

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y MINAS

ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DE LA PRESA
PILARES EN ALAMOS, SONORA.

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO MINERO

Presentan:

RAMÓN FRANCISCO MADRID JUÁREZ

MÓNICA ANDREA VALENZUELA GASTÉLUM

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Resumen

La presente tesis contiene un análisis de elementos finitos, un método numérico ampliamente utilizado desde su aparición, en el diseño ingenieril en mecánica de rocas. El análisis se realizó para la presa Pilares, construida de Concreto Compactado con Rodillos.

El CCR fue una técnica innovadora que surgió en los años 60 por la necesidad de encontrar un balance entre una técnica económica, pero con buena resistencia y durabilidad. Actualmente, es ampliamente utilizada en todo el mundo, y se podría decir que se ha convertido en el método estándar de construcción de presas.

Se sabe que los valores en las propiedades del CCR tienen un rango de variación, y es por eso que el análisis de elementos finitos nos ayuda a encontrar posibles problemas de estabilidad.

En la presente tesis se presentan los valores comúnmente encontrados en las propiedades del CCR, y cómo las variaciones de estos valores influyen en la resistencia del concreto a medida que varían en el rango mayor y/o menor.

Se observó que los parámetros más sensibles a variaciones son la resistencia a la tensión, la cohesión y el ángulo de fricción, que al alejarse de la media hacen que la estructura de la presa presente zonas críticas, donde la resistencia del CCR disminuye.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.	1
II. CONCRETO COMPACTADO (CCR).	2
2.1 Filosofía geotécnica o de suelos.	2
2.2 Filosofía estructural o de concreto.	4
III. PRESAS: RCC FRENTE A OTROS MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN.	5
3.1 El CCR frente a concreto convencional.	5
3.2 CCR frente a presas de materiales sueltos.	5
IV. MATERIALES PARA LA MEZCLA DE RCC.	6
V. PROPORCIONES DE LOS MATERIALES EN LA MEZCLA DE CCR.	7
5.1 Proporciones de mezcla en la filosofía geotécnica o de suelos.	7
5.2 Proporciones de mezcla en la filosofía del concreto.	8
VI. PROPIEDADES DEL CCR.	9
6.1 Propiedades de Resistencia.	9
6.1.1 Resistencia a la compresión.	9
6.1.2 Resistencia a la tensión.	10
6.1.3 Resistencia al cizallamiento.	10
6.2 Propiedades elásticas.	10
6.2.1 Módulo de elasticidad (Módulo de Young).	10
6.2.2 Relación de Poisson.	10
6.3 Permeabilidad.	10
6.4 Durabilidad.	11
6.4.1 Resistencia al hielo y deshielo.	11
6.4.2 Resistencia a la erosión.	11

6.5 Cambios de volumen.	12
6.5.1 Propiedades térmicas.	12
6.5.2 Contracción por secado.	12
6.5.3 Desplazamiento-deformación.	12
VII. CONSIDERACIONES PARA PRESAS CON CCR.	13
VIII. GEOLOGÍA.	14
8.1 Marco Geológico Regional.	14
8.2 Geología Estructural De La Región.	14
8.3 Levantamiento geológico de la boquilla y el vaso de almacenamiento.	14
8.3.1 Geología de la Boquilla.	14
8.3.2 Geología estructural de la Boquilla.	15
IX. TECTÓNICA.	16
X. SISMOLOGÍA.	16
XI. METODOLOGÍA.	17
XII. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL CCR.	18
12.1 Datos del Modelo Base para CCR.	20
XIII. RESULTADOS.	21
XIV. RECOMENDACIONES.	23
XV. CONCLUSIONES.	25
XVI. BIBLIOGRAFÍA.	26
XVII. ANEXOS.	

I. INTRODUCCIÓN.

El concreto compactado con rodillos (Roller - Compacted Concrete) surgió como una necesidad de encontrar una manera económica de elaborar presas, conservando la misma o incluso, mejor resistencia y seguridad que el concreto convencional.

Desde los años 60's se buscaba una manera segura y eficiente de elaborar presas, y la manera más económica era las presas de materiales sueltos con relleno. Sin embargo este tipo de construcciones solían fallar o dar problemas cuando se daban desbordamientos, o debido a la erosión del material de relleno debido al agua.

Las presas de concreto eran más seguras, y a su vez, más costosas, debido a los materiales utilizados para la elaboración del concreto (básicamente, una gran cantidad de material cementoso). Fue así, como se llegó al dilema de construir una presa económica, pero sin descuidar la seguridad y calidad de la misma, surgiendo nuevas ideas de construcción, híbridos entre las presas de materiales sueltos con relleno y las de concreto, y finalmente surgiendo el método de construcción por concreto compactado.

Actualmente, las presas de concreto compactado han sustituido a las presas de concreto simple y de material suelto, y se utilizan ampliamente en todo el mundo.

En Sonora, también se adoptó esta técnica de construcción, y unos ejemplos de ello son las presas Pilares en el municipio de Álamos, y la presa Centenario, en el municipio de Nacoziari.

Desde la aparición del CCR, se han recopilado información y datos sobre diferentes parámetros y propiedades del mismo, obtenidos de los diferentes proyectos llevados a cabo. En la actualidad, es común tomar parámetros para la construcción de una nueva presa, de otros proyectos ya realizados con características similares, o estimar los valores faltantes a partir de la resistencia a la compresión simple. Esto sabiendo y aceptando que existirá una variabilidad en los valores.

El objetivo de la presente tesis, es averiguar si dichos parámetros o propiedades variables del CCR, pueden llegar a afectar al factor de resistencia del mismo, utilizando como herramienta el análisis de elementos finitos.

II. CONCRETO COMPACTADO (CCR).

El concreto compactado es más que un material para construcción, sino que es una técnica, la cual consiste en distribuir el concreto en secciones horizontales, por capas (30 cm en el caso de la Presa Pilaes, en Álamos, Sonora), para después ser compactado utilizando maquinaria especializada para el tipo de trabajo. Ésta es la característica que lo diferencia del concreto convencional, además de que el CCR utiliza una cantidad menor de cemento, lo cual lo hace un material mucho más económico para construcciones de gran magnitud, como las presas.

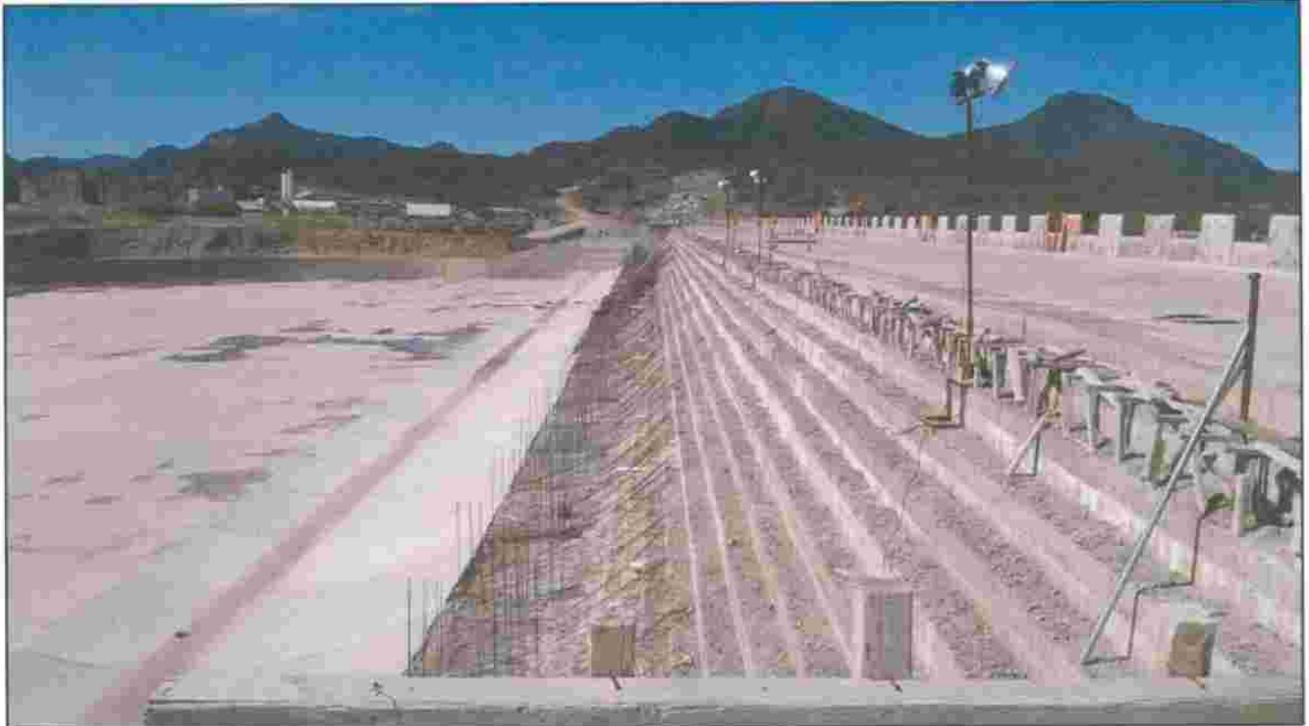


Figura 1. Distintas capas (30 cm.) de CCR colocadas en el dique, situado cerca del lugar de construcción de la presa Pilaes.

En cuanto a su elaboración, existen diversas filosofías o métodos de preparación con algunas variaciones, ya sea en el contenido y tamaño del material granular, contenido de agua, de cemento, de arena, etc. Su resistencia y demás propiedades dependerán de los agregados y el proporcionamiento que se utilice en la mezcla.

Se pueden destacar dos filosofías principales, la "geotécnica o de suelos", y la "estructural o de concreto". (Hansen, 1991).

2.1 Filosofía geotécnica o de suelos.

Se trata de un concreto elaborado con cemento enriquecido con material granular o agregados granulares, cuyo diseño de mezcla se basa en la relación de humedad-densidad. En este enfoque, se trata de encontrar, para un dado agregado en la mezcla, el contenido de humedad óptimo, ya que esta va íntimamente relacionada al

esfuerzo de compactación y a la densidad seca máxima que se puede alcanzar. En este caso, para un dado esfuerzo de compactación, existe una densidad óptima la cual nos dará como resultado una máxima densidad seca. Una humedad mayor o menor al óptimo nos dará como resultado una menor densidad seca.

Según algunos estudios de laboratorio elaborados por Reeves & Yates en 1985, ilustrados en la figura 2, si se aumenta el esfuerzo de compactación, tendremos una mayor densidad seca, y se requerirá de una menor humedad.

Así pues, encontrando la humedad óptima para un dado esfuerzo de compactación, se logrará obtener también la máxima resistencia a la compresión de esa mezcla. Esto se ilustra en la figura 3.

Debido a que las mezclas de CCR en esta filosofía usualmente contienen más de 2% de huecos, debido a los espacios de partícula con partícula que no alcanzan a ser llenados con finos o pasta, la compactación juega un papel muy importante.

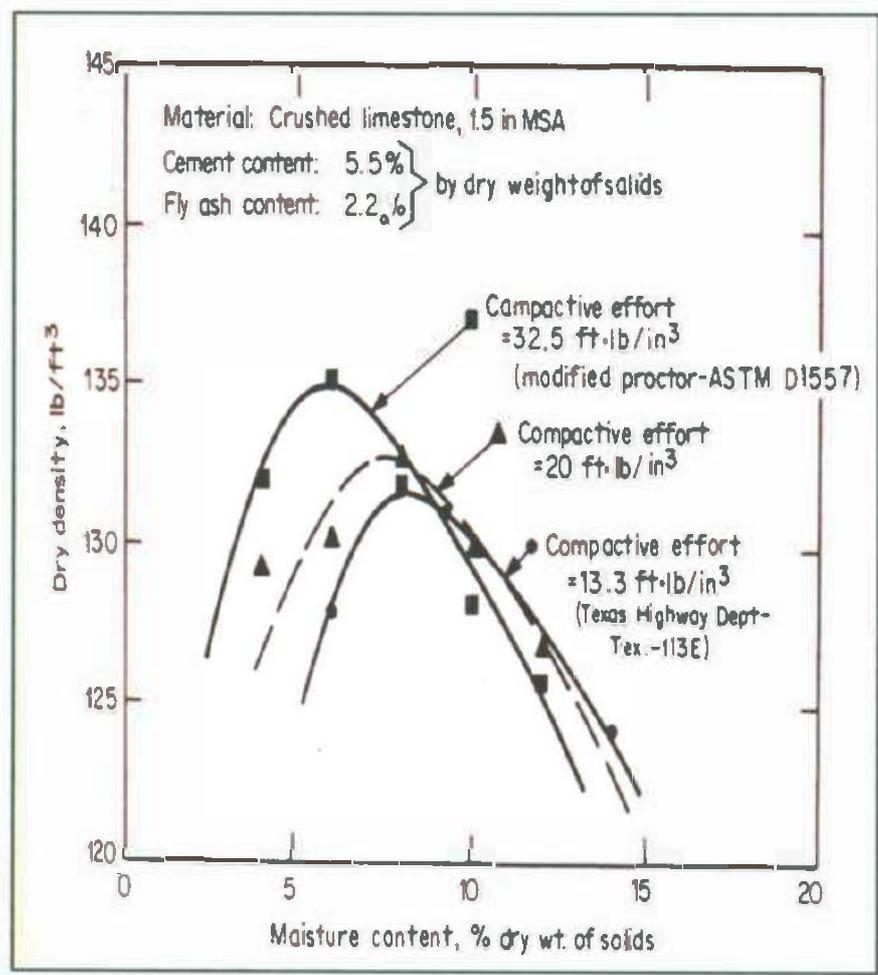


Figura 2. Relación contenido de humedad – densidad seca, dado un esfuerzo de compactación (Reeves & Yates, 1985).

III. PRESAS: CCR FRENTE A OTROS MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN.

Es importante mencionar las ventajas o las principales diferencias de construir proyectos como presas con concreto compactado con rodillos, en lugar de utilizar otro material o método, como por ejemplo, el concreto convencional o de material suelto.

3.1 El CCR frente a concreto convencional.

Una de las principales diferencias, y de mayor importancia entre, concreto compactado con rodillos y el concreto convencional, es el factor económico. Debido a que el CCR tiene una cantidad menor de cemento en su mezcla, esto significa una reducción considerable de precio, en comparación a un concreto armado convencional, donde las cantidades de material cementoso son mayores.

En cuanto a su resistencia y características, son similares si se utilizan los mismos agregados en la mezcla, por lo que el CCR puede alcanzar características similares a las del concreto convencional, a pesar de utilizar una menor cantidad de material cementoso.

Otra diferencia entre ambos concretos es, por ejemplo, que en el concreto convencional su consolidación se logra con vibración interna, mientras que en el CCR, se utiliza la compactación con rodillos.

Al momento de construir una presa, hay ciertas consideraciones a tomar, las cuales, dependiendo el método y materiales de construcción tenderán a variar. Un ejemplo es la elección del sitio de para los cimientos. Como el CCR tiene un costo menor por unidad de volumen, se tiene mayor libertad a la hora de elegir el lugar donde se colocarán los cimientos, puesto que no es tan necesario que sea un lugar minimice el volumen de concreto a utilizar.

Presas construidas con CCR pueden tener como cimiento muchos diferentes tipos de roca, como basalto, granito, caliza, etc., mientras que para el concreto convencional está limitado o es preferente que se coloque sobre una roca con características como alta capacidad de soporte y un alto grado de resistencia a la erosión y filtración.

3.2 CCR frente a presas de materiales sueltos.

Las presas de materiales sueltos eran tipos de presas muy utilizados debido a que resultaban mucho más económicos en comparación al concreto convencional. Éstas se preferían utilizar en lugares amplios, donde una presa de concreto costaría demasiado.

Estas presas se elaboran con rocas y diferentes materiales, utilizando diversos tamaños y finos, de tal manera de que los huecos entre partículas de igual tamaño, sean rellenos por material más pequeño y desaparezcan.

Sin embargo, el concreto convencional así como el CCR son superiores en cuanto a resistencia. Si bien, las presas de materiales sueltos resultaban ser más económicas, tendían a fallar más, en comparación con las de concreto convencional, esto debido problemas de erosión interna donde los materiales finos se iban desgastando con el agua.

El CCR resultó una gran alternativa, ya que, se puede alcanzar una resistencia similar a la del concreto convencional, y aun así utilizarse en lugares más amplios, sin que el costo de la obra sea demasiado grande. Sin embargo, las presas de material suelto son más económicas, pero si se requiere de una presa con buena resistencia y durabilidad, en un lugar donde el concreto convencional sería demasiado caro, el CCR es la mejor opción.

IV. MATERIALES PARA LA MEZCLA DE CCR.

Para el concreto compactado se utilizan esencialmente los mismos materiales que para el concreto convencional, pero utilizando diferentes proporciones, y también incluyendo comúnmente puzolana junto al cemento Portland.

En cuanto al cemento Portland utilizado, debido a las grandes dimensiones que suelen tener las presas, se requiere uno que genere menos calor; así mismo, los cuidados a considerar para sustancias químicas o reactivas serán los mismo que se toman en cuenta al elegir cemento para concreto convencional.

La puzolana que puede ser empleada en el CCR se basa en estándares establecidos (ASTM 618).

Los agregados son un factor que se maneja de manera similar al concreto convencional. Se considera generalmente el tamaño máximo de agregado, el porcentaje de arena en la mezcla, y la cantidad de finos menores a 0.75 mm. La filosofía geotécnica o de suelos suele utilizar en la mezcla un porcentaje mayor de finos, siempre y cuando estos no sean plásticos y ayuden a llenar los huecos en la mezcla, con la finalidad de disminuir el agua requerida y mejorar la compactibilidad. La función de la estructura terminada y las propiedades requeridas determinarán los agregados a utilizar, así como su calidad.

En cuanto al tamaño del agregado, debido a las dos filosofías de elaboración de CCR antes mencionadas, se difiere en los parámetros para la elección del tamaño. Para la filosofía de concreto, los requerimientos del tamaño de agregado son similares al del concreto convencional. Como ya se mencionó, en esta filosofía se quiere rellenar los

huecos con la pasta producida en la mezcla, por lo que una buena elección de tamaños es importante para la disminución de esos vacíos.

Hansen, en su libro *Roller Compacted Concrete* comenta que para esta filosofía el tamaño máximo de partícula es aproximadamente 3 pulgadas (75 a 80 mm), y que principalmente se utilizan cuatro tipos de tamaños para agregados: de 1.5 a 3 pulgadas (38 a 75 mm), $\frac{3}{4}$ a 1.5 pulgadas (19 a 38 mm), tamiz de No 4 a $\frac{3}{4}$ (4.75 a 19 mm), y finalmente menos de 4.75 mm. Los porcentajes de arena se encuentran normalmente entre el 30 y 35% del total de agregados.

En cuanto a la filosofía de suelos o geotécnica, hay una tendencia a utilizar un tamaño máximo de agregado de 50 mm, y manejar porcentajes de arena de 35 a 40%.

En cuanto al agua, el único requerimiento es que no tenga cantidades excesivas de contenidos alcalinos, ácidos u orgánicos que puedan afectar a la dureza del concreto. Generalmente se utiliza de 89 a 119 kg/m³ para tamaños de agregados máximos mayores a 50 mm.

V. PROPORCIONES DE LOS MATERIALES EN LA MEZCLA DE CCR.

El objetivo en el proporcionamiento de las mezclas es producir un concreto con las propiedades que requiere el proyecto, usando la combinación más económica de materiales que se presten para la compactación con rodillos.

Existen varios métodos que determinan la proporción de los materiales en la mezcla del CCR para presas, y son mencionados en el reporte 207.5R del Instituto de Concreto Americano (ACI por sus siglas en inglés), sin embargo, todos los métodos inician siguiente dos pasos principales: Elegir las propiedades que se desean tener en el CCR, y luego determinar las propiedades de los materiales a usar. Para esto, hay que basarse en el tipo de estructura que se construirá, la disponibilidad de los materiales y sus costos, el tipo de cemento y si se utilizará puzolana o no en la mezcla.

5.1 Proporciones de mezcla en la filosofía geotécnica o de suelos.

Se empieza normalmente con varias pruebas, gradando los agregados y variando el contenido de cemento, para comparar resultados de fuerza a la compresión, con los requerimientos del proyecto. Un tamaño máximo de agregado de 75 mm. es normalmente utilizado en esta mezcla, por ser considerado el óptimo económico.

La cantidad de agua a utilizar, se determina observando la consistencia de las mezclas de las diferentes pruebas con diferentes proporciones de agua, y confiando en la experiencia. Esto es, normalmente, cuando en la mezcla de agua y agregados

gruesos y finos ya no se ven huecos, sin dejar que llegue a parecer una mezcla gomosa.

Una vez se tiene la cantidad de agua y agregados, se preparan varias muestras de laboratorio, variando el contenido de cemento. En la mayoría de las mezclas que siguen este método, el contenido de cemento varía desde 60 a 104 kg/in³.

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizan en diferentes tiempos (3, 7, 14, 28, 90, 180, 360 días), sin embargo, si no se cuenta con el tiempo suficiente, los resultados se estiman con diferentes curvas calculadas, o se toman de proyectos similares o de pruebas similares hechas en el pasado. Una vez teniendo diferentes curvas, se selecciona aquellas cuyos parámetros cumpla con los requerimientos del proyecto, teniendo en cuenta también un coeficiente de seguridad y de variación de coeficientes.

El aumento de fuerza de compactación, ayuda a reducir estos huecos y a aumentar la densidad, así como la fuerza del concreto, sin embargo, una mala gradación de agregados puede ocasionar que el concreto tenga una matriz completamente compactada, y aun así contener huecos con lo cual se obtiene una menor densidad y resistencia.

En general, estos métodos de mezcla han sido utilizados ampliamente para la modificación o rehabilitación de presas existente, donde la durabilidad y la erosión eran los factores más importantes a considerar para el CCR expuesto.

5.2 Proporciones de mezcla en la filosofía del concreto.

Dentro del enfoque o filosofía del concreto, existen a su vez varios métodos que se pueden seguir para elegir las proporciones de una mezcla de CCR. La premisa básica de todos ellos se basa en que la cantidad de pasta en la mezcla debe exceder los huecos formados entre los agregados. Es por ello, que se requiere un buen control en el volumen y/o tamaño de los agregados a utilizar, puesto que menos huecos significan menor cantidad de pasta requerida.

Usualmente en éste método, se fijan varios componentes de la mezcla (ya sea el cemento, el agua, o los agregados) y se varía solo uno, hasta llegar a las características de CCR que mejor se adaptan a los requerimientos del concreto. Si se utiliza este método fijando y variando diferentes componentes, se puede optimizar la mezcla.

VI. PROPIEDADES DEL CCR.

Las propiedades del CCR dependen de la calidad de los materiales, las proporciones de las mezclas, y por supuesto, del grado de compactación o consolidación que se le dé. Debido a la gran cantidad de materiales utilizados para la elaboración del CCR, sus valores o propiedades varían dentro de ciertos rangos.

Las propiedades que dependen de los agregados, como la elasticidad y las propiedades térmicas, son similares a las del concreto convencional si utiliza los mismos agregados.

6.1 Propiedades de Resistencia.

En cuanto a las propiedades de resistencia del CCR, los testigos obtenidos directamente desde obras son un mejor indicador de ésta que los resultados obtenidos en laboratorios.

6.1.1 Resistencia a la compresión.

Como ya se mencionó, la resistencia del concreto dependerá del contenido óptimo de humedad para un esfuerzo dado de compactación. Sin embargo, una vez establecida un contenido de agua y un cierto esfuerzo de compactación, la resistencia de concreto dependerá del contenido de cemento y puzolana en la mezcla. La resistencia del concreto aumentará con el tiempo y con la cantidad de material cementante que contenga, como se muestra en la figura 4.

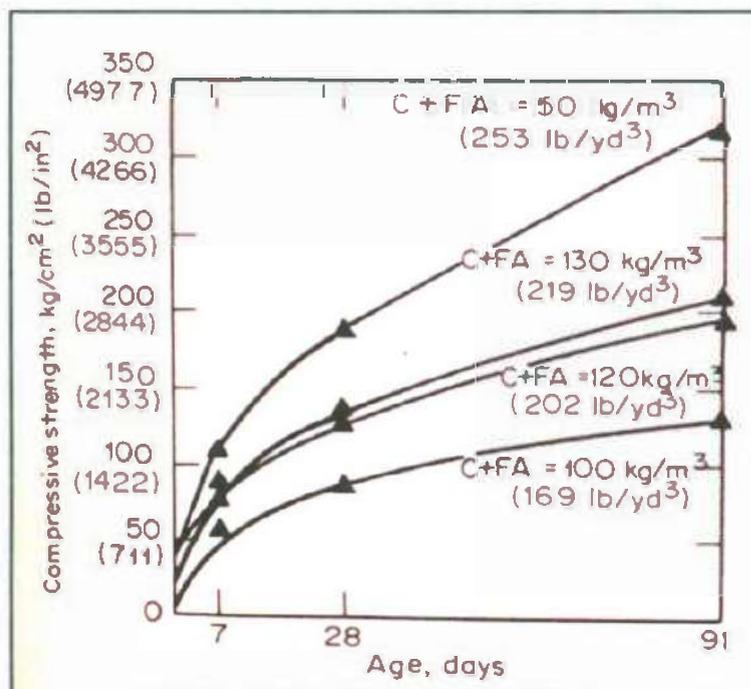


Figura 4. Relación de contenido cementoso y resistencia a la compresión, en relación al tiempo (Yamauchi et al).

6.1.2 Resistencia a la tensión.

La resistencia a la tensión se puede obtener con pruebas para medir la tensión directa o indirecta (una prueba brasileña). En presas de concreto convencional donde se realizó la prueba brasileña en núcleos extraídos, la resistencia a la tensión es aproximadamente un 10% de la resistencia a la compresión.

6.1.3 Resistencia al cizallamiento.

La utilización de CCR significa que existirán capas cada cierta distancia (0.3 a 0.6 m) verticalmente. Para determinar este parámetro se puede utilizar la ecuación de Coulomb.

Usualmente se utiliza un método directo para la obtención de éste parámetro. Los valores de cohesión y ángulo de fricción para el CCR varían en cierto rango. En el caso del ángulo de fricción varía de 33 a 76°, siendo la media 46°, con una desviación estándar de 16°. El valor de la cohesión varía desde 0.510–4.41 MPa, con una media de 0.301MPa y una desviación estándar de 1.2MPa.

6.2 Propiedades elásticas.

6.2.1 Módulo de elasticidad (Módulo de Young).

Éste módulo en el concreto convencional, es proporcional a su unidad de peso y su resistencia a la compresión. En el caso del CCR, el módulo de Young es menor.

Se ha observado que los tipos de agregados utilizados en el CCR son un factor determinante para el módulo de elasticidad. Agregados con una baja unidad de peso dan como resultado valores más bajos de elasticidad. En cuanto al diseño de presas, un Módulo de Young menor es bueno cuando se requiere reducir potencialmente las fracturas bajo ciertos niveles de estrés (Hansen, 1991).

6.2.2 Relación de Poisson.

Para el CCR este valor tiene usualmente un rango de 0.17 a 0.22, siendo 0.20 el típicamente encontrado.

6.3 Permeabilidad.

Se refiere a la cantidad de agua que pasa a través del material, así como la que pasa por fracturas o uniones en la estructura de la presa. Las filtraciones que se estudian son: las filtraciones a través de uniones y fracturas, las filtraciones a través del concreto convencional y el CCR y las filtraciones a través de los materiales de cimentación. El agua que logra filtrarse a través del CCR es debido a los huecos de aire que éste contiene, ya antes mencionados.

La impermeabilidad del concreto compactado se puede relacionar directamente con el contenido de material cementoso en la mezcla. En el caso de la filosofía estructural o de concreto, si la pasta producida tiene una suficiente cantidad de agua y concreto, está rellena los huecos y la filtración disminuirá. En el caso del enfoque geotécnico, una buena selección de agregados de diferentes tamaños, así como de finos, y un aumento en el cemento y la compactación ayudarán a disminuir la filtración de agua, ayudarán a disminuir los huecos en la mezcla, y con esto la filtración de agua.

6.4 Durabilidad.

Es importante que el CCR tenga una buena durabilidad ya que es un material que estará expuesto a condiciones de humedad, cambios climáticos, erosión y fuerzas hidráulicas.

6.4.1 Resistencia al hielo y deshielo.

Un CCR elaborado con mezclas de alta resistencia y una baja permeabilidad, tiene una mayor resistencia al congelamiento-descongelamiento. En una presa, las caras que están expuestas a esta situación mientras se encuentran húmedas son las de mayor importancia. Para lograr un CCR con características de resistencia a este parámetro, se requerirá una mayor cantidad de cemento que aquella necesaria, por ejemplo, para lograr una buena resistencia a la compresión. En este caso no se recomienda utilizar puzolana en la mezcla.

En este caso, de la presa Pilares, esta situación no se da en el lugar.

6.4.2 Resistencia a la erosión.

En este parámetro, la resistencia a la erosión del concreto compactado es directamente proporcional a su resistencia a la compresión y la resistencia abrasiva de los agregados (Hansen, 1991). En general, el CCR ha demostrado tener una buena resistencia a la erosión y abrasión. En caso de tener secciones de CCR en un lugar de la presa donde se expone continuamente a flujos de agua, como un vertedero, las distintas capas de CCR deben ser propiamente unidas para prevenir la delaminación. Una buena unión entre capas es lograda manteniendo una superficie limpia, plana y húmeda. En algunos casos, para asegurarse de una unión correcta, se coloca una pequeña capa de mezcla enriquecida con cemento mortero, antes de colocar la siguiente capa.

6.5 Cambios de volumen.

Dado el tamaño de las estructuras como las presas, es importante conocer y entender los factores que determinan los cambios de volumen, para minimizarlos y así disminuir la aparición de fracturas.

6.5.1 Propiedades térmicas.

Las propiedades térmicas del concreto compactado son principalmente dependientes de los agregados, así pues, si los agregados del CCR son iguales a los del concreto convencional, las propiedades térmicas serán similares a las de este. Las propiedades a considerar para un análisis térmico incluyen el calor específico del material, difusividad, conductividad y el coeficiente de expansión térmico.

En el caso de la presa pilares, la temperatura del CCR en planta era de 23°, y una vez colocado ésta aumentaba de uno a dos grados, llegando a 25° o 26°. Para que el concreto no tenga una temperatura muy alta, se cuida la temperatura del agregado, manteniéndolo bajo sombra y, de ser necesario, regándolo para bajar la temperatura. En caso de ser regado, se debe escurrir el exceso de agua, para poder llegar a la mezcla ideal, la cual debe contener un contenido de agua y humedad específica (la humedad del CCR en Pilares se encuentra entre 7% y 9%).

6.5.2 Contracción por secado.

Debido a que el CCR inicialmente es una mezcla húmeda, tiende a estar expandido, pero una vez éste se seca, empieza un proceso de contracción. En cualquier mezcla de concreto, ya sea convencional o CCR, la pasta es la que se contrae. Entonces, para una cantidad de cemento dada, la contracción por sequedad será determinada por el contenido de agua principalmente. Como ya se mencionó, el concreto compactado utiliza una menor cantidad de agua en la mezcla, por lo que su contracción será menor comparada con la del concreto convencional.

6.5.3 Desplazamiento-deformación.

Debido a que el concreto estará sometido a una carga constante, ocurre una deformación en él. Éste parámetro está en función de los agregados y la resistencia del CCR. Mezclas de concreto con alta resistencia tienen una menor deformación que aquellas con un bajo módulo de Young. En el caso de presas construidas con CCR, el desplazamiento es una manera de aliviar los esfuerzos existentes, por lo cual es una situación deseable, y generalmente no es un parámetro que requiere de cuidado especial.

VII. CONSIDERACIONES PARA PRESAS CON CCR.

Se tienen algunas consideraciones para el diseño de una presa con CCR. La elección del lugar donde se llevará a cabo la construcción es una de ellas. La elección del sitio es similar a la del concreto convencional, aunque puede ser más flexible y no necesariamente tiene que ser un sitio que minimice el uso de cemento.

Un punto importante que se debe tener en cuenta, es la roca donde se pondrán los cimientos de la presa. Se deben tener en cuenta propiedades como resistencia a la compresión, resistencia al cizallamiento, módulo de deformación, coeficiente de Poisson y su permeabilidad.

La resistencia a la compresión de la roca determinará el grosor de la base de la presa. La resistencia al cizallamiento dependerá de la cohesión y la fricción interna de la roca. El fracturamiento y fallamiento no impiden que se pueda construir una presa con CCR, sin embargo, se requerirá invertir dinero en el cuidado y monitoreo de las mismas, con el fin de que no ocurra un fracturamiento en el concreto.

Otra característica a considerar son las variaciones del módulo de deformación de la roca. No importa que ésta tenga un módulo bajo, pero es importante que no haya diferencia de éste en diferentes áreas. Cambios abruptos del módulo de deformación pueden generar fracturamiento del CCR.

Si en el lugar seleccionado existe mucho sedimento, o la roca está muy meteorizada, se debe retirar, de tal manera que se trabaje sobre la roca fresca. Sin embargo, es posible construir sobre material con un muy bajo módulo de deformación e incluso sobre sedimentos, si se tienen los cuidados necesarios, y si se construye, por ejemplo, una base de CCR o concreto convencional, y si se cuida el drenaje, de tal manera de que no exista filtración debajo de la base, y se genere una presión de levantamiento.

Una presa con CCR debe ser construida considerando ciertos parámetros de cargas, o combinaciones de cargas que puedan ocurrir:

- *Combinación de cargas usual*: Se tiene en consideración la presión hidrostática al nivel normal de operación del reservorio, las cargas muertas, la presión de levantamiento, presión de hielo, junto con los posibles efectos de la temperatura, todas éstas ocurriendo al mismo tiempo.

- *Combinación de cargas inusual (desbordamiento)*: consiste en la carga hidrostática del reservorio a la máxima altura diseñada, y todas las demás cargas antes mencionadas, ocurriendo al mismo tiempo.

- *Combinación de carga extrema (sismicidad)*: considera los parámetros de la combinación usual, más los efectos de un evento de sismicidad, en su nivel más alto posible en el área.

VIII. GEOLOGÍA.

8.1 Marco Geológico Regional.

El territorio del Estado de Sonora se integra por áreas que corresponden a cuatro Provincias o Regiones Fisiográficas del país tales como son el Desierto Sonorense, en el noroeste y oeste; la Sierra Madre Occidental, en la parte Oriental; Sierras y Llanuras del Norte, en la porción boreal; y Llanura Costera del Pacífico, en el sur.

Dentro de la provincia Sierra Madre Occidental está la subprovincia Pie de la Sierra que es donde se localiza el proyecto. Esta subprovincia ocupa en la entidad una extensión de 8,561.36 km². Tiene la forma de una franja angosta ubicada al poniente del Pacífico. Abarca parte de los municipios de: Cajeme, Quiriego, Rosario, Álamos, Navojoa y Huatabampo.

8.2 Geología Estructural De La Región.

Las principales estructuras en la región están comprendidas por fallas y fracturas de orientación noroeste-sureste en su mayoría y otras de orientación noreste-suroeste y norte-sur.

En general, la estructura de la sierra es debido a fallamiento y basculamiento de bloques, lo que causó rasgos geomorfológicos y fisiográficos característicos de este tipo de estructuras geológicas.

Por lo general, las grandes estructuras de granito, son de tipo batolítico y la secuencia volcánica son paquetes de gran espesor de carácter pseudo-estratificado y masivo para ignimbrítas y derrames de lava batolítica.

Los fallamientos y fracturamientos controlan la geomorfología de la zona, los cuales han favorecido el desarrollo de la mayoría de arroyos, el fallamiento de bloques también ha hecho cambios en los echados.

8.3 Levantamiento geológico de la boquilla y el vaso de almacenamiento.

8.3.1 Geología de la Boquilla.

La superficie donde se ubica la construcción de la Presa, así como en el área del Dique situado sobre la margen derecha del Río Mayo, se encuentra sobre conglomerados del Terciario Superior. En el cauce de los arroyos y del Río Mayo se presentan los depósitos de material granular del aluvión.

Las rocas aflorantes en el sitio de la boquilla corresponden a rocas ígneas intrusivas compuestas por un basamento de granito y volcánicas - sedimentarias de la Unidad Baucarit, compuesta por conglomerados polimícticos de gran presencia como aglomerados Sierra Madre Occidental, las cuales muestran, localmente, intercalaciones de areniscas.

A continuación, se hace una descripción de las Unidades litológicas iniciando por aquellas que afloran en la boquilla, posteriormente las que cuentan con mayor longitud en el Dique y finalmente se mencionan los depósitos aluviales y depósitos de talud.

- Conglomerado. Roca de origen Vulcano-sedimentaria con estructura estratificada. La estructura y textura del macizo rocoso en el pie de la formación es la de un aglomerado volcánico, y comienza a ser estratificada en estratos que van de 8, 12 y hasta 18 metros entre estrato y estrato hacia su parte media superior. La presencia de horizontes arenosos es notoria dentro de la secuencia y posee en general una dirección de caída hacia SW. En algunas partes se observa una textura de brecha volcánica y en otras una estructura pseudo-estratificada.

Es exactamente en esta Unidad rocosa donde está proyectada la construcción de la cortina. El macizo rocoso muestra zonas socavadas superficialmente por la erosión. Se observan minerales oxidados en ella, que con el peso del tiempo han sido erosionados o lavados. Existen también en algunas fracturas sellos de discontinuos de carbonato de calcio.

- Granito. Esta Unidad está compuesta por una roca de dimensiones batolíticas, con una distribución amplia en la zona del Dique y se muestra tentativamente a varios metros del nivel topográfico del cauce del Río Mayo. Se observa en algunos afloramientos rocosos un Granito alterado, moderadamente alterado y en algunas partes del Dique se puede observar muy fracturado.

- Aluvión. Son depósitos compuestos por boleos sueltos con granulometría variable que varía como bloques, gravas, arenas y limos. Sus espesores son de alrededor de los 9.0 metros.

- Depósitos de Talud. Los materiales sueltos y no cohesivos se formaron por el intemperismo y procesos erosivos de la roca que los subyace.

8.3.2 Geología estructural de la Boquilla.

En la Unidad Granítica Fueron censados una serie de fracturas, que se distinguen por tener una persistencia moderada o discontinua, sus trazas pueden llegar a tener desde un metro hasta seis de longitud, la forma de la superficie puede ser plana y ondulada, con rugosidad al tacto, están abiertas milimétricamente y por lo tanto muestran patina en sus juntas, varía la frecuencia de familia, ya que pueden ser de centímetros o decenas de centímetros, lo que provoca que cuerpos de roca intacta de forma cúbica de pequeñas dimensiones, tabular y poliédrica.

Los cuerpos de roca intacta, dependiendo del grado de alteración del afloramiento, pueden estar más o menos empacados unos con otros, en algunos casos, los afloramientos pueden ser excavados con facilidad utilizando la pica de geólogo y en otros están fuertemente cementados unos con otros.

El análisis estereográfico señalan que el Granito que se encuentra sobre la zona del Dique está dividido por fracturas que varían de direcciones; existiendo al menos cuatro direcciones preferenciales, con la presencian no muy bien definida de un grupo de planos de fracturas por su dispersión y poca densidad de concentración polar.

IX. TECTÓNICA.

En la porción nor-occidental de México, se distinguen dos fases tectónicas de deformación, una fase compresiva caracterizada por la convergencia de las Placas Pacífico y Americana, durante el Cretácico, Tardío-Terciario temprano, a la cual se relacionan los emplazamientos batolíticos, el plegamiento y el metamorfismo de las unidades del Mesozoico.

La segunda fase fue de carácter distensivo en el Mioceno Tardío-Plioceno Tardío. Está representado por la exuberante presencia de fallas normales, las cuales crearon pequeñas estructuras de "Horst y Grabens" que afectaron la Sierra Madre Occidental. Los derrames básicos alcalinos y grandes depósitos de sedimentos clásticos continentales de la formación Bucarit relacionan en si esta fase.

X. SISMOLOGÍA.

El área del proyecto se localiza dentro de una zona pre-sísmica, donde la ocurrencia de sismos es poca, lo cual muestra actualmente que se encuentra en una fase distensiva, que provoca la expansión del fondo oceánico, del Golfo de California, con el consecuente movimiento de separación de la Península de Baja California Norte.

Al saber que la Península de Baja California se mueve con la Placa del Pacífico confirmó que el resto del país pertenece a la Placa Norteamericana y que la liberación de energía se concentra en el Golfo de México, en donde el mecanismo de movimiento es a través de fallas transformes con una orientación de noroeste de desplazamiento derecho. Estas fallas enlazan fragmentos individuales de zonas de acreción, formando:

- a) La apertura y movimiento del fondo oceánico
- b) El desplazamiento de la península del continente
- c) La escasa o nula sismicidad en la región de estudio

Entregada la poca información sismológica que se conoce de esta región, la concentración de sucesos menores de magnitud 6 en la Escala Richter en la zona máxima activa, se concluye que el riesgo sísmico en el área del proyecto de interés en cuestión es baja, ya que por la distancia el amortiguamiento de los impulsos sísmicos es propicia para minimizar la aceleración del terreno en la estabilidad del proyecto.

XI. METODOLOGÍA.

El análisis de elementos finitos ha sido uno de los métodos numéricos más ampliamente utilizado desde su aparición a finales de los los 60's en el diseño ingenieril en mecánica de rocas, esto debido a su flexibilidad para el tratamiento de material heterogéneo, con deformaciones no lineares, condiciones de fronteras complejas, con esfuerzos in-situ y gravitacionales.

Existen varios tipos de análisis numéricos que se pueden llevar a cabo en mecánica de rocas, y el análisis de elementos finitos cae dentro de los denominados *métodos continuos*, junto con otros como el análisis de diferencias finitas y el análisis de elementos de fronteras. Así mismo, existen *métodos discretos*, como el análisis de elementos discretos, y *métodos híbridos*, que combinan los dos métodos continuos y discretos.

Estos modelos numéricos son de gran ayuda a la hora de detectar áreas problemáticas en los diseños que se utilizan y de ser así, realizar las modificaciones correspondientes.

A pesar de que el análisis de elementos finitos es ampliamente utilizado, tiene una limitante, y es que tiene problemas al tratar con discontinuidades, al ser un modelo de análisis continuo. Sin embargo, se han elaborado ecuaciones y algoritmos especiales para superar estas limitaciones, y es por esto que existen los métodos híbridos.

Para observar el progreso y los datos obtenidos hasta el momento, se realizó una visita al lugar de construcción de la presa Pilares, ubicada en Álamos Sonora.

XII. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL CCR.

Es importante analizar las propiedades del CCR, y saber que existe una variabilidad entre algunas de ellas. Lo importante es entender y conocer si estas variaciones en ciertos valores implican un gran cambio en el CCR, como por ejemplo una disminución considerable de la resistencia del mismo. El análisis se llevó a cabo en el software Phase2 de rocscience, el cual nos permite analizar los esfuerzos sobre uno o varios materiales y, en el caso de la presa con CCR, observar si soportará las cargas a la cual será sometida.

Así pues, para iniciar el análisis de sensibilidad, se requiere tener algunos datos iniciales, como las propiedades de los materiales del lugar. Se utilizaron 4 materiales para el análisis de este proyecto: La roca, el aluvión, un concreto convencional $f_c=150$, y el concreto compactado con rodillos.

Datos de la roca.

- Tipo: Granito.
- Tipo de material: elástico.
- $m_i = 22$.
- $MR = 425$.
- Peso volumétrico = 0.027 MN/m^3
- Módulo de Young = 48000 MPa .
- Coeficiente de Poisson = 0.25 .
- Cohesión = 5.3 MPa .
- Ángulo de fricción = 51° .
- Resistencia a tensión indirecta = 0.53 MPa .
- Módulo de deformación = 35 GPa .

Criterios Hoek-Brown

- Resistencia a la compresión intacta = 112 MPa .
- $m_b = 7.535$.
- $s = 0.0357$.
- $a = 0.501$.

Datos del aluvión.

- Tipo de material: elástico.
- Peso volumétrico = 0.02 MN/m^3
- Módulo de Young = 200 MPa .
- Coeficiente de Poisson = 0.3 .

Criterios Mohr Coulomb

- Resistencia a la tensión = 0 MPa .
- Ángulo de fricción = 35° .
- Cohesión = 0 .

Datos del concreto simple 150.

- Tipo de material: elástico.
- Peso volumétrico = 0.025 MN/m^3
- Módulo de Young = 25000 MPa .
- Coeficiente de Poisson = 0.2 .

Cráterios Mohr Coulomb

- Resistencia a la tensión = 2.5 MPa .
- Ángulo de fricción = 55° .
- Cohesión = 2.4 MPa .

Datos del CCR.

- Tipo de material: elástico.
- Peso volumétrico = 0.027 MN/m^3
- Módulo de Young = $13,168.98 \text{ MPa}$.
- Coeficiente de Poisson = $0.17 - 0.22$
- Resistencia a la compresión: 10 MPa

Cráterios Mohr Coulomb

- Resistencia a la tensión = $0.5 - 1.5 \text{ MPa}$.
- Ángulo de fricción = $33^\circ - 76^\circ$.
- Cohesión = $0.510 - 4.41 \text{ MPa}$.

A continuación, en la figura 5, se ilustra la sección vertical-transversal del modelo base hecho a escala en el programa de AutoCAD, donde se pueden observar las partes principales de este mismo. Las cotas descritas en el dibujo se encuentran en centímetros.

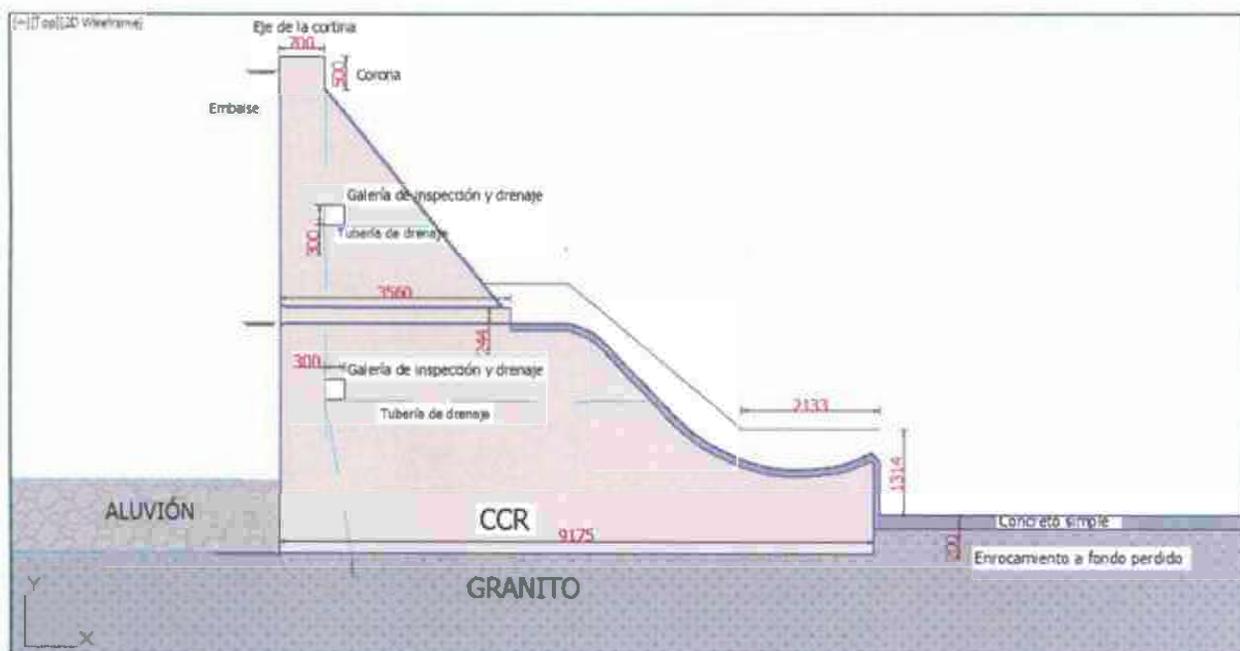


Figura 5. Modelo base hecho a escala en AutoCAD (Sección vertical-transversal).

12.1 Datos del Modelo Base para CCR.

Los datos utilizados para la simulación base, se pueden apreciar en la tabla 1. De los datos presentes ahí, solo los del concreto compactado serán variados (los valores que se muestran en la tabla 1 para el CCR son valores medios, utilizados para la simulación base), mientras que los demás se mantendrán fijos.

Tabla 1.

Material	CCR	Concreto 150'	Granito	Aluvi3n
Peso Volum3trico	0.027 MN/m ³	0.025 MN/m ³	0.027 MN/m ³	0.02 MN/m ³
M3dulo de Young	13,168.98 MPa	25000 MPa	48000	200 MPa
Coefficiente de Poisson	0.195	0.2	0.25	0.3
Resistencia a la tensi3n	1.0 MPa	2.5 MPa	0.53 MPa	0 MPa
Angulo de fricci3n	49°	55°	51°	35°
Cohesi3n	3.01 MPa	2.4 MPa	5.3 MPa	0

Tabla 1. Datos utilizados en el software para la simulaci3n del modelo base.

A continuaci3n, en la figura 6, se presentan los resultados de la primera simulaci3n, la cual se tomar3 como base para evaluar despu3s los cambios que sufrir3 el modelo con respecto a 3sta, al variar los datos. Las cargas hidr3ulicas se ilustran con flechas rojas, en el modelo.

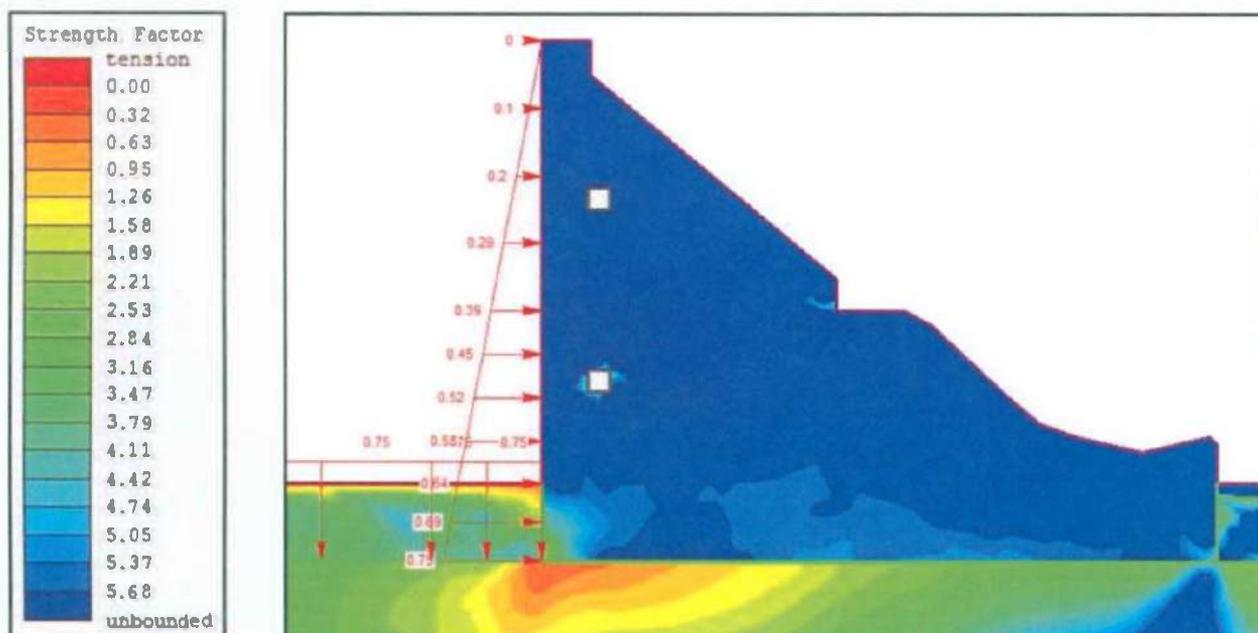


Figura 6. Resultados de la simulaci3n con el modelo base. Secci3n vertical-transversal.

XIII. RESULTADOS.

El *coeficiente de Poisson* es un valor que tiene variaciones en el CCR, así que, en las primeras dos corridas del software, se variará este valor tomando en cuenta el rango menor y el mayor, 0.17 y 0.22 respectivamente. Los demás valores del modelo base se quedan fijos. Al hacer las corridas, no se observó ningún cambio que tuviese que ser de cuidado o de especial atención.

En el caso de la *resistencia a la tensión*, también se realizan dos corridas, con el rango menor y mayor, es decir, 0.5 MPa. y 1.5 MPa. respectivamente. Al bajar el valor de la resistencia a la tensión, se pudo observar una zona crítica en la base de la presa de CCR, como se muestra en la figura 7. No se sabe con seguridad que es lo que ocurrirá en ese sitio, y en estos casos la experiencia es un factor importante para predecir comportamientos y acontecimientos, así como en la toma de decisiones a la hora de solucionar el problema. Así pues, este valor es de importancia a la hora de diseñar y construir presas con CCR.

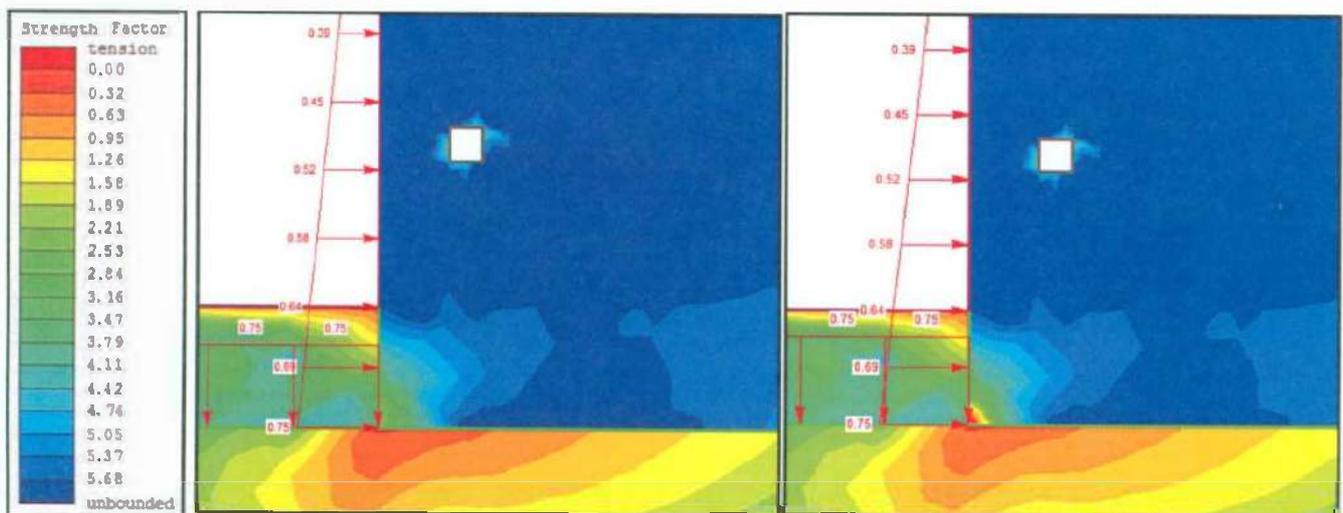


Figura 7. Resultados del modelo base (zoom área inferior), en comparación con los resultados utilizando un valor menor de resistencia a la tensión (derecha).

Se analizaron las variaciones del *ángulo de fricción*, que va de 33° a 76°. El análisis con el ángulo de fricción en el rango más bajo, no mostró ninguna zona problemática en el CCR, sin embargo, en el caso del valor más alto, 76°, se pudo observar una zona crítica, en el mismo sitio que se presentó al bajar la resistencia a la tensión. Esto se puede observar en la figura 8.

El valor de la *cohesión* también tiende a variar, desde 0.510 MPa. a 4.41 MPa, por lo que se analizó cómo ésta variación afectaría al CCR. El valor del rango superior de la cohesión no mostró problema alguno, pero al variar el valor del rango menor, se observó una zona crítica, nuevamente en la base de la presa. Ver figura 9.

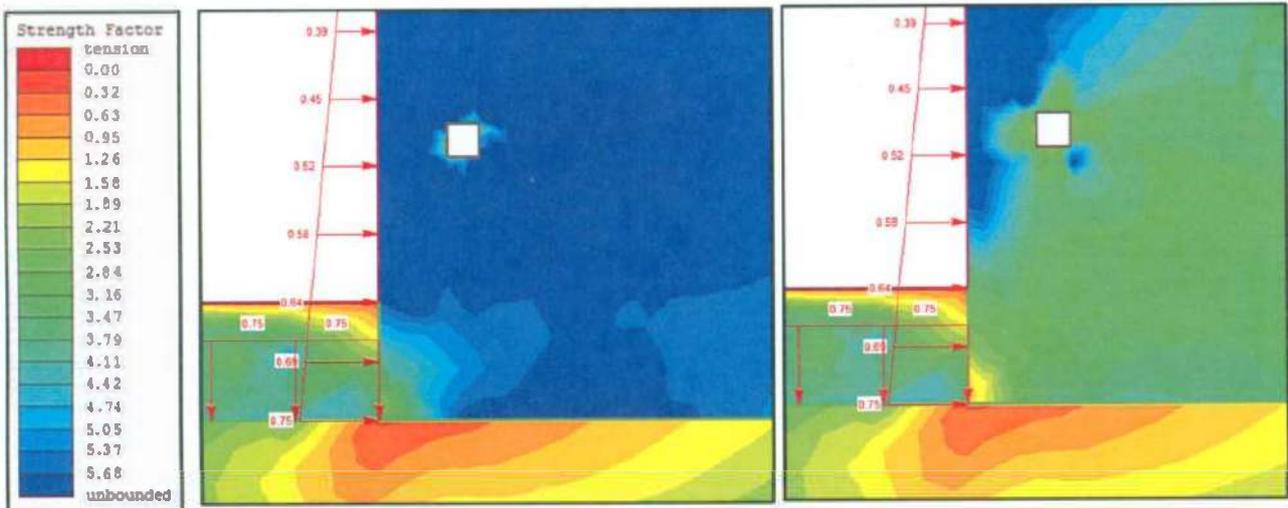


Figura 8. Comparación entre simulación del modelo base (izquierda), y simulación con el valor de 76° para el ángulo de fricción.

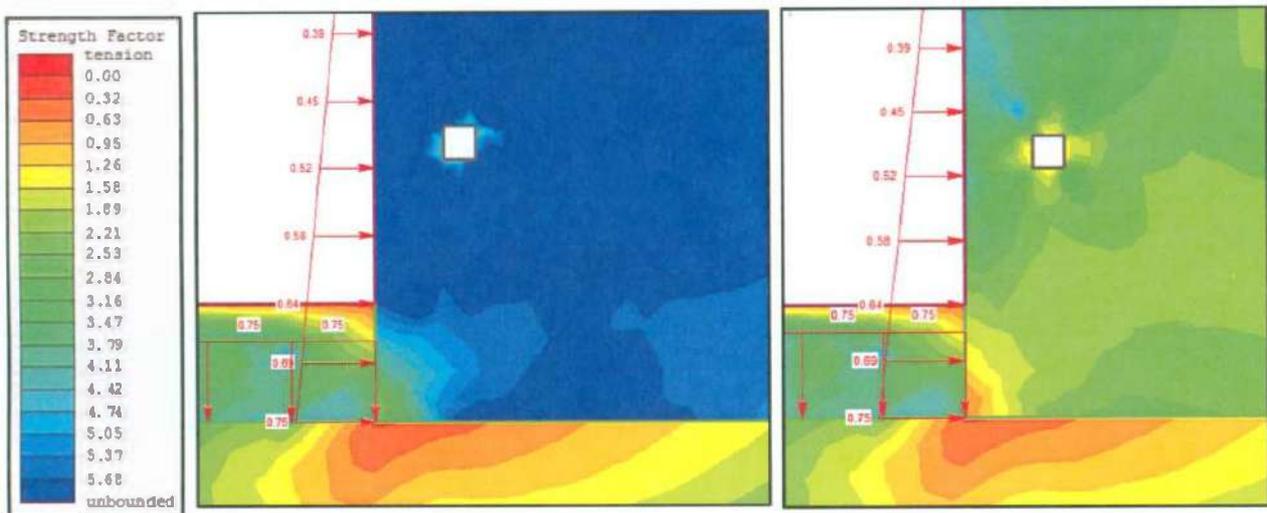


Figura 9. Comparación entre simulación del modelo base (izquierda), y simulación con el valor de cohesión en el rango bajo (0.510).

Los resultados de todas las corridas en donde se pueden observar zonas críticas, coinciden en un mismo lugar, la base de la presa del CCR. Ahí se puede observar que el factor de seguridad disminuye a casi 1 o incluso es menor a 1, por lo que es una zona que debe tener especial atención para el diseño de la presa.

Es importante minimizar o eliminar esas zonas críticas, aumentando el factor de seguridad, de tal manera de que el riesgo de un posible evento negativo sea menor o nulo.

Así mismo, en la simulación del software, desde el modelo base, se puede observar claramente una zona crítica en la roca, justo debajo del área antes mencionada en el CCR. Sin embargo, los datos de la roca que se utilizaron para este análisis de sensibilidad, no toman en cuenta el hecho de que normalmente, en zonas críticas como esas, se inyecta una lechada de cemento, con el fin de sellar las fracturas que se encuentran en el lugar. Con esto, la resistencia de la roca en esa zona, tendría que ser mayor que la que tiene la roca in-situ.

XIV. RECOMENDACIONES.

Como se pudo observar en las simulaciones, la zona crítica en la presa de CCR siempre fue en la parte inferior izquierda de la sección vertical transversal. Al ser esta una zona donde se ve disminuida la resistencia del CCR, se propone como solución, poner una pata de concreto simple, en forma triangular, con la finalidad de proteger la cortina de la presa, y que su resistencia no se vea afectada por las cargas hidráulicas. Esta idea, se obtuvo del diseño realizado para la presa Shimajigawa, ubicada en Japón, cuya sección se muestra en el libro "Roller-compacted concrete dams" de los autores Kenneth D. Hansen y William G. Reinhardt.

Como se puede observar en el diseño de la presa Shimajigawa, en la figura 10, ésta tiene en la parte inferior de aguas arriba, una pequeña pata, que la ayuda tener una mejor estabilidad y resistencia en esa área, misma en donde se encuentran los problemas en las simulaciones de software realizadas.

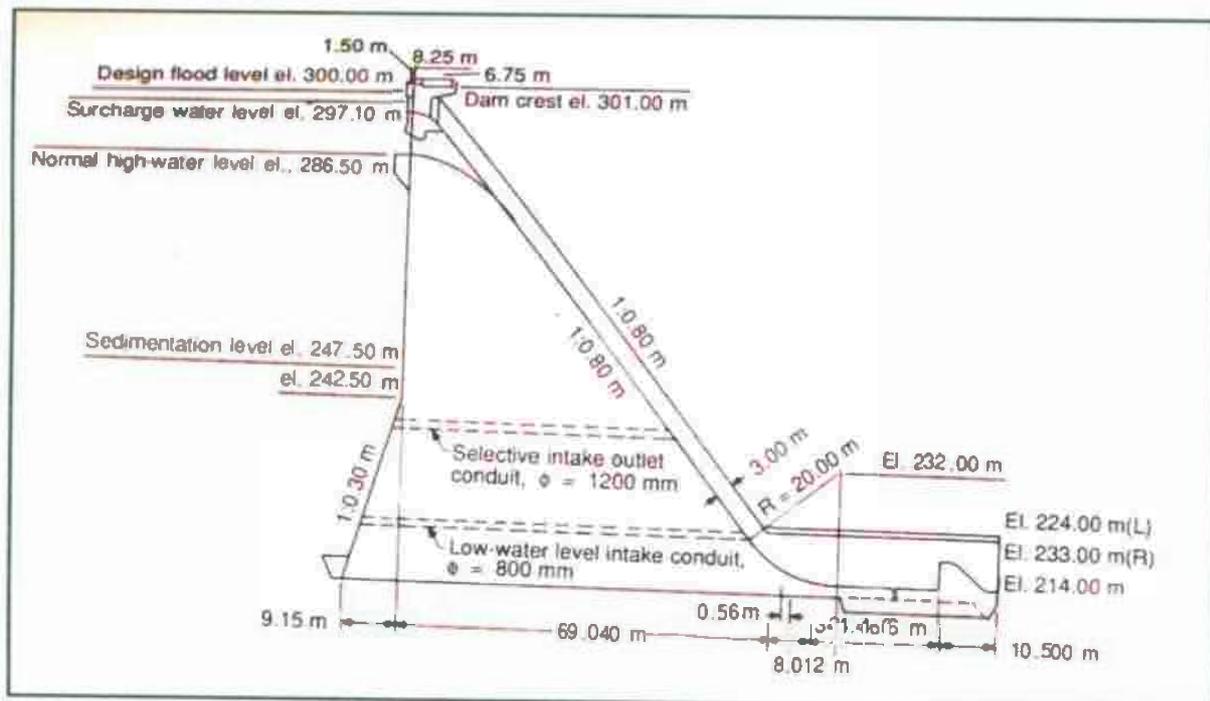


Figura 10. Sección Vertical Transversal de la presa Shimajigawa, ubicada en Japón (Hansen, 1991).

Como se puede apreciar a continuación en la figura 11, la propuesta fue efectiva para proteger la cortina de CCR de la presa. Si bien, se pueden observar zonas críticas en dos esquinas de la pata de concreto simple, no es área prioritaria, como lo es la cortina de concreto compactado, y así, el concreto simple cumple su trabajo como barrera protectora para el CCR.

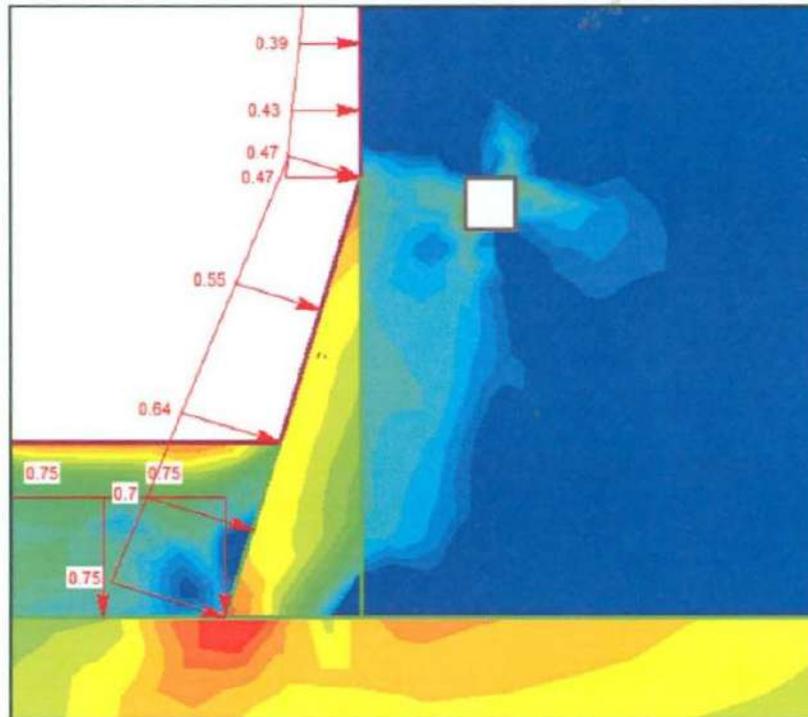


Figura 11. Resultados obtenidos de la simulación, una vez colocada la pata de concreto simple.

La simulación se realizó utilizando una pata de concreto simple, ya que si se elegía como material el CCR, los esfuerzos por las cargas hidráulicas seguían afectando la cortina de la presa. Es por esto, que se optó por un concreto de mayor resistencia (concreto convencional de 150), que aunque es más costoso, es una opción buena que da estabilidad a la estructura. Las dimensiones elegidas para la pata representan solo una pequeña área comparada con el resto de la estructura, lo cual hace que esta sea una opción económicamente viable (figura 12).

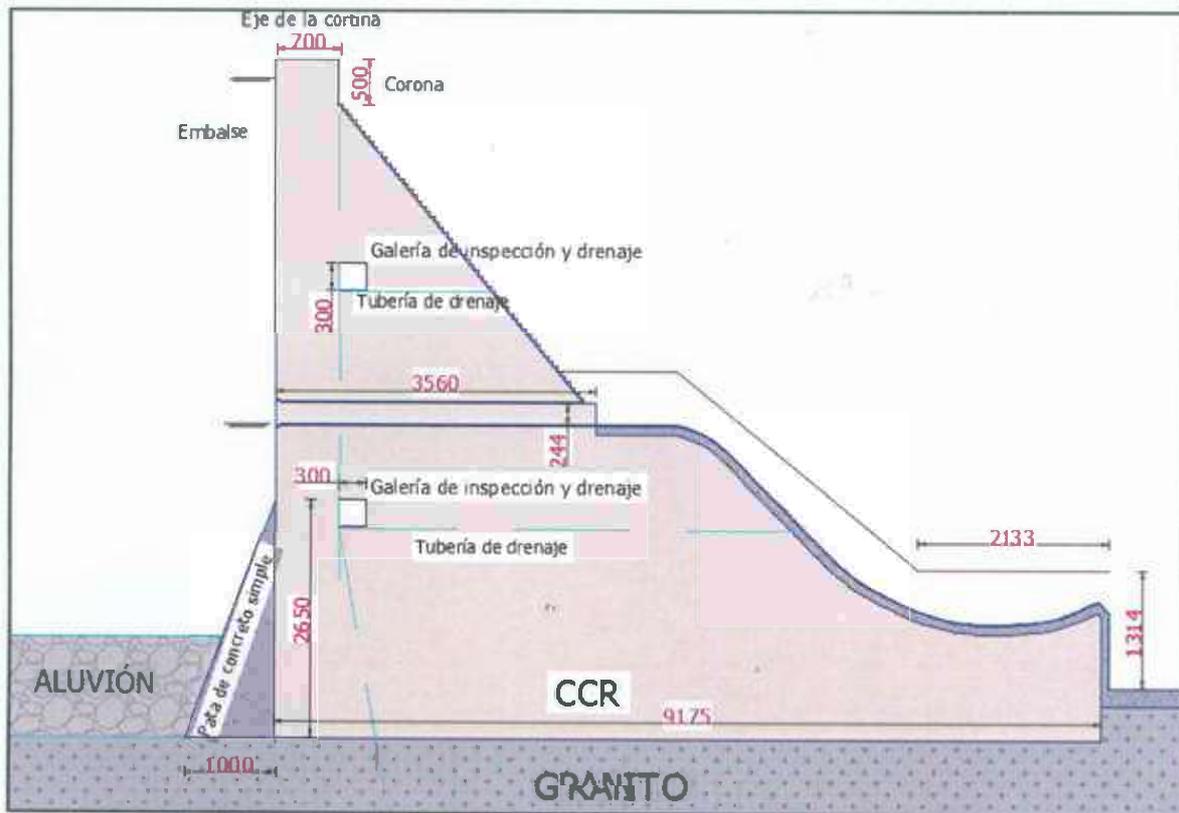


Figura 12. Modelo base con las dimensiones de la pata de concreto simple.

XV. CONCLUSIONES.

El método de análisis de elementos finitos se pudo utilizar de manera exitosa para realizar el análisis de sensibilidad de las propiedades del CCR, utilizando el software Phase2 de rocscience.

Como se pudo observar en los resultados obtenidos, la variabilidad de ciertos parámetros sí influye en la resistencia del CCR, ya que, dependiendo de ciertos valores que cambiaban, se pudieron observar zonas críticas en el concreto, en las distintas simulaciones de software realizadas. No se puede afirmar con seguridad que ocurre en las zonas observadas, pero el indicador de resistencia es de gran ayuda para detectar dichas áreas y tomar las medidas que se consideren adecuadas para dar solución al problema.

Así pues, se concluye que realizar un análisis de sensibilidad, en casos en donde existen parámetros con valores variables puede ser de gran utilidad para saber si la variación de valores tendrá un impacto en el factor de resistencia del concreto.

Una recomendación para evitar problemas, es llevar a cabo un muestreo, tomando núcleos de CCR cada cierta profundidad, o cada cierto número de capas, con la finalidad de analizar y ver si los valores que se tenían al comienzo de la obra, se siguen manteniendo, o si han tenido una variación que pueda llegar a afectar la presa.

XVI. BIBLIOGRAFÍA.

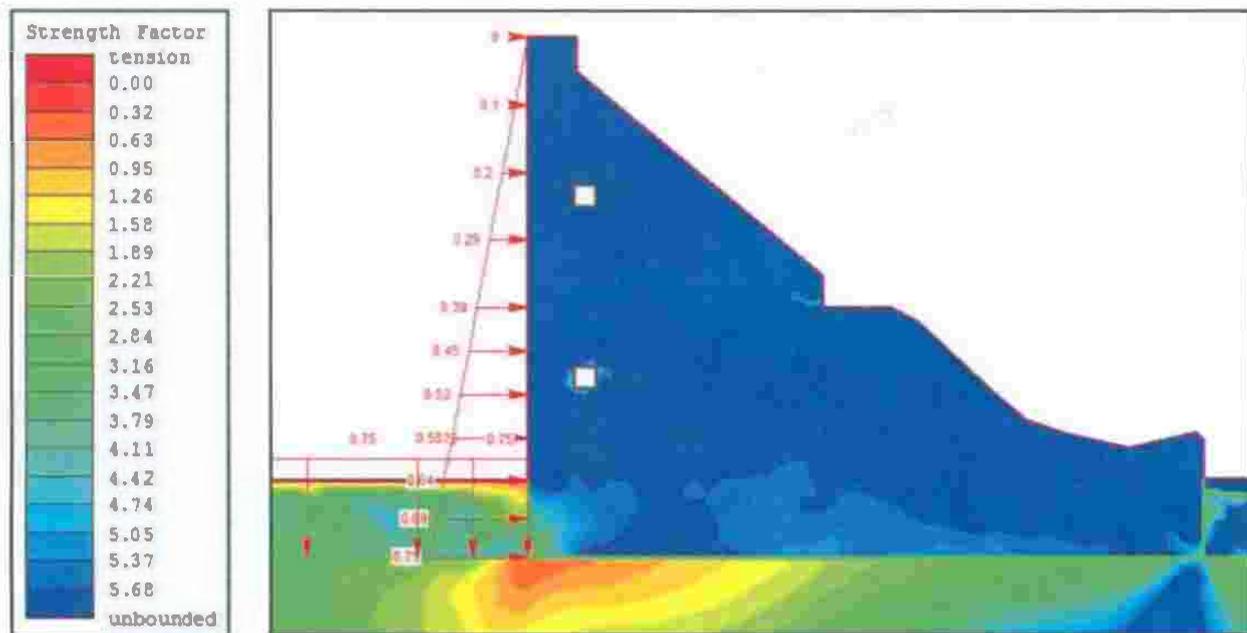
HANSEN, Kenneth D., REINHARDT, William G., Roller-Compacted Concrete Dams, United States of America, McGraw-Hill, 1991, ISBN 0-07-026072-9.

JING, L., HUDSON, J.A., Numerical methods in rock mechanics, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 39 (409-427), 2002.

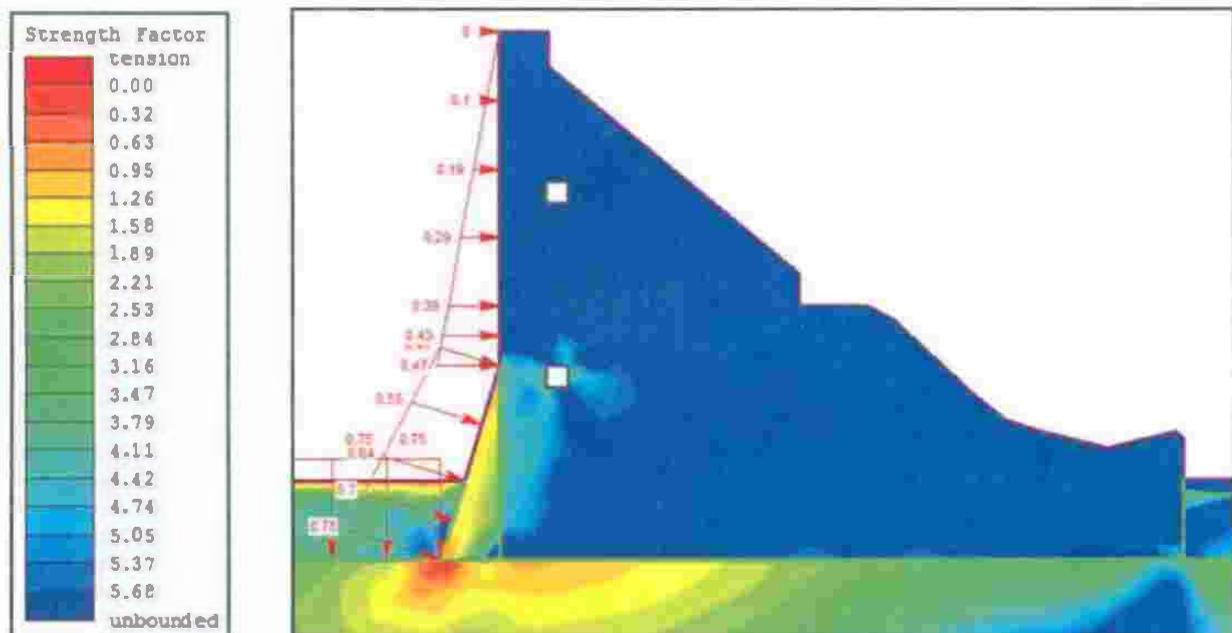
Proyecto Ejecutivo de la Presa Reguladora "Pilares" Sobre el Río Mayo, Sonora. Fondo de Operación de Obras Sí (FOSSI), Estudio Geológico (Pág. 1- 9).

XVII. ANEXOS

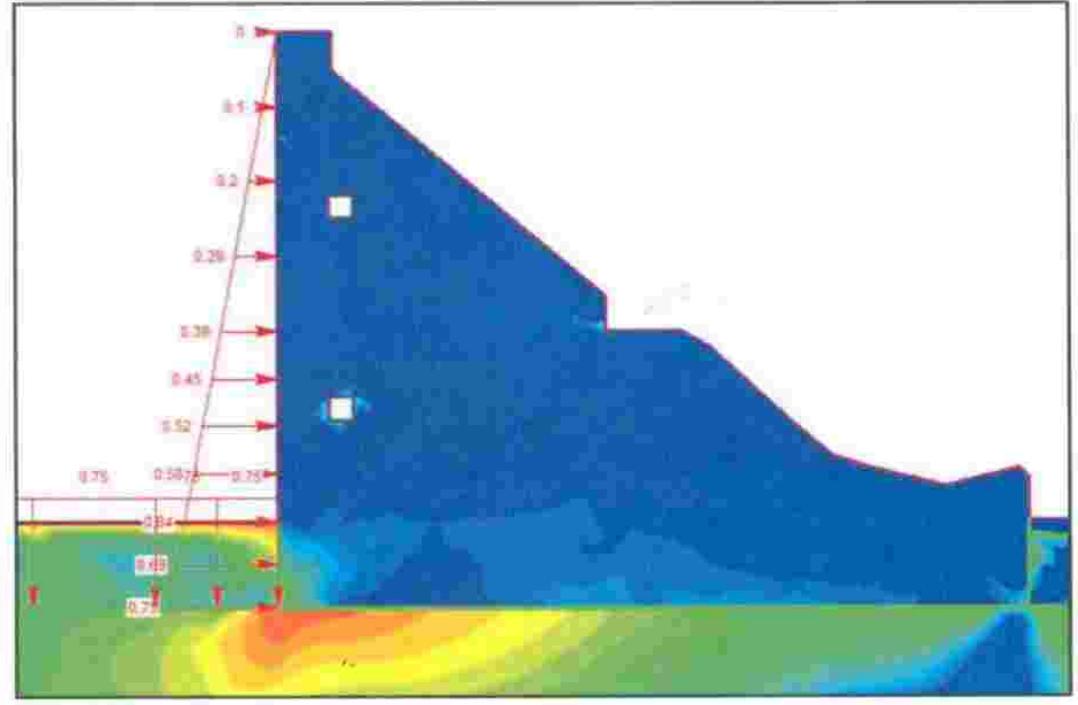
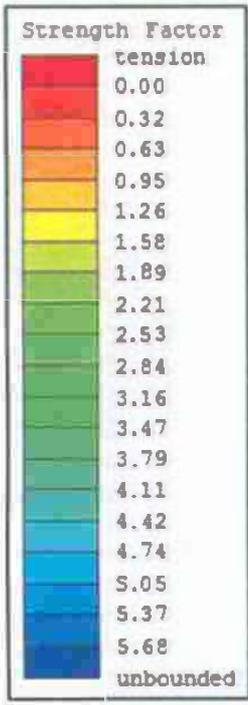
En esta sección se incluyen las figuras, en las cuáles se muestran los resultados obtenidos de todas las simulaciones realizadas en el software Phase2 de rocsience.



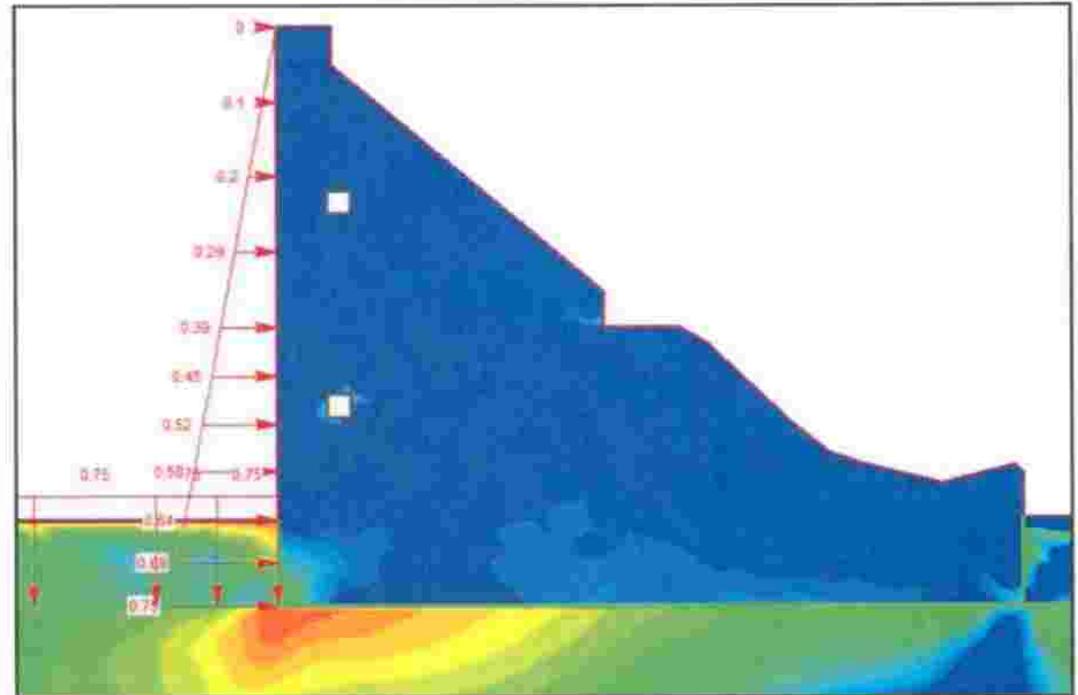
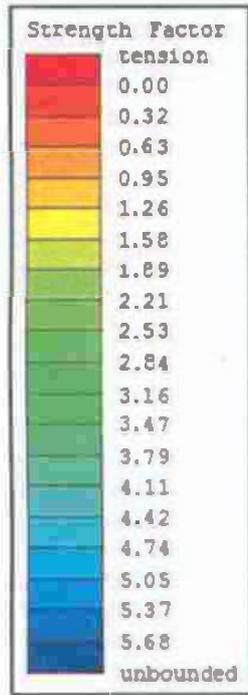
Resultados de simulación con parámetros base (Tabla 1).



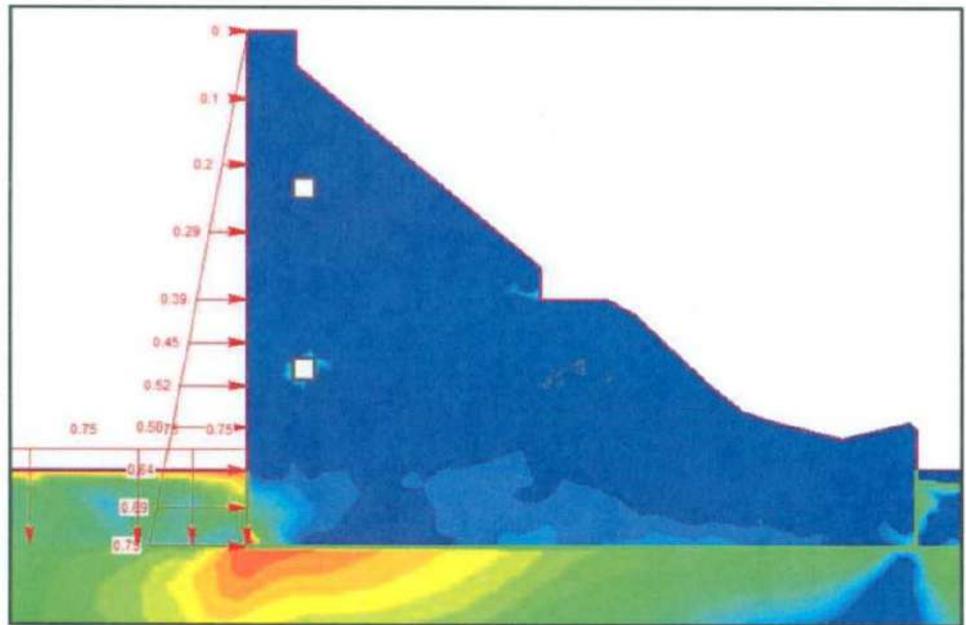
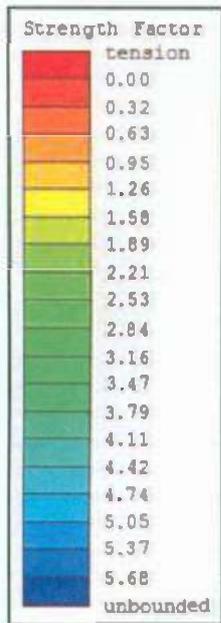
Resultados de simulación con pata de concreto simple.



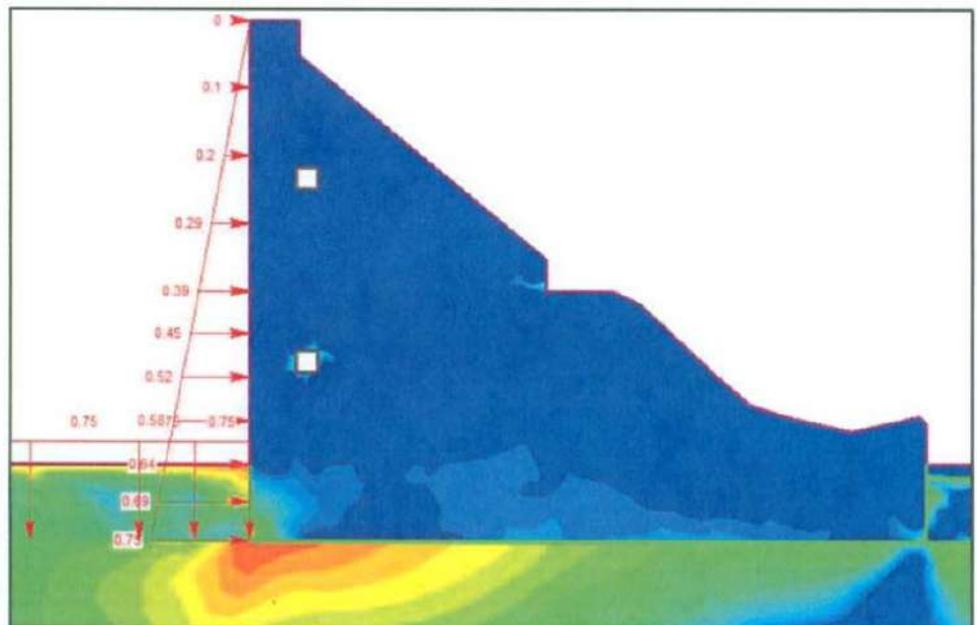
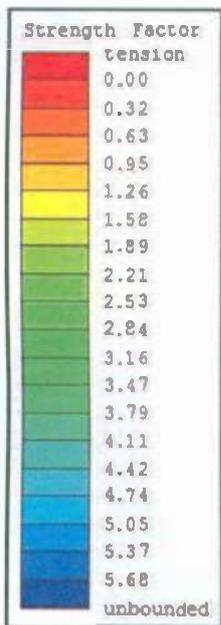
Resultados de simulación con coeficiente de Poisson bajo (0.17).



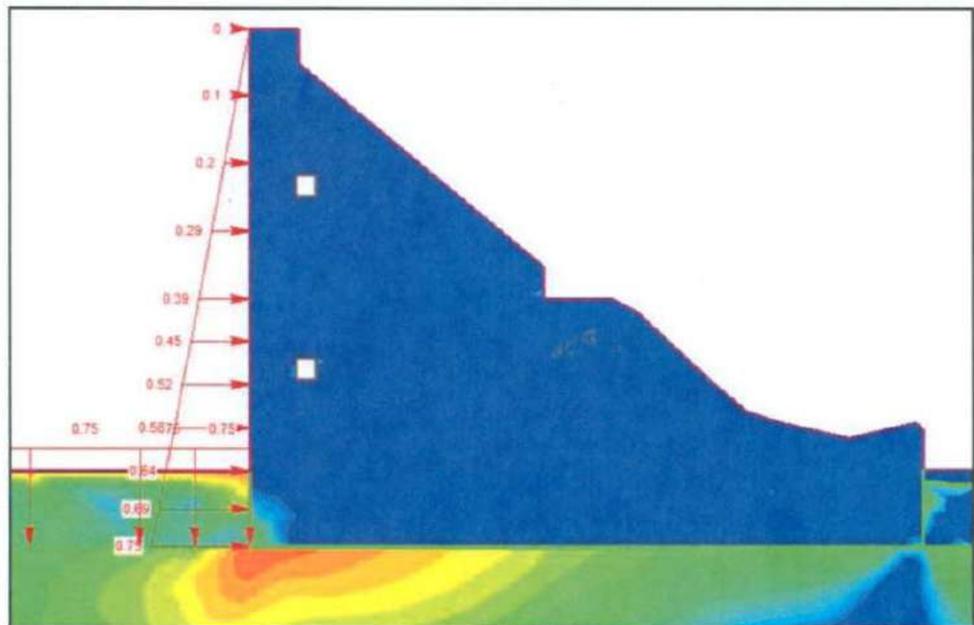
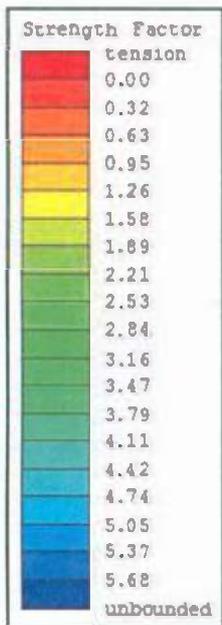
Resultados de simulación con coeficiente de Poisson alto (0.22).



Resultados de simulación con el valor de resistencia a la tensión bajo (0.5 MPa).

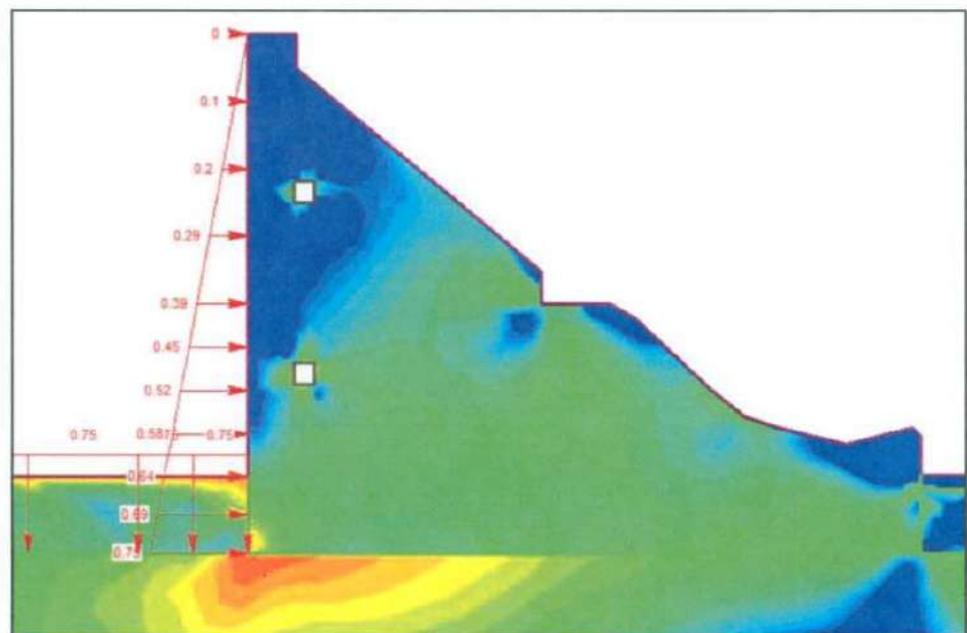
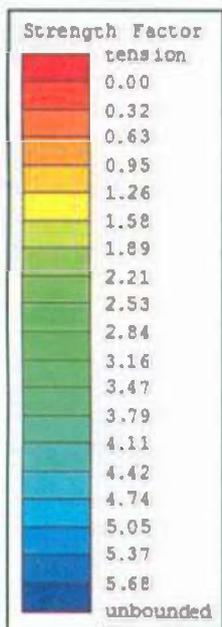


Resultados de simulación con el valor de resistencia a la tensión alto (1.5 MPa).



90

Resultados de simulación con el valor del ángulo de fricción bajo (33°).



Resultados de simulación con el valor del ángulo de fricción alto (76°).

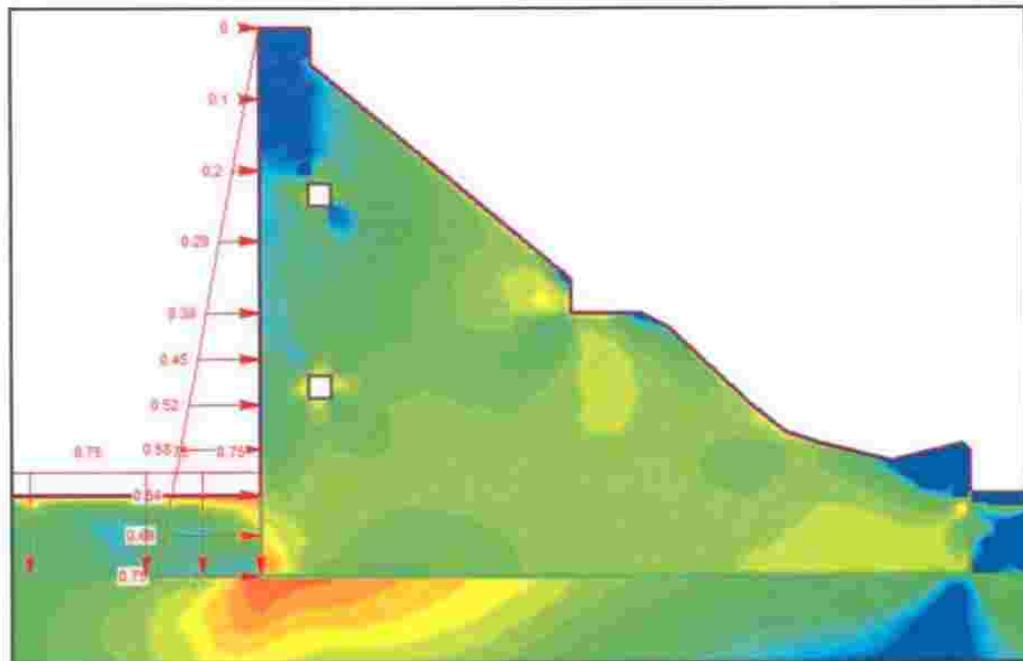
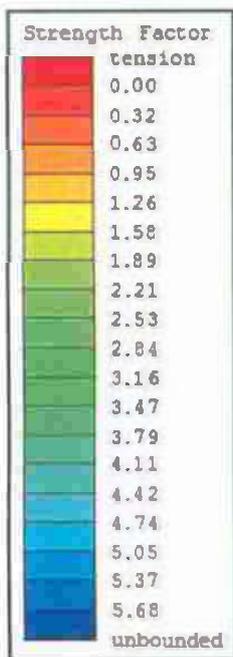
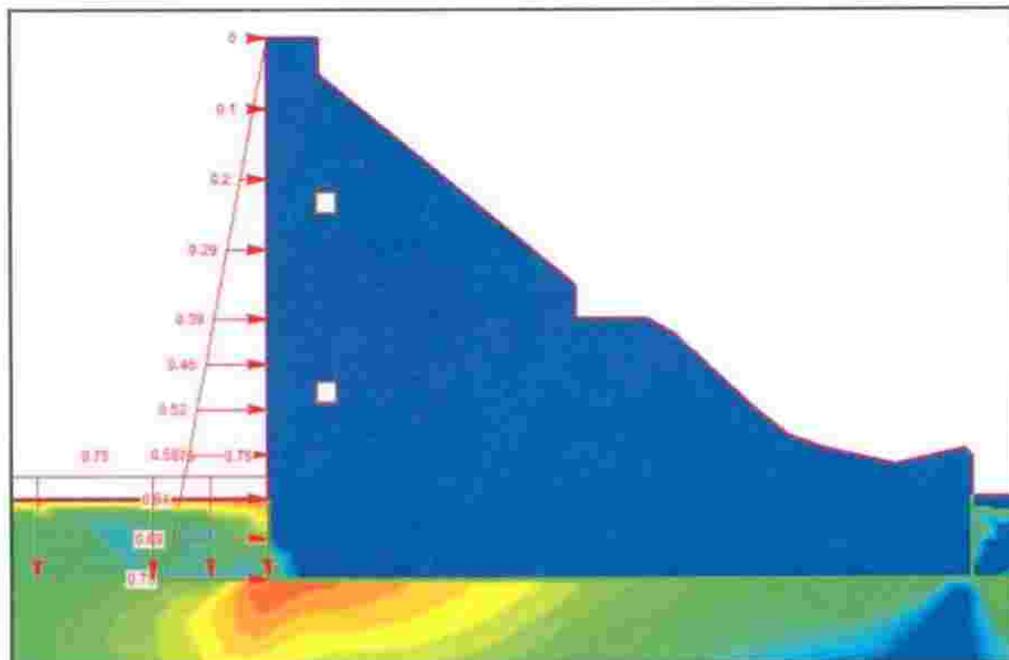
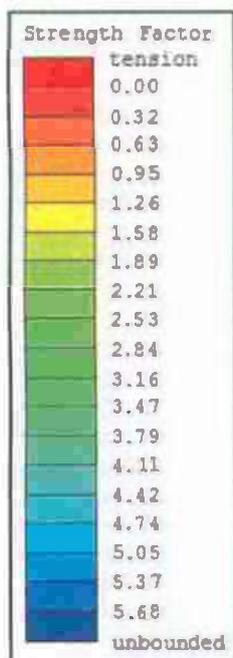


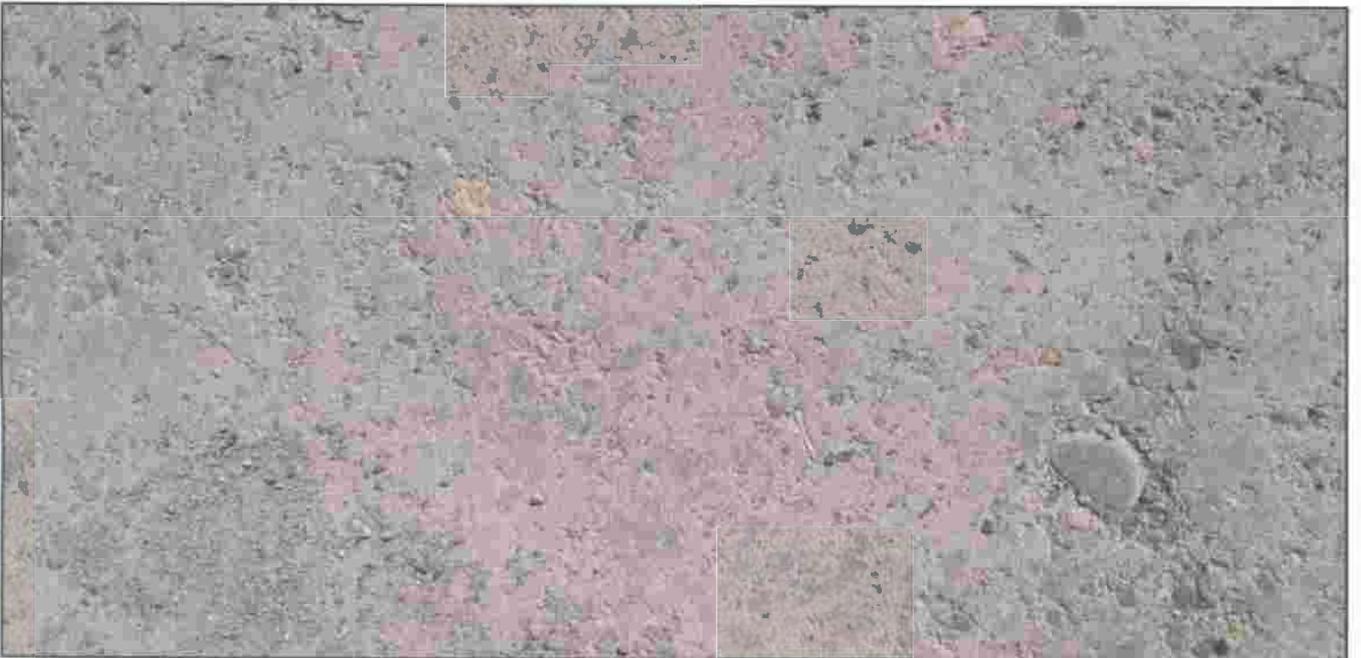
Figura 19. Resultados de simulación con el valor de la cohesión bajo (0.510 MPa.).



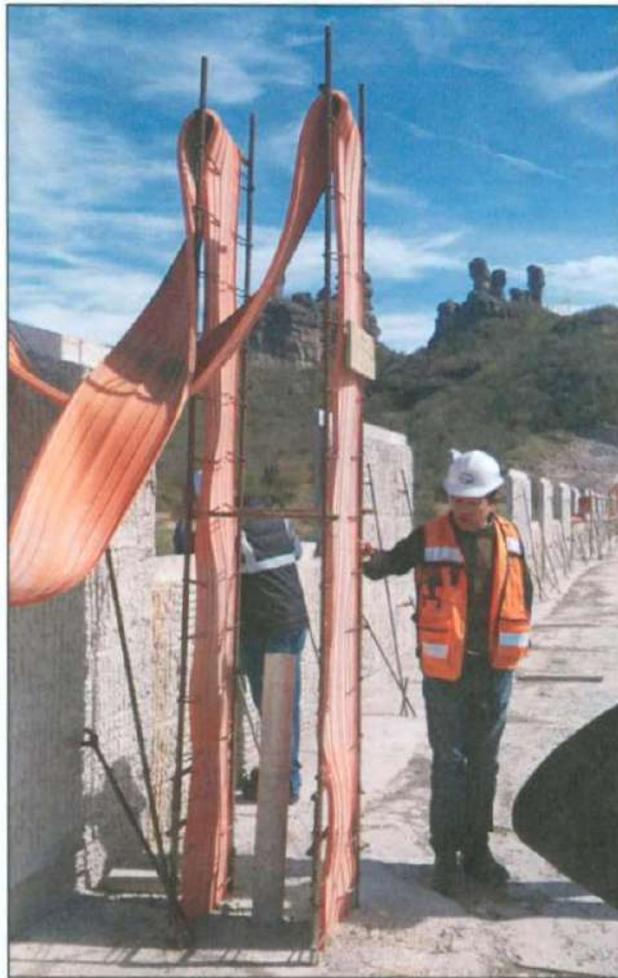
Resultados de simulación con el valor de la cohesión alto (4.41 MPa.).



Dique de CCR cerca de la construcción de la presa Pilares.



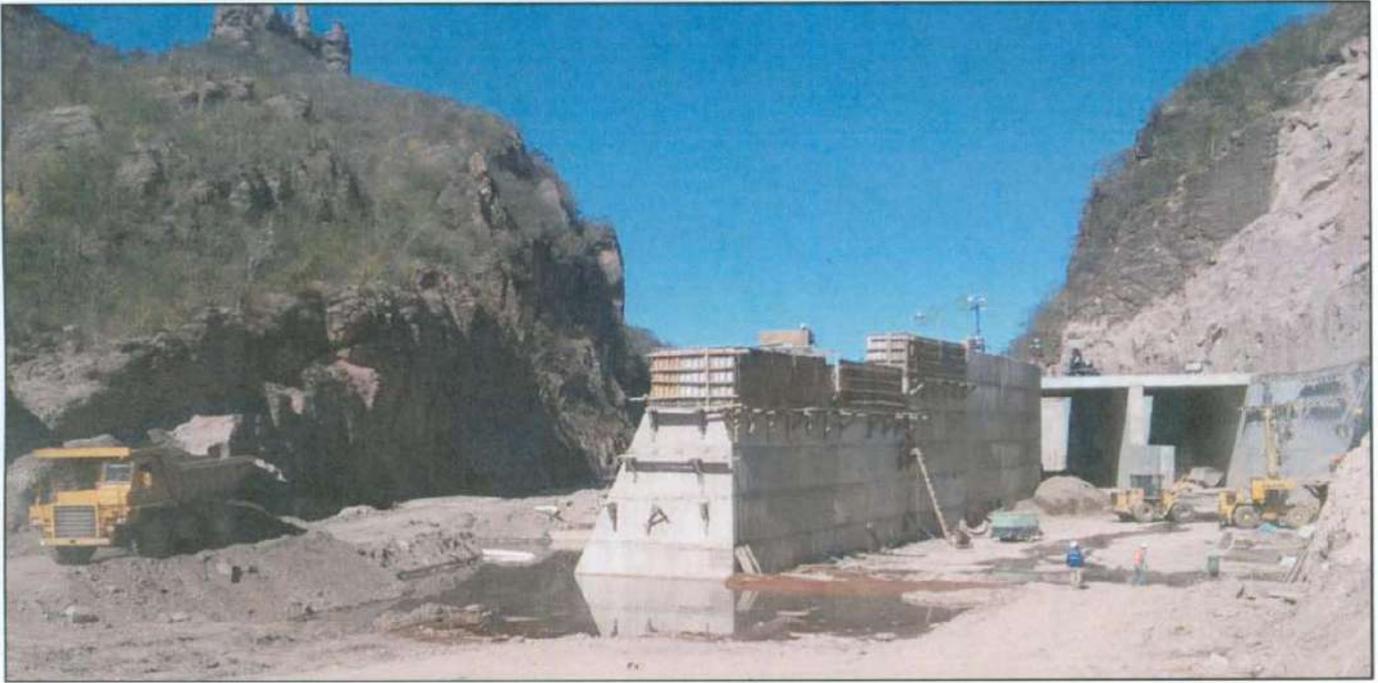
Superficie del dique de CCR en la presa Pilares.



Tubería de drenaje en el Dique de CCR en presa Pilares.



Galerías de inspección en el Dique de CCR en presa Pilares.



Ductos de desviación del caudal del río en presa Pilares.