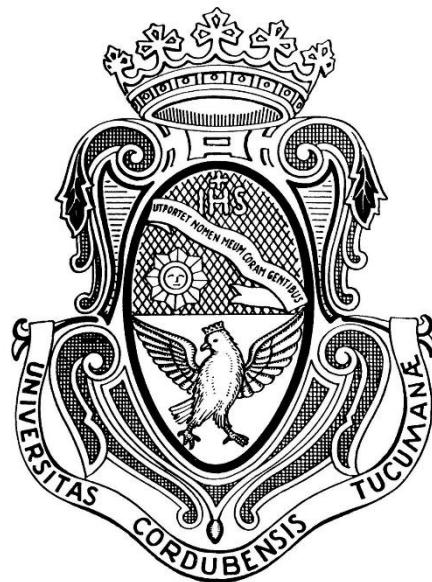


# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**

## **FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES**

**Maestría en Ciencias de la Ingeniería**

**Mención Estructura y Geotecnia**



**Tesis de Maestría**

## **Análisis Comparativo de Presas de Enrocado con Pantalla de Variada Tipología**

**Autor: Ing. Daniel R. Panique Lazcano**

**Director: Dr. Ing. Marcelo Zeballos**

Octubre, 2018

# **Análisis Comparativo de Presas de Enrocado con Pantalla de Variada Tipología**

Por:

**Ing. Daniel R. Panique Lazcano**

Dr. Ing. Marcelo Zeballos

Director

Universidad Nacional de Córdoba

## **COMISIÓN ASESORA**

Universidad Nacional de Córdoba

Esta Tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, para cumplimentar los requerimientos de obtención del grado académico de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Estructuras y Geotecnia.

Córdoba, Argentina

Septiembre, 2018

*A mis padres,  
Renán y Mery.*

*A mi hermana,  
Laura*

*A mi amada novia,  
Dercy*

*y a mi hija,  
Antonella.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*El presente trabajo es un esfuerzo que no podría haber sido posible sin la participación de personas, que directa o indirectamente colaboraron en la realización de esta Tesis de Maestría; por ello, es para mí un verdadero placer utilizar estas líneas para ser justo y consecuente, expresándoles mis agradecimientos a todos ellos.*

*Agradezco a mis padres Renán y Mery por la confianza que depositaron en mí y el incondicional apoyo en todo momento siendo un pilar fundamental en mi superación día a día. A mi hermana Laura que siempre está presente apoyándome y de forma incondicional confía en mí.*

*A mi novia Dercy que está en todo momento apoyándome y vivió el día a día del desarrollo de este trabajo; tanto en buenos y malos momentos. ¡Gracias por estar a mi lado!*

*A mi preciosa hija Antonella por haber cambiado mi vida.*

*A mi director, el Profesor Marcelo Zeballos, quien me ha brindado su constante apoyo, paciencia, tiempo dedicado y enseñanzas impartidas durante la realización de este trabajo de tesis, una gran persona de la cual he aprendido más de lo que reflejan estas palabras.*

*A los profesores de la Maestría en el área de Geotecnia, por la enseñanza y formación durante la maestría.*

*A Pablo Mendez Arevalo, un compañero, amigo y hermano de vida, con el que nos tocó compartir buenos y malos momentos en esta aventura de superación profesional, como también en aquellos momentos fuera de lo académico que perdurarán en el recuerdo.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen .....	1
Abstract.....	3
1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Introducción y problemática .....	5
1.2 Objetivo y alcance .....	5
1.2.1 Objetivo general .....	5
1.2.2 Objetivos específicos .....	6
1.3 Organización de este trabajo .....	6
2 ANTECEDENTES DE PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGÓN	
7	
2.1 INTRODUCCIÓN .....	7
2.2 EVOLUCIÓN HISTORICA DE LAS PRESA TIPO CFRD .....	8
2.3 TENDENCIA ACTUAL DE PRESAS CFRD .....	14
2.3.1 Pantalla de Hormigón Armado .....	14
2.3.2 Juntas.....	16
2.3.3 Plinto .....	16
2.3.4 Capa de Transición.....	17
2.3.5 Enrocado.....	18
2.3.6 Fundación o cimentación .....	23
2.4 COMPORTAMIENTO DE PRESAS TIPO CFRD.....	24
2.5 FALLAS Y DETERIOROS DE PRESAS TIPO CFRD .....	27
3 ANTECEDENTES DE PRESAS DE ESCOLLERA CON NÚCLEO ASFÁLTICO .....	30
3.1 INTRODUCCIÓN .....	30
3.2 EVALUACIÓN HISTORICA DE LAS PRESAS ACRD .....	31
3.2.1 Características de la mezcla bituminosa.....	31
3.2.2 Origen y desarrollo de los núcleos asfálticos.....	32
3.2.3 Presas de enrocado con pantalla asfáltica .....	33
3.2.4 Evolución de los tipos de revestimientos .....	35
3.2.5 Información sobre la mezcla bituminosa.....	36
3.2.6 Capa de drenaje bituminoso (BD).....	36
3.3 TENDENCIA ACTUAL DE LAS PRESAS ACRD .....	37
3.3.1 Núcleo asfáltico y zonas de transición .....	37
3.3.2 Transición.....	39

3.3.3	Ubicación del núcleo asfáltico en la presa .....	39
3.3.4	Tipos de núcleo de concreto asfáltico y caracterización .....	43
3.3.5	Métodos de construcción .....	44
3.4	COMPORTAMIENTO DE LAS PRESAS ACRD .....	45
3.5	FALLAS Y DETERIOROS EN LAS PRESAS ACRD .....	46
4	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y DEFINICIÓN DE CASOS.....	48
4.1	Caracterización de los materiales .....	48
4.1.1	Granulometría .....	48
4.1.2	Densidad .....	48
4.1.3	Resistencia al corte.....	49
4.1.4	Compresibilidad .....	54
4.1.5	Permeabilidad .....	55
4.2	Definición de los casos de aplicación para la comparación .....	55
4.2.1	Método de elementos finitos .....	56
4.2.2	Sección tipo de la presa CFRD .....	61
4.2.3	Sección tipo presa ACRD .....	63
4.2.4	Metodología del modelado .....	64
4.2.5	Selección del material y los parámetros .....	66
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS SOLUCIONES .....	68
5.1	Desplazamientos.....	68
5.1.1	Desplazamientos durante la construcción .....	68
5.1.2	Desplazamiento de la pantalla .....	74
5.1.3	Desplazamiento por el empuje del agua (embalse).....	77
5.2	Tensiones.....	84
5.2.1	Tensiones durante la construcción de la presa.....	85
5.2.2	Tensiones por la colocación de la pantalla $H^0A^0$ .....	93
5.2.3	Tensiones por el empuje del agua (embalse) .....	93
5.3	Esfuerzos en la pantalla $H^0A^0$ .....	102
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	106
6.1	Conclusiones.....	106
6.2	Recomendaciones y futuras líneas de investigación .....	107
7	Referencias .....	109

## Índice de Figuras

Figura 1. Presa de Schwammenauel .....	8
Figura 2. Características de presa PEPH del proyecto tradicional (CIGB-ICOLD, 1995). ....	9
Figura 3. Presa Loch Quoich.....	10
Figura 4. Características de presa PEPH del proyecto de concepción moderna.....	11
Figura 5. Zonificación y nomenclatura típica propuesta por (ICOLD, 2010). ....	13
Figura 6. Zonificación de la presa Aguamilpa (Montañez, y otros, 2000).....	13
Figura 7. Sección máxima de la Presa El Cajón. ....	14
Figura 8. Detalle constructivo del plinto (CIGB-ICOLD, 1995). ....	16
Figura 9. Tipos de plinto que se pueden implantar (Espinoza, 2010). ....	17
Figura 10. Tendencia general y granulometría recomendada para la zona de soporte de la pantalla (CIGB-ICOLD, 1995). ....	20
Figura 11. Typical cross section of CFRD zones (Xing, y otros, 2006).....	23
Figura 12. Esquema conceptual de empujes hidrostáticos sobre una presa tipo CFRD (Espinoza, 2010). ....	25
Figura 13. Patrón de deformaciones de una presa de material granular (Newmark, 1965). ....	27
Figura 14. Sección de Presa de enrocado con pantalla de mezcla asfáltica (ICOLD, 1999). ....	34
Figura 15. Presa Poza Honda (ICOLD, 1992).....	35
Figura 16. Detalle de la galería de drenaje aguas arriba de la presa Genkel (Sherard, y otros, 1963). ....	36
Figura 17. Prueba de impermeabilidad. Interdependencia de la presión del agua y el índice de vacíos (CIGB ICOLD, 1982).....	38
Figura 18. Sección transversal de una presa con núcleo de concreto asfáltico vertical. ....	40
Figura 19. Presa de Dhunn. ....	40
Figura 20. Presa Eberlaste. ....	40
Figura 21. Presa de Bigge. ....	41
Figura 22. Presa de High Island. ....	41
Figura 23. Sección transversal, Presa Finstertal – Austria.....	42
Figura 24. Presión interna del núcleo asfáltico en relación con la presión del agua en el núcleo de la presa Grasj.....	46
Figura 25. Ángulo de fricción interna para enrocados (modificado de Leps, 1970). ....	51
Figura 26. Resistencia equivalente de partículas de enrocado (Barton & Kjaernsli, 1981). ....	52
Figura 27. Rugosidad equivalente de partículas de enrocado (Barton & Kjaernsli, 1981). ....	52
Figura 28. Posición de los nodos y los puntos de tensión en elementos de suelo. ....	57
Figura 29. Camino de carga y descarga de tensión-deformación de un material en el modelo lineal elástico. ....	58
Figura 30. Representación de la relación tensión-deformación hiperbólica (Duncan & Chang, 1970). ....	59
Figura 31. Gráfica hiperbólica de tensión-deformación en el modelo Hardening Soil (Schanz, et al., 1999). ....	60
Figura 32. Definición de $E_{oed}^{ref}$ a partir de resultados de pruebas del edómetro (Schanz, et al., 1999)	60
Figura 33. Gráficas del modelo Hardening soil. ....	61
Figura 34. Sección tipo Presa CFRD de 30m de altura. ....	62

Figura 35. Sección tipo de Presa CFRD para 60 y 100m de altura.....	62
Figura 36. Distribución de los puntos de control en la Presa CFRD para los desplazamientos. ....	62
Figura 37. Distribución de los puntos de control en la Presa CFRD para las tensiones. ....	63
Figura 38. Sección tipo de la presa ACRD para alturas de 30, 60 y 100 m.....	63
Figura 39. Distribución de los puntos de control en la Presa ACRD para los desplazamientos. ....	63
Figura 40. Distribución de los puntos de control en la Presa ACRD para las tensiones.....	64
Figura 41. Malla de elementos finitos usada para el análisis Presa CFRD 30m. ....	64
Figura 42. Etapa Fundación.....	64
Figura 43. Etapa 1 de la Construcción .....	65
Figura 44. Etapa 2 de la Construcción .....	65
Figura 45. Etapa 3 de la Construcción .....	65
Figura 46. Etapa 4 de la Construcción .....	65
Figura 47. Etapa 5 de la Construcción .....	65
Figura 48. Etapa Embalse lleno. ....	66
Figura 49. Asentamientos constructivos, presa CFRD 30 metros. ....	69
Figura 50. Asentamientos constructivos, presa CFRD 60 metros. ....	69
Figura 51. Asentamientos constructivos, Presa CFRD 100 metros. ....	69
Figura 52. Asentamientos al final de la construcción, comparativa entre Presas CFRD 30m, 60m y 100 m.....	70
Figura 53. Asentamientos relativos al final de la construcción, comparativa entre Presas CFRD 30 m, 60 m y 100 m.....	70
Figura 54. Asentamientos constructivos, Presa ACRD 30 metros.....	71
Figura 55. Asentamientos constructivos, Presa ACRD 60 metros.....	71
Figura 56. Asentamientos constructivos, Presa ACRD 100 metros.....	72
Figura 57. Asentamientos en el eje de la presa ACRD, final de la construcción. Valores absolutos. ....	72
Figura 58. Asentamientos en el eje de la Presa ACRD, final de la construcción. Valores relativos. 73	73
Figura 59. Asentamientos constructivos en valores absolutos.....	73
Figura 60. Asentamientos constructivos en valores relativos.....	74
Figura 61. Desplazamiento total debido a la pantalla HºAº.....	75
Figura 62. Desplazamiento horizontal debido a la pantalla HºAº.....	75
Figura 63. Asientos debido a la pantalla de HºAº. ....	75
Figura 64. Desplazamiento total relativo debido a la pantalla de HºAº. ....	76
Figura 65. Desplazamientos horizontales relativos debido a la pantalla HºAº. ....	76
Figura 66. Desplazamientos verticales relativos debido a la pantalla HºAº. ....	76
Figura 67. Desplazamiento total absoluto debido al empuje del agua.....	77
Figura 68. Desplazamiento total relativo debido al empuje del agua. ....	78
Figura 69. Desplazamiento horizontal absoluto debido al empuje del agua.....	78
Figura 70. Desplazamiento horizontal relativo debido al empuje de agua. ....	79
Figura 71. Asentamientos absolutos debido al empuje del agua. ....	79
Figura 72. Asentamientos relativos debido al empuje del agua. ....	79
Figura 73. Desplazamientos totales absolutos debido al empuje del agua. ....	80
Figura 74. Desplazamientos totales relativos debido al empuje del agua.....	80
Figura 75. Desplazamientos horizontales absolutos debidos al empuje de agua. ....	81
Figura 76. Desplazamientos horizontales relativos debidos al empuje de agua. ....	81

Figura 77. Asentamientos absolutos debido al empuje de agua.....	81
Figura 78. Asentamientos relativos debido al empuje de agua.....	82
Figura 79. Desplazamientos totales absolutos debido al empuje de agua. ....	82
Figura 80. Desplazamientos totales relativos debido al empuje de agua.....	83
Figura 81. Desplazamientos horizontales absolutos debido al empuje de agua. ....	83
Figura 82. Desplazamientos horizontales relativos debido al empuje de agua.....	83
Figura 83. Asentamiento absoluto debido al empuje de agua. ....	84
Figura 84. Asentamiento relativo debido al empuje de agua. ....	84
Figura 85. Tensiones horizontales durante la construcción.....	85
Figura 86. Tensiones horizontales relativas durante la construcción.....	86
Figura 87. Tensiones horizontales absolutas durante la construcción. ....	86
Figura 88. Tensiones horizontales relativas durante la construcción. ....	87
Figura 89. Comparativa de tensiones horizontales relativas. ....	87
Figura 90. Tensiones verticales absolutas durante la construcción.....	88
Figura 91. Tensiones verticales relativas durante la construcción. ....	88
Figura 92. Tensiones verticales absolutas durante la construcción. ....	89
Figura 93. Tensiones verticales relativas durante la construcción. ....	89
Figura 94. Tensiones verticales durante la construcción. ....	90
Figura 95. Tensiones de corte absolutas durante la construcción.....	91
Figura 96. Tensiones de corte relativas durante la construcción. ....	91
Figura 97. Tensiones de corte absolutas durante la construcción.....	92
Figura 98. Tensiones de corte relativas durante la construcción. ....	92
Figura 99. Tensiones de corte relativas para ambos tipos de presa.....	93
Figura 100. Tensiones horizontales absolutas debido al empuje del agua.....	94
Figura 101. Tensiones horizontales relativas debido al empuje del agua. ....	94
Figura 102. Tensiones horizontales absolutas debido al empuje de agua.....	95
Figura 103. Tensiones horizontales relativas debido al empuje de agua. ....	95
Figura 104. Tensiones horizontales relativas para presas ACRD y CFRD. ....	96
Figura 105. Tensiones verticales absolutas debido al empuje del agua. ....	97
Figura 106. Tensiones verticales relativas debido al empuje de agua. ....	97
Figura 107. Tensiones verticales absolutas debido al empuje del agua. ....	98
Figura 108. Tensiones verticales relativas debido al empuje del agua. ....	98
Figura 109. Tensiones verticales relativas para presas ACRD y CFRD. ....	99
Figura 110. Tensiones de corte absolutas debidas al empuje de agua.....	99
Figura 111. Tensiones de corte relativas debido al empuje de agua. ....	100
Figura 112. Tensiones de corte absolutas debido al empuje del agua. ....	100
Figura 113. Tensiones de corte relativas debido al empuje de agua. ....	101
Figura 114. Tensiones de corte relativas para presas ACRD y CFRD. ....	101
Figura 115. Distribución de esfuerzos normales CFRD 30m. ....	102
Figura 116. Distribución de momentos en la pantalla, presa CFRD 30m.....	102
Figura 117. Distribución de esfuerzos normales, presa CFRD 60 m.....	103
Figura 118. Distribución de momentos, presa CFRD 60 m.....	103
Figura 119. Distribución de esfuerzos normales, presa CFRD 100m. ....	104
Figura 120. Distribución de momentos, presa CFRD 100m. ....	104
Figura 121. Esfuerzos axiales máximos en función de la altura de presa. ....	105

## Índice de Tablas

Tabla 1. Presas PEPH con una altura mayor a los 150 metros. ....	12
Tabla 2. Criterios para determinar el espesor de la pantalla impermeable (CIGB-ICOLD, 1995). ....	15
Tabla 3. Ancho del plinto en función al RMR de la fundación (Cruz, y otros, 2009). ....	17
Tabla 4. Zonificación para una presa de CFRD de roca sana en cimentación sobre roca. ....	18
Tabla 5. Características del Material 2A recomendado por ICOLD y utilizados en México. ....	19
Tabla 6. Granulometría para material 2B recomendaciones por ICOLD, 2010. ....	20
Tabla 7. Resultados de ensayos de laboratorio para evaluar Enrocado y Riprap (USSD, 2011). ....	22
Tabla 8. Presas con núcleo bituminoso con una altura mayor a 50 m (ICOLD, 1992). ....	33
Tabla 9. Presas con pantalla de mezcla asfáltica con una altura mayor a 70 m (ICOLD, 1999). ....	36
Tabla 10. Valores de ángulo de rozamiento de ensayos triaxiales (CIGB/ICOLD, 1998). ....	49
Tabla 11. Resistencia de la partícula. ....	51
Tabla 12. Constantes del método de Duncan, 2004. ....	54
Tabla 13. Propiedades de suelos de varios tipos de presas, taludes y presas de relave. ....	54
Tabla 14. Definición de los casos a realizar en el análisis. ....	56
Tabla 15. Parámetros del modelo hiperbólico (Duncan & Chang, 1970). ....	59
Tabla 16. Parámetros del modelo Hardening Soil (PLAXIS, 2006). ....	61
Tabla 17. Propiedades de los materiales para la presa ACRD del modelo Hardening Soil. ....	66
Tabla 18. Propiedades de los materiales para la presa CFRD del modelo Hardening Soil. ....	66
Tabla 19. Propiedades de la pantalla de hormigón armado del modelo elástico. ....	67

# Análisis Comparativo de Presas de Enrocado con Pantalla de Variada Tipología

## Resumen

Existe una tendencia en la actualidad de la construcción de presas de enrocado con barreras de agua; es decir, pantallas de diferente tipología, como ser, hormigón armado, hormigón asfáltico, geomembranas y otros materiales. A su vez estas pantallas pueden ser internas (dentro de la presa) como externas (talud aguas arriba). En el análisis se optó por una presa de enrocado con pantalla de hormigón (CFRD) y una presa de enrocado con núcleo asfáltico (ACRD). Las presas ACRD resultan ser muy adecuadas bajo diversas condiciones climáticas, el núcleo es impermeable, resistente a la erosión y muy deformable. Las presas CFRD han sufrido bastantes accidentes en el pasado, principalmente por la dificultad que tiene la pantalla de adaptarse a los asientos del enrocado, motivo por el cual fue cambiando la zonificación; por otro lado, tiene una ventaja ya que puede ser reparada en caso de algún incidente.

El propósito del presente trabajo es realizar un análisis comparativo de presas CFRD y presas ACRD. Dentro del análisis tenso-deformacional, se hizo una comparación de ambas pantallas en lo que respecta a los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos mostrando las ventajas y desventajas de cada una de ellas. Para dicho análisis se hizo uso de un programa de elementos finitos, como es PLAXIS; se trabajó bajo un criterio de rotura de Hardening soil; el comportamiento de cada presa se llevó a cabo para dos condiciones, la primera durante la construcción de la presa y la segunda, presa llena cuando existe un empuje del agua sobre la pantalla; y por último se fue variando la altura de las presas 30 m, 60 m y 100 m.

En lo que respecta a los asentamientos debidos a la construcción de la presa, podemos decir que los mayores asientos ocurren en las presas ACRD. En ambos tipos de presa y sin importar la altura, los mayores asientos se producen en el tercio central de la presa y estos asientos son menores al 0,50% de la altura de cada presa. Los desplazamientos debido al empuje del agua (embalse) son mayores en presas ACRD ya que la presión de agua se ejerce directamente sobre la pantalla que está dentro del cuerpo de la presa; a diferencia de la presa CFRD que tiene la pantalla externa y la presión en el eje de la presa es baja. Los desplazamientos verticales son mayores para presas ACRD ya que estos se mueven conjuntamente se asienta la presa, a diferencia de la presa CFRD que luego de terminar la construcción es que se construye la pantalla.

Las tensiones horizontales debidas a la construcción de la presa CFRD no tienen variación de una presa de 30, 60 y 100m de altura; lo que no ocurre con las presas ACRD que en función de la altura se produce la máxima tensión horizontal que difiere de una presa de 30, 60 o 100m. Por otra parte, el comportamiento de la tensión horizontal es un valor máximo en la base de la presa y esta va disminuyendo hasta un valor nulo en el coronamiento. Las tensiones verticales debidas a la construcción de la presa son mayores para una presa CFRD que para una ACRD. Las presas CFRD presentan los mayores valores de tensiones de corte en el tercio central de la presa a diferencia de las presas ACRD que presentan el valor máximo en el tercio inferior.

Los esfuerzos axiales máximos debidos al empuje de agua muestra que el valor de los esfuerzos axiales está ligado directamente con la altura de la presa, a mayor altura de la presa mayor esfuerzo axial tendrá. De la misma manera los momentos máximos debido al empuje del agua en la pantalla muestran una buena relación en función a la altura y a medida que incrementamos la altura de la presa mayor será el valor del momento producido en la pantalla.

# **Comparative Analysis of Rockfill Dams with Face of Varied Typology**

## **Abstract**

There is a current trend in the construction of rockfill dams with water barriers; that is, faces of different types, such as reinforced concrete, asphalt concrete, geomembranes and other materials. In turn these faces can be internal (inside the dam) as external (slope upstream). In the analysis, we opted for a Concrete Face Rockfill Dam (CFRD) and a rockfill dam with an asphalt concrete core (ACRD). The ACRD dams turn out to be very suitable under diverse climatic conditions, the core is impermeable, resistant to the erosion and very deformable. The CFRD dams have suffered many accidents in the past, mainly due to the difficulty of the concrete face adapting to the settling of rockfill, which is why the zoning was changed; On the other hand, it has an advantage because it can be repaired in case of an incident.

The purpose of this paper is to perform a comparative analysis of CFRD dams and ACRD dams. Within the tense-deformational analysis, a comparison of both faces was made with respect to the efforts, deformations and displacements showing the advantages and disadvantages of each of them. For this analysis, we made use of a finite element program, such as PLAXIS; it was worked according to a Hardening Soil model; the behavior of each dam was carried out for two conditions, the first during the construction of the dam and the second, full dam when there is a water pressure on the face; and finally it was varying the height of the dams 30 m, 60 m and 100 m.

As regards to the settlements due to the construction of the dam, we can say that the largest settlements occur in the ACRD dams. In both types of dam and regardless of the height, the largest settlements are produced in the central third of the dam and these settlements are less than 0,50% of the height of each dam. The displacements due to the water pressure (reservoir) are greater in ACRD dams since the water pressure is exerted directly on the face, that is inside the body of the dam; unlike of the CFRD dam that has the external face and the pressure on the axis of the dam is low. The vertical displacements are greater for ACRD dams since these move together the dam settlement, a difference of the dam CFRD that after finishing the construction is that the concrete face is built.

The horizontal stresses due to the construction of the CFRD dam don't have variation from a dam of 30, 60 and 100m in height; what doesn't happen with the ACRD dams which, depending on the height, produces the maximum horizontal stresses that differs from a dam of 30, 60 or 100m. On the other hand, the behavior of the horizontal stresses is a maximum value at the base of the dam and it decreases to a null value at the crowning. The vertical stresses due to the construction of the dam are greater for a CFRD dam than for an ACRD. The CFRD dams present the highest values of shear stresses in the central third of the dam, in contrast to the ACRD dams that present the maximum value in the lower third.

The maximum axial forces due to the water pressure shows that the value of the axial forces is directly linked to the height of the dam, the higher the height of the dam, the greater the axial effort. In the same way the maximum moments due to the water pressure on the face

show a good relationship depending on the height and as we increase the height of the dam the greater the value of the moment produced on the face.