 | 228 | 206 | 206 | 9 | 8 | -1 | -2 | -1 | -2 |
| | 45 | 233 | 235 | 257 | 231 | 231 | 9 | 9 | -1 | -2 | -1 | -2 |
| | 50 | 255 | 260 | 285 | 257 | 257 | 11 | 9 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| Very Coarse: | 40 | 209 | 205 | 228 | 206 | 206 | 8 | 10 | -2 | 0 | -2 | 0 |
| | 45 | 236 | 230 | 257 | 231 | 231 | 8 | 11 | -2 | 1 | -2 | 1 |
| | 50 | 262 | 255 | 285 | 257 | 257 | 8 | 11 | -2 | 1 | -2 | 1 |

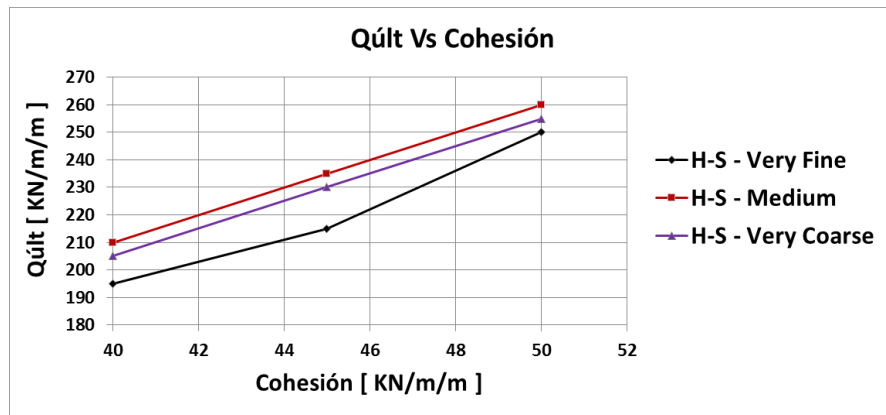
Gráfica 53. Comparación de capacidad portante para arcillas saturadas, por medio de modelos constitutivos.



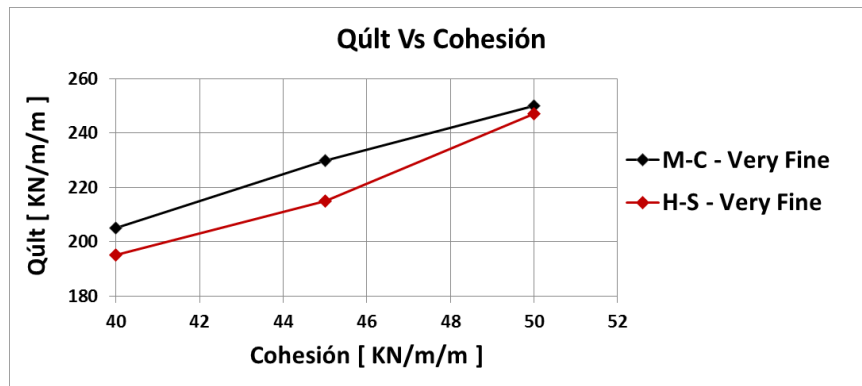
Gráfica 54. Influencia de la malla según M-C; arcillas saturadas.



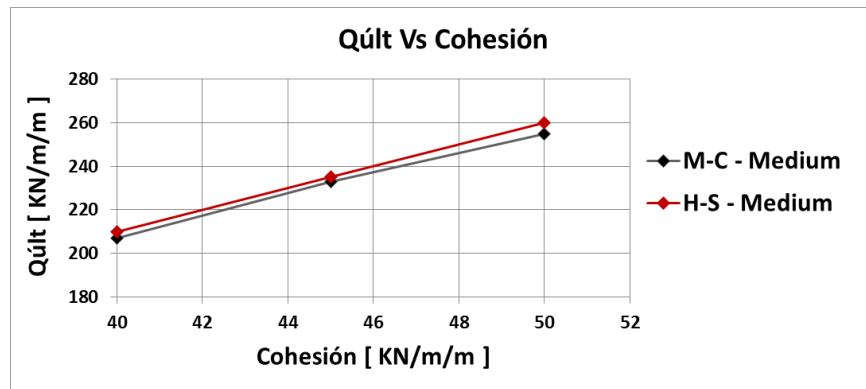
Gráfica 55. Influencia de la malla según H-S; arcillas saturadas.



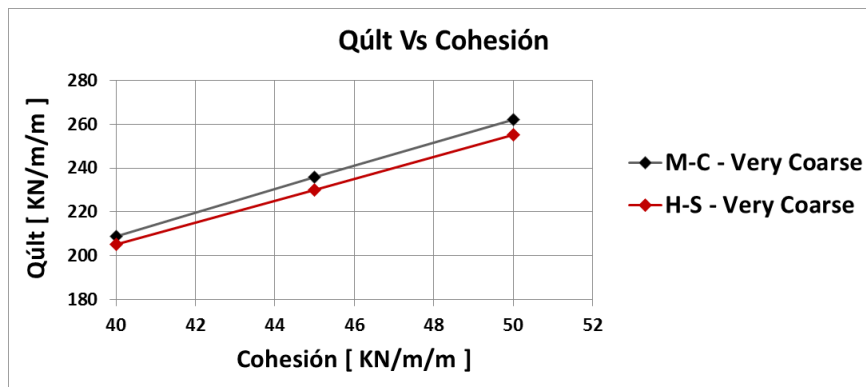
Gráfica 56. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; arcillas saturadas.



Gráfica 57. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium; arcillas saturadas.



Gráfica 58. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse; arcillas saturadas.

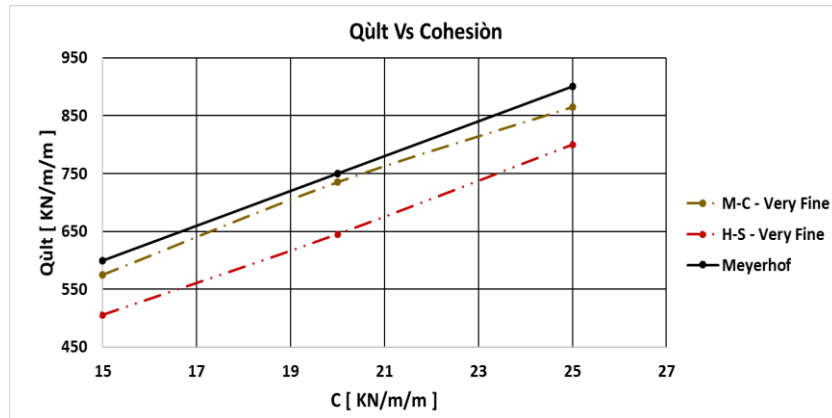


- Cimiento corrido sobre limos saturados.

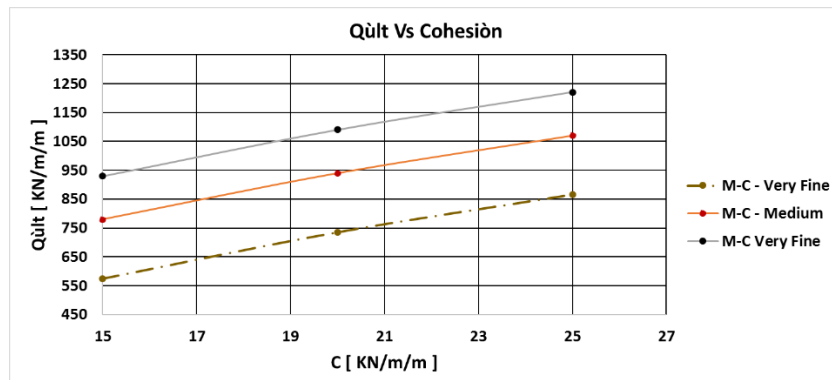
Tabla 15. Resultados de la comparación de capacidad portante para limos saturados.

| Tipo de Malla | Ángulo | Cohesión | Capacidad de Carga | | ERROR [%] | | | | | |
|---------------|--------|----------|--------------------|------|-----------|-----|----------|-----|--------|-----|
| | | | Plaxis 2D | | Terzaghi | | Meyerhof | | Hansen | |
| | | | MC | HSM | MC | HSM | MC | HSM | MC | HSM |
| Very Fine: | 20 | 15 | 265 | 235 | 51 | 56 | 28 | 36 | 28 | 36 |
| | | 20 | 340 | 285 | 46 | 54 | 23 | 36 | 23 | 36 |
| | | 25 | 395 | 360 | 45 | 50 | 24 | 31 | 24 | 31 |
| | 25 | 15 | 390 | 335 | 56 | 62 | 15 | 27 | 40 | 48 |
| | | 20 | 490 | 395 | 52 | 61 | 13 | 30 | 35 | 47 |
| | | 25 | 605 | 445 | 47 | 61 | 9 | 33 | 29 | 48 |
| | 30 | 15 | 575 | 505 | 63 | 68 | 4 | 16 | 52 | 58 |
| | | 20 | 735 | 645 | 58 | 63 | 2 | 14 | 46 | 52 |
| | | 25 | 865 | 800 | 55 | 59 | 4 | 11 | 43 | 47 |
| Medium: | 20 | 15 | 470 | 437 | 12 | 19 | -27 | -18 | -27 | -18 |
| | | 20 | 545 | 487 | 13 | 22 | -23 | -10 | -23 | -10 |
| | | 25 | 600 | 562 | 16 | 21 | -16 | -8 | -16 | -8 |
| | 25 | 15 | 595 | 537 | 33 | 40 | -30 | -17 | 8 | 17 |
| | | 20 | 695 | 597 | 32 | 41 | -24 | -6 | 8 | 21 |
| | | 25 | 810 | 647 | 29 | 43 | -22 | 3 | 5 | 24 |
| | 30 | 15 | 780 | 707 | 50 | 55 | -30 | -18 | 35 | 41 |
| | | 20 | 940 | 847 | 46 | 52 | -25 | -13 | 31 | 38 |
| | | 25 | 1070 | 1002 | 45 | 48 | -19 | -11 | 29 | 34 |
| Very Coarse: | 20 | 15 | 620 | 540 | -15 | -1 | -68 | -46 | -68 | -46 |
| | | 20 | 695 | 590 | -11 | 6 | -57 | -33 | -57 | -33 |
| | | 25 | 750 | 665 | -5 | 7 | -45 | -28 | -45 | -28 |
| | 25 | 15 | 745 | 640 | 17 | 28 | -63 | -40 | -15 | 1 |
| | | 20 | 845 | 700 | 17 | 31 | -50 | -25 | -12 | 7 |
| | | 25 | 960 | 750 | 16 | 34 | -44 | -13 | -12 | 12 |
| | 30 | 15 | 930 | 810 | 40 | 48 | -55 | -35 | 23 | 33 |
| | | 20 | 1090 | 950 | 38 | 46 | -45 | -27 | 20 | 30 |
| | | 25 | 1220 | 1105 | 37 | 43 | -35 | -23 | 19 | 27 |

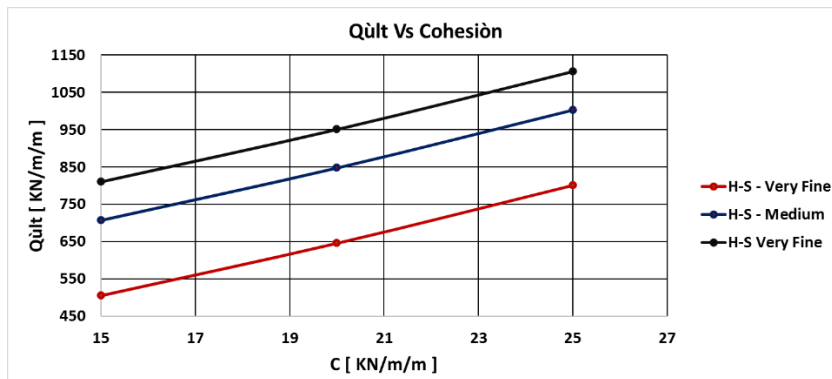
Gráfica 59. Comparación de capacidad portante para limos saturados, por medio de modelos constitutivos.



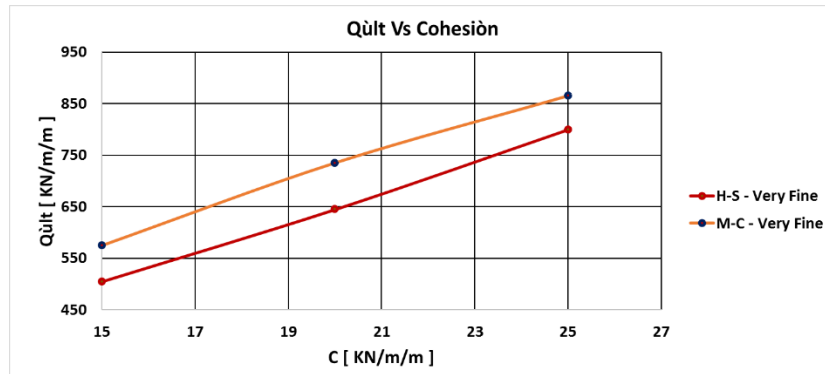
Gráfica 60. Influencia de la malla según M-C; Limos saturados.



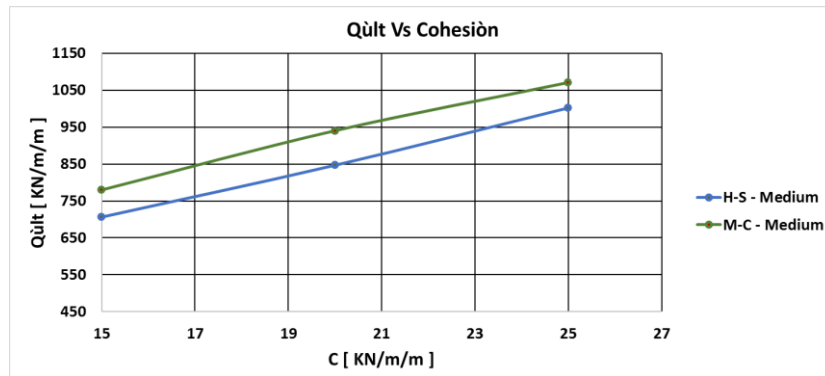
Gráfica 61. Influencia de la malla según H-S; Limos saturados.



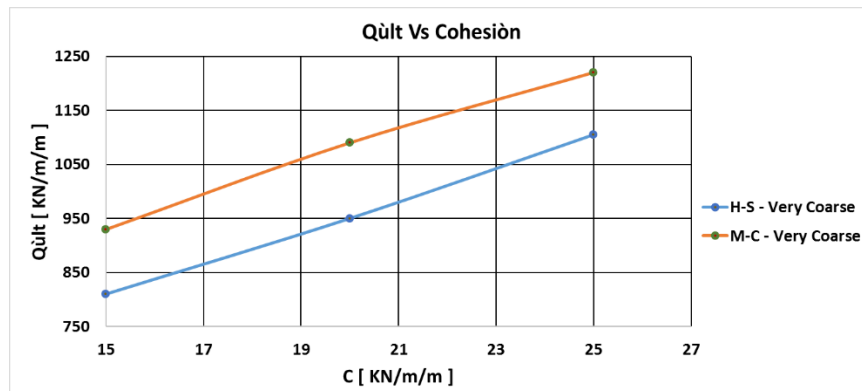
Gráfica 62. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; limos saturados.



Gráfica 63. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium; arcillas saturadas.



Gráfica 64. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse; arcillas saturadas.

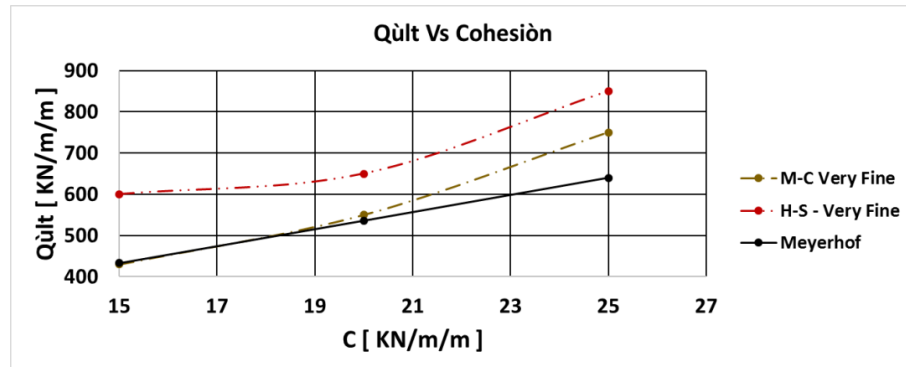


- Cimiento corrido sobre limo con nivel freático a dos metros.

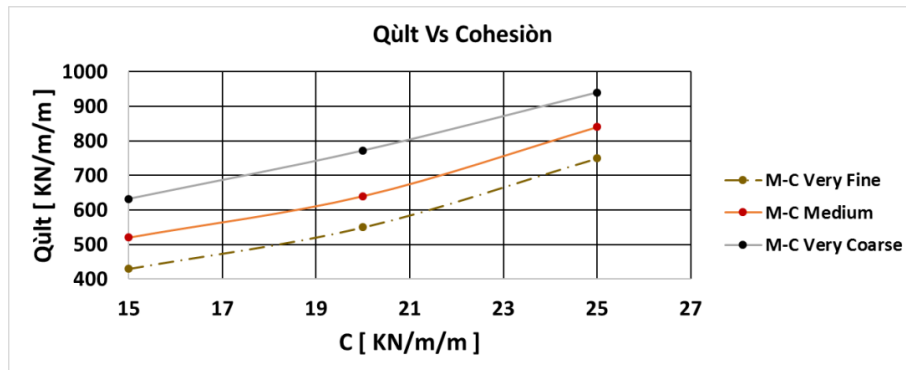
Tabla 16. Resultados de la comparación de capacidad portante para limos con nivel freático a 2 [m].

| | | | Capacidad de Carga | | | | | | | |
|--------------|--------|----------|--------------------|------|-------------|-----|----------|-----|--------|-----|
| | Ángulo | Cohesión | Plaxis 2D | | Error [%] | | | | | |
| | | | MC | HSM | Terzaghi | | Meyerhof | | Hansen | |
| | | | | | MC | HSM | MC | HSM | MC | HSM |
| Very Fine: | 20 | 15 | 359 | 353 | 38 | 39 | 31 | 29 | 30 | 28 |
| | | 20 | 430 | 465 | 35 | 30 | 24 | 34 | 72 | 86 |
| | | 25 | 510 | 540 | 32 | 28 | 21 | 28 | 20 | 27 |
| | 25 | 15 | 430 | 600 | 55 | 38 | 1 | 39 | 0 | 39 |
| | | 20 | 550 | 650 | 50 | 40 | 3 | 21 | 3 | 21 |
| | | 25 | 750 | 850 | 38 | 30 | 17 | 33 | 17 | 33 |
| | 30 | 15 | 800 | 1050 | 53 | 38 | 9 | 43 | 11 | 45 |
| | | 20 | 1040 | 1285 | 45 | 32 | 18 | 45 | 19 | 47 |
| | | 25 | 1080 | 1320 | 48 | 36 | 4 | 27 | 5 | 29 |
| Medium: | 20 | 15 | 449 | 443 | 22 | 23 | 64 | 62 | 63 | 61 |
| | | 20 | 520 | 555 | 22 | 16 | 49 | 59 | 108 | 122 |
| | | 25 | 600 | 630 | 20 | 16 | 42 | 49 | 42 | 49 |
| | 25 | 15 | 520 | 690 | 46 | 28 | 20 | 59 | 20 | 60 |
| | | 20 | 640 | 740 | 41 | 32 | 19 | 38 | 19 | 38 |
| | | 25 | 840 | 940 | 31 | 23 | 31 | 47 | 31 | 47 |
| | 30 | 15 | 860 | 1110 | 50 | 35 | 17 | 51 | 19 | 54 |
| | | 20 | 1110 | 1355 | 41 | 28 | 25 | 53 | 27 | 55 |
| | | 25 | 1220 | 1460 | 41 | 30 | 18 | 41 | 19 | 42 |
| Very Coarse: | 20 | 15 | 574 | 568 | 0 | 1 | 109 | 107 | 108 | 106 |
| | | 20 | 643 | 678 | 3 | -2 | 85 | 95 | 157 | 171 |
| | | 25 | 725 | 755 | 4 | 0 | 71 | 78 | 71 | 78 |
| | 25 | 15 | 632 | 802 | 34 | 17 | 46 | 85 | 46 | 86 |
| | | 20 | 772 | 872 | 29 | 20 | 44 | 63 | 44 | 63 |
| | | 25 | 940 | 1040 | 23 | 14 | 47 | 63 | 47 | 63 |
| | 30 | 15 | 981 | 1231 | 42 | 28 | 34 | 68 | 36 | 70 |
| | | 20 | 1237 | 1482 | 34 | 22 | 40 | 67 | 42 | 70 |
| | | 25 | 1345 | 1585 | 35 | 24 | 30 | 53 | 31 | 55 |

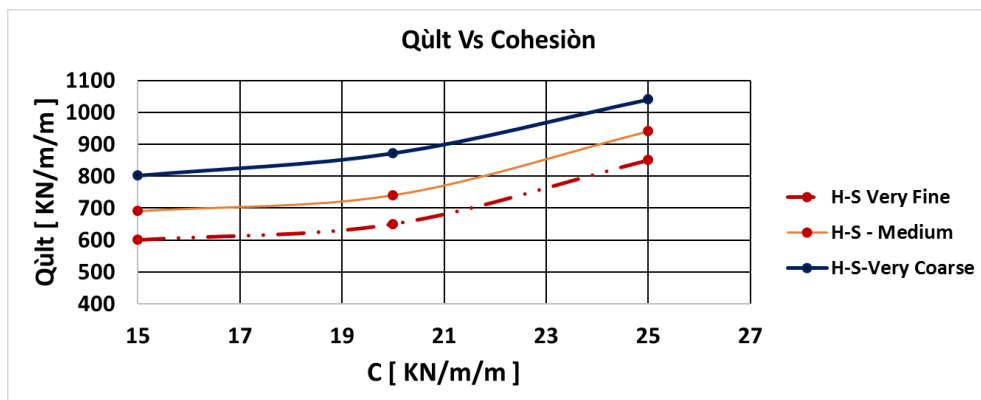
Gráfica 65. Comparación de capacidad portante para limos con nivel freático 2 [m], por medio de modelos constitutivos.



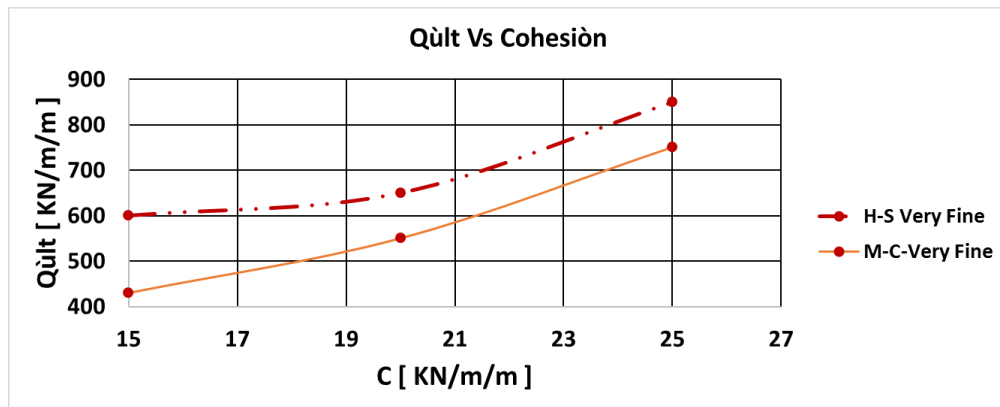
Gráfica 66. Influencia de la malla según M-C; Limos con nivel freático 2 [m].



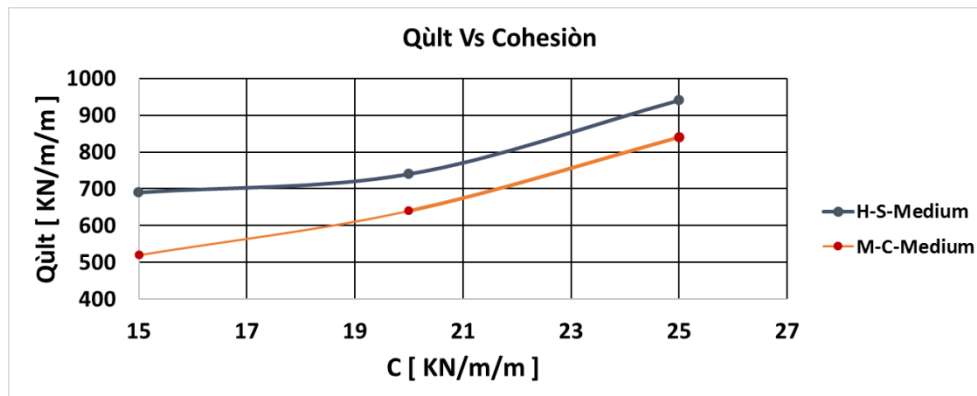
Gráfica 67. Influencia de la malla según H-S; Limos con nivel freático 2 [m].



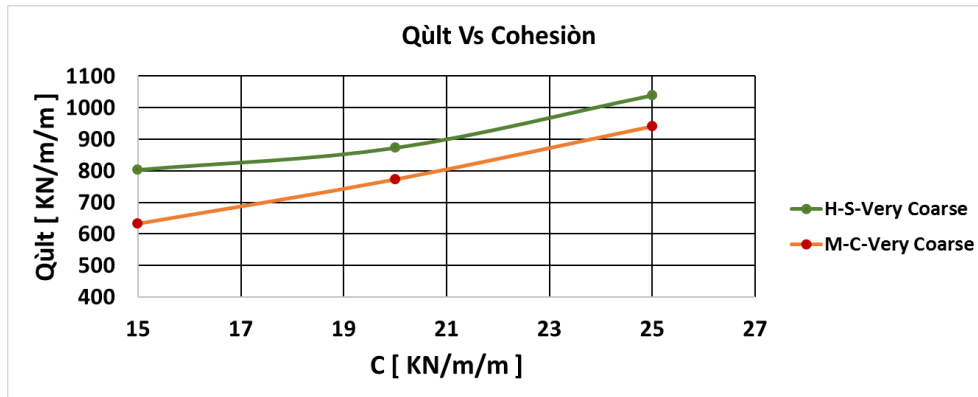
Gráfica 68. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Fine; limos nivel freático 2 [m].



Gráfica 69. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Medium limos nivel freático 2 [m].

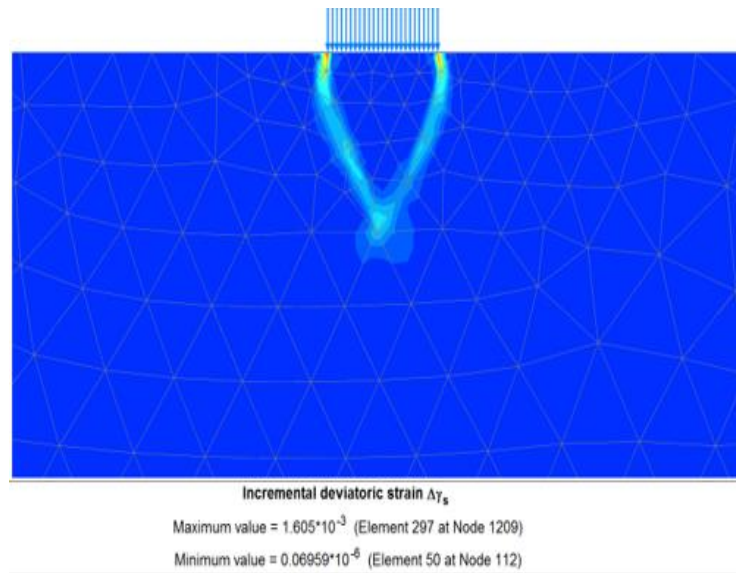


Gráfica 70. Comparación entre modelos constitutivos para tipo de malla Very Coarse limos nivel freático 2 [m].

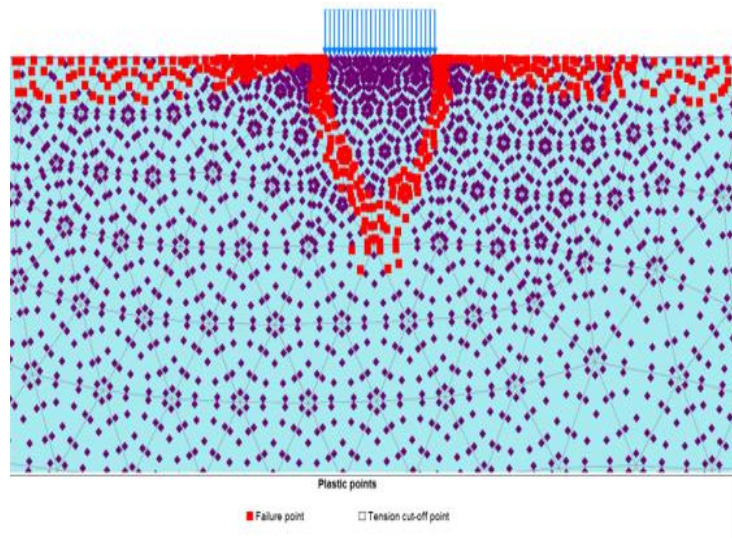


Anexo D. Resultado de puntos plásticos e incremento de esfuerzos desviadores para los suelos de estudio.

Ilustración 1. Tipo de malla Very Fine – M - C. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

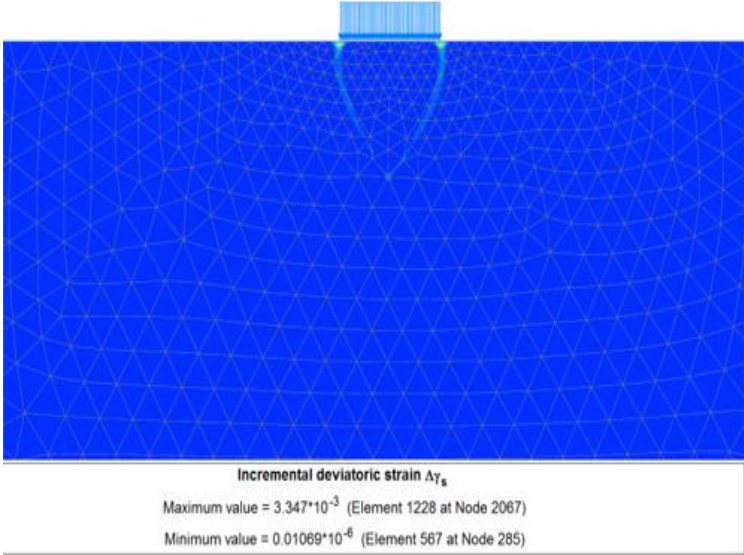


(a)

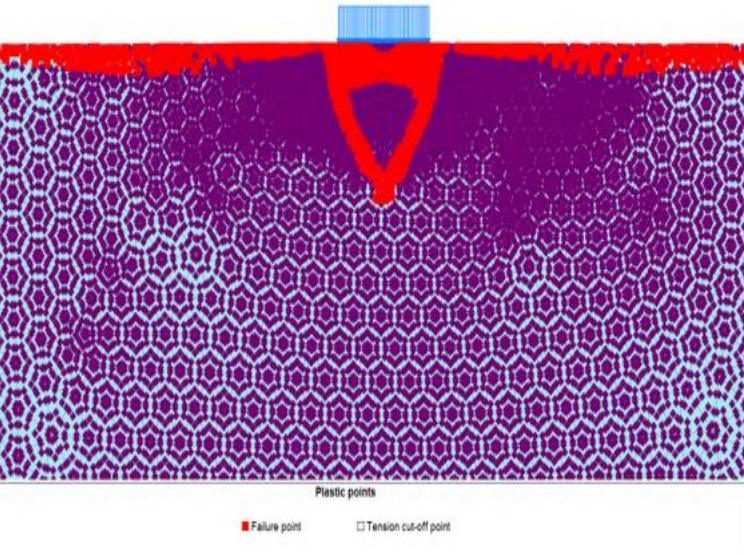


(b)

Ilustración 2. Tipo de malla Medium – M - C. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

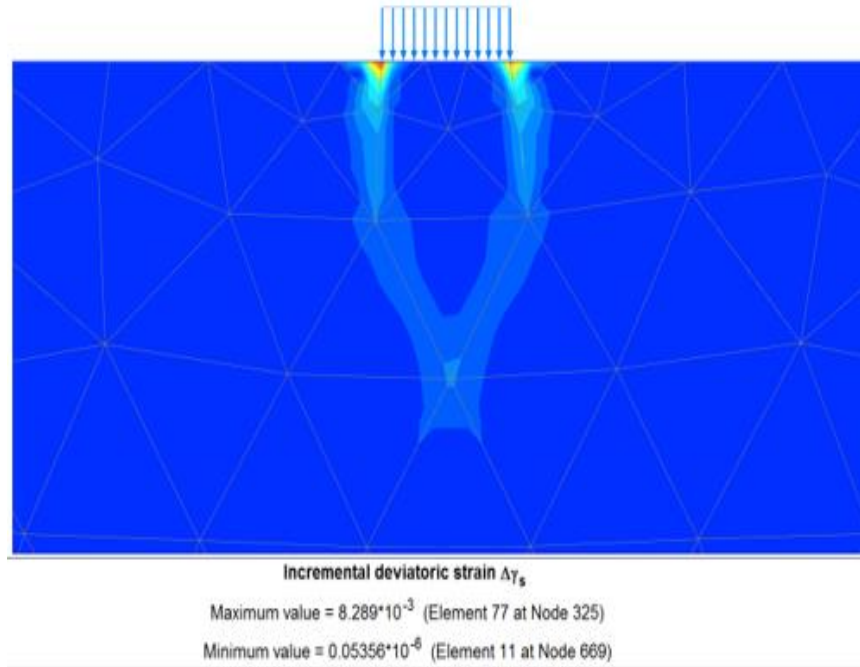


(a)

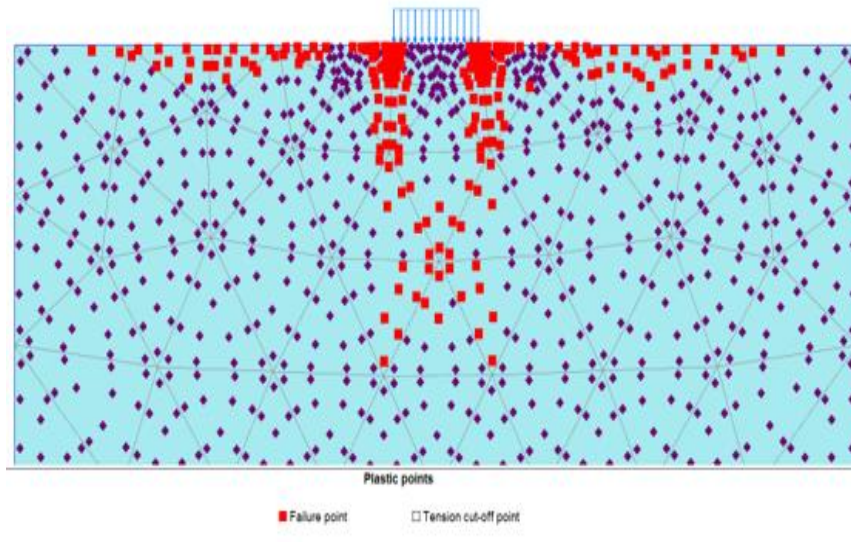


(b)

Ilustración 3. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

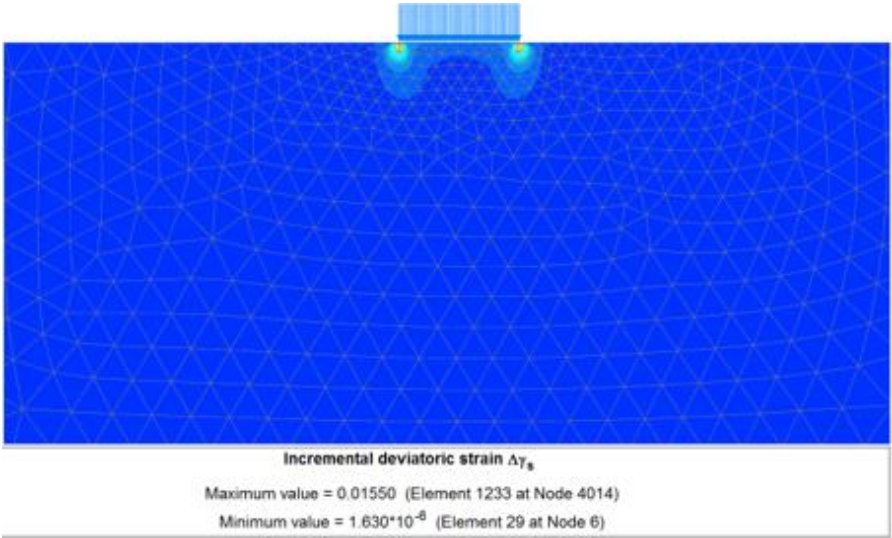


(a)

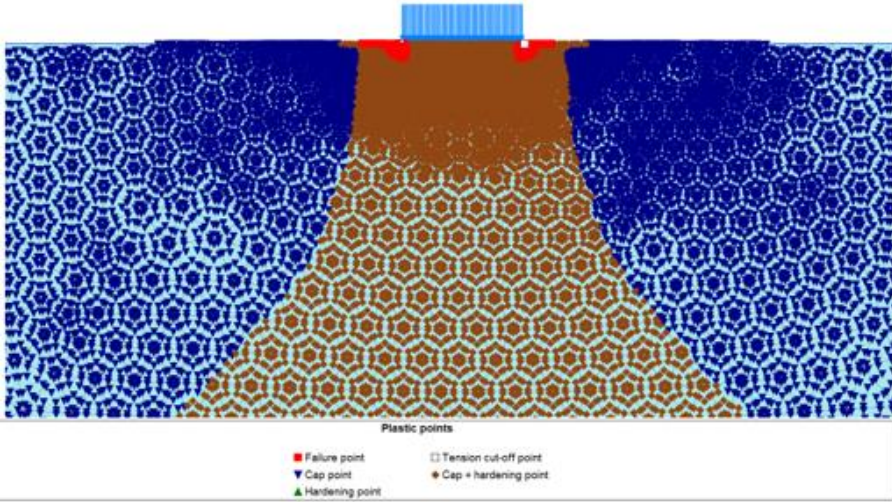


(b)

Ilustración 4. Tipo de malla Very Fine – H - S. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

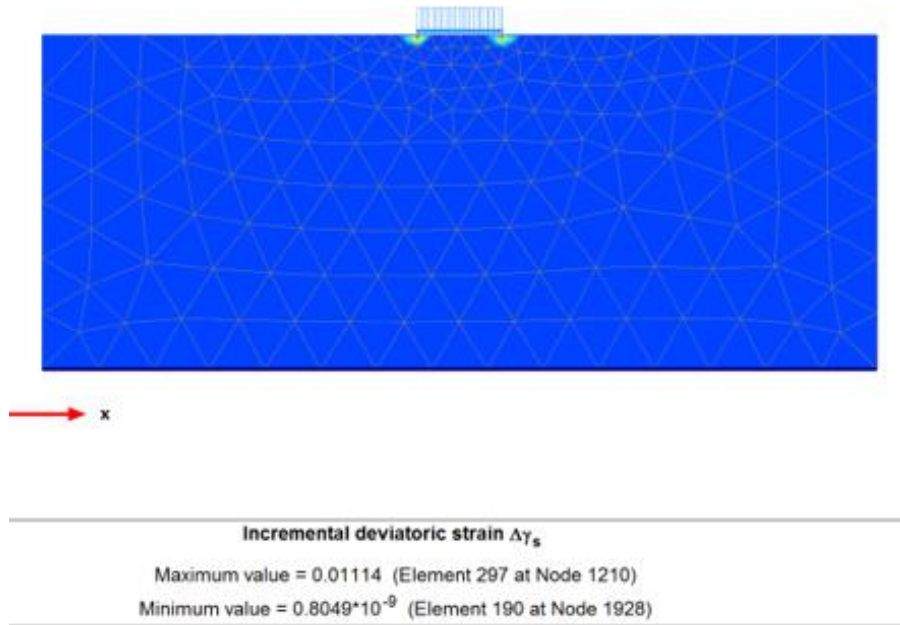


(a)

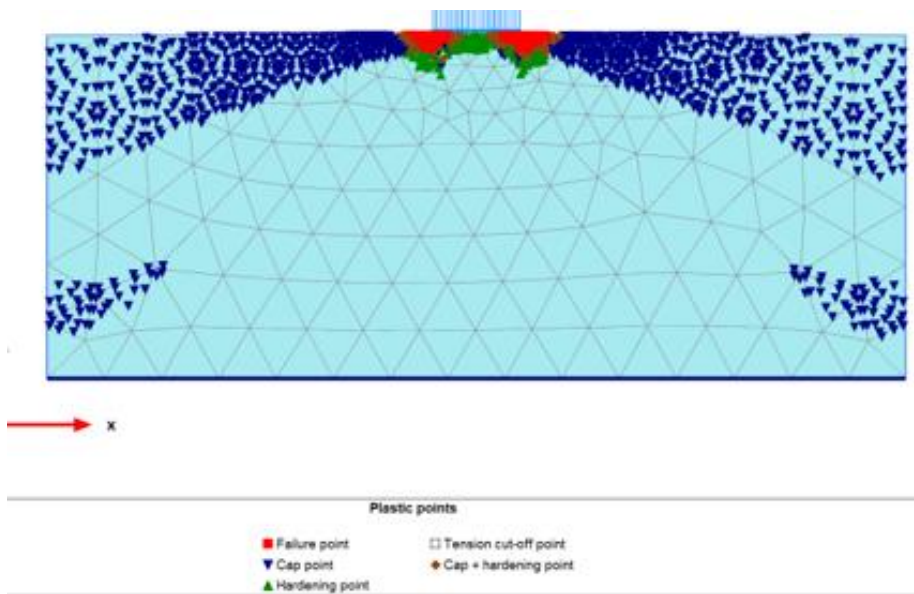


(b)

Ilustración 5. Tipo de malla Medium – H - S. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

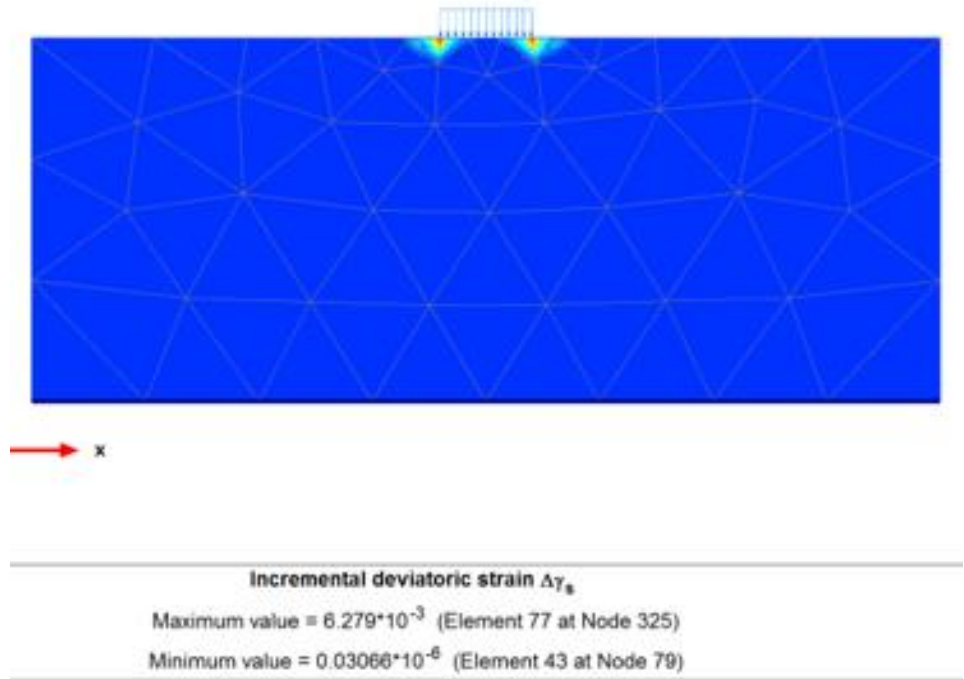


(a)

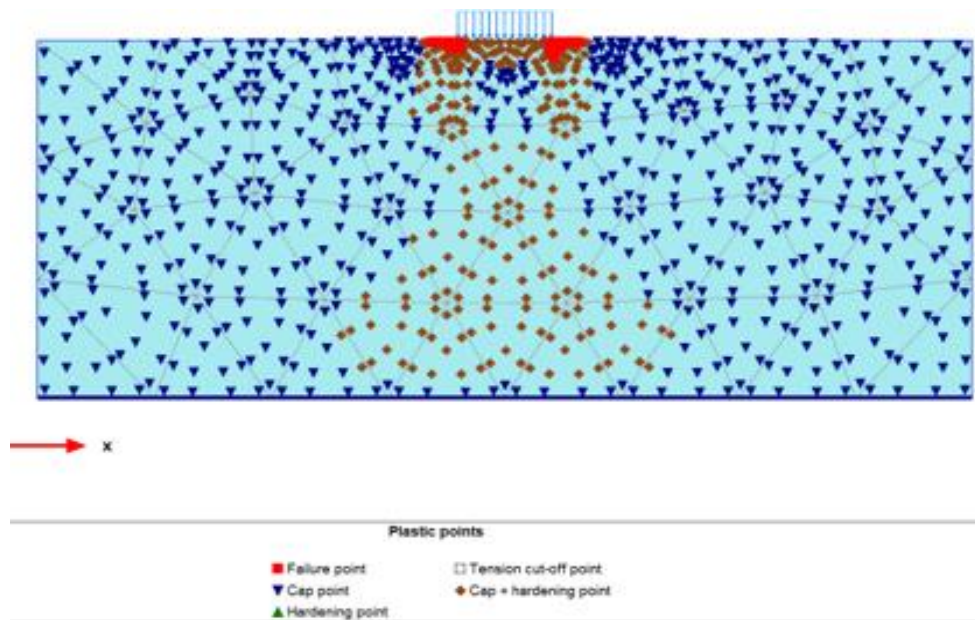


(b)

Ilustración 6. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Arenas secas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

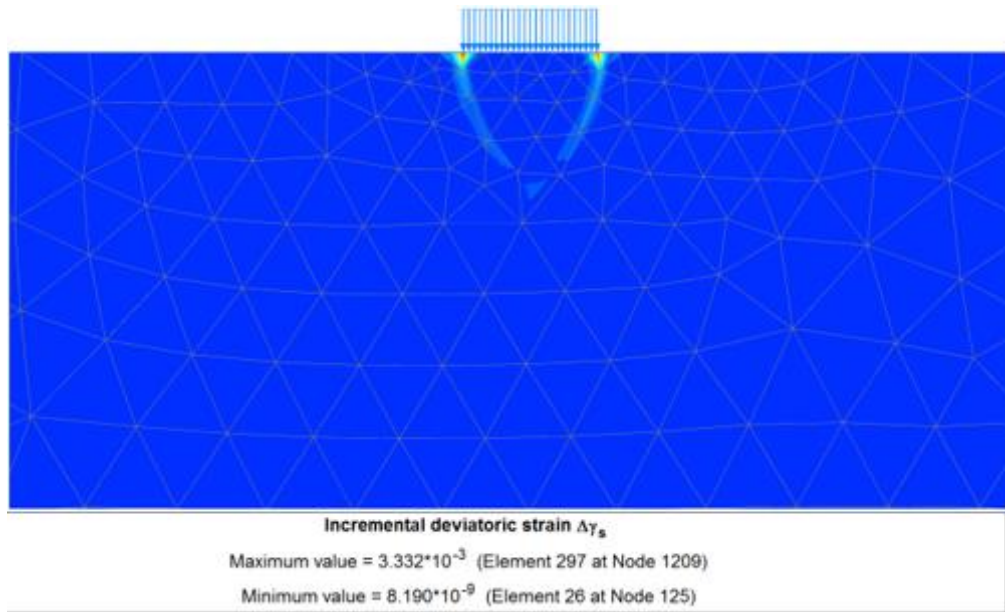


(a)

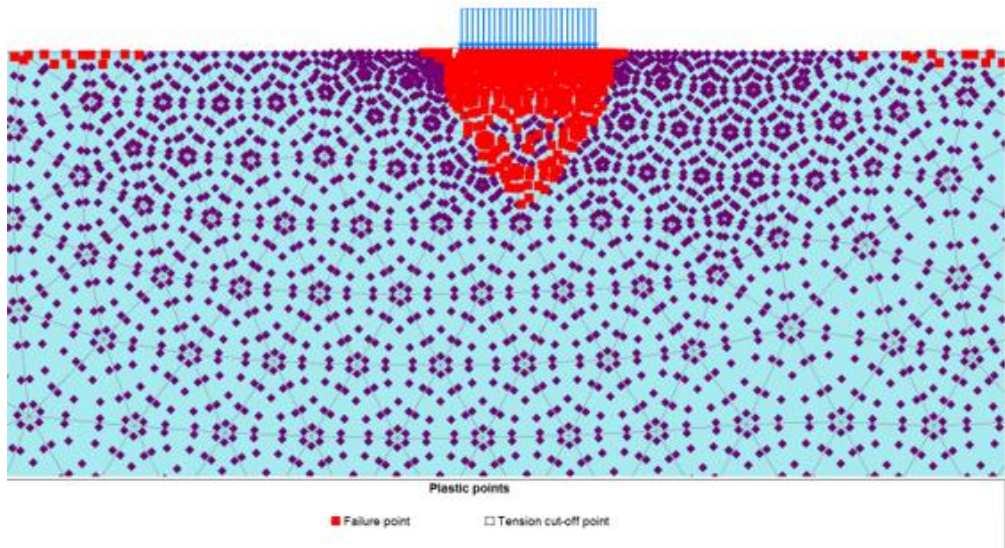


(b)

Ilustración 7. Tipo de malla Very Fine – M - C. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

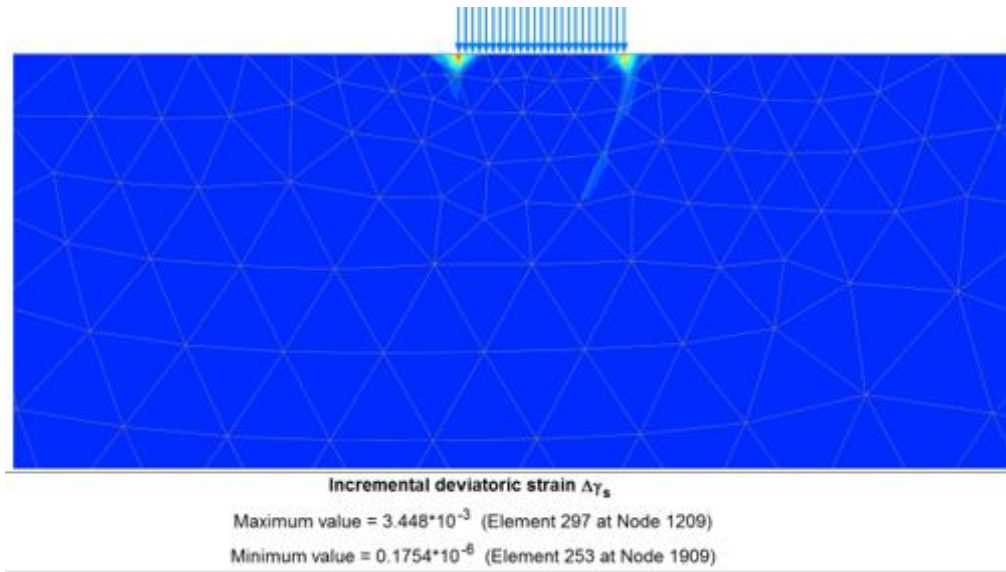


(a)

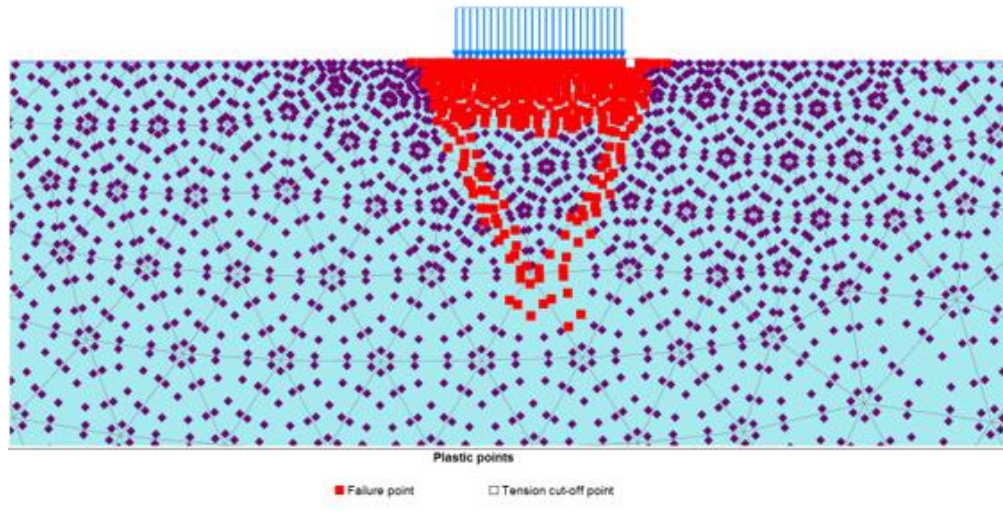


(b)

Ilustración 8. Tipo de malla Medium – M - C. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

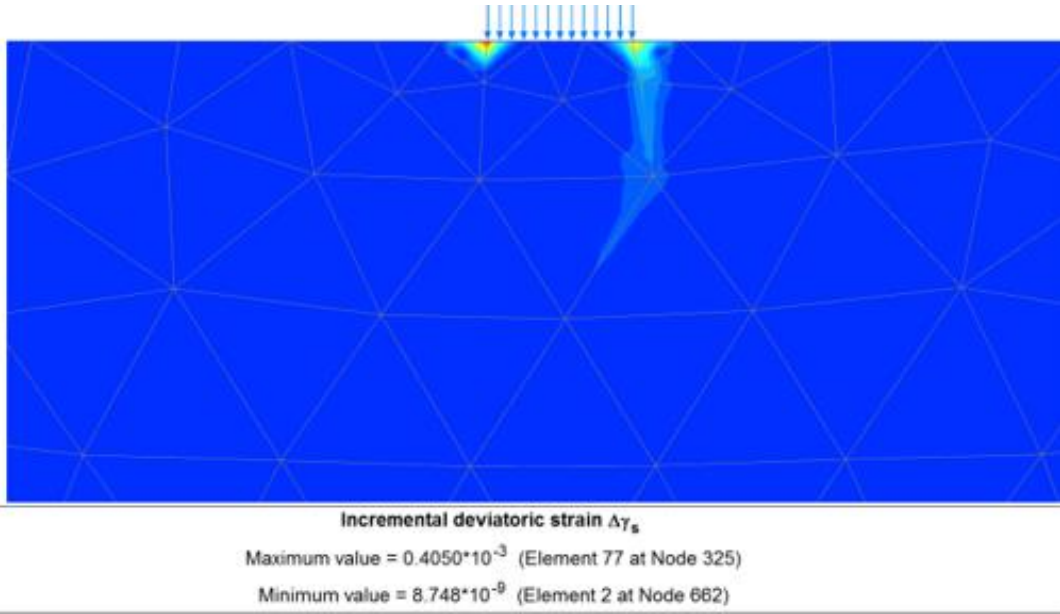


(a)

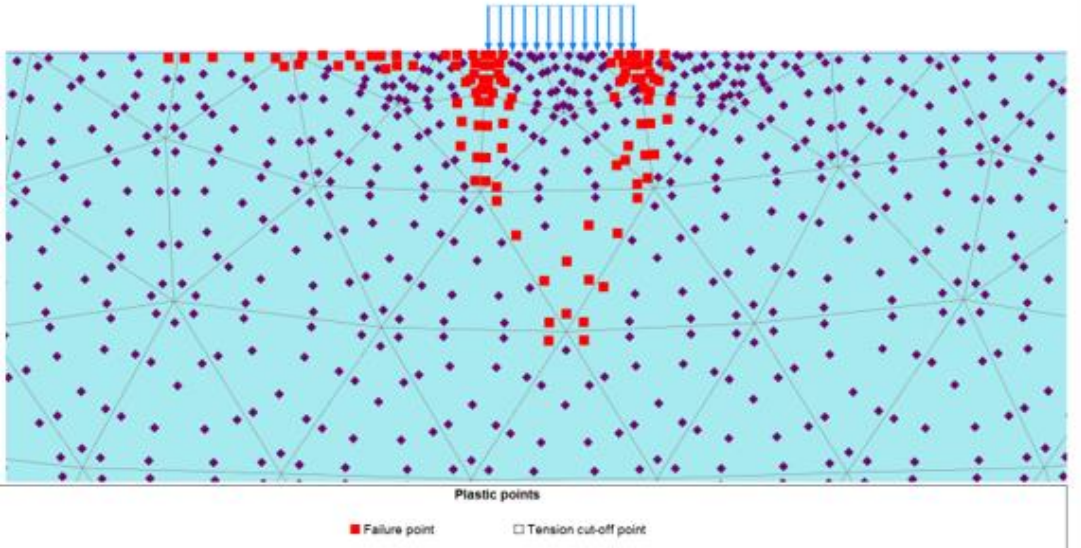


(b)

Ilustración 9. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

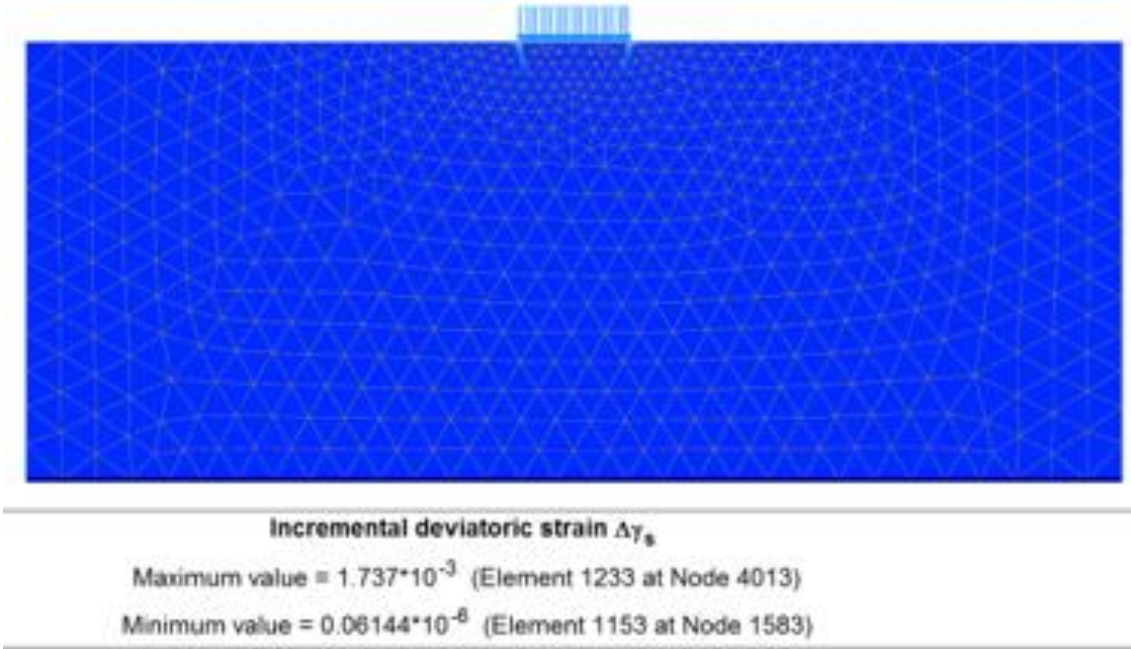


(a)

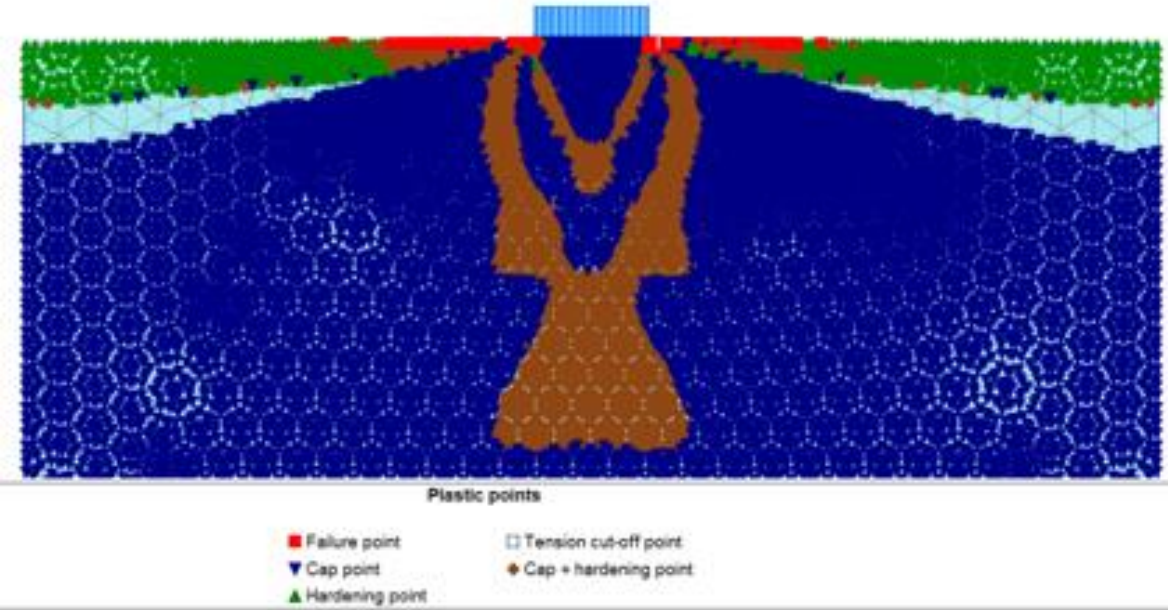


(b)

Ilustración 10. Tipo de malla Very Fine – H - S. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

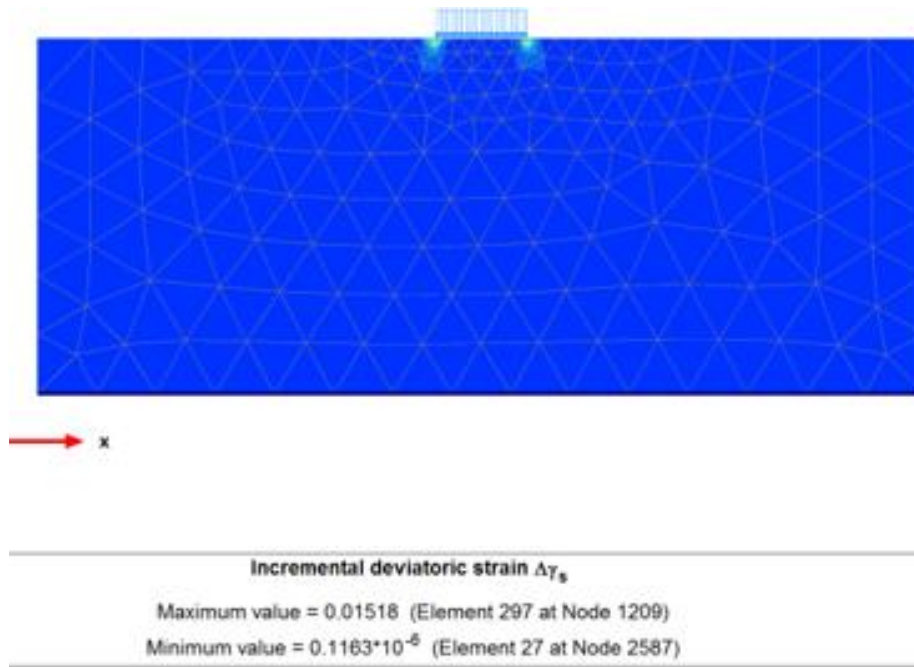


(a)

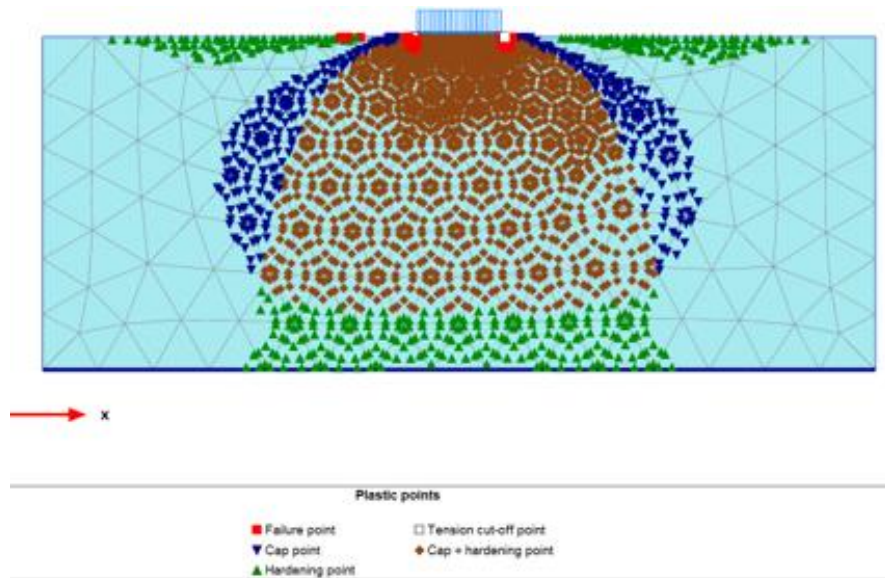


(b)

Ilustración 11. Tipo de malla Medium – H - S. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

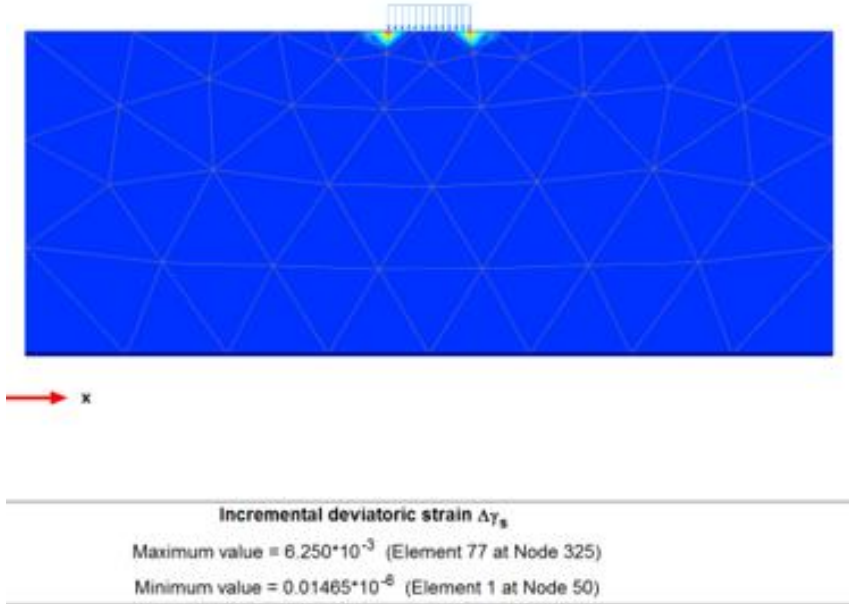


(a)

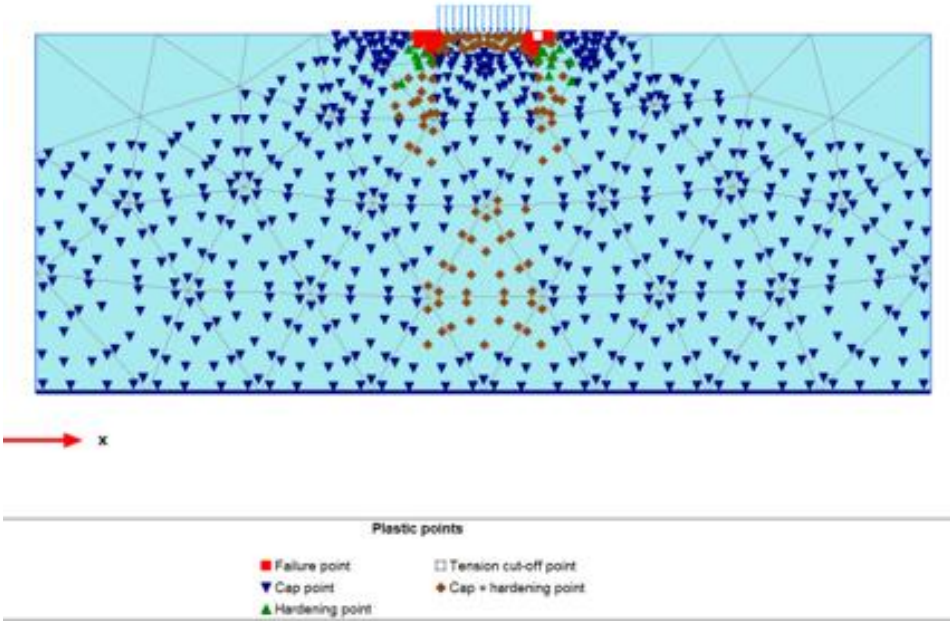


(b)

Ilustración 12. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Arenas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

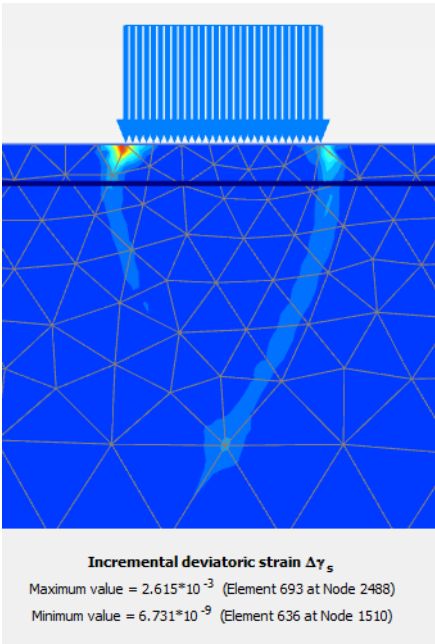


(a)

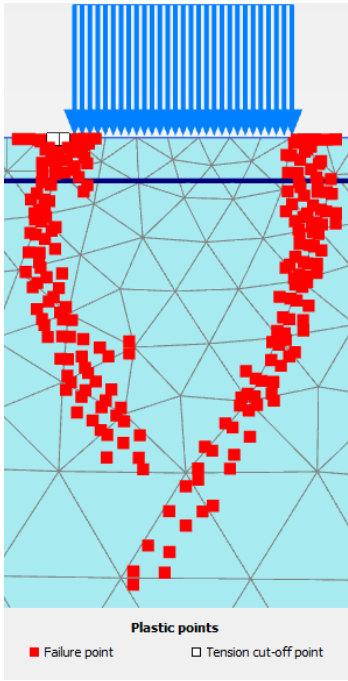


(b)

Ilustración 13. Tipo de malla Very Fine – M - C. Arenas con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.



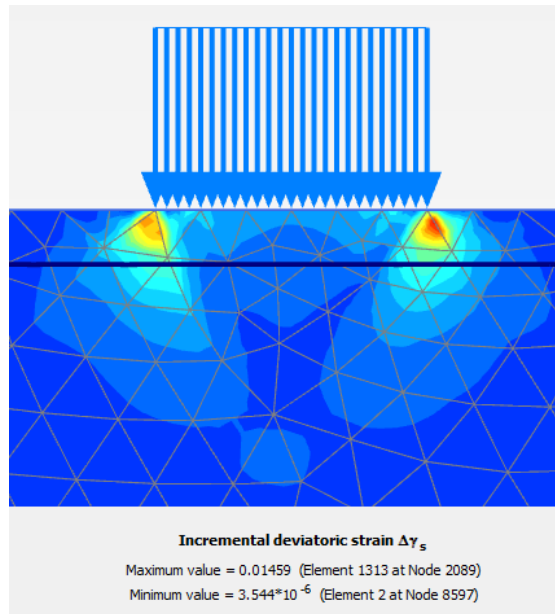
(a)



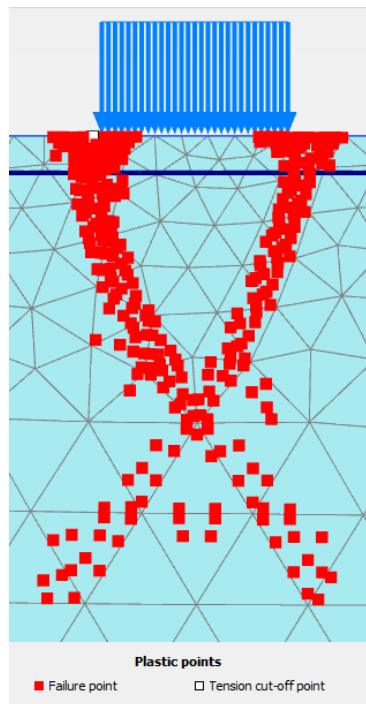
(b)

Ilustración 14. Tipo de malla Medium – M - C. Arenas con nivel freático a 2 [m].

(a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

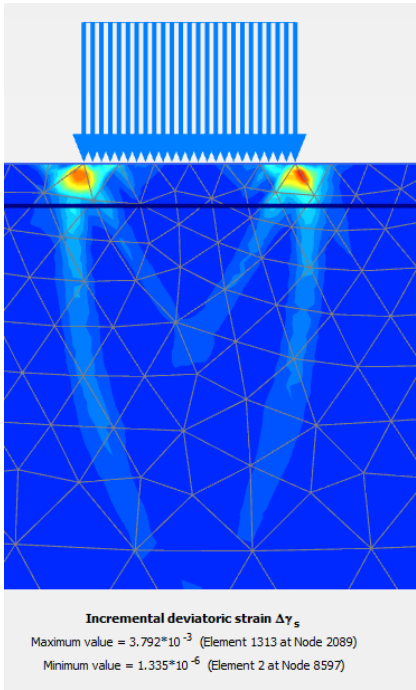


(a)

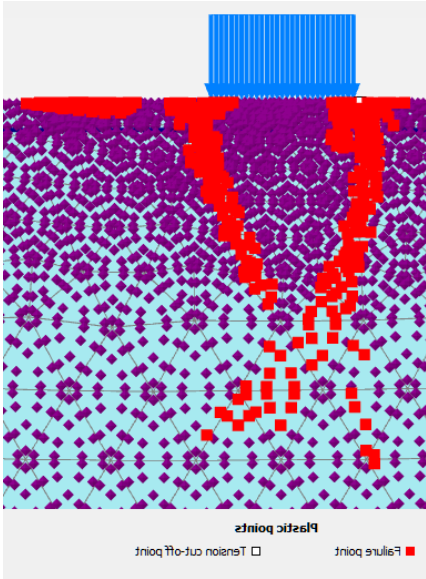


(b)

Ilustración 15. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Arenas con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

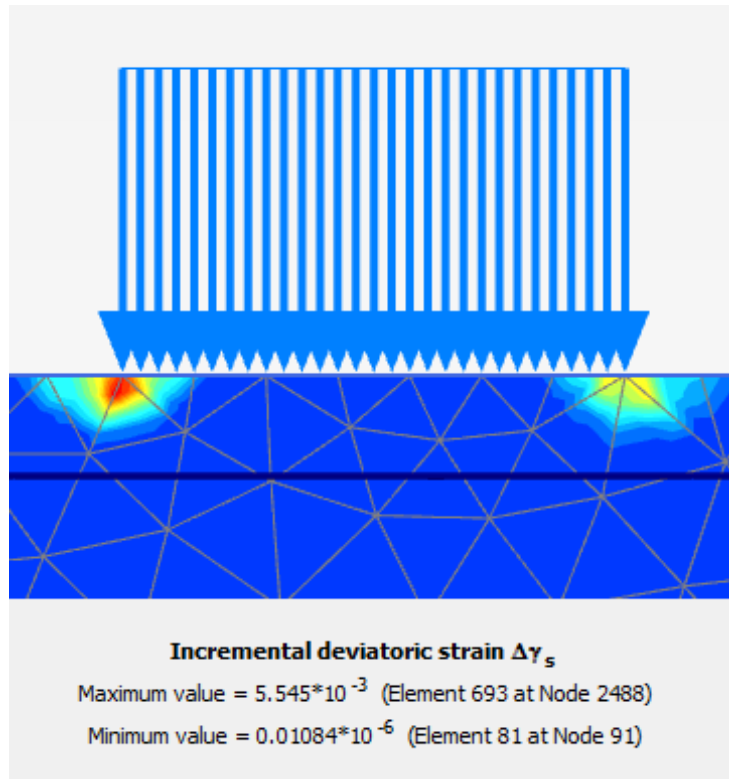


(a)

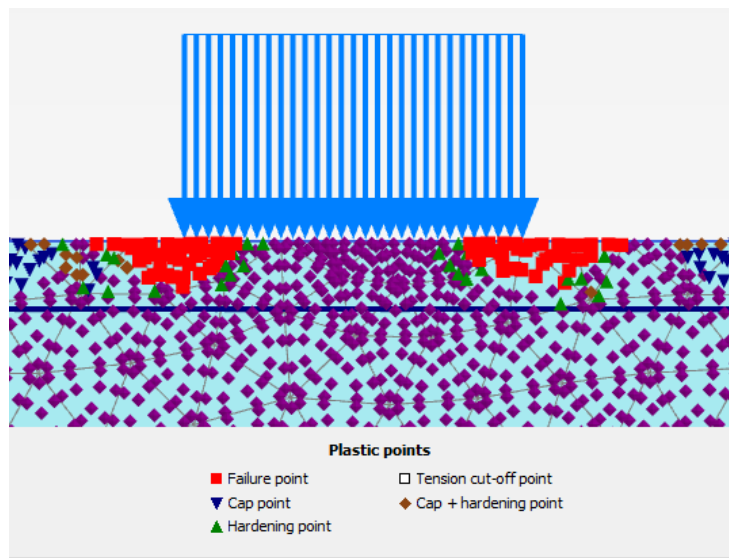


(b)

Ilustración 16. Tipo de malla Very Fine – H - S. Arenas con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.



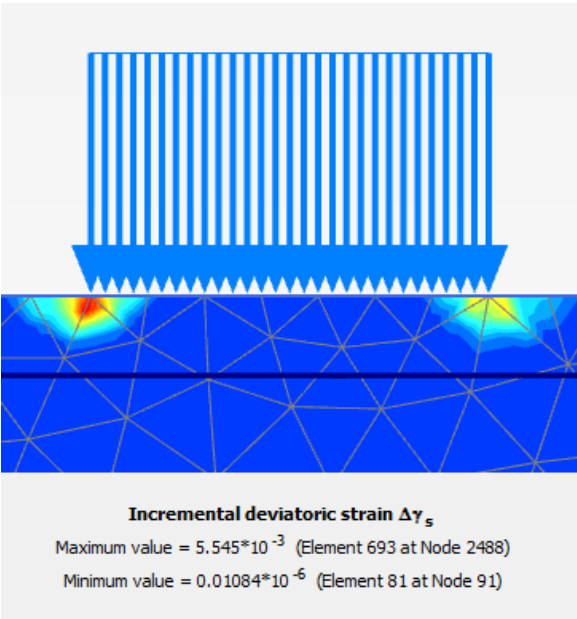
(a)



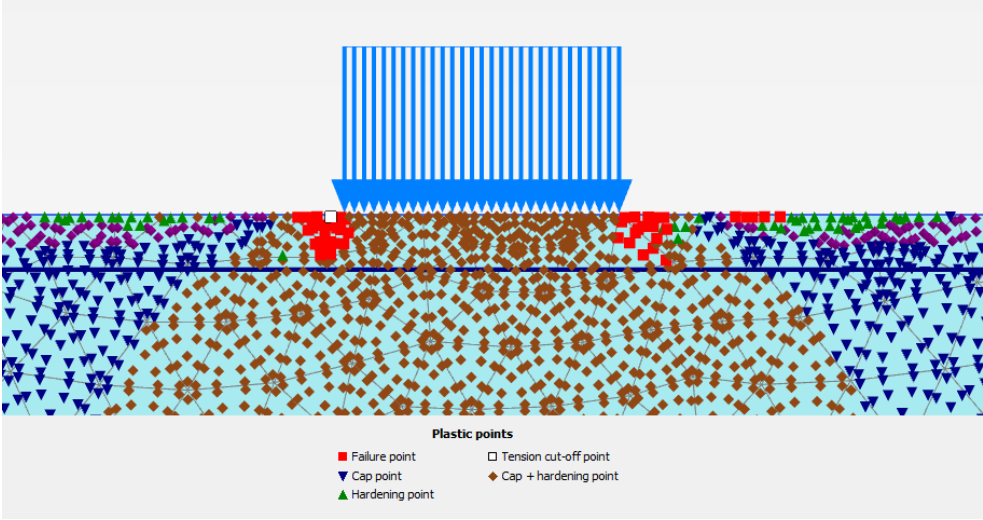
(b)

Ilustración 17. Tipo de malla Medium – H - S. Arenas con nivel freático a 2 [m].

(a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

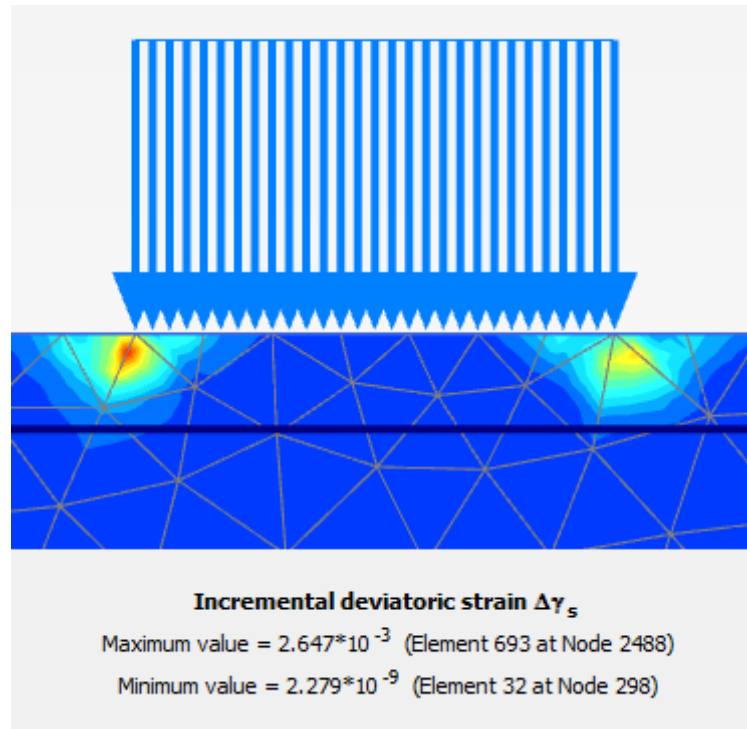


(a)

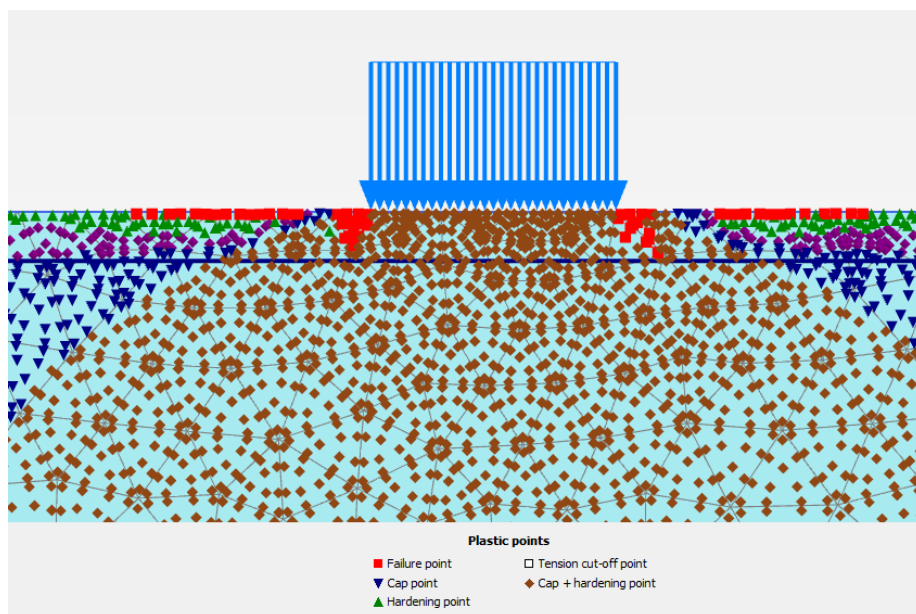


(b)

Ilustración 18. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Arenas con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

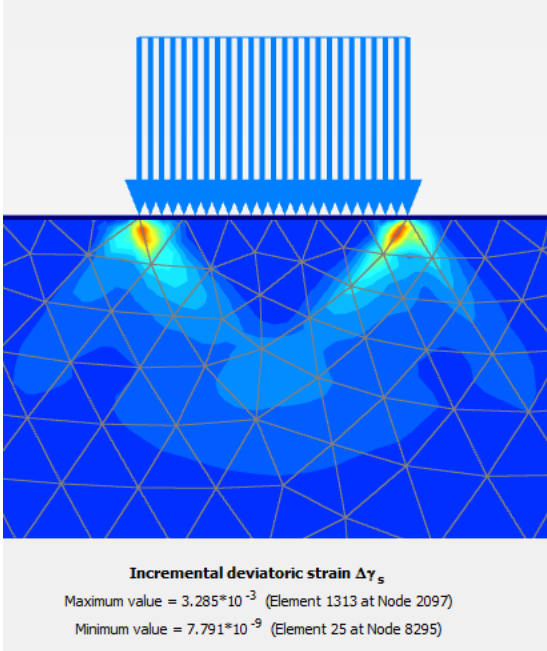


(a)

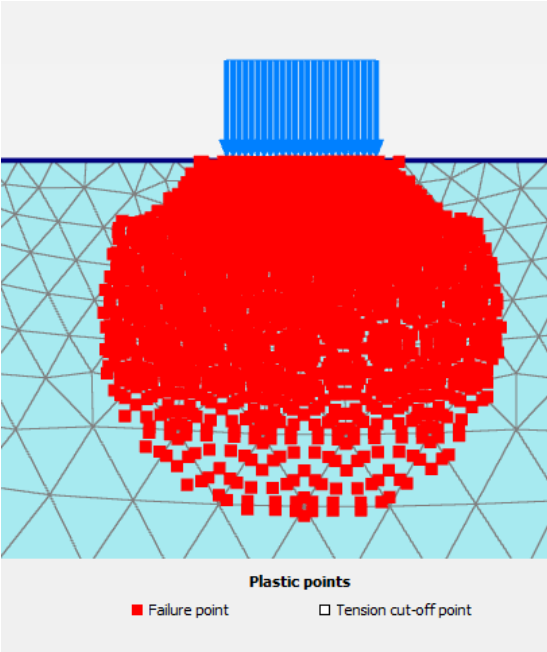


(b)

Ilustración 19. Tipo de malla Very Fine – M - C. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

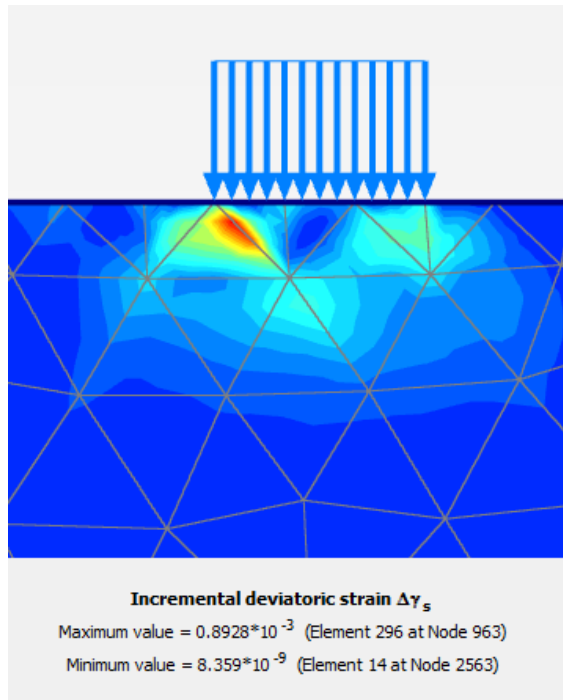


(a)

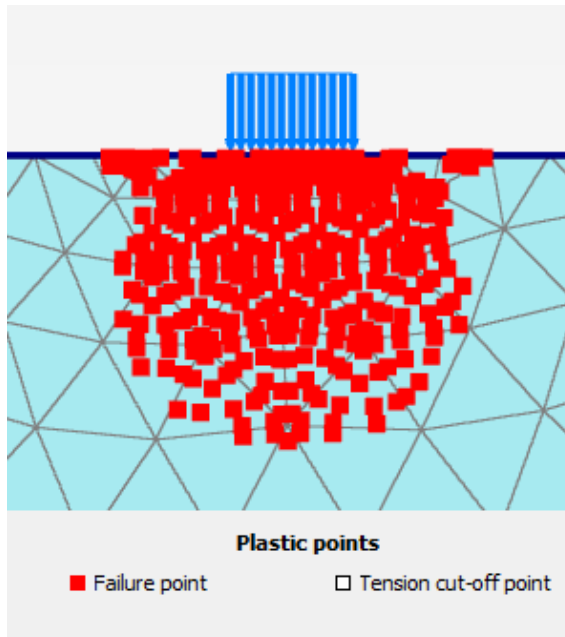


(b)

Ilustración 20. Tipo de malla Medium – M - C. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

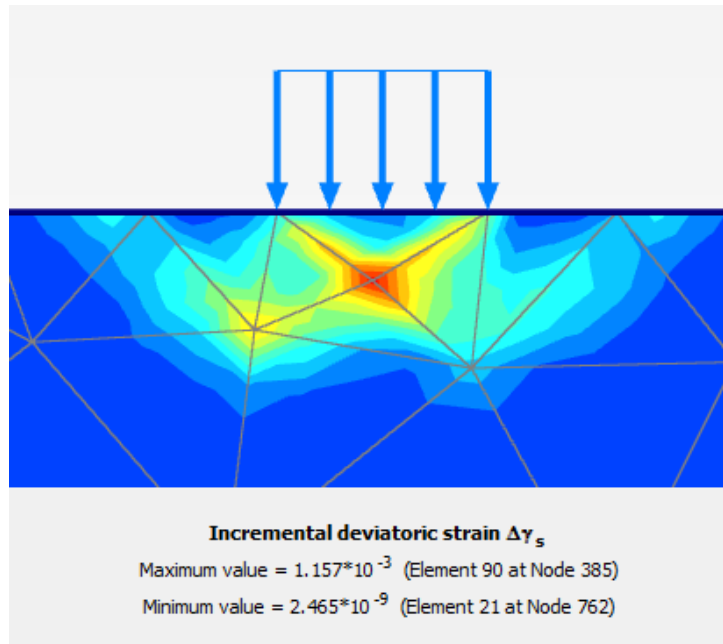


(a)

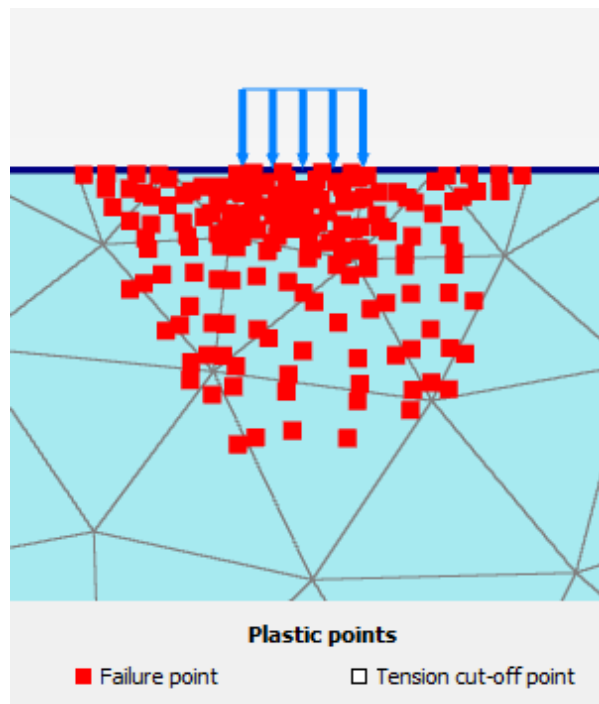


(b)

Ilustración 21. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

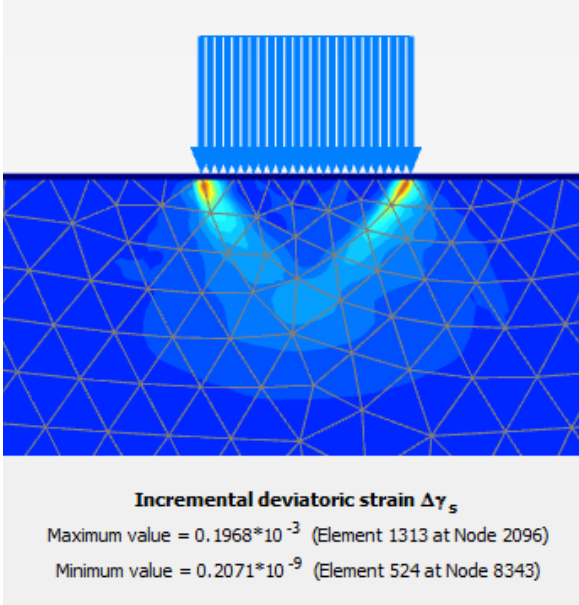


(a)

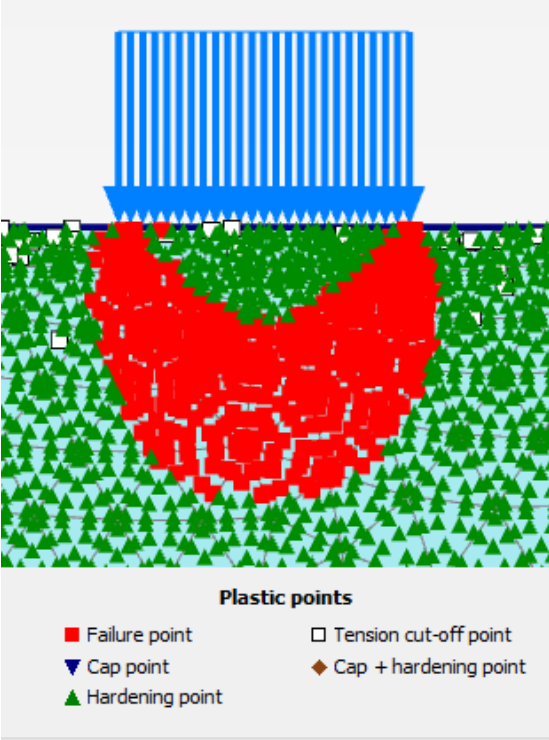


(b)

Ilustración 22. Tipo de malla Very Fine – H - S. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

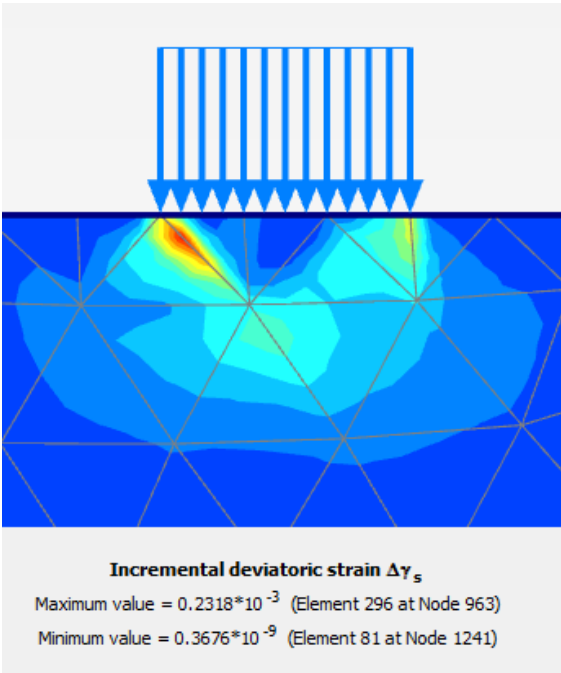


(a)

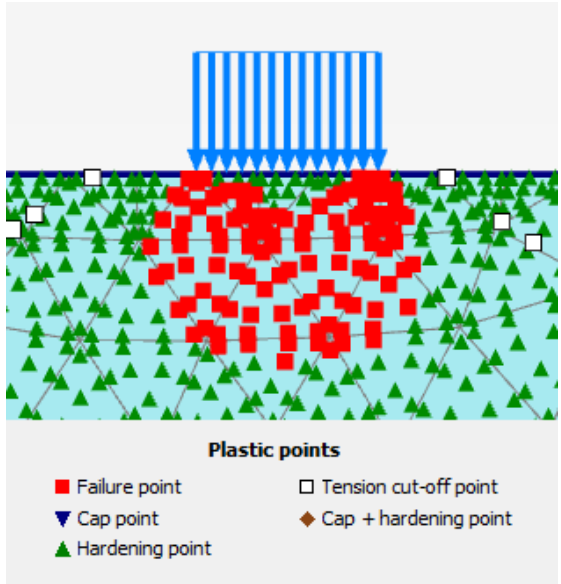


(b)

Ilustración 23. Tipo de malla Medium – H - S. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

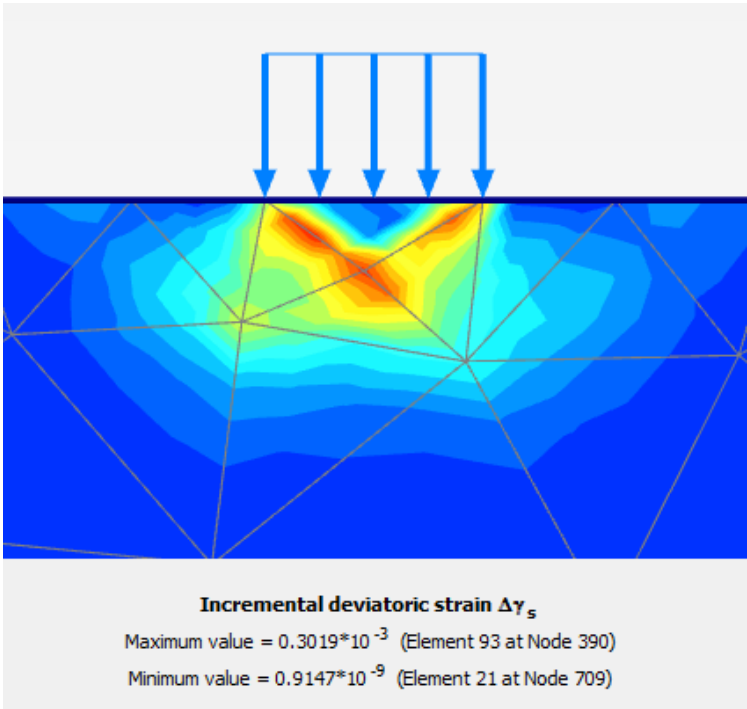


(a)

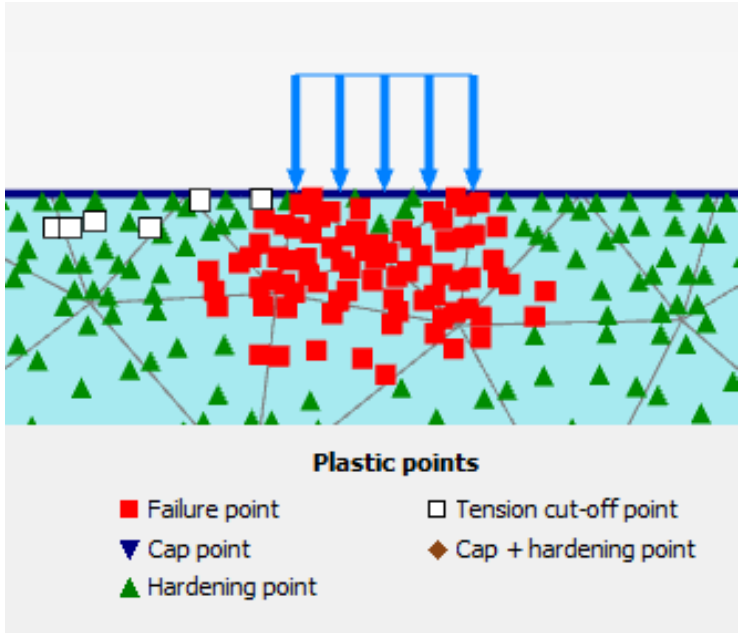


(b)

Ilustración 24. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Arcillas saturadas. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

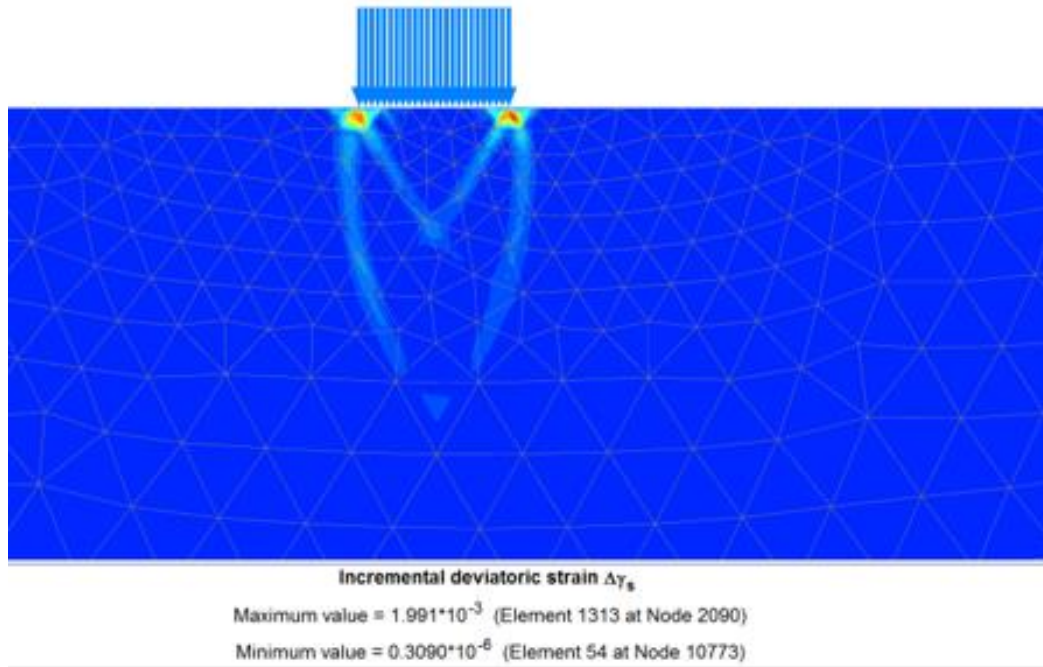


(a)

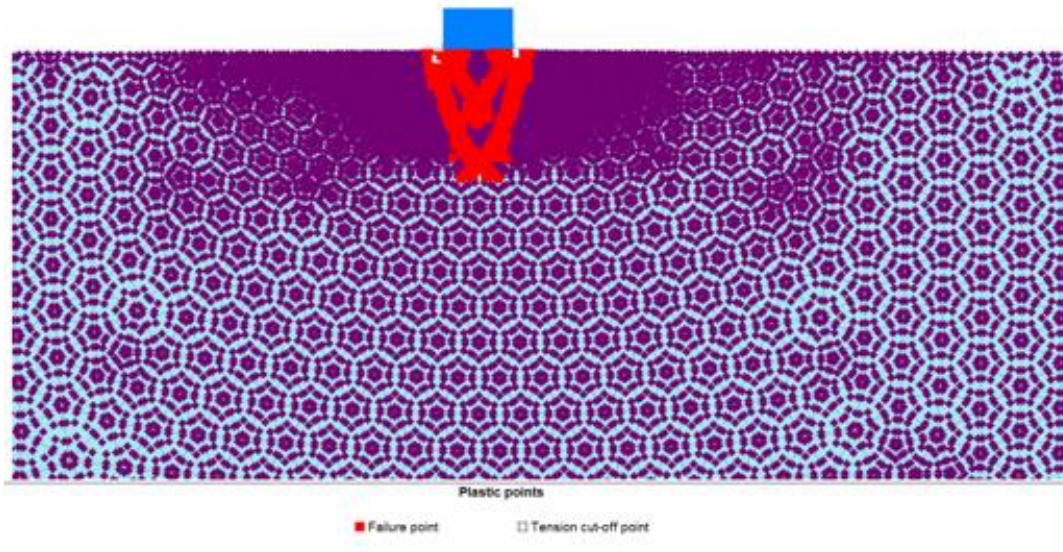


(b)

Ilustración 25. Tipo de malla Very Fine – M - C. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

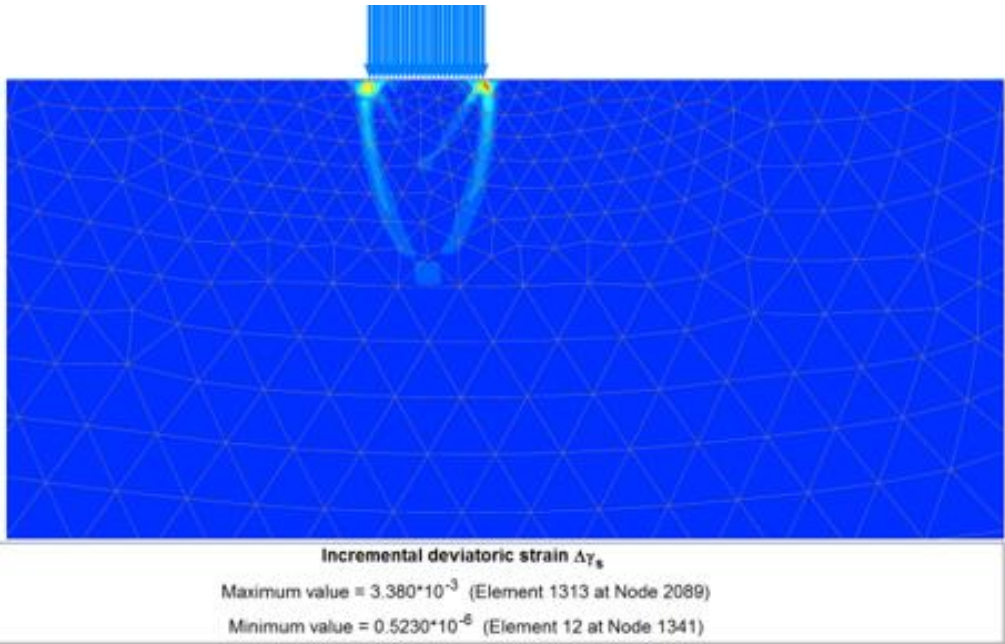


(a)

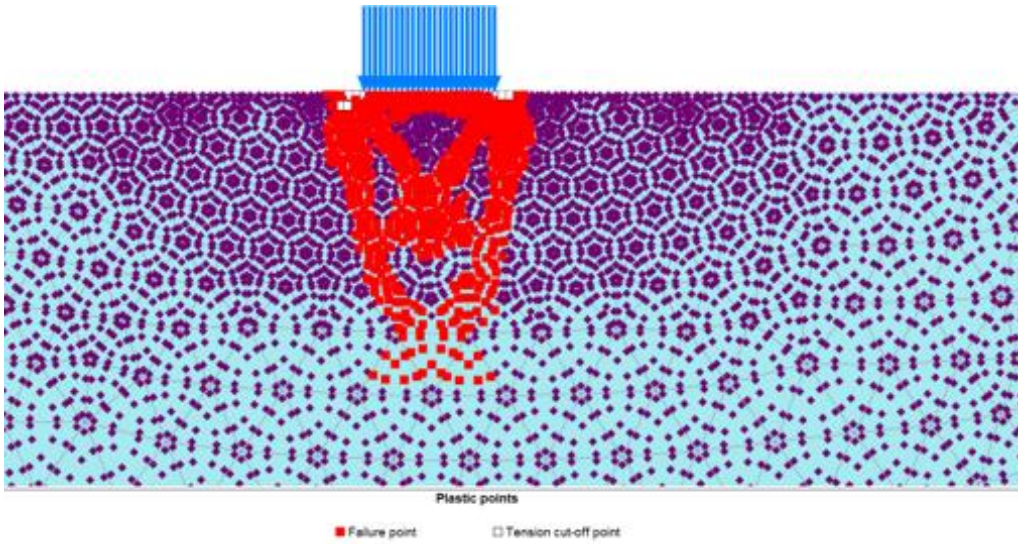


(b)

Ilustración 26. Tipo de malla Medium – M - C. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

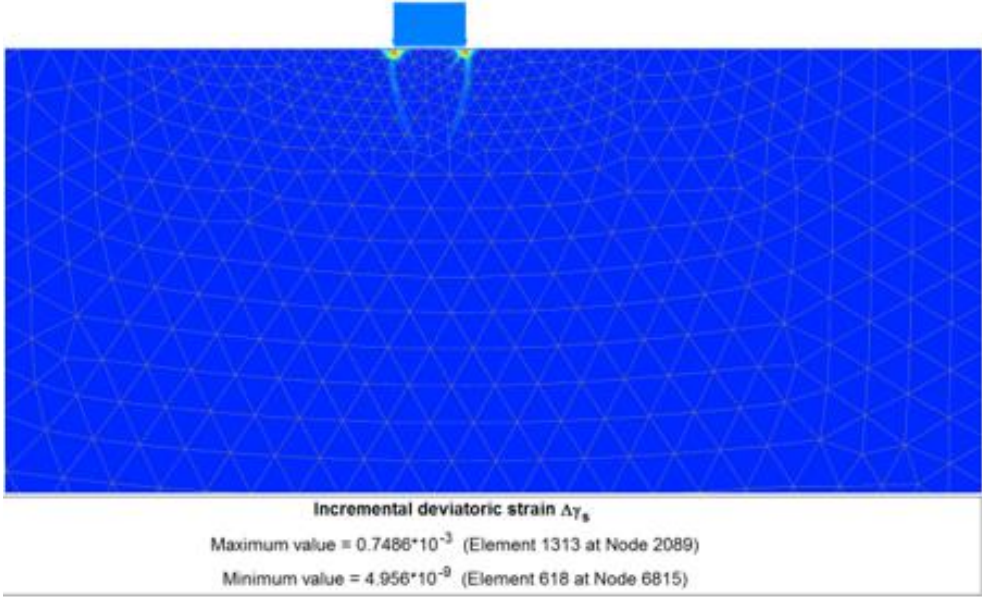


(a)

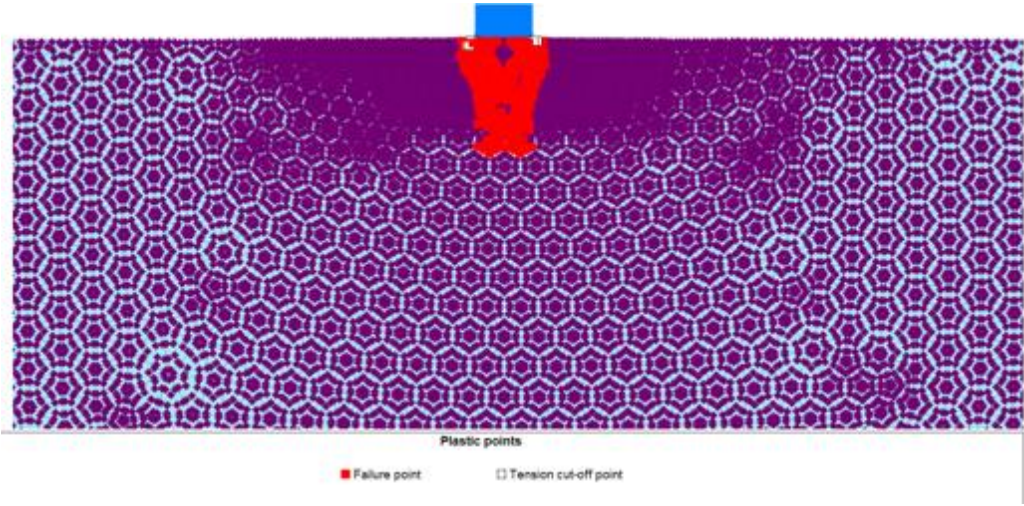


(b)

Ilustración 27. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

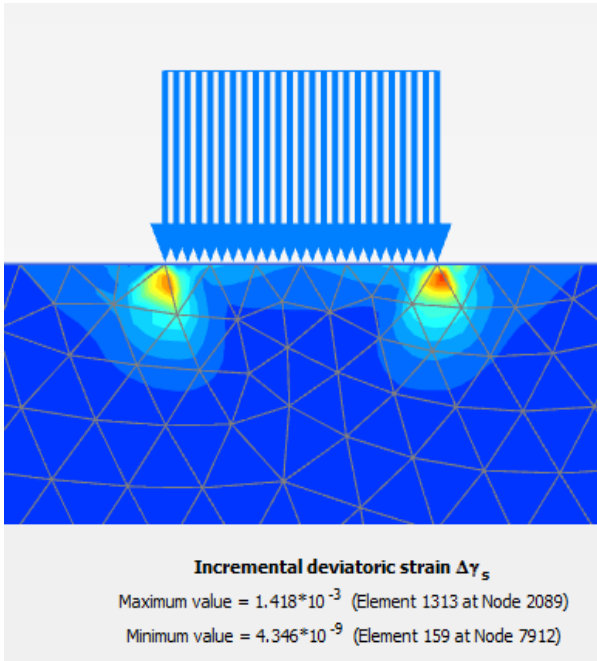


(a)

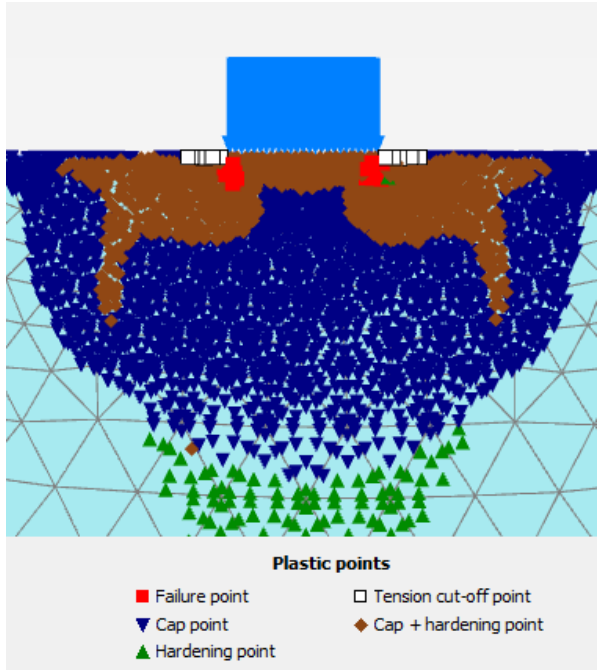


(b)

Ilustración 28. Tipo de malla Very Fine – H - S. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

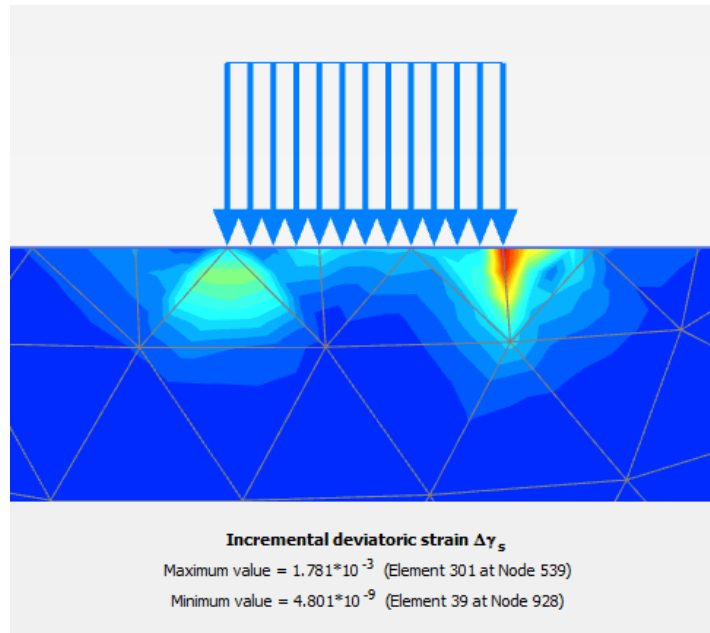


(a)

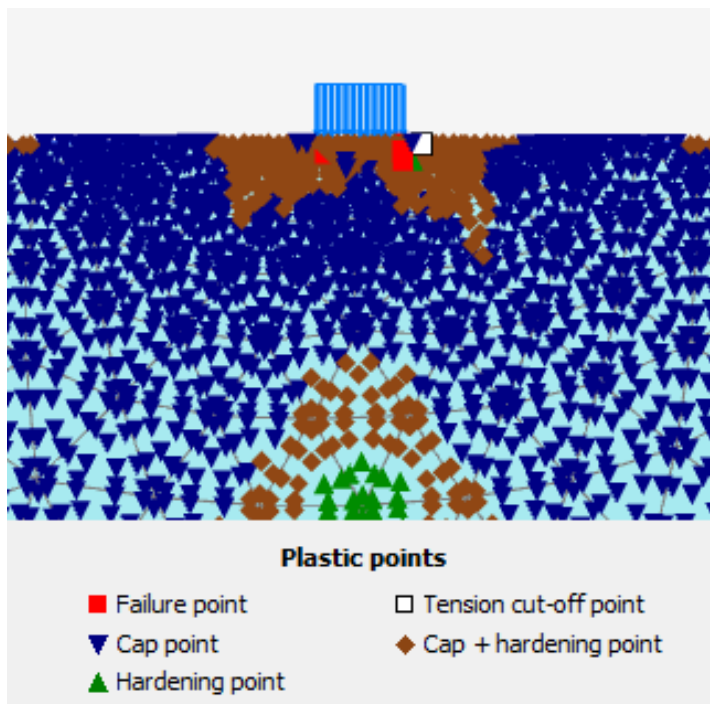


(b)

Ilustración 29. Tipo de malla Medium – H - S. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

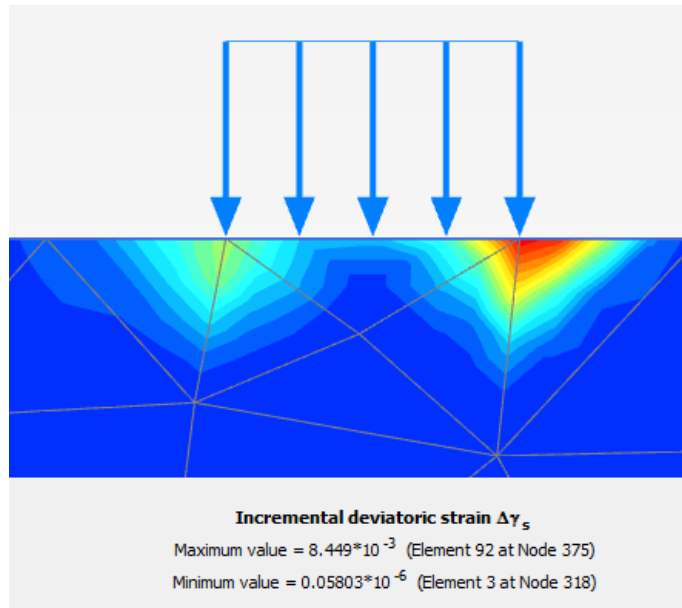


(a)

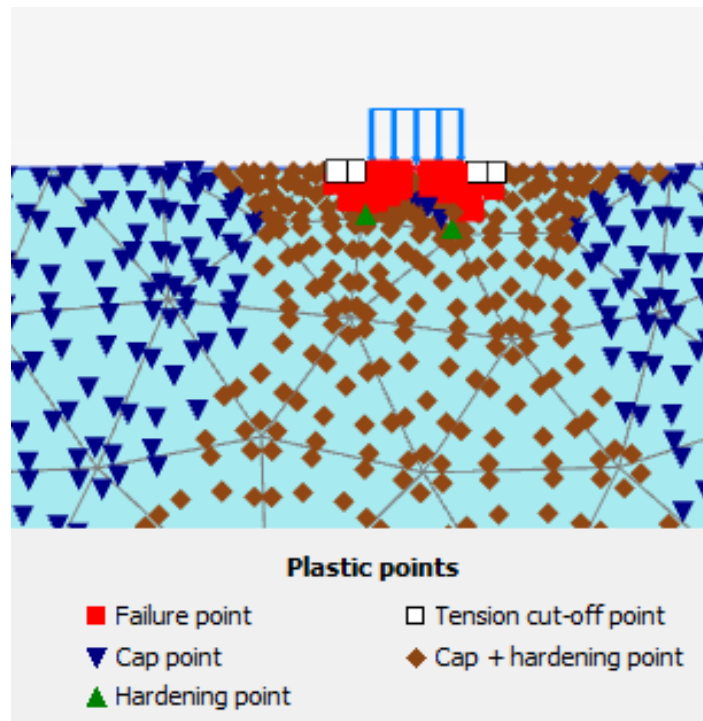


(b)

Ilustración 30. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Limos secos. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

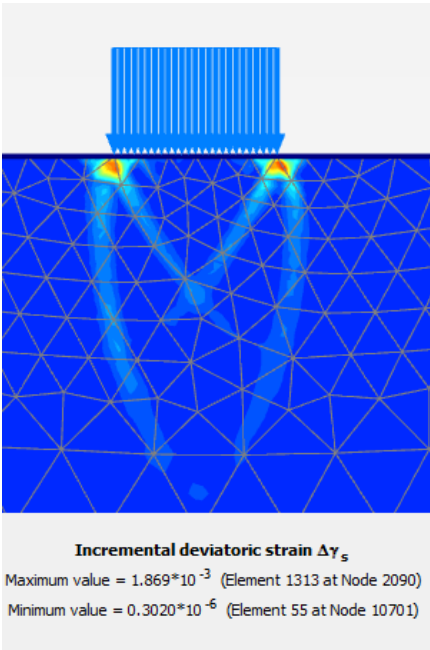


(a)

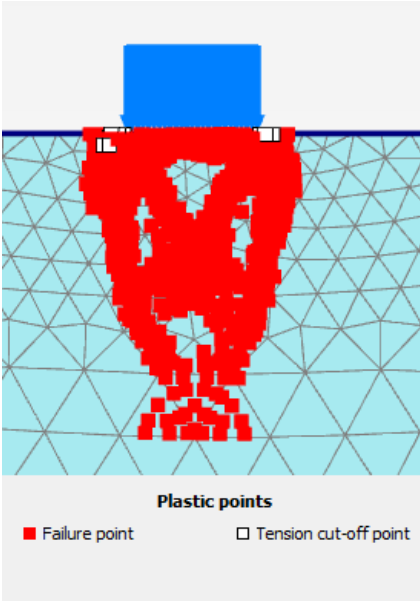


(b)

Ilustración 31. Tipo de malla Very Fine – M - C. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

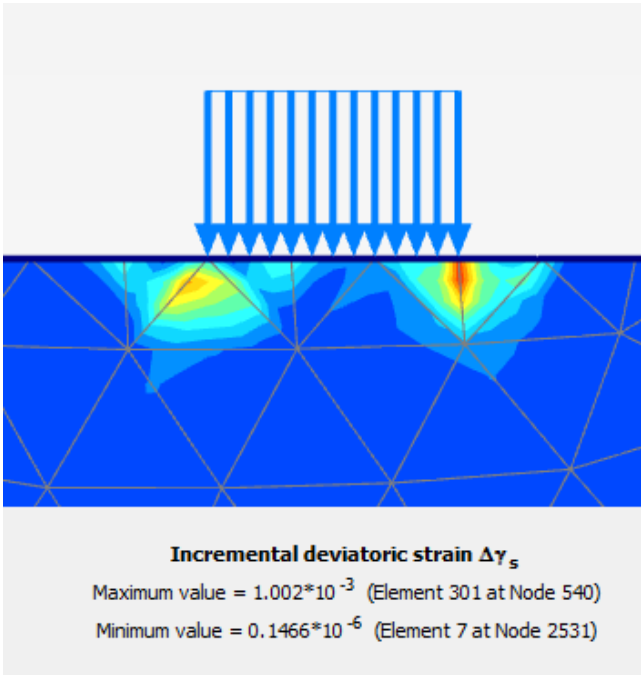


(a)

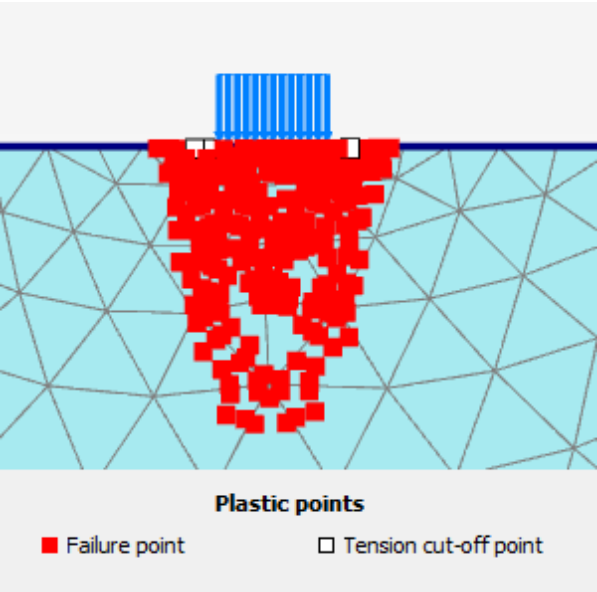


(b)

Ilustración 32. Tipo de malla Medium – M - C. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

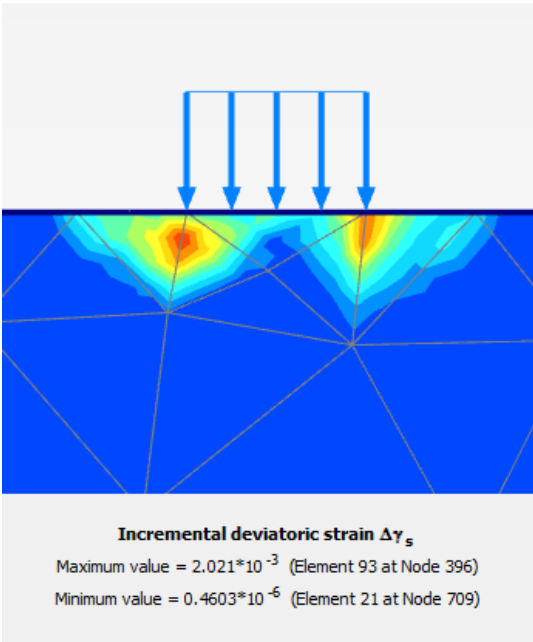


(a)

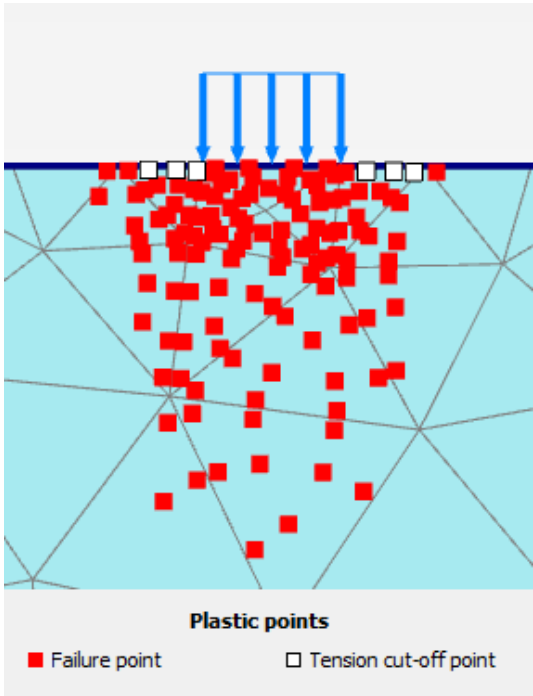


(b)

Ilustración 33. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

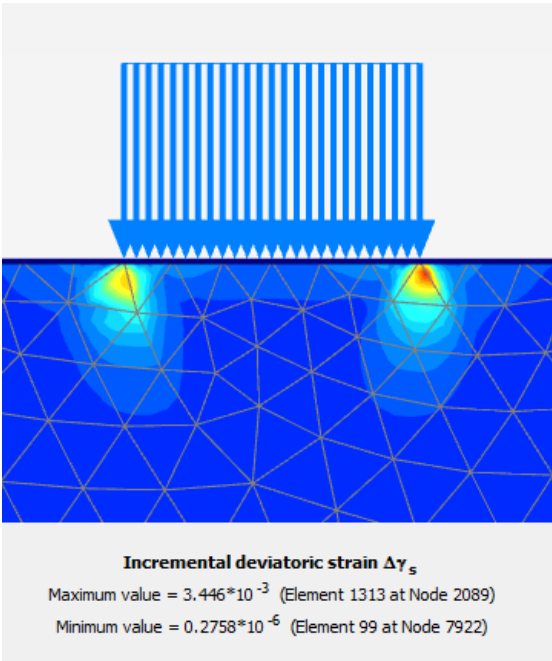


(a)

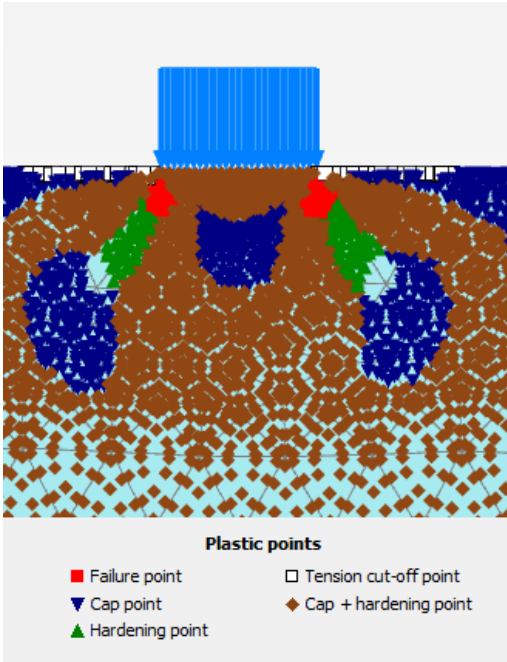


(b)

Ilustración 34. Tipo de malla Very Fine – H - S. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

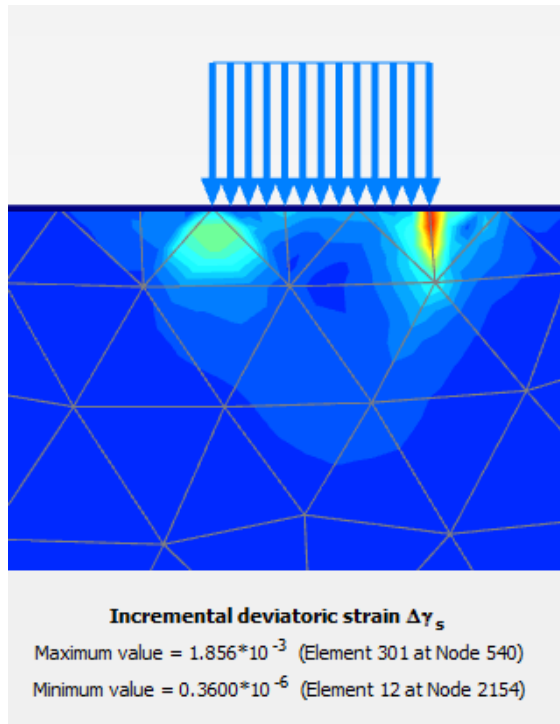


(a)

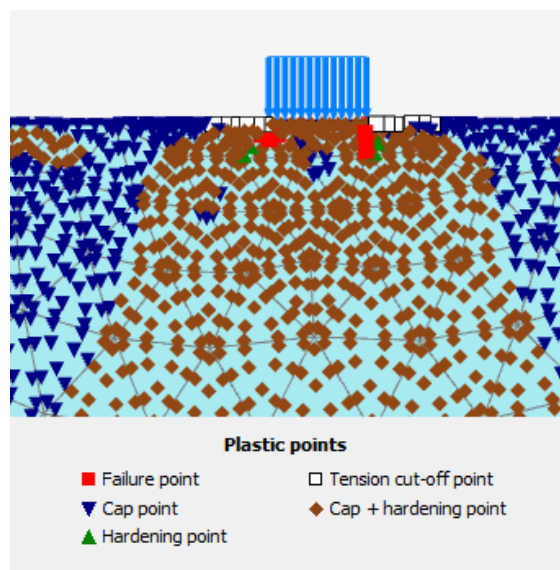


(b)

Ilustración 35. Tipo de malla Medium – H - S. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

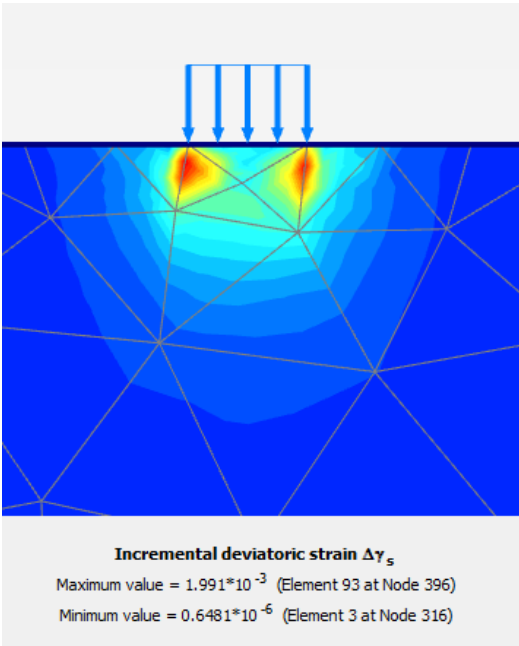


(a)

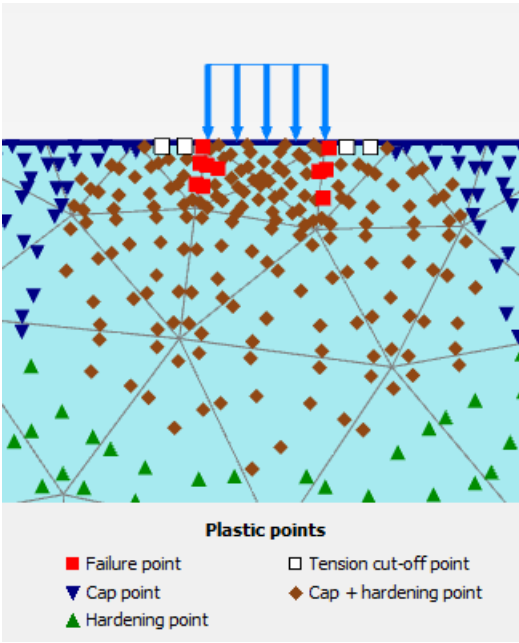


(b)

Ilustración 36. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Limos saturados. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.



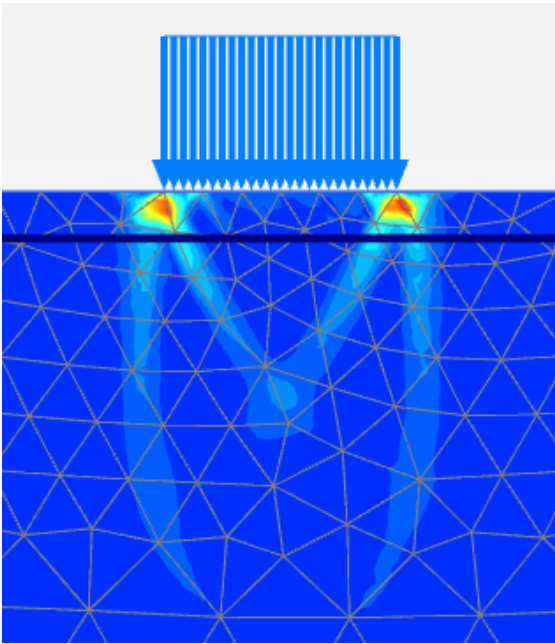
(a)



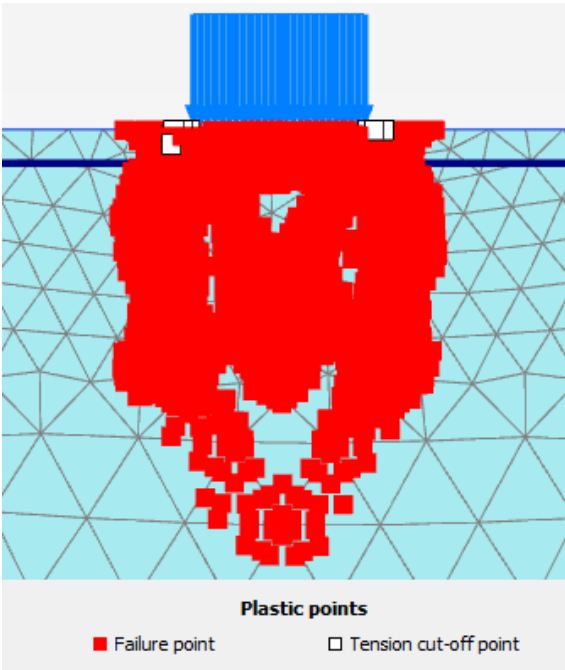
(b)

Ilustración 37. Tipo de malla Very Fine – M - C. Limos con nivel freático a 2 [m].

(a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.



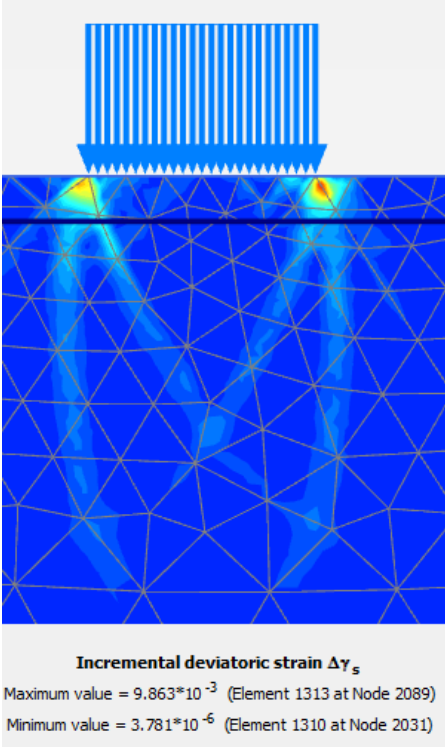
(a)



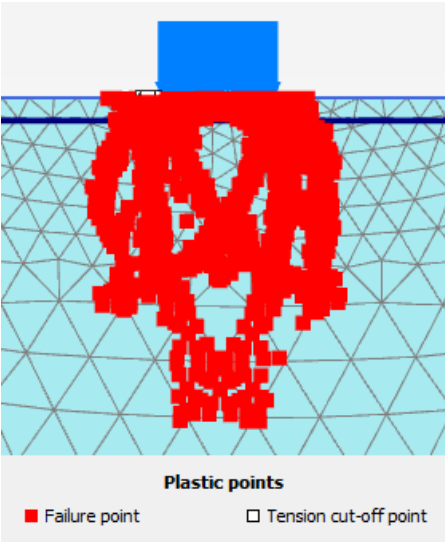
(b)

Ilustración 38. Tipo de malla Medium – M - C. Limos con nivel freático a 2 [m].

(a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

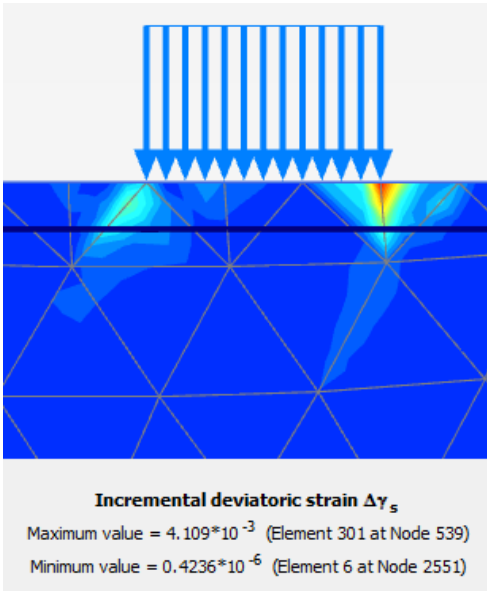


(a)

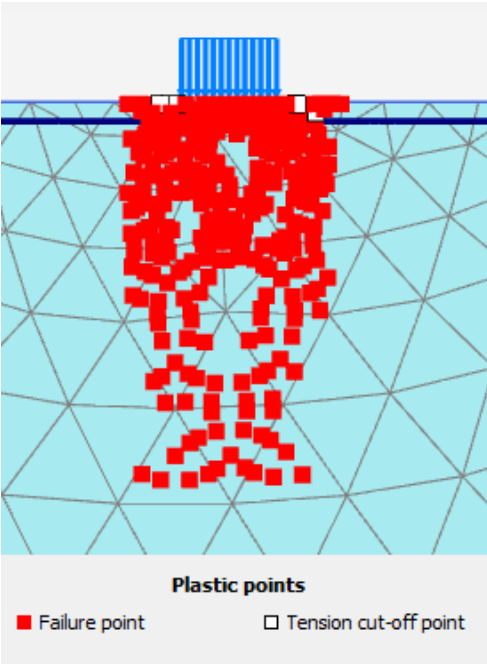


(b)

Ilustración 39. Tipo de malla Very Coarse – M - C. Limos con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.



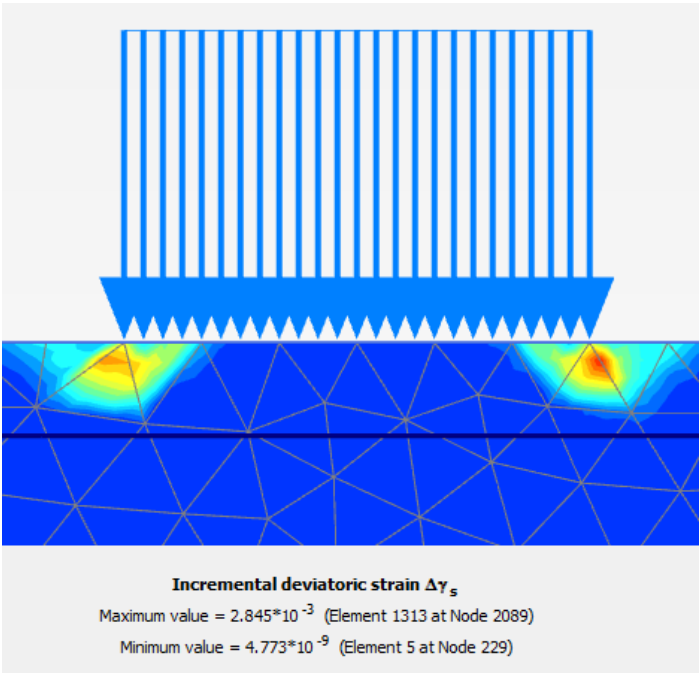
(a)



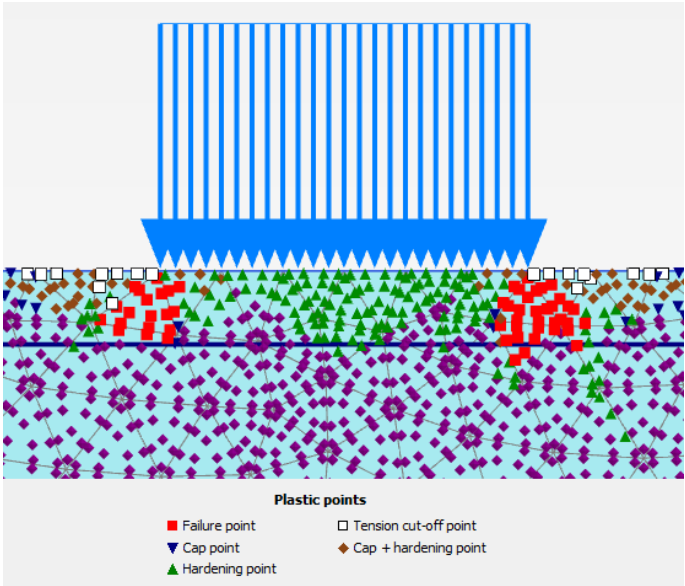
(b)

Ilustración 40. Tipo de malla Very Fine – H - S. Limos con nivel freático a 2 [m].

(a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.



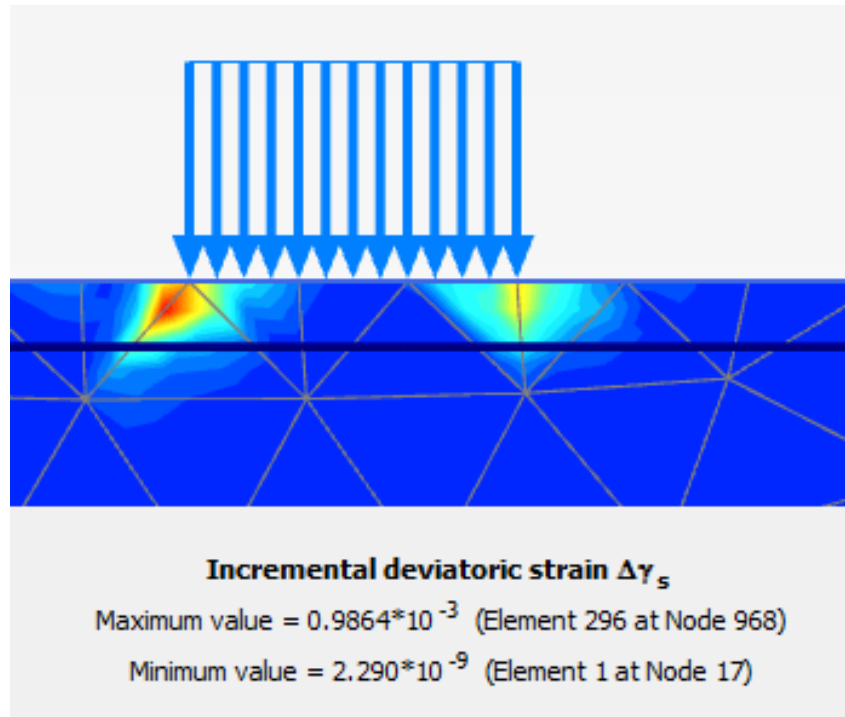
(a)



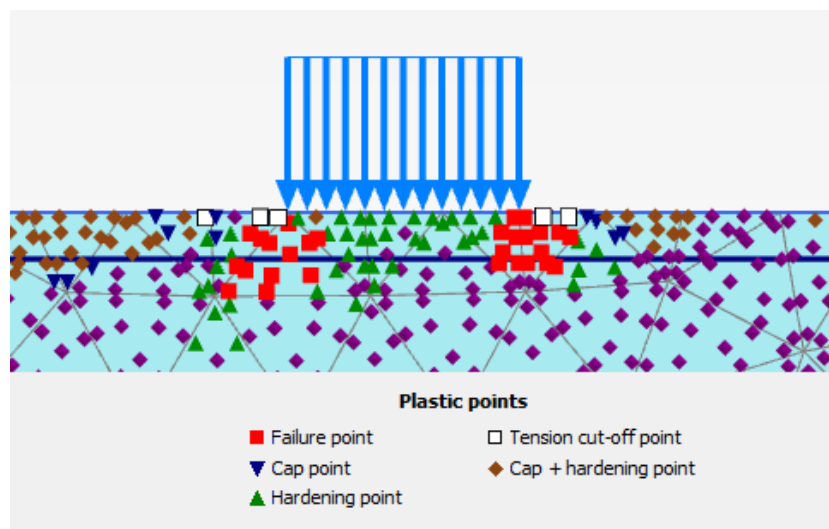
(b)

Ilustración 41. Tipo de malla Medium – H - S. Limos con nivel freático a 2 [m].

(a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.

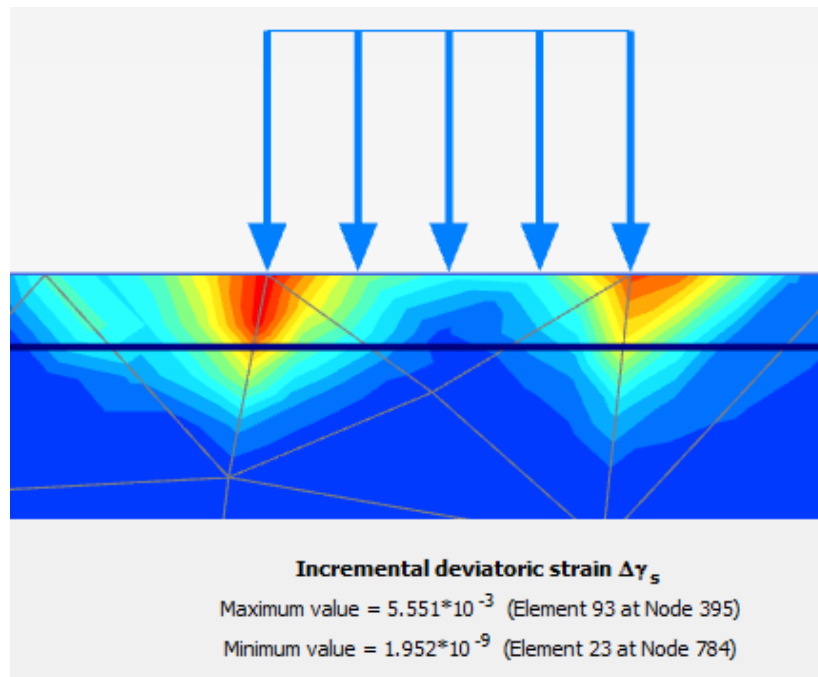


(a)

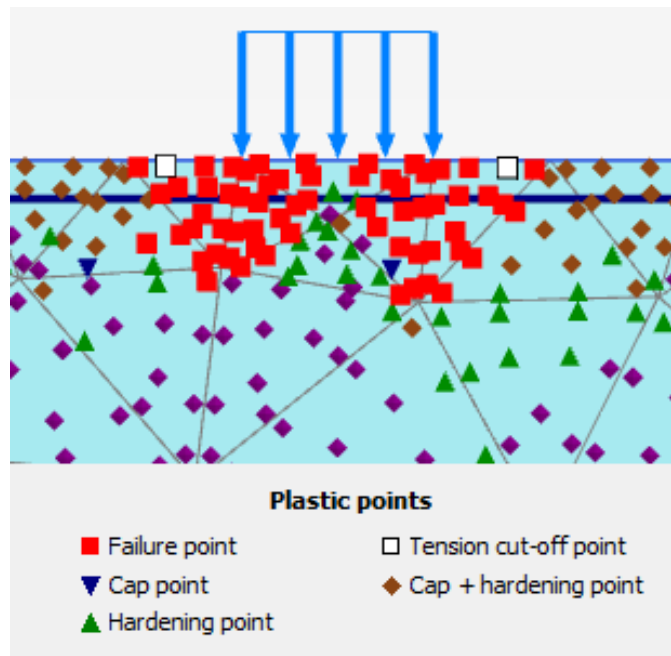


(b)

Ilustración 42. Tipo de malla Very Coarse – H - S. Limos con nivel freático a 2 [m]. (a) Incremento de los esfuerzos desviadores, (b) Puntos plásticos.



(a)



(b)