



UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Escuela Politécnica

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL-CONSTRUCCIONES CIVILES



Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LA PRESA DE VILLALBA DE LOS BARROS

(BADAJOZ)

AUTOR: RUBÉN SÁNCHEZ DEL VIEJO

SEPTIEMBRE, 2019



ESCUELA POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Escuela Politécnica

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL-CONSTRUCCIONES CIVILES

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LA PRESA DE VILLALBA DE LOS BARROS

(BADAJOZ)

AUTOR: RUBÉN SÁNCHEZ DEL VIEJO

TUTOR: AGUSTÍN MATIAS SÁNCHEZ

CO-TUTORA: JUANA ARIAS TRUJILLO

AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento a Don Fernando Aranda Gutiérrez y a Don Jesús Sánchez Carcaboso, ingenieros de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, por su colaboración en todo momento. Gracias a ellos he podido obtener los datos necesarios y por ende, la realización del trabajo. Quiero destacar también el tiempo que me han dedicado durante la visita a la presa para la mejor comprensión de la misma.

Agradecer a mis tutores, Don Agustín Matías Sánchez y Doña Juana Arias Trujillo, por estar siempre a disposición cuando me han surgido dudas durante la realización de dicho trabajo y por los años en los que me han transmitido sus enseñanzas en las distintas asignaturas impartidas en la Escuela Politécnica de Cáceres. También darles las gracias por ponerme en contacto con la Confederación Hidrográfica del Guadiana y así poder realizar dicho trabajo.

A mis padres y mi hermana, por confiar siempre en mí.

A mis amigos de la universidad (Ignacio, Alejandro, Rodrigo, Luis, José y Antonio), por los buenos y malos ratos en los exámenes y, por supuesto, los refrigerios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ACRÓNIMOS.....	XIII
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. MOTIVACIÓN	4
1.2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA.....	4
1.3. REGULACIÓN HISTÓRICA DE LA CUENCA DEL RÍO GUADAJIRA	7
1.4. ANTECEDENTES Y USOS DEL EMBALSE	8
1.5. LEGISLACIÓN APLICABLE A LA PRESA.....	10
2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	11
3. CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA	12
3.1. GENERALIDADES.....	12
3.2. PLANTA, SECCIÓN TIPO Y ALZADOS	12
3.3. MARCO GEOLÓGICO Y MATERIALES DEL EMBALSE	19
3.4. ELEMENTOS DE DESAGÜE Y TOMA DE AGUA.....	22
3.5. ELEMENTOS DE CONTROL Y AUSCULTACIÓN.....	24
4. METODOLOGÍA	27
4.1. MÉTODOS DE CÁLCULO.....	27
4.1.1. <i>Métodos de Equilibrio Límite para el FS en taludes</i>	<i>28</i>
4.1.2. <i>Métodos de Búsqueda de la superficie de deslizamiento pésima.....</i>	<i>31</i>
4.1.3. <i>Software de cálculo</i>	<i>32</i>
4.2. SECCIONES ANALIZADAS.....	32
4.3. SITUACIONES DE CÁLCULO.....	34
4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	36
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
5.1 SECCIÓN INICIALMENTE PROYECTADA.....	38

<i>ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LA PRESA DE VILLALBA DE LOS BARROS (BADAJOZ)</i>	
5.1.1. Red de flujo.....	38
5.1.2. Factores de seguridad de los taludes.....	40
5.1.3. Análisis de Sensibilidad.....	46
5.2. SECCIÓN CONSTRUIDA.....	48
5.2.1. Red de flujo.....	48
5.2.2. Factores de Seguridad de los taludes.....	50
5.2.3. Análisis de Sensibilidad.....	55
6. CONCLUSIONES.....	57
6.1. CONCLUSIONES CON RESPECTO A LA RED DE FLUJO.....	57
6.2. CONCLUSIONES CON RESPECTO A LOS FACTORES DE SEGURIDAD.....	58
6.3. CONCLUSIONES CON RESPECTO AL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXO DE CÁLCULO 1- SECCIÓN INICIALMENTE PROYECTADA.....	64
FACTORES DE SEGURIDAD.....	64
<i>SITUACIÓN NORMAL-EMBALSE VACIO.....</i>	<i>64</i>
<i>SITUACIÓN NORMAL-EMBALSE LLENO N.M.N.....</i>	<i>68</i>
<i>SITUACIÓN ACCIDENTAL-VACIO+SISMO.....</i>	<i>70</i>
<i>SITUACIÓN ACCIDENTAL- EMBALSE LLENO N.A.P.....</i>	<i>74</i>
<i>SITUACIÓN ACCIDENTAL-DESEMBALSE RÁPIDO.....</i>	<i>76</i>
<i>SITUACIÓN ACCIDENTAL- N.M.N. +SISMO.....</i>	<i>78</i>
<i>SITUACIÓN EXTREMA-EMBALSE LLENO N.A.E.....</i>	<i>80</i>
<i>SITUACIÓN EXTREMA- DESEMBALSE RÁPIDO + SISMO.....</i>	<i>82</i>
ANEXO DE CÁLCULO 2-SECCIÓN CONSTRUIDA.....	84
FACTORES DE SEGURIDAD.....	84
<i>SITUACIÓN NORMAL-EMBALSE VACIO.....</i>	<i>84</i>
<i>SITUACIÓN NORMAL-EMBALSE LLENO N.M.N.....</i>	<i>88</i>
<i>SITUACIÓN ACCIDENTAL-DESEMBALSE RÁPIDO.....</i>	<i>90</i>
<i>SITUACIÓN ACCIDENTAL- N.M.N. + SISMO.....</i>	<i>92</i>
<i>SITUACIÓN ACCIDENTAL-EMBALSE VACIO+ SISMO.....</i>	<i>94</i>

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LA PRESA DE VILLALBA DE LOS BARROS (BADAJOZ)

<i>SITUACIÓN ACCIDENTAL-EMBALSE LLENO N.A.P.....</i>	<i>98</i>
<i>SITUACIÓN EXTREMA-EMBALSE LLENO N.A.E.....</i>	<i>100</i>
<i>SITUACIÓN EXTREMA- DESEMBALSE RÁPIDO + SISMO.....</i>	<i>102</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características mínimas exigidas a los materiales en proyecto inicialmente. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Guadiana, 2016)	20
Tabla 2: Características de los materiales encontrados en el vaso del embalse. Fuente:(Confederación Hidrográfica del Guadiana, 2016)	20
Tabla 3: Características de los materiales usados en el cuerpo de la presa y en el cimiento. Fuente: (C.H.G., 2006)	34
Tabla 4: Resumen de situaciones de estudio de la presa. Fuente: (Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, 1996)	35
Tabla 5: Cota de la lámina de agua en la presa para las distintas situaciones analizadas. Fuente: (C.H.G., 2006)	36
Tabla 6: Factores de seguridad mínimos. Fuente:(Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).....	36
Tabla 7: Variación de los parámetros geotécnicos de los materiales para el análisis de sensibilidad	37
Tabla 8: Factores de Seguridad sección inicialmente proyectada en la Situación Normal. 41	
Tabla 9: Factor de Seguridad sección inicialmente proyectada en la Situación Accidental.	43
Tabla 10: Factor de Seguridad en la sección inicialmente proyectada en la Situación Extrema.....	45
Tabla 11: Resumen Análisis de Sensibilidad Sección inicialmente Proyectada	46
Tabla 12: Factores de seguridad de la Sección Construida en la Situación Normal.	51
Tabla 13: Factores de seguridad de la Sección Construida en la Situación Accidental.	52
Tabla 14:Factores de seguridad de la Sección Construida en la Situación Extrema.	54
Tabla 15: Resumen Análisis de sensibilidad sección construida	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista aérea de la presa. Fuente: (Rivera, 2014)	3
Figura 2: Ubicación de la presa a nivel nacional. Fuente (Google Maps, 2019).....	5
Figura 3: Ubicación de la presa a nivel comarcal. En rojo se rodea el embalse. Fuente:(Google Maps, 2019).....	6
Figura 4: En rojo se muestra el camino de acceso a la presa desde BA-155. Fuente:(Google Maps, 2019).....	6
Figura 5: Presa de la Albuera del Castellar, siglo XVI. Fuente: (Fernando Aranda Gutierrez J. S., 2010).....	7
Figura 6: Presa de la Albuera de Feria, siglo XVIII. Fuente: (E.P., 2018).....	7
Figura 7: Vista del embalse desde coronación de la presa.	8
Figura 8: Toma flotante de abastecimiento vista desde la coronación de la presa, rodeada en color rojo.....	9
Figura 9: Vista en planta de la presa. Fuente:(C.H.G., 2018)	15
Figura 10: Sección tipo de la presa proyectada inicialmente. Fuente: (C.H.G., 2018)	16
Figura 11: Sección tipo de la presa construida con el núcleo impermeable en la parte central. Fuente: (C.H.G., 2018)	17
Figura 12: Vistas en alzado de la presa construida, aguas arriba(superior) y aguas abajo(inferior). Fuente:(C.H.G., 2018).....	18
Figura 13: Calicata realizada durante la campaña de ensayos previos a la ejecución del cuerpo de la presa. (Fernando Aranda Gutiérrez, 2015).....	19
Figura 14: Corte transversal del terreno de la cimentación. Fuente: (C.H.G., 2006).....	21
Figura 15: Detalle del perfil geológico-geotécnico de la cimentación. Fuente: (C.H.G., 2006).....	21
Figura 16: Vista exterior de los desagües de fondo con válvulas de chorro hueco cónico (Howell-Bunger) y salida de caudal ecológico.....	22
Figura 17: Vista en el interior de la galería de los desagües de fondo (tubos inferiores) y toma de abastecimiento (tubo superior).	23

Figura 18: Vista del aliviadero desde la coronación de la presa.	23
Figura 19: Inicio del aliviadero vista aguas abajo.	23
Figura 20: Localización de los elementos de control en la presa. Fuente:(Fernando Aranda Gutiérrez, 2015).....	24
Figura 21: Células de presión total y piezómetro durante su instalación en obra. Fuente:(Fernando Aranda Gutiérrez, 2015)	25
Figura 22: Extensómetros de cadena durante su instalación en obra. Fuente:(Fernando Aranda Gutiérrez, 2015).....	25
Figura 23: Localización de los elementos de control y nivelación en el cuerpo de la presa.(Fernando Aranda Gutiérrez, 2015)	26
Figura 24: Esquema de comunicaciones de la presa con los distintos organismos responsables de C.H.G., Gobierno y Protección Civil. Fuente:(Fernando Aranda Gutiérrez, 2015).....	27
Figura 25: Acciones sobre las rebanadas en los métodos de equilibrio limite. Fuente:(Universidad de Extremadura, 2019).....	29
Figura 26: Factor de corrección f_0 del método de Janbu. Fuente: (Universidad de Extremadura, 2019)	30
Figura 27: Modelo de la sección tipo inicialmente proyectada.....	33
Figura 28: Modelo de la sección tipo construida.....	33
Figura 29: Red de flujo con el embalse en N.M.N.....	39
Figura 30: Red de flujo con el embalse en N.A.P.	39
Figura 31: Red de flujo con el embalse en N.A.E.....	40
Figura 32: Análisis de sensibilidad aguas abajo, método de Bishop Simplificado	47
Figura 33: Análisis de sensibilidad aguas abajo, método de Janbu.....	47
Figura 34: Análisis de sensibilidad aguas abajo, método de Spencer	48
Figura 35: Red de flujo con el embalse en N.M.N.....	49
Figura 36: Red de flujo con el embalse en N.A.P.	49
Figura 37: Red de flujo con el embalse en N.A.E.....	50

Figura 38: Análisis de sensibilidad aguas abajo, método de Bishop Simplificado	56
Figura 39: Análisis de sensibilidad aguas abajo, método de Janbu.....	56
Figura 40: Sensibilidad aguas abajo, método de Spencer	57
Figura 41: FS aguas arriba con el embalse vacío, método Grid Search	64
Figura 42: FS aguas arriba con embalse vacío, método Auto Refine Search.....	64
Figura 43: FS aguas abajo con el embalse vacío, Grid Search.....	65
Figura 44: FS aguas abajo con el embalse vacío, Auto Refine Search	65
Figura 45: FS aguas arriba con el embalse vacío, método de Cuckoo.....	66
Figura 46: FS aguas arriba con el embalse vacío, método Particle Swarm Search.....	66
Figura 47: FS aguas abajo con el embalse vacío, método de Cuckoo.....	67
Figura 48: FS aguas abajo con el embalse vacío, método Particle Swarm Search.....	67
Figura 49: FS aguas abajo, método Grid Search.	68
Figura 50: FS aguas abajo, método Auto Refine Search.....	68
Figura 51: FS aguas abajo, método de Cuckoo	69
Figura 52: FS aguas abajo, método de Particle Swarm Search.	69
Figura 53: FS Aguas arriba, método de Grid Search.....	70
Figura 54: FS Aguas arriba, método de Auto Refine Search.	70
Figura 55: FS Aguas arriba, método de Cuckoo Search.	71
Figura 56: FS Aguas arriba, método Particle Swarm Search.	71
Figura 57: FS Aguas abajo, método Grid Search.	72
Figura 58: FS Aguas abajo, método de Auto Refine Search.....	72
Figura 59: FS Aguas abajo, método de Cuckoo Search.	73
Figura 60: FS Aguas abajo, método de Particle Swarm Search.	73
Figura 61: FS Aguas abajo, método de Grid Search.	74
Figura 62: FS Aguas abajo, método se Auto Refine Search.	74
Figura 63: FS Aguas abajo, método de Cuckoo Search.	75

Figura 64: FS Aguas abajo, método de Particle Swarm Search.	75
Figura 65: FS aguas arriba, método Grid Search.....	76
Figura 66: FS aguas arriba, método Auto Refine Search.	76
Figura 67: FS aguas arriba, método Cuckoo	77
Figura 68: FS aguas arriba, método Particle Swarm Search.	77
Figura 69: FS aguas abajo, método Grid Search.	78
Figura 70: FS aguas abajo, método Auto Refine Search.....	78
Figura 71: FS aguas abajo, método de Cuckoo.	79
Figura 72: FS aguas abajo, método Particle Swarm Search.....	79
Figura 73:FS aguas abajo, método Grid Search.	80
Figura 74: FS aguas abajo, método Auto Refine Search.....	80
Figura 75: FS aguas abajo, método de Cuckoo Search.	81
Figura 76: FS aguas abajo, método Particles Swarm Search.	81
Figura 77: FS aguas arriba, método Grid Search.....	82
Figura 78: FS Aguas arriba, método Auto Refine Search.	82
Figura 79: FS Aguas arriba, método de Cuckoo Search.	83
Figura 80: FS Aguas arriba, método de Particles Swarm Search.....	83
Figura 81: FS aguas arriba, método Grid Search.....	84
Figura 82: FS aguas arriba, método Auto Refine Search	85
Figura 83: FS aguas abajo, Grid Search	85
Figura 84: FS aguas abajo, método de Auto Refine Search.....	86
Figura 85: FS aguas arriba, método de Cuckoo Search.....	86
Figura 86: FS aguas arriba, método de Particles Swarm Search.....	87
Figura 87: FS aguas abajo, método de Cuckoo Search	87
Figura 88: FS aguas abajo, método Particles Swarm Search.	88
Figura 89: FS aguas abajo, método Grid Search.	88

Figura 90: FS aguas abajo, método de Auto Refine Search.	89
Figura 91: FS aguas abajo, método de Cuckoo Search.	89
Figura 92: FS aguas abajo, método de Particles Swarm Search.....	90
Figura 93: FS aguas arriba, método de Grid Search.....	90
Figura 94: FS aguas arriba, método Auto Refine Search.	91
Figura 95: FS aguas arriba, método de Cuckoo Search.....	91
Figura 96: FS aguas arriba, método de Particles Swarm Search.	92
Figura 97: FS aguas abajo, método de Grid Search.	92
Figura 98: FS aguas abajo, método de Auto Refine Search.	93
Figura 99: FS aguas abajo, método de Cuckoo Search.	93
Figura 100: FS aguas abajo, método de Particle Swarm Search.	94
Figura 101: FS Aguas arriba, método de Grid Search.....	94
Figura 102: FS Aguas arriba, método de Auto Refine Search.	95
Figura 103: FS Aguas arriba, método de Cuckoo Search.	95
Figura 104: FS Aguas arriba, método de Particle Swarm Search.	96
Figura 105: FS Aguas abajo, método de Grid Search.	96
Figura 106: FS Aguas abajo, método de Auto Refine Search.	97
Figura 107: FS Aguas abajo, método de Cuckoo Search.	97
Figura 108: FS Aguas abajo, método de Particle Swarm Search.	98
Figura 109: FS Aguas abajo, método de Grid Search.	98
Figura 110: FS Aguas abajo, método de Auto Refine Search.	99
Figura 111: FS Aguas abajo, método de Cuckoo Search.	99
Figura 112: FS Aguas abajo, método de Particle Swarm Search.	100
Figura 113: FS aguas abajo, método de Grid Search.	100
Figura 114: FS aguas abajo, método Auto Refine Search.....	101
Figura 115: FS aguas abajo, método de Cuckoo Search.	101

Figura 116: FS aguas abajo, método de Particles Swarm Search.....	102
Figura 117: FS Aguas arriba, método Grid Search.	102
Figura 118: FS Aguas arriba, método Auto Refine Search.	103
Figura 119: FS Aguas arriba, método de Cuckoo Search.	103
Figura 120: FS Aguas arriba, método Particles Swarm Search.....	104

ACRÓNIMOS

C.H.G.: Confederación Hidrográfica del Guadiana

CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

D.I.A.: Declaración de Impacto Ambiental

E.L.S.: Estado Límite de Servicio

E.L.U.: Estado Límite Último

F.S.: Factor de seguridad

G.P.R.S.: General Packet Radio Service

G.S.M.: Global System for Mobile

m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar

N.A.E.: Nivel de Avenida Extrema

N.A.P.: Nivel de Avenida de Proyecto

N.M.N.: Nivel Máximo Normal

S.A.I.H.: Sistema Automático de Información Hidrológica

S.C.: Superficie de rotura circular

S.N.C.: Superficie de rotura no circular

RESUMEN

Las graves consecuencias, tanto económicas como humanas, que puede llegar a suponer la rotura de una presa para la población, hace de especial importancia el desarrollo de los correspondientes estudios de estabilidad. El objeto principal de este estudio es realizar un análisis comparativo de la influencia de diferentes factores sobre la estabilidad de los taludes, tanto de aguas arriba como de aguas abajo, de la presa de Villalba de los Barros (Badajoz). Se analizarán dos secciones transversales de la presa, la sección proyectada inicialmente y la sección ejecutada finalmente. En cuanto a la estabilidad se analizarán las diferentes situaciones marcadas por la "Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de grandes presas" combinadas con distintos niveles de llenado del embalse y condiciones de desembalse del mismo. Además de los factores de seguridad (FS) obtenidos para la estabilidad de los correspondientes taludes en los distintos casos identificados, se han calculado y analizado también las correspondientes redes de flujo y se ha realizado un análisis de sensibilidad sobre el FS de los distintos parámetros geotécnicos de los materiales que conforman la presa. Para los cálculos de estabilidad se han empleado tres métodos de cálculo de Equilibrio Límite (Bishop Simplificado, Janbu Corregido y Spencer), así como dos métodos de búsqueda de superficies de rotura pésima de tipo circular (Grid Search y Auto Refine Search) y dos métodos de superficies no circulares (Cuckoo Search, Particle Swarm Search). Todos los cálculos se han realizado a través del programa comercial "Slide 2D" de la casa Rocscience. Por último, se recogen las principales conclusiones obtenidas de los análisis desarrollados.

ABSTRACT

The severe economic and human consequences of breaking a dam for the population make the development of the corresponding stability studies of great importance. The main objective of this study is to carry out a comparative analysis of the influence of different factors on the stability of the slopes, both upstream and downstream, for the Dam of Villalba de los Barros (Badajoz). Two cross sections of the dam will be analysed, the initial design section and the final built section. Regarding to stability, the scenarios established by the "Instruction for the Project, Construction and Exploitation of large dams" (Spain) combined with different levels of filling and discharging of the reservoir will be analysed. In addition to safety factors (SF) obtained from the stability analysis of the slopes for the different cases identified, the corresponding seepage flow nets have also been calculated and studied. Moreover, a sensitivity analysis on SF of different geotechnical properties of each material of the dam has been developed. Three Limit Equilibrium Methods (Bishop Simplified, Janbu Corrected and Spencer) have been used for stability calculations, as well as two methods to search critical circular failure surfaces (Grid Search and Auto Refine Search) and two methods for non-circular surfaces (Cuckoo Search, Particle Swarm Search). All computations have been made through "Slide 2D", a commercial software from Rocscience. Finally, the main conclusions drawn from the analyses are included.

1. INTRODUCCIÓN

La presa de Villalba de los Barros, mostrada en Figura 1, se sitúa en la provincia de Badajoz. Es una presa de tipología de materiales sueltos zonificada, de categoría A. Esta clasificación corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, o producir daños materiales o medioambientales muy importantes, según la norma técnica de seguridad para la clasificación de presas y para la elaboración e implantación de los planes de emergencia de presas y embalses. (Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, 1996)



Figura 1: Vista aérea de la presa. Fuente: (Rivera, 2014)

La seguridad de las presas se tiene que abordar en todas las fases, desde el proyecto hasta el final de su vida útil. Es en la fase de proyecto donde el cálculo de la estabilidad de los taludes es de vital importancia realizarlos correctamente, ya que afectan al diseño y a la posterior construcción.

El documento presenta la siguiente estructura:

- Primero se hará una breve introducción, en la que se explicará el por qué se realiza dicho trabajo, la situación geográfica de la presa, la razón de su construcción y la legislación que le fue aplicada.
- El segundo apartado explica los objetivos propuestos para la realización del trabajo.
- El tercer apartado trata las características técnicas de la presa.

- En el cuarto apartado se explica la metodología aplicada para la realización del trabajo y cómo se ha realizado.
- El quinto apartado se expone el análisis estructural realizado a la presa.
- En el sexto apartado se analizan los resultados obtenidos en el apartado anterior.
- En el séptimo y último apartado se exponen las conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados.

1.1. MOTIVACIÓN

Dentro de la gran variedad de construcciones de infraestructuras para el desarrollo de la calidad de vida de la sociedad que abarca la ingeniería civil, las presas en general y las de materiales sueltos en particular, son unas de las obras más completas que puede haber, debido principalmente a la variedad de materiales con las que son construidas. Las presas son fundamentales para garantizar el riego y el abastecimiento a la población en cualquier país. La rotura de las presas supone grandes pérdidas tanto económicas como humanas si no presentan un diseño, construcción y plan de seguridad adecuados.

Debido al gran interés personal sobre seguridad de presas y embalses, la presa seleccionada para la realización de este trabajo fin de grado ha sido la de Villalba de los Barros (Badajoz). También, se ha elegido esta presa por su relativa reciente construcción, pues la mayoría de las presas de Extremadura que están actualmente en explotación se construyeron en el siglo pasado.

1.2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

La presa de Villalba de los Barros se construyó sobre el río Guadajira, afluente del río Guadiana por su margen izquierda que nace en las sierras de Feria, con una longitud de 73,54 km. El embalse se encuentra en la provincia de Badajoz, dentro de la comunidad autónoma de Extremadura. La región se caracteriza además por tener varios de los embalses más grandes de España. En la Figura 2 se muestra la localización en el mapa de la península ibérica.



Figura 2: Ubicación de la presa a nivel nacional. Fuente (Google Maps, 2019)

La presa se sitúa geográficamente en la zona centro-oeste de la provincia de Badajoz, una vez que el río alcanza la llanura de los barros a tres kilómetros en dirección sur del núcleo de Villalba de los Barros, en la denominada "Tierra de Barros", siendo una de las comarcas más fértiles de Extremadura. Se caracteriza por el suelo arcilloso en general, y donde la principal actividad económica es la agricultura de secano, destacando las viñas y los olivos. Recientemente se ha aprobado por parte de la Junta de Extremadura el proyecto de la zona regable de Tierra de Barros (Junta de Extremadura, 2017), que consiste en la definición, justificación y valoración de las obras necesarias para dotar de un riego de apoyo, con el recurso hídrico superficial disponible, a una superficie regable de 14.994,14 hectáreas, lo cual supondrá un impulso para la economía de la comarca, de la cual, para su desarrollo, la presa de Villalba de los Barros tiene una importancia significativa.

El embalse ocupa los términos municipales de Feria, Fuente del Maestre, y Villalba de los Barros de cuya población recibe la presa el nombre. En la Figura 3, se destaca la localización de la presa entre los términos municipales citados anteriormente. El embalse creado por la presa se sitúa entre la carretera comarcal BA-155 y la carretera regional EX-361. Ambas carreteras pasan por la localidad de Villalba de los Barros.



Figura 3: Ubicación de la presa a nivel comarcal. En rojo se rodea el embalse. Fuente:(Google Maps, 2019)

En la Figura 4 se destaca el camino de acceso a la presa, que nace en la carretera comarcal BA-155, ya que es en este sentido en el que se llega al edificio de explotación de la presa. La coronación de la presa se encuentra habitualmente cerrada al tráfico, aunque se puede abrir a la circulación y el camino (cuya titularidad es de la Confederación Hidrográfica del Guadiana) uniría la carretera BA-155 y la EX-361.

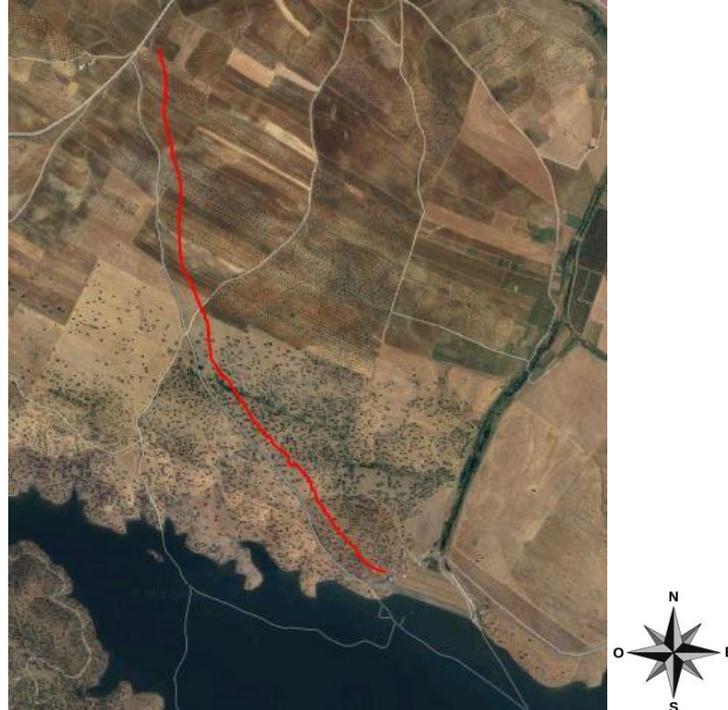


Figura 4: En rojo se muestra el camino de acceso a la presa desde BA-155. Fuente:(Google Maps, 2019)

1.3. REGULACIÓN HISTÓRICA DE LA CUENCA DEL RÍO GUADAJIRA

La regulación de la cuenca del río Guadajira, afluente del Guadiana por la margen izquierda, se comenzó a realizar mediante la construcción del embalse de La Albuera del Castellar, cuya construcción se estima que fue en el siglo XVI. La Figura 5 corresponde a la presa de la Albuera del Castellar, actualmente sumergida por el embalse de Zafra.



Figura 5: Presa de la Albuera del Castellar, siglo XVI. Fuente: (Fernando Aranda Gutierrez J. S., 2010)
Posteriormente, a mediados del siglo XVIII se construye la presa de la Albuera de Feria la cual se muestra en la Figura 6.

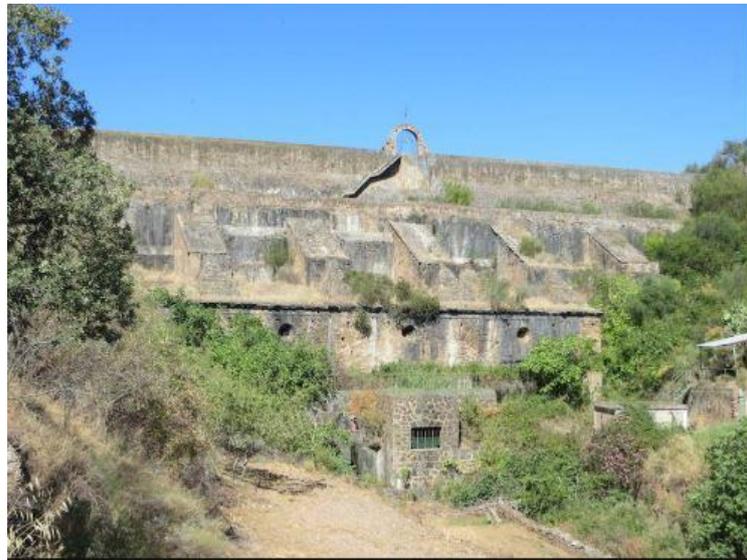


Figura 6: Presa de la Albuera de Feria, siglo XVIII. Fuente: (E.P., 2018)

En el siglo XX se construye la presa de Zafra (cuyo embalse sumerge la antigua presa de la Albuera del Castellar) y la presa de Jaime Ozores.(Fernando Aranda Gutierrez J. S., 2010). La mancomunidad de Jaime Ozores está formada por las poblaciones de Feria, Villalba de

los Barros, Aceuchal, Santa Marta y Almendralejo que suman una población en total de 45 783 habitantes que es preciso abastecer. Debido a la falta de infraestructuras adecuadas para esta población surge la necesidad de un mejor reparto de los recursos hídricos de la zona, los cuales se administran desde el embalse de Albuera de Feria y el embalse de Jaime Ozores. La mancomunidad de Jaime Ozores no puede abastecer a todas las poblaciones que la componen debido a la poca capacidad de los embalses de Albuera de Feria, con tan solo 0,9 hm³, y el embalse de Jaime Ozores con una capacidad de 1,8 hm³. (Confederación Hidrográfica del Guadiana, 2016)

Esta poca capacidad de los embalses hace que no haya cantidad suficiente de agua para abastecer a las poblaciones más grandes como son Almendralejo principalmente y Santa Marta. Cabe destacar que Almendralejo se abastece directamente del río Guadiana, no siendo la calidad de esta agua óptima debido a los nutrientes aportados por los regadíos existentes en la zona.

La presa de Villalba de los Barros, Figura 7, se ideó para solucionar este problema de abastecimiento al contar el embalse con una capacidad de 106 hm³ y mejorar notablemente la calidad del agua que se proporcionaría a la mancomunidad, especialmente a la ciudad de Almendralejo.



Figura 7: Vista del embalse desde coronación de la presa.

1.4. ANTECEDENTES Y USOS DEL EMBALSE

La presa de Villalba de los Barros, cuyo promotor es la Confederación Hidrográfica del Guadiana, se adjudicó en marzo de 2006 con un período de ejecución de 48 meses, comenzando las obras en 2008 y concluyéndose en 2010. El coste fue de 18 millones de euros. La sección de la presa construida se modificó con respecto a la diseñada

originalmente debido a que los materiales encontrados en el vaso del embalse presentaron unas características mejores que las estimadas en proyecto.

El embalse de Villalba de los Barros se construyó principalmente para subsanar las carencias de abastecimiento de agua que se producían en la mancomunidad de Jaime Ozores. A continuación, se destacan los principales usos para los que fue diseñado este embalse: abastecimiento, regadío, laminación de avenidas y usos recreativos.

1) Abastecimiento: La poca capacidad y la antigüedad que tenían los embalses anteriormente construidos, hizo de la presa de Villalba de los Barros una estructura fundamental para el abastecimiento, siendo esta su principal función. El embalse de Villalba de los Barros también abastecería a otras poblaciones fuera de la mancomunidad como son Arroyo de San Serván, Torremejía y Fuente del Maestre, y eventualmente a las poblaciones de Villafranca de los Barros, Zafra, Los Santos de Maimona, Solana de los Barros, etc. pudiendo abastecer en total a unos 100 000 habitantes, el doble de los habitantes que forman la mancomunidad para la que se construyó el embalse.

El agua se capta mediante una toma flotante (rodeada en un círculo rojo, Figura 8). De este modo la toma coge el agua que presenta mejor calidad. Dicha toma de agua actualmente no se encuentra en funcionamiento, ya que la ciudad de Almendralejo se sigue abasteciendo desde el propio río Guadiana. Esto hace que el embalse no se esté explotando íntegramente.



Figura 8: Toma flotante de abastecimiento vista desde la coronación de la presa, rodeada en color rojo

2) Regadío: Otro de los usos para la correcta explotación del embalse es el apoyo a los regadíos existentes y para el proyecto de la Junta de Extremadura de regadíos de la zona de Barros (Junta de Extremadura, 2017), denominado Barros II, con unas 3600 ha aproximadamente.

3) Laminación de avenidas: Todos los embalses, en mayor o menor medida realizan esta función que controla los excesos de caudal, evitando posibles inundaciones o avenidas en el río Guadajira aguas abajo de la presa evitando afectar a su paso a la localidad de Villalba de los Barros y otras zonas aledañas.

También se controla el caudal en el caso contrario, en las sequías. En estas épocas gracias al embalse se regula el desembalse adecuado mediante los desagües de fondo y el caudal ecológico para mantener el caudal mínimo del río Guadajira como del propio río Guadiana y así poder tener una adecuada calidad ambiental para las especies que lo habitan. También se desembalsa para que el río Guadiana presente el caudal mínimo que tiene que llevar cuando entre en Portugal, según el convenio de Albufeira, que dice que España debe garantizar un caudal mínimo al país vecino.

4) Usos recreativos: Se aprovecha también el embalse generado por la presa como espacio destinado al ocio para la población.

1.5. LEGISLACIÓN APLICABLE A LA PRESA

La **Ley de Contratos del Sector Público** ha variado a lo largo de los años. En la adjudicación de la obra, en el año 2006 estaba vigente la ley 13/2003 de 23 de Mayo siendo la aplicada a la construcción de la presa según la disposición transitoria primera de la Ley 30/2007 de 30 de Octubre. Esta ley quedó derogada con la entrada en vigor de la nueva ley 9/2017 de 18 de Noviembre, actualmente vigente.(BOE, 2017)

En materia de seguridad, hay actualmente tres borradores de normativas técnicas de seguridad (Norma Técnica 1 Clasificación, Norma Técnica 2 Proyecto y Norma Técnica 3 Explotación) que una vez aprobados constituirán en el futuro la única normativa legal en materia de seguridad de presas y embalses aplicables en España, derogando de esta forma la **Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas de 1967**, así como el **Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses de 1996**, siendo estos los que están actualmente vigentes. Estos borradores se encuentran disponibles en la página web del actual ministerio para la Transición Ecológica del

Gobierno de España(Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, 1996).

El **Plan de Emergencia** debe ser aprobado por el órgano competente de Protección Civil. Este plan de emergencia se implanta por tener la presa la clasificación de riesgo A, donde se determinan las estrategias a seguir para controlar situaciones que impliquen riesgo grave de rotura o fallo de la presa. (Secretaría de Estado de Aguas y Costas, 2001)

En materia jurídica, se protege el dominio público hidráulico aplicando el **Real Decreto Legislativo 1/2001 de 20 de Julio**, por el que se aprueba el texto refundido de la **Ley de Aguas**. (BOE, 2001).

En materia de medio ambiente, entró en vigor en 2007 la **Ley 26/2007 de 23 de Octubre de Responsabilidad Medioambiental**. (BOE, 2007).

En materia de sismicidad se aplica el coeficiente expuesto en la norma sismo-resistente **NCSE-02** (Instituto Geográfico Nacional, 2002).

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos principales de este trabajo son los siguientes:

- 1) Analizar la red de flujo desarrollada en el interior de la presa, y su influencia en los FS sobre la estabilidad de los taludes, para la sección inicialmente proyectada y la sección construida.
- 2) Estudiar y comparar los factores de seguridad (FS) de la estabilidad de los taludes de la presa en las distintas secciones consideradas, para las distintas situaciones marcadas por la Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de grandes presas (Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas , 1967).
- 3) Analizar la influencia sobre los FS de estabilidad de los taludes del empleo de diferentes métodos de cálculo de estabilidad de taludes por el método de Equilibrio Limite y de diferentes métodos de búsqueda de la superficie de rotura pésima.
- 4) Estudiar qué parámetros geotécnicos de los materiales que componen las dos secciones transversales consideradas afectan significativamente al FS.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA

A continuación, se comentarán diferentes aspectos relacionados con la presa y el embalse, tanto de características generales como relacionados con los datos necesarios para el análisis de estabilidad de taludes.

3.1. GENERALIDADES

La presa genera una capacidad del embalse con el nivel máximo normal (N.M.N.) de 106 hm³, con una aportación media anual de 35 hm³ y una superficie de cuenca de 343 km². Los asientos debido al peso propio del cuerpo de la presa que se estimaron en proyecto fueron de unos 7 cm. Para contrarrestar estos asientos durante la construcción de la presa se la dotó de una ligera contra flecha.

3.2. PLANTA, SECCIÓN TIPO Y ALZADOS

La presa tiene una altura desde cimientos de 46 m y una longitud de coronación de 484 m. En la Figura 9 se muestra la vista en planta de la presa construida.

La sección tipo inicialmente proyectada, mostrada en Figura 10, se modifica por la mejora de las características de los materiales encontrados en el vaso durante las campañas de reconocimiento, como se muestra en el apartado siguiente. Inicialmente en proyecto, el talud aguas arriba estaba formado por un único material homogéneo sin un núcleo central que impermeabilizase, haciendo el material del espaldón aguas arriba la función de impermeabilización. El talud aguas arriba, protegido de la erosión del agua mediante bloques de escollera, presenta un talud H:V de 2,5:1, tiene una berma de ancho 8 metros a la cota 303,00 m.s.n.m. y la coronación de ancho 8 metros a la cota 331,00 m.s.n.m. La ataguía (pie de presa aguas arriba) está formada por los mismos materiales que el espaldón de aguas arriba, cuya coronación de la ataguía se sitúa a la cota 303,00 m.s.n.m. El espaldón aguas abajo, tiene un talud 3:1, una berma de ancho 4 metros a la cota 314,00 m.s.n.m. y otra de 6 metros a la cota 301,00 m.s.n.m. El pie de presa aguas abajo presenta una berma de ancho 3,16 metros a la cota 294,50 m.s.n.m. El espaldón está formado por un único material homogéneo (el mismo que el espaldón aguas arriba), estando separado del espaldón aguas arriba mediante una lámina permeable que drena el agua filtrada por el espaldón aguas arriba.

En la sección tipo construida, Figura 11, se muestra la modificación de la sección producida por las mejores características de los materiales encontrados. Se añade un núcleo central impermeable quedando los espaldones aguas arriba y aguas abajo constituidos por un único material homogéneo, estando el talud aguas abajo separado del núcleo central mediante una lámina drenante que recoge el agua filtrada por el espaldón aguas arriba y el núcleo. El talud aguas arriba queda protegido de la erosión del agua mediante bloques de escollera. Tanto los taludes, como los anchos de las bermas, pies de presas y sus cotas correspondientes no presentan modificaciones con respecto a la sección tipo inicialmente proyectada.

Las vistas en alzado de la presa construida, tanto aguas arriba como aguas abajo, se muestra en la Figura 12.

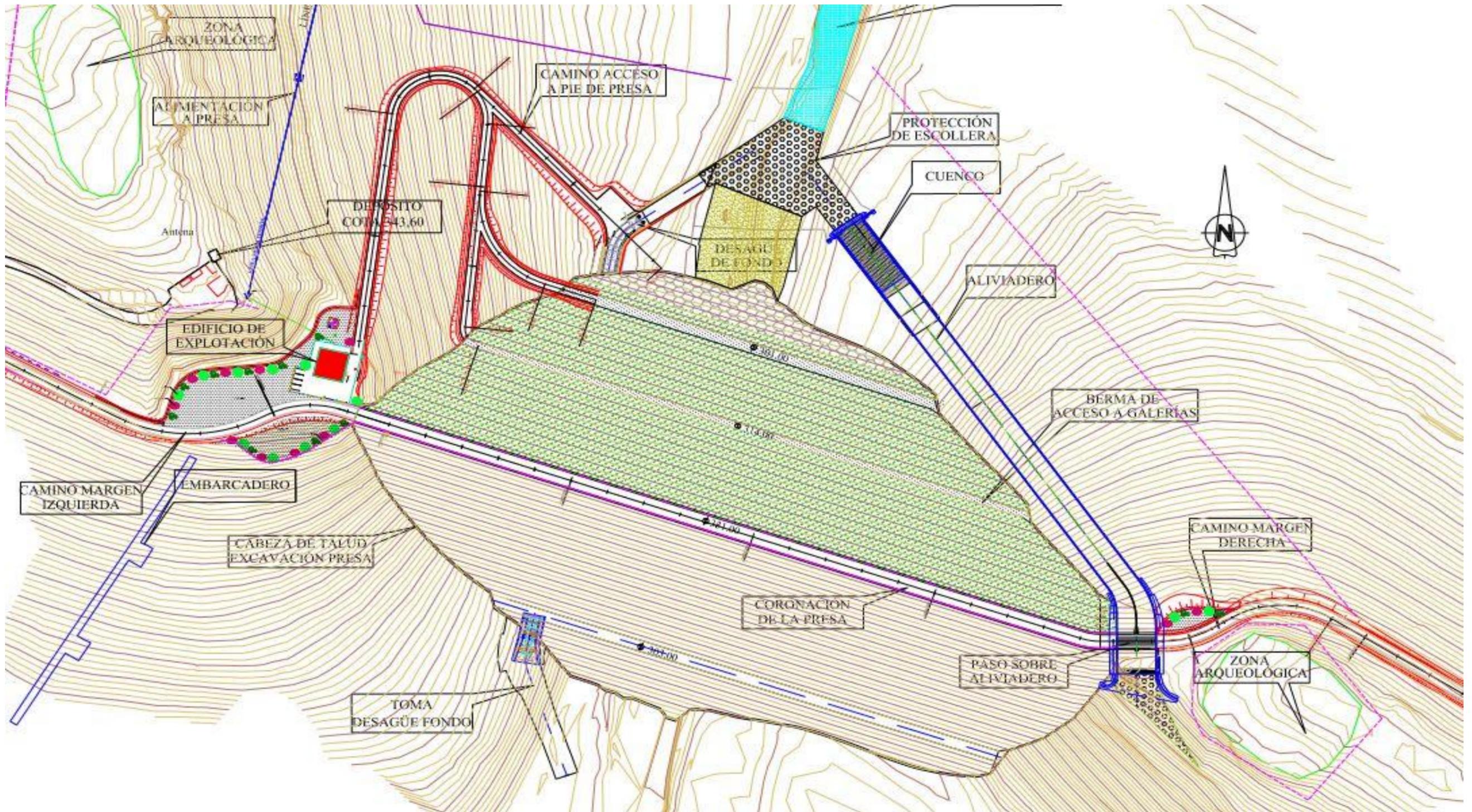


Figura 9: Vista en planta de la presa. Fuente:(C.H.G., 2018)

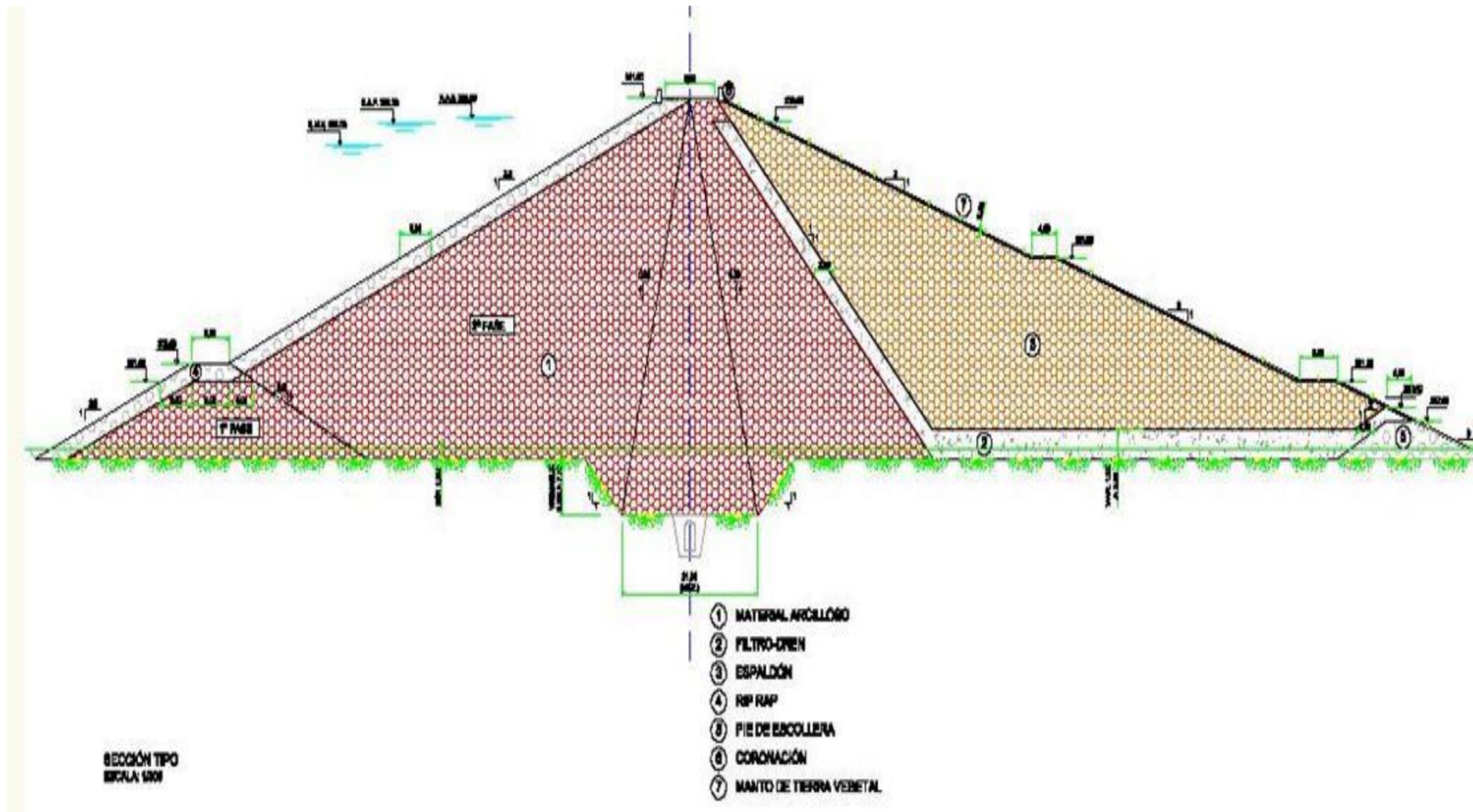


Figura 10: Sección tipo de la presa proyectada inicialmente. Fuente: (C.H.G., 2018)

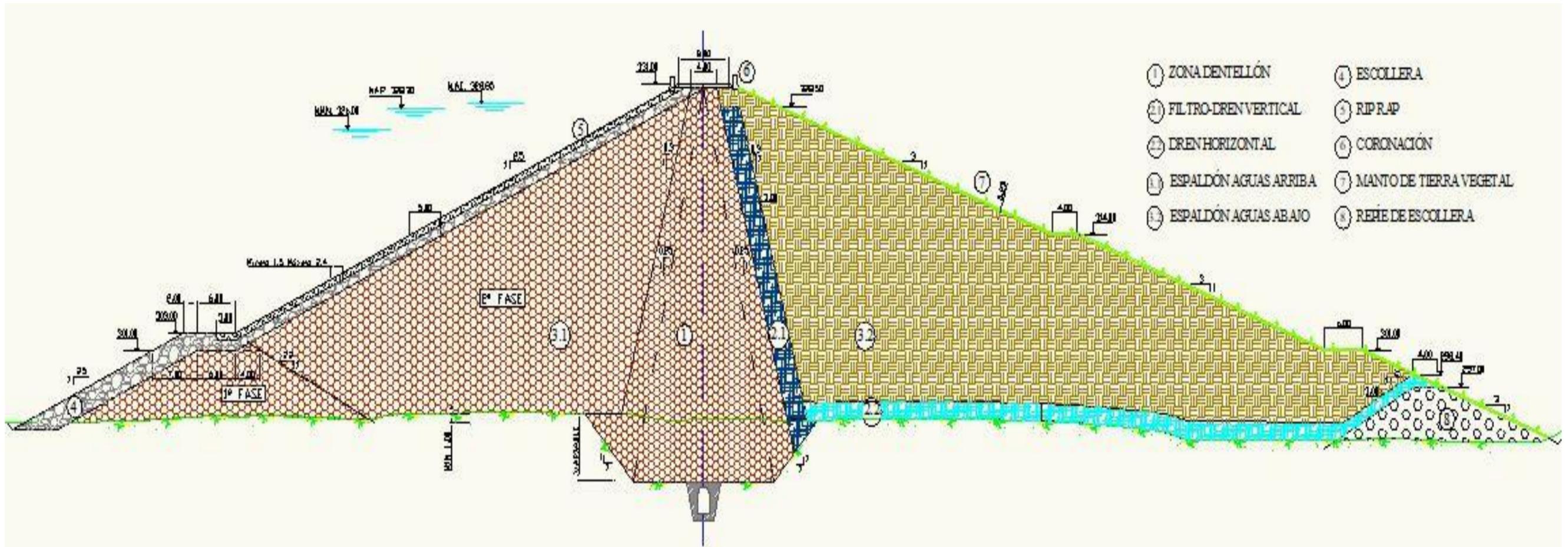
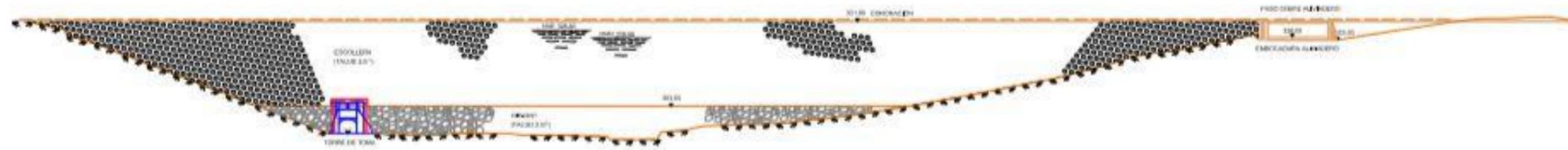
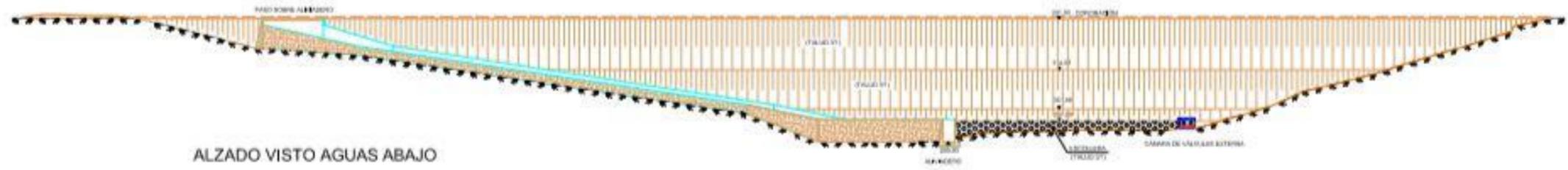


Figura 11: Sección tipo de la presa construida con el núcleo impermeable en la parte central. Fuente: (C.H.G., 2018)



ALZADO VISTO AGUAS ARRIBA



ALZADO VISTO AGUAS ABAJO

Figura 12: Vistas en alzado de la presa construida, aguas arriba(superior) y aguas abajo(inferior). Fuente:(C.H.G., 2018)

3.3. MARCO GEOLÓGICO Y MATERIALES DEL EMBALSE

La zona en la que se encuentra la presa queda situada entre las hojas 828 y 829 del Mapa Geológico Nacional (MAGNA 50) escala 1:50 000 (Instituto y Geológico y Minero de España, 1975) . Antes de contar con estudios más específicos en esta zona, se asumió que el vaso del embalse estaba formado en su totalidad por suelos coluvio-eluviales, aluviales de terraza y pizarras alteradas, válidos para construir todo el espaldón de la presa. Según la D.I.A., los materiales para la construcción de la presa debían proceder del vaso del embalse. Debido a esto se realizaron diversos estudios geotécnicos en el vaso para confirmar que eran adecuados para la construcción de la presa. En la Figura 13 se muestra una calicata realizada durante la campaña de ensayos una vez iniciadas las obras.



Figura 13: Calicata realizada durante la campaña de ensayos previos a la ejecución del cuerpo de la presa. (Fernando Aranda Gutiérrez, 2015)

Las conclusiones de los estudios geotécnicos mostraron que los materiales del vaso del embalse presentaban mejores características geotécnicas que las exigidas en proyecto, por lo que se modificó la sección transversal de la presa propuesta inicialmente. Esta modificación se realizó atendiendo a la permeabilidad observada en los materiales, quedando los de menor permeabilidad para la zona central (núcleo) de la presa y los materiales con permeabilidad superior entre la zona central y la escollera colocada en el talud de la presa. En las Tabla 1 y Tabla 2 se muestran las características exigidas a los materiales y las características de los materiales encontrados en el vaso del embalse. Como

se puede observar, los materiales seleccionados del vaso del embalse superan ampliamente las características mínimas exigidas en el proyecto.

Tabla 1: Características mínimas exigidas a los materiales en proyecto inicialmente. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Guadiana, 2016)

Tamaño máximo	125 mm
Índice de Plasticidad	>10
Ángulo de rozamiento	>30°
Cohesión	10 kN/m²
Permeabilidad	<10⁻⁵ cm/s
Dispersivo y expansivo	No
Materia orgánica	<10 %
Sales solubles	<10 %
Compactación	100 % del Proctor Normal
Contenido en finos (pase en tamiz 0,08mm)	>10 %

Tabla 2: Características de los materiales encontrados en el vaso del embalse. Fuente:(Confederación Hidrográfica del Guadiana, 2016)

Tamaño máximo	<50 mm
Pase por tamiz 5 mm	>50-70%
Contenido en finos	>30-40% sobre total de la muestra >50% sobre la fracción tamiz 5 mm
Límite Líquido	<40
Índice de Plasticidad	<20
Permeabilidad	10⁻⁷ cm/s

En la zona de la cimentación, que se muestra en las Figura 14 y Figura 15, destacan unas capas antiguas de origen volcánico en facies blastomiloníticas de unos 5 metros de espesor y una falla de desgarre de unos 70 metros de anchura del alpino tardiorogénico, rellena de milonitas, que no afecta a la estabilidad de la presa. La presión admisible de esta zona se estimó entre 7 y 18 MPa mientras que la presa solo transmite presiones inferiores de 1 MPa. En el vaso del embalse también afloran terrenos del carbonífero, (Fernando Aranda Gutierrez J. S., 2010).

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LA PRESA DE VILLALBA DE LOS BARROS (BADAJOZ)

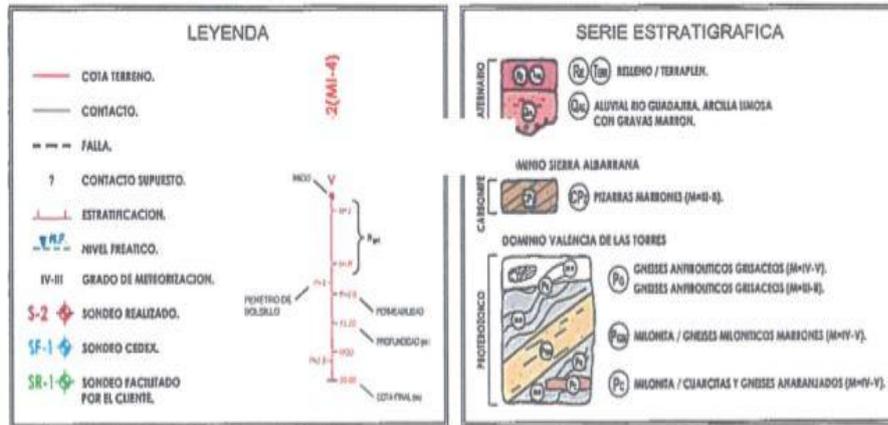
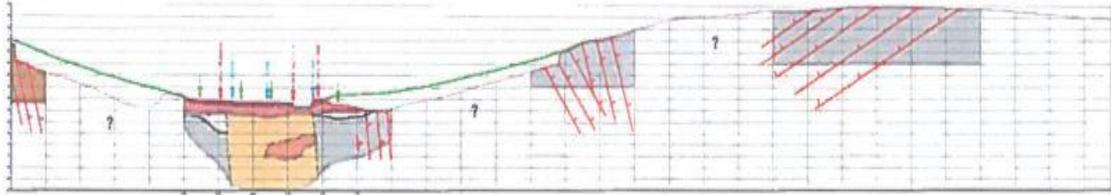


Figura 14: Corte transversal del terreno de la cimentación. Fuente: (C.H.G., 2006)

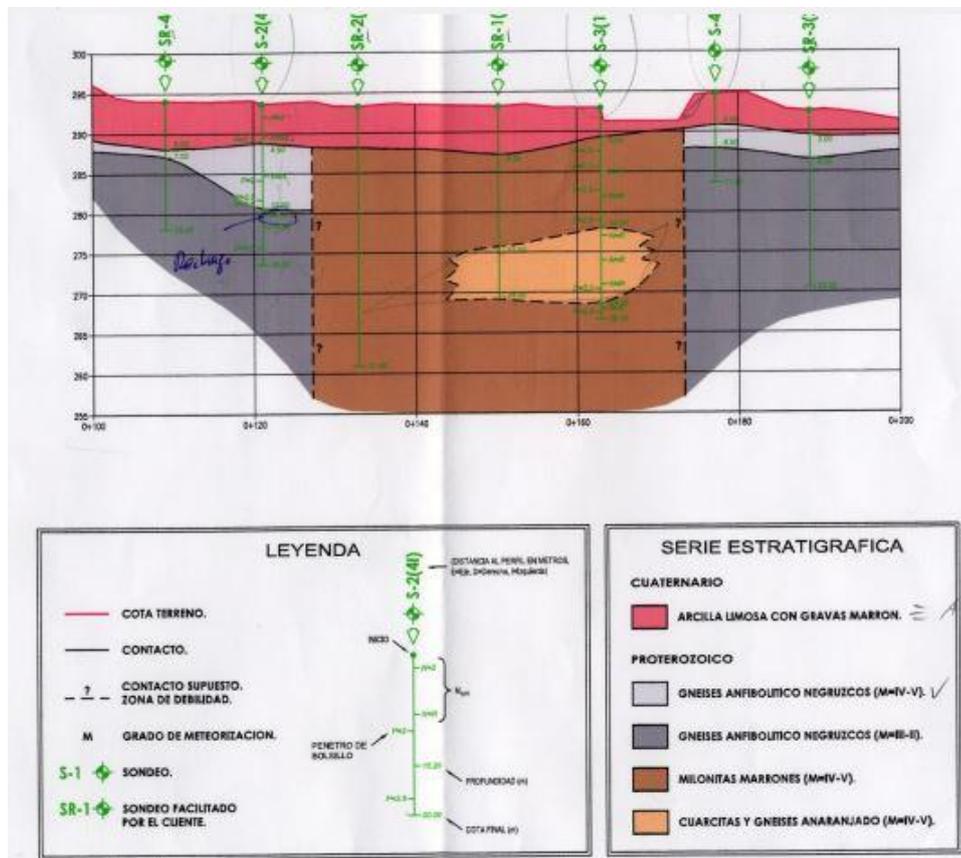


Figura 15: Detalle del perfil geológico-geotécnico de la cimentación. Fuente: (C.H.G., 2006)

3.4. ELEMENTOS DE DESAGÜE Y TOMA DE AGUA

Acorde con el artículo 20 de la Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas, y según la clasificación de riesgo A que le corresponde a esta presa, los desagües profundos de la presa están formados por dos conductos paralelos e iguales entre sí, los cuales se muestran en la Figura 16. Tienen un diámetro de 1000 mm pudiendo evacuar cada uno un caudal de $14 \text{ m}^3/\text{s}$. Están fabricados de acero inoxidable.



Figura 16: Vista exterior de los desagües de fondo con válvulas de chorro hueco cónico (Howell-Bunger) y salida de caudal ecológico.

La toma de abastecimiento, expuesta en Figura 17, está situada en la misma galería que los desagües de fondo y por encima de ellos, con un diámetro de 800 mm fabricada de acero inoxidable.



Figura 17: Vista en el interior de la galería de los desagües de fondo (tubos inferiores) y toma de abastecimiento (tubo superior).

El aliviadero de la presa es de labio fijo situado en la ladera derecha fuera del cuerpo de la presa. Está diseñado para un periodo de retorno de 1000 años, con un caudal punta de 148 m³/s. Para la comprobación de su diseño se realizaron modelos a escala reducida en la Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. En la Figura 18 y en la Figura 19 se puede observar el aliviadero de la presa.



Figura 18: Vista del aliviadero desde la coronación de la presa.



Figura 19: Inicio del aliviadero vista aguas abajo.

3.5. ELEMENTOS DE CONTROL Y AUSCULTACIÓN

La presa cuenta con diferentes instrumentos de medida, controlando en cada uno de ellos distintos parámetros para corroborar que la presa trabaja estructuralmente de manera eficaz y no presenta fallos que puedan afectar a los Estados Límites Últimos (E.L.U.) o los Estados Límites de Servicio (E.L.S.). La instrumentación se colocó en distintas zonas de la presa, según la Figura 20. Estos elementos fueron: piezómetros de cuerda vibrante, células de presión total y fibra óptica para la detección de filtraciones.

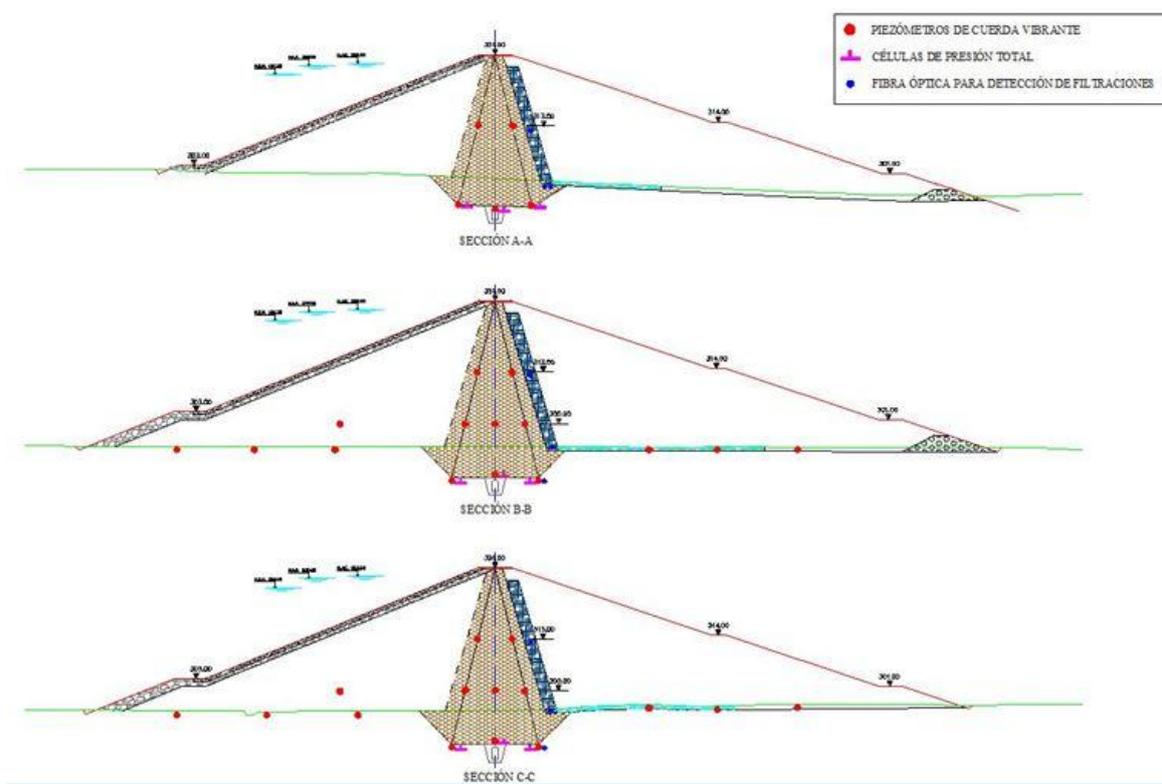


Figura 20: Localización de los elementos de control en la presa. Fuente:(Fernando Aranda Gutiérrez, 2015)

Los piezómetros de cuerda vibrante instalados en la presa permiten medir las presiones intersticiales en el terreno (Figura 21). La carga hidráulica modifica la tensión de la cuerda, que hace que vibre con una frecuencia proporcional al nivel de tensión.(Sensogeo, 2019).

Las células de presión total miden la presión que produce el peso de las tierras y el agua sobre la célula (Figura 21).

La fibra óptica mide las variaciones de temperatura que se producen en ella debido a las filtraciones de agua, que hacen que descienda su temperatura. Así se observa si hay más filtraciones de las esperadas.



Figura 21: Células de presión total y piezómetro durante su instalación en obra. Fuente:(Fernando Aranda Gutiérrez, 2015)

En la Figura 22 se muestra la instalación en obra de las bases de extensómetros de cadena, cuyo funcionamiento es el siguiente. La frecuencia que envía al aparato receptor es modificada por las variaciones de longitud debidas a los cambios de tensión en la cuerda. Estos cambios serían producidos por filtraciones u otros tipos de fallos que pudieran ocurrir.



Figura 22: Extensómetros de cadena durante su instalación en obra. Fuente:(Fernando Aranda Gutiérrez, 2015)

En la Figura 23, se muestra en planta, los distintos puntos usados para la colimación y nivelación de la presa por medio del control topográfico de la misma, las arquetas para el sistema de detección de filtraciones con fibra óptica y los extensómetros de gran base.

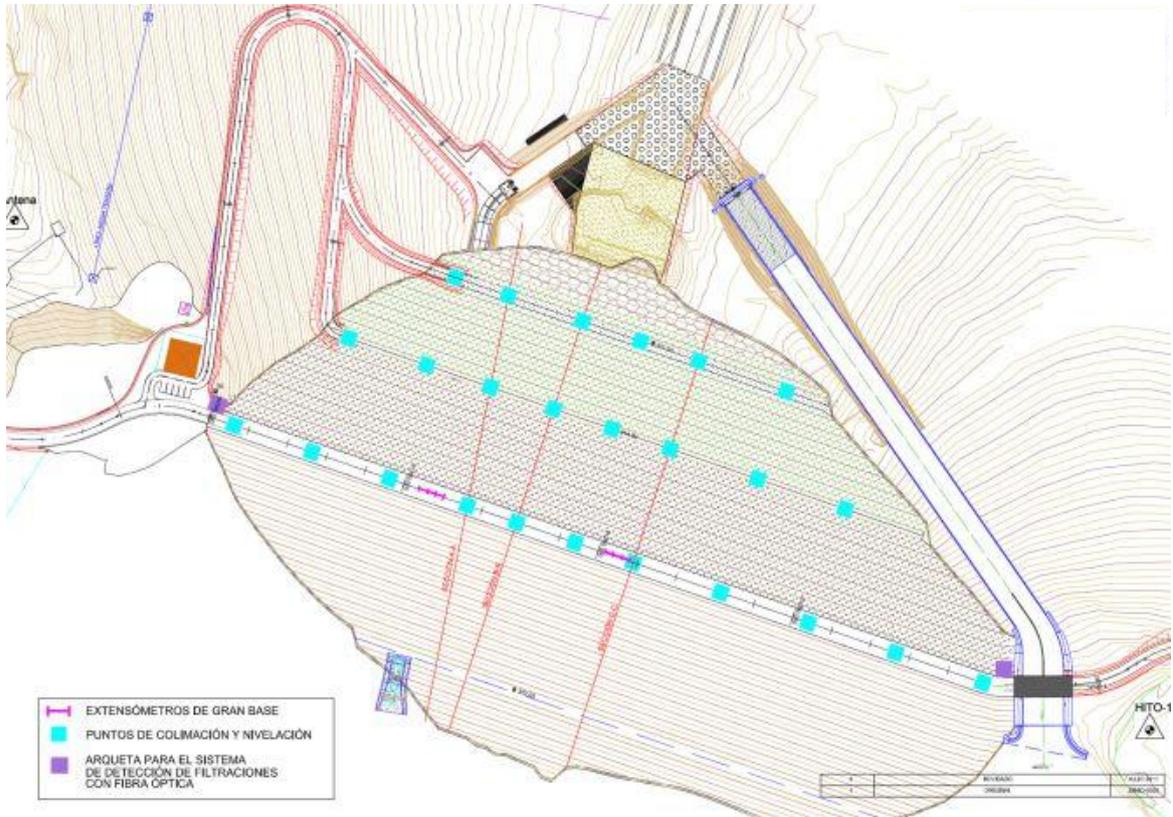


Figura 23: Localización de los elementos de control y nivelación en el cuerpo de la presa.(Fernando Aranda Gutiérrez, 2015)

La presa está integrada en la red SAIH con un sistema de comunicaciones adecuado, con sala de emergencia en el edificio de explotación y con puestos de sirena de aviso a la población, red telefónica conmutada, red de telefonía GPRS/GSM, etc., debidamente comunicados con los organismos responsables del gobierno y de protección civil, Figura 24.

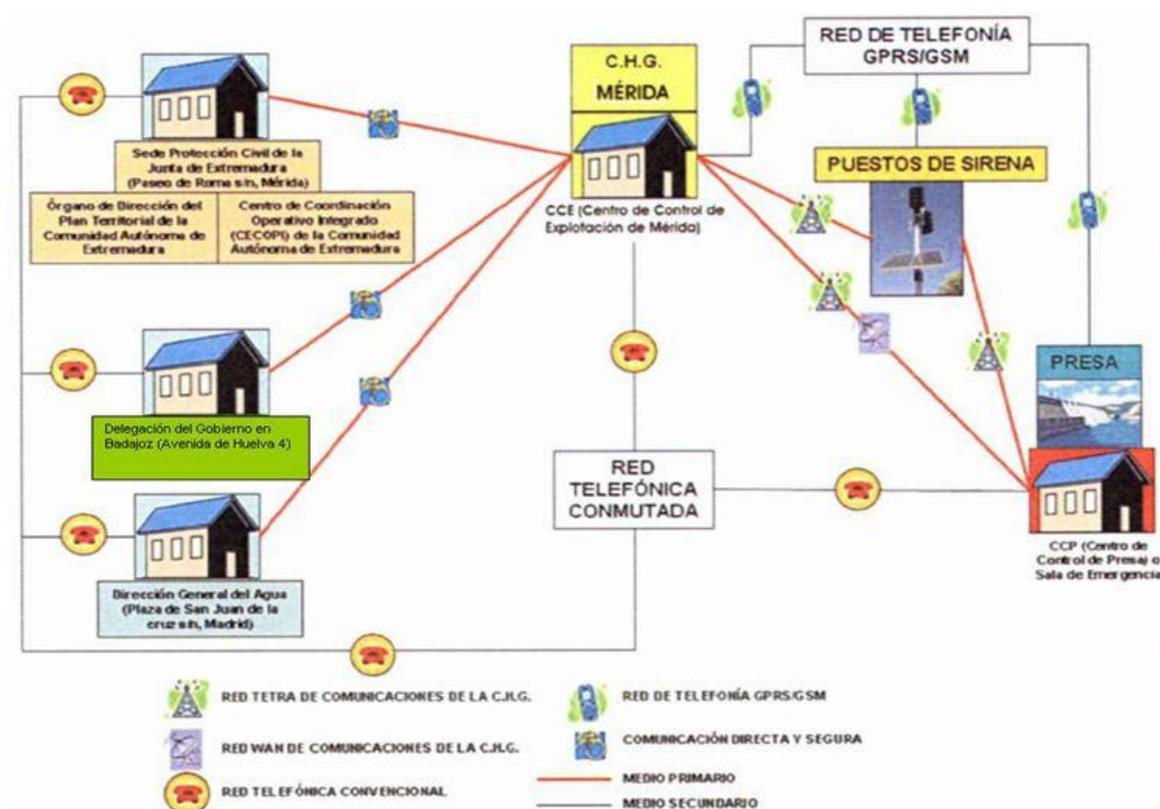


Figura 24: Esquema de comunicaciones de la presa con los distintos organismos responsables de C.H.G., Gobierno y Protección Civil. Fuente:(Fernando Aranda Gutiérrez, 2015)

4. METODOLOGÍA

Este apartado describe la metodología empleada en este trabajo. En primer lugar, se exponen los métodos de cálculo utilizados para evaluar la estabilidad de los taludes de la presa, así como los métodos de búsqueda de las superficies de rotura pésimas, y el software de cálculo usado. Seguidamente, se exponen las secciones analizadas y las situaciones de cálculo evaluadas. Finalmente, se describe el análisis de sensibilidad realizado para determinar la influencia en la variabilidad de los parámetros geotécnicos en el FS de estabilidad.

4.1. MÉTODOS DE CÁLCULO

A continuación, se exponen los métodos de equilibrio límite usados en el cálculo del factor de seguridad de los taludes, los métodos de búsqueda de la superficie pésima de deslizamiento y el software utilizado.

4.1.1. Métodos de Equilibrio Límite para el FS en taludes

Los métodos de cálculo empleados para obtener los factores de seguridad a deslizamiento de los taludes de la presa se basan en los métodos de equilibrio límite 2D implementados en el programa "Slide 2" de Rocscience (Rocscience, 2018). Estos métodos se basan en estudiar el equilibrio de una masa de tierra, comparando las tensiones de corte generadas con la resistencia disponible, quedando definida dicha masa de tierra mediante una superficie de rotura o potencial de deslizamiento. Dichas superficies de rotura o superficies potenciales de deslizamiento, de geometría y dimensiones desconocidas a priori, quedan divididas en un número determinado de rebanadas (superficies de caras verticales y paralelas separadas una cierta distancia). Junto con las fuerzas que actúan en cada rebanada se deben identificar las presiones de agua. Finalmente se realiza un equilibrio entre las fuerzas o momentos resistentes y los momentos o fuerzas que provocan el deslizamiento de la masa de tierra. El programa dispone de 10 métodos de cálculo en función de las expresiones utilizadas y de las simplificaciones realizadas entre las fuerzas interrebanadas. Estos métodos son: Método Ordinario, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Janbu Corregido, Sarma, Spencer, Cuerpo de Ingenieros 1, Cuerpo de Ingenieros 2, Lowe-Karafiath y GLE Morgenstern-Price.

Los métodos utilizados en el presente trabajo han sido los siguientes: Bishop Simplificado, Janbu Corregido y Spencer. Para todos estos métodos se han aplicado las siguientes características comunes, que permiten obtener resultados suficientemente precisos con un coste computacional reducido:

-El **número de rebanadas**: Es el número de rebanadas en las que se divide la superficie de deslizamiento estudiada, en el presente trabajo se dividen en 50 rebanadas.

-La **tolerancia**: Es la diferencia entre los factores de seguridad obtenidos entre dos interacciones sucesivas, cuando es inferior al valor de tolerancia establecido se considera que la solución ha convergido. En el presente trabajo se fija en 0,005.

-El **número máximo de interacciones**: Es el número máximo de interacciones a realizar en el análisis según el método de equilibrio límite y en cada superficie de deslizamiento estudiada. Si alcanzado este valor máximo de iteraciones no se logra la convergencia de la solución, es decir no se encuentra la solución, el programa termina el cálculo automáticamente. En el presente trabajo se establece en 100.

En la Figura 25 se muestran las acciones sobre una rebanada en las cuales se divide la masa de tierra potencialmente deslizante o superficie de deslizamiento.

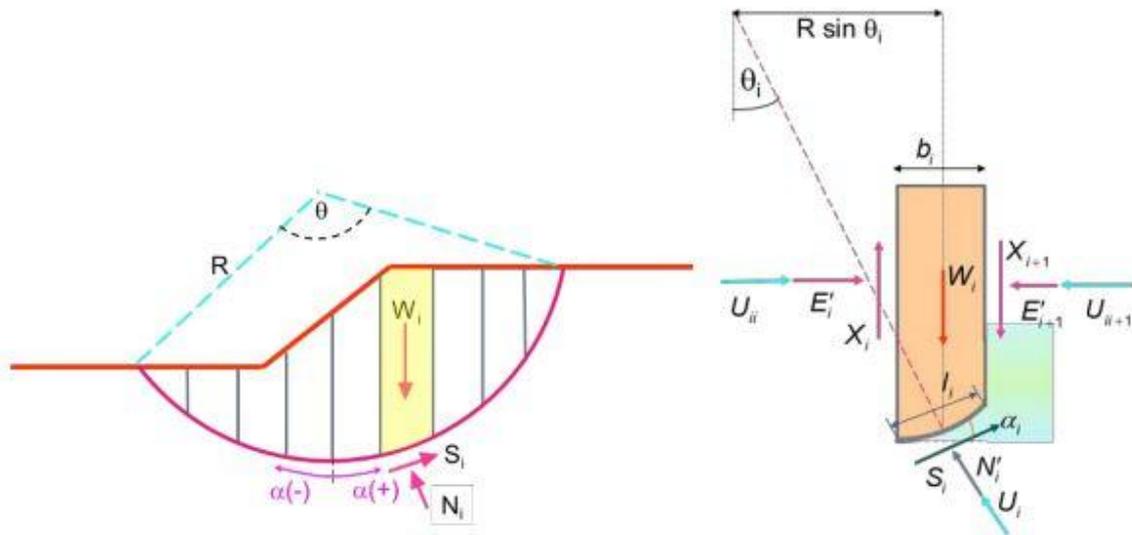


Figura 25: Acciones sobre las rebanadas en los métodos de equilibrio límite. Fuente:(Universidad de Extremadura, 2019)

En estudio de estabilidad de los paramentos de la presa y según la normativa será necesario considerar la carga sísmica. Para el cálculo con acciones sísmicas en los métodos de equilibrio límite, se añadirá a las acciones anteriores una fuerza horizontal de magnitud la masa movilizada afectada por el coeficiente sísmico horizontal y aplicada según la dirección más desfavorable de cara a la estabilidad del talud.

Los diferentes parámetros que intervienen tanto en la Figura 25 como en las siguientes expresiones se han definido como:

c' : cohesión del suelo (kN/m^2)

b : ancho de la rebanada (m)

W : peso de la rebanada (kN)

u : presión de poro (kN/m^2)

ϕ' : ángulo de rozamiento interno ($^\circ$)

α : ángulo de la base de la rebanada con la horizontal ($^\circ$)

N : Fuerza normal a la base de la rebanada

l : Longitud de la base de la rebanada

a) Método de Bishop

El método de Bishop es muy apreciado para el análisis de factor de seguridad (FS) en superficies circulares. La expresión (1) muestra la formulación básica de este método. Para la obtención del FS se realiza un equilibrio de momentos, un equilibrio de fuerzas verticales en cada rebanada y se suponen las fuerzas interrebanadas cortantes nulas.

$$FS = \frac{\sum \left(\frac{c' b + (W - ub) \tan \phi'}{m_\alpha} \right)}{\sum W \sin \alpha}; \quad m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{FS} \quad (1)$$

b) Método de Janbu Corregido

El método de Janbu corregido es muy efectivo en superficies no circulares. El factor de seguridad se obtiene de la condición de equilibrio global de las fuerzas horizontales, añadiendo un factor corrector f_0 para considerar las fuerzas de corte interrebanadas, mostrado en la Figura 26, que depende de las características del suelo y de la geometría del problema.

$$FS = f_0 \frac{\sum \left(\frac{c' b + [W - ub] \tan \phi'}{\cos \alpha \cdot m_\alpha} \right)}{\sum W \tan \alpha} \quad m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{FS} \quad (2)$$

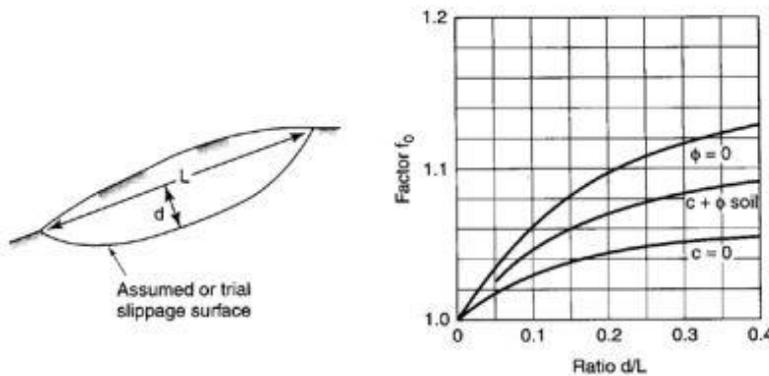


Figura 26: Factor de corrección f_0 del método de Janbu. Fuente: (Universidad de Extremadura, 2019)

c) Método de Riguroso de Spencer

El método riguroso de Spencer es aplicable a superficies tanto circulares como no circulares, teniendo presente las fuerzas interrebanadas. El factor de seguridad se obtiene

del equilibrio de fuerzas horizontales y de momentos, suponiendo que el ángulo desconocido entre las fuerzas interrebanadas es constante. Esto último es lo que lo diferencia del método de Morgenstern-Price.

$$FS = \frac{\sum c'l + (N-ul)\tan\phi}{\sum W\text{sen}\alpha} \quad (3)$$

4.1.2. Métodos de Búsqueda de la superficie de deslizamiento pésima

Para la aplicación de los métodos de equilibrio límite resulta fundamental determinar la superficie de rotura, la cual es a priori desconocida y se deben realizar diferentes tanteos. Se pueden emplear diferentes métodos de búsqueda para encontrar dicha superficie pésima, que permiten definir tanto superficies circulares como no circulares. En este trabajo se emplearán dos métodos de búsqueda tanto para superficies circulares como no circulares.

Para las superficies de deslizamientos circulares el programa “Slide 2” dispone de 3 métodos de búsqueda: Grid Search, Slope Search y Auto Refine Search. De los cuales, se emplearán en este trabajo Grid Search y Auto Refine Search. Estos métodos son elegidos debido a que su uso es muy común y familiar para la mayoría de los usuarios. En el método de búsqueda Grid Search, se define una cuadrícula o rejilla donde se localizan los centros de las superficies circulares de deslizamiento que se tantean, mientras que el método de Auto Refine Search, realiza una búsqueda iterativa limitando el área de búsqueda de la superficie pésima según los factores de seguridad más bajos.

Para las superficies de deslizamiento no circulares el programa “Slide 2” dispone de 6 métodos de búsqueda: Cuckoo Search, Simulated Annealing, Particle Swarm Search, Auto Refine Search, Block Search y Path Search. De los cuales, los métodos de búsqueda para superficies no circulares presentes en el trabajo son los siguientes: Cuckoo Search y Particle Swarm Search. Estos son elegidos principalmente por su precisión, velocidad, y facilidad de uso. El método de Cuckoo Search se basa en un algoritmo de optimización global inspirado en el comportamiento natural de la especie Cuckoo, la cual coloca sus huevos en los nidos de otras especies de aves, sin que están se enteren, de tal modo que los mejores nidos con los mejores huevos sobrevivirán y formarán la siguiente generación. Mientras que el método de Particle Swarm Search es un método computacional que optimiza el problema en base a la posición de una partícula que representa una posible solución del problema. Cada partícula trata de alcanzar mejores posiciones en el espacio de

búsqueda al cambiar su velocidad de acuerdo con las reglas inspiradas originalmente en los modelos de comportamiento de aves en bandada.

4.1.3. Software de cálculo

Todo lo expuesto en los apartados anteriores se realiza con el programa "Slide 2", (Rocscience, 2018). El programa permite realizar análisis deterministas (factor de seguridad) o probabilísticos (factor de seguridad con una probabilidad de fallo), tiene en cuenta la altura del nivel freático o de la lámina de agua en el talud afectado y también las distintas sobrecargas a las que puede verse sometido, entre otras muchas opciones que no se aplican en el presente trabajo. El programa se basa en los métodos de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes y el método de los elementos finitos para determinar la red de flujo, necesaria para obtener las subpresiones que intervendrán en el equilibrio.

El método de los elementos finitos, se basa en la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento del problema que se desea resolver, en este caso un problema de flujo. Para ello se define el dominio de cálculo y se discretiza a través de elementos o subregiones de cálculo obteniéndose una malla formada por elementos y nodos. En este trabajo se emplean elementos finitos triangulares de 3 nodos. Las ecuaciones diferenciales se resuelven para los nodos y se interpolan para cualquier otro punto del dominio, alcanzando una solución aproximada. Para la resolución numérica se deben aplicar las correspondientes condiciones de contorno. Para los criterios de convergencia (intervalos, errores etc.) se han mantenido los valores asignados por defecto por el programa.

4.2. SECCIONES ANALIZADAS

Los modelos de las secciones estudiadas se introducen en el software de cálculo y se estudiarán de acuerdo con las características de los métodos descritos en el apartado anterior. Debido a que el programa trabaja en 2D, estos modelos de secciones corresponden a la parte central de la presa. Las secciones analizadas son las siguientes:

- Sección inicialmente proyectada (Figura 27)
- Sección construida (Figura 28)

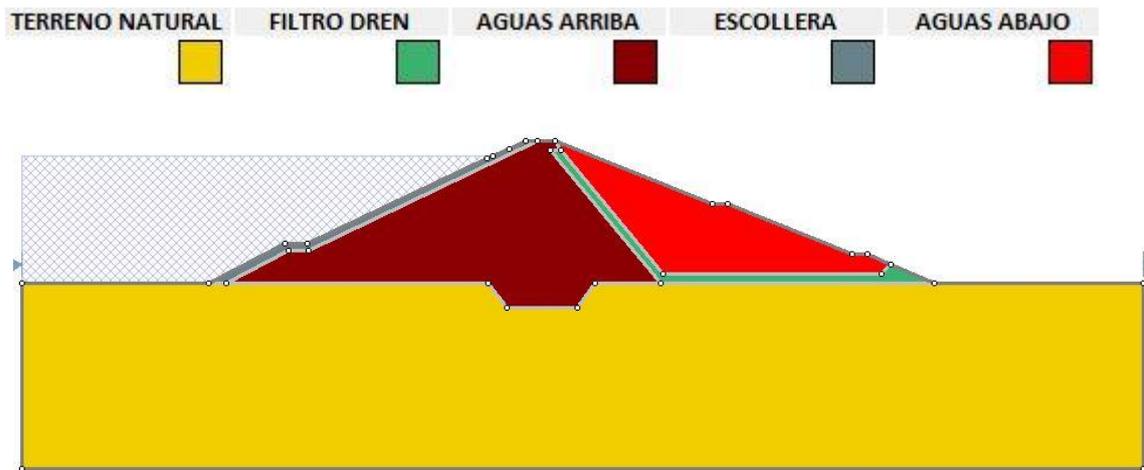


Figura 27: Modelo de la sección tipo inicialmente proyectada

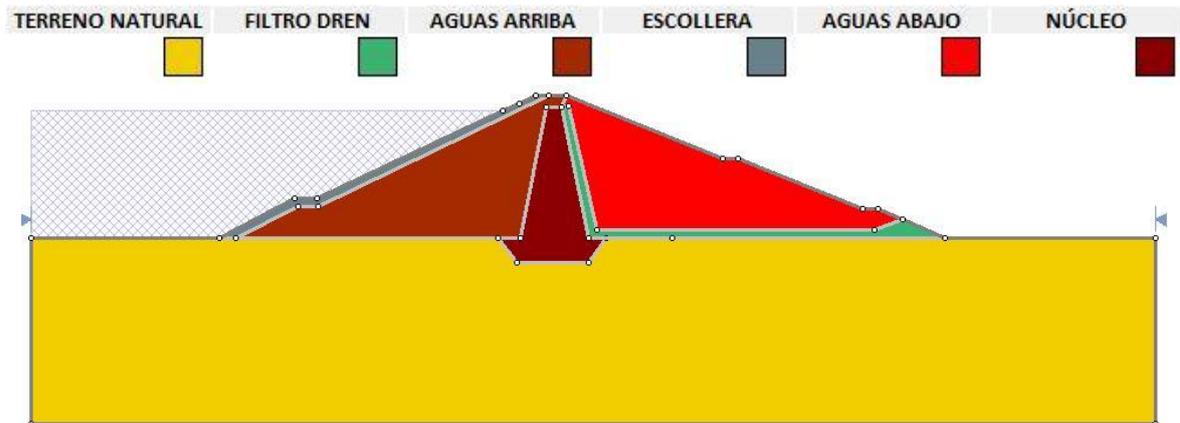


Figura 28: Modelo de la sección tipo construida

Las características geotécnicas de los materiales usados para la realización de los cálculos son los mismos en ambas secciones, con la única diferencia de la inclusión del núcleo central en la sección construida. En la Tabla 3 se muestran las características geotécnicas de los materiales obtenidos directamente del proyecto de la presa (C.H.G., 2006) . Los datos necesarios en el programa son: cohesión, peso específico, ángulo de rozamiento interno y permeabilidad.

Tabla 3: Características de los materiales usados en el cuerpo de la presa y en el cimiento. Fuente: (C.H.G., 2006)

	NÚCLEO	FILTRO DREN	ESPAJDÓN	ESCOLLERA	TERRENO NATURAL
ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO (°)	25	38	30	42	29
COHESIÓN EFECTIVA (kN/m ²)	50	0	10	0	0
PESO ESPECÍFICO (kN/m ³)	18	19	19	21	20,1
PERMEABILIDAD (m/s)	10-8	0,01	10-6	0,001	10-7

4.3. SITUACIONES DE CÁLCULO

Las situaciones estudiadas en el trabajo están referidas al Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, 1996), las cuales son las siguientes: Normales, Accidentales y Extremas.

- **Situaciones Normales:** Representan el estado de la presa en condiciones normales o habituales, debidas al peso propio, al empuje hidrostático y a las presiones intersticiales con el embalse a distintos niveles hasta el N.M.N. (Nivel Máximo Normal). Esta situación se estudia tanto con el embalse lleno como con el embalse vacío. Cuando el embalse se encuentra lleno (N.M.N.), se estudia la estabilidad del talud aguas abajo, al ser éste el más desfavorable por la red de flujo existente en el interior de la presa. Cuando el embalse se encuentra vacío, se estudia la estabilidad de ambos taludes, tanto aguas arriba como aguas abajo, debido a que no hay red de flujo que induzca a que el talud aguas abajo presente una menor estabilidad.

- **Situaciones Accidentales:** Son situaciones, de duración limitada, controlables o no. En esta situación se analizará el desembalse rápido con el embalse en N.M.N., estudiando el talud aguas arriba de la presa. Se estudia dicho talud debido a que se producirá un descenso de la resistencia producido por la desaparición del empuje del agua sobre el espaldón, siendo este el talud más desfavorable y por lo tanto con el factor de seguridad más bajo. Otro caso de estudio de la estabilidad de la presa en situación accidental es con el embalse en N.M.N. y sismo, estudiándose el talud aguas abajo por la misma razón que en la situación normal. La aceleración sísmica básica en la zona de Villalba de los Barros es $a_b=0,04g$ con un periodo de retorno de 500 años según la norma sismorresistente actual. Los siguientes casos de estudio son con el embalse vacío y sismo y en último lugar con el embalse en N.A.P. (Nivel de Avenida de Proyecto). Los taludes estudiados son los mismos

que en la situación normal con el embalse vacío y con el embalse lleno tanto en N.A.P. como en N.M.N.

- **Situaciones Extremas:** Son las situaciones producidas en la situación de avenida extrema, es decir con el embalse lleno hasta el Nivel de Avenida Extrema (N.A.E.) o las producidas por situaciones de disminuciones generalizadas y anómalas de resistencia. Con el embalse en N.A.E. se estudia el talud aguas abajo al ser el más desfavorable por la presencia de la red de flujo. También se analiza la situación de Desembalse rápido con Sismo cuando el embalse se encuentra en N.M.N. estudiándose el talud de aguas arriba, al ser el que presente un factor de seguridad más desfavorable por la acción del sismo y las presiones intersticiales presentes en el talud, como se explicó en la situación accidental. En situación extrema también se debería analizar la situación de sismo extremo y el embalse en N.M.N., considerando el sismo extremo con el doble de la aceleración básica de la zona. Sin embargo, según la Norma Técnica N° 2 de Seguridad para el Proyecto, Construcción y Puesta en Carga de grandes Presas y llenado de Embalses, no aplica introducir el cálculo de sismo extremo al presentar una aceleración sísmica muy baja. (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).

En la Tabla 4 se resumen las situaciones expuestas anteriormente y que puede presentar la presa bajo los distintos escenarios propuestos y los taludes estudiados.

Tabla 4: Resumen de situaciones de estudio de la presa. Fuente: (Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, 1996)

SITUACIÓN	TALUD ESTUDIADO	ESCENARIOS
NORMAL	-Aguas arriba y Aguas abajo	-Vacío
	-Aguas abajo	- N.M.N.
ACCIDENTAL	-Aguas arriba	-Desembalse rápido en N.M.N.
	-Aguas abajo	-N.M.N. + Sismo
	-Aguas arriba y Aguas abajo	-Vacío +Sismo
	-Aguas abajo	-N.A.P.
EXTREMA	-Aguas abajo	-N.A.E.
	-Aguas arriba	Desembalse rápido en N.M.N. + Sismo

La cota de la lámina de agua en la presa es diferente en cada situación estudiada, dicha cota es importante para el cálculo tanto de la estabilidad como de la red de flujo. Este dato se ha obtenido del propio proyecto de la presa (C.H.G., 2006). Los valores de la cota de la lámina de agua introducidos en los modelos analizados de las secciones de la presa son los que se muestran en la Tabla 5. Las cotas en la tabla se dan en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

Tabla 5: Cota de la lámina de agua en la presa para las distintas situaciones analizadas. Fuente: (C.H.G., 2006)

SITUACIONES	COTA LÁMINA DE AGUA (m.s.n.m.)
NORMALES (N.M.N.)	326,00
ACCIDENTALES (N.A.P.)	328,30
EXTREMAS (N.A.E.)	328,85

Acorde con el segundo documento (Norma Técnica 2, Proyecto) de las Normas Técnicas de Seguridad para las grandes presas y sus embalses (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018) se muestran en la Tabla 6 los factores de seguridad mínimos que tiene que presentar una presa de Categoría A.

Tabla 6: Factores de seguridad mínimos. Fuente:(Ministerio para la Transición Ecológica, 2018)

ESCENARIO	CATEGORÍA A
NORMAL	1,4
ACCIDENTAL	1,3
EXTREMA	>1,0

4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Debido a la incertidumbre en la estimación de los parámetros geotécnicos, se realizará un análisis de sensibilidad para determinar qué parámetros de cada uno de los materiales son más susceptibles de provocar cambios significativos en los factores de seguridad de los taludes. Para realizar dicho análisis de sensibilidad, la variación de los valores de las características geotécnicas de los materiales introducidos en el modelo de ambas secciones será de tres unidades en cada parámetro geotécnico por las posibles variaciones que puede presentar el material en los ensayos, excepto en la cohesión en el filtro dren, la escollera, y

en el terreno natural que se toma igual a 0 en todos los casos, debido a las características de dicho material. También se limita la variación del peso específico en el terreno natural en el valor máximo a una unidad, debido a que una variación de tres unidades es excesiva en el valor máximo. Los rangos de valores de los parámetros analizados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Variación de los parámetros geotécnicos de los materiales para el análisis de sensibilidad

MATERIAL	PROPIEDAD	VALOR MEDIO	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
TERRENO NATURAL	Peso específico (kN/m ³)	20	17	21
	Ángulo de rozamiento interno (°)	29	26	32
	Cohesión (kPa)	0		
FILTRO DREN	Peso específico (kN/m ³)	19	16	22
	Ángulo de rozamiento interno (°)	38	35	41
	Cohesión (kPa)	0		
ESPALDÓN	Peso específico (kN/m ³)	19	16	22
	Ángulo de rozamiento interno (°)	30	27	33
	Cohesión (kPa)	10	7	13
ESCOLLERA	Peso específico (kN/m ³)	21	18	24
	Ángulo de rozamiento interno (°)	42	39	45
	Cohesión (kPa)	0		
NÚCLEO	Peso específico (kN/m ³)	18	15	21
	Ángulo de rozamiento interno (°)	25	22	28
	Cohesión (kPa)	50	47	53

El análisis de sensibilidad obtenido para la sección inicialmente proyectada se calcula para el talud aguas abajo, en la situación extrema con el embalse en N.A.E. Se estudia esta situación debido a que los materiales de la presa no varían en una situación respecto a otra distinta, siendo la situación extrema la más desfavorable de las que puede presentar el nivel del embalse. Este análisis, cuyos cálculos se exponen en el Anexo 1, permite identificar las características geotécnicas de los materiales de la presa que provocan un mayor cambio en los factores de seguridad de los taludes y por lo tanto tienen mayor influencia en su estabilidad si dichas características se vieran modificadas.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se exponen y analizan los resultados obtenidos de los cálculos realizados en las dos secciones estudiadas: la sección inicialmente proyectada y la sección construida, para los métodos de cálculo y situaciones identificadas anteriormente.

Este capítulo se divide en dos apartados, uno por cada sección de la presa estudiada. En primer lugar, se presentan los resultados de la Sección Inicialmente Proyectada y a continuación los resultados para la Sección Construida. En cada una de ellas se incluyen la red de flujo, la estabilidad a través de los factores de seguridad y el análisis de sensibilidad sobre los valores asignados a los materiales, y se discuten los resultados obtenidos. En cuanto al análisis de los factores de seguridad, éstos se compararán respecto a los factores de seguridad mínimos exigidos en el segundo documento (Norma Técnica 2, Proyecto) de las Normas Técnicas de Seguridad para las grandes presas y sus embalses (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018), debido a que no se dispone de los análisis de la estabilidad de taludes de esta presa según el proyecto.

5.1 SECCIÓN INICIALMENTE PROYECTADA

5.1.1. Red de flujo

En este apartado se estudia la red de flujo que presenta la sección inicialmente proyectada con el embalse lleno en las situaciones de N.M.N., N.A.P. y N.A.E. La red de flujo de la presa en cada situación estudiada se muestra al final de dicho apartado.

El agua se filtra por el cuerpo de la presa, recorriendo todo el espaldón desde aguas arriba hasta llegar al filtro dren donde se produce un cambio brusco en el comportamiento de la red de flujo debido al cambio de permeabilidad de los materiales y se produce la evacuación del agua del interior de la presa. Debido al cuerpo homogéneo con el que se diseñó esta sección, el recorrido del agua no presenta variación de dirección por el talud aguas de arriba hasta su llegada al filtro dren. La variación del nivel del embalse, modificando la cota de la lámina de agua en la sección de la presa en las distintas situaciones estudiadas (N.M.N., N.A.P. y N.A.E.) no supone una variación en la red de flujo, tal y como se observa en las siguientes figuras.

Las diferentes franjas de colores muestran las líneas equipotenciales de energía, mostrándose en la leyenda de las imágenes la altura total de energía en metros. Las líneas azules muestran el flujo de agua por el interior de la presa.

N.M.N.

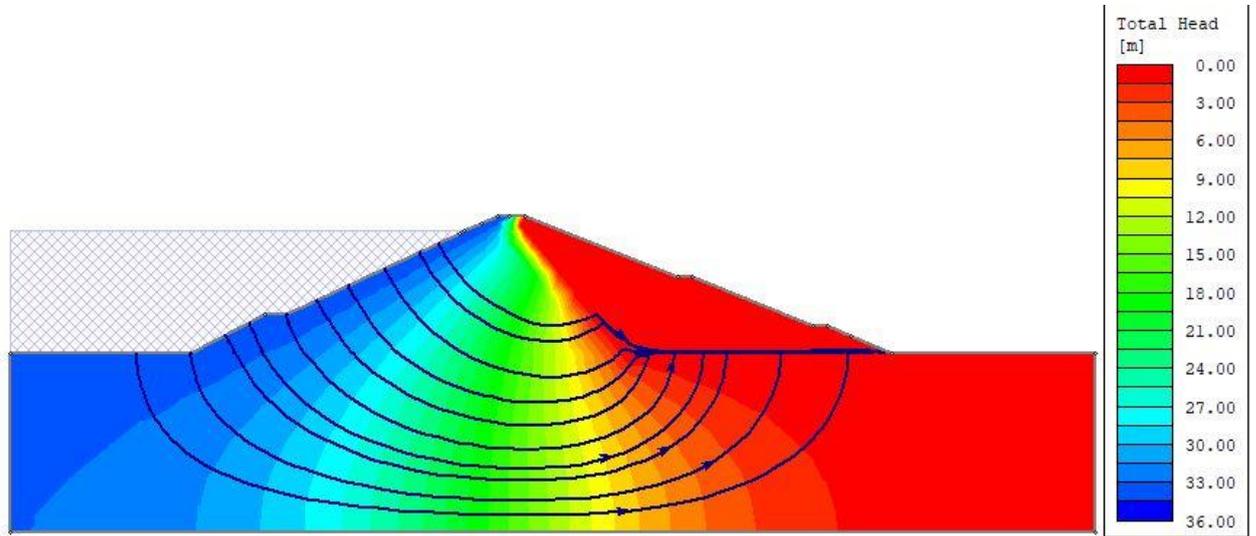


Figura 29: Red de flujo con el embalse en N.M.N.

N.A.P.

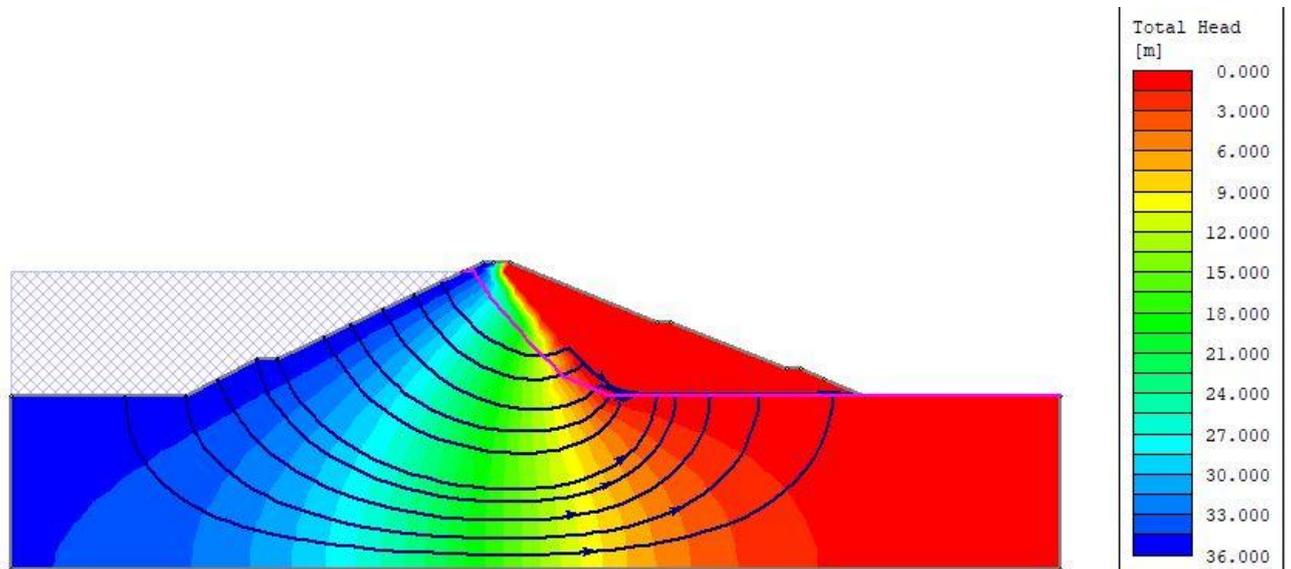


Figura 30: Red de flujo con el embalse en N.A.P.

N.A.E.

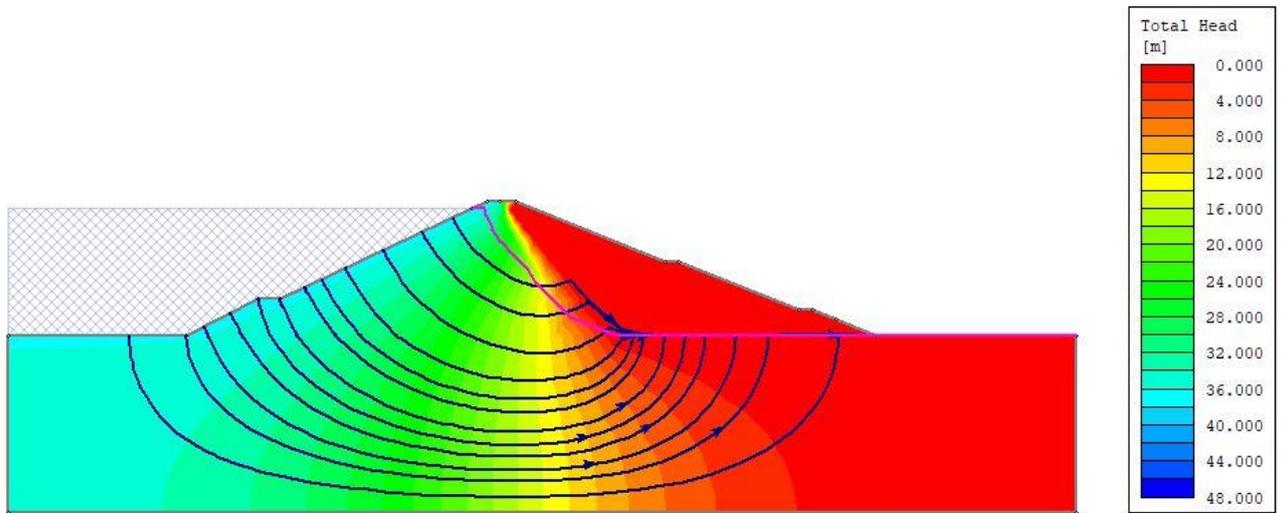


Figura 31: Red de flujo con el embalse en N.A.E.

5.1.2. Factores de seguridad de los taludes

Los resultados obtenidos de los cálculos correspondientes a la sección inicialmente proyectada para las diferentes situaciones consideradas y los distintos métodos de cálculo y búsqueda de la superficie pésimas seleccionadas, se recogen en el Anexo 1 de este documento. A modo de resumen y para facilitar el análisis y la comparación de resultados, en la Tabla 8 se exponen los resultados de los factores de seguridad calculados en la Situación Normal, en la Tabla 9 se exponen los resultados de los factores de seguridad calculados en la Situación Accidental y en la Tabla 10 se exponen los resultados de los factores de seguridad calculados en la Situación Extrema. En estas tablas se identifican con las siglas SC y SNC, los resultados correspondientes a las superficies de rotura pésimas circulares y no circulares, respectivamente.

Tabla 8: Factores de Seguridad sección inicialmente proyectada en la Situación Normal.

			FACTOR DE SEGURIDAD											
			BISHOP SIMPLIFICADO				JANBU CORREGIDO				SPENCER			
			SC		SNC		SC		SNC		SC		SNC	
			Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search
ESTADO DEL EMBALSE	VACIO	Talud Aguas arriba	1,60	1,50	1,58	1,57	1,60	1,58	1,55	1,56	1,60	1,58	1,56	1,56
		Talud Aguas abajo	1,91	1,90	1,87	1,86	1,93	1,87	1,79	1,86	1,91	1,90	1,81	1,85
	N.M.N	Talud aguas abajo	1,75	1,75	1,64	1,64	1,66	1,63	1,65	1,65	1,76	1,73	1,72	1,72

La sección inicialmente proyectada en la situación normal presenta factores de seguridad superiores al valor mínimo de 1,4 exigido para una presa de categoría A, según se recoge en la Tabla 6. En los análisis realizados para los distintos estados del embalse, el FS mínimo obtenido es de 1,50 para el caso del embalse vacío en el talud aguas arriba. El valor mínimo del FS obtenido es de 1,79 en el talud aguas abajo, también estando el embalse vacío.

Como se observa en la tabla previa, comparando los resultados obtenidos sobre el talud de aguas abajo para el embalse vacío y para N.M.N., la presencia de la red de flujo hace disminuir el FS del talud aguas abajo desde 1,79 (FS mínimo) a 1,63 (FS mínimo).

Con respecto a los métodos de cálculos utilizados en el presente trabajo (Bishop Simplificado, Janbu Corregido y Spencer), en la situación normal no hay diferencias significativas entre ellos en lo que concierne a los valores del FS obtenido en cada situación estudiada. Sin embargo, en las superficies de rotura no circulares (SNC) los

valores del FS en los tres métodos de cálculo presentan un ligero descenso con respecto a los valores obtenidos para las superficies de rotura circulares (SC).

En cuanto a la geometría de la superficie de rotura pésima de los taludes en las situaciones estudiadas, los diferentes métodos de cálculos aplicados muestran cambios significativos de la forma de dicha superficie entre ellos, más allá de la diferencia que hay entre las superficies circulares y las superficies no circulares. Con el embalse vacío las superficies de rotura afectan a la parte central del talud aguas arriba y aguas abajo (véase desde la figura 41 hasta la figura 48), excepto en el método de búsqueda de Cuckoo Search en el que la superficie de rotura afecta al pie del talud (figura 47), no aceptando como válida dicha superficie. Con el embalse lleno, las superficies de rotura afectan a la parte central del talud y ligeramente al terreno natural (figuras desde la 49 hasta la figura 52). La excepción se da con el método de búsqueda Auto Refine Search que afecta a la superficie de rotura el pie del talud aguas abajo (figura 50).

Tabla 9: Factor de Seguridad sección inicialmente proyectada en la Situación Accidental.

		FACTOR DE SEGURIDAD												
		BISHOP SIMPLIFICADO				JANBU CORREGIDO				SPENCER				
		SC		SNC		SC		SNC		SC		SNC		
		Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	
ESTADO DEL EMBALSE	DESEMBALSE RÁPIDO Talud Aguas arriba	0,95	0,95	0,94	0,94	0,95	0,94	0,94	0,94	0,95	0,94	0,94	0,94	
	N.M.N. + SISMO Talud aguas abajo	1,53	1,53	1,43	1,53	1,45	1,45	1,44	1,44	1,54	1,54	1,52	1,52	
	N.A.P. Talud aguas abajo	1,73	1,73	1,62	1,61	1,64	1,63	1,62	1,62	1,74	1,74	1,72	1,72	
	VACIO + SISMO	Talud Aguas arriba	1,45	1,44	1,41	1,42	1,44	1,44	1,42	1,41	1,44	1,44	1,41	1,41
		Talud Aguas abajo	1,71	1,68	1,62	1,64	1,71	1,67	1,61	1,65	1,71	1,68	1,65	1,65

En la situación accidental de desembalse rápido, presenta un factor de seguridad crítico en el talud aguas arriba inferior al FS mínimo exigido (1,3), aunque dicho valor está muy cercano a 1. Para el resto de las situaciones estudiadas, los taludes cumplen con el valor exigido del factor de seguridad en todos los métodos de cálculo, siendo en todos los casos superior a 1,3 (Tabla 6). La presencia del sismo hace que disminuya el valor del FS con respecto a la misma situación sin sismo, pasando de 1,63 (FS mínimo Tabla 8, para N.M.N). a 1,43 (FS mínimo Tabla 9, para N.M.N+sismo). Otro aspecto a tener en cuenta es el aumento de la cota de la lámina de agua en la presa (situación N.A.P) con respecto a

la situación normal en N.M.N. Dicho aumento del nivel del embalse no supone apenas variación del valor obtenido del FS en el talud aguas abajo.

Comparando entre sí los métodos de cálculos usados en las situaciones estudiadas no se aprecian diferencias importantes entre los valores de los FS obtenidos para la situación accidental. La diferencia entre el valor mínimo con respecto al valor máximo es menor del 10%¹. Con respecto a las formas de las superficies de rotura pésimas en esta situación, con el embalse vacío más el sismo las superficies de rotura afectan a la parte central del talud, tanto aguas arriba como aguas abajo (figuras desde la 53 hasta la 60). Con el embalse en N.A.P. las superficies de rotura circulares afectan a parte del talud aguas abajo y la parte central del talud aguas arriba y parte del terreno natural (figuras desde la 61 hasta la 64). Las SNC cambian con respecto a las SC, afectando a la parte central del talud aguas arriba. En el caso del desembalse rápido las superficies de rotura afectan a la parte central del talud aguas arriba (figuras desde la 65 hasta la 68). En la última situación de N.M.N. más el sismo las superficies de rotura afectan a la parte central del talud aguas arriba y el talud aguas abajo y parte del terreno natural (figuras desde la 69 hasta la 72). En ningún caso se observan diferencias destacadas entre los distintos métodos de búsqueda.

¹ Porcentaje que se tomará como referencia para que sea considerada destacable la diferencia en el FS

Tabla 10: Factor de Seguridad en la sección inicialmente proyectada en la Situación Extrema.

			FACTOR DE SEGURIDAD											
			BISHOP SIMPLIFICADO				JANBU CORREGIDO				SPENCER			
			SC		SNC		SC		SNC		SC		SNC	
			Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search
ESTADO DEL EMBALSE	N.A.E.	Talud aguas abajo	1,73	1,73	1,61	1,61	1,63	1,63	1,62	1,62	1,73	1,73	1,72	1,72
	DESEMBALSE RÁPIDO+SISMO	Talud aguas arriba	0,85	0,85	0,84	0,84	0,85	0,86	0,84	0,84	0,86	0,85	0,84	0,84

En la situación extrema, el factor de seguridad obtenido cumple sobradamente con el valor mínimo exigido en la Instrucción con el embalse en N.A.E. cuyo valor debe ser superior a 1 (Tabla 6). Sin embargo, en la situación excepcional cuando se produzcan simultáneamente un desembalse rápido y sismo, el FS es inferior al mínimo que marca la instrucción. Por lo que cuando concurren estas dos circunstancias el talud aguas arriba sería considerado un talud potencialmente inestable. Se debe destacar que la probabilidad de que ocurran las dos circunstancias simultáneamente es muy pequeña.

El aumento de la cota de la lámina de agua sobre la presa (N.A.E.) con respecto al nivel N.A.P. (Tabla 9) tampoco supone un cambio significativo en el valor del FS.

Comparando los FS obtenidos de los métodos de cálculo en los distintos casos estudiados para la situación extrema no se observan variaciones mayores del 10% entre el máximo y el mínimo valor obtenido.

Con respecto a la forma de las superficies de rotura pésimas en esta situación extrema, en el caso del embalse en N.A.E. las superficies de rotura circulares afectan a la parte superior

del talud aguas arriba y a la parte central del talud aguas abajo afectando también a parte de la cimentación, mientras que las superficies de rotura no circulares afectan a la parte central del talud aguas abajo y la cimentación (figuras desde la 73 hasta la 76). En la situación de desembalse rápido más el sismo las superficies de rotura pésimas afectan a la parte central del talud aguas arriba, sin que se aprecien diferencias significativas entre los métodos de búsqueda de dichas superficies (figuras desde la 77 hasta la 80).

5.1.3. Análisis de Sensibilidad

Variando las características geotécnicas de los materiales según se ha expuesto en la Tabla 7, los cambios producidos en el FS sobre el talud de aguas abajo con los métodos de cálculo de Bishop Simplificado y Janbu corregido producen los siguientes resultados. Se produce un aumento de los valores máximos del FS desde 1,45 hasta 1,8 con el aumento del peso específico y el ángulo de rozamiento interno del terreno natural. Sin embargo, el FS disminuye desde aproximadamente el valor de 1,7 hasta el valor de 1,55 con el aumento del peso específico del talud aguas abajo. Con el método de Spencer se producen los mismos resultados que los explicados con los métodos de Janbu corregido y Bishop simplificado, con la diferencia de que el aumento de los valores de las características geotécnicas de los materiales hace que aumente el FS desde el valor 1,65 hasta el valor de 1,78 aproximadamente con el aumento del ángulo de rozamiento interno del talud aguas abajo. En la Tabla 11 se muestra un resumen de los resultados más destacados obtenidos en el análisis de sensibilidad en esta sección.

Tabla 11: Resumen Análisis de Sensibilidad Sección inicialmente Proyectada

Variación FS	Variación Características Geotécnicas
AUMENTA	Mayor Peso Específico y Ángulo de rozamiento interno - Terreno Natural
DISMINUYE	Mayor Peso Específico-Talud Aguas abajo

A continuación, se expone los análisis realizados en el talud aguas abajo en la situación de N.A.E. con los distintos métodos de cálculo utilizados en el presente trabajo. En el eje de ordenadas se muestra la variación del factor de seguridad, y en el eje de abscisas se muestra el porcentaje de cambio de los valores de las características geotécnicas de los materiales estudiados.

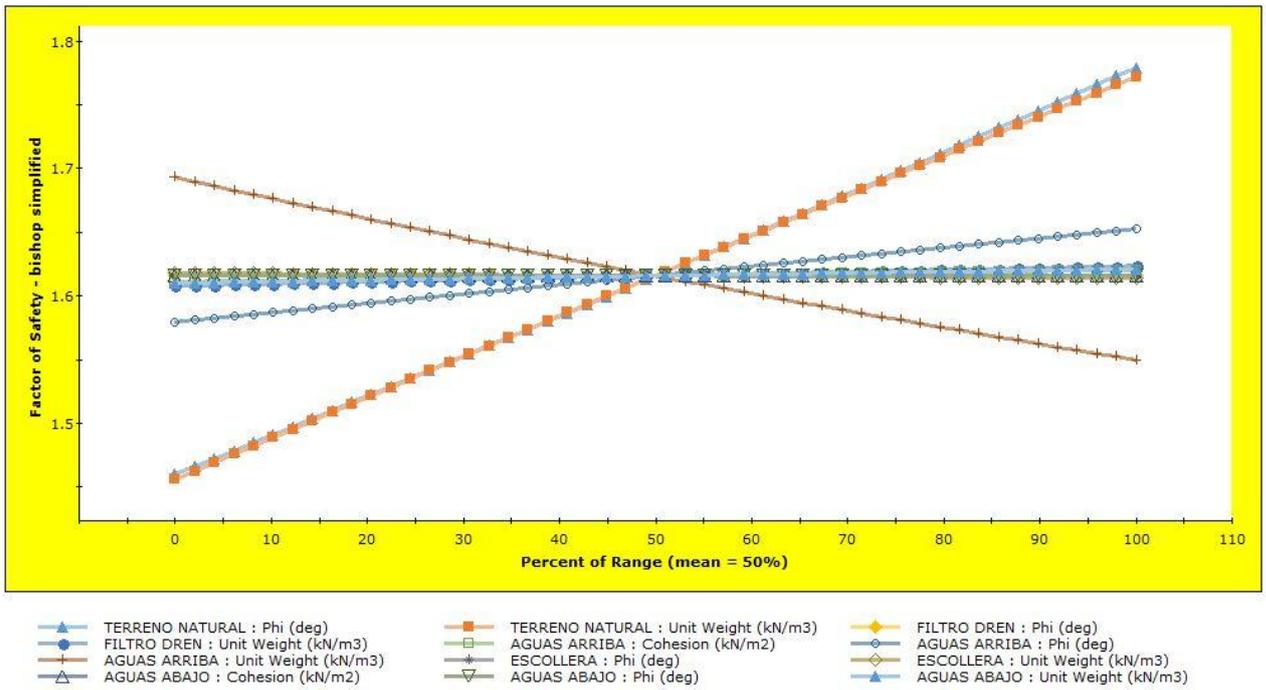


Figura 32: Análisis de sensibilidad aguas abajo, método de Bishop Simplificado

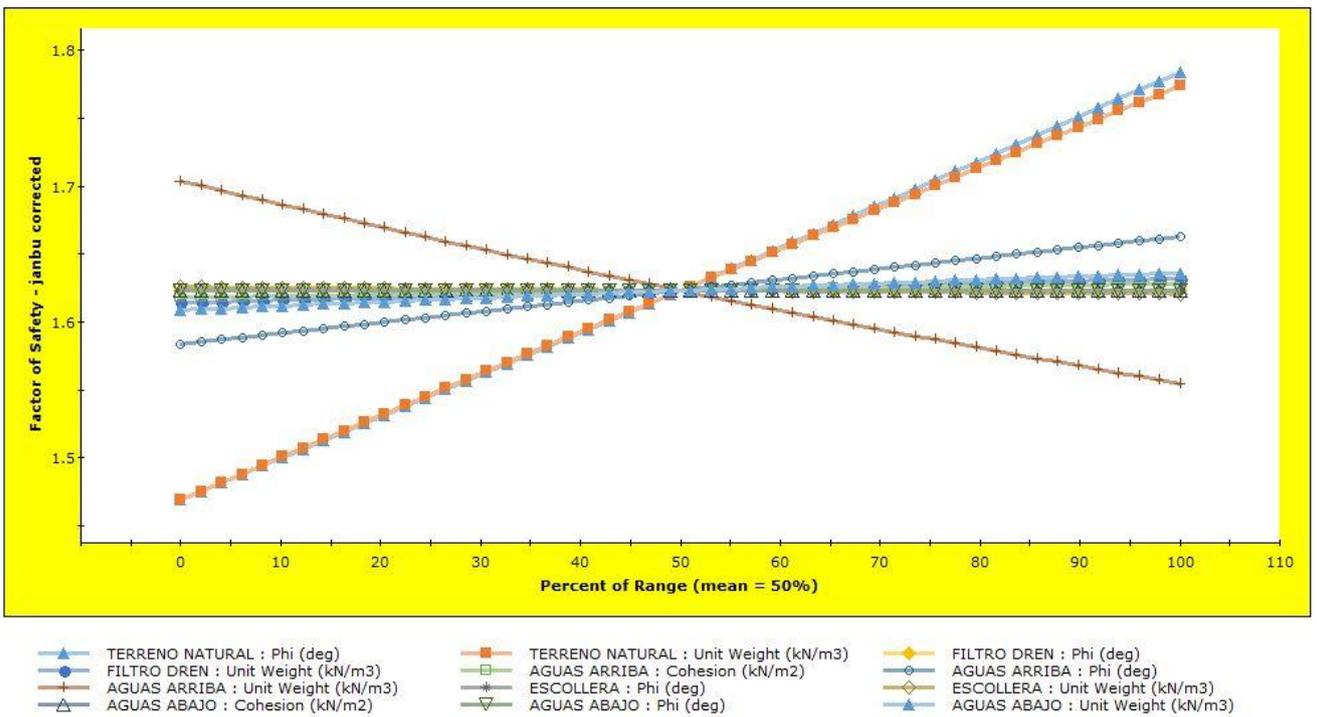


Figura 33: Análisis de sensibilidad aguas abajo, método de Janbu

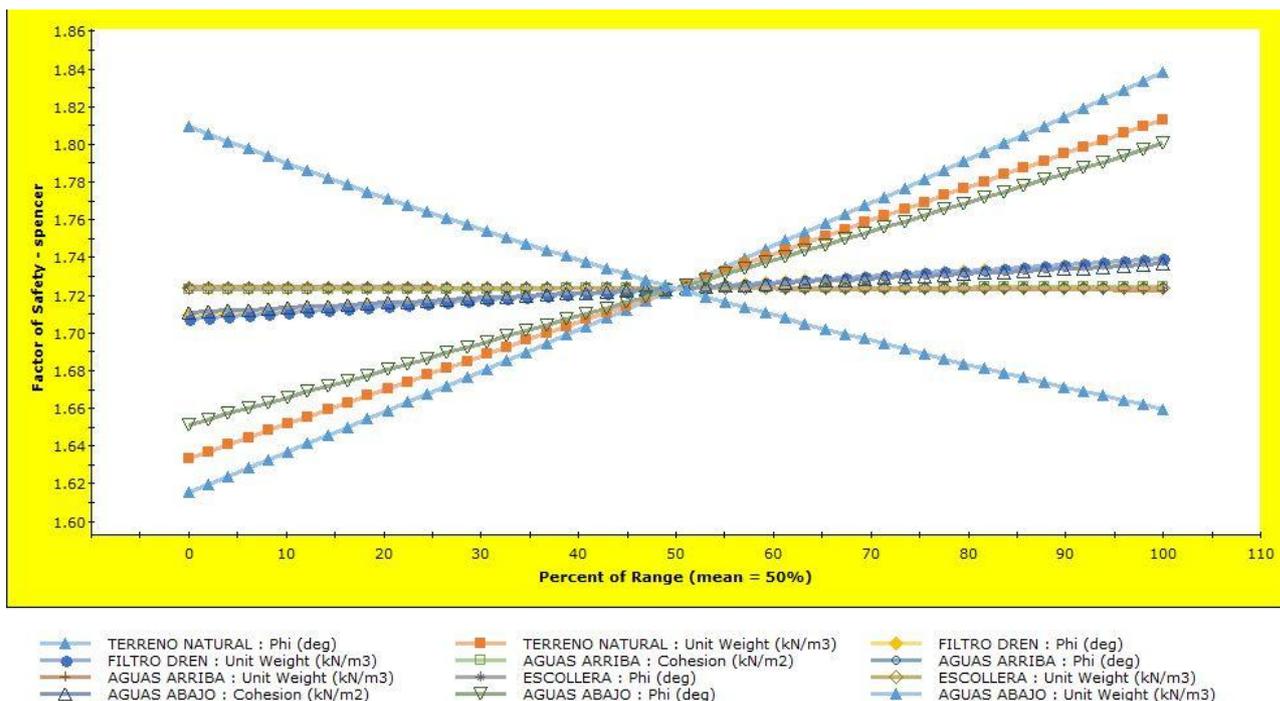


Figura 34: Análisis de sensibilidad aguas abajo, método de Spencer

5.2. SECCIÓN CONSTRUIDA

Este apartado se presenta los resultados obtenidos para la sección finalmente ejecutada. En este apartado se incluye: Red de flujo, Factores de Seguridad y Análisis de Sensibilidad.

5.2.1. Red de flujo

Este apartado estudia la red de flujo que presenta la sección construida con el embalse lleno, tanto con el embalse en N.M.N., en N.A.P. y en N.A.E. Las imágenes de la red de flujo de la presa en cada situación estudiada se muestran al final de dicho apartado.

El agua recorre el espaldón aguas arriba de la presa hasta que se encuentra con el núcleo impermeable. Este núcleo impermeable hace que el agua se desvíe hacia la parte inferior de la presa, produciendo un cambio brusco en la red de flujo con respecto a la sección inicialmente proyectada, buscando el filtro dren que producirá la evacuación del agua del interior de la presa. Este es el mayor cambio con respecto a la sección inicialmente proyectada, el cambio que produce el núcleo central impermeable en la red de flujo, como se muestra en las siguientes imágenes.

Las diferentes franjas de colores muestran las líneas equipotenciales de energía, mostrándose en la leyenda de las imágenes la altura total de energía en metros. Las líneas azules muestran el flujo de agua por el interior de la presa.

N.M.N.

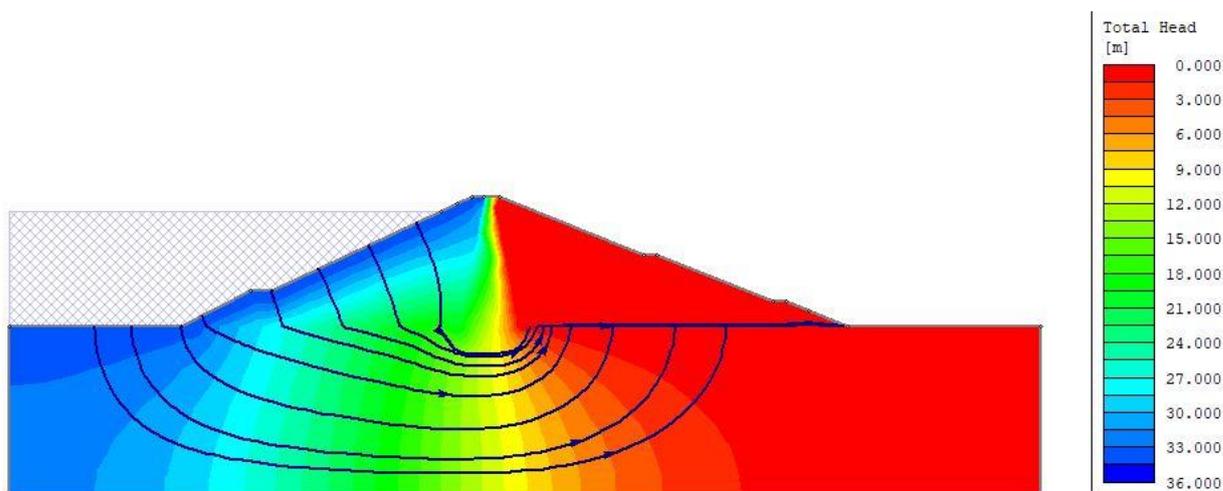


Figura 35: Red de flujo con el embalse en N.M.N.

N.A.P.

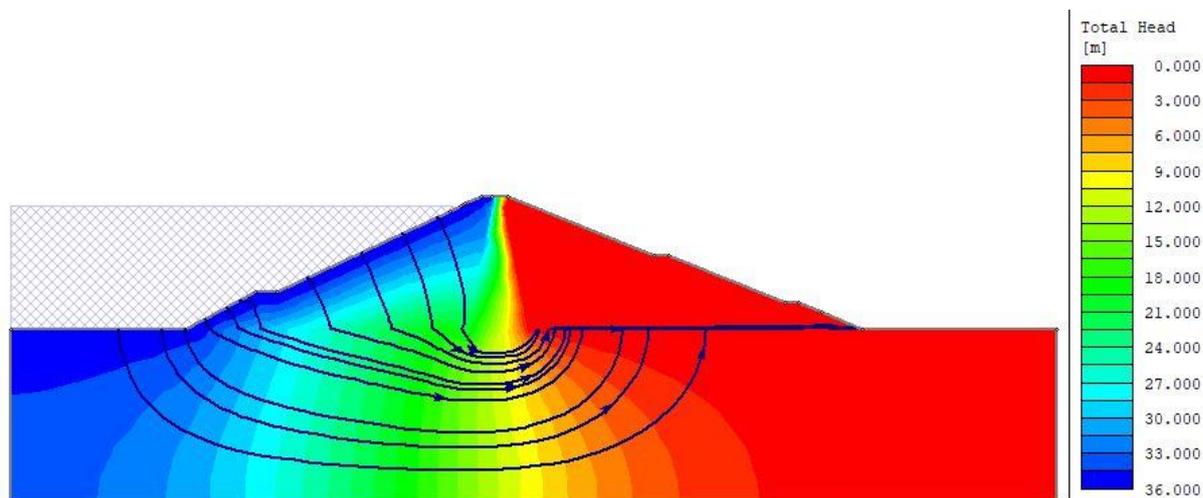


Figura 36: Red de flujo con el embalse en N.A.P.

N.A.E.

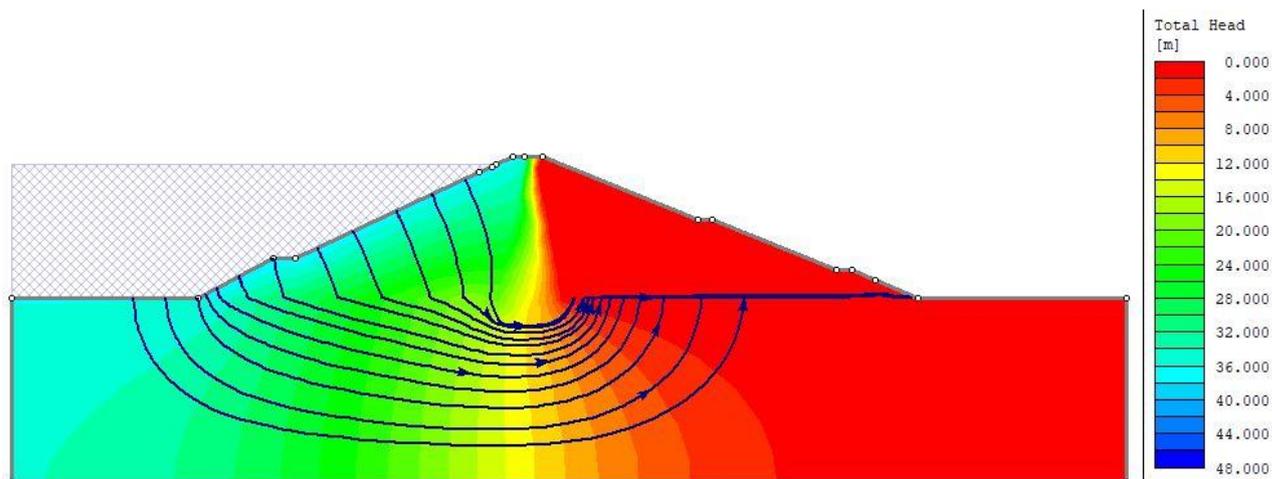


Figura 37: Red de flujo con el embalse en N.A.E.

5.2.2. Factores de Seguridad de los taludes

Los resultados obtenidos los cálculos correspondientes a la sección construida para las diferentes situaciones presentadas y los distintos métodos seleccionados se recogen en el Anexo 2 de este documento. A modo de resumen y para facilitar el análisis y la comparación de resultados, en la Tabla 12 se exponen los resultados de los factores de seguridad calculados en la Situación Normal, en la Tabla 13 se exponen los resultados de los factores de seguridad calculados en la Situación Accidental y en la Tabla 14 se exponen los resultados de los factores de seguridad calculados en la Situación Extrema. En las tablas aparecen también las siglas SC y SNC, las cuales corresponden a las superficies de rotura pésimas circulares y no circulares, respectivamente.

Tabla 12: Factores de seguridad de la Sección Construida en la Situación Normal.

			FACTOR DE SEGURIDAD											
			BISHOP SIMPLIFICADO				JANBU CORREGIDO				SPENCER			
			SC		SNC		SC		SNC		SC		SNC	
			Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search
ESTADO DEL EMBALSE	VACIO	Talud Aguas arriba	1,51	1,58	1,38	1,56	1,48	1,58	1,41	1,56	1,59	1,58	1,50	1,56
		Talud Aguas abajo	1,78	1,76	1,78	1,75	1,75	1,72	1,78	1,77	1,78	1,76	1,84	1,81
	N.M.N	Talud aguas abajo	1,76	1,75	1,58	1,64	1,72	1,64	1,58	1,67	1,77	1,73	1,71	1,72

En la situación normal (figuras desde la 81 hasta la 92) los factores de seguridad calculados cumplen con los valores mínimos exigidos en la instrucción, cuyo valor debe de ser superior a 1,4 según se muestra en la Tabla 6, tanto en la situación con el embalse lleno en N.M.N. como en la situación con el embalse vacío. El menor factor de seguridad (1,41) se produce con el embalse vacío en el talud aguas arriba y con las superficies de deslizamiento no circulares . Este valor mínimo obtenido es muy cercano al mínimo exigido.

Comparando los FS obtenidos en los métodos de cálculos usados (Bishop Simplificado, Janbu Corregido y Spencer), no se observan cambios destacables entre ellos, siendo todos los valores de los FS de un valor cercano entre sí. Tampoco se aprecian diferencias destacables entre los FS obtenidos en las SC con respecto a las SNC.

Con respecto a las formas de las superficies de rotura obtenidas en los cálculos, se aprecia que de forma general para la sección construida, las superficies de rotura afectan

principalmente a la parte central de los taludes calculados, y parte del terreno natural. Cabe destacar que en excepcionalmente, la superficie de rotura afecta solo al pie del talud (Figura 87). Estas superficies de rotura son mucho más pequeñas pero igual de importantes que las que afectan a la parte central de los taludes, debido a que se sitúan en la base del talud de la presa. Entre las SC y las SNC no se aprecian diferencias de las formas de las superficies de rotura obtenidas, en lo que concierne a la superficies del talud en cuestión afectado.

Tabla 13: Factores de seguridad de la Sección Construida en la Situación Accidental.

			FACTOR DE SEGURIDAD											
			BISHOP SIMPLIFICADO				JANBU CORREGIDO				SPENCER			
			SC		SNC		SC		SNC		SC		SNC	
			Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search
ESTADO DEL EMBALSE	DESEMBALSE RÁPIDO	Talud Aguas arriba	1,09	1,02	0,95	0,95	1,09	0,99	0,97	0,97	1,10	1,02	0,98	1,03
	N.M.N. + SISMO	Talud aguas abajo	1,55	1,55	1,45	1,45	1,51	1,51	1,47	1,47	1,55	1,55	1,52	1,52
	N.A.P.	Talud aguas abajo	1,75	1,74	1,57	1,64	1,71	1,63	1,57	1,67	1,76	1,72	1,71	1,71
	VACIO + SISMO	Talud Aguas arriba	1,45	1,44	1,38	1,41	1,44	1,44	1,39	1,41	1,44	1,44	1,41	1,41
		Talud Aguas abajo	1,58	1,68	1,64	1,64	1,54	1,67	1,65	1,65	1,59	1,67	1,65	1,64

En la situación accidental el menor factor de seguridad se da en el talud de aguas arriba cuando se produce un desembalse rápido con el embalse en N.M.N. (figuras desde la 93 hasta la 96), siendo estos valores cercanos a 1, menor que el valor mínimo exigido de 1,3 como se expone en la Tabla 6. Este valor hace que el talud sea potencialmente estable inestable. En todas las demás situaciones estudiadas los valores obtenidos de los FS cumplen con los valores mínimos recogidos en la Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de grandes presas, siendo el menor valor de 1,38 en la situación de embalse vacío más el sismo (figuras desde 101 hasta 108).

Comparando entre sí los métodos de cálculo utilizados, los valores del FS obtenidos en esta situación no presentan diferencias destacables entre sí, obteniendo valores muy próximos entre sí. Destaca que los valores obtenidos con las superficies de rotura no circulares (SNC) son ligeramente menores que los obtenidos en las superficies de rotura circulares (SC), siendo la variación de un 5% aproximadamente. Este descenso no es significativo debido a que la referencia tomada para que sea destacable la variación es del 10%.

Con respecto a las formas de las superficies de rotura obtenidas en esta situación, en el desembalse rápido la superficie de rotura afecta al pie del talud, siendo esta superficie no aceptada como válida. Con el método de búsqueda de Grid Search afecta a la parte superior del talud. En los demás casos estudiados la superficie de rotura afecta a la parte central del talud y a parte de la cimentación, con sus respectivas diferencias según sean SC o SNC.

Tabla 14: Factores de seguridad de la Sección Construida en la Situación Extrema.

			FACTOR DE SEGURIDAD											
			BISHOP SIMPLIFICADO				JANBU CORREGIDO				SPENCER			
			SC		SNC		SC		SNC		SC		SNC	
			Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search	Grid Search	Auto Refine Search	Cuckoo Search	Particle Swarm Search
ESTADO DEL EMBALSE	N.A.E.	Talud aguas abajo	1,76	1,75	1,58	1,64	1,72	1,64	1,58	1,67	1,76	1,73	1,71	1,72
	DESEMBALSE RÁPIDO+SISMO	Talud aguas arriba	0,99	0,98	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99

En la situación extrema los valores de los factores de seguridad de los taludes obtenidos en las situaciones estudiadas se pueden considerar que cumplen con el valor mínimo exigido según se muestra en la Tabla 6, cuyo valor debe de ser mayor que 1. En la situación de N.A.E. (figuras desde la 113 hasta la 116) supera ampliamente dicho valor, sin embargo, en la situación de Desembalse rápido más sismo (figuras desde la 117 hasta la 120) los valores obtenidos en los cálculos se admiten que cumplen el valor exigido, por estar estos valores justo en el límite del valor mínimo exigido.

Comparando los resultados obtenidos de los FS entre los distintos métodos de cálculo usados (Bishop Simplificado, Janbu Corregido y Spencer) entre sí, con el embalse en N.A.E. destacan dos valores ligeramente inferiores a los demás en los métodos de Bishop Simplificado y Janbu Corregido, cuyo valor es de 1,58 mientras que el máximo valor obtenido para ese mismo caso con otros métodos de búsqueda aumenta hasta 1,76 o 1,72. Estos valores mínimos se dan ambos para superficies de rotura no circulares. En la

situación de desembalse rápido más el sismo no se aprecia diferencias entre los valores del FS obtenido con los distintos métodos de cálculo usados.

Con respecto a la forma de las superficies de rotura obtenidas en los cálculos, en la situación de desembalse rápido más sismo, todas afectan a la parte externa del talud aguas arriba. En la situación con el embalse en N.A.E. las superficies de rotura afectan a la parte central del talud aguas abajo y parte de la cimentación, excepto con el método de búsqueda de superficies Auto Refine Search, cuya superficie de rotura afecta al pie del talud siendo la única con diferencia de forma apreciable, por lo que no se acepta como válida.

Comparando las superficies de rotura pésimas entre la sección inicialmente proyectada y la sección construida, se aprecian pequeños cambios en algunos casos en la situación de las superficies de rotura pésimas, producidas por la inclusión del núcleo impermeable.

5.2.3. Análisis de Sensibilidad

En el talud aguas abajo la variación de los valores de las características geotécnicas de los materiales expuestos en la Tabla 7, produce un aumento del FS desde los valores máximos de 1,52 hasta 1,76 aproximadamente cuando aumenta el valor del peso específico y el ángulo de rozamiento interno del terreno natural. Sin embargo, se produce un descenso del FS del cuando se produce un aumento del Peso específico del talud aguas abajo.

El aumento de los valores de las características geotécnicas del núcleo y filtro dren de ambas secciones no produce apenas variación del FS, siendo dicha variación inferior al 10% por lo que se tomará dicha variación como insignificante. En la Tabla 15 se muestran los resultados más destacados obtenidos en el análisis de sensibilidad de esta sección.

Tabla 15: Resumen Análisis de sensibilidad sección construida

Variación FS	Variación Características Geotécnicas
AUMENTA	Mayor Peso Específico y Ángulo de rozamiento interno-Terreno Natural
DISMINUYE	Mayor Peso Específico -Talud Aguas abajo

El análisis realizado se muestra en las siguientes imágenes, con los tres métodos usados. En el eje de ordenadas se aprecia la variación del factor de seguridad, y en el eje de

abscisas se muestra el porcentaje de variación de los valores de las características geotécnicas de los materiales estudiados.

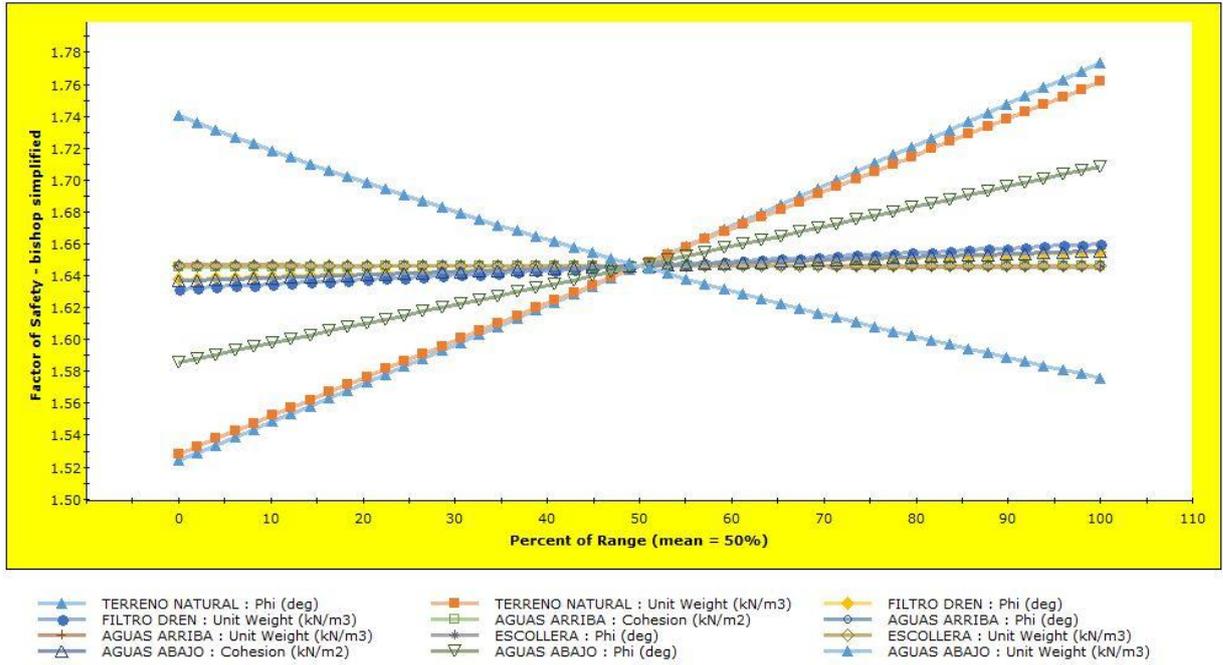


Figura 38: Análisis de sensibilidad aguas abajo, método de Bishop Simplificado

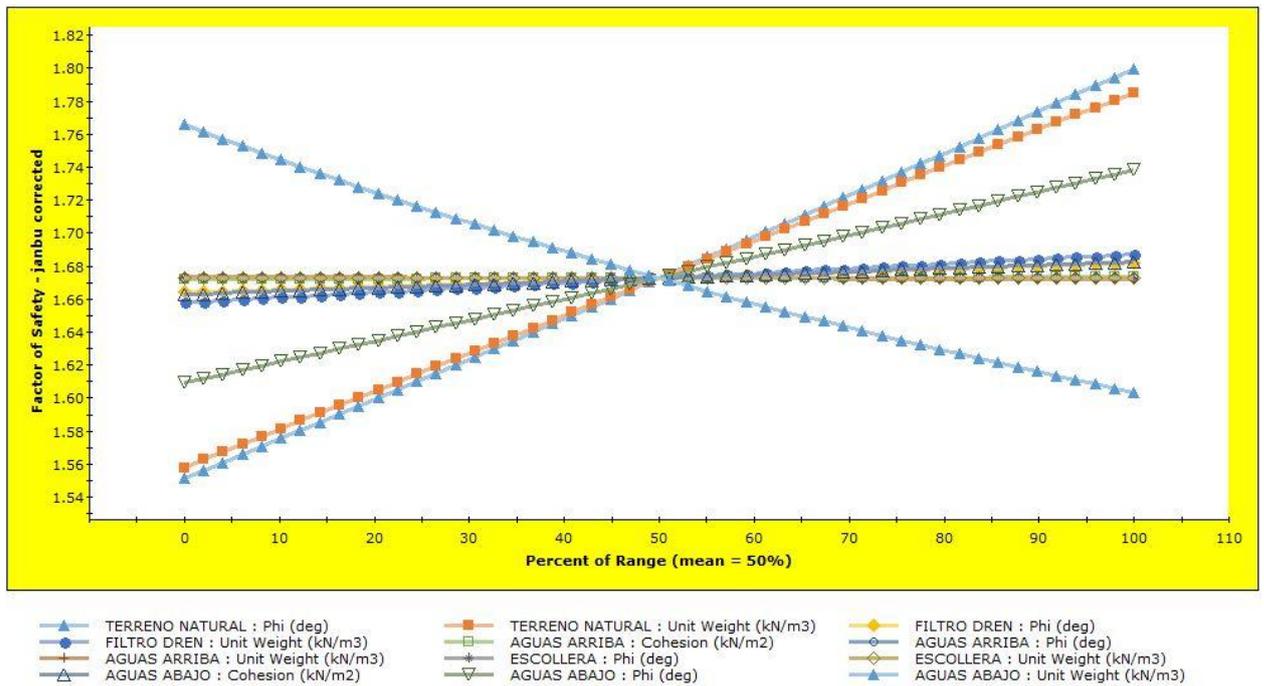


Figura 39: Análisis de sensibilidad aguas abajo, método de Janbu

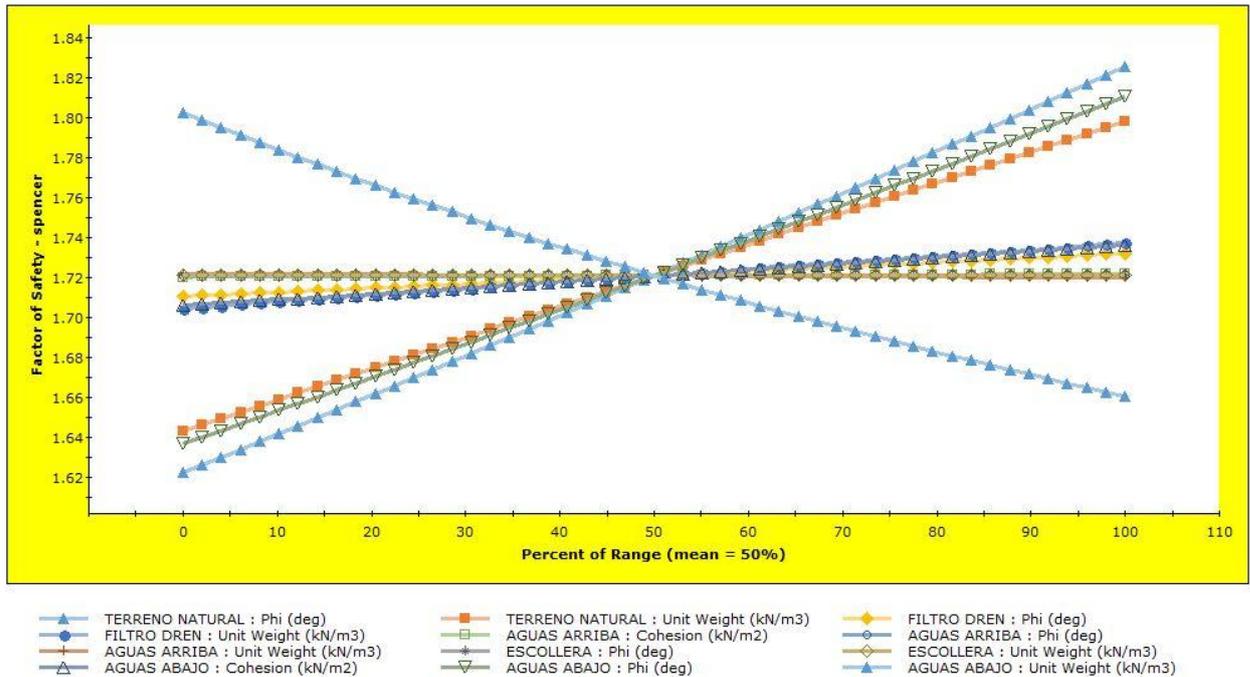


Figura 40: Sensibilidad aguas abajo, método de Spencer

6. CONCLUSIONES

El apartado de conclusiones se divide en tres epígrafes, acordes con los objetivos propuestos, destacando las principales conclusiones observadas de acuerdo con: la red de flujo, los factores de seguridad y el análisis de sensibilidad.

6.1. CONCLUSIONES CON RESPECTO A LA RED DE FLUJO

La modificación de la sección inicialmente proyectada de la presa con respecto a la sección construida finalmente, donde se adopta un núcleo central impermeable, produce una variación importante de la red de flujo. La red de flujo en la sección construida presenta un cambio de dirección brusco con respecto a la sección inicialmente proyectada, ya que el agua se encuentra con el núcleo central impermeable, dirigiéndose esta hacia la parte inferior de la presa. Por lo tanto, la sección construida presenta un gradiente hidráulico más bajo (más bajo cuanto más longitud recorra el agua en una sección con respecto a la otra) que la sección inicialmente proyectada debido a la variación de la red de flujo entre dichas secciones. Dicha variación supone un aumento del FS especialmente del talud aguas abajo, siendo este el principal afectado por la modificación de la red de flujo. En ningún caso, este aumento del FS es superior al 10% (valor de referencia).

La variación de la cota de agua según la situación estudiada (N.M.N, N.A.P. y N.A.E.), iguales en ambas secciones, modifica el gradiente hidráulico el cual depende de la altura de la lámina de agua (directamente proporcional) y de la longitud recorrida por el agua (inversamente proporcional) en el interior de la presa. Esta longitud recorrida por el agua en el interior de la presa se ve modificada con respecto a la sección inicialmente proyectada por la inclusión del núcleo central impermeable.

6.2. CONCLUSIONES CON RESPECTO A LOS FACTORES DE SEGURIDAD

La variación de la sección inicialmente proyectada de la presa de Villalba de los Barros (Badajoz) con respecto a la sección construida, producido dicho cambio por la mejora de las características de los materiales encontrados en el vaso del embalse, y la inclusión de un núcleo central impermeable, supone de forma generalizada un ligero aumento de los factores de seguridad de los taludes estudiados con respecto a la sección inicialmente proyectada, siendo estos aumentos alrededor de un 5%. Tiene especial relevancia el aumento del valor del FS en las situaciones en las que se produce un desembalse rápido, debido a que esta situación(aunque sea poco probable) presenta valores del FS inferiores a 1 en la sección inicialmente proyectada. Este aumento del FS produce que dicho valor sea muy cercano al valor mínimo exigido en la sección construida finalmente. Esta variación destaca sobre las demás debido a que en la situación de desembalse rápido más sismo, se produce un aumento del 10% siendo este el máximo producido.

El estudio de la estabilidad de los taludes con los distintos métodos de cálculo empleados en el presente trabajo (Bishop Simplificado, Janbu Corregido y Spencer) no supone diferencias reseñables entre los valores de los FS obtenidos por los distintos métodos en las mismas situaciones estudiadas comparándolas entre ellas, tanto en la sección inicialmente proyectada como en la sección construida. Con respecto a las superficies pésimas de rotura, estas cambian en algunos casos su forma y posición en el talud según el método de búsqueda de superficies de rotura pésimas considerado. Estos cambios en las superficies de rotura pésimas no suponen un cambio significativo en el valor del FS, pero sí en su localización en la sección estudiada y por ende, la posible zona afectada de la presa. Con respecto a las SC y las SNC, la posición en los taludes estudiados son las mismas en cada caso con ambos tipos de superficies.

6.3. CONCLUSIONES CON RESPECTO AL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los resultados obtenidos en ambas secciones en este apartado no suponen variación entre ellas, ya que tanto el aumento del FS como el descenso del FS se ve afectado en ambas secciones por los mismos parámetros. Los cálculos realizados en este trabajo, con las modificaciones de los valores de las propiedades geotécnicas introducidas en cada sección, muestra claramente que la variación de las características en ciertas zonas de la presa es mucho más significativa que en otras, tanto en la sección inicialmente proyectada como en la sección construida. Estas zonas que presentan mayor afección son el terreno natural y el talud aguas abajo. Por el contrario, las zonas que presentan menor afección son el núcleo, la escollera, el filtro dren y el talud aguas arriba. De ello se deduce que ambas secciones estudiadas se ven afectadas con las mismas variaciones de los parámetros geotécnicos de los materiales empleados. Un aumento del peso específico y del ángulo de rozamiento interno del terreno natural produciría un aumento del FS del talud aguas abajo. Un descenso del FS del talud aguas abajo se vería producido por un aumento del peso específico del talud aguas abajo.

Bibliografía

- Ágreda, E. A. (2005). *Estabilidad de Taludes*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Atinfo. (2019). Recuperado el 7 de Febrero de 2019, de <https://www.atinfo.net/lineas-de-negocio/instrumentacion-sensores/20-temperatura-y-deformaciones/115-v2-extensometro-cv-gran-base>
- BOE. (20 de Julio de 2001). *Boletín Oficial del Estado*. Recuperado el 5 de Febrero de 2019, de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-14276>
- BOE. (24 de Octubre de 2007). *Boletín Oficial del Estado*. Recuperado el 5 de Febrero de 2019, de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-18475>
- BOE. (2017). *Boletín Oficial del Estado*. Recuperado el 5 de Febrero de 2019, de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-12902>
- C.H.G. (2006). *Proyecto presa de Villalba de los Barros*.
- C.H.G. (2018). *Confederación Hidrográfica del Guadiana*.
- Confederación Hidrográfica del Guadiana. (2016). La presa de Villalba de los Barros. *La presa de Villalba de los Barros*, (pág. 130 diapositivas).
- Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. (Noviembre de 1996). *Ministerio para la Transición Ecológica*. Recuperado el 5 de Febrero de 2019, de <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/seguridad-de-presas-y-embalses/normas-tecnicas/>
- E.P. (28 de Marzo de 2018). Comienza el camino para declarar monumento la histórica presa de Feria. *HOY*.
- Fernando Aranda Gutiérrez. (2015). Análisis de la problemática presentada en el proceso constructivo y puesta en carga de las presas de Villalba de los Barros, Alcollarín y Búrdalo. *Jornada sobre el análisis del comportamiento de las presas*. Madrid.
- Fernando Aranda Gutierrez, J. S. (2010). Aprovechamiento de los materiales existentes en el vaso de la presa de Villalba de los Barros. *IX Jornadas Españolas de Presas*, (pág. 22).

- Fernando Aranda Gutierrez, J. S. (Abril de 2010). La presa de Villalba de los Barros:500 años de presas en la cuenca del Guadajira. *Revista de Obras Públicas*(3509), 149 a 158.
- Google Maps. (2 de Febrero de 2019). *Google Maps*. Recuperado el 2 de Febrero de 2019, de <https://www.google.com/maps/@38.5906339,-6.4753148,11533m/data=!3m1!1e3>
- Guadiana, C. H. (2019). *Confederación Hidrográfica del Guadiana*. Recuperado el 5 de Febrero de 2019, de <https://www.chguadiana.es/cuenca-hidrografica/infraestructuras/infraestructuras-de-regulacion/presas-de-embalse-de-la-cuenca-media>
- Gutiérrez, F. A. (25 de Junio de 2015). ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA PRESENTADA EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO Y PUESTA EN CARGA DE LAS PRESAS DE VILLALBA DE LOS BARROS, ALCOLLARÍN Y BÚRDALO. *Jornada sobre el análisis del comportamiento de las presas*. Madrid.
- Instituto Geográfico Nacional. (11 de Octubre de 2002). *ign*. Recuperado el 04 de Marzo de 2019, de <http://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/SIS-Norma-Sismorresistente-NCSE-02.pdf>
- Instituto y Geológico y Minero de España. (1975). *Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades*. Recuperado el 02 de Julio de 2019, de <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?Id=829&language=es>
- (1967). *Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas* .
- Junta de Extremadura. (2017). *www.juntaex.es*. Recuperado el 04 de Junio de 2019, de <http://www.juntaex.es/con03/regadio-tierra-de-barros>
- Ministerio para la Transición Ecológica. (1996). *Comité Nacional Español de Grandes Presas*. Recuperado el 09 de Junio de 2019, de https://www.spancold.org/wp-content/uploads/2016/09/Reglamento_Tecnico_sobre_Seguridad_de_Presas_y_Embalses.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica. (7 de Julio de 2018). *Normas Técnicas de Seguridad para las Grandes Presas y sus Embalses*. Recuperado el 29 de Julio de

2019, de <https://www.miteco.gob.es/es/agua/participacion-publica/PP-Proyecto-RD-Normas-Tecnicas-Seguridad-Grandes-Presas.aspx>

Rivera, A. C. (20 de 10 de 2014). *La crónica de Badajoz*. Recuperado el 6 de Junio de 2019, de https://www.lacronicabadajoz.com/noticias/extremadura/agricultura-delimita-15-000-nuevas-hectareas-riego-tierra-barros_171242.html

Rocscience. (2018). *Rocscience*. Recuperado el 8 de Febrero de 2019, de <https://www.rocscience.com/software/slide2>

Secretaría de Estado de Aguas y Costas. (Junio de 2001). *Ministerio para la Transición Ecológica*. Recuperado el 13 de Julio de 2019, de https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/guia_planes_emergencia_tcm30-216054.pdf

Sensogeo. (2019). *Sensogeo.com*. Recuperado el 7 de Febrero de 2019, de <http://www.sensogeo.com/piezometro-cuerda-vibrante/>

Universidad de Extremadura. (2019). Estabilidad de Taludes. *Apuntes de Obras Geotécnicas-Curso 2018/2019*.

ANEXO DE CÁLCULO 1- SECCIÓN INICIALMENTE PROYECTADA

En el siguiente anexo se mostrarán los cálculos obtenidos del programa "Slide 2D" para el análisis estructural de la presa proyectada según las situaciones de cálculo propuestas.

FACTORES DE SEGURIDAD

SITUACIÓN NORMAL-EMBALSE VACIO

Talud aguas arriba: Superficie circular

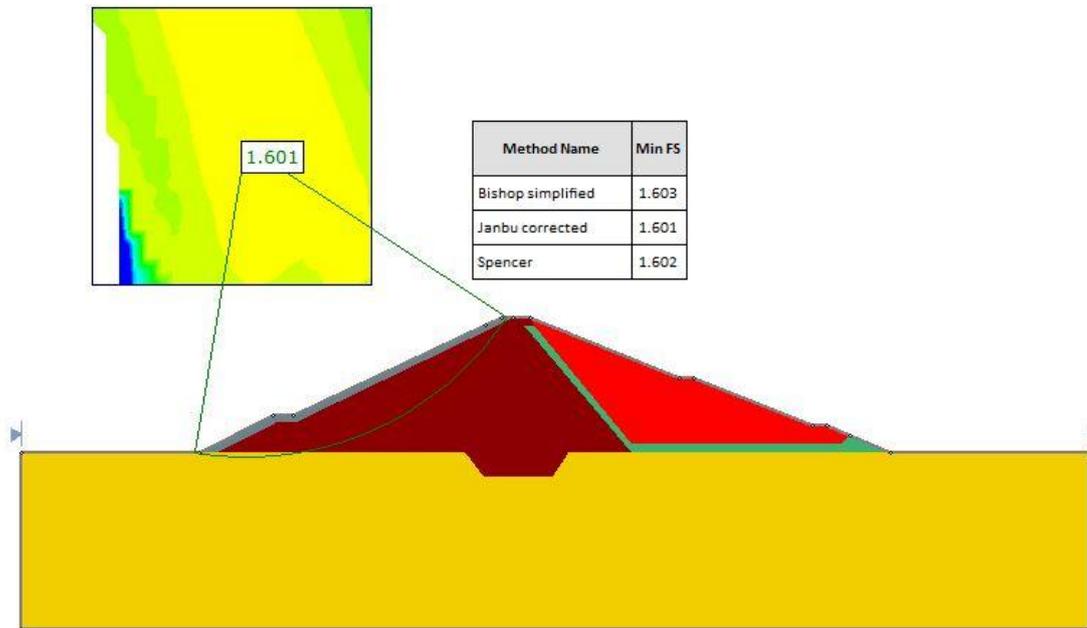


Figura 41: FS aguas arriba con el embalse vacío, método Grid Search

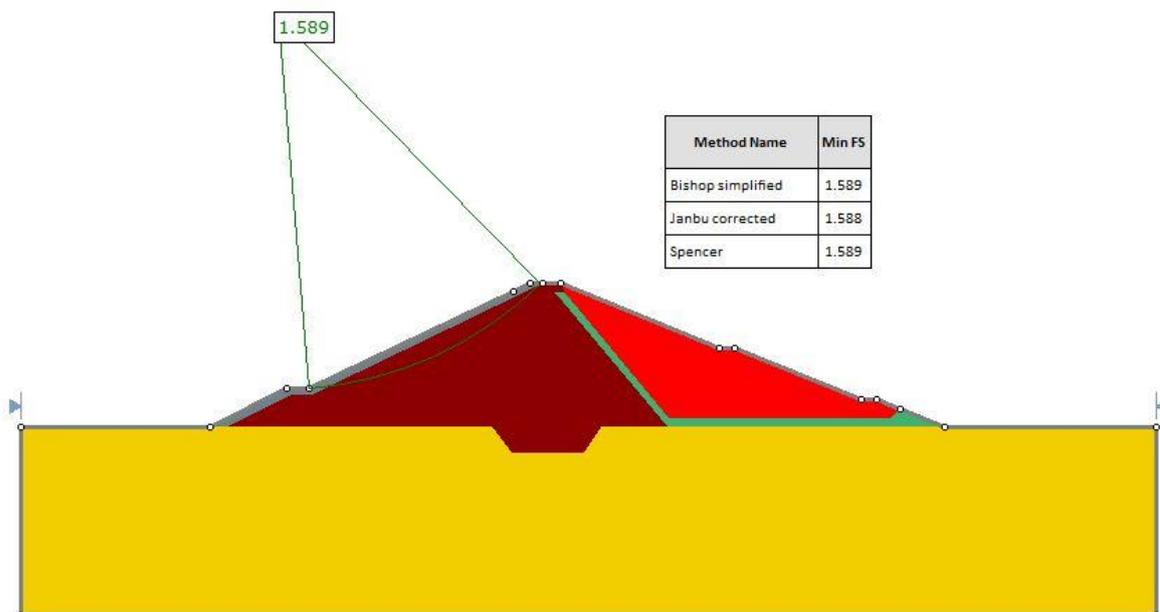


Figura 42: FS aguas arriba con embalse vacío, método Auto Refine Search

Talud aguas abajo: Superficie circular

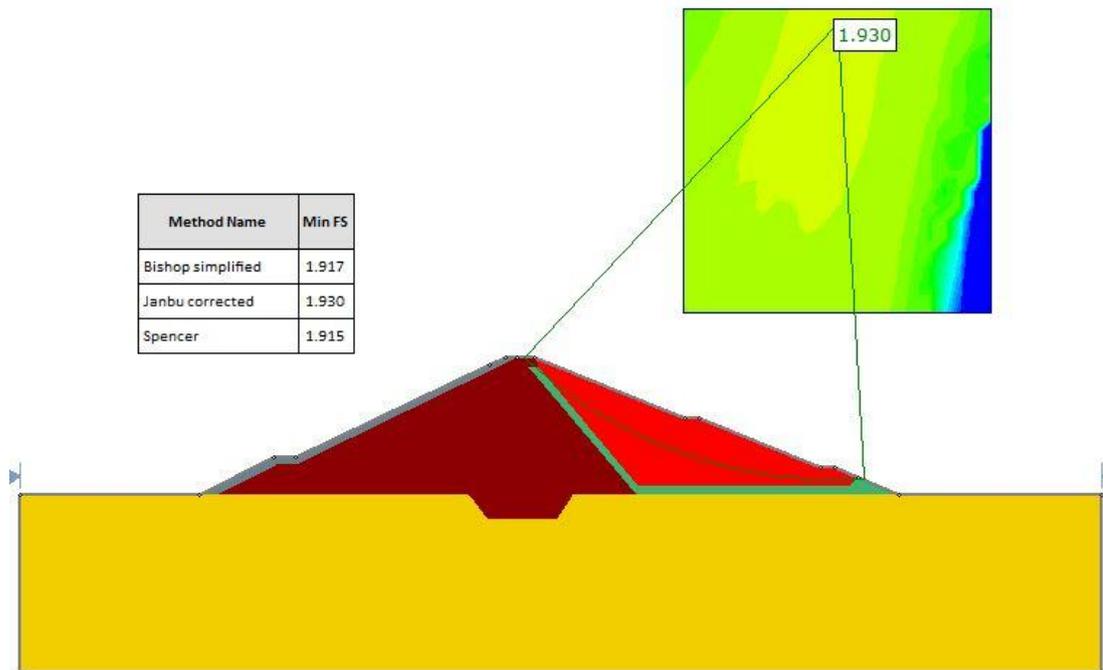


Figura 43: FS aguas abajo con el embalse vacío, Grid Search.

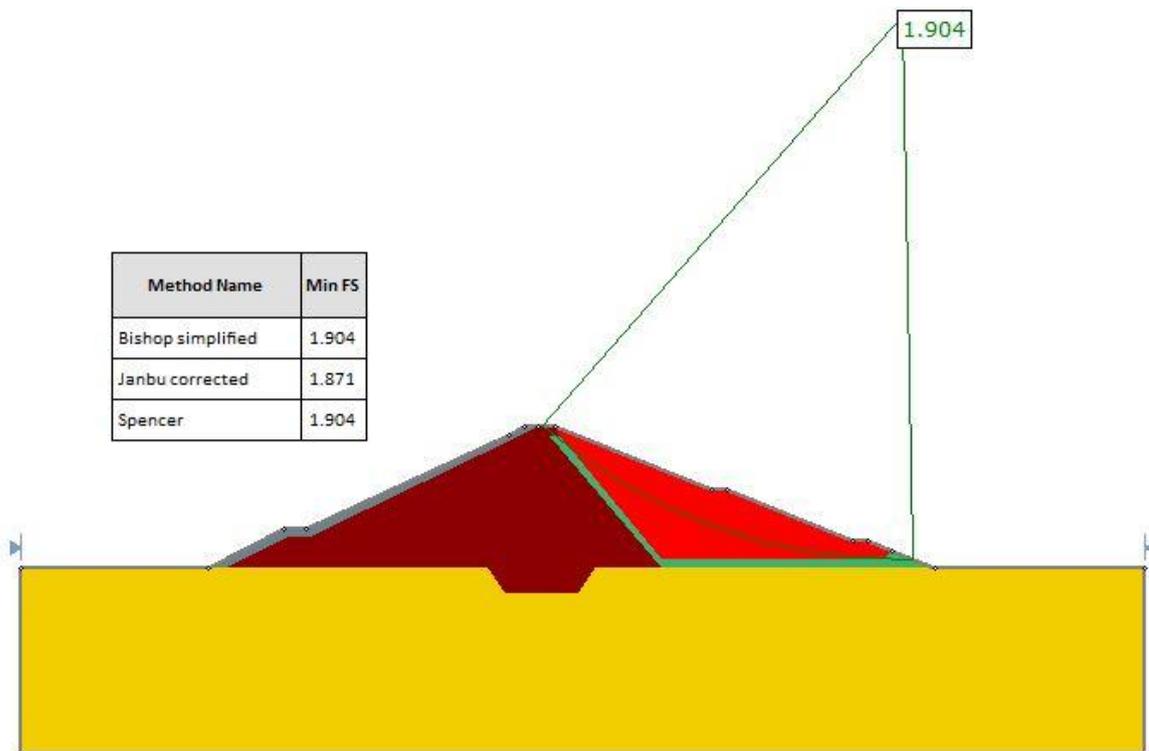


Figura 44: FS aguas abajo con el embalse vacío, Auto Refine Search

Talud aguas arriba: Superficie no circular

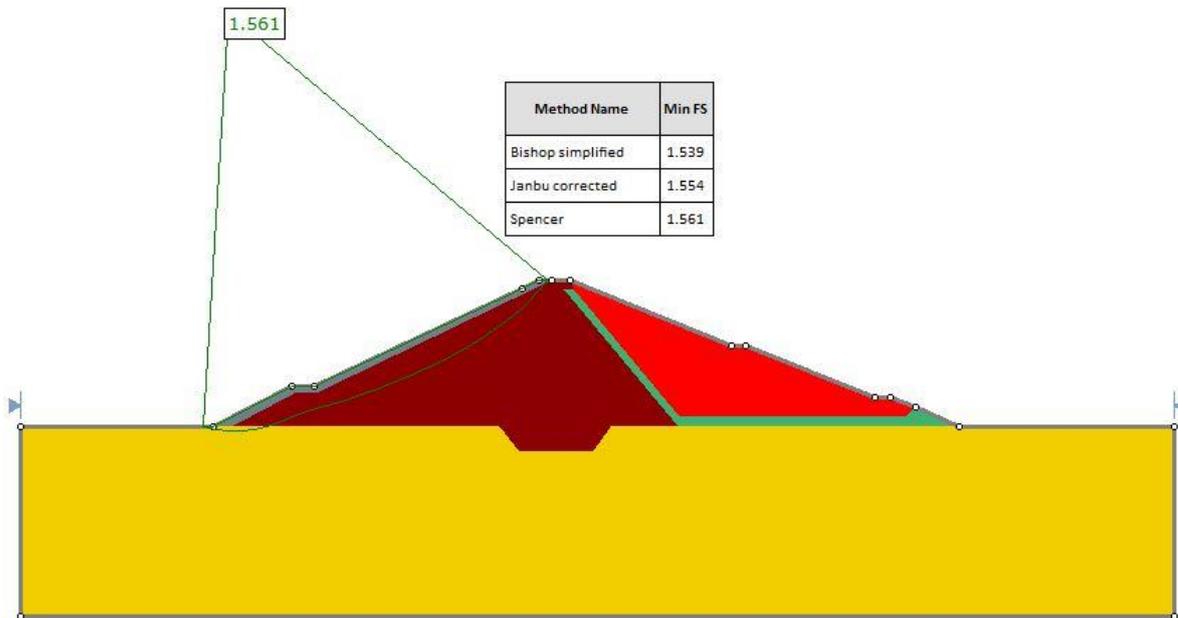


Figura 45: FS aguas arriba con el embalse vacío, método de Cuckoo.

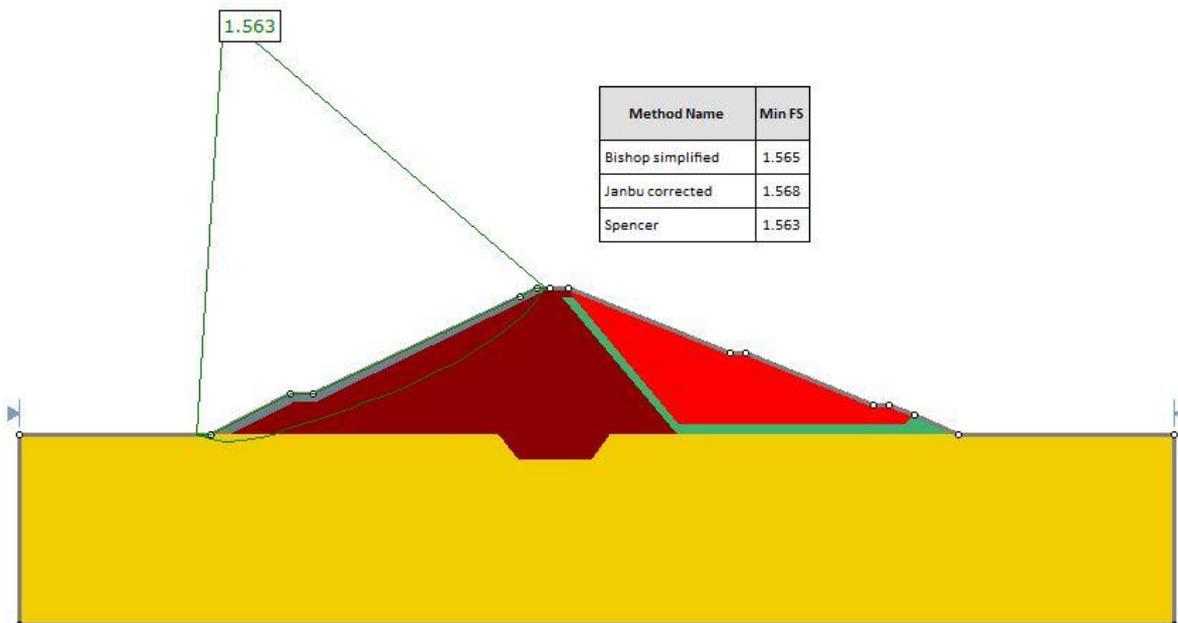


Figura 46: FS aguas arriba con el embalse vacío, método Particle Swarm Search

Talud aguas abajo: Superficie no circular

Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.793
Janbu corrected	1.790
Spencer	1.819



Figura 47: FS aguas abajo con el embalse vacío, método de Cuckoo.

Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.856
Janbu corrected	1.864
Spencer	1.851

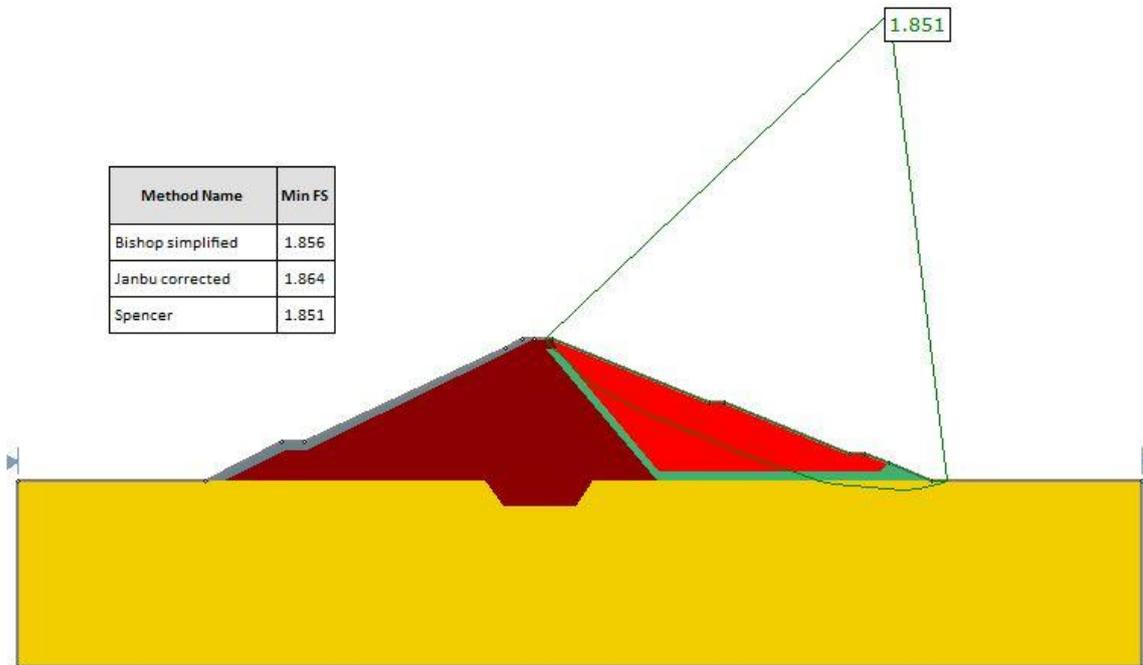


Figura 48: FS aguas abajo con el embalse vacío, método Particle Swarm Search.

SITUACIÓN NORMAL-EMBALSE LLENO N.M.N.

Talud aguas abajo: Superficie circular

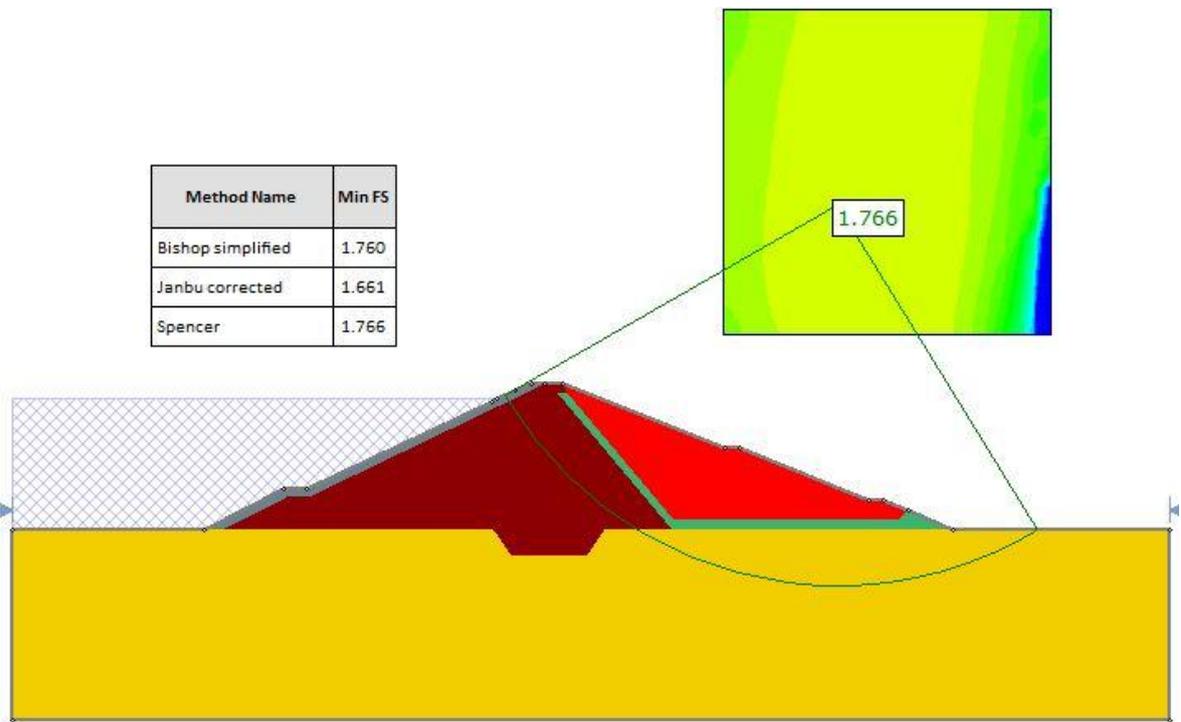


Figura 49: FS aguas abajo, método Grid Search.

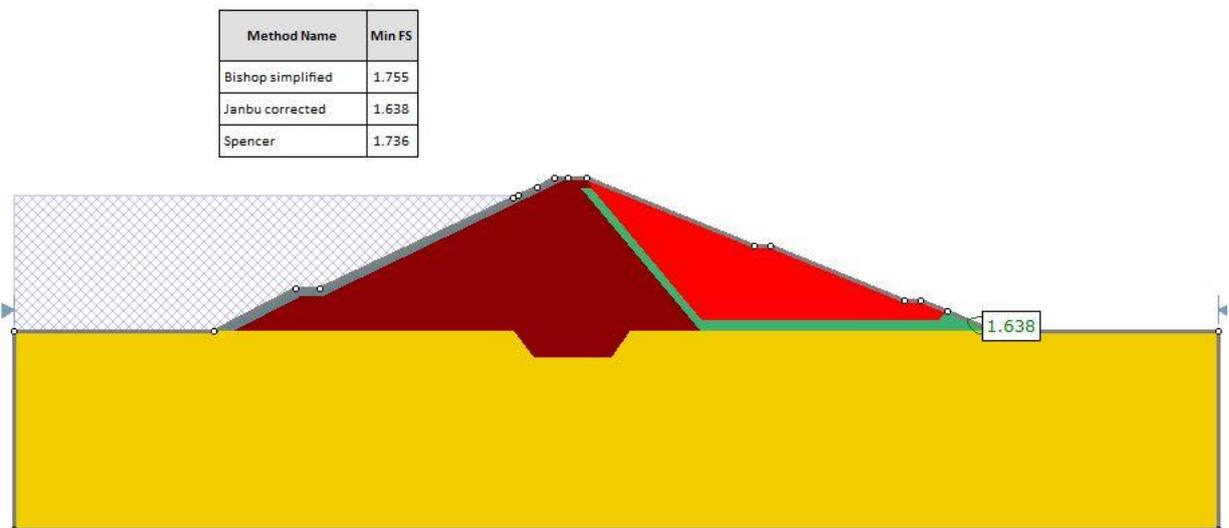


Figura 50: FS aguas abajo, método Auto Refine Search.

Talud aguas abajo: Superficie no circular

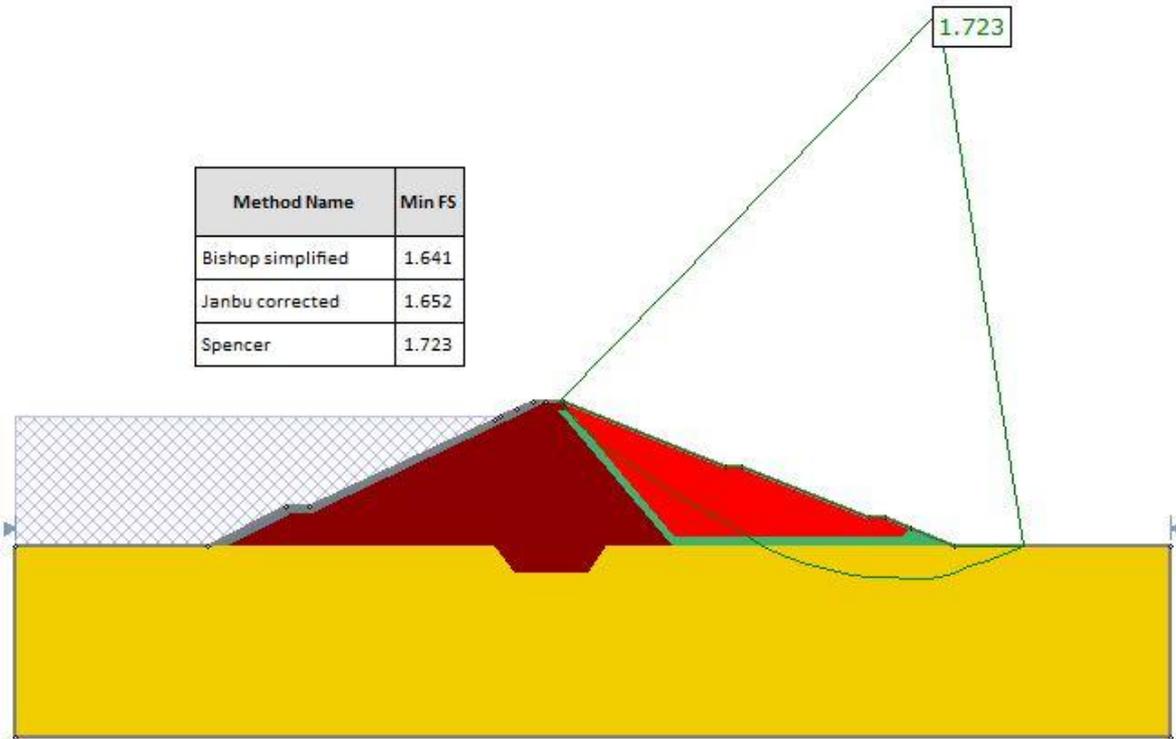


Figura 51: FS aguas abajo, método de Cuckoo

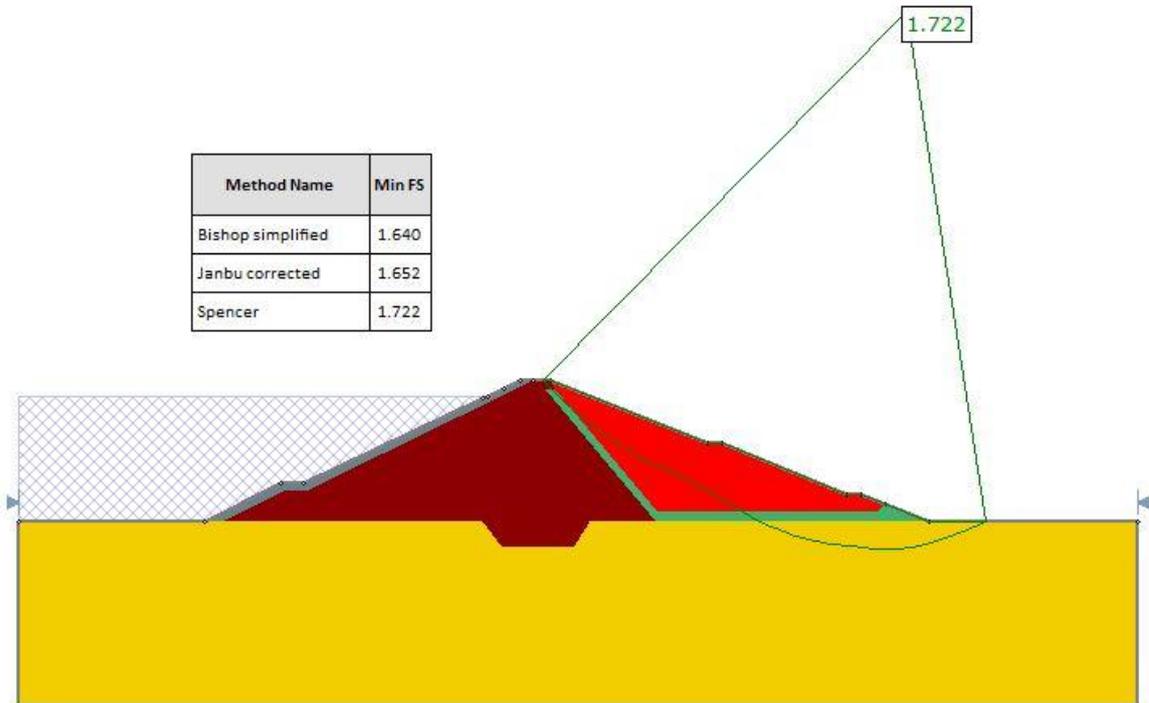


Figura 52: FS aguas abajo, método de Particle Swarm Search.

SITUACIÓN ACCIDENTAL-VACIO+SISMO

Talud aguas arriba: Superficie circular

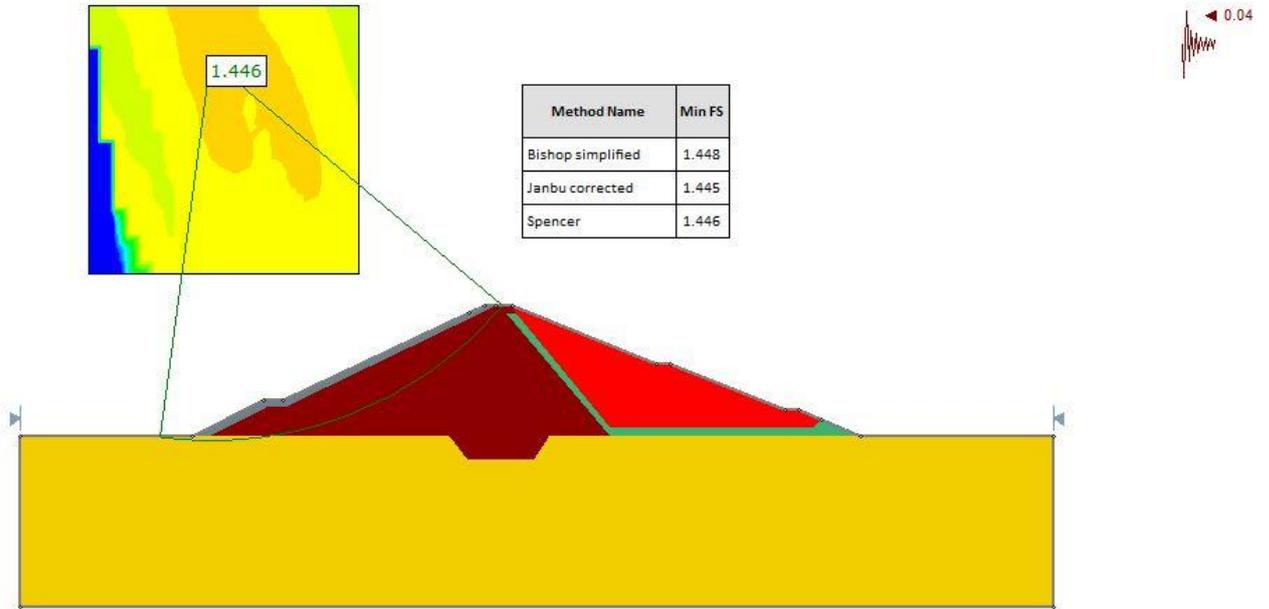


Figura 53: FS Aguas arriba, método de Grid Search.

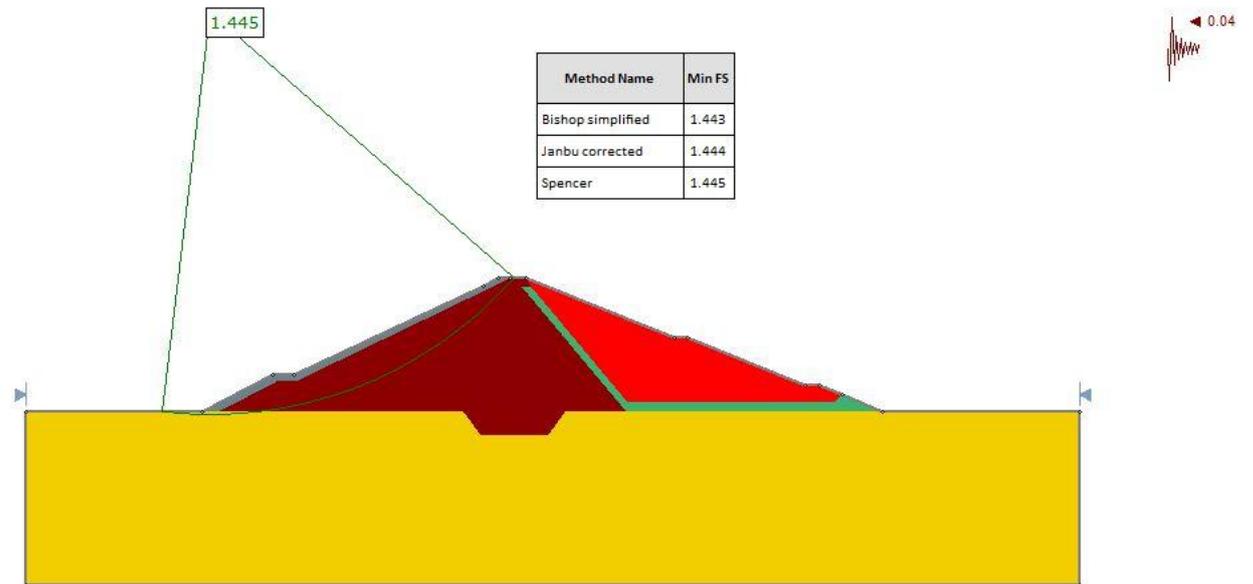


Figura 54: FS Aguas arriba, método de Auto Refine Search.

Talud aguas arriba: Superficie no circular

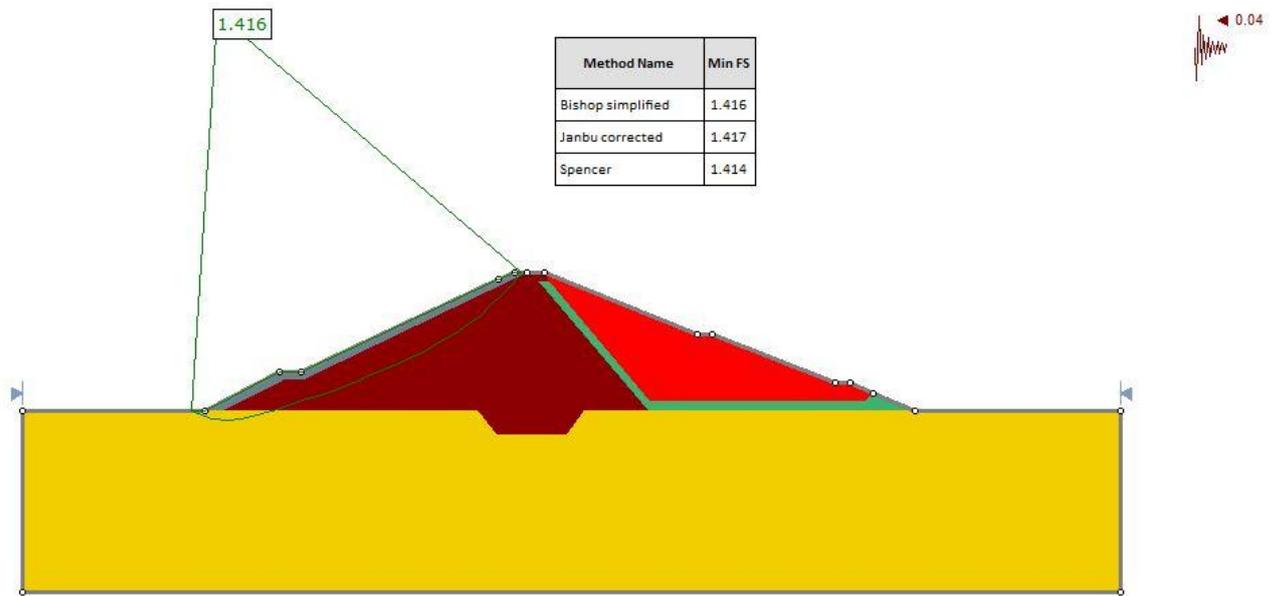


Figura 55: FS Aguas arriba, método de Cuckoo Search.

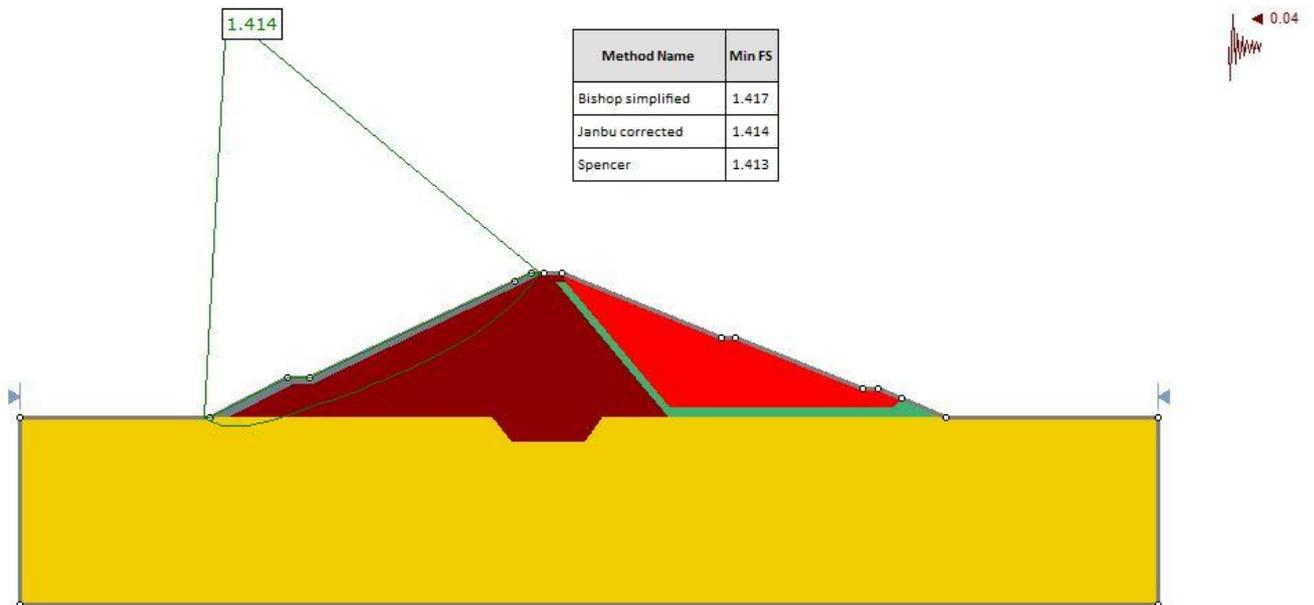


Figura 56: FS Aguas arriba, método Particle Swarm Search.

Talud aguas abajo: Superficie circular

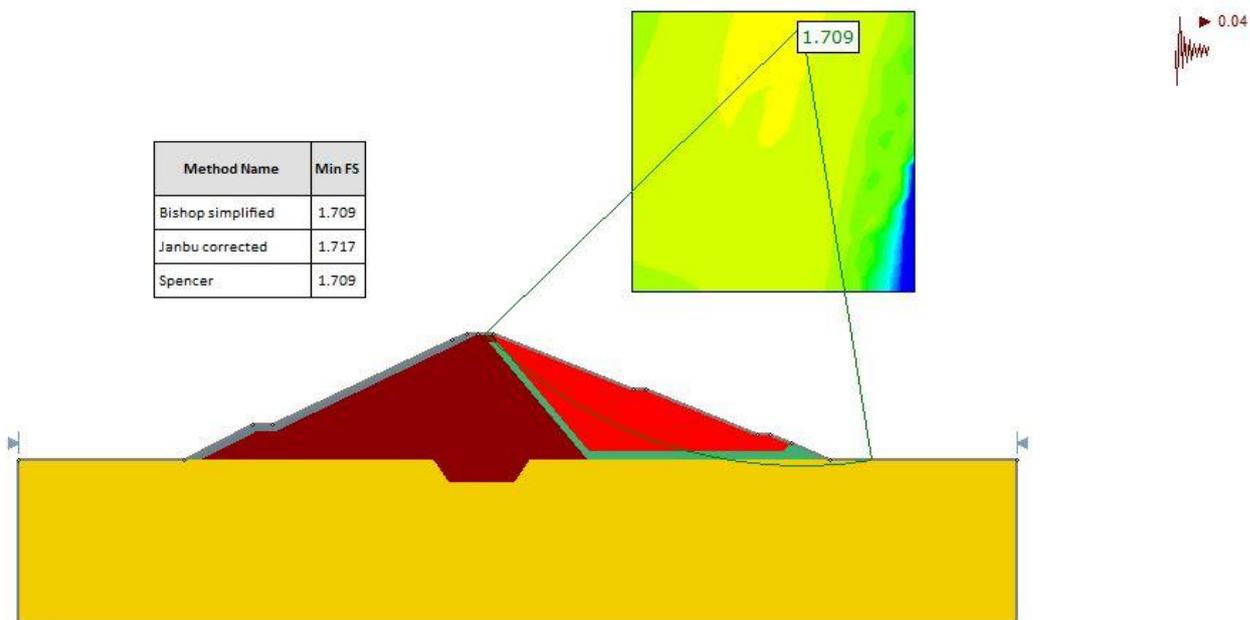


Figura 57: FS Aguas abajo, método Grid Search.

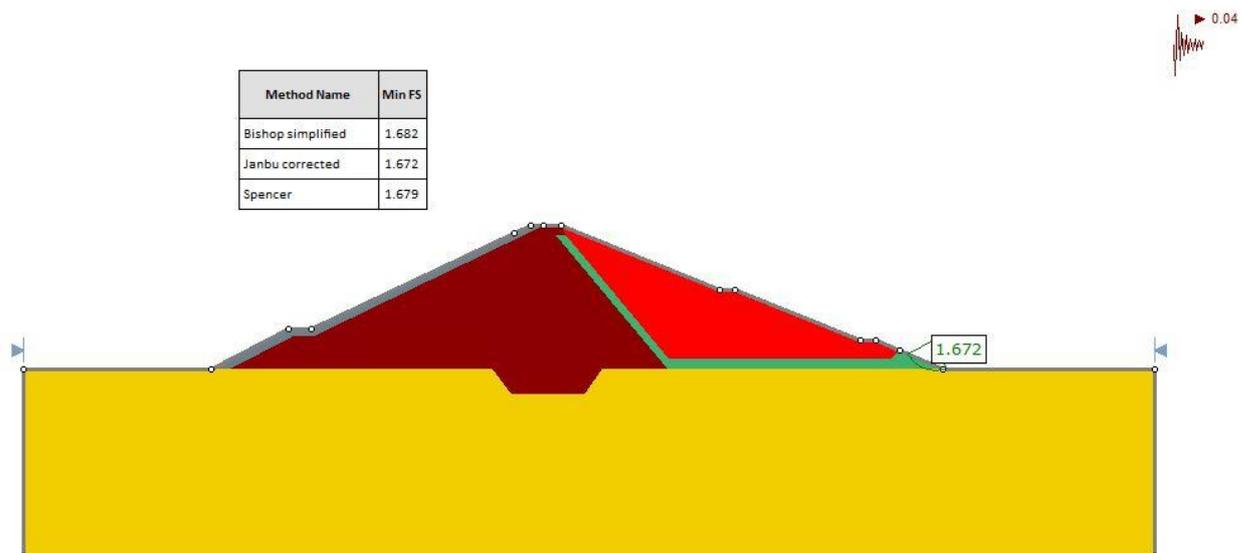


Figura 58: FS Aguas abajo, método de Auto Refine Search

Talud aguas abajo: Superficie no circular

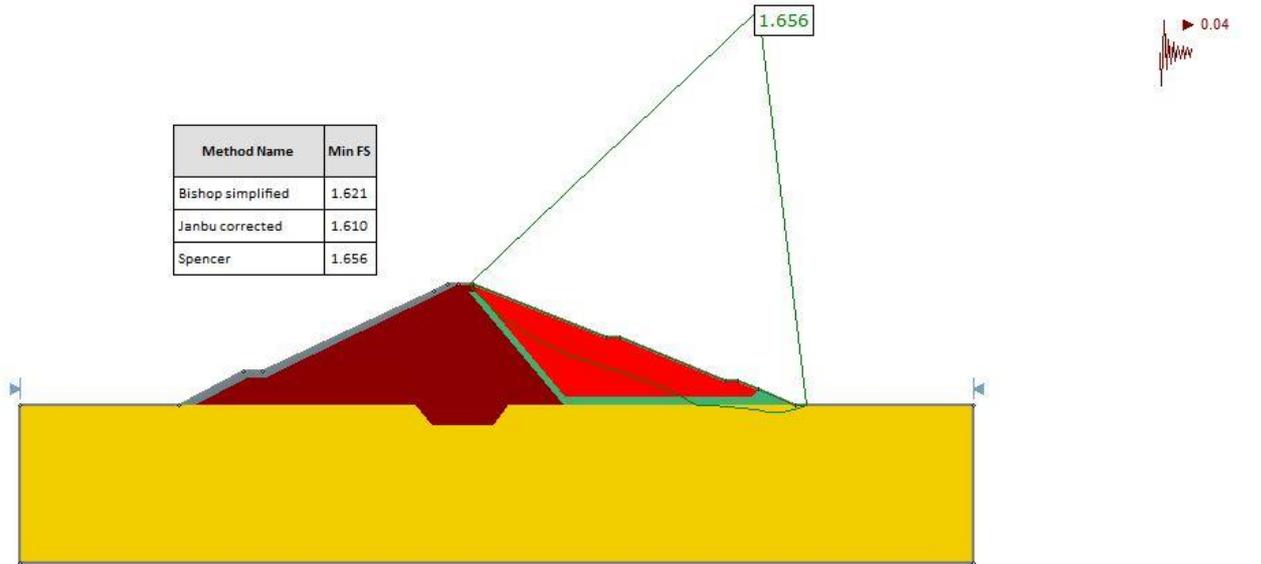


Figura 59: FS Aguas abajo, método de Cuckoo Search.

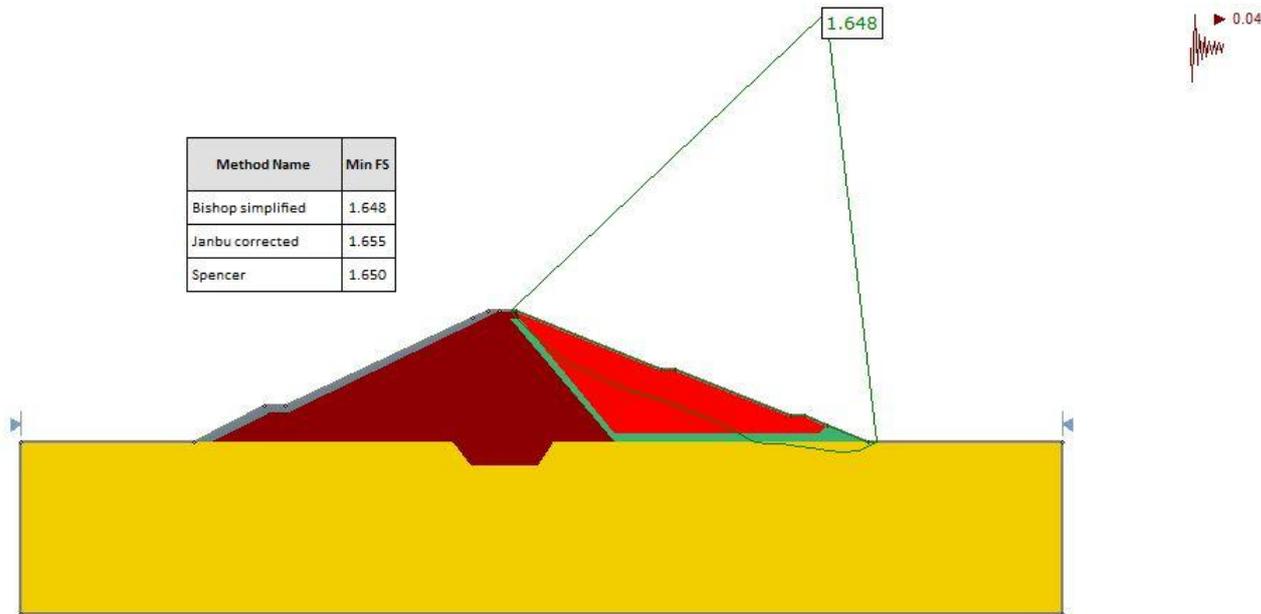


Figura 60: FS Aguas abajo, método de Particle Swarm Search.

SITUACIÓN ACCIDENTAL- EMBALSE LLENO N.A.P.

Talud aguas abajo: Superficie circular

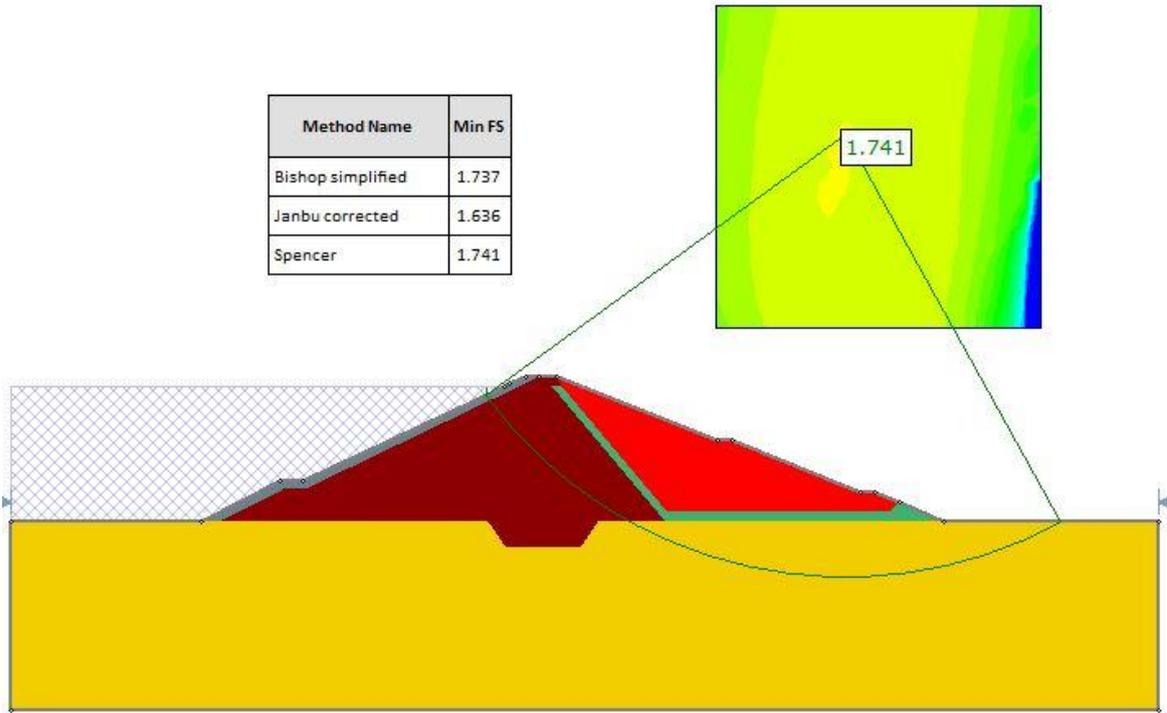


Figura 61: FS Aguas abajo, método de Grid Search.

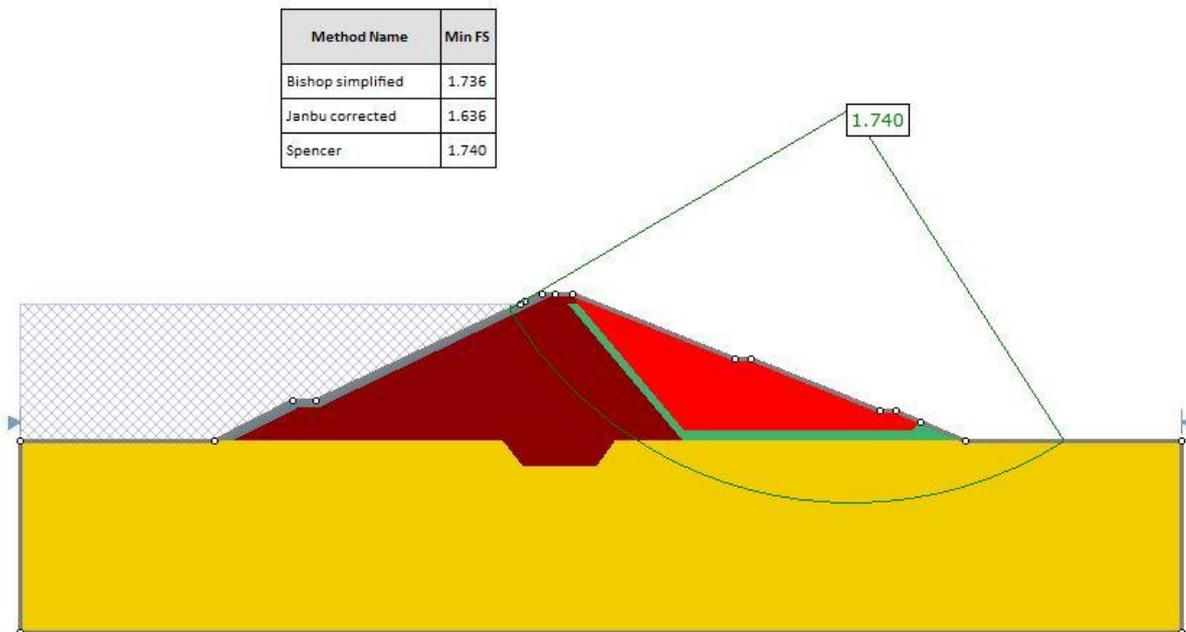


Figura 62: FS Aguas abajo, método se Auto Refine Search.

Talud aguas abajo: Superficie no circular

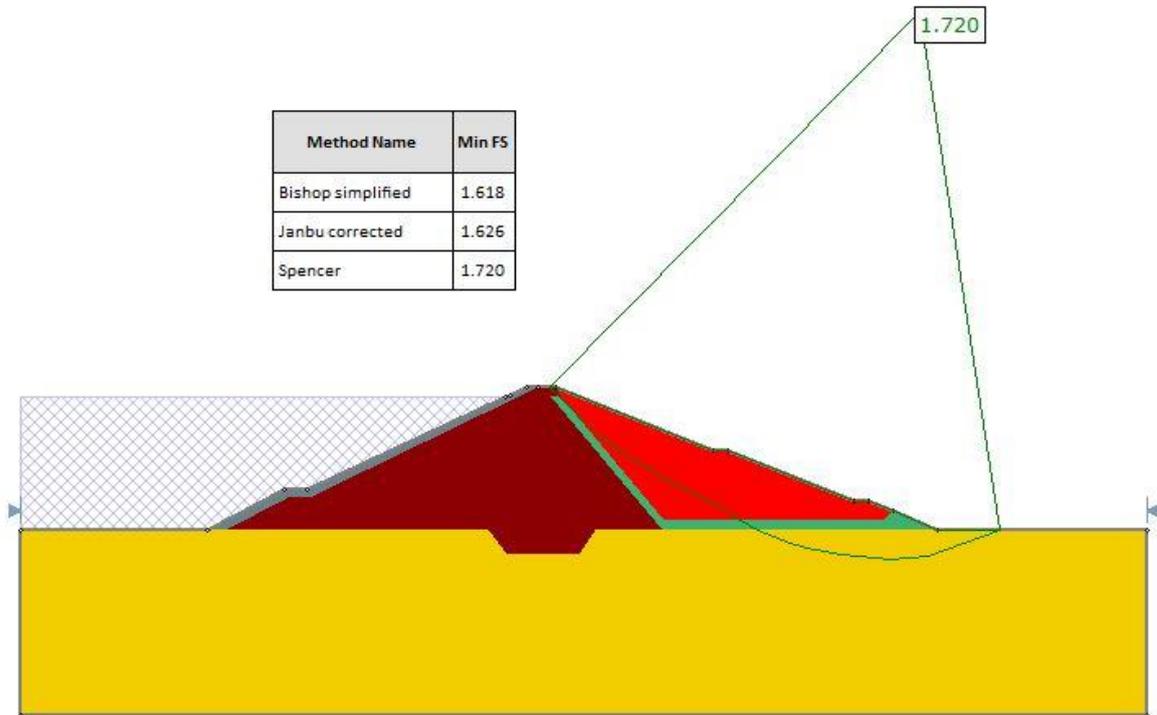


Figura 63: FS Aguas abajo, método de Cuckoo Search.

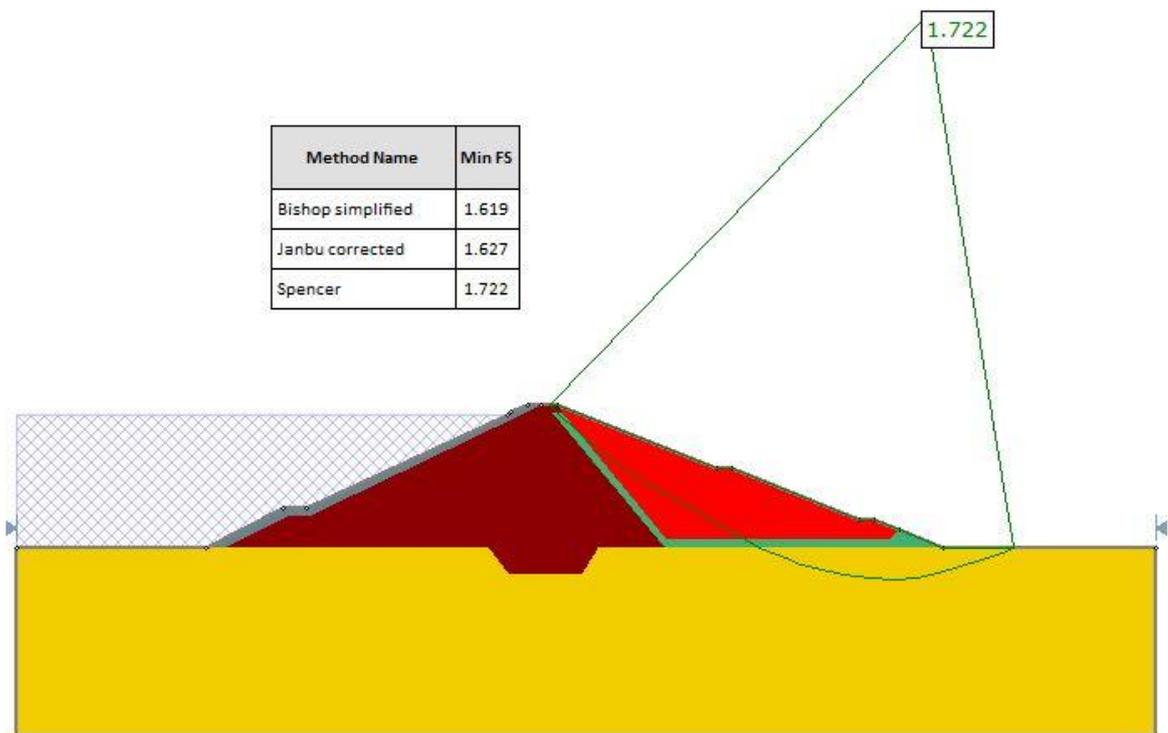


Figura 64: FS Aguas abajo, método de Particle Swarm Search.

SITUACIÓN ACCIDENTAL-DESEMBALSE RÁPIDO

Talud aguas arriba: Superficie circular

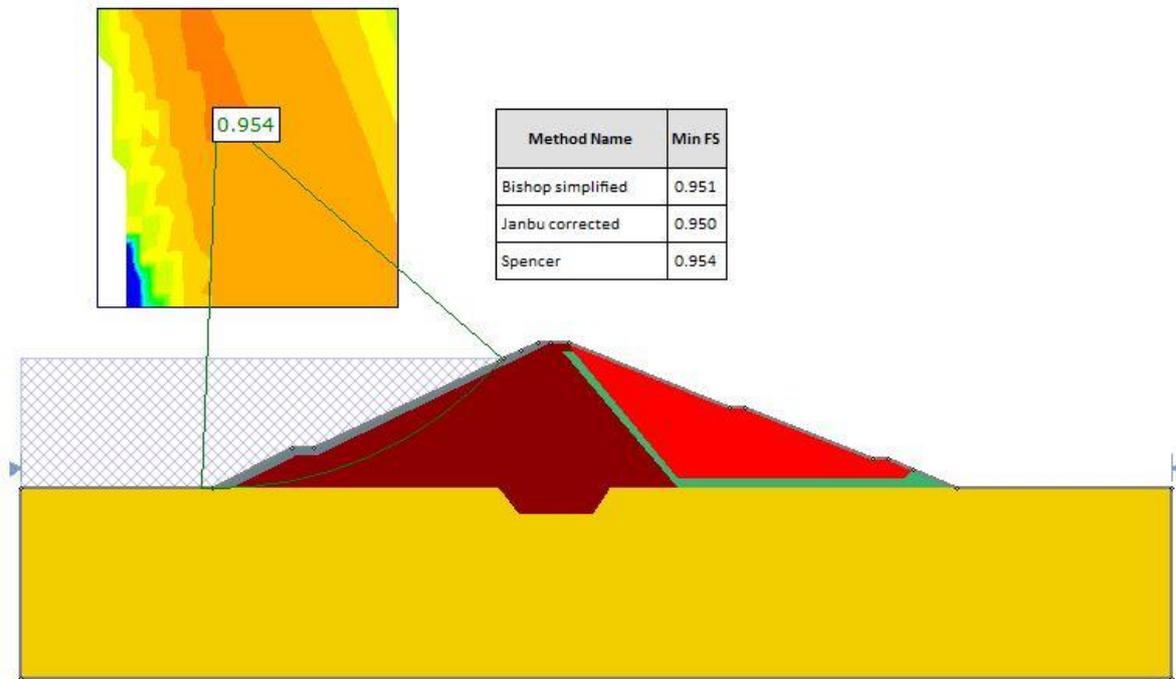


Figura 65: FS aguas arriba, método Grid Search.

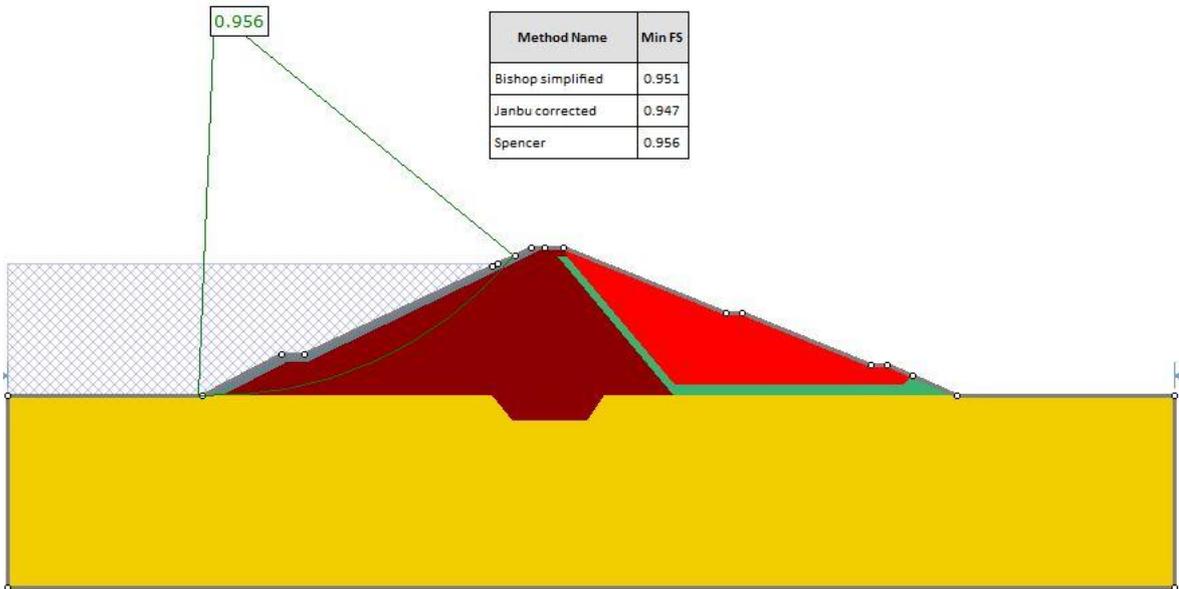


Figura 66: FS aguas arriba, método Auto Refine Search.

Talud aguas arriba: Superficie no circular

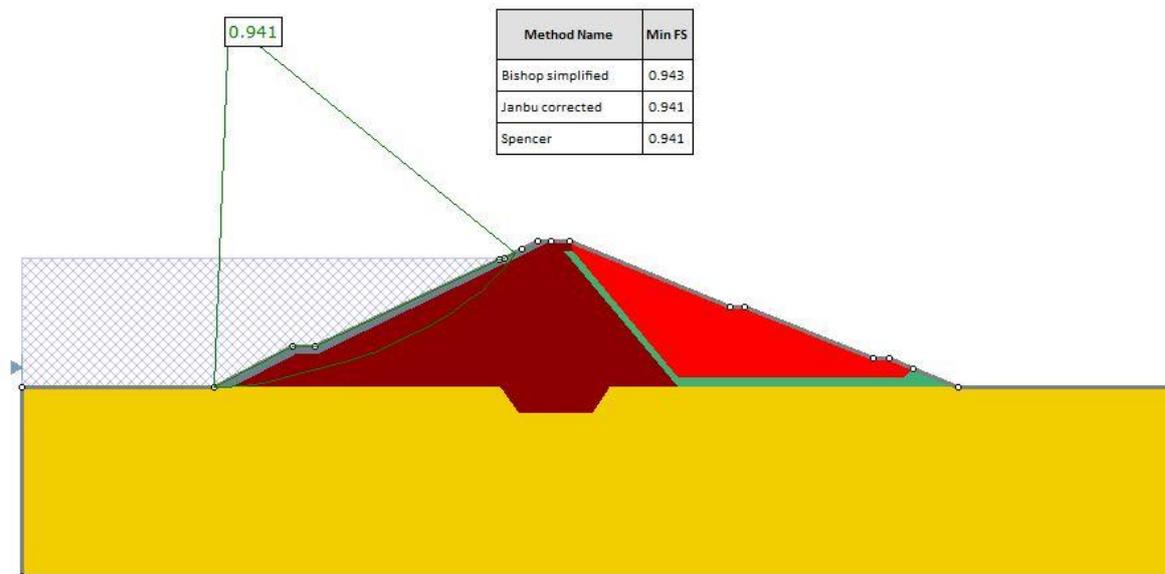


Figura 67: FS aguas arriba, método Cuckoo

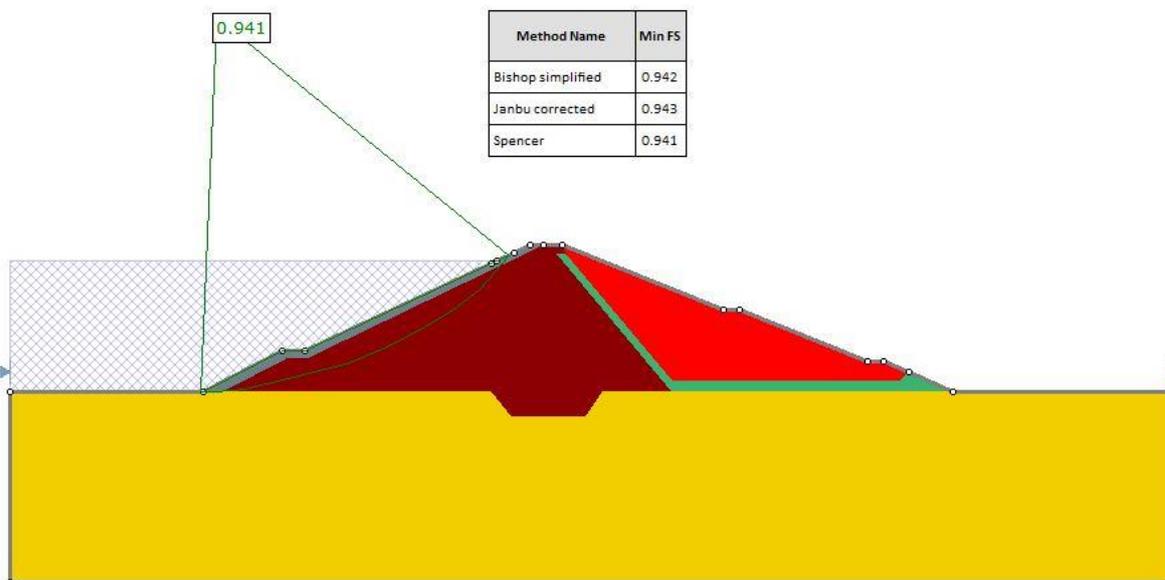


Figura 68: FS aguas arriba, método Particle Swarm Search.

SITUACIÓN ACCIDENTAL- N.M.N. +SISMO

Talud aguas abajo: Superficie circular

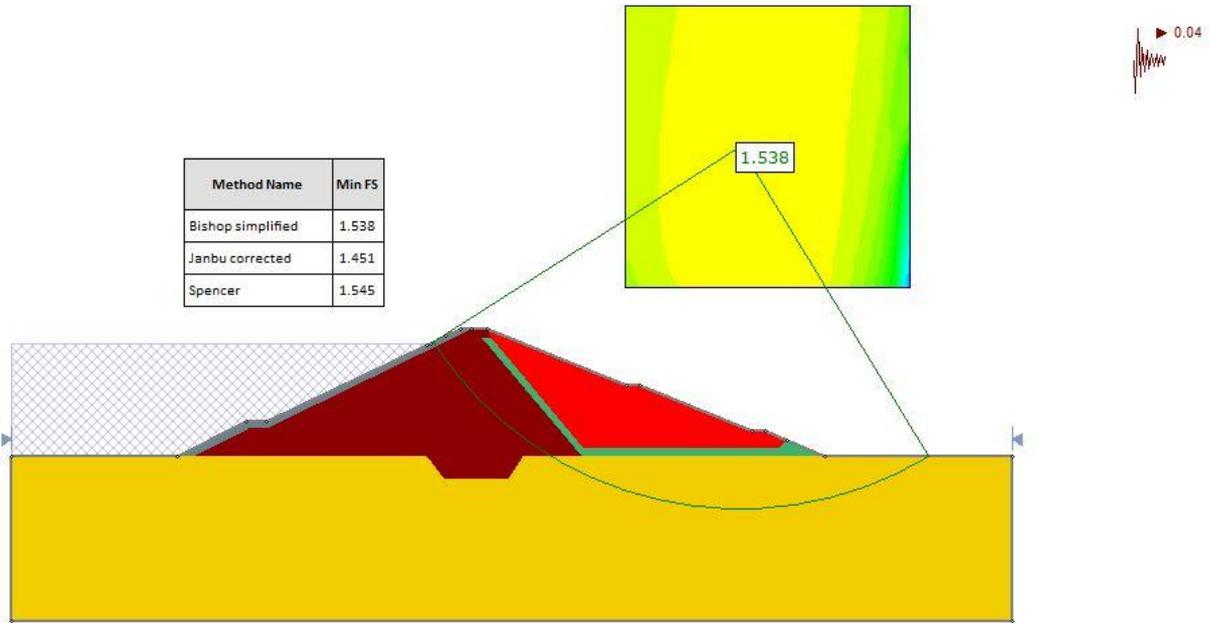


Figura 69: FS aguas abajo, método Grid Search.

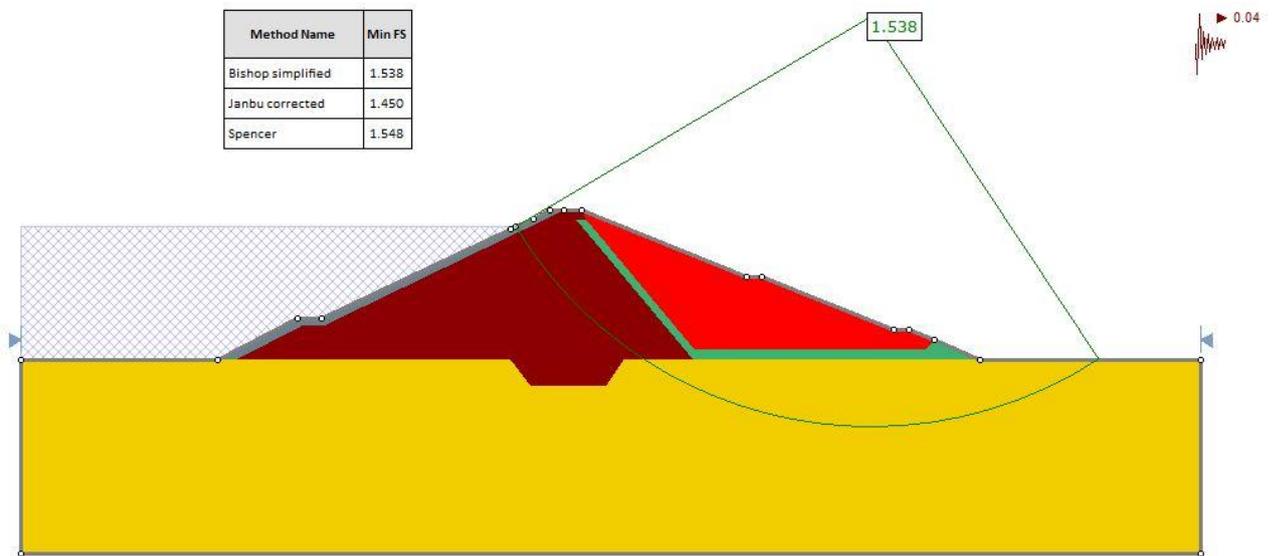


Figura 70: FS aguas abajo, método Auto Refine Search.

Talud aguas abajo: Superficie no circular

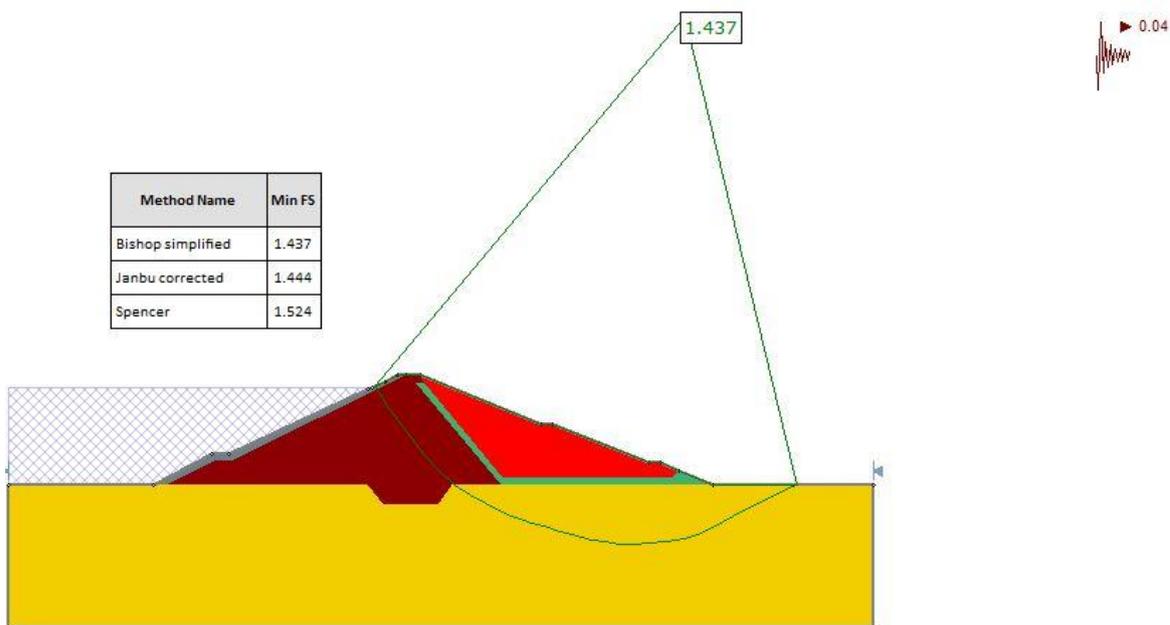


Figura 71: FS aguas abajo, método de Cuckoo.

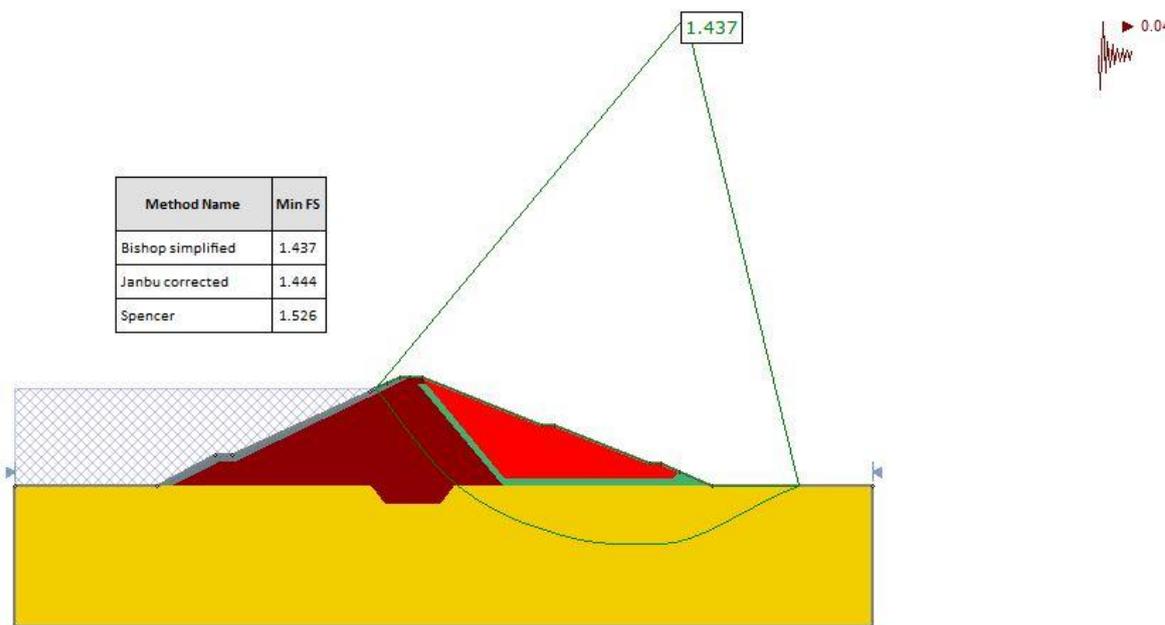


Figura 72: FS aguas abajo, método Particle Swarm Search.

SITUACIÓN EXTREMA-EMBALSE LLENO N.A.E.

Talud aguas abajo: Superficie circular

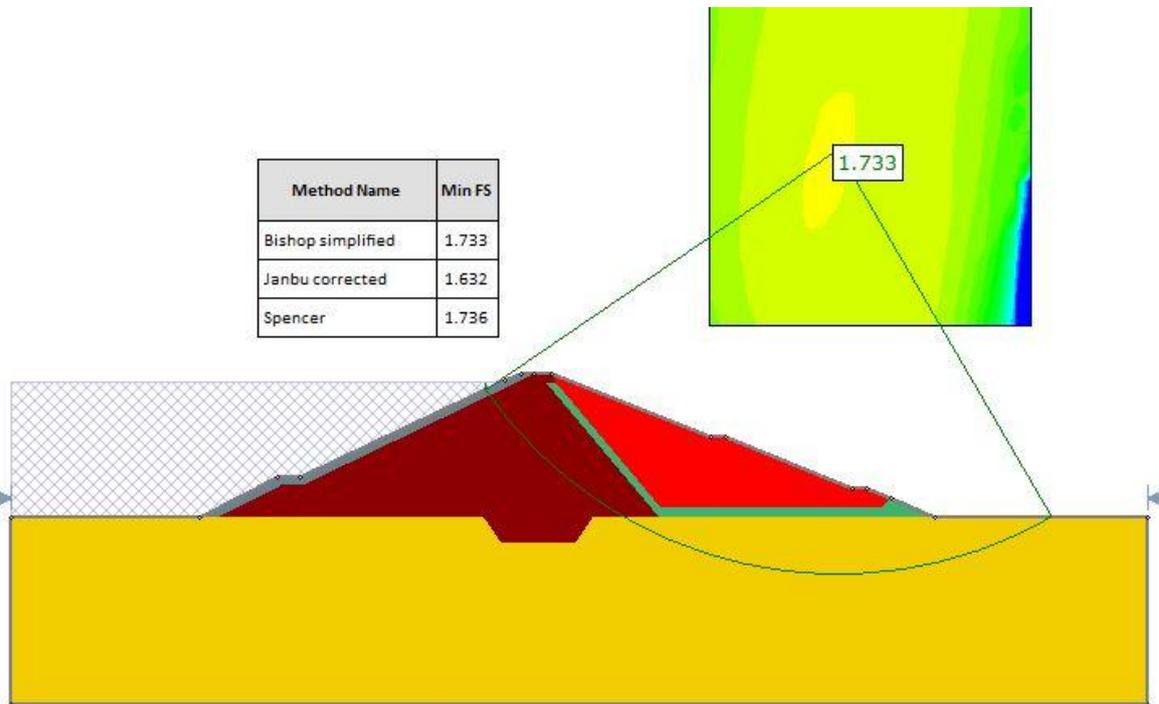


Figura 73:FS aguas abajo, método Grid Search.

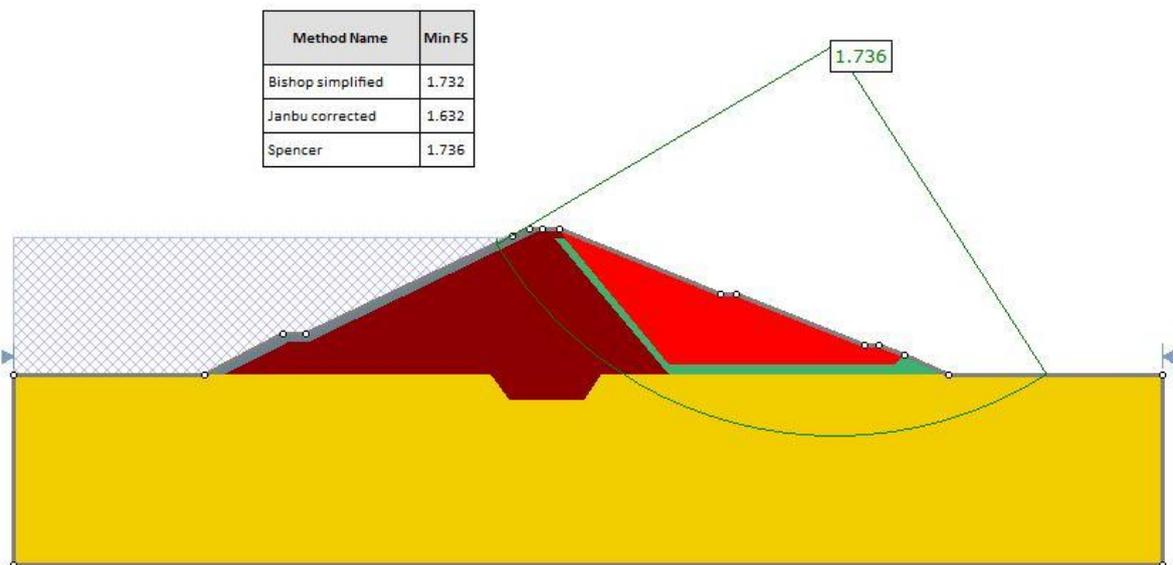


Figura 74: FS aguas abajo, método Auto Refine Search.

Talud aguas abajo: Superficie no circular

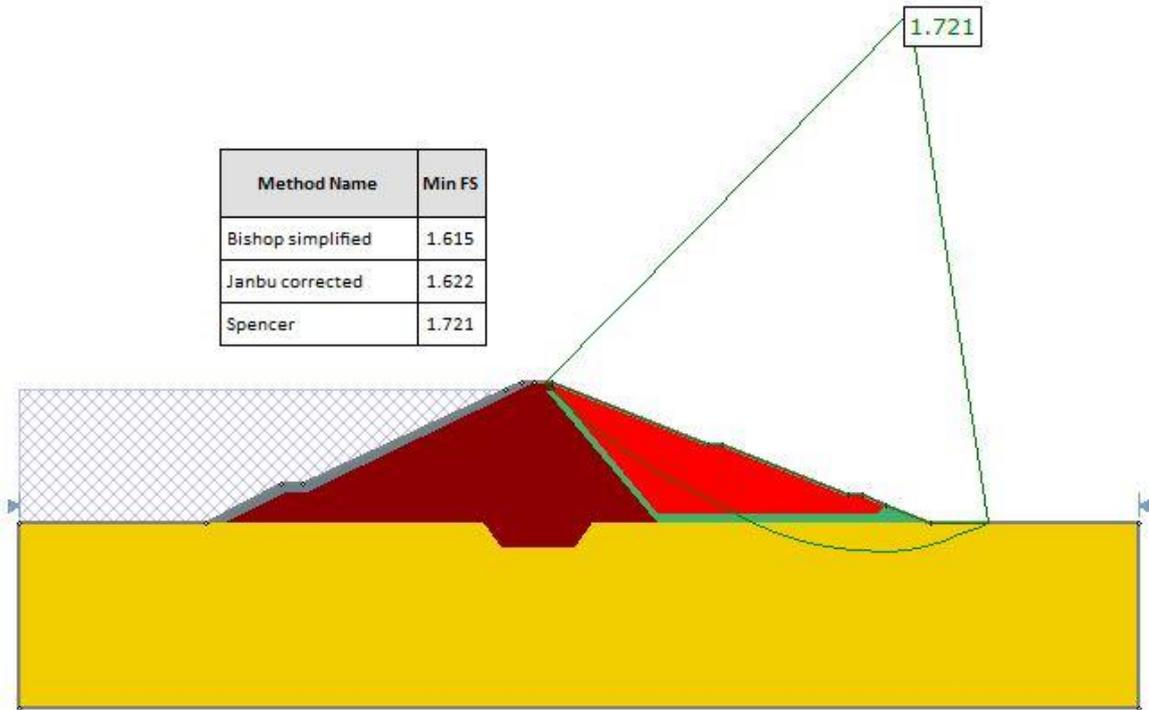


Figura 75: FS aguas abajo, método de Cuckoo Search.

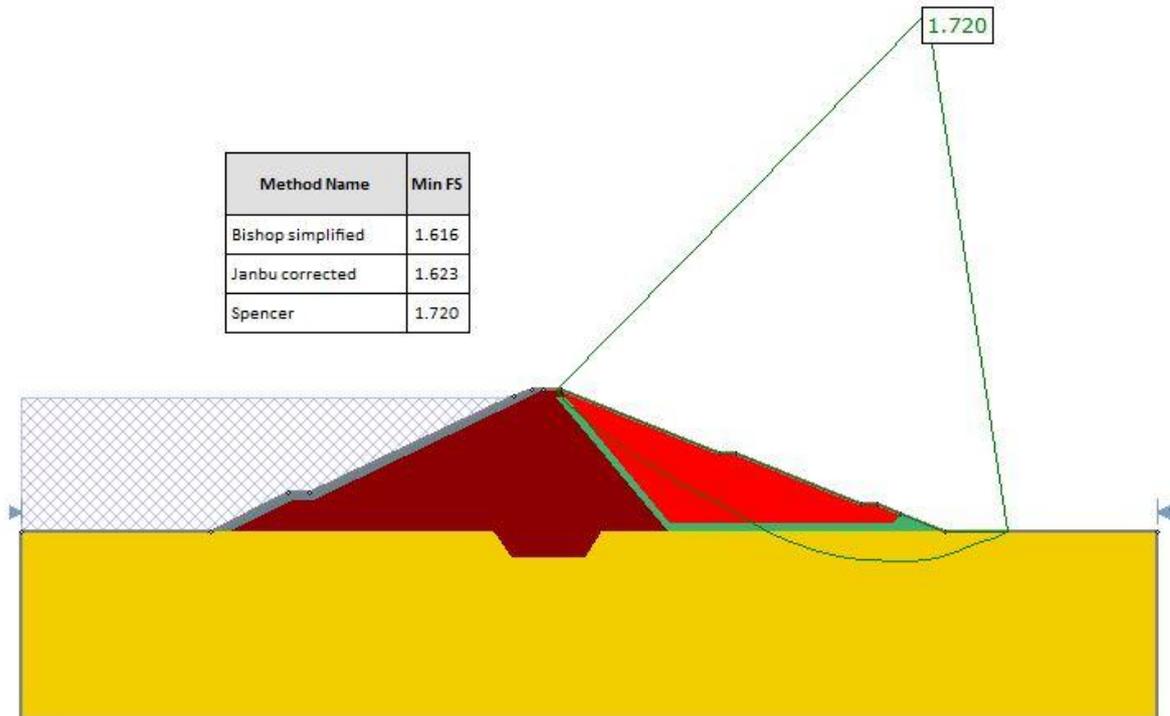


Figura 76: FS aguas abajo, método Particles Swarm Search.

SITUACIÓN EXTREMA- DESEMBALSE RÁPIDO + SISMO

Talud aguas arriba: Superficie circular

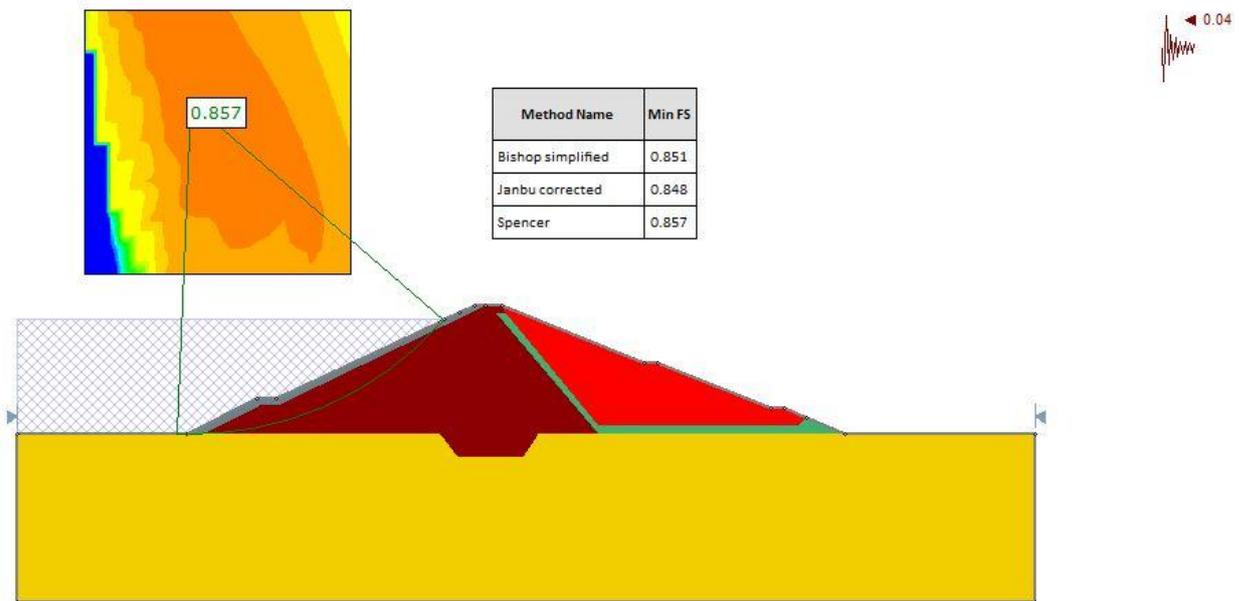


Figura 77: FS aguas arriba, método Grid Search.

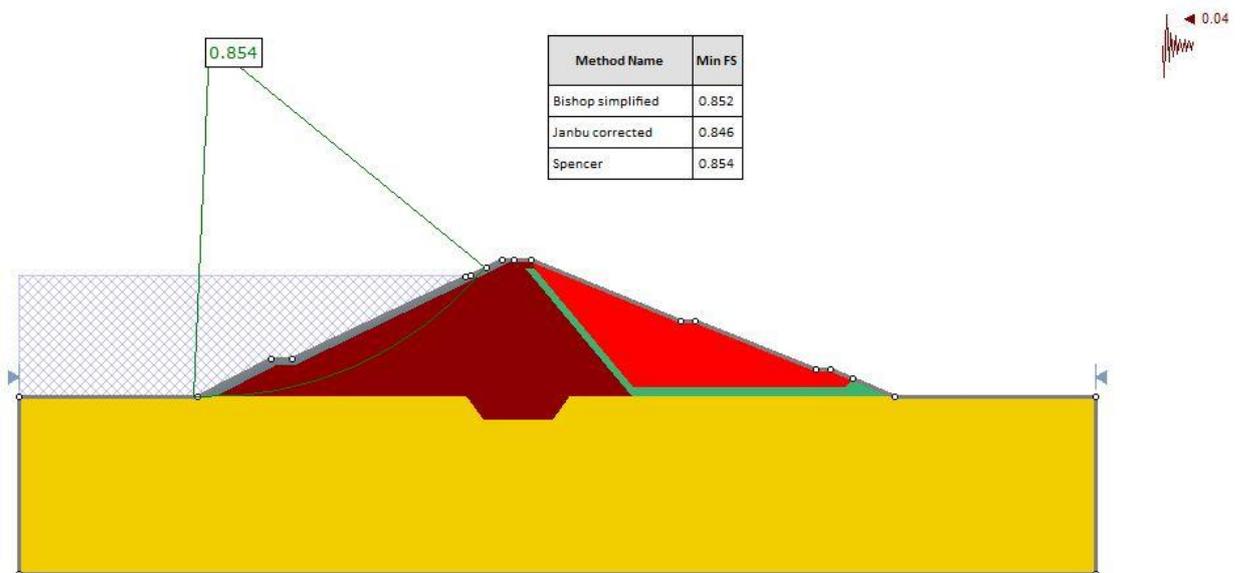


Figura 78: FS Aguas arriba, método Auto Refine Search.

Talud aguas arriba: Superficie no circular

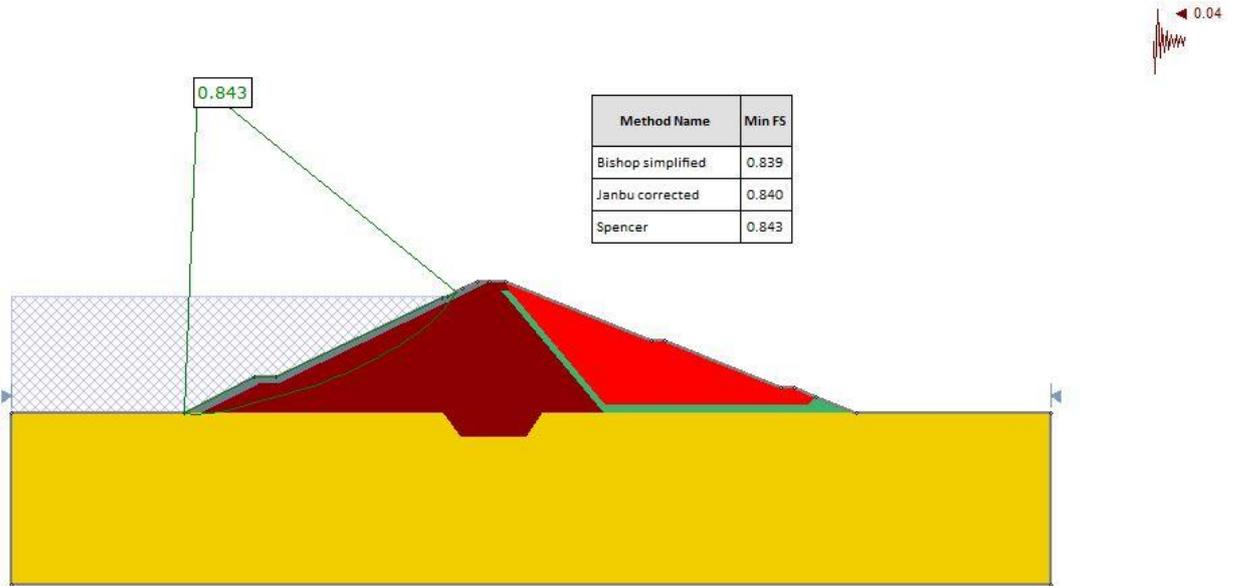


Figura 79: FS Aguas arriba, método de Cuckoo Search.

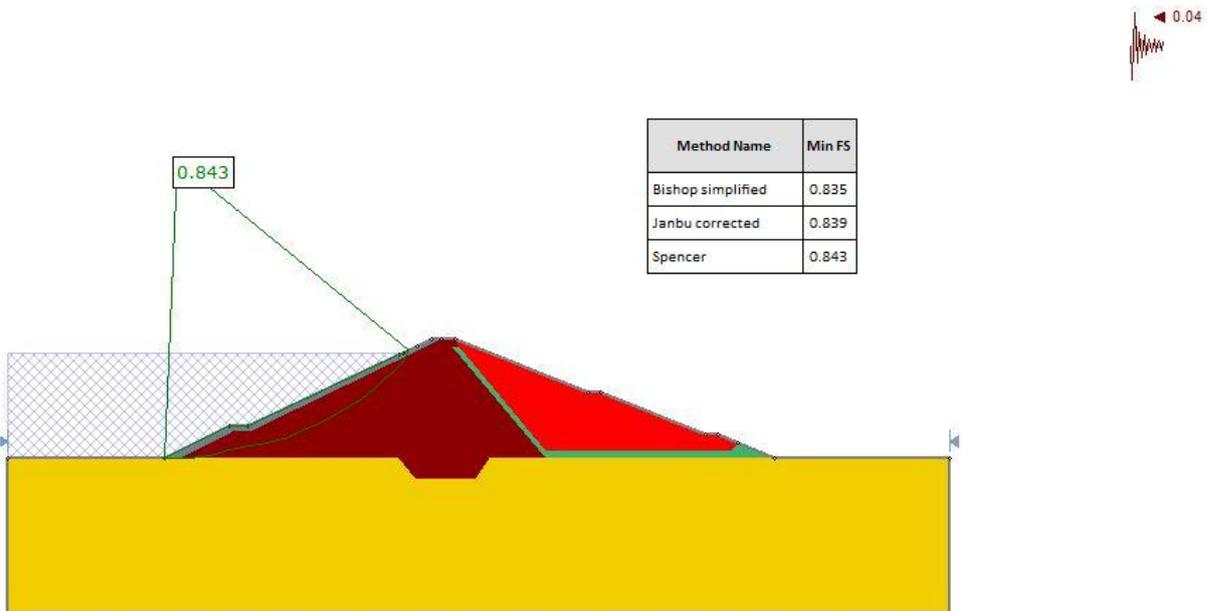


Figura 80: FS Aguas arriba, método de Particles Swarm Search.

ANEXO DE CÁLCULO 2-SECCIÓN CONSTRUIDA

En el siguiente anexo se mostrarán los cálculos realizados por el programa “SLIDE 2D” en el análisis estructural de la sección construida.

FACTORES DE SEGURIDAD

SITUACIÓN NORMAL-EMBALSE VACIO

Talud aguas arriba: Superficie circular

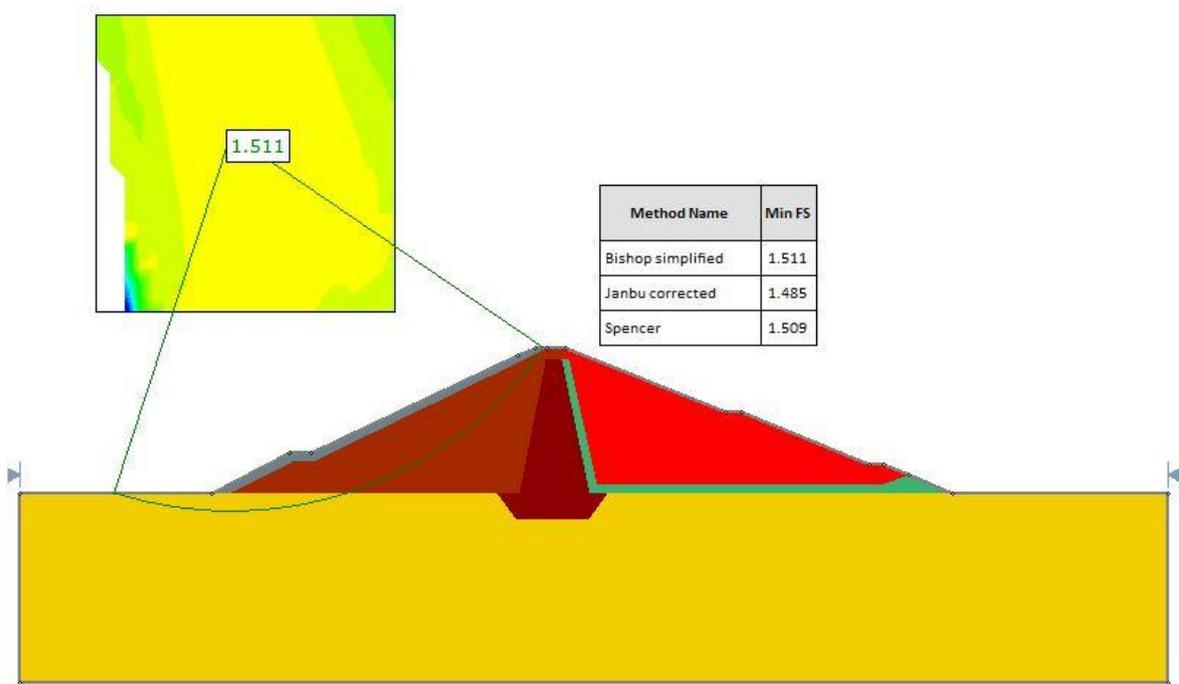


Figura 81: FS aguas arriba, método Grid Search

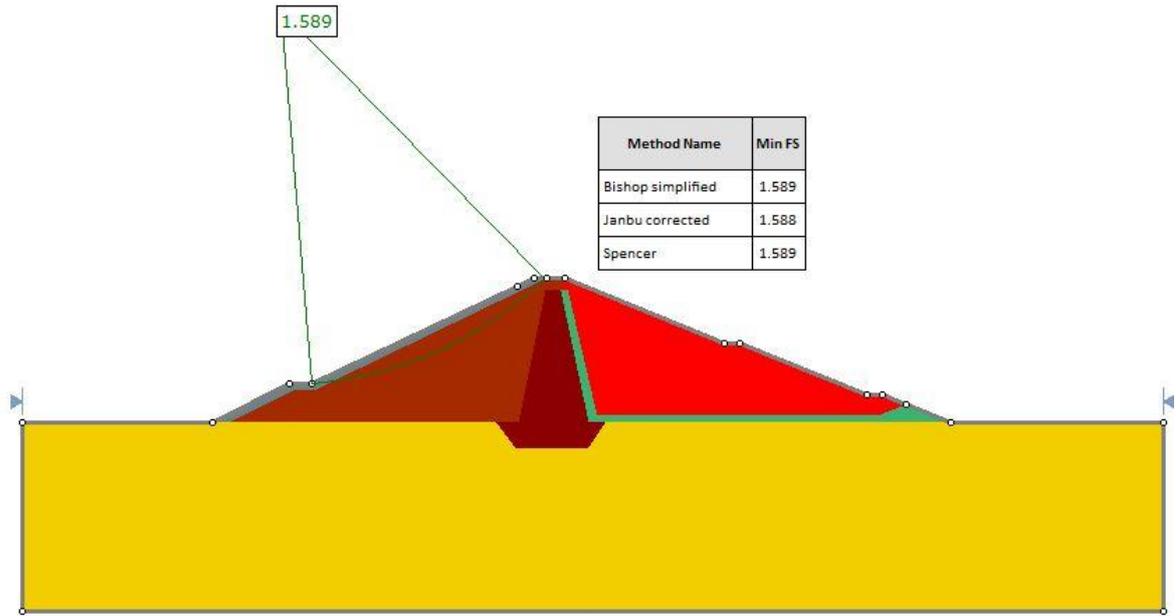


Figura 82: FS aguas arriba, método Auto Refine Search

Talud aguas abajo: Superficie circular

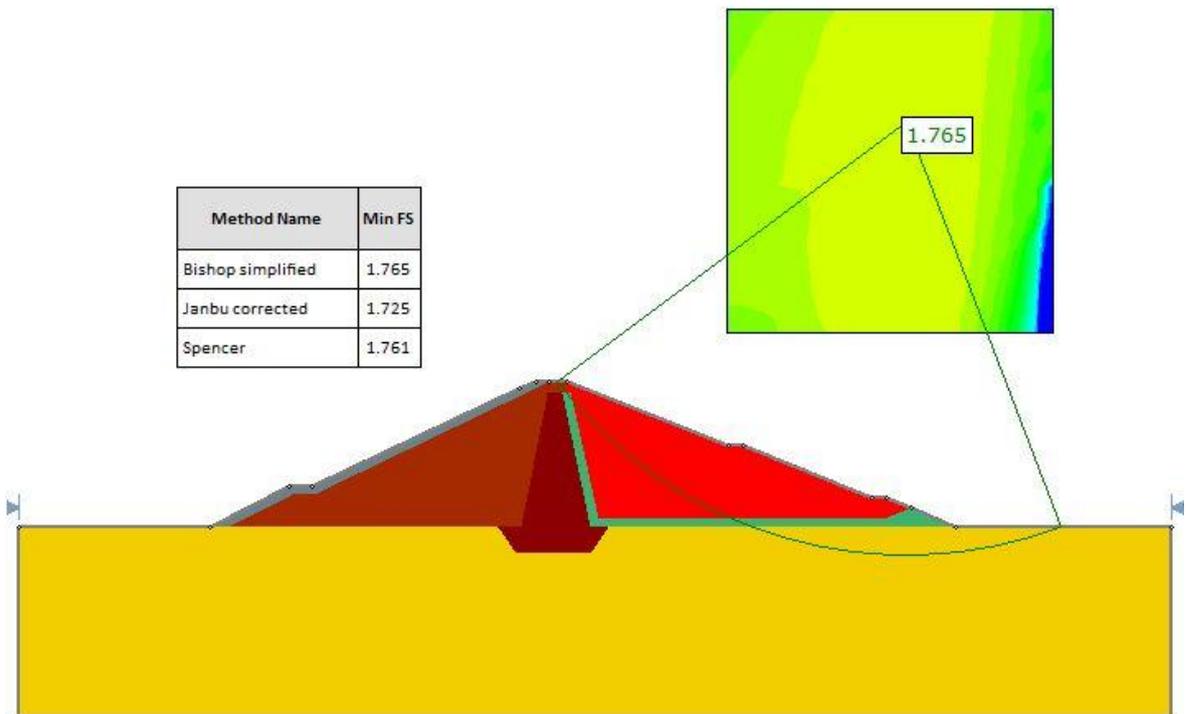


Figura 83: FS aguas abajo, Grid Search

Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.872
Janbu corrected	1.868
Spencer	1.870

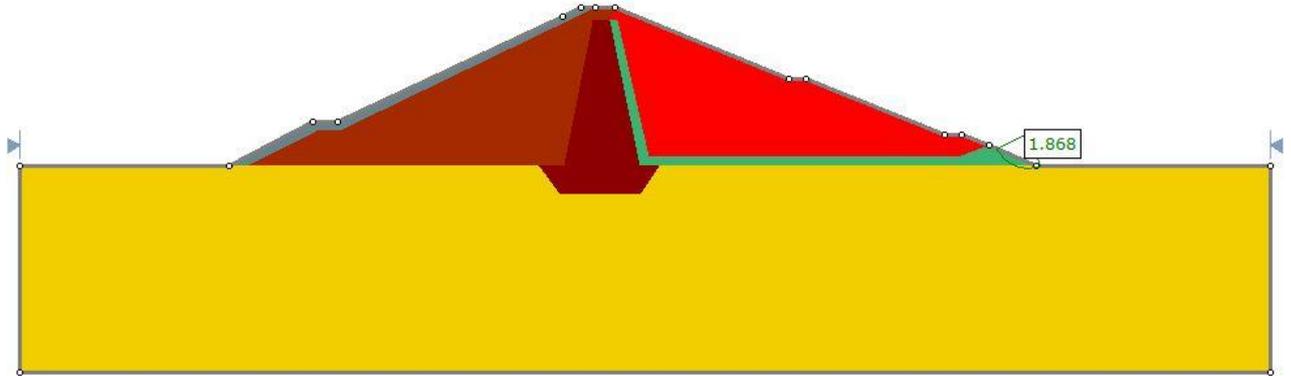


Figura 84: FS aguas abajo, método de Auto Refine Search.

Talud aguas arriba: Superficie no circular

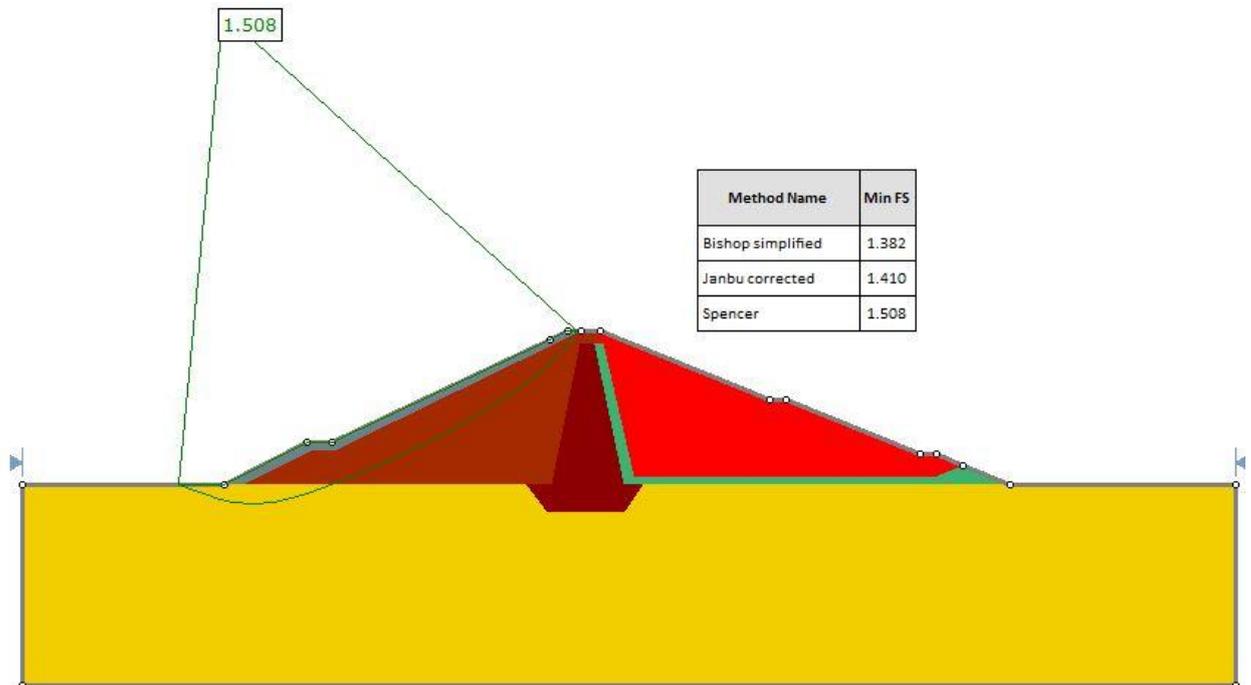


Figura 85: FS aguas arriba, método de Cuckoo Search.

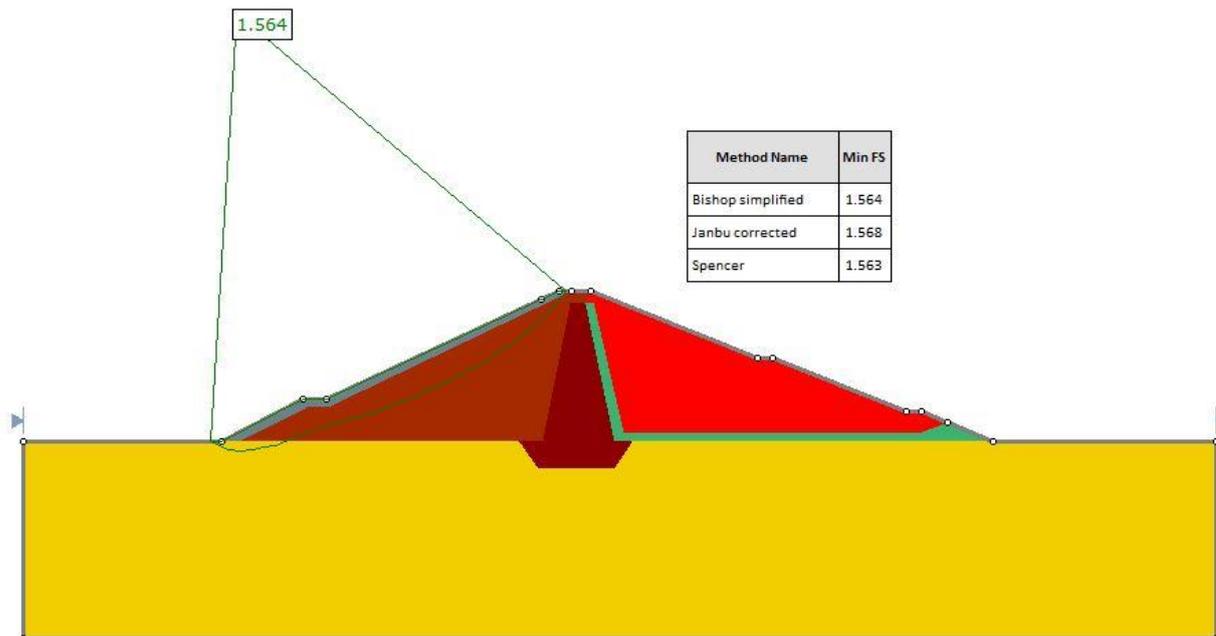


Figura 86: FS aguas arriba, método de Particles Swarm Search.

Talud aguas abajo: Superficie no circular

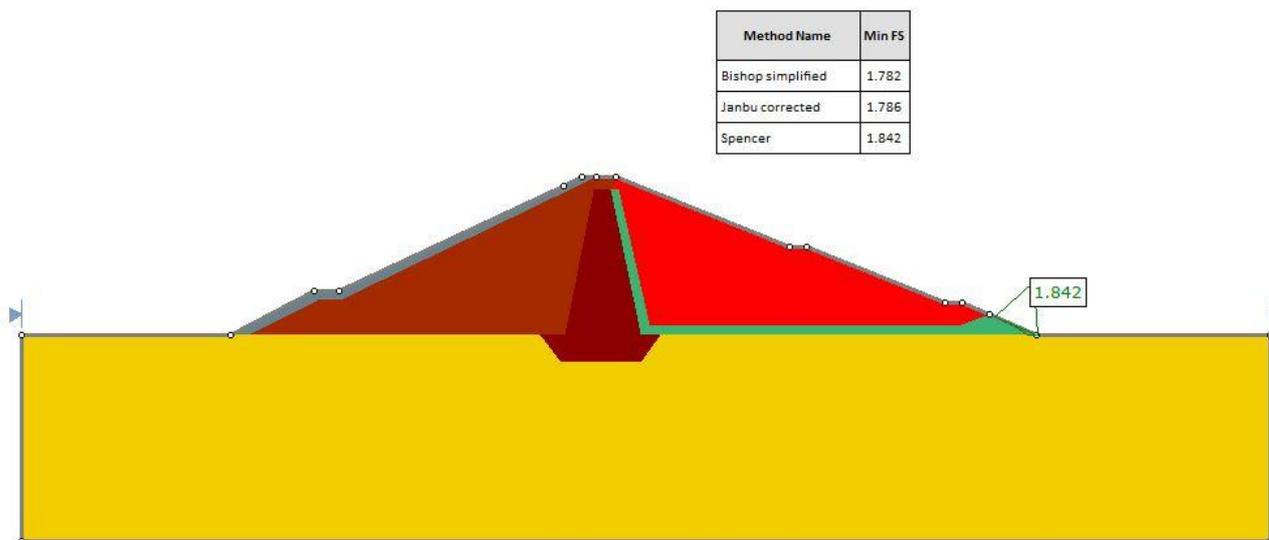


Figura 87: FS aguas abajo, método de Cuckoo Search

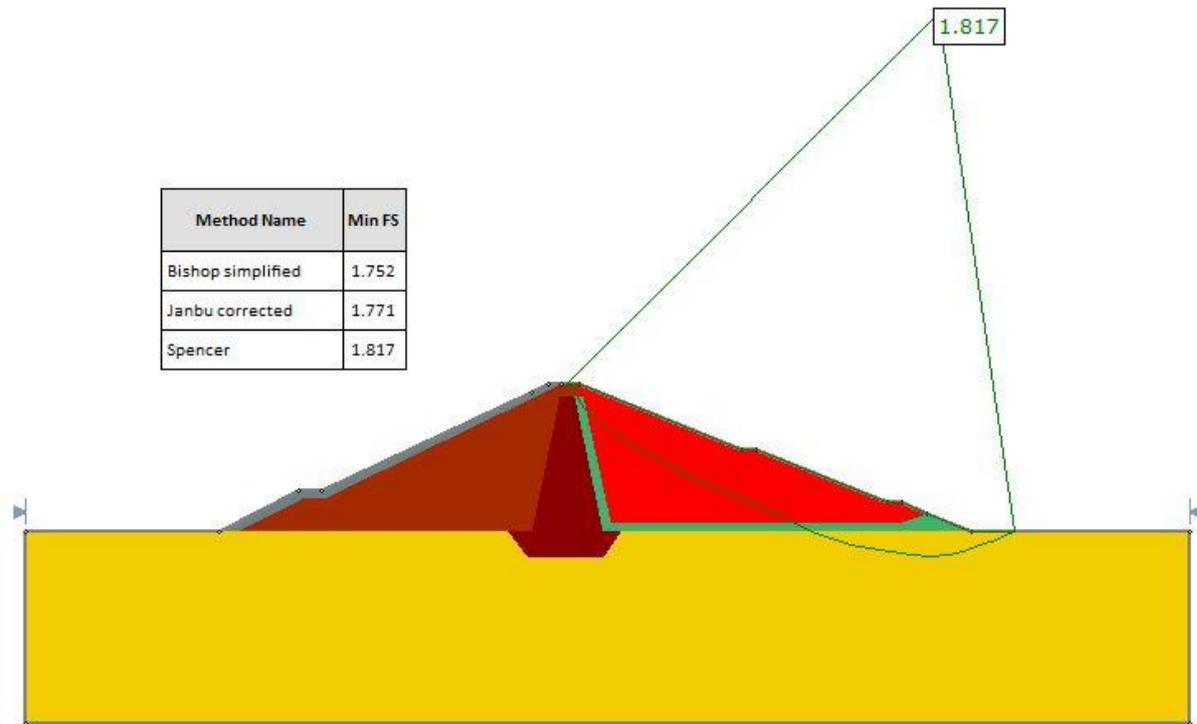


Figura 88: FS aguas abajo, método Particles Swarm Search.

SITUACIÓN NORMAL-EMBALSE LLENO N.M.N.

Talud aguas abajo: Superficie Circular

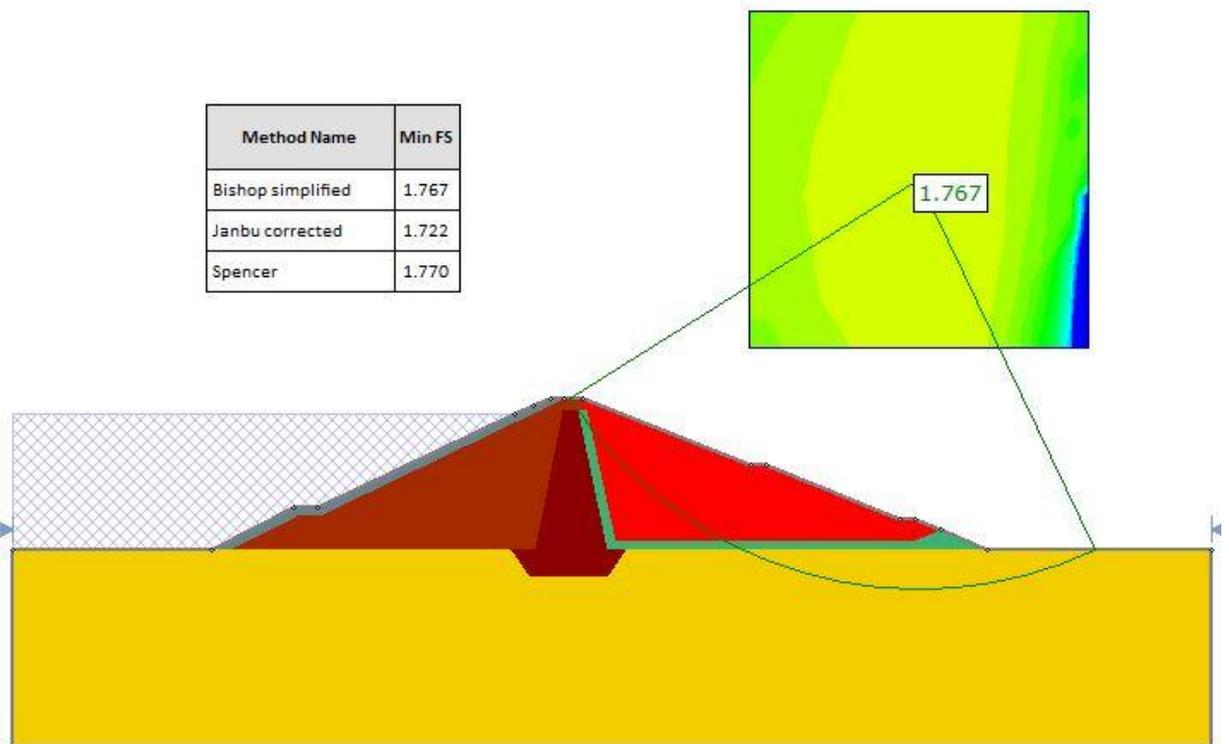


Figura 89: FS aguas abajo, método Grid Search.

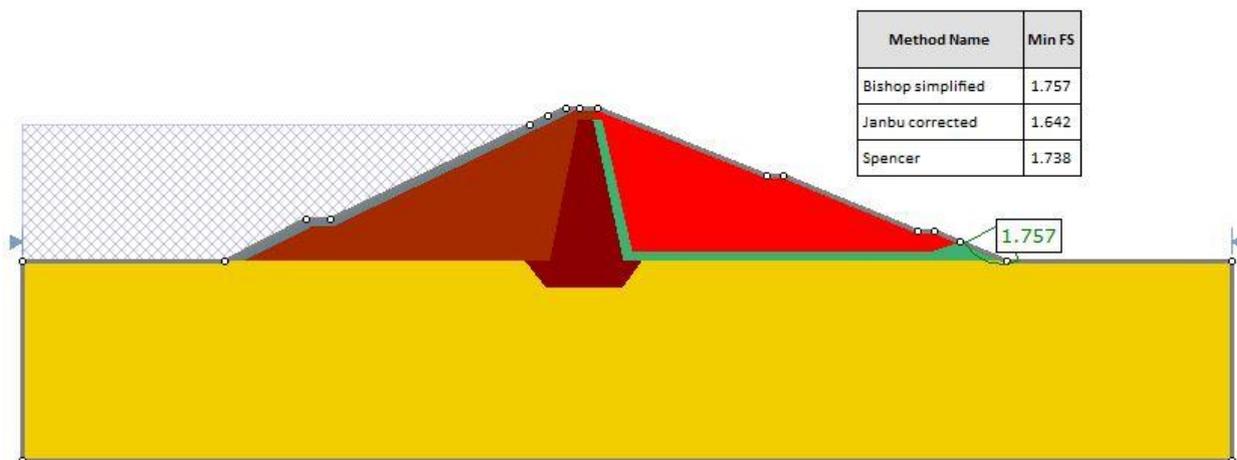


Figura 90: FS aguas abajo, método de Auto Refine Search.

Talud aguas abajo: Superficie no circular

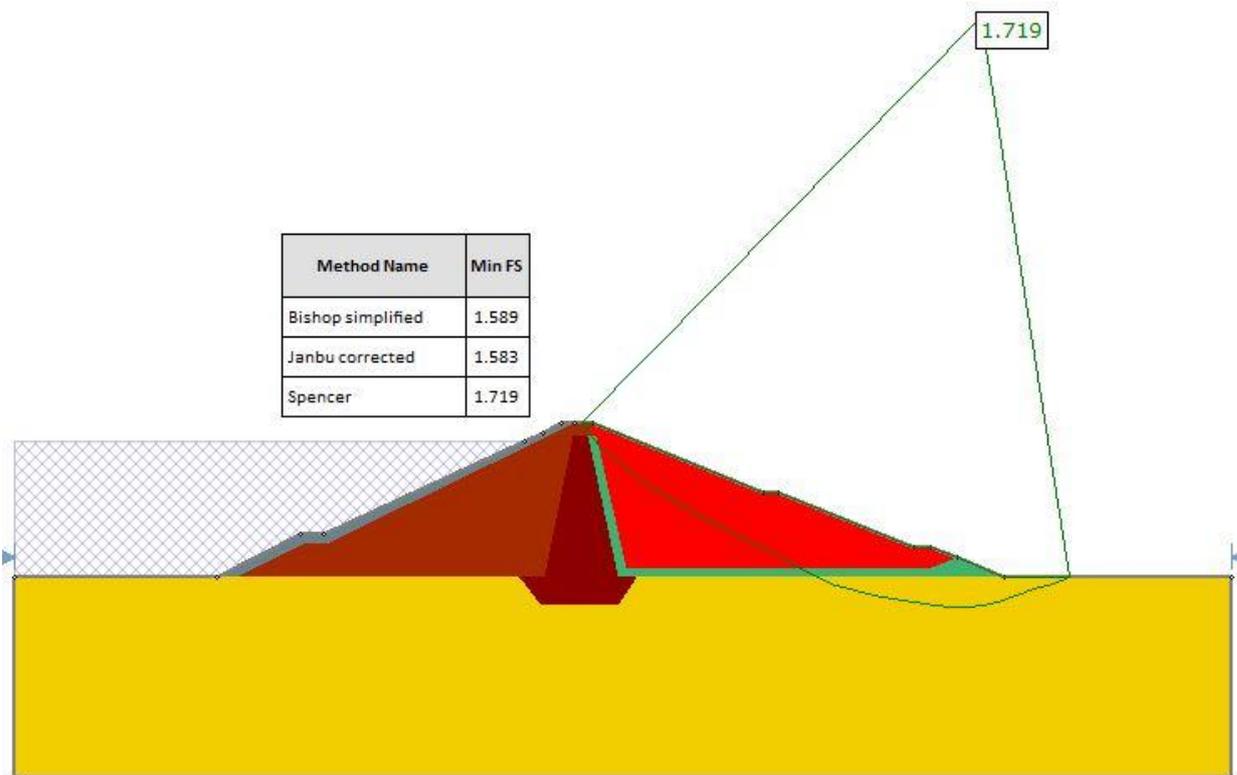


Figura 91: FS aguas abajo, método de Cuckoo Search.

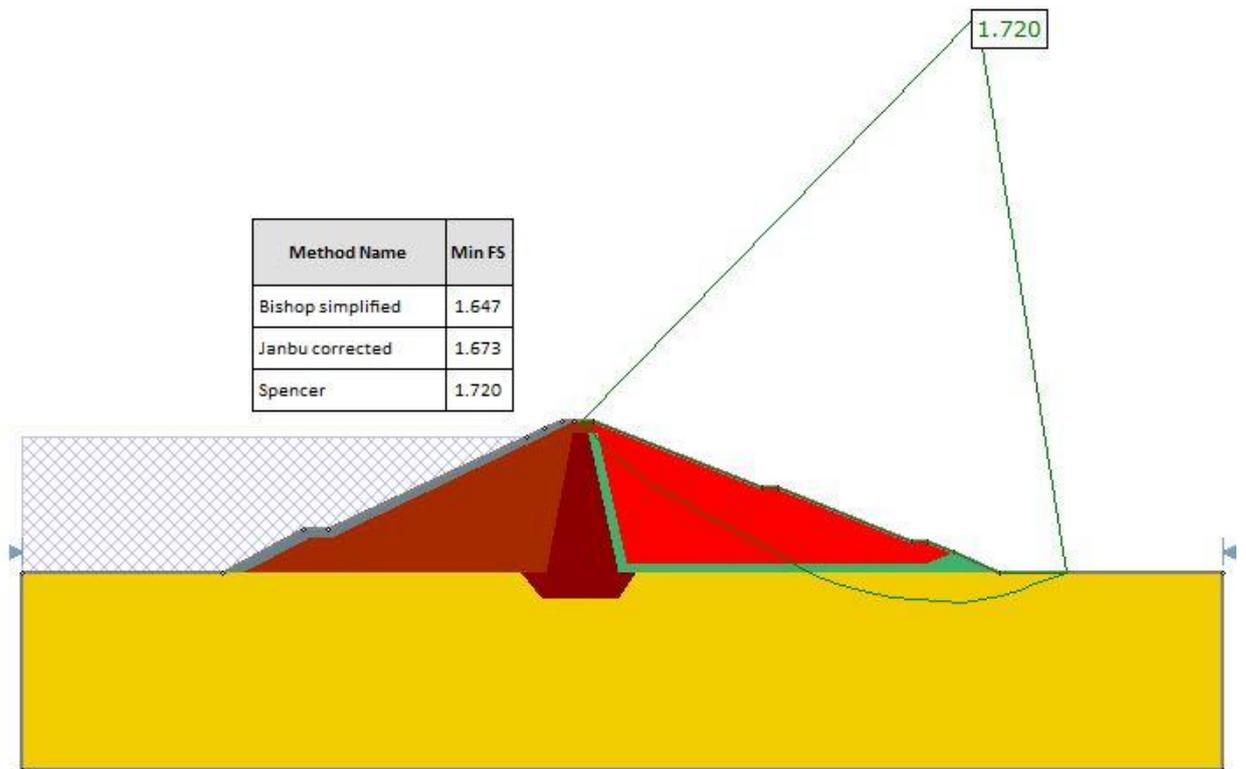


Figura 92: FS aguas abajo, método de Particles Swarm Search.

SITUACIÓN ACCIDENTAL-DESEMBALSE RÁPIDO

Talud aguas arriba: Superficie circular

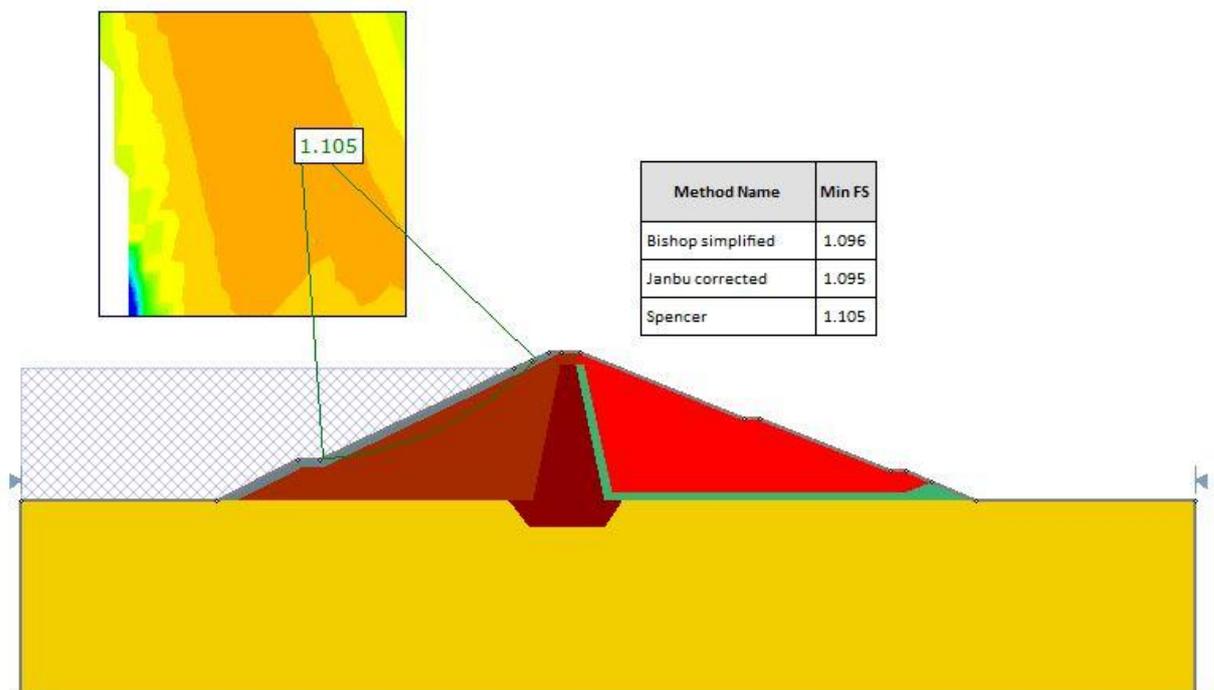


Figura 93: FS aguas arriba, método de Grid Search.

Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.026
Janbu corrected	0.997
Spencer	1.027

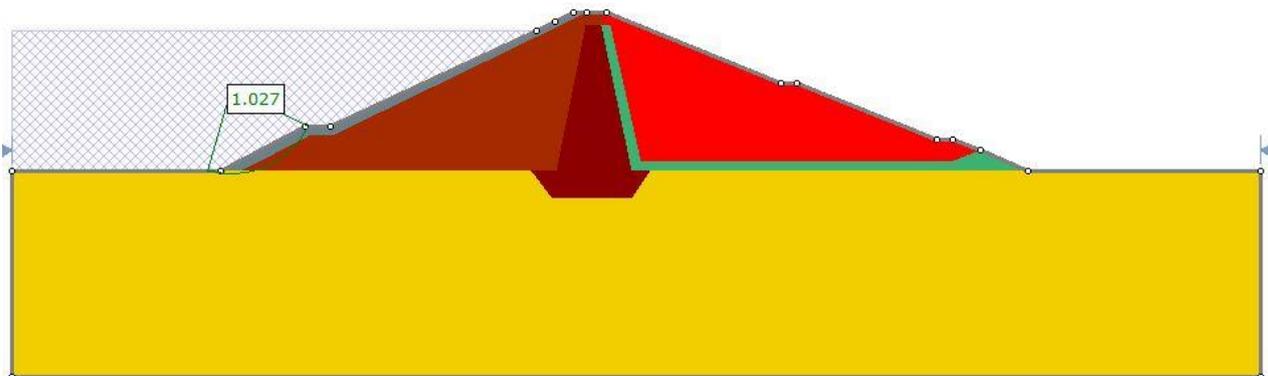


Figura 94: FS aguas arriba, método Auto Refine Search.

Talud aguas arriba: Superficie no circular

Method Name	Min FS
Bishop simplified	0.957
Janbu corrected	0.970
Spencer	0.987

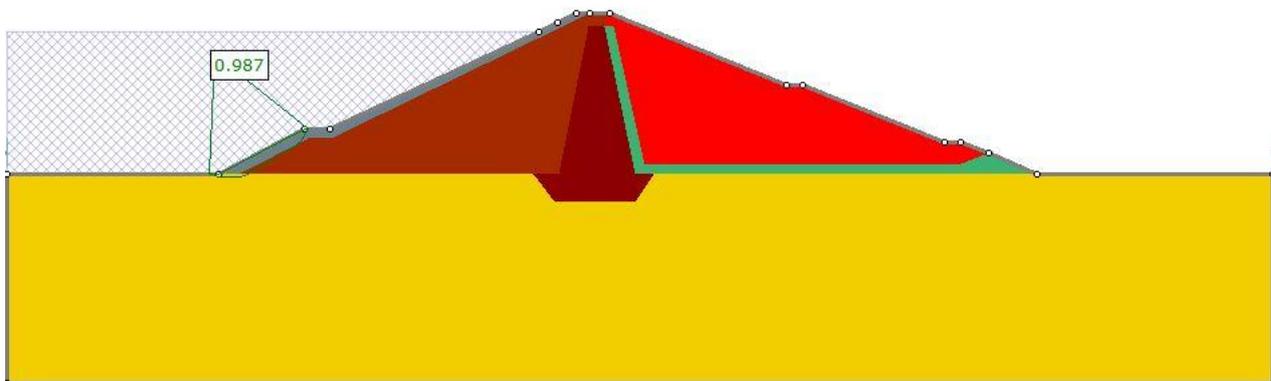


Figura 95: FS aguas arriba, método de Cuckoo Search.

Method Name	Min FS
Bishop simplified	0.958
Janbu corrected	0.970
Spencer	1.030

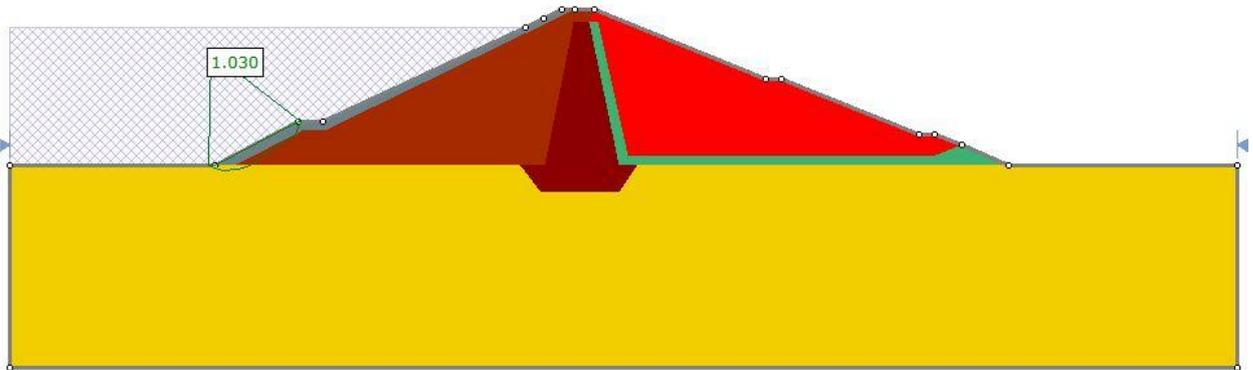
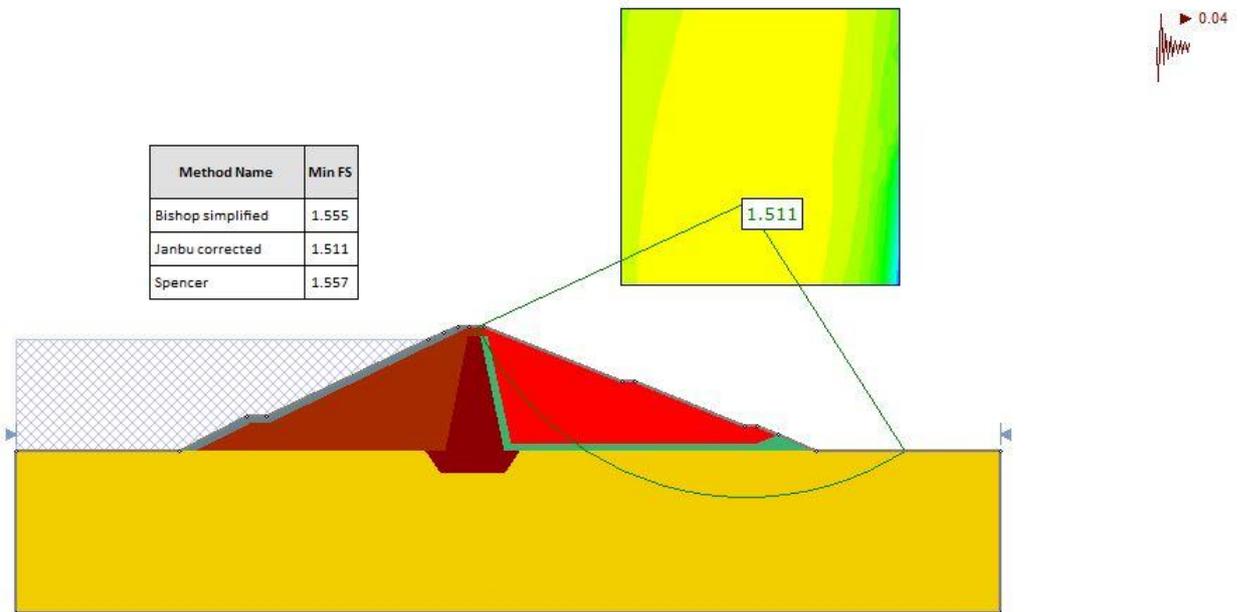


Figura 96: FS aguas arriba, método de Particles Swarm Search.

SITUACIÓN ACCIDENTAL- N.M.N. + SISMO

Talud aguas abajo: Superficie no circular



Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.555
Janbu corrected	1.511
Spencer	1.557

Figura 97: FS aguas abajo, método de Grid Search.

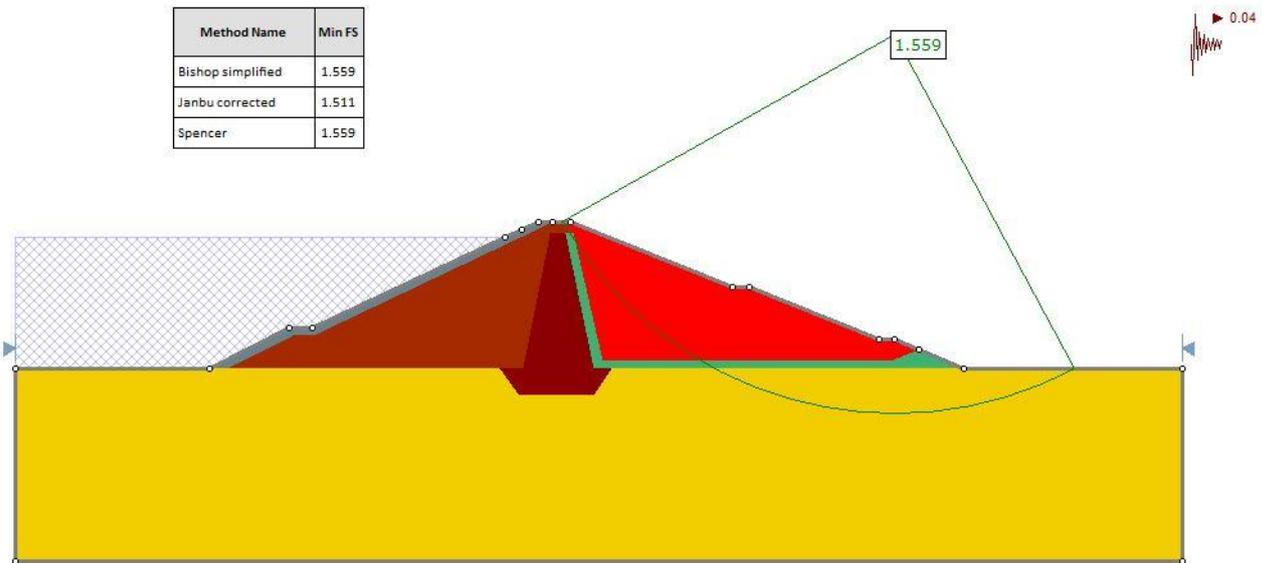


Figura 98: FS aguas abajo, método de Auto Refine Search.

Talud aguas abajo: Superficie no circular

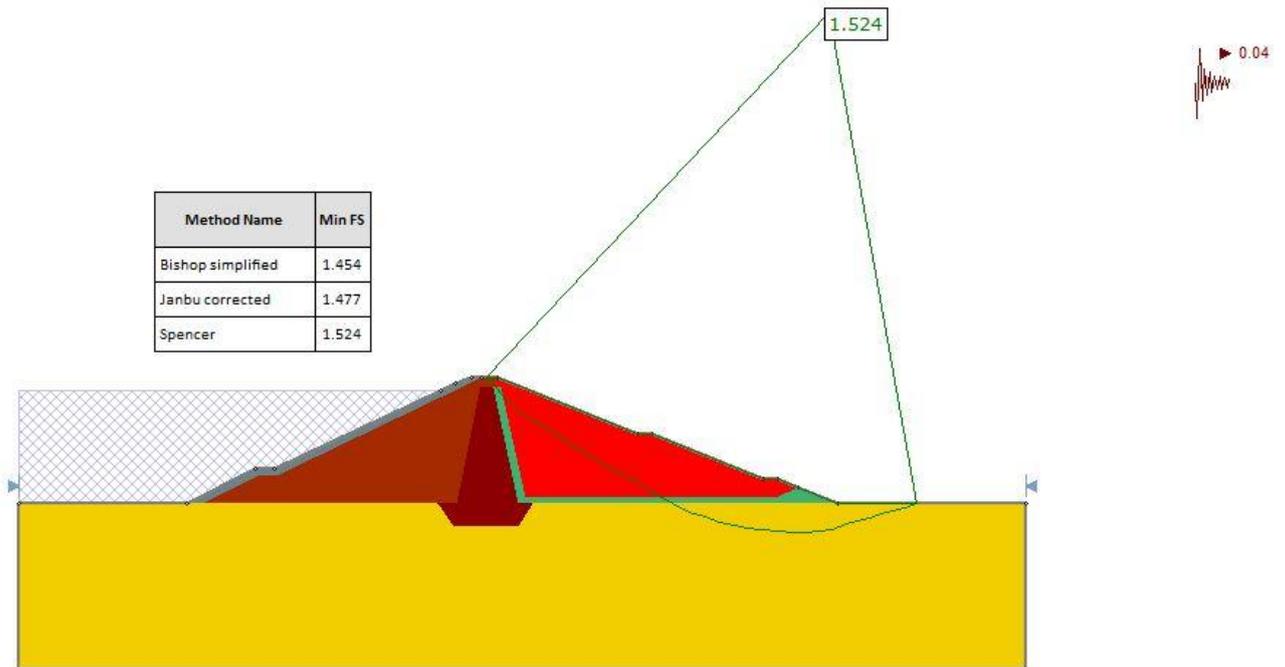


Figura 99: FS aguas abajo, método de Cuckoo Search.

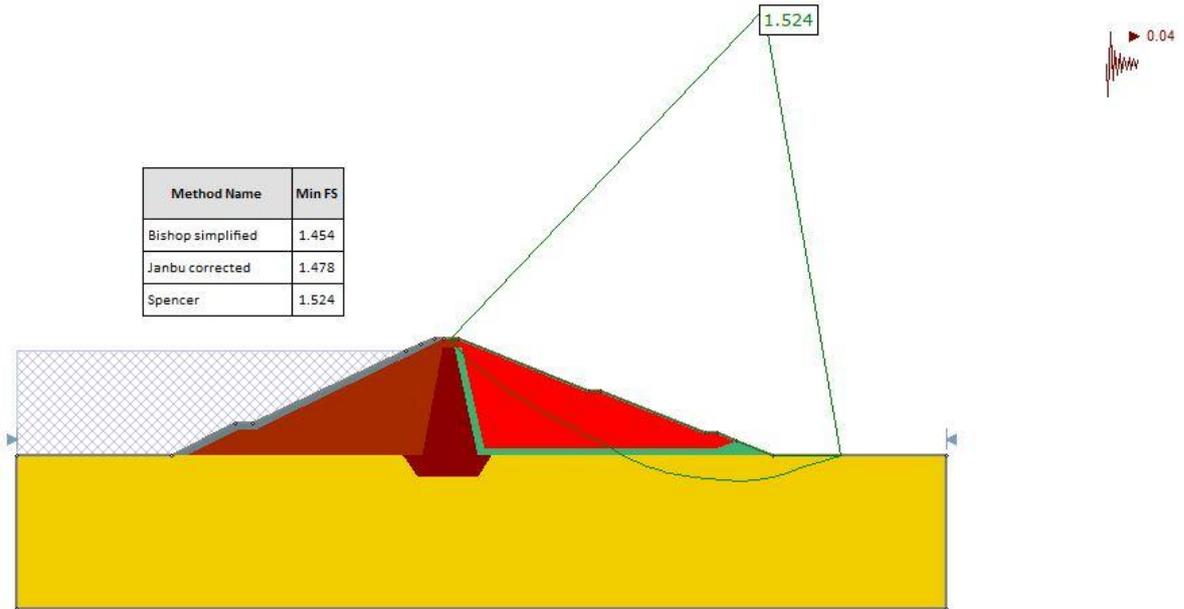


Figura 100: FS aguas abajo, método de Particle Swarm Search.

SITUACIÓN ACCIDENTAL-EMBALSE VACIO+ SISMO

Talud aguas arriba: Superficie circular

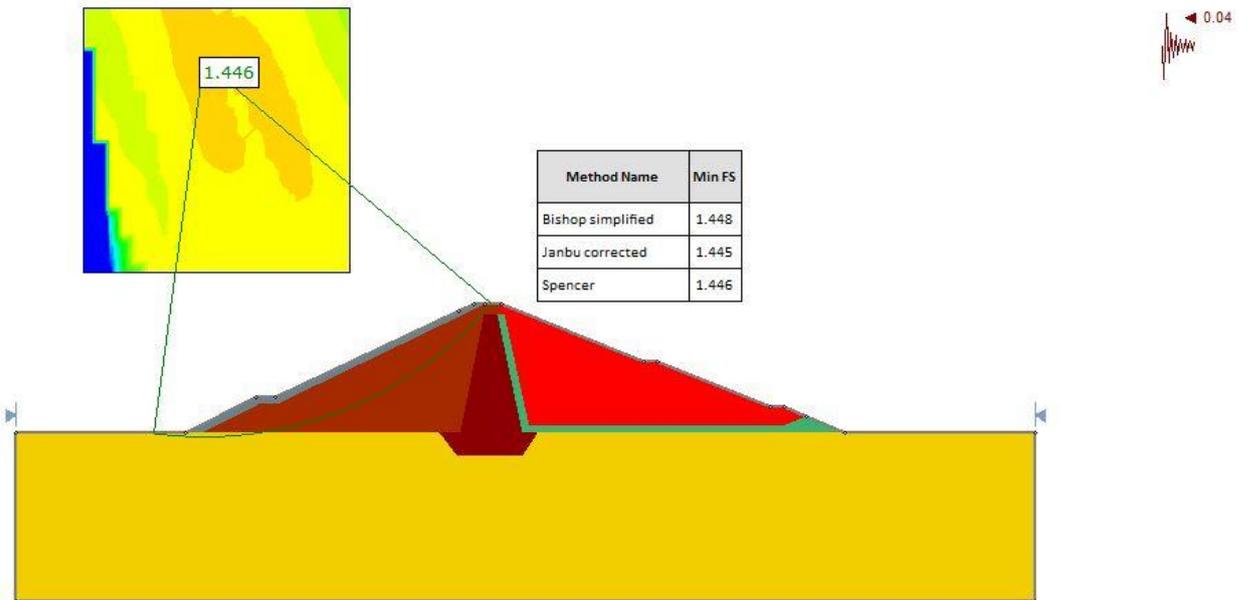


Figura 101: FS Aguas arriba, método de Grid Search.

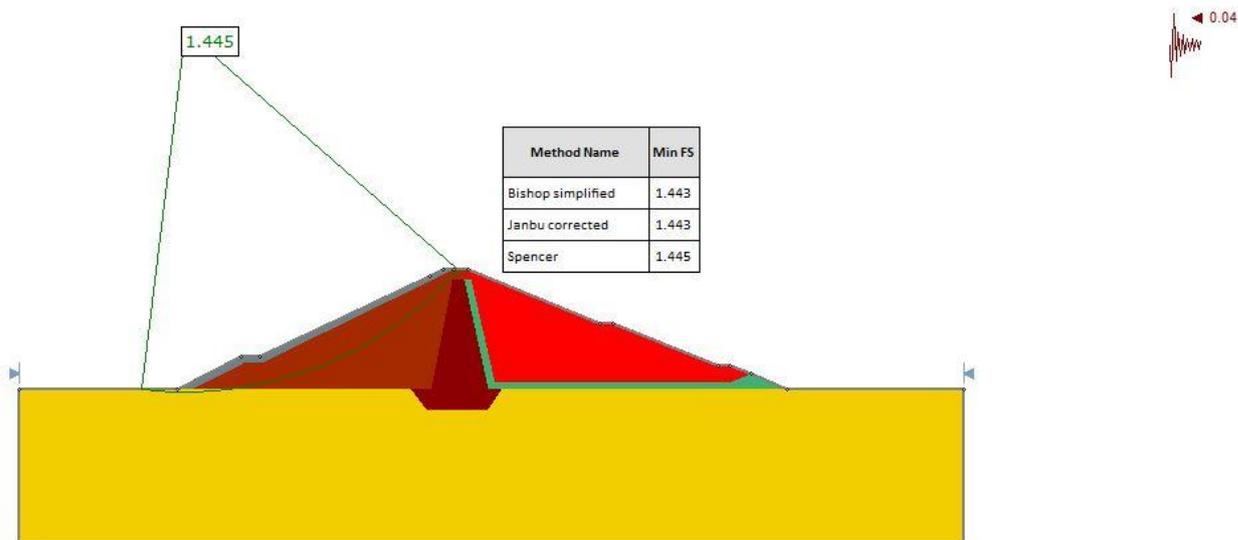


Figura 102: FS Aguas arriba, método de Auto Refine Search.

Talud aguas arriba: Superficie no circular

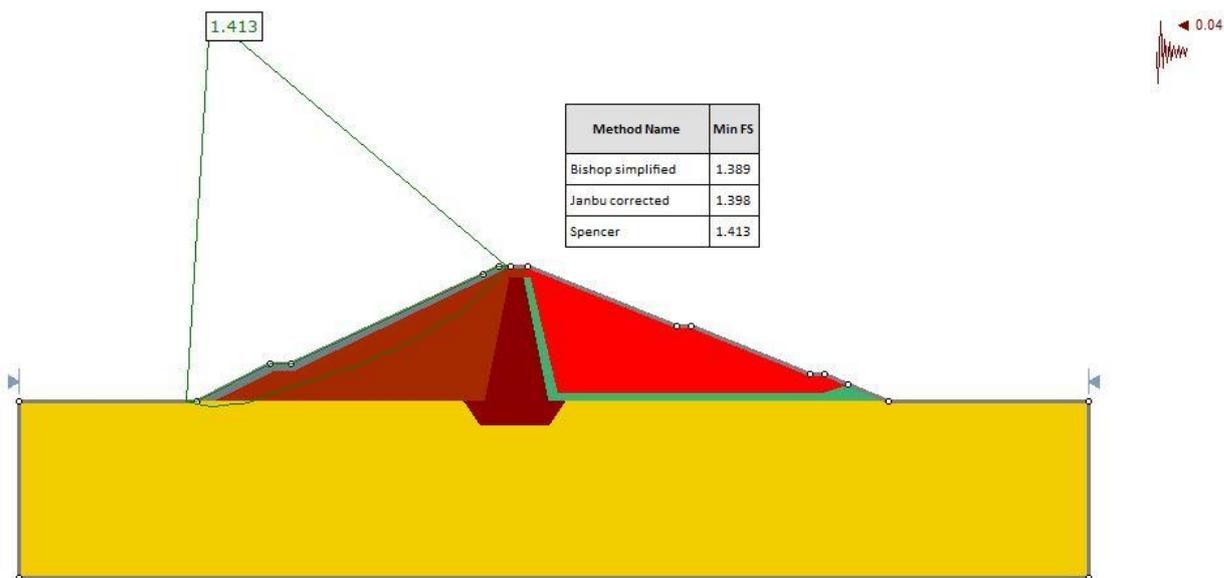


Figura 103: FS Aguas arriba, método de Cuckoo Search.

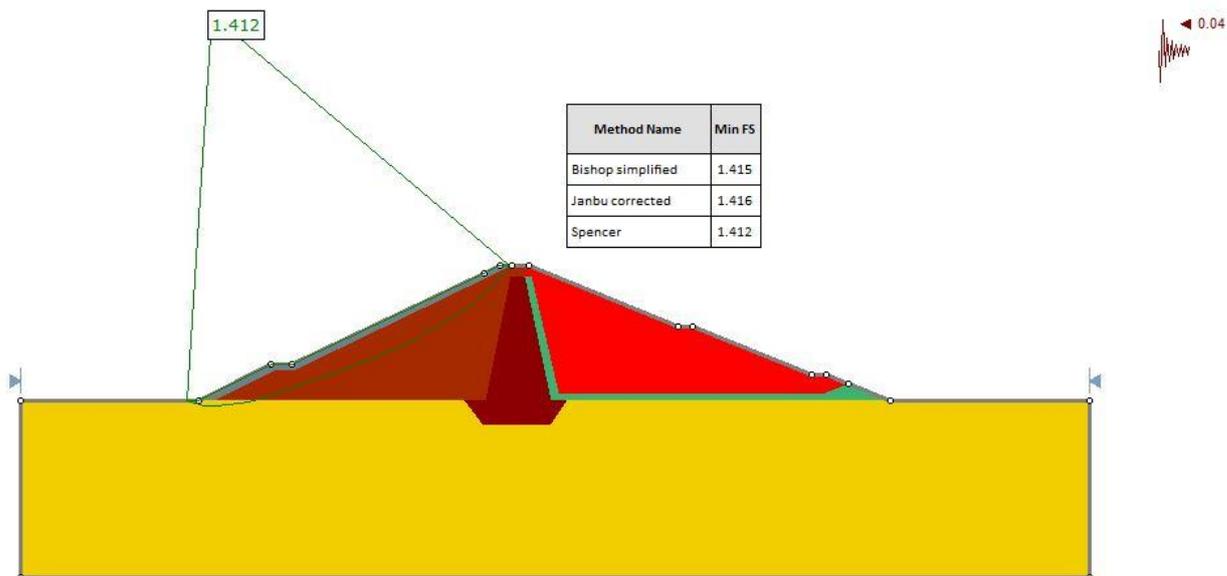


Figura 104: FS Aguas arriba, método de Particle Swarm Search.

Talud aguas abajo: Superficie circular

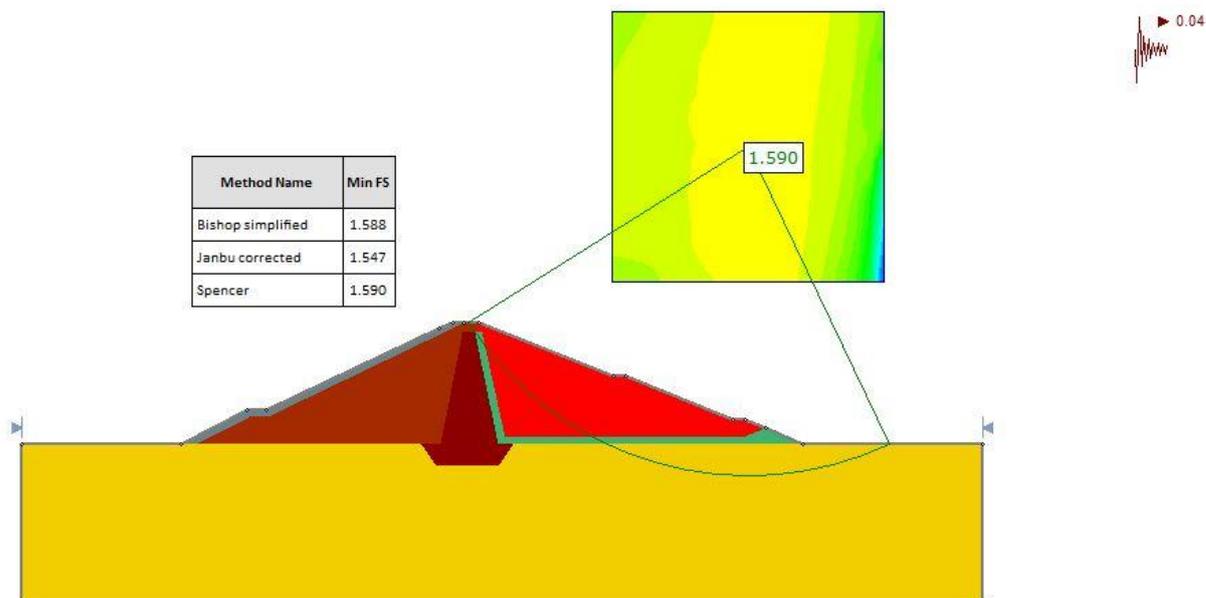


Figura 105: FS Aguas abajo, método de Grid Search.

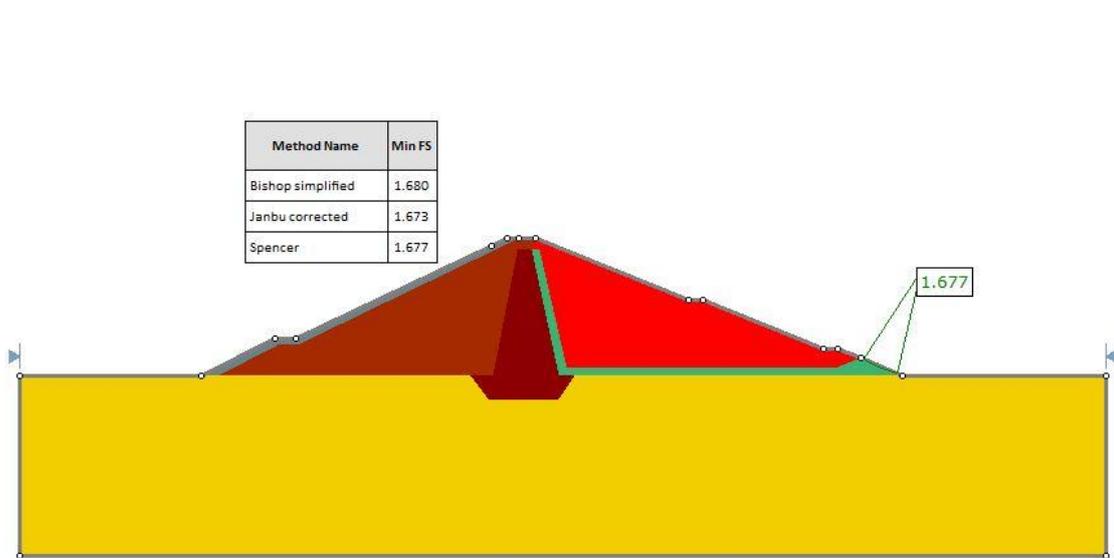


Figura 106: FS Aguas abajo, método de Auto Refine Search.

Talud aguas abajo: Superficie no circular

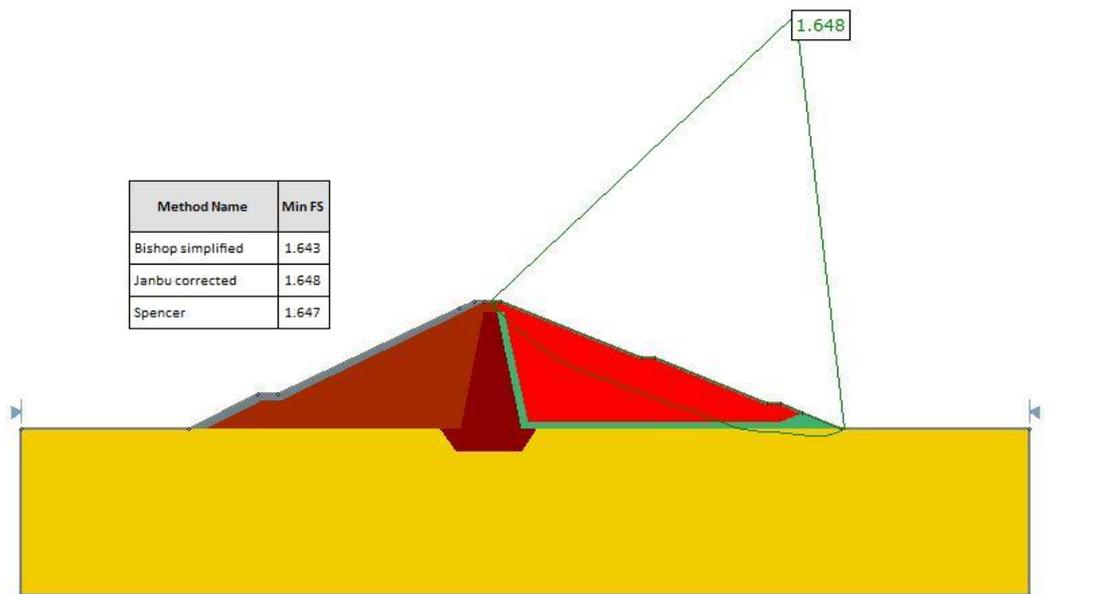


Figura 107: FS Aguas abajo, método de Cuckoo Search.

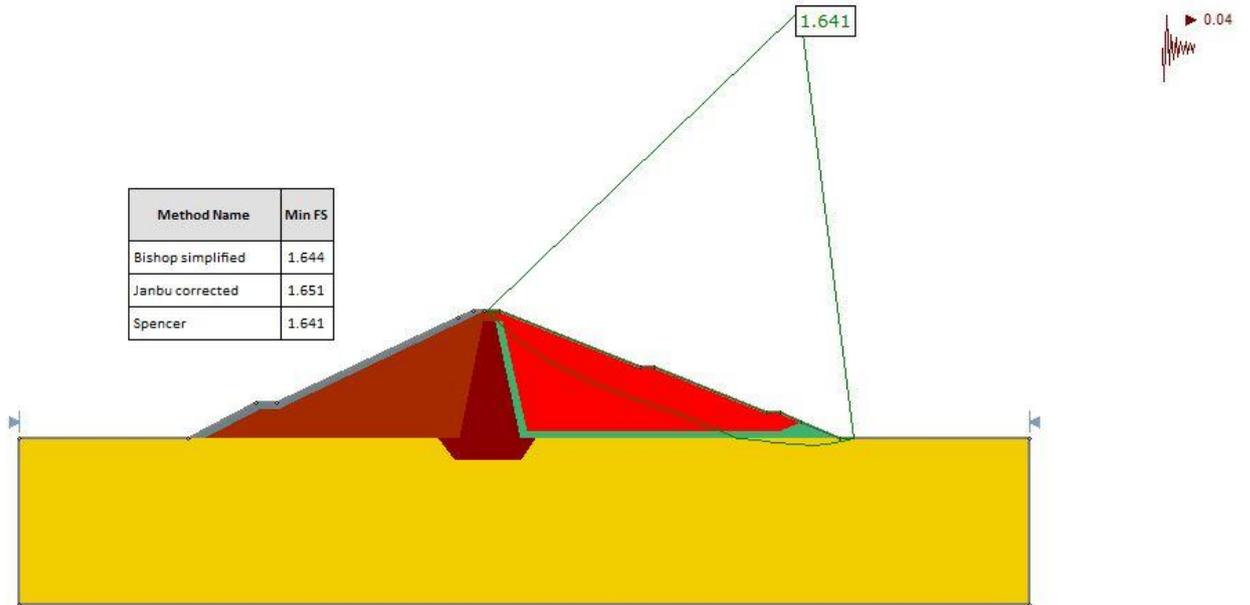


Figura 108: FS Aguas abajo, método de Particle Swarm Search.

SITUACIÓN ACCIDENTAL-EMBALSE LLENO N.A.P.

Talud aguas abajo: Superficie circular

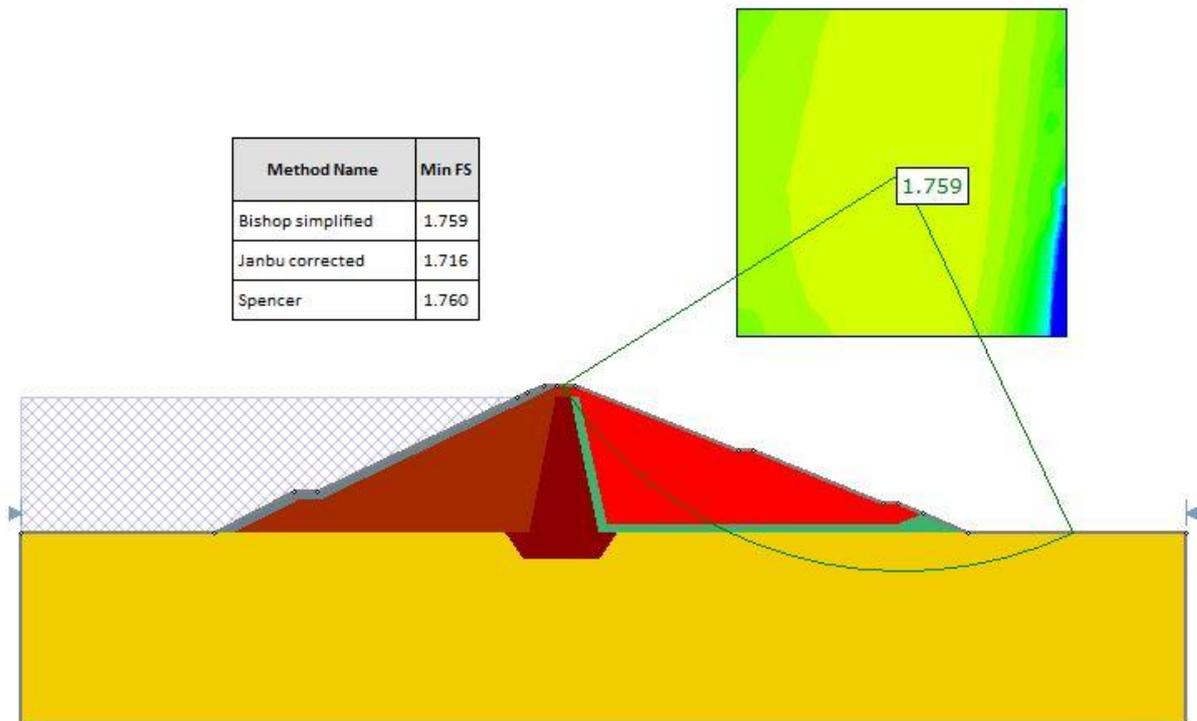


Figura 109: FS Aguas abajo, método de Grid Search.

Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.742
Janbu corrected	1.630
Spencer	1.723

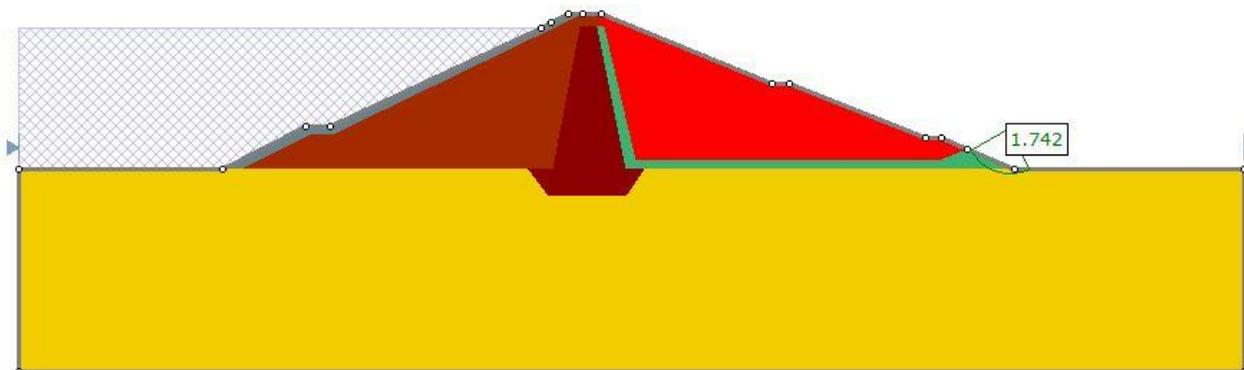


Figura 110: FS Aguas abajo, método de Auto Refine Search.

Talud aguas abajo: Superficie no circular

Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.574
Janbu corrected	1.573
Spencer	1.713

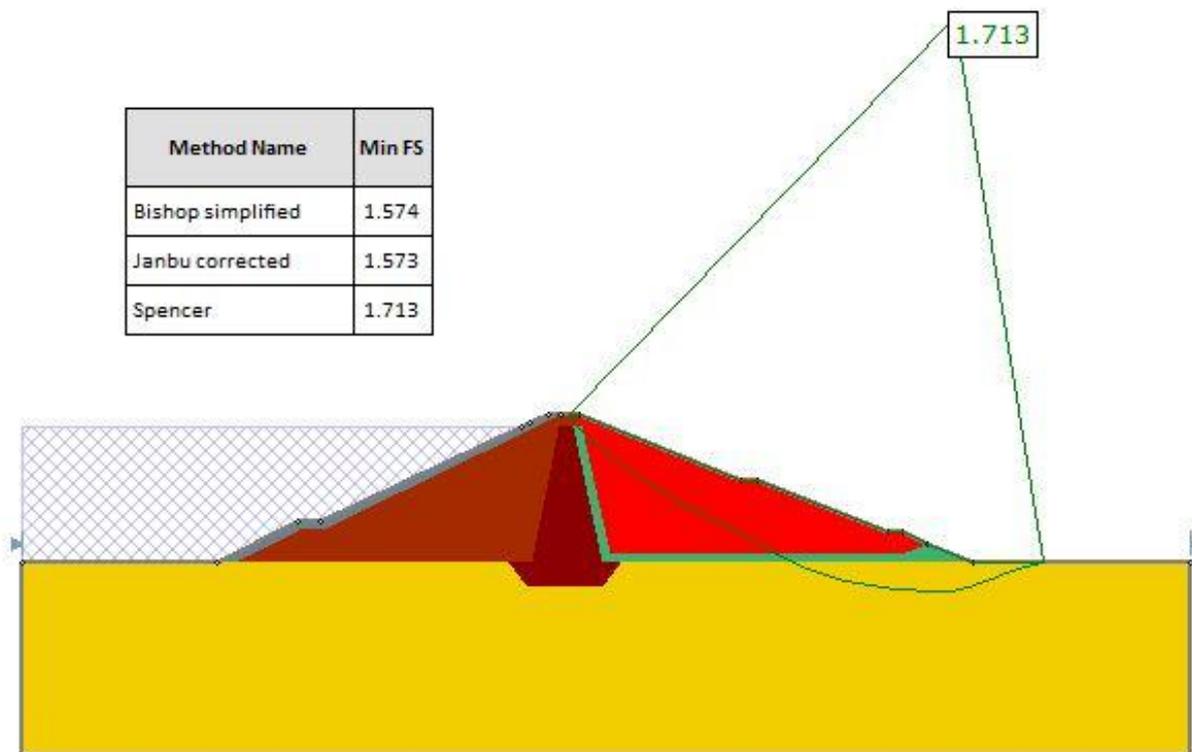


Figura 111: FS Aguas abajo, método de Cuckoo Search.

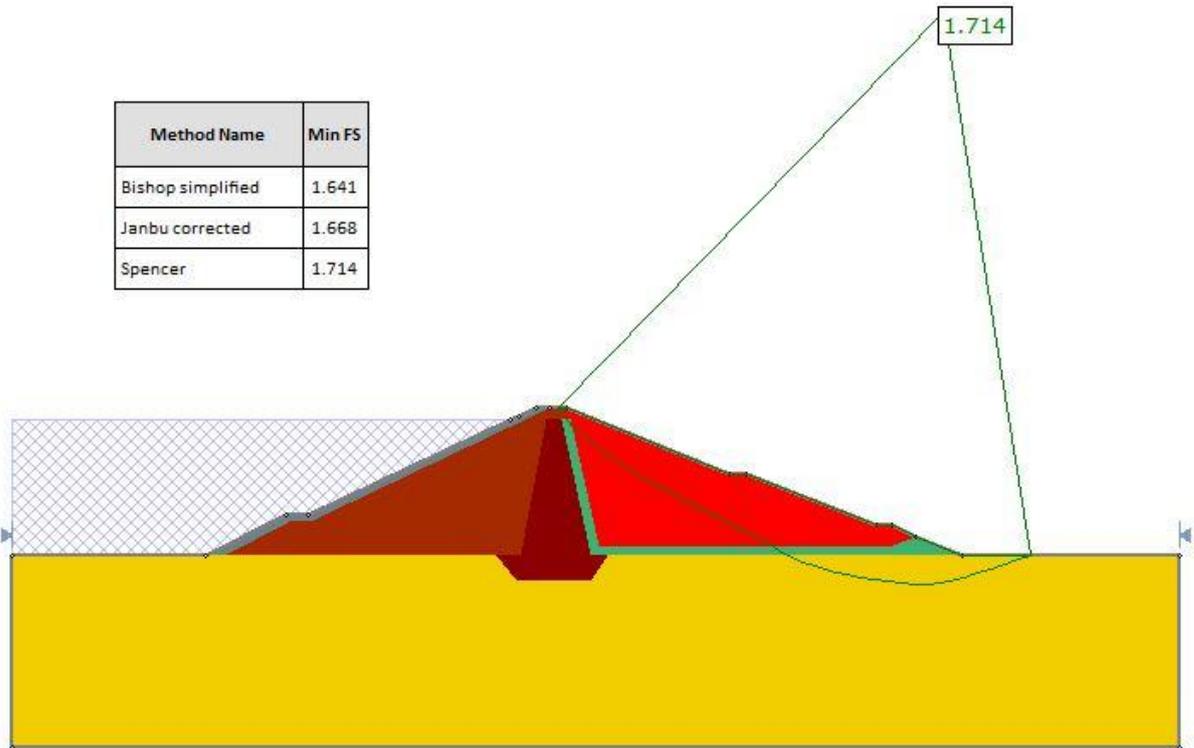


Figura 112: FS Aguas abajo, método de Particle Swarm Search.

SITUACIÓN EXTREMA-EMBALSE LLENO N.A.E.

Talud aguas abajo: Superficie circular

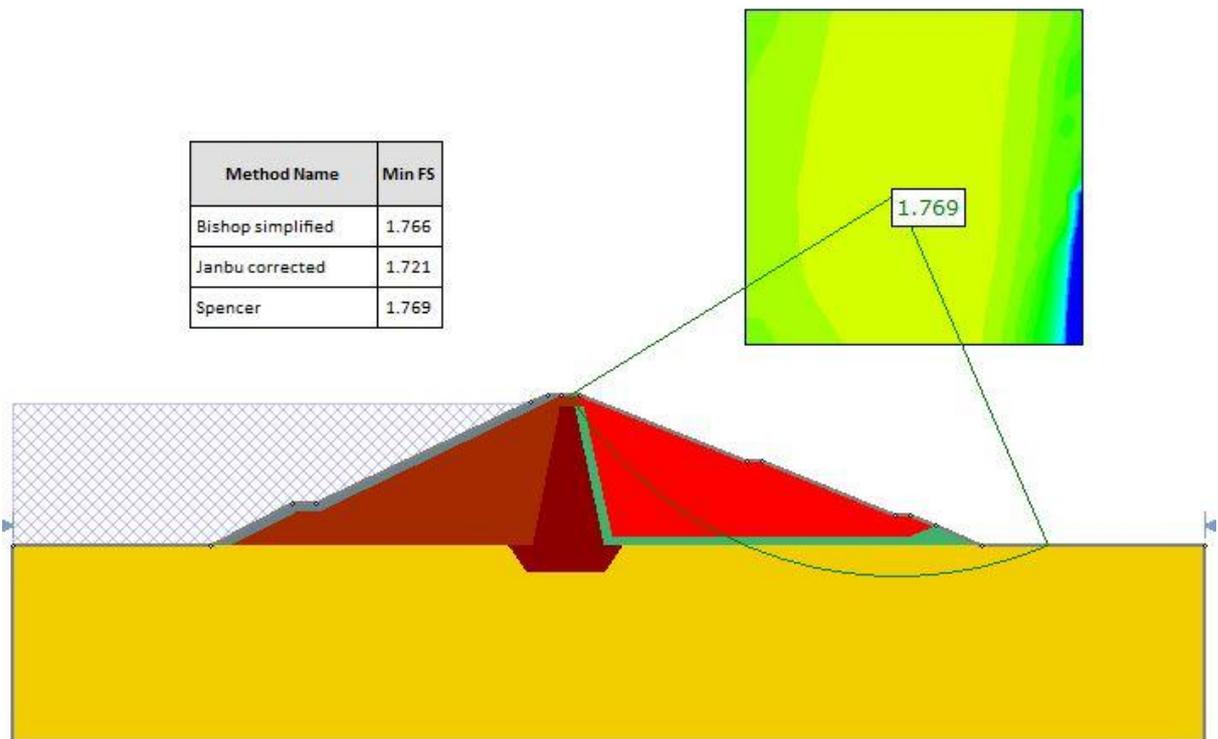


Figura 113: FS aguas abajo, método de Grid Search.

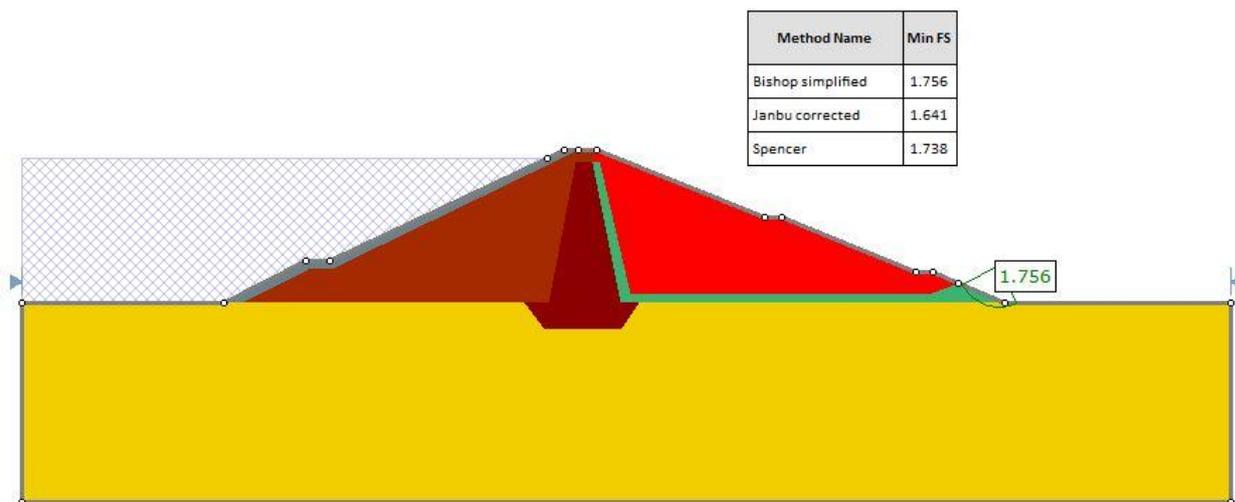


Figura 114: FS aguas abajo, método Auto Refine Search

Talud aguas abajo: Superficie no circular

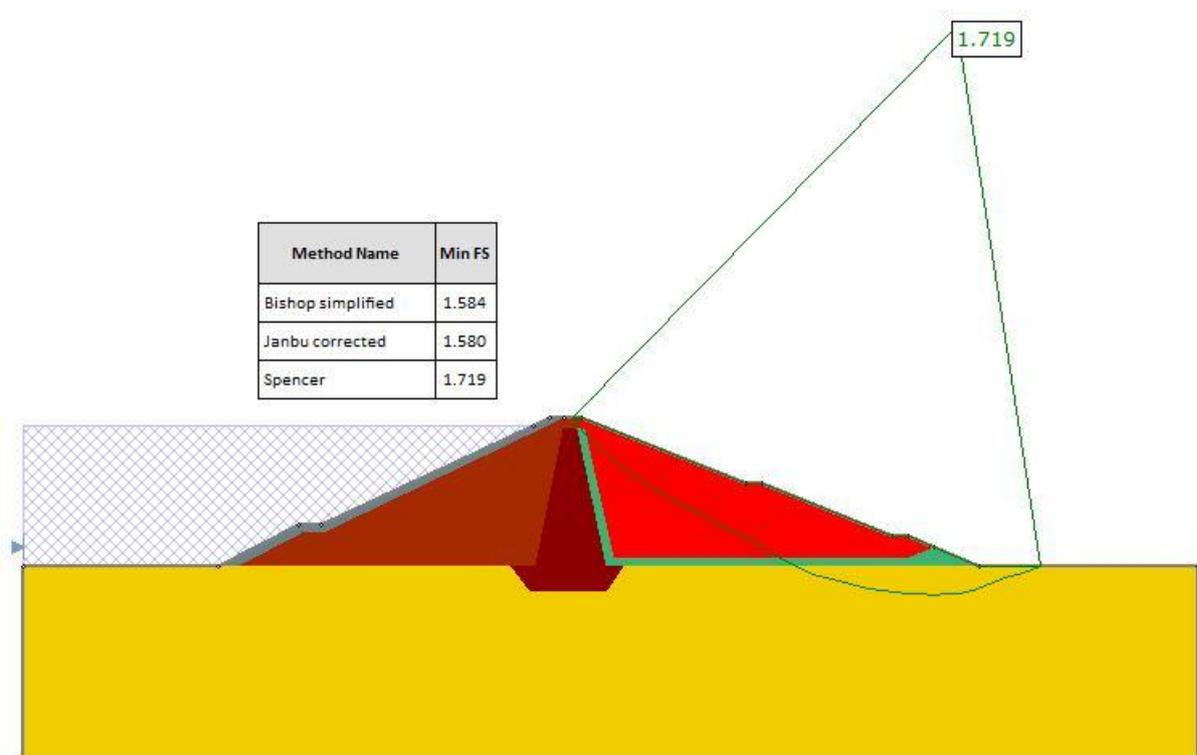


Figura 115: FS aguas abajo, método de Cuckoo Search.

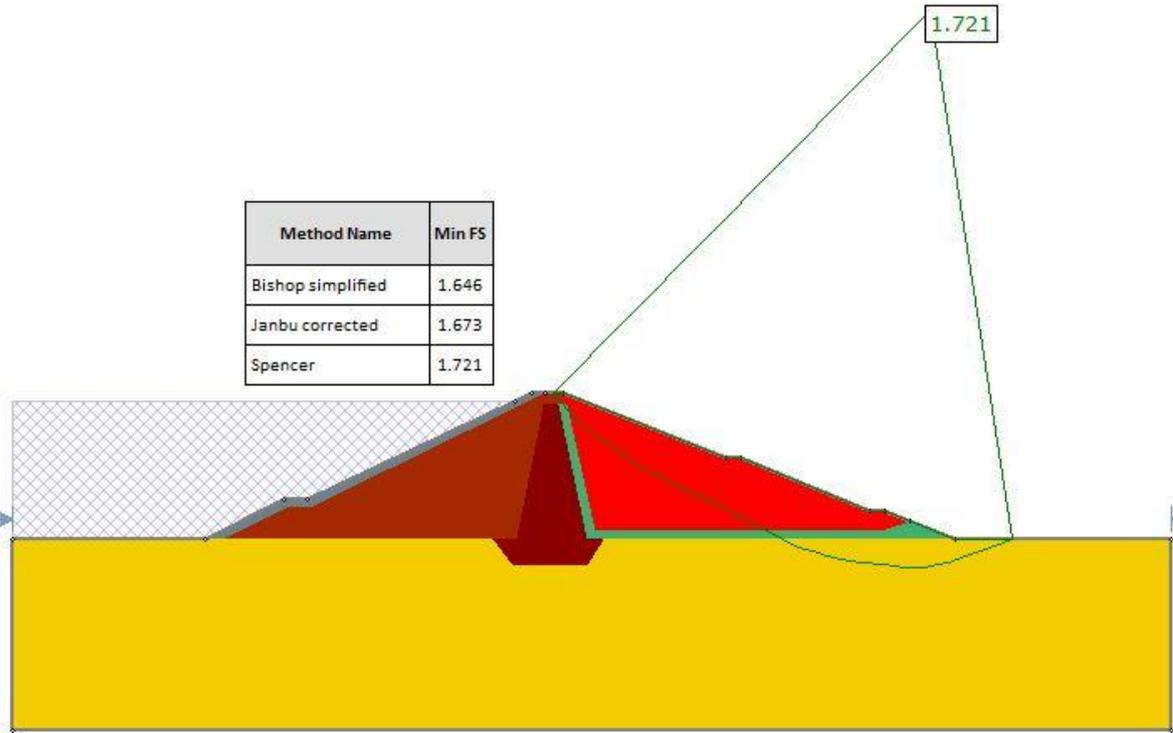


Figura 116: FS aguas abajo, método de Particles Swarm Search.

SITUACIÓN EXTREMA- DESEMBALSE RÁPIDO + SISMO

Talud aguas arriba: Superficie circular

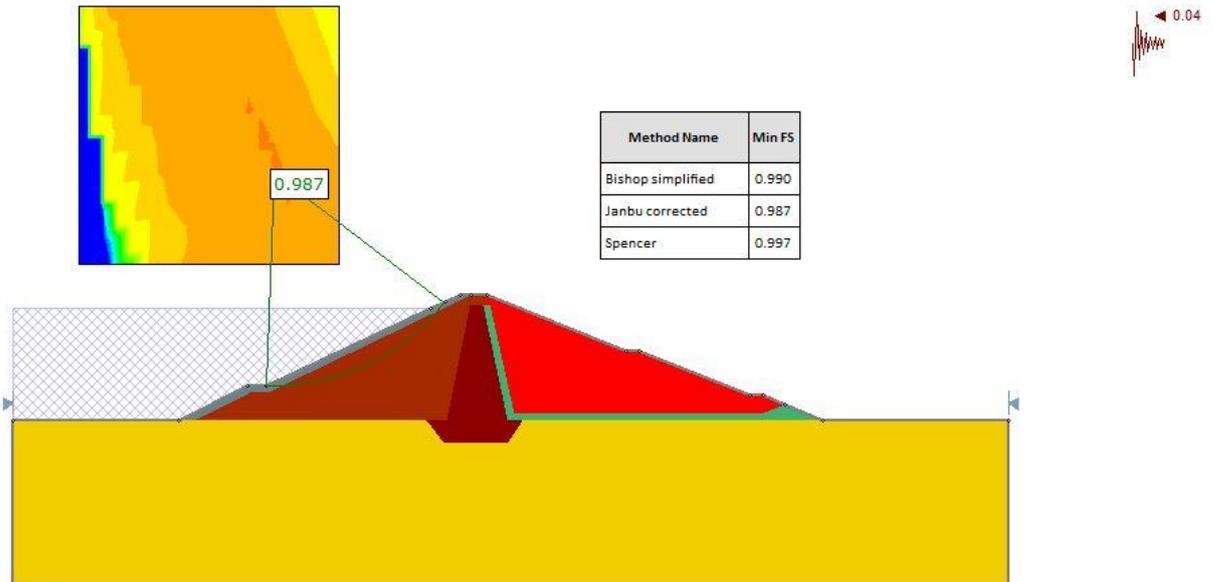


Figura 117: FS Aguas arriba, método Grid Search.

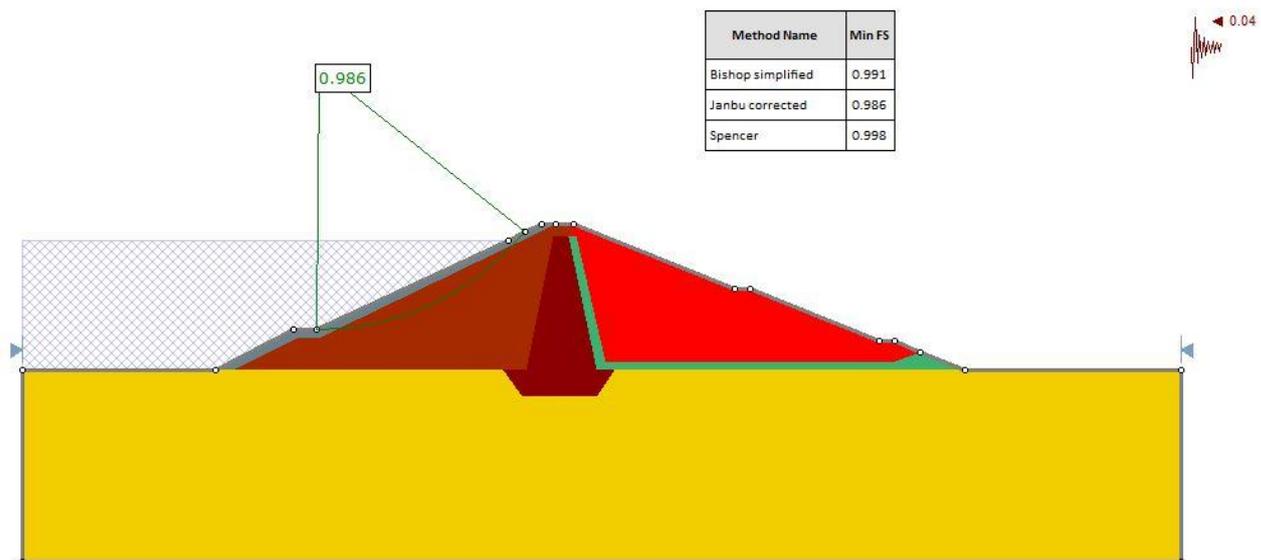


Figura 118: FS Aguas arriba, método Auto Refine Search.

Talud aguas arriba: Superficie no circular

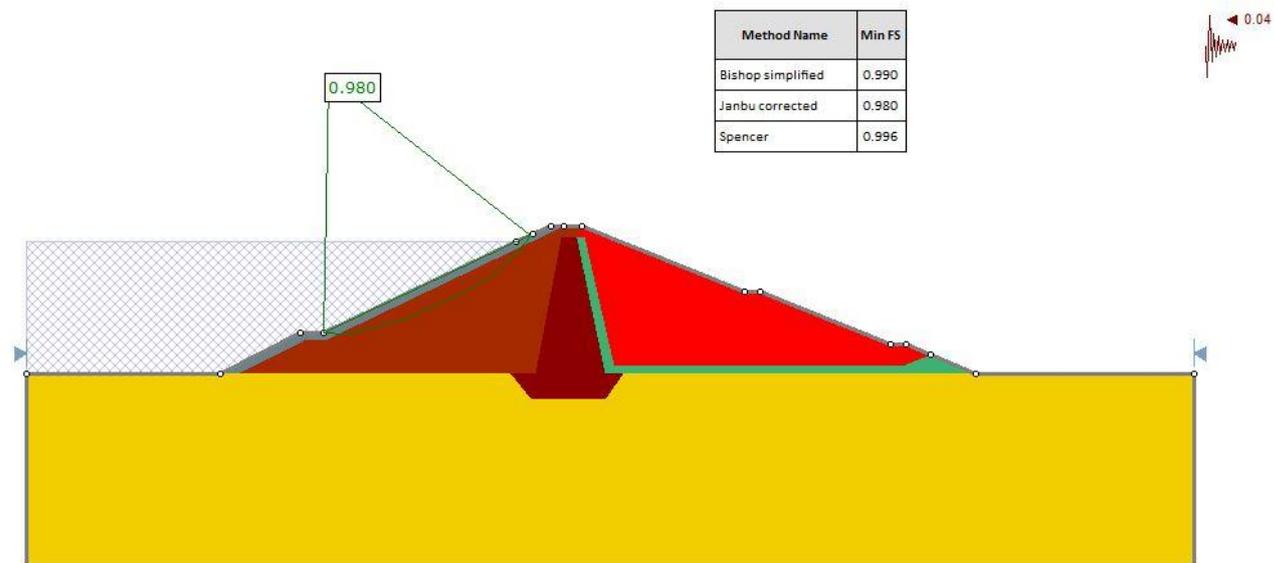


Figura 119: FS Aguas arriba, método de Cuckoo Search.

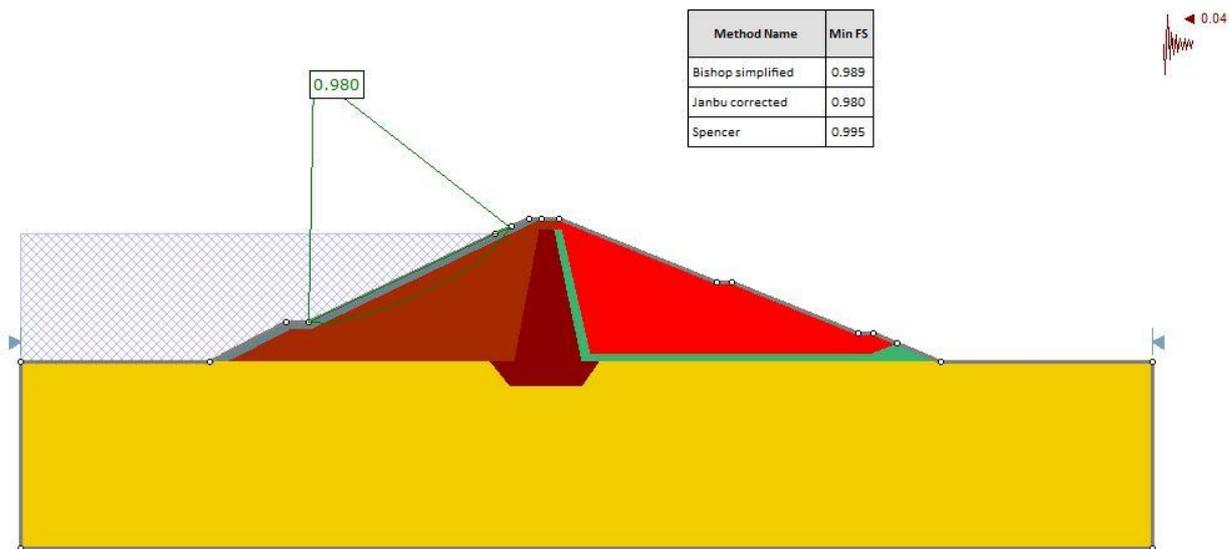


Figura 120: FS Aguas arriba, método Particles Swarm Search