Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

Estudio para prever el deterioro de estructuras de hormigón afectadas por la reacción Alcalino-Árido

Autor/a

Jaime Alfredo Moles Dimartino

Tutor/a

Enric Vazquez

Departament

Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria

Intensificació

Aplicación: presa de Kariba

Data

18 d'Octubre 2011

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins Canals i Ports de Barcelona (ETSECCPB)

2010-2011

Proyecto de Fin de Carrera

Jaime Alfredo Moles Dimartino

Ingeniero Doble Diploma

Estudio para prever el deterioro de estructuras de hormigón afectadas por la reacción Alcalino-Árido

Aplicación: Presa de Kariba

Proyecto realizado en la empresa Electricité de France, Centre d'Ingénierie Hydraulique (EDF-CIH)

EDF-CIH Technolac 73373, Le Bourget du Lac Cedex, France

14 Mars 2011 – 14 Septembre 2011

Tutores: M. Etienne Grimal, M. Enric Vazquez

Agradecimientos

En primer lugar quiero dirigir mis más sinceros agradecimientos a Etienne Grimal por haberme aceptado para este trabajo de investigación. Le agradezco su disponibilidad y sus explicaciones esclarecedoras para avanzar y comprender las particularidades de mi proyecto. Sin él, no podría haber desarrollado mi TFC.

Gracias igualmente a Frédérique Laugier, Eric Bourdarot y Alain Sellier, por haberme dado su confianza e inestimable ayuda. Por su amabilidad y buenos consejos.

También quiero agradecer a Emmanuel Robbe y Adrien Nadal el haberme dado parte de su tiempo y por sus explicaciones en la utilización y desarrollo del programa Code Aster. A Gregory Coubard por su buen humor y por haberme enseñado a utilizar el programa GMSH y a Maud, su compañera de despacho, por su ayuda en el diseño de mallados.

A mis compañeros de despacho Véronique Nagel y Romain Tajetti gracias a los cuales he podido disfrutar de una ambiente de trabajo privilegiado.

Quiero agradecer también todas las personas que he cruzado en el CIH-EDF y con las cuales he podido entablar una buena amistad. Si no fuera por ellos, seguro que mi estancia en Saboya no hubiera sido tan constructiva como al final lo ha sido.

Finalmente, no puedo olvidarme de mi familia y amigos los cuales me han apoyado en mi 'aventura' en Francia tanto anímicamente como económicamente. Si no fuera por ellos, hoy no sería ingeniero doble diploma ni estaría aquí redactando esta tesina.

Resumen

Un cierto nombre de presas del parque de EDF se ven afectadas por patologías de expansión, la más extendida de las cuales es la de la reacción alcalino-árido (AAR)
Las fases reactivas de la sílice de los granulados reaccionan con los alcalinos presentes dentro del líquido intersticial, el resultado es un gel que se expande y que puede producir presiones internas provocando problemas de durabilidad en las estructuras de hormigón. Con el objetivo de poder predecir el comportamiento de estas estructuras, EDF en cooperación con el LMDC Toulouse han desarrollado un modelo de expansión en el cual, la principal innovación llevada a cabo es la consideración conjunta de la presión causada por la expansión y:

- Las deformaciones diferenciales (fluencia) de un lado
- Las deformaciones anisotrópicas inducidas por la figuración orientada de otro lado.

El modelo considera también la influencia del agua (retracción).
Las características del modelo, en elementos finitos, son presentadas y ensayadas con el fin de poder utilizar el modelo en la resolución del XI ICOLD Benchmark Workshop en numerical analysis sobre la expansión de la presa de Kariba (Zimbabue).

Palabras clave: Hormigón, modelización, elementos finitos, Reacción Alcalino-Árido (AAR), expansión, fluencia, deterioro, Benchmark Workshop, presa, Kariba

Abstract

A certain number of building of the EDF's stock are affected of pathologies of swelling. Among these, the most common is the alkali aggregate reaction (AAR).

The reactive phases of the silica in the arid reacts with the alkalis dissolved in the interstitial water, the result is a swelling gel which can create internal overload and logical structural problems in concrete structures. In order to predict the behavior of these structures, EDF in partnership with LMDC Toulouse have a swelling model whose principal innovation is to join the deformations dues to autogenous shrinkage, creep and swelling. The main developments carried out by the model are the coupling between the intern pressures of swelling and:

- Differential deformation (creep) by one hand
- Anisotropy deformations induced by the oriented crack (damage) by the other hand.

The model considers too the water effects (autogenous shrinkage).

The model properties, in finite elements, are tested and presented. The model will be use to answer the XI ICOLD Benchmark Workshop en numerical analysis of dams, treating the swelling of the Kariba Dam (Zimbabwe).

Keywords: concrete, model, finite elements, Alkali Aggregate Reaction (AAR), swelling, creep, damage, Benchmark Workshop, dam, Kariba.

Índice

Agradecimientos 3
Résumé 4
Abstract 5
Índice 6
Índice de tablas 8
Índice de imágenes 9
Índice de anejos 11
1. Introducción 12
2. Presentación de la empresa 13
2.1. Presentación de EDF-CIH 13
2.2. Presentacion del LMDC Toulouse 15
3. Documento bibliográfico 16
3.1. Introducción 16
3.2. Reacción Alcalino-Arido 16
4. Explicación del modelo 19
4.1. Introducción 19
4.2. Modelo original 19
4.2.1. Modelo de deterioro 22
4.2.2. Deformaciones 23
4.3. Desarrollo del modelo 25
4.3.1. Primer desarrollo 25
4.3.2. Segundo desarrollo 28
5. Calibración del modelo 30
5.1. Calibración de la fluencia 30
5.1.1. Gopalaskrishnan biaxal 30
5.1.2. Gopalaskrishnan uniaxial 31
5.1.3. Gopalaskrishnan triaxial 32
5.2. Calibración del deterioro 33
5.2.1. Ensayo de William 34

5.2.2. Ciclico local GFCL ... 37
5.3. Ensayos de verificación ... 38
5.3.1. Prisma ... 39
5.3.2. Cubo en expansión libre ... 41
5.3.3. Viga bi-apoyada ... 43
6. Presa de Kariba ... 45
6.1. Introducción ... 45
6.2. Descripción de la presa ... 46
6.3. Historia de la construcción y de la vida operativa de la presa ... 47
6.4. Sistemas de toma de medidas ... 47
6.5. Datos del problema ... 48
6.5.1. Mallado ... 48
6.5.2. Propiedades del material ... 49
6.5.3. Fechas ... 50
6.5.4. Resultados del sistema de toma de medidas ... 50
6.6. Ejercicio ... 53
6.6.1. Primera parte ... 53
6.6.2. Segunda parte ... 53
6.6.3. Tercera parte ... 54
6.7. Resolución ejercicio ... 54
6.7.1. Introducción ... 54
6.7.2. Hipótesis consideradas ... 55
6.7.3. Primera parte ... 56
6.7.4. Segunda parte ... 60
6.7.5. Tercera parte ... 68
Conclusión ... 77
Bibliografía ... 78
Trabajos imprimidos ... 80
Trabajos universitarios ... 80
Comunicaciones en un congreso ... 80
Sitios web consultados ... 81
Anejos ... 82

Índice de tablas

Table 1. Energie de dissipation par fissuration locale minimal. 35
Table 2. Paramètres de calage William 36
Table 3. Caractéristiques du barrage de Kariba 46
Table 4. Propriétés du béton 49
Table 5. Propriétés du rocher 49
Table 6. Identification des points pour le déplacement vertical 51
Table 7. Identification des points de mesure 54
Tableau8. Champ des contraintes après la construction 57
Tableau9. Champ des contraintes et déplacements pour le calcul sans RAG et 483,8 m de niveau d'eau 58
Tableau10 Champ des contraintes et déplacements pour le calcul sans RAG et 486,1 m de niveau d'eau 59
Tableau11 Champ des contraintes et déplacements pour le calcul sans RAG et 479,9 m de niveau d'eau 60
Tableau12. Champ des contraintes et déplacements le 30 Juillet 1973 66
Tableau13 Champ des contraintes et déplacements le 30 Mai 1981 66
Tableau14. Champ des contraintes et déplacements le 30 Mai 1994 67
Tableau15. Champ des contraintes et déplacements le 30 Avril 2010 70

Índice de imágenes

Figura 1. Esquema reológico del modelo 20
Figura 2. Modulo visco-élasto-plástico 24
Figura 3. Desarrollo del esquema reológico del modelo 25
Figura 4. Ley esfuerzos-deformación de la AAR. 26
Figura 5. Sistema de fluencia del modelo 28
Figura 6. Ensayo Gopalaskrishnan-Biaxial 31
Figura 7. Ensayo Gopalaskrishnan -uniaxial 32
Figure 8. Essai Gopola-Triaxial 33
Figura 9. Influencia de la parámetros de tracción. 34
Figura 10. Grafico esfuerzos-deformaciones del ensayo William 36
Figura 11 Esquema del ensayo cíclico local 37
Figura 12. Grafico esfuerzos-deformaciones del ensayo cíclico local 38
Figura 13. Deformación vertical prisma en expansión libre 40
Figura 14. Prisma cargado axialmente a 10 MPa 40
Figura 15. Esfuerzos verticales 41
Figura 16. Deterioro localizado 42
Figura 17. Presión de gel. 42
Figura 18. Deformaciones del cubo en expansión libre 43
Figura 19. Mallado de la viga 43
Figura 20. Deformada y esfuerzos axiales 44
Figura 21. . Deterioro localizado en tracción. 44
Figura 22. Presa de Kariba 46
Figura 23. Emplazamiento de los aparataos de medición en la presa de Kariba 48
Figura 24. Mallado de Kariba 49
Figura 25. Curva del nivel de agua en el tiempo 50
Figura 26. . Desplazamiento radial nodo T434 51
Figura 27. Desplazamientos verticales 52
Figura 28. Desplazamiento de la cresta. 52
Figura 29. Nivel de agua simplificado 54

Figura 30. Influencia de alpha y de V_g 62
Figura 31. Desplazamiento vertical del bloque 6-8 entre 1963 y 1994 62
Figura 32. Desplazamiento radial del punto de la cresta T434. 63
Figura 33. Desplazamiento radial del punto de la cresta T434 calibrado para el bloque 3-5. . 64
Figura 34. Desplazamiento radial del punto de la cresta T434 considerando fluencia. 65
Figura 35. Desplazamiento vertical del bloque 6-8 entre 1963 y 2010 68
Figura 36. Desplazamiento vertical del bloque 6-8 entre 1963 et 2010 con Charlwood 68
Figura 37. Desplazamiento radial para el punto de la cresta T343 entre 1963 y 2010 69
Figura 38. Desplazamientos verticales de los puntos 9-11, 6-8 et 15-17. 71
Figura 39. Desplazamientos verticales de los puntos 18-20, 12-14, 21-23. 71
Figure 40. Desplazamientos verticales de los puntos 0-2, 3-5. 72
Figura 41. Campo de rosetas aguas arriba el 30 de Julio de 1963 73
Figura 42. Campo de rosetas aguas arriba el 30 de abril de 2010 73
Figura 43. Campo de rosetas aguas abajo el 30 de Julio de 1963 73
Figura 44. Campo de rosetas aguas abajo el 30 de abril de 2010 73
Figura 45. Esfuerzos principales de compresión en la cara aguas arriba (MPa) 74
Figura 46. Esfuerzos principales de compresión en la cara aguas abajo (MPa) 74
Figura 47. Esfuerzos normales en el contacto presa-macizo rocoso (2011) [MPa] 75
Figura 48. Esfuerzos tangenciales en el contacto presa-macizo rocoso (2011) [MPa] 75
Figura 49. Potencial de cohesión en el contacto presa-macizo rocoso (2011) [MPa] 75
Figura 50. Campo de deterioro de la presa (2011). 76

Índice de anejos

Anejo 1. Fichero de comandos para el ensayo Gopalaskrishnan uniaxial 844
Anejo 2. Fichero de comandos para el ensayo Gopalaskrishna biaxial 855
Anejo 3. Fichero de comandos para el ensayo Gopalaskrishna triaxial..... 866
Anejo 4. Fichero de comandos para el ensayo William local 888
Anejo 5. Fichero de comandos para el ensayo cíclico local..... 90
Anejo 6. Fichero de comandos para el ensayo del prisma 92
Anejo 7. Fichero de comandos para el ensayo del cubo en expansión libre 94
Anejo 8. Fichero de comandos para el ensayo de la viga bi-apoyada..... 96
Anejo 9. Fichero de comandos de la construcción de Kariba 98
Anejo 10. Fichero de comandos para Kariba sin AAR 1088
Anejo 11. Fichero de comandos para Kariba con AAR..... 1111
Anejo 12. Explicación mallado de Kariba 1165

1. Introducción

La reacción Alcalino-Árido (AAR) es una patología del hormigón que está en el origen de expansiones que modifican las propiedades mecánicas y fragilizan el conjunto de la estructura afectada. Se pueden constatar también problemas de durabilidad a largo plazo dentro de varios tipos de construcciones y, particularmente, en presas, motivo por el cual EDF-CIH está interesada dentro del mantenimiento de construcciones hidráulicas.

Mi proyecto ha sido dividido en dos partes. Una parte dedicada al estudio y modelización de la AAR y otra a su aplicación dentro de un caso real de expansión, la presa de Kariba (Zimbabue), ejercicio propuesto por el Benchmark Workshop y que tendrá lugar en Valencia el próximo Octubre.

El LMDC Toulouse ha creado un modelo de expansión provocado por la AAR que ha sido implementado dentro del programa CODE-ASTER, desarrollado por EDF para el cálculo de estructuras en elementos finitos. Uno de los objetivos será verificar el buen funcionamiento del modelo en relación a los ensayos reales.

La modelización de la reacción toma en cuenta numerosos fenómenos mecánicos (fluencia, retracción endógena, deterioro…) y químicos (formación de gel). Será por lo tanto indispensable considerar varias variables de estado con el fin de definir los materiales y obtener un modelo bien calibrado que nos permita de representar de la mejor manera posible la realidad.

2. Presentación de la empresa

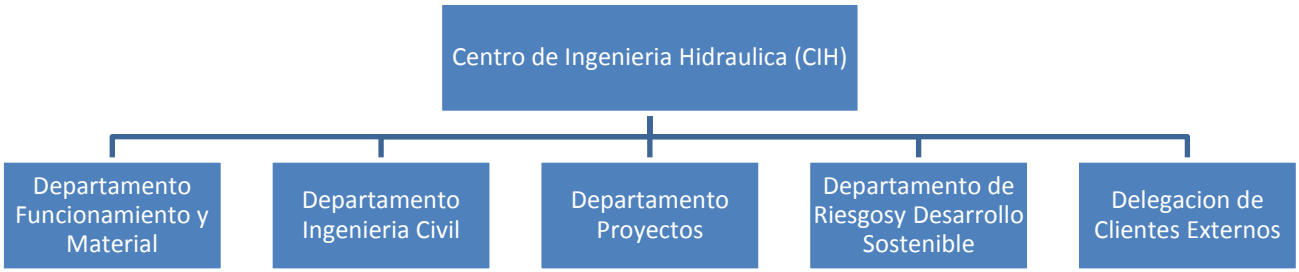
El proyecto ha sido desarrollado en el Centro de Ingeniería Hidráulica de Bourget du Lac (Saboya)

2.1. Presentación de EDF-CIH

EDF es una ingeniería internacional que produce y distribuye energía eléctrica en Francia. Actualmente, gracias a su saber hacer, se ha convertido en una referencia en el mundo. Con una cincuentena de filiales, EDF es hoy ya un verdadero grupo internacional. Es también líder europeo en la producción de energía de origen hidráulico, la cual representa hoy en Francia más del 9% de la producción total del grupo y, aproximadamente, una producción de 44 TWh. Con 640 presas y 461 centrales hidroeléctricas, EDF llega a producir una potencia de 20.4 GW solo en Francia.

El Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH) forma parte de la División de Producción de Ingeniería Hidráulica, en el seno de la Dirección de Producción de Ingeniería de EDF. El CIH está constituido por unidades de producción que tienen competencias en la ingeniería de concepción y construcción, en ingeniería de medición, en ingeniería de explotación, en dirección de proyectos dentro de los dominios de la hidráulica y de las energías renovables. Asegurado así una misión de asistencia al jefe de obra tanto de nuevos proyectos como aquellos de rehabilitación en Francia e internacionalmente. También cuenta de un gran número de expertos en dominios ajenos a la hidroelectricidad tales que trabajos subterráneos, proyectos de trasvases de agua e incluso dentro del dominio eólico. La sede del CIH se encuentra en Bourget du Lac y sus antenas en Brive, Toulouse, Marsella, Grenoble, Lyon y Mulhouse.

Con el propósito de ofrecer al mismo tiempo una buena contribución dentro de los dominios en relación con la construcción civil y un servicio optimo y eficaz, EDF-CIH se divide en varios departamentos cuyo objetivo es abarcar todas las fases comprendidas dentro de un proyecto de ingeniería civil tal y como puede ser constatado en la siguiente tabla



A causa del carácter transversal del campo de la hidráulica, el departamento de Ingeniería Civil, el cual he integrado durante mi proyecto, se divide en cuatro servicios cuyas atribuciones son resumidas brevemente en el siguiente diagrama:

Durante mi proyecto, he podido integrar el departamento de Servicio de Estructuras el cual es responsable del estudio del comportamiento y de la estabilidad de las estructuras en hormigón tales como las presas, así como de su concepción estructural. Ejecuta también una función de seguimiento de los lotes 'estructuras de hormigón' y de controles de ejecución. Tras las especificaciones técnicas aplicadas sobre estas estructuras, el servicio debe realizar una misión de control tecnológico para el desarrollo de los aparatos y los modelos, o la incorporación al sistema de referencias técnicas. Para asegurar tanto la seguridad de sus

instalaciones como el aprovisionamiento energético, el servicio de estructuras esta en el origen de numerosas investigaciones para mejorar la durabilidad de las estructuras.

Dentro del marco de investigación de los fenómenos de expansión en las estructuras de hormigón y de su modelización numérica, EDF-CIH ha podido trabajar con el LMDC Toulouse

2.2. Presentación del LMDC Toulouse

El Laboratorio de Materiales y Durabilidad de la Construcción (LMDC) es un laboratorio universitario de investigación especializada en el dominio de la ciencia de los materiales utilizados en la ingeniería civil. Se encuentra en el campus de Rangueil en Toulouse.

El LMDC se apoya sobre cuatro servicios especializados en el dominio del análisis experimental y modelización de los materiales de construcción: los servicios de la química micro-estructural, de la física, de la mecánica y de la informática y modelización, que nos proponen soluciones especificas para garantizar un mantenimiento tanto ecológico como responsable de las infraestructuras civiles. Para ello, el laboratorio desarrolla, dentro de sus instalaciones, materiales innovadores, metodologías para la auscultación, mantenimiento y diagnostico de obras existentes. Profundizan también en la comprensión de los diferentes fenómenos que pueden afectar en la durabilidad de los materiales de construcción, a causa de la reacción AAR.

Con el objetivo de adaptar sus investigaciones a las necesidades reales de la industria y proponer soluciones aplicables a los problemas actuales, el LMDC colabora estrechamente con Universidades, laboratorios y diversas industrias especializadas en la ingeniería civil en el mundo. Es dentro de este marco donde la cooperación entre EDF y LMDC tiene lugar. El objetivo es el desarrollo de un modelo de expansión que pueda representar la patología de la AAR afectando a las estructuras en hormigón.

3. Documento bibliográfico

3.1. Introducción

El hormigón no es un material inerte. En efecto, depende de toda una serie de equilibrios entre los elementos que lo componen y los cuales reaccionan constantemente entre ellos y el medio de su alrededor. La degradación del hormigón, es por lo tanto, una realidad y debe ser estudiada con el fin de predecir el comportamiento y la durabilidad de las estructuras en hormigón.

La deterioración del hormigón puede ser provocada por numerosos factores (aguas sulfatadas, alcalinas…). Según los mecanismos de degradación podemos clasificarlos en tres familias:

- Disolución de la matriz de cemento.
- Expansión del hormigón.
- Corrosión de las armaduras cuando esta armado.

La reacción AAR pertenece a la segunda familia. Aunque según la OCDE esta patología se encuentra en la duodécima posición en una lista de 16 causas de degradación de estructuras de hormigón, la magnitud de las degradaciones provocadas por esta reacción justifica el gran número de estudios realizados. Actualmente, podemos evitar el desarrollo de esta reacción en la concepción de nuevas estructuras durante la fase de proyecto. Sin embargo, en las obras ya existentes, es necesario poder prever tanto la amplitud de la reacción como las degradaciones estructurales provocadas con el objetivo de reevaluar la durabilidad de la estructura y las estrategias de mantenimiento. Para ello, es necesario un conocimiento profundo de la AAR.

3.2. Reacción Alcalino-Árido

La reacción fue identificada por primera vez en 1940 en los Estados Unidos. No fue hasta pasado los años 70 que se empezaron a identificar estructuras afectadas por este fenómeno en Francia.

En ese momento, se creyó que la expansión provocada por la reacción tenía un límite de duración y que estaba asociada a la gran cantidad de alcalinos presentes dentro de la pasta de cemento. Sin embargo, se ha podido identificar en varias presas modernas, donde la concentración de alcalinos es baja, una evolución indefinida de la reacción en el tiempo. Actualmente tras diversos estudios realizados conocemos mejor esta reacción y las causas que la provocan.

La AAR es producto de la reacción química entre las fases reactivas de la sílice de los áridos (sílice amorfa) y los alcalinos presentes dentro de la solución intersticial. El resultado es un gel sillico-calco-alcalino que se expande mediante la absorción de agua y que puede producir esfuerzos internos dentro del hormigón y, con ello, una bajada de sus propiedades mecánicas, deformaciones irreversibles, poner en peligro el funcionamiento de la estructura y su durabilidad. Actualmente, existen divergencias entre los diferentes protagonistas a considerar o el lugar donde ocurre la reacción.

Para algunos el lugar de la reacción es fijo, aproximación toponímica (Glasser y Kataoka (1981), Poole (1992)) en los contactos agua-árido reactivo, mientras que para otros, la reacción toma lugar dentro de la solución intersticial sin limitarse solo a los contactos, aproximación trans-solución (Dron (1993), Buteel (2006)).

La documentación consultada demuestra cuales son los parámetros que influyen en el desarrollo de la reacción alcalino-árido. El tipo de árido, la porosidad de la pasta de cemento, las condiciones medioambientales o la granulometría, afectan de una manera u otra a la evolución de la AAR.

Los áridos silicatados reactivos, favorecen el desarrollo de la AAR reduciendo la energía característica de la reacción. La formación de gel es proporcional a la granulometría del árido. De hecho, cuanto más grande es el granulado, más importante es la cantidad de gel producido. Podemos decir que la "expansión es inversamente proporcional a la superficie especifica de los granulados" (Poyet, 2003). La granulometría puede jugar un papel favorable o no: por un lado, sirve como medio de desplazamiento de los elementos alcalinos presentes en el agua; por otro lado, si hay una porosidad suficiente, el gel se expande sin producir esfuerzos internos ni daños en la estructura.

Las condiciones ambientales determinan la velocidad y el avance de la reacción. En particular la temperatura y la humedad. A altas temperaturas, la reacción es más rápida que a bajas temperaturas. La tasa de humedad, se muestra como un parámetro limitante durante la formación del gel. La definición de un umbral de humedad, de un valor mínimo, para activar la reacción es por lo tanto necesaria.

Considerando la estructura final, las cargas externas influyen determinando las direcciones principales de expansión y la anisotropía de la reacción.

La AAR progresa generalmente de manera lenta y sus efectos pueden manifestarse varios años más tarde tras la construcción de la estructura. En ciertos casos, la reacción puede durar unos 30 años. En estructuras ya terminadas, no existe ningún medio verdaderamente eficaz de

intervención que nos permita parar o disminuir el desarrollo de la reacción. La impermeabilización de la superficie aguas arriba o la utilización de inyecciones de sal de litio han sido propuestas como medios para controlar la AAR al disminuir la cantidad de agua. Sin embargo, es imposible asegurar una distribución homogénea de estas soluciones en la presa. Otra solución sería recargar o acomodar los desplazamientos provocados con el fin de que la estructura pueda soportar la expansión. Finalmente, reemplazar el hormigón dañado es la única solución posible.

Por el contrario, en las presas en concepción sí que se pueden tomar medidas preventivas contra la AAR. Son un ejemplo el limitar la cantidad de áridos reactivo, la utilización de aditivos que disminuyan la cantidad de alcalinos en la pasta de cemento o impedir la difusión de iones OH^-. Todas estas acciones han probado su eficacia. De esta manera podremos considerar cenizas volantes, humo de sílice o lactantes de alto horno para la concepción del cemento.

4. Explicación del modelo

4.1. Introducción

Para las grandes obras no convencionales como las presas, puentes o centrales nucleares, no existe ningún código de diseño o de relaciones empíricas que pueda ayudarnos durante la fase de concepción. La utilización de modelos en elementos finitos parece por lo tanto una alternativa eficaz para predecir el comportamiento a largo plazo de estas construcciones y, en particular, de estudiar y verificar cómo reaccionan bajo el efecto de la AAR.

Los modelos existentes pueden clasificarse en dos grupos según la escala utilizada dentro del estudio: los modelos químicos o microscópicos y los modelos fenomenológicos o macroscópicos. Los primeros tienen como objetivo comprender los mecanismos fisicoquímicos internos de la reacción y dar como resultado su cinética y el volumen de gel creado en nivel local, los segundos nos permiten de modelizar el comportamiento mecánico a largo plazo de la estructura.
La cooperativa EDF-LMDC Toulouse ha desarrollado un modelo fenomenológico que toma en cuenta las variables químicas de avance de la reacción así como las características físicas del gel. El objetivo de este modelo es de analizar de manera conjunta los diferentes fenómenos que modifican el comportamiento de la estructura: la fluencia, el deterioro, la retracción, sur-presión, etc.

Recientes mejoras en el modelo de fluencia permiten de abordar con pragmatismo el estudio de la AAR en situación real.

4.2. Modelo original

El modelo, desarrollado por Grimal (2007), toma en cuenta los diferentes parámetros importantes actuando en el seno del hormigón e influenciando la reacción química tales como la humedad o la presión capilar debida a la retracción. Entre sus principales innovaciones, encontramos la interacción entre la presión de origen químico y la deformación diferencial con las deformaciones anisótropas inducidas por la presencia de fisuras orientadas.

Se puede constatar una dependencia entre la evolución de las expansiones y el estado de esfuerzos, que es la consecuencia de la carga interna debida a la presión de expansión

combinada a la carga externa. Es la carga externa la que va a determinar la anisotropía de la reacción, originalmente isótropa, creando una relación entre las deformaciones verticales y radiales.

El modelo propuesto es esquematizado en la figura siguiente:

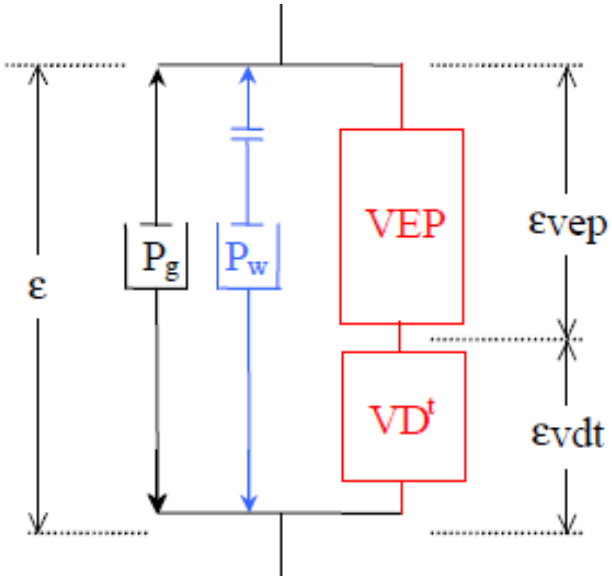


Figura 1. Esquema reológico del modelo

P_g, junto con los esfuerzos externos, solicita la matriz de cemento la cual es considerada como un medio visco-elasto-plástico dañable (VEPD) que puede ser dividido en dos niveles complementarios:

- VD^t dedicado a la deformación de ε^{vdt} respetando la relación empírica existente entre la expansión debida a la AAR y el deterioro.

- VEP modulo visco-elasto-plástico (VEP), correspondiente a la deformación ε^{vep}, permitiendo modelizar otros aspectos del comportamiento del hormigón tales como la elasticidad y la fluencia.

La presión P^g, es calculada suponiendo la hipótesis de que el estado de esfuerzos no modifica el avance químico de la reacción alcalino-árido. La AAR es una reacción donde los elementos alcalinos presentes en el agua intersticial en la porosidad del hormigón reaccionan con las fases reactivas de la sílice de los granulados. Esta porosidad conectada a los sitios de reacción es notada como A_0V^g (donde V^g es el volumen máximo de gel producido por la AAR y A_0 el valor del avance por el cual el volumen de gel es igual al volumen de la porosidad conectada

con los sitos de reacción) El resultado es un gel que consume agua y que se expande con una velocidad V^g. Mientras el volumen de gel creado (AV^g) sea inferior a la porosidad accesible (A_0V^g), no habrá presiones internas. Sin embrago, cuando el volumen de gel creado sea igual o superior a la porosidad conectada, el gel producirá presiones 'Pg' dentro del hormigón. Podemos por lo tanto escribir:

$$P^g = M^g (AV^g - (A_0V^g + b^g (tr(\varepsilon)))^+)^+$$

En esta expresión:

- V^g es el volumen máximo de gel que, teóricamente, puede ser creado por la reacción química a partir de un volumen unitario de hormigón en condiciones saturadas en un tiempo infinito.

- A es el avance de la reacción química, variando de 0, hormigón sano, a 1 cuando la reacción es completada.

- M^g es asimilable a un modulo de elasticidad del gel.

- b^g puede ser asimilado a un coeficiente de Biot para el gel.

- $tr(\varepsilon)$ representa la figuración del hormigón a causa de la expansión y ε la deformación total.

- $(\ )^+$ retiene los resultados positivos de una operación.

El avance de la reacción (A) será calculado:

$$\delta A/\delta t=\alpha_0 \cdot \exp(E_a/R(1/T_{ref}-1/T)) \cdot (Sr-Sr_0)^+/(1-Sr_0) \cdot (Sr-A)^+$$

En esta expresión:

- $Sr = C/C_{sat}$, donde C es la concentración de agua libre con por unidad de volumen de hormigón y C_{sat} es el valor de C cuando el hormigón está completamente saturado.

- α_0 es un parámetro cinético.

- E_a es la energía de activación alcalino-árido.

- R la constante de los gases perfectos.

- T_{ref} es es la temperatura absoluta del test permitiendo la identificación de α_0 y T la temperatura del punto material.

- (Sr-A) representa la fracción de la porosidad conectada al árido llena de agua y por ello susceptible de provocar reacción.

El modelo define por lo tanto, el avance de la reacción alcalino-árido y de la formación de gel para deducir la presión intra-porosa. La presión es seguidamente acoplada a un modelo reológico que permite definir las deformaciones y el deterioro del hormigón.

4.2.1. Modelo de deterioro

La evolución de la reacción depende del estado de esfuerzos y de las solicitaciones seguidas por una determinada estructura. En el caso en que la estructura sea sometida a un estado de esfuerzos desviatorio, la expansión y el deterioro en tracción son fuertemente anisótropos. Vamos por ello a diferenciar deterioro en tracción y deterioro en compresión.

El deterioro anisótropo en tracción según la dirección i, 'd^t_i' se expresa de la siguiente manera :

$$d^t_i = 1 - \exp(-1/m^t \cdot (\sigma_i^R / \sigma^{ut})^{mt})$$

En esta expresión, m^t es un parámetro tanto más grande cuando el material es más frágil y puede ser identificado a partir del deterioro experimental medido con la ayuda de un test de tracción. 'σ^{ut}' es también un parámetro del material que puede ser asimilado a una cohesión y que está directamente relacionado con la resistencia. Finalmente, 'σ_i^R' es la componente i correspondiente al tensor umbral de esfuerzos 'σ^R'. Este tensor umbral, permite definir un criterio de fisuración correspondiente al criterio de Rankine en tracción.

En compresión, encontramos el mismo tipo de expresión:

$$d^c = 1 - \exp(-1/m^c \cdot (\sigma^{DP} / \sigma^{uc})^{mc})$$

Sin embargo, en este caso, el criterio de fisuración expresado según un esfuerzo umbral 'σ^{DP}' es función, en compresión, de un criterio de Drucker Praguer que toma en cuenta el efecto desfavorable de la desviador de esfuerzos.

Podemos remarcar igualmente que el deterioro en compresión es considerado isótropo. Esta simplificación puede ser explicada por el hecho de que, en compresión, la anisotropía inducida es menos importante que en tracción y puede por lo tanto ser descartada.

Al final, podemos calcular el deterioro global de la siguiente manera

$$d = (1 - d_C)\Pi_i(1 - d_T^i)$$

4.2.2. Deformaciones

Después del cálculo del deterioro del hormigón, podemos calcular de manera teórica su deformación total. Observando el esquema reológico del modelo representado en la figura 1, podemos definir la deformación total de la siguiente manera.

$$\varepsilon = \varepsilon^{vdt} + \varepsilon^{vep}$$

Donde, ε^{vdt} hace referencia a la parte visco-elasto-plástica mientras que ε^{vep} es la deformación debida al fluencia y a la retracción actuando en a matriz de cemento. Hace falta considerarlos conjuntamente con el fin que nuestra representación sea lo más realista posible.

Para calcular ε^{vdt}, consideraremos la cinética de la deformación como:

$$(d\varepsilon_{vdt}/dt) = \varepsilon_0 \cdot (1/(1 - d_{rag}))\, d(d_{rag}/dt)$$

En esta ecuación fenomenológica, ε_0 es un parámetro dado a partir de los resultados experimentales, d_{rag} es el tensor de deterioro a tracción de segundo orden evaluado de la siguiente manera:

$$d_{rag} = 1\text{-}\exp(-1/m^t \cdot (((\min(\sigma_i^R, bg \cdot Pg))/\sigma^{ut})^{mt})$$

ε^{vep} es la deformación procedente del modulo VED, definido en el esquema reológico de la figura 1. El VED puede ser representado de manera más precisa tal como sigue:

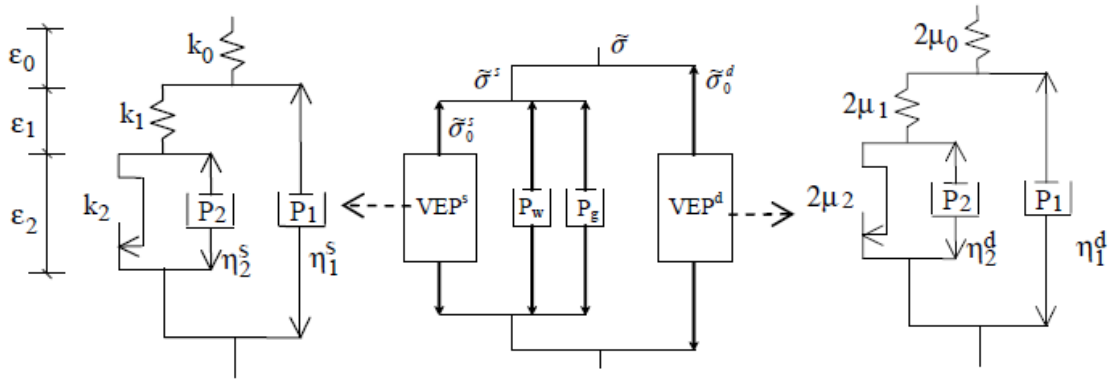


Figura 2. Modulo visco-elasto-plástico

Diferenciando su parte esférica (VEP^s) de su parte desviatoria (VEP^d) ε^{vep} puede ser evaluada y calculada según las siguientes formulas:

$\varepsilon^{vep} = \varepsilon^0 + \varepsilon^1 + \varepsilon^2$ et:

$\varepsilon^0 = \sigma^s/k_0$

$k_1 \cdot \varepsilon^1 = k_2 \cdot \varepsilon^2 + \eta^s{}_2 \cdot d\varepsilon^2/dt$

$\sigma^s = k_1 \cdot \varepsilon^1 + \eta^s{}_1 d(\varepsilon^1 + \varepsilon^2)/dt$

Con k_0, k_1, k_2, $\eta^s{}_1$ et $\eta^s{}_2$ parámetros del modelo que tendrán que ser identificados en ensayos de laboratorio

Para la parte desviatoria seguiremos el mismo procedimiento que en la parte esférica pero los parámetros a calibrar serán μ_0, μ_1, μ_2, $\eta^d{}_1$ et $\eta^d{}_2$.

La siguiente formula nos permite relacionar todos los parámetros implicados:

$\sigma = (1 - D) : (C^0 : (\varepsilon - \varepsilon^{vep} - \varepsilon^{vdp} - \varepsilon^{th}) - (b_g P_g + b_w P_w) I)$ con $D = \max(d_{rag}, d_T)$

En esta expresión, σ es el esfuerzo aparente, C^0 la matriz de rigidez del material, ε^{th} la deformación térmica, $b_w P_w$ el efecto de la presión del agua y $b_g P_g$ el efecto de la presión de gel debido a la AAR.

Seguidamente; vamos a explicar los desarrollos aplicados al modelo.

4.3. Desarrollo del modelo

4.3.1. Primer desarrollo

Si bien es cierto que el modelo original nos permitía obtener resultados muy cercanos a la realidad, ciertas simplificaciones han sido propuestas con el fin de mejorar su convergencia así como la gestión conjunta de los diferentes fenómenos actuando en el hormigón.

Para alcanzar estos objetivos, en el primer desarrollo pasaremos del modelo original (esquema reológico representado en la figura 1) a un nuevo modelo representado en la figura 3 y precisado seguidamente:

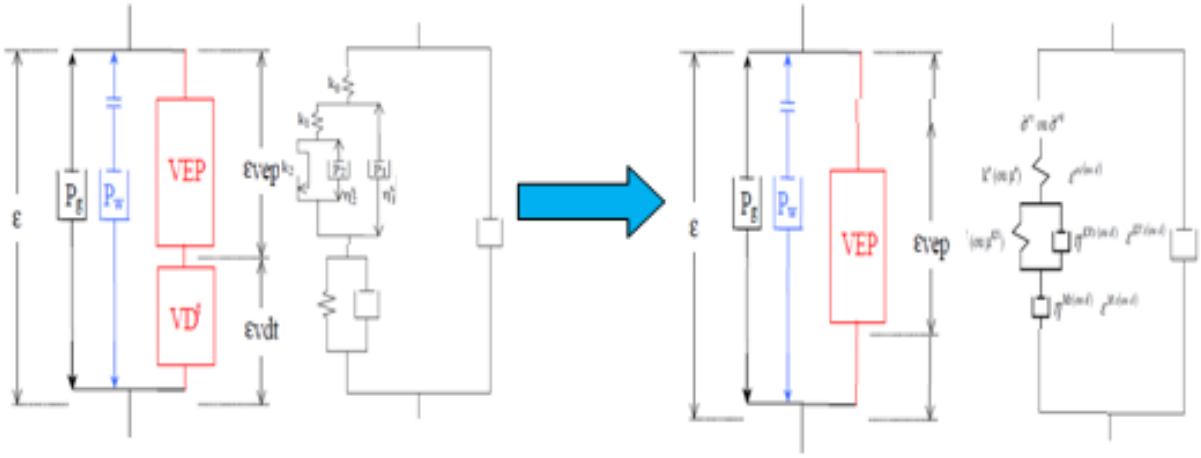


Figura 3. Desarrollo del esquema reológico del modelo

En el modelo antiguo, la matriz de cemento estaba representada por un modulo VEPD dividido en dos partes: una parte visco-elasto-plástica (VEP) y otra dedicada a la modelización de ε^{vdt}. De esta manera, la deformación total puede ser obtenida como la suma $\varepsilon = \varepsilon^{vep} + \varepsilon^{vdt}$ o más genéricamente como $\varepsilon = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{v} + \varepsilon^{rag}$ donde $\varepsilon^{vep} = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{v}$ (deformación elástica y viso-elasto-plástica) y $\varepsilon^{vdt} = \varepsilon^{rag}$, una deformación definida con el fin de poder obtener la curva experimental tensión-deformación:

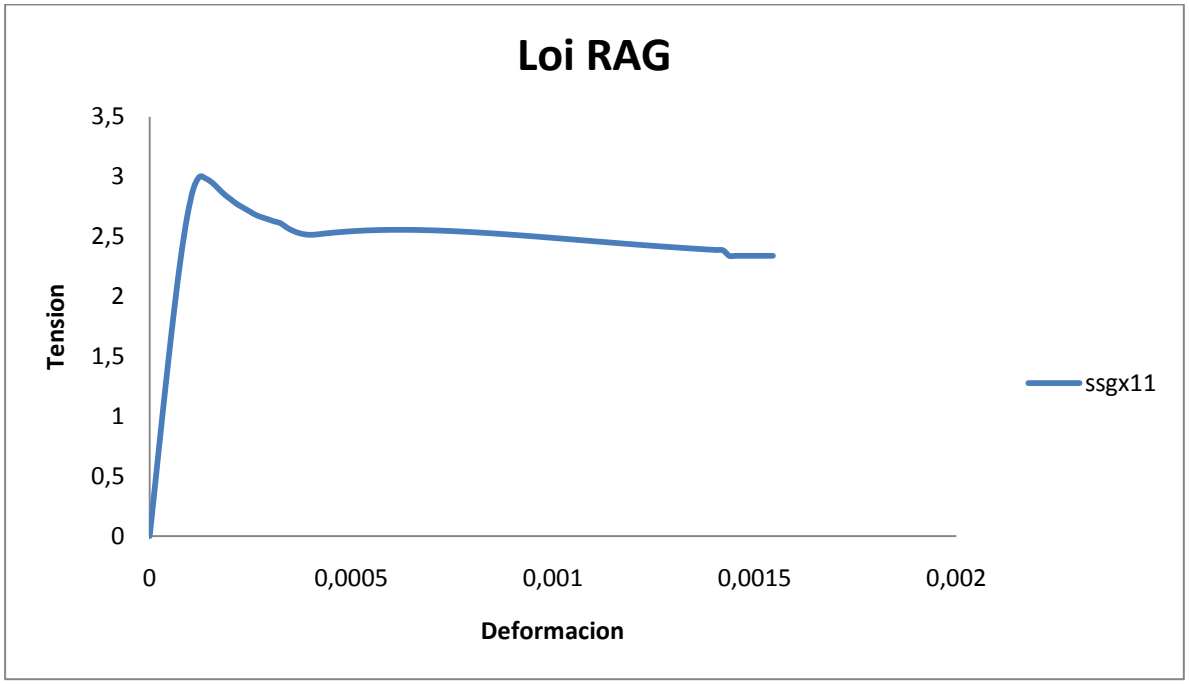


Figura 4. Ley esfuerzos-deformación de la AAR.

Simplificando, buscamos demostrar la deformación total como $\varepsilon = \varepsilon^{vep} = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{v}$, solución simple y lógica que refleja mejor la realidad sobre el terreno.

Entre les desarrollos del modelo encontramos la diferenciación entre deterioro difuso (fisuras microscópicas repartidas por todo el volumen) y deterioro localizado (fisura local). Cuando el sólido es afectado por un deterioro local o difuso, los efectos desde un punto localizado son los mismos: el hormigón está dañado. Es decir, si nuestra estructura esta fisurada en un punto local, es imposible conocer a posteriori si ha sido deteriorada mediante un proceso difuso o localizado. Solo una observación a nivel estructural o macroscópico puede revelarnos si el daño es localizado o si pertenece a una familia de deterioro difuso.

Las consecuencias son que, localmente, cualquiera que sea el proceso de deterioro, un decrecimiento aparente del esfuerzo de tracción es observado. Por lo tanto, si un proceso de deterioro difuso tiene ligar antes que un proceso localizado, este es acelerado por el proceso difuso precedente e viceversa. También, otra consecuencia es la imposibilidad que tiene una carga externa local de crear fisuras difusas. Es decir, si existe una carga externa, esta provoca un deterioro localizado o, si hay un deterioro difuso, este solo puede ser asociado a un proceso difuso.

El modelo encuentra finalmente una fórmula que nos permite liar estos deterioros con el esfuerzo local.

$$\sigma = (1 - D^{\lambda})\cdot\sigma' + D^{\lambda}\sigma'^{f} - (b_g P_g + bS_w(P_w^{+} + (1 - D^{\delta})\cdot P_w^{-}))(1 - D^{\lambda}) - D^{\lambda}\cdot P_w^{+} S_w$$

Dentro de esta expresión, σ es el esfuerzo total, σ' es el esfuerzo efectivo y σ'^{f} es el esfuerzo positivo en caso de cerrarse las fisuras. Recordamos que la definición del esfuerzo efectivo es $\sigma' = \sigma - \sigma_w$ donde σ_w es la presión dentro del hormigón. D^{δ} es el tensor de deterioro difuso y D^{λ} es el tensor de deterioro localizado. $(1 - D^{\lambda})$ es la parte no dañada tras la aparición de una fisura local, $(1 - D^{\delta})$ es la parte no dañada tras la aparición de una fisura difusa. P_w es la presión de agua, distinguimos entre P_w^{+} et P_w^{-} puesto que la P_w^{-} no tendrá ningún efecto sobre la parte fisurada. S_w es el grado de saturación, b el coeficiente de Biot y $b_g P_g$ es la presión de gel.

El modelo permite también la evolución del deterioro en compresión. El deterioro en compresión es consecuencia de la coalescencia de las microfisuras inducidas alrededor de los granulados a causa de las diferentes deformaciones horizontales entre los áridos y la pasta de cemento. Si estas microfisuras producidas por este fenómeno hacen desaparecer la heterogeneidad del campo de esfuerzos, el equilibrio local se hace imposible y la carga debe ser reducida para alcanzar el equilibrio otra vez. El deterioro en compresión es el causante. El modelo formula la siguiente igualdad que considera el esfuerzo en función del deterioro de compresión D^{c}:

$$\sigma = (1 - D^{c})((1 - D^{\lambda})\cdot\sigma' + D^{\lambda}\sigma'^{f}) - (b_g P_g + bS_w(P_w^{+} + (1 - D^{\delta})(1 - D^{c})P_w^{-}))(1 - D^{\lambda}) - D^{\lambda}\cdot P_w^{+}$$

Para calcular las deformaciones totales del sistema, vamos a considerar el modelo reológico siguiente valido tanto para la parte esférica (VEP^{s}) como para la parte desviatoria (VEP^{d}) de la fluencia.

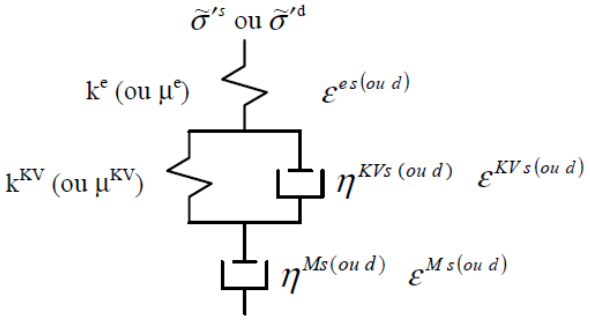


Figura 5. Sistema de fluencia del modelo

Como podemos ver en la figura precedente, el cálculo de las deformaciones será el resultado de la resolución del sistema de ecuaciones siguiente:

$\sigma'^{s} = k^{e}\varepsilon^{es}$

$k^{e}\varepsilon^{es} = k^{KVs}\varepsilon^{KVs} + \eta^{KVs}\, d\, \varepsilon^{KVs}/dt$

$k^{e}\varepsilon^{es} = \eta^{Ms}\, d\, \varepsilon^{Ms}/dt$

Donde k^{e} es el modulo de elasticidad del material, k^{KV} et η^{KVs} el modulo de la viscosidad del nivel Kelvin Voïgt que sirve para considerar la parte reversible de las deformaciones de fluencia y η^{Ms} la viscosidad del nivel de Maxwell. Para la parte desviatoria, el sistema a resolver será idéntico al anterior pero cambiando el nombre de los parámetros:

$\sigma'^{d} = \mu^{e}\varepsilon^{ed}$

$\mu^{e}\varepsilon^{ed} = \mu^{KVd}\varepsilon^{KVd} + \eta^{KVd}\, d\, \varepsilon^{KVd}/dt$

$\mu^{e}\varepsilon^{ed} = \eta^{Md}\, d\, \varepsilon^{Md}/dt$

4.3.2. Segundo desarrollo

Para verificar el buen funcionamiento del primer desarrollo, se han lanzado diversos cálculos con el fin de compararlos con los resultados obtenidos en la práctica y que nos permitan verificar la adecuación del modelo con la realidad. Sin embargo, pese a que la teoría de deterioro y de fluencia avala la obtención de unos resultados acordes a la realidad, hemos podido corroborar ciertos problemas de convergencia al afectar el modelo con la AAR hecho por el cual hemos tenido que definir cambios importantes con el objetivo de mejorar nuestro futuro desarrollo.

El problema se encontraba en el cálculo de P_g. Para calcular P_g, necesitábamos conocer la deformación provocada por la AAR (tr(ε)). El esquema reológico de la figura 3 determina la evolución de esta deformación que alcanzará, en este primer desarrollo, valores infinitos en aplicación de una carga AAR lo que provoca esfuerzos infinitos y problemas de convergencia.

Este modelo reológico presenta ciertos problemas que no nos permiten obtener los resultados esperados ni resolver los problemas para los cuales ha sido desarrollado. Es por ello que será descartado por el esquema original que será adaptado a los nuevos avances. El modulo VD^t será objeto de ciertas modificaciones debido a una mejor comprensión actual del mismo.

De este modo, la cinética de deformación de la AAR será calculada de la siguiente manera:

$$(d\varepsilon^{vdt}/dt)^+ = (P^g/\zeta(\varepsilon_{vdt}^{\infty} - \varepsilon^{vdt}))^+ \text{ con } \varepsilon_{vdt}^{\infty} = \varepsilon_0\,(d_{rag}^{\infty}/(1-d_{rag}^{\infty}))$$

En esta expresión, los parámetros ζ et Pg han sido añadidos a la fórmula original. ζ puede ser definido como el tiempo característico de flujo del gel dentro de las fisuras. P_g, la presión del gel, será entonces calculada como:

$$P^g = M^g\,(AV^g - (A_0V^g + b^g(tr(\varepsilon^{evp})) + tr(\varepsilon^{vdt}))^+)^+$$

En esta expresión, consideramos que todas las fisuras producidas por la AAR (ε^{vdt}) son accesibles al gel, motivo por el cual $tr(\varepsilon^{vdt})$ no es afectada por el coeficiente de Biot.

Con el objetivo de verificar el modelo, se han lanzado diversos ensayos que nos permitirán identificar los parámetros del modelo que mejor representan la realidad. Los ensayos son explicados en el próximo capítulo.

5. Calibración del modelo

5.1. Calibración de la fluencia

El objetivo de esta parte es verificar el buen funcionamiento del modelo para representar un caso real de fluencia. Por ello, se propone encontrar los valores de los parámetros del modelo que nos permitan representar de la mejor manera posible una evolución de las deformaciones del hormigón en función del tiempo, considerando que el material está sometido a cargas axiales y que la fluencia es la principal causa de la evolución de las deformaciones. Los ensayos Gopalaskrishnan nos permiten representar los efectos de la fluencia en estas condiciones. En la tesis doctoral de E. Grimal (2007) podemos encontrar los resultados experimentales obtenidos para estos ensayos. Vamos por lo tanto a comparar los resultados calculados al lanzar modelo fenomenológico propuesto con aquellos que se han podido obtener en la realidad.

El proceso escogido ha sido identificar el valor de los parámetros del modelo que nos permiten una mejor representación del ensayo Gopalaskrishnan en dos ejes (Gopalaskrishnan biaxial) y de asegurar seguidamente que los valores retenidos permiten también una buena representación de los otros ensayos Gopalaskrishnan.

5.1.1. Gopalaskrishnan biaxal

En este ensayo, un cubo de hormigón de 0,1 metros de lado es cargado según dos ejes durante 28 días. Después, se descarga instantáneamente y se observa la evolución de las deformaciones debidas a la fluencia.

Den el modelo, los parámetros que caracterizan la fluencia son:

TAU1: Tiempo característico de fluencia reversible.

TAU2: Tiempo característico de fluencia irreversible.

EPS0: Deformación característica de fluencia.

DFMX: Deterioro máximo de fluencia.

Y1SY: Relación entre la amplitud de la deformación elástica y la de la fluencia reversible.

Iterando, podemos encontrar el valor de estos parámetros que representan de manera óptima la evolución real.

En el siguiente gráfico se representa la deformación en función del tiempo y la comparación con los puntos reales obtenidos en el ensayo.

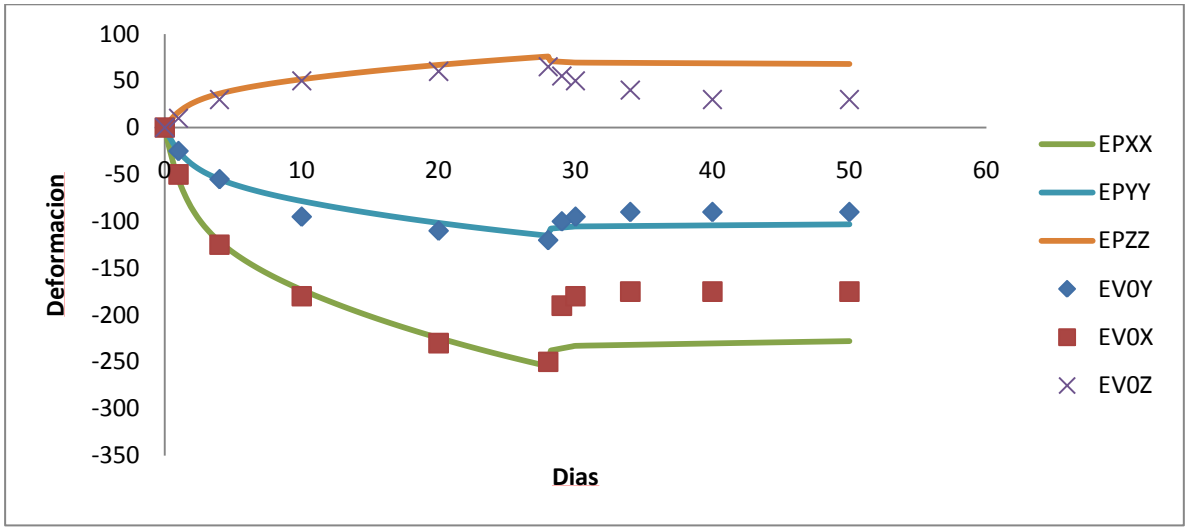


Figura 6. Ensayo Gopalaskrishnan-Biaxial

El valor retenido para los parámetros ha sido:

TAU1: 1 días

TAU2: 14 días

EPS0: 2e-3

DFMX: 0,2

Y1SY: 4,1

5.1.2. Gopalaskrishnan uniaxial

En este ensayo un cubo de hormigón de 0,1 metros de lado es cargado según un eje durante 28 días. Seguidamente descargamos instantáneamente y observamos la evolución de las deformaciones causadas por la fluencia.

Con los parámetros retenidos en la sección precedente, lanzando el modelo para Gopalaskrishnan uniaxial, obtenemos el siguiente grafico que nos va a permitir comparar la evolución calculada a partir del modelo numérico con los puntos reales:

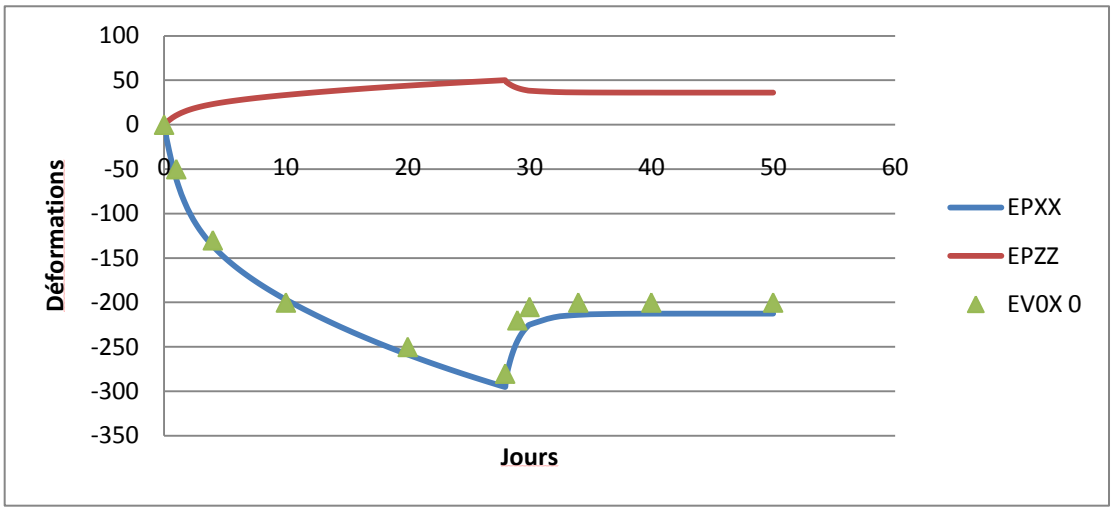


Figura 7. Ensayo Gopalaskrishnan -uniaxial

Se puede comprobar que los parámetros obtenidos en el ensayo biaxial permiten una buena modelización del ensayo uniaxial.

5.1.3. Gopalaskrishnan triaxial

En este ensayo un cubo de hormigón de 0,1 metros de lado es cargado según tres eje durante 28 días. Seguidamente descargamos instantáneamente y observamos la evolución de las deformaciones causadas por la fluencia.

Con los parámetros retenidos en la sección precedente, lanzando el modelo para Gopalaskrishnan triaxial, obtenemos el siguiente grafico que nos va a permitir comparar la evolución calculada a partir del modelo numérico con los puntos reales:

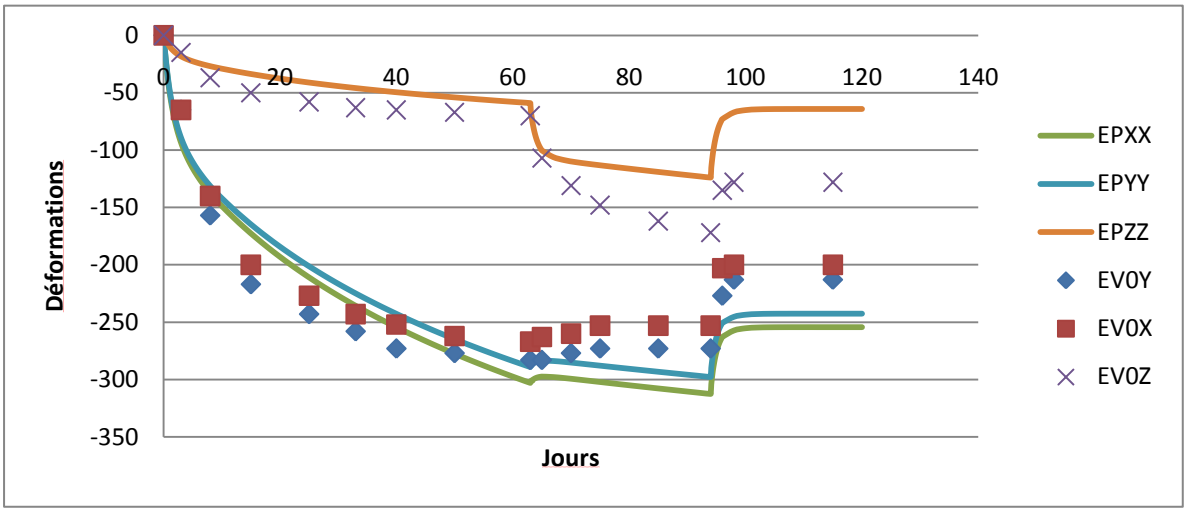


Figure 8. Ensayo Gopola-Triaxial

Se puede comprobar que los parámetros obtenidos en el ensayo biaxial permiten una buena modelización del ensayo triaxial

5.2. Calibración del deterioro

El objetivo en esta parte es de identificar los parámetros del modelo propuesto que mejor nos permiten representar el deterioro del hormigón con respecto a la realidad. Se proponen dos ensayos de deterioro (cíclico local y William), los resultados de los cuales han sido recopilados de la tesis doctoral de E. Grimal (2007). Para identificar los parámetros del modelo, vamos a seguir el procedimiento utilizado en el apartado anterior. Iterando vamos a intentar encontrar el valor de los parámetros de deterioro del modelo que nos permiten de predecir de la mejor manera posible el comportamiento real del hormigón.

Los parámetros a calar son:

GFTL: energía volumétrica de disipación localizada de tracción.

GFCL: energía volumétrica de disipación localizada de compresión.

EPC (ε_{pc}): deformación en el pico de compresión.

EPT (ε_{pt}) : deformación en el pico de tracción.

R_T: resistencia de tracción.

R_C: resistencia de compresión.

5.2.1. Ensayo de William

En este ensayo vamos a someter a una probeta cubica de 1 metro de lado a un camino de carga especifico que crea una rotación continuada de las direcciones de los esfuerzos principales. Este ensayo numérico nos va a permitir de verificar la robustez del modelo para converger pese a los cambios de sus características.

Los parámetros que deberán ser identificados son aquellos de tracción. Es decir, GFTL, ε_{pt} y R_T . La influencia de estos parámetros en la curva esfuerzos-deformación es ilustrada en la siguiente figura:

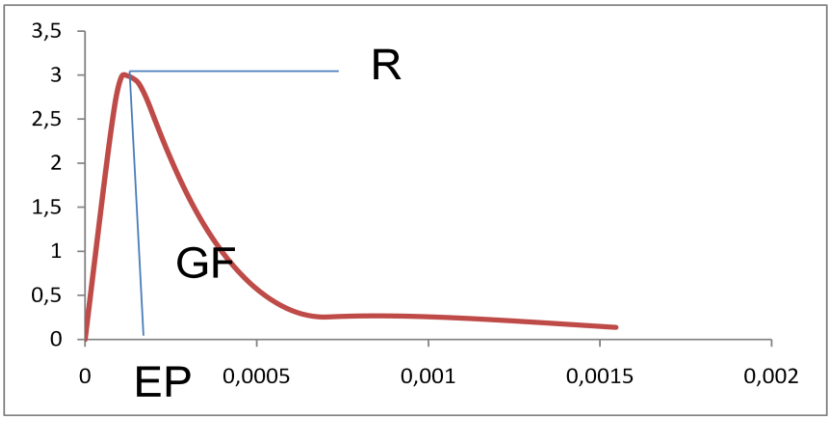


Figura 9. Influencia de la parámetros de tracción.

Observando la curva, RT fija el pico de la curva o su ordenada, EPT la deformación en el momento del pico de tracción o su abscisa y, finalmente, GFTL gestiona la forma de la curva. GFTL puede ser definida como el área encerrada por la curva formada por una recta que pasa por el origen de coordenadas, punto (0,0), y por el pico de tracción, la curva de comportamiento del material tras el pico de tracción y el eje de abscisas.

Según la formulación del modelo, podemos encontrar una energía de fisuración GFTL en función de la longitud de tracción máxima del elemento:

$$xl_{imaxtraction}=6\cdot Gftl_{min}\cdot fr/Rt/\varepsilon_{tpic}/(-4\cdot\beta\cdot fr+fr-2+2\cdot\beta+2\cdot\gamma\cdot fr+4\cdot\gamma\cdot\beta\cdot fr-2\cdot\gamma\cdot\beta+2\cdot\gamma)$$

En esta fórmula, β y γ son los parámetros del criterio de Drucker-Prager.

De esta manera, los elementos del modelo permiten verificar esta fórmula con el objetivo de evitar una lectura errónea. El valor de GFTL mínimo así como la longitud a tracción máxima

son fácilmente deducidos en función de Rt, ε_{pic}, fr, β y γ. De esta manera para una cierta longitud de tracción, podemos encontrar una GFTL mínima y viceversa.

Tabla 1. Energía de disipación para fisuración local minina.

xlimax	9,30E-02 m
Gftraccion	1,95E-05
Rt	3 Mpa
epic	1,30E-04
beta	5,00E-03
gama	1,1
fr	1,00E+01

Iterando hemos podido encontrar los valores de los parámetros buscados. Para el ensayo William, pueden ser fijados tal como sigue:

GFTL= 8e-4

EPT= 2,0e-4

R_T=3MPa

Sin embargo, se ha podido demostrar que, en el modelo, el valor de GFTL depende de la talla de los elementos, por ello tendrá que ser recalada según el tamaño con el fin de respectar la forma de la curva buscada. Como ya se ha dicho anteriormente, GFTL es igual al área encerrada por la curva esfuerzos-deformación y el eje de abscisas. De manera que para un valor grande de GFTL la curva se moverá hacia la derecha, para encerrar más área, y para un valor pequeño de GFTL se moverá hacia la izquierda. Sin embargo, esta igualdad GFTL-área encerrada solo es válida para un cubo de 1 metro de lado. Para elementos de otras dimensiones, el valor de GFTL será el resultado de multiplicar el valor GFTL para un cubo de 1 metro de lado (o el área encerrada por la curva) por la longitud del lado del cubo.

Tabla 2. Parámetros de calibración William

		Valor por defecto
Valor de la integral a tracción (área de la curva)	0,0008	8,00E-04
Longitud del cubo	0,1	Depende del mallado
GFTL	8,00E-05	
eps(sigmaxxmax) = epic		2e-4 MPa
RT		3 MPa

Esta dependencia entre la talla de los elementos y GFTL no debería existir. Es por ello posible que exista un error de programación para corregir en el modelo.

La respuesta al modelo está dada en el grafico siguiente:

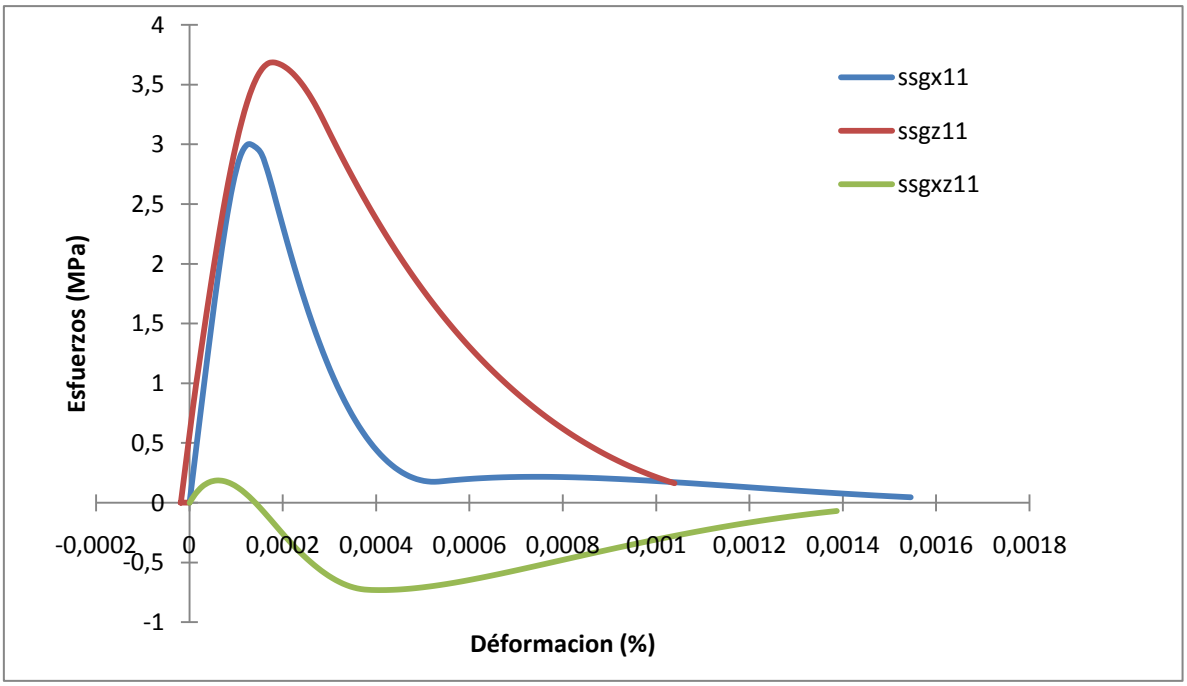


Figura 10. Grafico esfuerzos-deformaciones del ensayo William

5.2.2. Cíclico local GFCL

La puesta en carga consiste en la aplicación de dos ciclos de carga en tracción seguida de otros dos ciclos de carga en compresión siguiendo el trayecto siguiente:

Control en desplazamientos

1. Tracción $\varepsilon_{xx} = 1{,}4 \cdot 10^{-4}$
2. Relajamiento (à $\sigma_{xx} = 0$)
3. Tracción $\varepsilon_{xx} = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$
4. Compresión $\varepsilon_{xx} = -4 \cdot 10^{-3}$
5. Relajamiento (à $\sigma_{xx} = 0$)
6. Compresión $\varepsilon_{xx} = -5 \cdot 10^{-3}$
7. Tracción $\varepsilon_{xx} = 0{,}0$

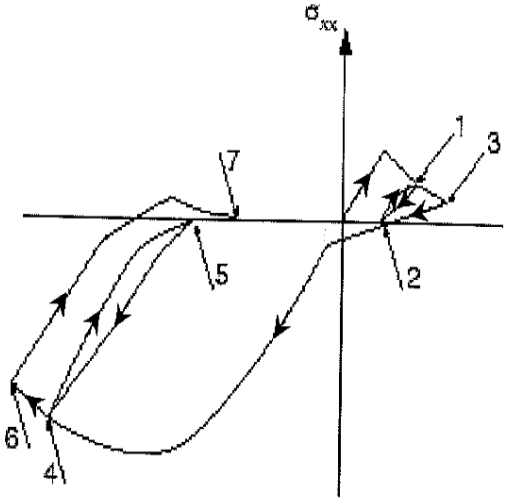


Figura 11 Esquema del ensayo cíclico local

El calibrado para el ensayo cíclico local es parecido al que hemos hecho para el ensayo William. Esta vez, sin embargo, los parámetros a calibrar serán tanto los de tracción como los de compresión. De todas maneras, si la realización del ensayo de William es correcta, solo los parámetros de compresión deberán ser calibrados. Siguiendo las consignas explicadas en la sección anterior, R_c y EPC sitúan el pico de compresión y su deformación respectivamente. GFCL será por lo tanto el parámetro que va a gestionar la forma de la parte en compresión.

Una vez el modelo ha sido bien calibrado, calculamos el área encerrad por la curva. Hemos podido constatar que esta área es igual a GFCL para los elementos de longitud de compresión 1 metro y proporcional a su longitud para las otras tallas de elemento. Por lo tanto, para un cubo de lado 0,1 metros, GFCL es igual a 0,1 veces el área encerrada por la curva

Como ya se ha explicado en el ensayo de William, esta dependencia no debería existir por lo que podemos suponer que existe un error a corregir en el problema.

En el ensayo cíclico local tenemos también valores limítrofes definidos por la formulación del programa. Por ejemplo la siguiente fórmula:

$xl_{imaxcompression}=2\cdot Gfcl_{min}\cdot/Rt/\varepsilon_{cpic}/(-\beta+fr-2+\gamma+\cdot\gamma\cdot\beta)$

En la formula precedente, β et γ son los parámetros que definen el criterio de fluencia de Drucker-Prager.

La respuesta dada por el modelo es representada en la siguiente figura::

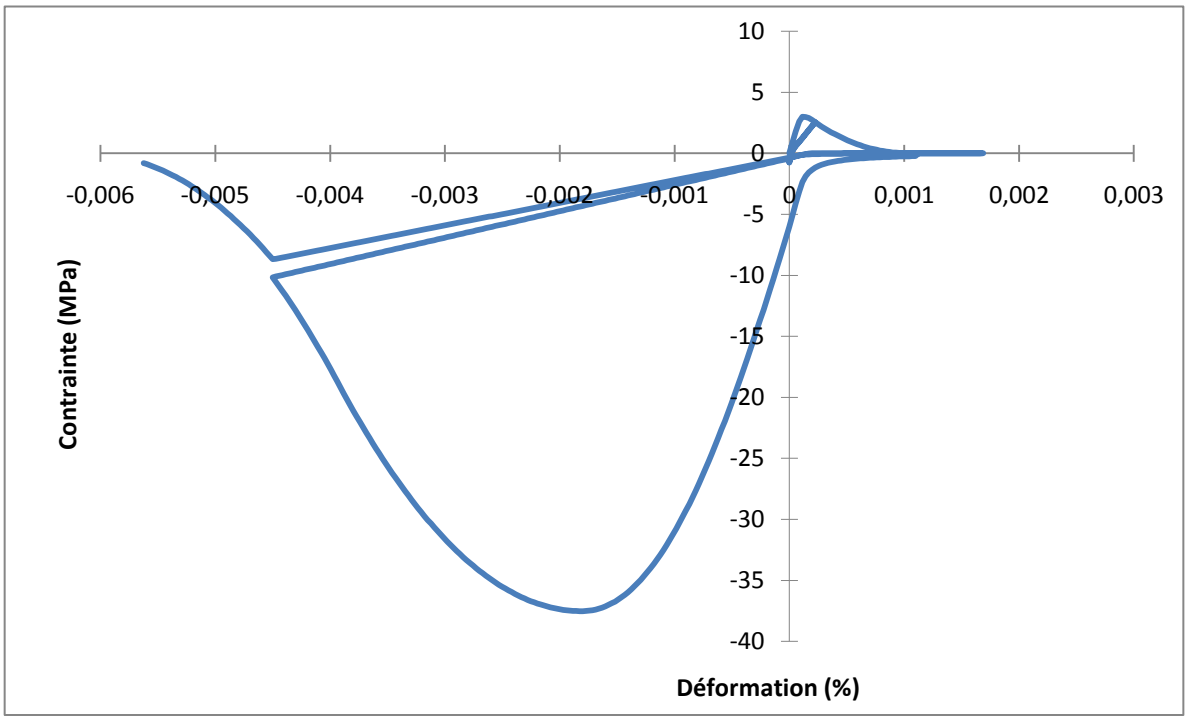


Figura 12. Grafico esfuerzos-deformaciones del ensayo cíclico local

Los valores finalmente retenidos según las características del ensayo cíclico local son los siguientes:

GFCL= 8e-4

EPC= 1,2e-2

R_C=38,3MPa

5.3. Ensayos de verificación

Antes de utilizar el modelo en casos reales, el modelo de la AAR debe ser validado. Esta etapa de validación consiste en comparar los resultados obtenidos por medio de la modelización con los resultados experimentales realizados en laboratorio por Stéphane Multon (2003).

Pese a nuestro interés por desarrollar estos ensayos, el tiempo finalmente no nos ha permitido verificar la integralidad de nuestra investigación. Los resultados parciales nos obligan pues a prolongar este stage con el fin de poder conseguir nuestro objetivo.

5.3.1. Prisma

La verificación de este ensayo es realizada en probetas salidas de la campaña experimental LCP/EDF (Multon 2003, 2006). Se identificaran los parámetros AAR según dos ensayos, un ensayo en expansión libre de la reacción y otro en expansión condicionada con una carga axial de 10 MPa aplicada a las probetas reactivas.

Podemos deducir fácilmente que los parámetros que van a tener una influencia más grande serán: el volumen de gel (V_g), el volumen de gel inicial (V_{g0}) y el tiempo característico de flujo del gel dentro de las fisuras (τ).

La metodología seguida para calar y determinar los parámetros de la AAR ha consistido en calibrar V_g et V_{g0} en el ensayo de expansión libre y posteriormente τ en el ensayo del cubo cargado axialmente a 10 MPa. De esta manera, vamos a intentar gestionan la cinética de la AAR en probetas no cargadas determinando el punto de partida por medio de V_{g0} y e punto final por medio de V_g .

Hemos tenido problemas con la evolución de la AAR puesto que solo podemos modelizar una cinética lineal mientras que en la realidad esta evolución es más bien parabólica. La ley cinética de avance es definida por medio de:

$VG=0{,}45\cdot 10^{-2}$

$VG0=0{,}4\cdot 10^{-3}$

TAUG=1,5

Los resultados de expansión libre y con 10 MPa de carga axial son respectivamente:

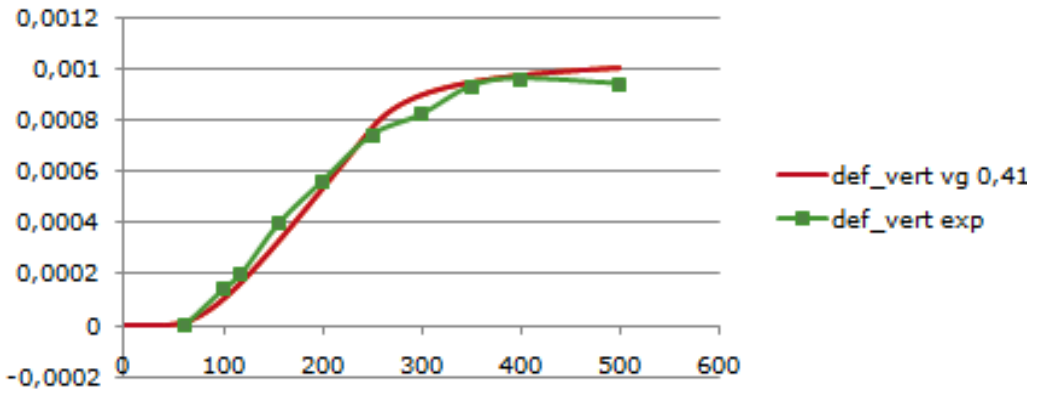


Figura 13. Deformación vertical prisma en expansión libre

Como la expansión es libre, las deformaciones según el eje 'x' e 'y' serán las mismas que si fuera una expansión isótropa.

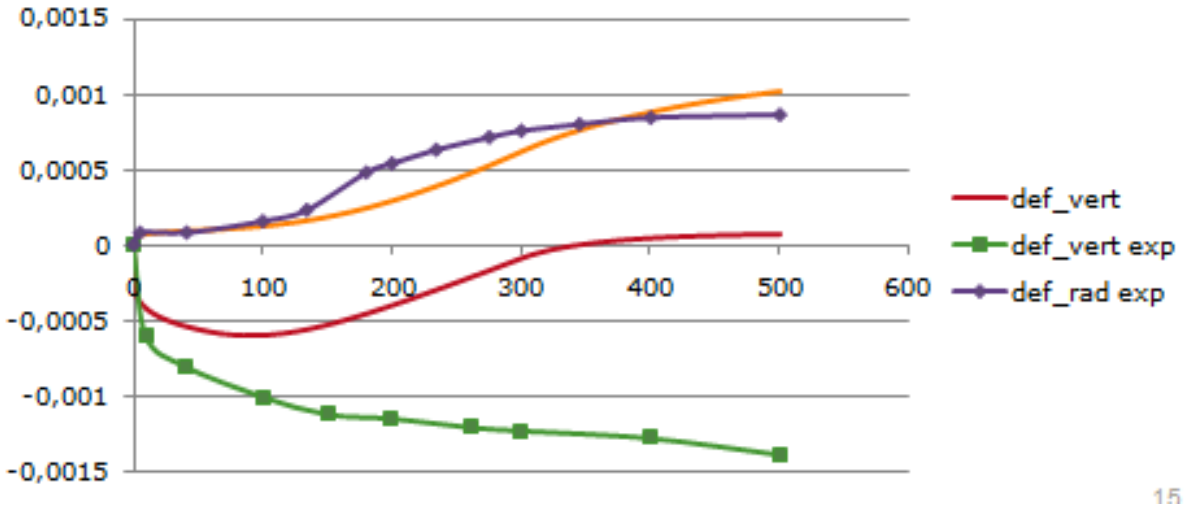


Figura 14. Prisma cargado axialmente a 10 MPa

El objetivo futuro va ser conseguir una mejor gestión de la cinética de la reacción que nos permita un mejor calibrado de la curva.

5.3.2. Cubo en expansión libre

Este ensayo consiste en dejar expandirse libremente un cubo de un metro de lado.

Como ya se ha explicado anteriormente, la primera evolución del modelo de Etienne Grimal ha sido finalmente descartada reteniendo el modelo reológico original aunque mejorando la comprensión de ciertos elementos de su estructura. Este ha sido el ensayo que nos ha llevado a descartar el primer desarrollo debido a una no compatibilidad del modelo cuando es afectado por una carga de expansión AAR. Se han podido constatar claros problemas de convergencia así como unos resultados ilógicos y erróneos con respecto a los esperados de una expansión libre.

Los resultados presentados en este apartado corresponden por lo tanto a aquellos obtenidos para el segundo desarrollo.

Los resultados obtenidos son:

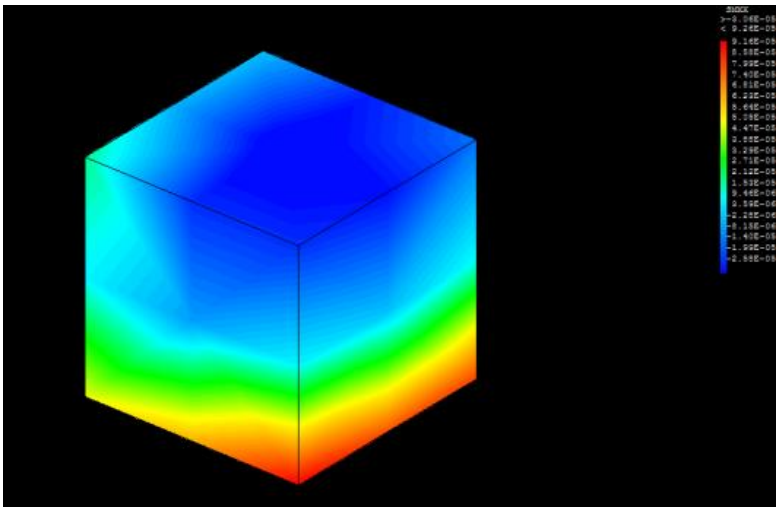


Figura 15. Esfuerzos verticales

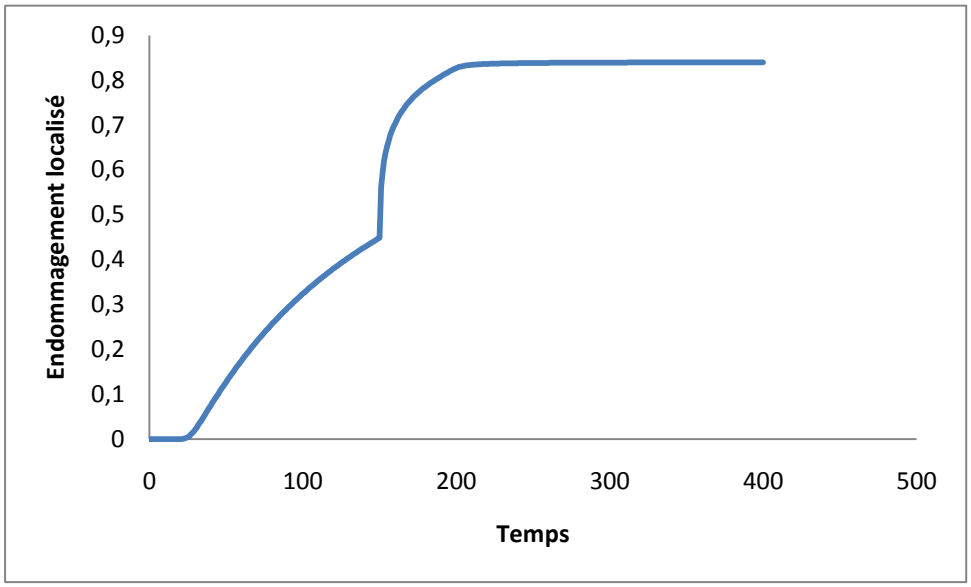


Figura 16. Deterioro localizado

Se puede ver que el deterioro es siempre creciente positivo. En el modelo descartado, el deterioro obtenido respectaba este comportamiento creciente positivo al inicio del cálculo. Sin embargo, a partir de un cierto instante, los resultados alternaban fases crecientes con decrecientes e incluso deterioros negativos (totalmente ilógico debido a la definición de deterioro) y que ha sido atribuido a problemas de convergencia a altas presiones de gel.

El deterioro no puede disminuir puesto que no es un fenómeno reversible. Los problemas de convergencia para fuertes presiones de gel pueden ser el origen de este resultado aberrante.

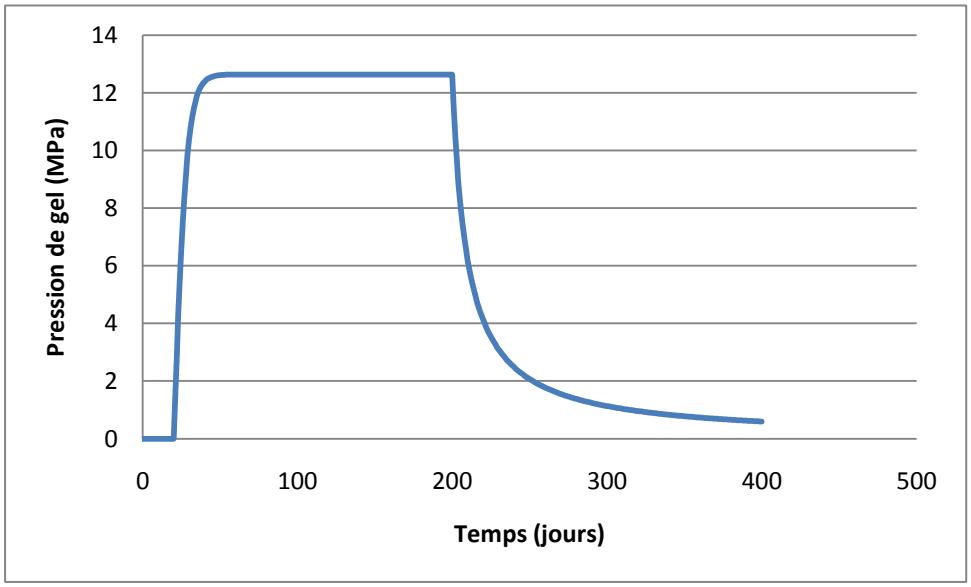


Figura 17. Presión de gel.

En la figura 17, La caída de la presión de gel corresponde a la ruptura del cubo provocando su lógica perdida de presión interna.

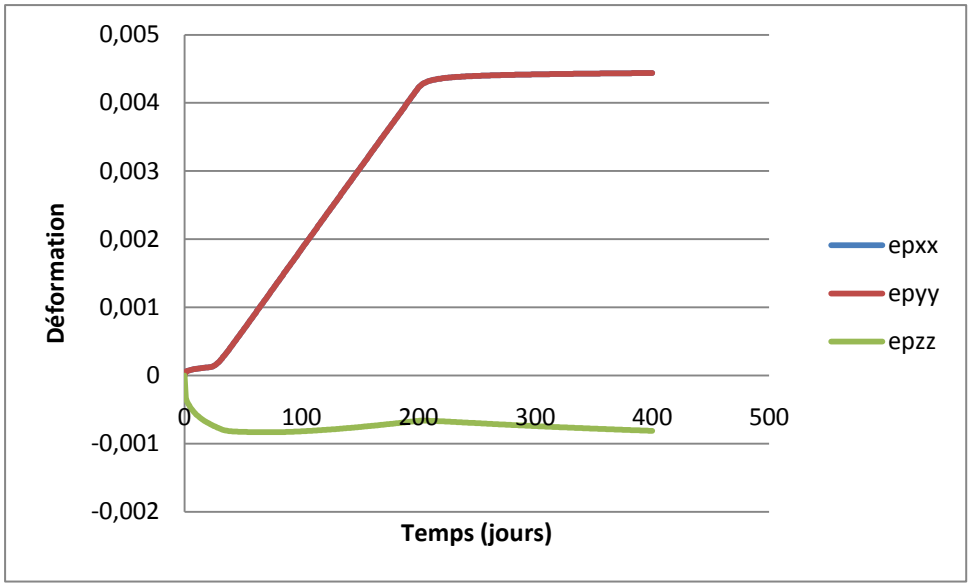


Figura 18. Deformaciones del cubo en expansión libre

Observando la figura 8, las deformaciones según los ejes 'x' e 'y' son las mismas ya que no existe ninguna carga en estas direcciones, la producción del gel no está por lo tanto limitada y la deformación es isótropa. La deformación según el eje 'z', por el contrario, no sigue la misma deformación. En efecto, el modelo toma en cuentas los efectos de la gravedad.

5.3.3. Viga bi-apoyada

Este ensayo consiste en dañar una viga bi-apoyada imponiéndole un desplazamiento en su sección media. No se tomaran en cuenta la AAR puesto que en este ensayo, el objetivo es de testar el modelo de deterioro. La viga será reforzada con dos cables de pretensado.

El mallado considerado, tomando en cuenta las condiciones de simetría, es el siguiente:

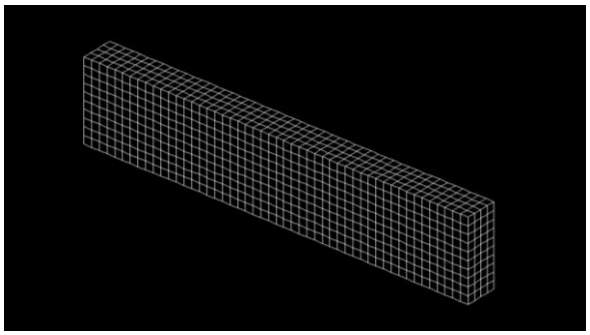


Figura 19. Mallado de la viga

Los problemas de convergencia encontrados con la utilización del modelo de AAR desarrollado, desaparecen con la utilización del segundo desarrollo. Igualmente, la localización del deterioro ha sido solucionada.

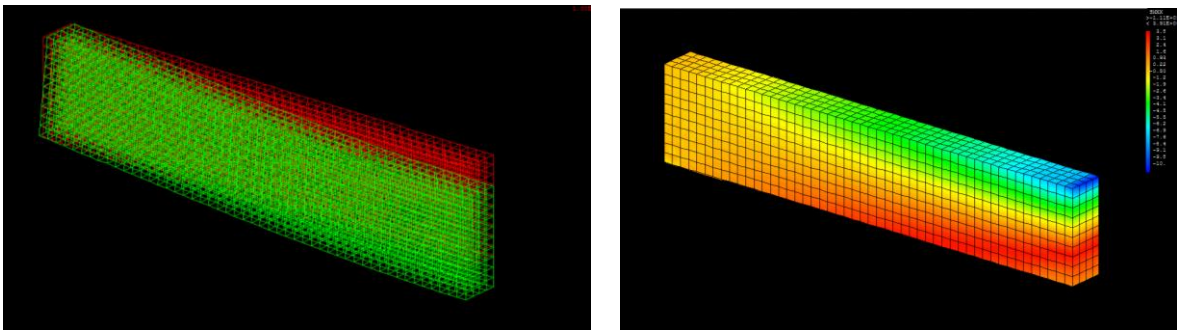


Figura 20. Deformada y esfuerzos axiales

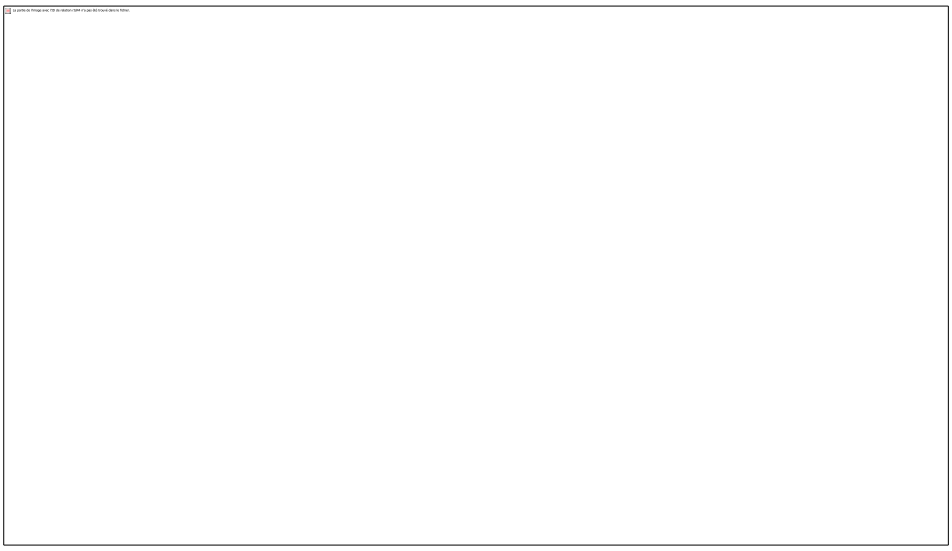


Figura 21. . Deterioro localizado en tracción.

Podemos corroborar que el modelo permite una buena localización de los deterioros encontrando las zonas de mayor deterioro.

Debido a la necesidad de este segundo desarrollo, no se ha podido implementar el modelo evolucionado dentro del tiempo previsto motivo por el cual utilizaremos el modelo original (explicado en E. Grimal, 2007) con el fin de resolver el caso práctico propuesto.

6. Presa de Kariba

6.1. Introducción

En ocasión del último congreso de la CIGP (Comisión Internacional de Grandes Presas) en Brasilia, se realizó una reunión entre el comité técnico del hormigón y el comité técnico en métodos numéricos para presas. En el curso de esta reunión, se hizo especial hincapié sobre las consecuencias de la AAR en el comportamiento de las estructuras hiperestáticas así como la necesidad de evaluar los diferentes métodos y programas existentes que son capaces de calcular la expansión del hormigón.

Con este objetivo, la CIGP propone un taller de cálculo (Tema A, undécimo Benchmark Workshop, Valencia) cuyo problema numérico es muy representativo de aquellos planteados por los ingenieros a cerca de la expansión causada por la AAR. El ejemplo escogido es el de la presa de Kariba, presa en arco construida sobre el rio Zambeze entre Zambia y Zimbabue en los años cincuenta y que ha mostrado signos evidentes de expansión peco después de su construcción.

Gracias a la vigilancia atenta y eficaz llevada a cabo por la Autoridad del rio Zambeze, empresa que explota la presa, así como a la instalación progresiva de nuevos instrumentos de medida, el comportamiento especifico de la estructura puede ser controlado, modelizado e interpretado.

El ejercicio propuesto por el 11th Benchmark Workshop, consiste en determinar e identificar los parámetros de la ley de expansión que nos permite modelizar el comportamiento de la presa y dar el estado de esfuerzos y de desplazamientos tanto verticales como radiales en función del tiempo. Para ello, la organización nos proporciona los daos y las medidas almacenadas por los aparatos de medida en el periodo entre 1963 y 1995. Con estos resultados, el ejercicio nos propone también predecir el comportamiento de la presa hasta 2010.

Figura 22. Presa de Kariba

6.2. Descripción de la presa

La presa de Kariba es una presa en arco de doble curvatura construida en el rio Zambeze entre 1956 y 1959. El volumen de agua retenido (181 km^3) es de los más grandes del mundo.

La siguiente tabla nos muestra sus características principales:

Tabla 3. Características de la presa de Kariba

Altura estructural (H)	128 m
Longitud de la cresta (L)	617 m
Longitud/altura (L/H)	4.8
Anchura de la cresta	13 m
Elevación de la cresta	489.5 m
Volumen total de hormigón	1 millón m^3
Numero de bloques	41
Anchura de los bloques	~ 14.24 m
Volumen de la retención	181 km^3

La temperatura del sitio está evaluada en 27°C desde su construcción sin haberse detectado ningún cambio apreciable posteriormente.
El macizo rocoso, que sirve como cimientos a la presa, es un granito de excelente calidad en el margen izquierdo y sobre el curso del rio. Por el contrario, en el margen derecho, el macizo se compone de mica y juntas de cuarzo liadas a un granito en muy mal estado. A causa de estas pobres condiciones, el terreno ha sido reforzado con inyecciones de hormigón que nos han permitido considerar una rigidez uniforme para todo el macizo.

6.3. Historia de la construcción y de la vida operativa de la presa

La presa fue construida entre los años 1956 y 1959. El proyecto previó una construcción por bloques (41 bloques) independientes de 14 metros de longitud media. Los bloques son separados por juntas de contracción instaladas entre 1959 y 1960. El inicio de explotación de la retención comienza en 1959 y alcanza su nivel máximo en 1963.
En la figura 25 podemos observar la evolución del nivel medio del agua en función de los años.
Sin embargo, considerando que entre 1963 y 1994, las fluctuaciones de la retención son en general débiles a causa de la talla excepcional de la retención, se pueden identificar 3 periodos sucesivos:

1963-1973 : cota media del nivel del agua de 483,80 m.
1974-1981 : cota media del nivel del agua de 486,10 m.
1982-1994 : cota media del nivel del agua de 479,90 m.

A partir de 1995, el nivel de agua es más variable.

6.4. Sistemas de toma de medidas

El sistema de toma de medidas inicial estaba basado en un sistema topográfico emplazado en la cara aguas debajo de la presa junto con un sistema de vibraciones por extensómetros encajados dentro del hormigón de la presa.
Este sistema inicial fue progresivamente completado, con el fin preciso de controlar los movimientos, con 6 líneas de péndulos y un sistema de medida preciso del nivel de cota siguiendo el trazado de las galerías de inspección desde 1989.
Desde su concepción, el sistema de medida de la presa de Kariba ha incorporado un 'test especial'. Este test consiste en un juego de detectores de corrección de vibración longitudinal que nos permite, teóricamente, determinar los esfuerzos corregidos dentro de la presa; con correcciones debidas al efecto térmico, efecto de fluencia u otros. Este dispositivo especial

nos ha permitido demostrar rápidamente que los esfuerzos calculados no corresponden con los desplazamientos obtenidos según la teoría de elasticidad y que por lo tanto tenemos algún fenómeno interviniendo en la presa.

La siguiente figura muestra la localización de los aparatos de medición.

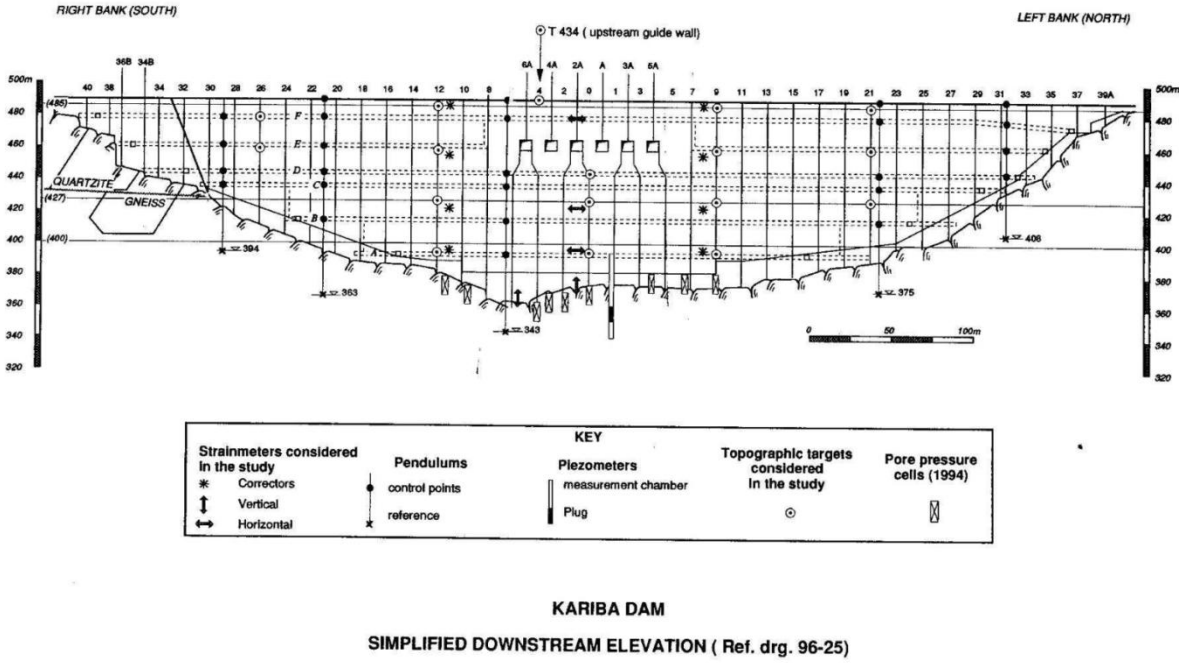


Figura 23. Emplazamiento de los aparataos de medición en la presa de Kariba

6.5. Datos del problema

6.5.1. Mallado

Dos mallados han sido provistos y que difieren en la modelización del contacto presa-cimientos, considerando (mallado2) o no (mallado1) elementos de juntura.

Estos mallados no toman en cuenta la estructura del aliviadero de crecidas puesto que no tiene ninguna influencia en la deformación total de la presa al afectar solamente la reacción de manera local.

Con el fin de leer el mallado en formato ideas.unv (programa utilizado en EDF) hemos tenido que crear un programa en fortran que nos permita convertir el código escrito al lenguaje empleados por ideas.unv y que es explicado en el anejo 12.

Este mallado modeliza la presa en 26 bloques lo que nos limita en la representación real de la construcción de la presa donde se hacía en 41 bloques.

Para la resolución del ejercicio, hemos utilizado el primer mallado, donde no se consideran juntas, con el fin de simplificar el problema.

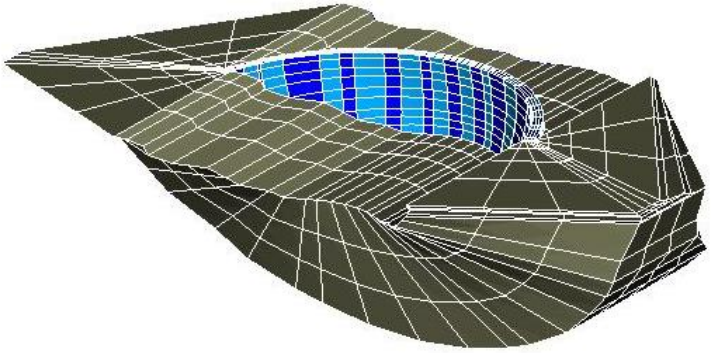


Figura 24. Mallado de Kariba

6.5.2. Propiedades del material

Propiedades mecánicas de la presa:

Tabla 4. Propiedades del hormigón

Modulo Young	22 GPa
Coeficiente de Poisson	0.2
Densidad	2350 kN/m3

Propiedades mecánicas del macizo rocoso

Tabla 5. Propiedades del macizo rocoso

Modulo Young	10 GPa
Coeficiente de Poisson	0.2
Densidad	0 kN/m3

6.5.3. Fechas

La construcción de la presa de Kariba se inicia en 1956 y acaba el 30 de abril de 1959.

La retención empieza en 1959 y alcanza su nivel límite en 1963. El nivel de agua durante los años operativos de la presa es el siguiente:

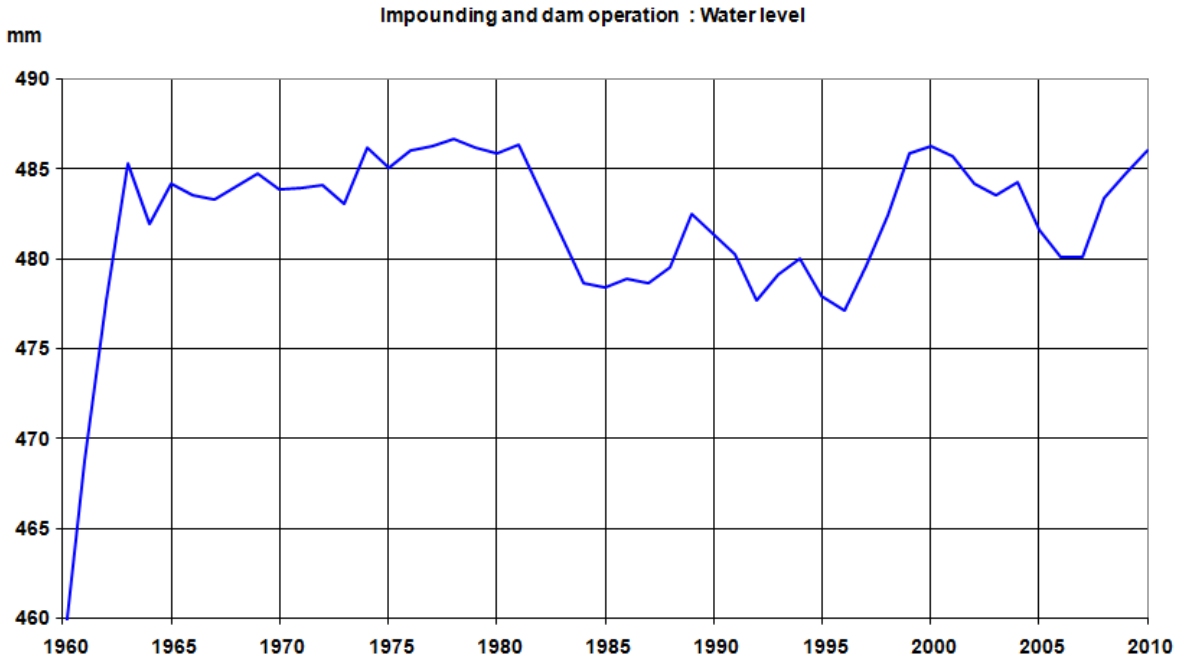


Figura 25. Curva del nivel de agua en el tiempo

La temperatura puede ser considerada constante tanto durante la fase de construcción como durante toda la vida de la presa e igual a 27°C. No se consideraran por lo tanto los efectos térmicos.

6.5.4. Resultados del sistema de toma de medidas

Los resultados almacenados por los aparatos de medición nos permiten identificar los parámetros del modelo con el fin de obtener una buena representación del comportamiento de la presa en expansión. Con estos parámetros calibrados, podremos predecir el comportamiento de probable de la presa afectada por la AAR en los próximos años.

El emplazamiento de los aparatos de medición ha sido especificado en la figura 23.

6.5.4.1. Desplazamientos radiales

Estos desplazamientos son almacenados por el sistema topográfico de medición.

La organización ha puesto a nuestra disposición el desplazamiento radial del punto T434 sobre la cresta de la presa y que corresponde a los nodos 3127 y 3275 de los mallados 1 y 2

respectivamente. Suponemos también que este movimiento no será afectado por los nodos vecinos de la estructura del aliviadero.

La siguiente figura nos muestra las variaciones del desplazamiento radial con el tiempo:

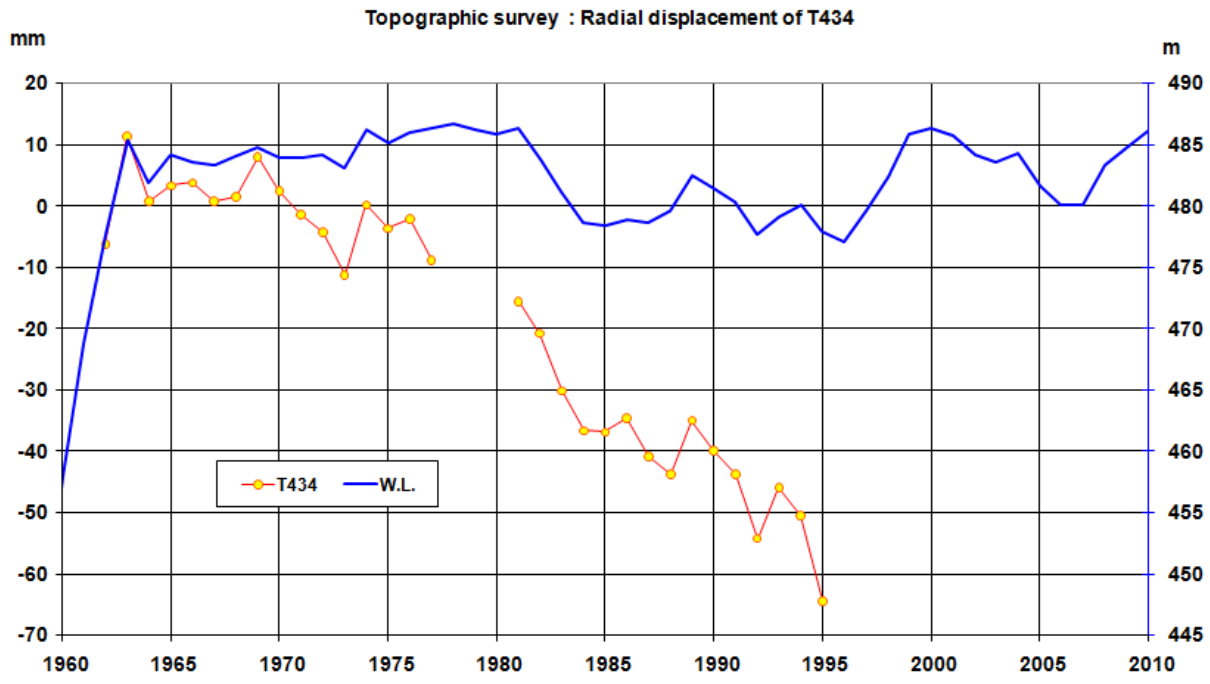


Figura 26. . Desplazamiento radial nodo T434

6.5.4.2. Desplazamiento vertical de la cresta de la presa

La organización nos ha provisto de los resultados correspondientes a ocho puntos situados sobre la cresta de la presa. Podemos observar en la tabla siguiente el nombre de los puntos y sus respectivos nodos según el mallado utilizado:

Tabla 6. Identificación de los nodos para medición del desplazamiento vertical

Nombre	Bloque de la presa	Punto de referencia	Nodo sobre el mallado 1	Nodo sobre el mallado 2
18-20	20	R14	1735	1822
12-14	14	R15	2135	2241
6-8	6	R16	2706	2835
0-2	0	R17	3366	3523
3-5	5	R18	4026	4211
9-11	11	R19	4686	4899
15-17	17	R20	5105	5337
21-23	23	R21	5416	5662M

Los datos almacenados por los aparatos de medida son mostrados seguidamente.

Desplazamientos de los puntos sobre la cresta:

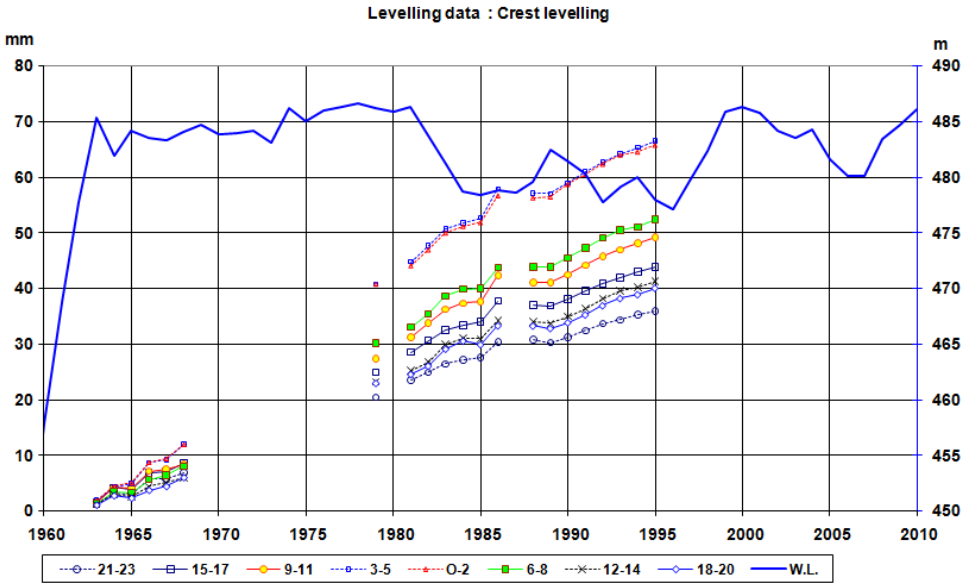


Figura 27. Desplazamientos verticales

Distribución del desplazamiento vertical sobre la cresta

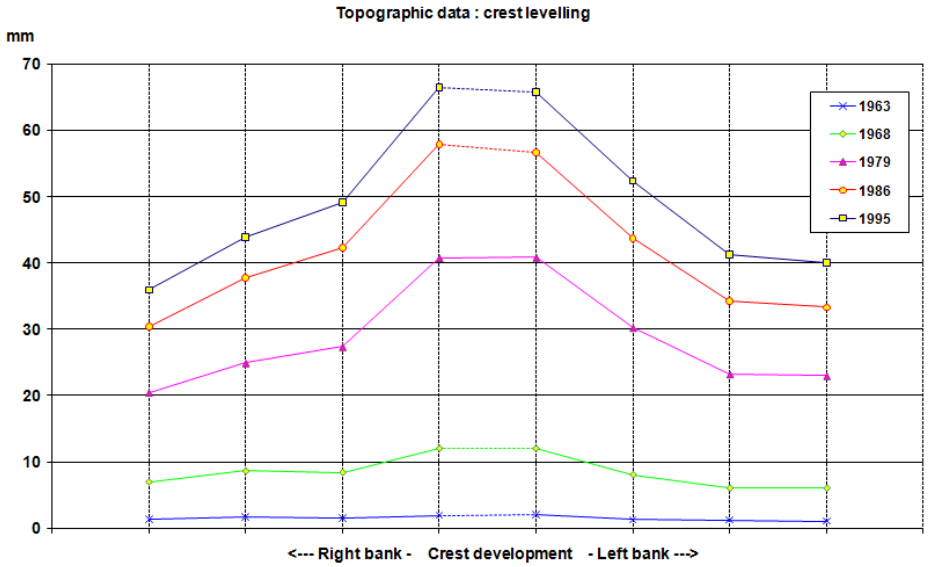


Figura 28. Desplazamiento de la cresta.

6.6. Ejercicio

El ejercicio se divide en tres partes:

6.6.1. Primera parte

En esta primera parte tenemos que estudiar la respuesta de la presa modelizada en condiciones normales, sin considerar los efectos de expansión ni degradación. El objetivo es de detectar las posibles divergencias entre las diferentes soluciones, independientemente de la modelización de la expansión. Esta parte se divide en 4 secciones:

Sección A

Suponiendo una construcción de la presa por bloques, calcular el campo de esfuerzos omitiendo los desplazamientos.

Sección B

Para un nivel de agua de 483,80 m (que corresponde a un nivel medio de agua durante el periodo de tiempo 1963-1973) calcular el campo de desplazamientos y el de esfuerzos.

Sección C

Para un nivel de agua de 486,10 m (que corresponde a un nivel medio de agua durante el periodo de tiempo 1974-1981) calcular el campo de desplazamientos y el de esfuerzos.

Sección D

Para un nivel de agua de 479,9 m (que corresponde a un nivel medio de agua durante el periodo de tiempo 1982-1994) calcular el campo de desplazamientos y el de esfuerzos.

6.6.2. Segunda parte

El objetivo de esta parte es identificar los parámetros y la ley del modelo de expansión con el objetivo de representar el comportamiento de la presa entre 1963 y 1994, periodo durante el cual se dispone de los datos de desplazamientos verticales y radiales.

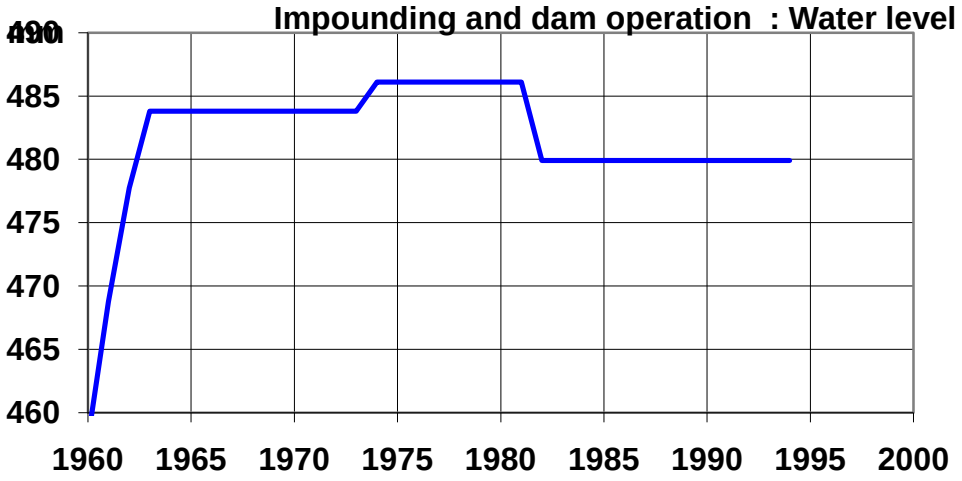


Figura 29. Nivel de agua simplificado

6.6.3. Tercera parte

Con el modelo propuesto y ya calibrado en la segunda parte, prever el comportamiento

6.7. Resolución ejercicio

6.7.1. Introducción

Con el fin de resolver el ejercicio y de poder comparar los resultados obtenidos en cada proposición, un fichero Excel ha sido facilitado para ser completado por los participantes. En este fichero, los valores de los esfuerzos y de los desplazamientos deben ser dados para todos los puntos de esta tabla:

Tabla 7. Identificación de los puntos de medida

Punto	Bloque de la presa	Cota	Nodo sobre el mallado 1	Nodo sobre el mallado 2
R1	20	488	1256	1322
R2	20	480	1267	1333
R3	20	463	1283	1349
R4	20	438	1300	1366
R5	20	418	1316	1382
R6	0	480	2806	2940
R7	0	438	2839	2973
R8	0	418	2855	2989
R9	19	488	5416	5662
R10	19	480	5427	5673

R11	19	463	5443	5689
R12	19	438	5460	5706
R13	19	418	5476	5662
R14	20	489	1735	1822
R15	14	489	2135	2241
R16	6	489	2706	2835
R17	0	489	3366	3523
R18	5	489	4026	4211
R19	11	489	4686	4899
R20	17	489	5105	5337
R21	23	489	5416	5662
R22	4	489	3127	3275

El esfuerzo principal de compresión también será solicitado.

6.7.2. Hipótesis consideradas

Para la resolución del problema, las hipótesis siguientes han sido consideradas

1. Los efectos térmicos son despreciados y una temperatura constante y uniforme iguala 27°C es considerada para todo el cálculo.

2. Los cálculos son llevados a cabo suponiendo un nivel de agua simplificado en una primera aproximación y real para el cálculo final.

3. El mallado 1 es utilizado, sin consideración de juntas en la interfaz hormigón-cimentación.

4. La toma de medidas comienza en 1963, cuando se alcanza el nivel máximo y tras el primer llenado de la retención, en 1959, es por ello que parece lógico suponer que las medidas almacenadas no toman en cuenta la respuesta de la presa frente a esta primera carga.

5. El modelo propuesto considera los efectos de fluencia. Ante la falta de datos para calibrar este fenómeno, los valores de los parámetros encontrados en laboratorio para la presa de Temple sur Lot, presa bajo la supervisión de EDF, serán utilizados.

6. Los fenómenos de retracción por depresión capilar, también considerados en el modelo, no serán tomados en cuenta ya que esta fenómeno actúa durante los primeros años de vida de la presa y suponemos que, a partir de 1963, sus efectos serán mínimos y por ende, despreciables.

7. Los parámetros mecánicos del gel (M_g, b_b) no serán identificados para esta presa pero los valores obtenidos para la presa de Temple sur Lot son retenidos.

8. Para llevar a cabo la calibración del modelo, no tomaremos en cuenta los desplazamientos de los puntos 0-2 y 3-5, sensiblemente superiores a los otros puntos, puesto que la presencia del aliviadero de crecidas, no representado en el mallado, puede explicar estos desplazamientos más grandes. Es por ello que no consideraremos representativos sus desplazamientos en el cálculo numérico.

6.7.3. Primera parte

En esta parte se utilizara el modelo de expansión propuesto, pero considerando los parámetros de expansión nulos con el fin de resolver el problema sin considerar la AAR.

Sección A

En esta primera parte, la estructura es modelizada según una construcción por bloques, lo que corresponde a la construcción real de la presa de Kariba. Sin embargo, en la realidad, la construcción de la presa se hace en 41 bloques independientes mientras que en el mallado solo consideramos 26 bloques.

Para modelizar la construcción por bloques, la presa se divide en dos grupos de mallas principales: bloques pares e impares. Después de haber dado las características mecánicas de los materiales que componen la presa y el macizo rocoso así como las condiciones iniciales, lanzamos un primer cálculo para los bloques pares e impares respectivamente, afectados solamente por la fuerza de la gravedad. Una vez hemos calculado la respuesta para cada grupo de mallas, extraemos el campo de esfuerzos y de variables internas de cada grupo. Seguidamente, lanzaremos un segundo cálculo para toda la presa introduciendo como condiciones iniciales los campos de variables internas y de esfuerzos obtenidos en el primer cálculo. El objetivo es considerar nulos los desplazamientos de la presa antes de la puesta en carga de la misma, pero considerar los esfuerzos originados por el peso propio de la misma así como de la evolución de sus propiedades durante la fase de construcción, lo que corresponde bien a la construcción de la presa.

Tras este cálculo, los campos de esfuerzos son extraídos en los puntos pedidos:

Tabla 8. Campo de esfuerzos tras la construcción

Solution 1A : End of construction

Punto	Localización	Elevación	ESFUERZOS (MPa)		
			Horizontal	Vertical	Mayor Principal
R1	Block 20	488	3,18E-01	-1,02E-03	-3,59E-03
R2	Block 20	480	2,17E-01	-2,14E-01	-2,25E-01
R3	Block 20	463	1,27E-01	-6,54E-01	-6,67E-01
R4	Block 20	438	-2,03E-02	-9,75E-01	-9,72E-01
R5	Block 20	418	4,57E-02	-6,96E-01	-6,40E-01
R6	Block 0	480	1,54E-01	-2,05E-01	-2,08E-01
R7	Block 0	438	2,50E-01	-1,12E+00	-1,12E+00
R8	Block 0	418	1,59E-01	-1,48E+00	-1,49E+00
R9	Block 19	488	2,11E-01	1,47E-04	-1,69E-02
R10	Block 19	480	1,58E-01	-2,14E-01	-2,17E-01
R11	Block 19	463	1,22E-01	-6,45E-01	-6,48E-01
R12	Block 19	438	2,28E-02	-9,80E-01	-9,94E-01
R13	Block 19	418	-5,72E-04	-9,93E-01	-9,92E-01
R14	Crest Block 20	489	2,63E-01	4,69E-04	-3,41E-02
R15	Crest Block 14	489	1,90E-01	2,63E-04	-6,36E-02
R16	Crest Block 6	489	1,33E-01	-2,27E-04	-4,50E-02
R17	Crest Block 0	489	1,36E-01	-2,71E-04	-1,21E-03
R18	Crest Block 5	489	2,04E-01	-1,34E-05	-2,09E-02
R19	Crest Block 11	489	2,99E-01	2,80E-04	-5,45E-02
R20	Crest Block 17	489	3,44E-01	7,29E-04	-4,24E-02
R21	Crest Block 23	489	2,11E-01	1,47E-04	-1,69E-02
R22	Crest Block 4	489	2,76E-01	4,86E-03	4,78E-03

Estos esfuerzos corresponden a los que se pueden encontrar normalmente en una presa de estas características tras su construcción.

Sección B

En esta sección, y en las siguientes secciones de la primera parte, el cálculo consiste en seguir el modelo utilizado para la sección A (hacer un *POURSUITE* en Code Aster) imponiendo para un instante de tiempo posterior a su construcción una determinada presión de agua. Después calcularemos la respuesta de la presa. Recuerdo que en esta primera parte, el objetivo es detectar las posibles divergencias entre modelos antes de la aplicación de la AAR. Por ello, se ha considerado todos los parámetros de expansión nulos así como los debidos a los otros fenómenos de degradación del hormigón utilizados en el modelo (fluencia y retracción endógena) ya que son particulares del modelo presentado. El cálculo será por ello similar al

obtenido utilizando un modelo elástico pero siguiendo una formulación de segundo grado en lugar de lineal.

En esta sección, el nivel de agua será de 483,80 metro, lo que corresponde al nivel medio del nivel de la retención entre 1934 y 1973.

Tablea 9. Campo de desplazamientos para el cálculo sin AAR y 483,8 m de cota de agua

Solution 1C : RWL = 483,8

Punto	Localización	Elevación	ESFUERZOS (MPa)			DESPLAZAMIENTOS (m)		
			Horizontal	Vertical	Mayor Principal	Radial	Vertical	Tangencial
R1	Block	20	-1,37E+00	-4,89E-03	-2,35E+00	2,32E-02	-4,00E-03	1,53E-02
R2	Block	20	-1,39E+00	-1,59E-01	-2,25E+00	2,25E-02	-4,08E-03	1,45E-02
R3	Block	20	-1,18E+00	-4,11E-01	-2,19E+00	2,06E-02	-3,98E-03	1,30E-02
R4	Block	20	-9,00E-01	-6,95E-01	-2,18E+00	1,63E-02	-2,35E-03	1,13E-02
R5	Block	20	-5,02E-01	-8,20E-01	-1,96E+00	1,04E-02	5,59E-04	1,00E-02
R6	Block	0	-3,14E+00	-1,06E-01	-3,24E+00	7,78E-02	-5,35E-03	9,44E-03
R7	Block	0	-2,81E+00	-3,46E-01	-3,03E+00	6,39E-02	-5,55E-03	6,58E-03
R8	Block	0	-2,17E+00	-6,63E-01	-2,56E+00	5,05E-02	-4,35E-03	5,23E-03
R9	Block	19	-1,26E+00	-5,42E-03	-2,22E+00	3,08E-02	8,98E-03	-1,57E-02
R10	Block	19	-1,33E+00	-1,61E-01	-2,18E+00	2,98E-02	8,92E-03	-1,49E-02
R11	Block	19	-1,16E+00	-4,30E-01	-2,17E+00	2,73E-02	8,51E-03	-1,31E-02
R12	Block	19	-8,88E-01	-7,02E-01	-2,19E+00	2,22E-02	6,41E-03	-1,14E-02
R13	Block	19	-6,69E-01	-8,41E-01	-2,23E+00	1,51E-02	2,67E-03	-9,98E-03
R14	Crest	Block	-1,98E+00	-6,45E-03	-2,78E+00	3,96E-02	-6,88E-03	1,67E-02
R15	Crest	Block	-2,61E+00	-9,13E-03	-3,07E+00	6,04E-02	-8,18E-03	1,55E-02
R16	Crest	Block	-3,05E+00	-1,10E-02	-3,23E+00	7,59E-02	-6,02E-03	1,79E-02
R17	Crest	Block	-3,34E+00	-1,32E-02	-3,35E+00	8,72E-02	-1,72E-04	3,97E-03
R18	Crest	Block	-3,25E+00	-1,27E-02	-3,33E+00	8,53E-02	7,45E-03	-4,68E-03
R19	Crest	Block	-2,80E+00	-1,07E-02	-3,16E+00	7,20E-02	1,23E-02	-1,15E-02
R20	Crest	Block	-2,02E+00	-7,90E-03	-2,79E+00	5,04E-02	1,26E-02	-1,54E-02
R21	Crest	Block	-1,26E+00	-5,42E-03	-2,22E+00	3,08E-02	8,98E-03	-1,57E-02
R22	Crest	Block	-2,77E+00	-3,46E-02	-2,78E+00	8,56E-02	-1,30E-03	6,85E-03

Sección C

La cota de agua es de 486,10 m, lo que corresponde al nivel de agua medio entre 1974-1981.

El campo de esfuerzos y de deformaciones obtenidos en estas condiciones para los puntos solicitados, son recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 10 Campo de desplazamientos para el cálculo sin AAR y 481,6 m de cota de agua

Solution 1C : RWL = 486,10

Punto	Localización	Elevación	ESFUERZOS (MPa)			DESPLAZAMIENTOS (m)		
			Horizontal	Vertical	Mayor Principal	Radial	Vertical	Tangencial
R1	Block 20	488	-1,38E+00	-3,39E-03	-2,36E+00	2,49E-02	2,32E-03	3,52E-02
R2	Block 20	480	-1,40E+00	-1,59E-01	-2,25E+00	2,35E-02	2,31E-03	3,35E-02
R3	Block 20	463	-1,16E+00	-4,50E-01	-2,20E+00	2,04E-02	1,87E-03	2,89E-02
R4	Block 20	438	-8,44E-01	-7,82E-01	-2,27E+00	1,65E-02	2,06E-04	2,05E-02
R5	Block 20	418	-4,62E-01	-1,05E+00	-2,34E+00	1,27E-02	-2,20E-03	1,08E-02
R6	Block 0	480	-3,35E+00	-1,00E-01	-3,46E+00	1,28E-01	9,09E-03	3,52E-02
R7	Block 0	438	-2,90E+00	-3,82E-01	-3,14E+00	1,01E-01	9,65E-03	2,96E-02
R8	Block 0	418	-2,21E+00	-7,28E-01	-2,66E+00	7,64E-02	8,27E-03	2,25E-02
R9	Block 19	488	-1,28E+00	-3,50E-03	-2,27E+00	2,63E-02	5,44E-03	-4,73E-02
R10	Block 19	480	-1,35E+00	-1,61E-01	-2,22E+00	2,48E-02	5,45E-03	-4,52E-02
R11	Block 19	463	-1,16E+00	-4,58E-01	-2,21E+00	2,14E-02	4,97E-03	-3,98E-02
R12	Block 19	438	-8,61E-01	-7,71E-01	-2,27E+00	1,74E-02	2,93E-03	-3,01E-02
R13	Block 19	418	-6,21E-01	-9,82E-01	-2,43E+00	1,37E-02	-7,37E-04	-1,78E-02
R14	Crest Block 20	489	-2,09E+00	-4,20E-03	-2,91E+00	4,99E-02	5,22E-03	4,84E-02
R15	Crest Block 14	489	-2,80E+00	-6,59E-03	-3,29E+00	8,93E-02	7,59E-03	5,34E-02
R16	Crest Block 6	489	-3,28E+00	-8,29E-03	-3,47E+00	1,22E-01	8,57E-03	5,13E-02
R17	Crest Block 0	489	-3,57E+00	-1,02E-02	-3,59E+00	1,49E-01	8,94E-03	8,03E-03
R18	Crest Block 5	489	-3,49E+00	-9,66E-03	-3,57E+00	1,42E-01	9,52E-03	-3,37E-02
R19	Crest Block 11	489	-3,01E+00	-7,92E-03	-3,39E+00	1,07E-01	9,89E-03	-6,01E-02
R20	Crest Block 17	489	-2,16E+00	-5,83E-03	-2,97E+00	5,93E-02	8,63E-03	-6,27E-02
R21	Crest Block 23	489	-1,28E+00	-3,50E-03	-2,27E+00	2,63E-02	5,44E-03	-4,73E-02
R22	Crest Block 4	489	-2,98E+00	-3,33E-02	-2,98E+00	1,45E-01	6,72E-03	1,70E-02

Sección D

La cota de agua es de 479,90 m, lo que corresponde al nivel de agua medio entre 1982-1994.

El campo de esfuerzos y de deformaciones obtenidos en estas condiciones para los puntos solicitados, son recogidos en la siguiente tabla:

Tableau11 Campo de desplazamientos para el cálculo sin AAR y 479,9 m de cota de agua

Solution 1D : RWL = 479,90

Punto	Localización	Elevación	ESFUERZOS (MPa)			DESPLAZAMIENTOS (m)		
			Horizontal	Vertical	Mayor Principal	Radial	Vertical	Tangencial
R1	Block 20	488	-9,82E-01	-3,42E-03	-1,71E+00	2,79E-02	1,93E-03	1,81E-02
R2	Block 20	480	-1,02E+00	-1,71E-01	-1,66E+00	2,72E-02	1,84E-03	1,71E-02
R3	Block 20	463	-8,95E-01	-4,51E-01	-1,71E+00	2,49E-02	1,45E-03	1,48E-02
R4	Block 20	438	-7,13E-01	-7,36E-01	-1,85E+00	1,89E-02	1,61E-04	1,22E-02
R5	Block 20	418	-4,22E-01	-9,28E-01	-1,98E+00	1,06E-02	-1,82E-03	9,75E-03
R6	Block 0	480	-2,50E+00	-1,22E-01	-2,59E+00	1,18E-01	8,87E-03	1,35E-02
R7	Block 0	438	-2,37E+00	-4,10E-01	-2,58E+00	9,57E-02	8,79E-03	8,82E-03
R8	Block 0	418	-1,88E+00	-7,52E-01	-2,28E+00	7,34E-02	7,36E-03	6,59E-03
R9	Block 19	488	-9,28E-01	-3,25E-03	-1,67E+00	3,85E-02	4,62E-03	-1,89E-02
R10	Block 19	480	-1,00E+00	-1,72E-01	-1,65E+00	3,75E-02	4,55E-03	-1,78E-02
R11	Block 19	463	-8,90E-01	-4,53E-01	-1,72E+00	3,44E-02	4,13E-03	-1,51E-02
R12	Block 19	438	-7,08E-01	-7,25E-01	-1,85E+00	2,73E-02	2,51E-03	-1,25E-02
R13	Block 19	418	-5,49E-01	-8,98E-01	-2,02E+00	1,69E-02	-5,93E-04	-1,02E-02
R14	Crest Block 20	489	-1,51E+00	-3,87E-03	-2,15E+00	5,32E-02	4,93E-03	2,18E-02
R15	Crest Block 14	489	-2,03E+00	-5,96E-03	-2,43E+00	8,76E-02	7,45E-03	2,15E-02
R16	Crest Block 6	489	-2,40E+00	-7,39E-03	-2,56E+00	1,14E-01	8,52E-03	2,61E-02
R17	Crest Block 0	489	-2,63E+00	-9,10E-03	-2,64E+00	1,33E-01	8,93E-03	5,67E-03
R18	Crest Block 5	489	-2,56E+00	-8,66E-03	-2,62E+00	1,30E-01	9,43E-03	-6,97E-03
R19	Crest Block 11	489	-2,17E+00	-7,22E-03	-2,48E+00	1,06E-01	9,60E-03	-1,63E-02
R20	Crest Block 17	489	-1,54E+00	-5,33E-03	-2,18E+00	6,98E-02	8,02E-03	-2,04E-02
R21	Crest Block 23	489	-9,28E-01	-3,25E-03	-1,67E+00	3,85E-02	4,62E-03	-1,89E-02
R22	Crest Block 4	489	-2,09E+00	-2,59E-02	-2,09E+00	1,31E-01	7,18E-03	1,01E-02

Mirando los resultados obtenidos en las tablas de estas tres últimas secciones. Podemos ver que los resultados corresponden bien a aquellos que podemos esperar al cargar una presa con una presión de agua. Los esfuerzos originados son mayores cuando el nivel de agua es más grande. También podemos ver que el desplazamiento radial es positivo (hacia aguas abajo) lo que tiene sentido al aplicar una presión hidrostática sobre una presa.

6.7.4. Segunda parte

En esta parte, los parámetros del modelo de expansión son identificados sobre el periodo 1959-1964. El objetivo es representar de la mejor manera posible el comportamiento de la presa, el cual conocemos a través de los datos de desplazamientos radial y vertical provistos por la organización. Es por ello que los datos del modelo deberán ser calibrados con el fin de que el modelo verifique estos desplazamientos.

Para los desplazamientos verticales, una vez descartados los desplazamientos de los bloques 0-2 y 3-5, se buscara calibrar el modelo para el bloque 6-8, desplazamiento máximo, y luego verificar el resultado sobre los otros bloques.

A fin de realizar este calibrado de los parámetros del modelo. Hemos desarrollado un fichero Excel que recoge toda la formulación de la teoría de expansión debida a la AAR utilizada en el modelo y que nos permite obtener el valor de la expansión para ciertos valores de los parámetros. De este modo, obtenemos una primera curva de expansión sin considerar la deformación causada por la carga de agua o la fluencia.

Podemos calcular la influencia de la presión del agua lanzando el modelo sin considerar la reacción AAR pero tomando en cuenta la presión provocada por el nivel del agua proporcionado por la organización entre 1959 y 1994 y la fluencia en este periodo de tiempo. De esta manera, añadiendo estos desplazamientos a aquellos obtenidos por el fichero Excel, podemos optimizar el tiempo de identificación de los parámetros dando unos buenos valores iniciales de los mismos para lanzar el primer cálculo del modelo en Code-Aster. Sin embargo, la no consideración de los efectos proporcionados por los esfuerzos y la anisotropía que ellos causan en la evolución de la reacción, nos obligará a iterar en el programa en elementos finitos a fin de encontrar los buenos valores.

Como ya se ha explicado en la parte de las hipótesis, los parámetros a calibrar serán únicamente el coeficiente cinético de la reacción, la porosidad conectada y el volumen de gel. Esto es debido a que no se disponen de los datos suficientes para identificar los parámetros de fluencia de una manera coherente científicamente.

Con el objetivo de encontrar el valor de estos parámetros, se ha considerado oportuno explicar la influencia de estos en la evolución de la AAR y facilitar la identificación de los valores de los parámetros.

Así, la influencia de alpha (coeficiente cinético de la reacción) y V_g (Volumen de gel) es mostrada seguidamente:

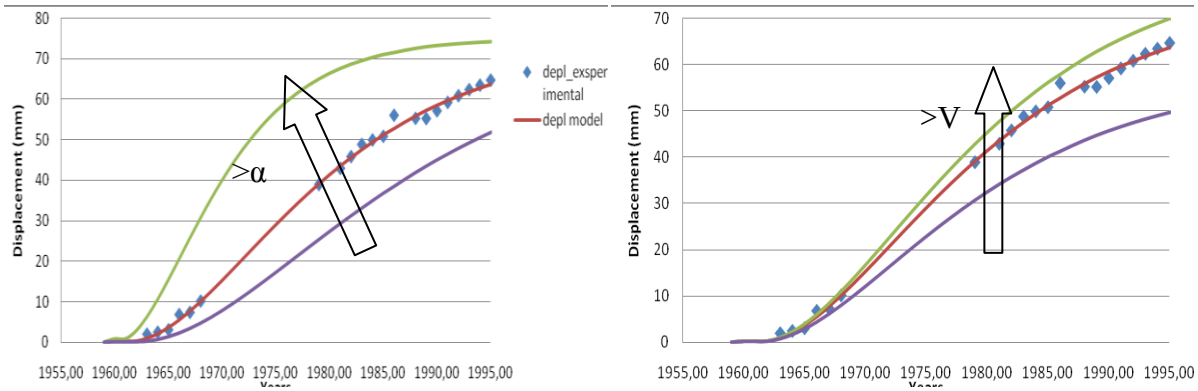


Figura 30. Influencia de alpha y de V_g

Co los valores de los parámetros retenidos, obtenemos la siguiente curva de desplazamiento para el bloque 6-8:

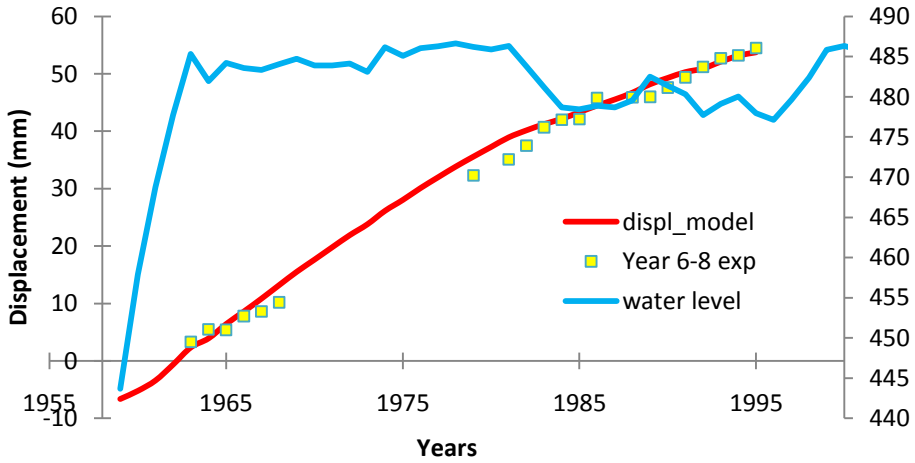


Figura 31. Desplazamiento vertical del bloque 6-8 entre 1963 y 1994

Como podemos ver, el modelo nos permite realizar una buena representación de la realidad. Alrededor de 1985, encontramos un aumento en los desplazamientos verticales medidos experimentalmente, mientras que en el cálculo en elementos finitos, se puede observar un ligero descenso. Si miramos el nivel de agua en ese periodo, podemos ver un descenso brusco del nivel de la retención lo que debería provocar una disminución lógica de los desplazamientos verticales medidos (los puntos de medida están emplazados en la cara aguas arriba de la presa).

Este fenómeno puede ser explicado de varias maneras. Por un lado O. Ozanam (Florencia, 1997) lo explica como la influencia de los esfuerzos de compresión sobre el avance de la reacción la cual puede ser desacelerada e incluso invertida si consideramos en cuenta la teoría

de cierre de fisuras. Una reducción de los esfuerzos de compresión a causa de, por ejemplo, una disminución del nivel del agua, puede favorecer el avance de la reacción y por lo tanto aumentar los desplazamientos verticales, tal y como ocurre en este caso.

Esta divergencia entre los resultados puede también ser provocada como consecuencia de cambios de temperatura en la presa. Los efectos térmicos, despreciados en las hipótesis por petición de la organización, pueden jugar un rol importante en los desplazamientos de la presa. Así pues, una disminución del nivel del mete en exposición al sol una porción más grande de la presa y las diferencias de temperatura entre la parte sumergida y la parte expuesta al sol, pueden provocar incrementos en el desplazamiento vertical

Co los valores de los parámetros retenidos, el desplazamiento radial obtenido es:

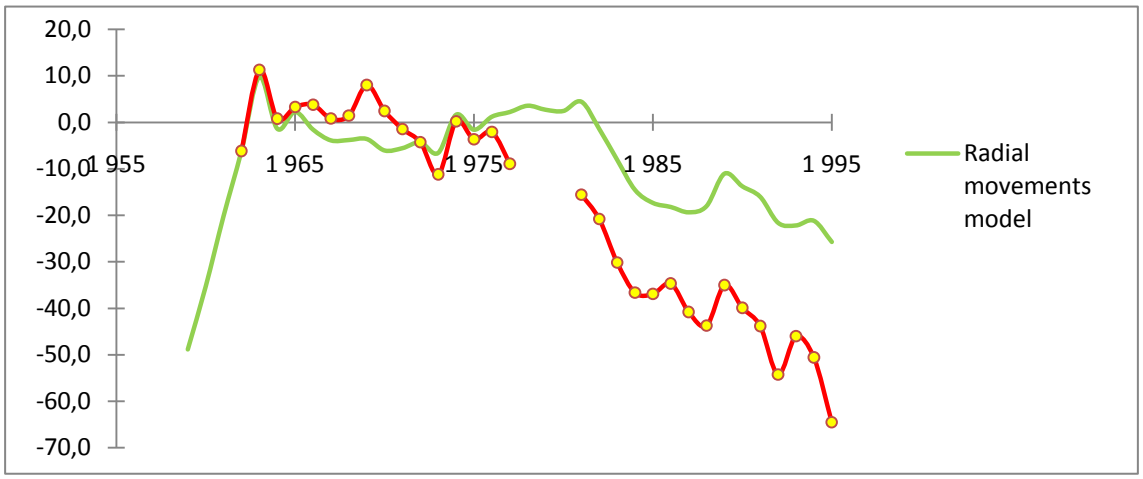


Figura 32. Desplazamiento radial del punto de la cresta T434.

Podemos observar que el desplazamiento obtenido por medio del modelo de cálculo no llega a representar de manera precisa el desplazamiento radial. Si bien la forma de la curva es respetada, las diferencias son bastante sustanciales como para ser despreciadas. La curva en este caso tiende hacia los valores negativos (aguas arriba, en la representación grafica) como bien corresponde a una deformación de la AAR. Sin embargo en nuestro calculo, parece que la expansión provocada por el gel no es suficiente como para respectar el desplazamiento radial. Si calibramos los parámetros del modelo con respecto a los bloques 0-2 o 3-5 (desplazamientos inicialmente despreciados por no ser representativos), como el desplazamiento vertical es mayor, se necesitara mas gel (ver figura 30). El resultado en el desplazamiento radial es el siguiente:

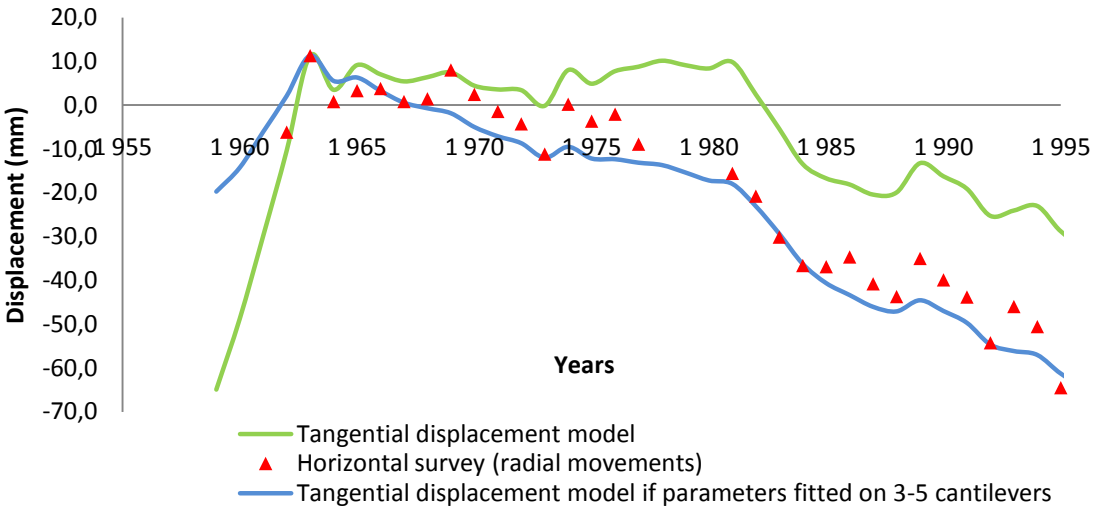


Figura 33. Desplazamiento radial del punto de la cresta T434 calibrado para el bloque 3-5.

Podemos observar que, en este caso, el desplazamiento radial es respetado. Sin embargo, al observar los resultados en el desplazamiento vertical, podemos ver que el desplazamiento es excesivamente sobredimensionado y que, si bien la forma de la curva se respeta, retener este calibrado no nos permite encontrar la solución tal y como nos gustaría.

La divergencia entre el desplazamiento radial medido experimentalmente y aquel encontrado en la resolución del modelo se puede explicar también por medio de la fluencia. Como se ha explicado en el apartado de las hipótesis, para los parámetros de fluencia se han considerado los valores encontrados para la presa de Temple-sur-Lot, explotada por EDF, ya que no se disponen de datos suficientes en el enunciado como para identificarlos de manera precisa. Sin embargo, los desplazamientos debido a la fluencia también pueden intervenir de manera determinante en la resolución del modelo. Es por ello que se ha calibrado el modelo también sobre los parámetros de fluencia con el objetivo de respectar tanto el desplazamiento radial como tangencial. En este caso se tendrán que disminuir los valores de la fluencia con el fin de permitir que el efecto del gel sea más efectivo que la presión del agua. En este caso, la deformación encontrada ha sido:

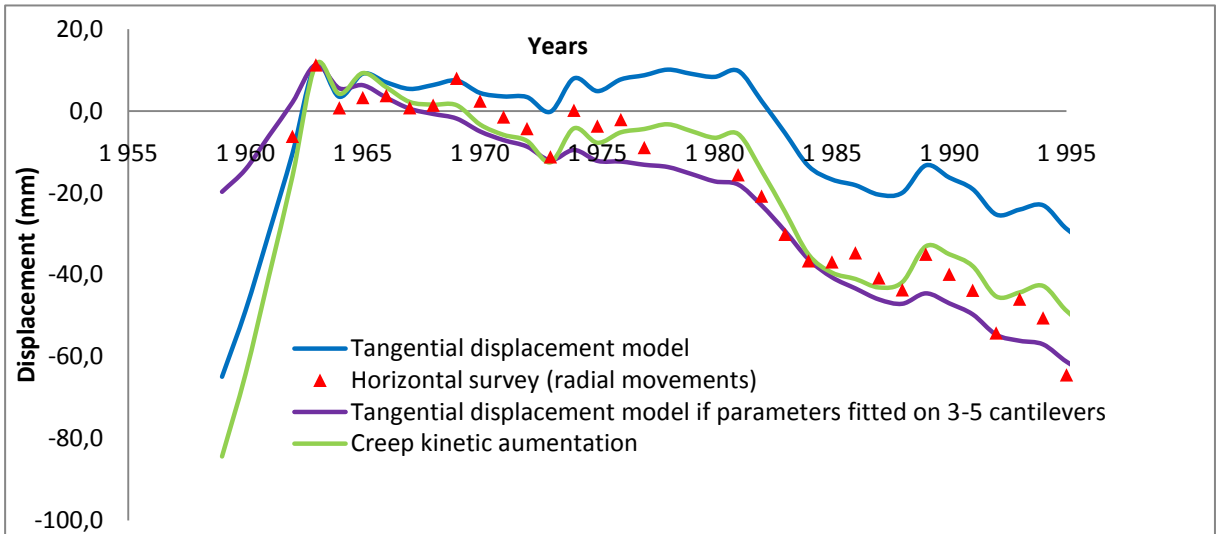


Figura 34. Desplazamiento radial del punto de la cresta T434 considerando fluencia.

Se puede ver que es cuando se consideran los parámetros de fluencia (curva verde) donde encontramos la mejor representación de la realidad. Los desplazamientos verticales, en este caso también son respectados. Es por ello que podríamos retener estos valores de fluencia. Sin embargo, dentro de la tesis doctoral de E. Grimal (2007) no he encontrado los márgenes usuales dentro de los cuales deben permanecer los valores de fluencia del hormigón. Es por ello que pese a que este resultado es el más preciso, no va a ser retenido hasta que se pueda verificar la adecuación de los valores a un hormigón normal y voy por ello a retener los valores encontrados en laboratorio para Temple sur Lot. Sería interesante, en vista de resolver el ejercicio correctamente, disponer de muestras de la presa de Kariba a fin de poder extraer el valor de su fluencia en laboratorio y poder comprarla con el obtenido en el calibrado del modelo.

Se han extraído los valores de los campos de esfuerzos y de desplazamientos para los nodos y para los instantes de tiempo requeridos según el calibrado para el bloque 6-8 en las siguientes tablas:

Tabla 12. Campo de esfuerzos y de desplazamientos el 30 de Julio de 1973

Solution 2A : RWL = 483,80 - 30 July 1973

Punto	Localización	Elevación	ESFUERZOS (MPa)			DESPLAZAMIENTOS (m)		
			Horizontal	Vertical	Mayor Principal	Radial	Vertical	Tangencial
R1	Block 20	488	-1,25E+00	-2,64E-03	-1,95E+00	-3,22E-03	1,90E-02	2,07E-02
R2	Block 20	480	-1,33E+00	-1,66E-01	-2,15E+00	7,40E-04	1,65E-02	1,95E-02
R3	Block 20	463	-1,60E+00	-4,40E-01	-2,66E+00	9,02E-03	1,17E-02	1,64E-02
R4	Block 20	438	-1,67E+00	-6,85E-01	-3,02E+00	1,26E-02	6,89E-03	1,32E-02
R5	Block 20	418	-1,61E+00	-8,12E-01	-2,82E+00	1,01E-02	1,76E-03	1,06E-02
R6	Block 0	480	-2,28E+00	-1,58E-01	-2,36E+00	7,34E-02	3,06E-02	1,30E-02
R7	Block 0	438	-3,29E+00	-6,15E-01	-3,48E+00	6,90E-02	1,92E-02	8,03E-03
R8	Block 0	418	-3,20E+00	-1,01E+00	-3,48E+00	5,52E-02	1,37E-02	5,72E-03
R9	Block 19	488	-1,12E+00	-6,01E-03	-1,79E+00	2,80E-03	2,17E-02	-2,10E-02
R10	Block 19	480	-1,23E+00	-1,59E-01	-2,01E+00	6,57E-03	1,92E-02	-1,97E-02
R11	Block 19	463	-1,51E+00	-4,58E-01	-2,53E+00	1,43E-02	1,45E-02	-1,66E-02
R12	Block 19	438	-1,55E+00	-7,54E-01	-2,92E+00	1,72E-02	9,68E-03	-1,32E-02
R13	Block 19	418	-1,45E+00	-8,43E-01	-2,91E+00	1,44E-02	4,34E-03	-1,05E-02
R14	Crest Block 20	489	-1,51E+00	-4,62E-03	-2,01E+00	1,68E-02	2,51E-02	2,33E-02
R15	Crest Block 14	489	-1,81E+00	-1,55E-02	-2,09E+00	4,52E-02	3,03E-02	2,17E-02
R16	Crest Block 6	489	-2,00E+00	-1,88E-02	-2,10E+00	6,75E-02	3,28E-02	2,16E-02
R17	Crest Block 0	489	-2,10E+00	-5,55E-03	-2,10E+00	8,38E-02	3,38E-02	5,18E-03
R18	Crest Block 5	489	-2,06E+00	-8,65E-03	-2,10E+00	8,03E-02	3,40E-02	-7,39E-03
R19	Crest Block 11	489	-1,87E+00	-1,45E-02	-2,06E+00	5,95E-02	3,29E-02	-1,70E-02
R20	Crest Block 17	489	-1,50E+00	-1,30E-02	-1,90E+00	2,78E-02	2,86E-02	-2,17E-02
R21	Crest Block 23	489	-1,12E+00	-6,01E-03	-1,79E+00	2,80E-03	2,17E-02	-2,10E-02
R22	Crest Block 4	489	-1,63E+00	-2,27E-02	-1,64E+00	8,26E-02	3,38E-02	9,33E-03

Tableau13 Campo de esfuerzos y de desplazamientos el 30 de Mayo de 1981

Solution 2B : RWL = 486,10 - 30 May 1981

Punto	Localización	Elevación	ESFUERZOS (MPa)			DESPLAZAMIENTOS (m)		
			Horizontal	Vertical	Mayor Principal	Radial	Vertical	Tangencial
R1	Block 20	488	-1,38E+00	-1,35E-02	-2,20E+00	-1,25E-02	3,01E-02	2,54E-02
R2	Block 20	480	-1,52E+00	-1,25E-01	-2,47E+00	-6,63E-03	2,61E-02	2,38E-02
R3	Block 20	463	-1,91E+00	-4,74E-01	-3,15E+00	5,96E-03	1,83E-02	1,97E-02
R4	Block 20	438	-2,04E+00	-7,36E-01	-3,61E+00	1,30E-02	1,08E-02	1,51E-02
R5	Block 20	418	-2,00E+00	-8,88E-01	-3,38E+00	1,17E-02	3,40E-03	1,16E-02
R6	Block 0	480	-2,52E+00	-1,30E-01	-2,61E+00	8,08E-02	4,43E-02	1,57E-02
R7	Block 0	438	-3,76E+00	-7,11E-01	-3,96E+00	7,58E-02	2,67E-02	9,34E-03
R8	Block 0	418	-3,74E+00	-1,10E+00	-4,04E+00	6,04E-02	1,86E-02	6,37E-03
R9	Block 19	488	-1,27E+00	-1,69E-03	-2,01E+00	-7,01E-03	3,32E-02	-2,55E-02
R10	Block 19	480	-1,39E+00	-1,26E-01	-2,28E+00	-1,34E-03	2,92E-02	-2,38E-02
R11	Block 19	463	-1,77E+00	-4,87E-01	-2,96E+00	1,05E-02	2,15E-02	-1,98E-02
R12	Block 19	438	-1,94E+00	-8,64E-01	-3,49E+00	1,68E-02	1,41E-02	-1,52E-02
R13	Block 19	418	-1,83E+00	-1,07E+00	-3,56E+00	1,60E-02	6,90E-03	-1,15E-02
R14	Crest Block 20	489	-1,67E+00	-1,55E-02	-2,22E+00	1,20E-02	3,82E-02	2,85E-02
R15	Crest Block 14	489	-2,02E+00	-1,82E-02	-2,32E+00	4,68E-02	4,48E-02	2,65E-02

R16	Crest Block 6	489	-2,22E+00	-2,04E-03	-2,33E+00	7,39E-02	4,79E-02	2,54E-02
R17	Crest Block 0	489	-2,32E+00	1,14E-02	-2,33E+00	9,35E-02	4,91E-02	6,03E-03
R18	Crest Block 5	489	-2,29E+00	-6,14E-03	-2,32E+00	8,91E-02	4,93E-02	-9,46E-03
R19	Crest Block 11	489	-2,10E+00	2,87E-03	-2,30E+00	6,32E-02	4,78E-02	-2,12E-02
R20	Crest Block 17	489	-1,66E+00	2,63E-02	-2,12E+00	2,36E-02	4,23E-02	-2,69E-02
R21	Crest Block 23	489	-1,27E+00	-1,69E-03	-2,01E+00	-7,01E-03	3,32E-02	-2,55E-02
R22	Crest Block 4	489	-1,82E+00	-1,61E-02	-1,83E+00	9,25E-02	4,91E-02	1,11E-02

Tableau14. Campo de esfuerzos y de desplazamientos el 30 de Mayo de 1994

Solution 2C : RWL = 479,90 - 30 May 1994

Punto	Localización	Elevación	ESFUERZOS (MPa)			DESPLAZAMIENTOS (m)		
			Horizontal	Vertical	Mayor Principal	Radial	Vertical	Tangencial
R1	Block 20	488	-1,12E+00	-1,87E-03	-1,75E+00	-4,95E-02	3,99E-02	4,95E-02
R2	Block 20	480	-1,20E+00	-2,09E-01	-1,95E+00	-3,86E-02	3,43E-02	3,86E-02
R3	Block 20	463	-1,71E+00	-4,97E-01	-2,75E+00	-1,39E-02	2,39E-02	1,39E-02
R4	Block 20	438	-2,13E+00	-7,03E-01	-3,64E+00	5,40E-03	1,51E-02	-5,40E-03
R5	Block 20	418	-2,09E+00	-7,78E-01	-3,60E+00	1,08E-02	6,35E-03	-1,08E-02
R6	Block 0	480	-1,83E+00	-1,53E-01	-1,87E+00	4,91E-02	5,71E-02	-4,91E-02
R7	Block 0	438	-3,31E+00	-6,91E-01	-3,47E+00	5,93E-02	3,28E-02	-5,93E-02
R8	Block 0	418	-3,71E+00	-1,11E+00	-3,94E+00	5,11E-02	2,25E-02	-5,11E-02
R9	Block 19	488	-1,03E+00	-1,94E-02	-1,67E+00	-4,92E-02	4,24E-02	4,92E-02
R10	Block 19	480	-1,09E+00	-1,82E-01	-1,77E+00	-3,83E-02	3,69E-02	3,83E-02
R11	Block 19	463	-1,50E+00	-4,99E-01	-2,48E+00	-1,39E-02	2,67E-02	1,39E-02
R12	Block 19	438	-1,94E+00	-8,64E-01	-3,49E+00	5,54E-03	1,82E-02	-5,54E-03
R13	Block 19	418	-2,08E+00	-1,11E+00	-3,77E+00	1,35E-02	1,03E-02	-1,35E-02
R14	Crest Block 20	489	-1,22E+00	-1,36E-03	-1,70E+00	-2,70E-02	5,00E-02	2,70E-02
R15	Crest Block 14	489	-1,42E+00	4,84E-03	-1,70E+00	9,43E-03	5,82E-02	-9,43E-03
R16	Crest Block 6	489	-1,60E+00	1,79E-02	-1,71E+00	3,92E-02	6,21E-02	-3,92E-02
R17	Crest Block 0	489	-1,73E+00	-1,82E-02	-1,74E+00	6,03E-02	6,36E-02	-6,03E-02
R18	Crest Block 5	489	-1,64E+00	-4,27E-03	-1,68E+00	5,47E-02	6,36E-02	-5,47E-02
R19	Crest Block 11	489	-1,45E+00	-3,54E-03	-1,64E+00	2,50E-02	6,12E-02	-2,50E-02
R20	Crest Block 17	489	-1,18E+00	-1,28E-02	-1,61E+00	-1,94E-02	5,37E-02	1,94E-02
R21	Crest Block 23	489	-1,03E+00	-1,94E-02	-1,67E+00	-4,92E-02	4,24E-02	4,92E-02
R22	Crest Block 4	489	-1,45E+00	-5,61E-03	-1,46E+00	5,97E-02	6,49E-02	-5,97E-02

Los campos calculados corresponden a aquellos que podemos encontrar en presas afectadas por la AAR. El valor de los esfuerzos principales se ha incrementado respecto a aquellos obtenidos sin consideración de la AAR lo que representa bien una carga interna provocada por la expansión del gel. Los desplazamientos han aumentado también y son más importantes. Podemos concluir que la reacción ha evolucionado en el modelo.

6.7.5. Tercera parte

El objetivo es predecir el comportamiento de la presa hasta el 30 de Abril de 2010 utilizando los parámetros identificados en el apartado anterior.

Para el punto R16 del bloque 6-8 el modelo predice el siguiente desplazamiento vertical:

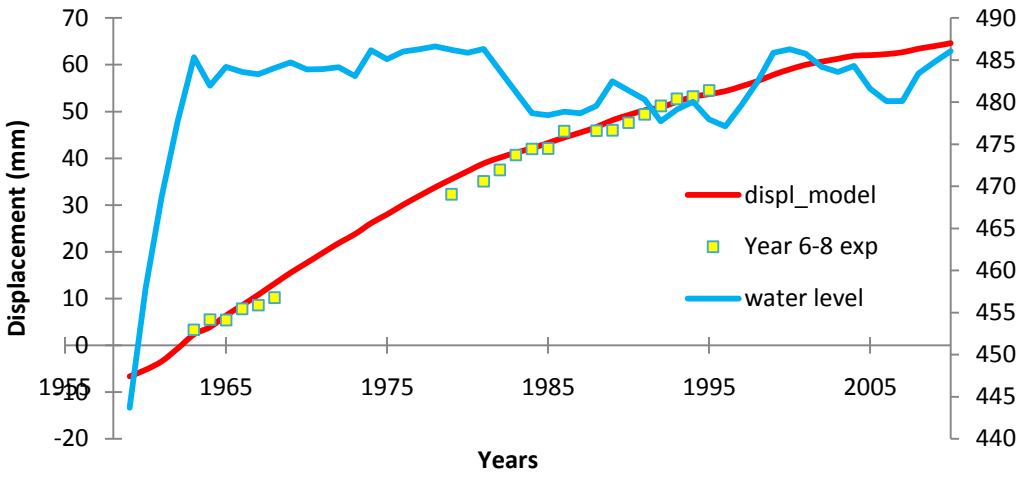


Figura 35. Desplazamiento vertical del bloque 6-8 entre 1963 y 2010

En otros trabajos como el de R. Charlwood (Lisboa,2011) o de B. Goguel y K. Gurukumba (Granada, 2007), podemos encontrar más puntos experimentales en la curva de desplazamientos que nos permiten disponer de más puntos de verificación la verificación del modelo:

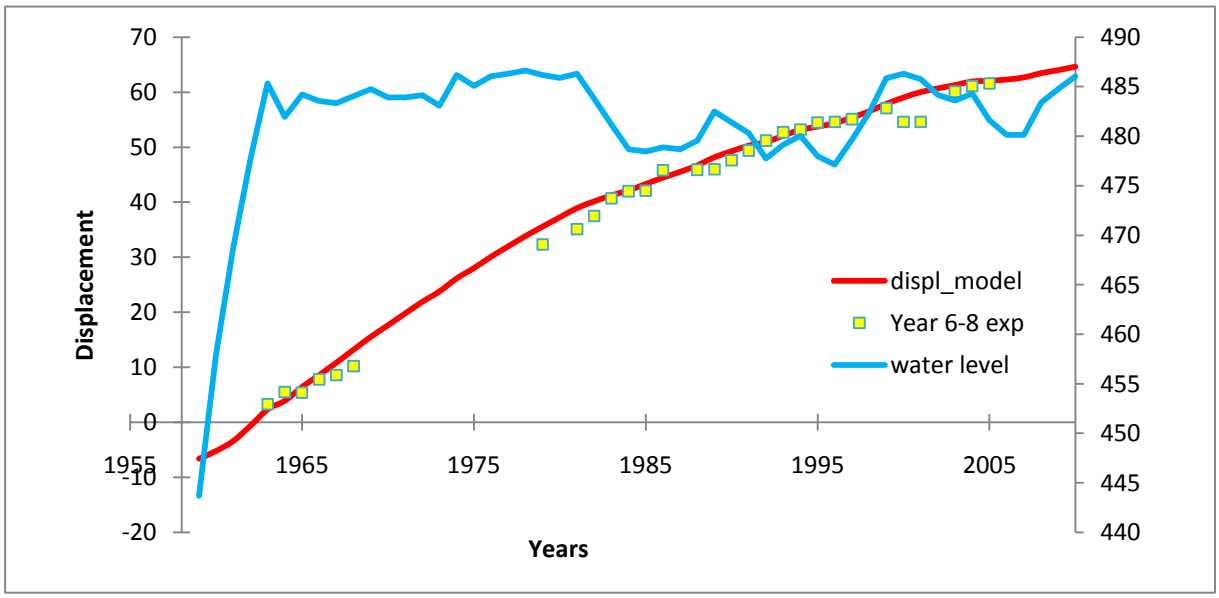


Figura 36. Desplazamiento vertical del bloque 6-8 entre 1963 et 2010 con Charlwood

Podemos ver que la curva encontrada representa bien el comportamiento real de la presa y nos permite obtener en 2010 aproximadamente el mismo desplazamiento vertical que el experimental para el bloque 6-8. Tenemos, sin embargo, una divergencia alrededor del año 2000. Mientras, por un lado, nuestra curva experimenta un leve incremento en los desplazamientos; por el otro lado, los datos tomados experimentalmente muestran todo lo contrario al medir un descenso de los mismos. Puede explicarse de la misma manera que en el apartado anterior, los esfuerzos de compresión pueden impedir e incluso invertir la evolución de la AAR. También los efectos térmicos, no considerados en este ejercicio pueden intervenir en la evolución de la reacción.

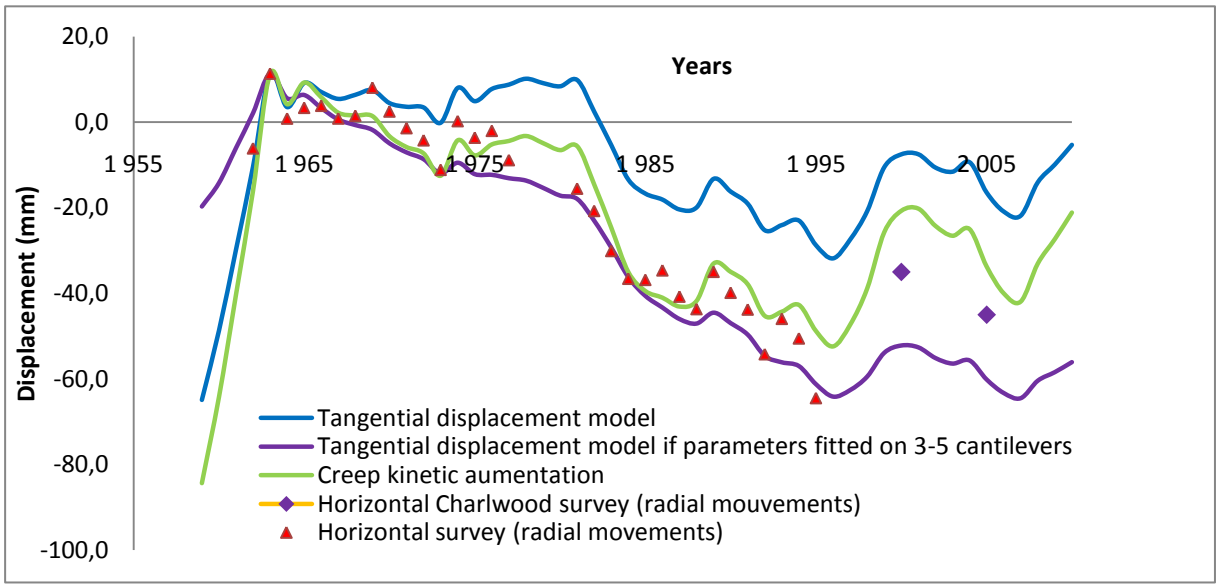


Figura 37. Desplazamiento radial para el punto de la cresta T343 entre 1963 y 2010

Podemos ver que según los puntos experimentales medidos por Charlwood, es también el modelo calibrado sobre la fluencia el que nos permite una mejor previsión del comportamiento de la presa. Cuando los parámetros del modelo son calibrados sobre el bloque 3-5, el desplazamiento radial es sobreestimado. El cálculo utilizando los parámetros de fluencia de Temple sur Lot sigue sin expandirse hasta el nivel de verificar los valores previstos aunque la forma seguida por la curva muestra una tendencia similar a la mostrada por los valores experimentales.

El campo de esfuerzos y desplazamientos obtenidos el 30 de Abril de 2010 para el modelo calibrado sobre el bloque 6-8 y con los parámetros de fluencia de Temple sur Lot son:

Tabla 15. Camp de esfuerzos y de desplazamientos el 30 de Abril de 2010

Solution 3A : RWL = 486,06 - 30 April 2010

Punto	Localización	Elevación	ESFUERZOS (MPa)			DESPLAZAMIENTOS (m)		
			Horizontal	Vertical	Mayor Principal	Radial	Vertical	Tangencial
R1	Block 20	488	-1,46E+00	-1,78E-03	-2,26E+00	-5,08E-02	4,84E-02	2,97E-02
R2	Block 20	480	-1,57E+00	-1,44E-01	-2,57E+00	-3,90E-02	4,17E-02	2,76E-02
R3	Block 20	463	-2,06E+00	-4,97E-01	-3,33E+00	-1,27E-02	2,92E-02	2,23E-02
R4	Block 20	438	-2,40E+00	-7,20E-01	-4,18E+00	7,50E-03	1,82E-02	1,61E-02
R5	Block 20	418	-2,32E+00	-9,03E-01	-4,05E+00	1,30E-02	7,46E-03	1,14E-02
R6	Block 0	480	-2,44E+00	-1,33E-01	-2,57E+00	6,43E-02	6,76E-02	1,88E-02
R7	Block 0	438	-3,89E+00	-6,99E-01	-4,09E+00	7,14E-02	3,91E-02	1,05E-02
R8	Block 0	418	-4,17E+00	-1,14E+00	-4,44E+00	5,98E-02	2,68E-02	6,70E-03
R9	Block 19	488	-1,33E+00	-6,17E-03	-2,11E+00	-4,99E-02	5,15E-02	-2,93E-02
R10	Block 19	480	-1,44E+00	-1,37E-01	-2,37E+00	-3,81E-02	4,50E-02	-2,73E-02
R11	Block 19	463	-1,84E+00	-5,00E-01	-3,06E+00	-1,21E-02	3,27E-02	-2,23E-02
R12	Block 19	438	-2,29E+00	-8,57E-01	-3,95E+00	8,02E-03	2,21E-02	-1,63E-02
R13	Block 19	418	-2,29E+00	-1,23E+00	-4,19E+00	1,61E-02	1,23E-02	-1,13E-02
R14	Crest Block 20	489	-1,65E+00	1,23E-02	-2,21E+00	-2,37E-02	6,00E-02	3,41E-02
R15	Crest Block 14	489	-1,96E+00	2,01E-02	-2,26E+00	1,90E-02	6,92E-02	3,20E-02
R16	Crest Block 6	489	-2,19E+00	1,75E-03	-2,30E+00	5,36E-02	7,36E-02	2,76E-02
R17	Crest Block 0	489	-2,34E+00	-1,12E-02	-2,35E+00	7,80E-02	7,52E-02	6,79E-03
R18	Crest Block 5	489	-2,28E+00	-1,23E-02	-2,32E+00	7,14E-02	7,52E-02	-1,26E-02
R19	Crest Block 11	489	-2,06E+00	-2,24E-02	-2,27E+00	3,70E-02	7,27E-02	-2,69E-02
R20	Crest Block 17	489	-1,65E+00	-2,07E-02	-2,13E+00	-1,46E-02	6,45E-02	-3,28E-02
R21	Crest Block 23	489	-1,33E+00	-6,17E-03	-2,11E+00	-4,99E-02	5,15E-02	-2,93E-02
R22	Crest Block 4	489	-1,96E+00	-2,56E-02	-1,97E+00	7,74E-02	7,64E-02	1,31E-02

Observando los resultados obtenidos, la reacción sigue evolucionando hasta 2010, los esfuerzos son más importantes y también los desplazamientos que respecto a 1994. Es por ello que podemos concluir que los resultados obtenidos corresponden bien a los que podemos esperar de una presa afectada por la AAR.

Hasta ahora, el modelo ha sido calibrado preferencialmente sobre el bloque 6-8, ya que, descartando los bloques 0-2 y 3-5, era donde se recogía un desplazamiento máximo en la dirección vertical. Sin embargo, el modelo también debe verificar su funcionamiento en los demás puntos facilitados por la organización.

Para los otros puntos, el desplazamiento vertical obtenido es el siguiente:

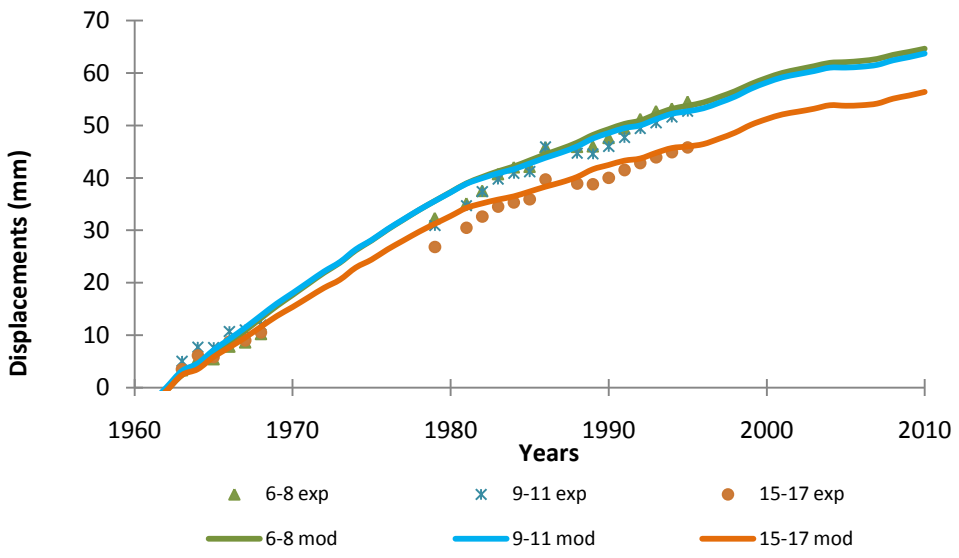


Figura 38. Desplazamientos verticales de los puntos 9-11, 6-8 et 15-17.

Como podemos observar, los desplazamientos verticales son bien aproximados por el modelo que consigue una buena representación del comportamiento de estos puntos de la presa.

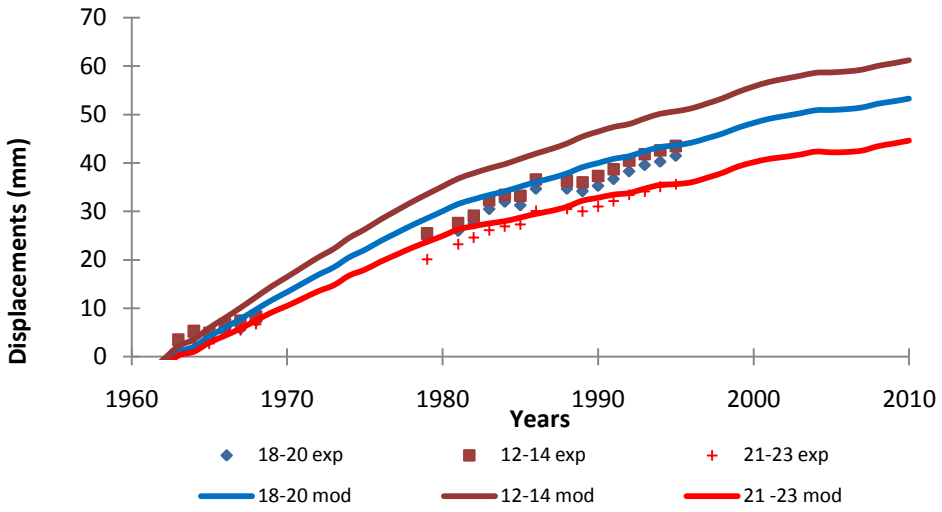


Figura 39. Desplazamientos verticales de los puntos 18-20, 12-14, 21-23.

En esta imagen podemos comprobar que en los bloques 21-23 y 18-20, el modelo propuesto consigue una aceptable modelización de los desplazamientos verticales, obteniendo con bastante precisión el desplazamiento del bloque 21-23. E desplazamiento del bloque 12-14 es, sin embargo, claramente sobre valorizado aunque siga la tendencia de los datos obtenidos experimentalmente. No he conseguido dar una explicación razonable a esta sobre

valorización. La posición del punto es similar a la del punto 18-20 lejos del aliviadero de crecidas por lo que el desplazamiento debería ser similar.

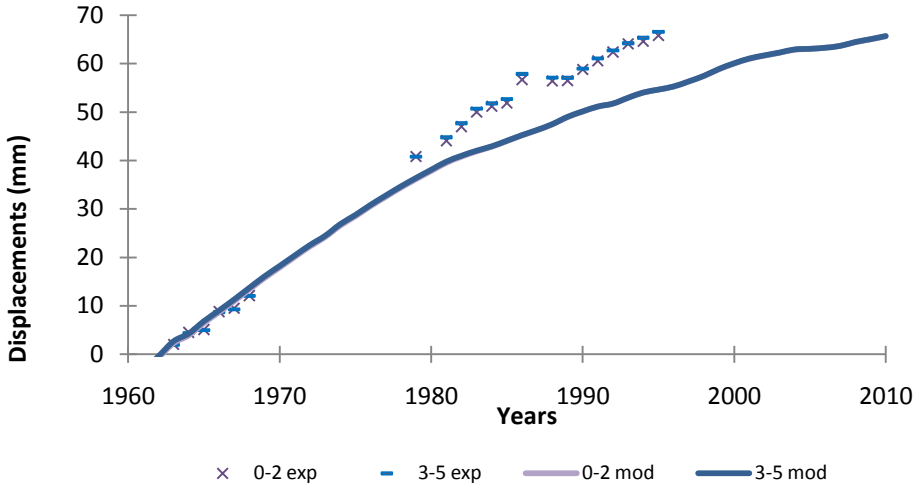


Figure 40. Desplazamientos verticales de los puntos 0-2, 3-5.

El desplazamiento de estos puntos es claramente inferior a los obtenidos experimentalmente tal y como ya habíamos previsto en el apartado de hipótesis.

El programa nos permite también la obtención de otros datos de pos tratamiento que nos ayudan a estudiar las propiedades de la presa y la evolución de las mismas en el tiempo. Por ejemplo, con el fin de comparar la evolución del campo de esfuerzos desde la construcción de la presa, hemos extraído tanto el campo de rosetas de los esfuerzos principales así como los isovalores del esfuerzo principal de compresión aguas arriba y aguas debajo de la presa tanto en 1963 como en 201

Podemos ver en las siguientes imágenes que la dirección de los esfuerzos principales ha cambiado desde el fin de la construcción, orientándose hacia la horizontal. Este cambio refleja correctamente la evolución de los esfuerzos a causa de la AAR. Inicialmente, al finalizar la construcción, la presa, sin presión de agua, es afectada principalmente por su peso propio. Esto implica una representación prioritariamente vertical de las rosetas de esfuerzos principales, que es lo que obtenemos con el modelo. Sin embargo, a medida que en la presa evoluciona la AAR, el avance de la reacción (producción de gel) produce una carga poro mecánica en la pasta de cemento que mete a la presa en compresión entre los márgenes del rio. Es por ello que la dirección preferente de compresión cambia de la vertical a la horizontal

a medida que evoluciona la reacción. Este fenómeno puede observarse en los campos de rosetas representados por el modelo:

Aguas arriba:

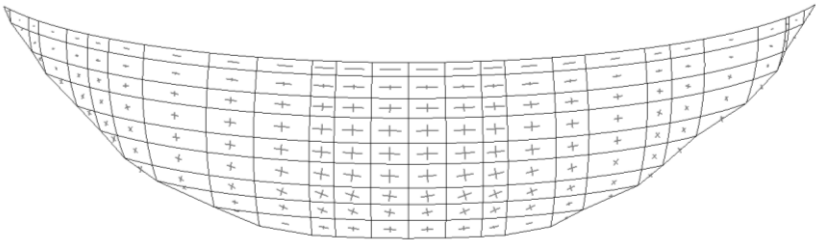


Figura 41. Campo de rosetas aguas arriba el 30 de Julio de 1963

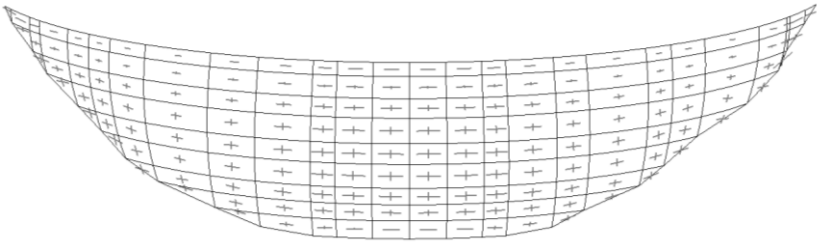


Figura 42. Campo de rosetas aguas arriba el 30 de abril de 2010

Aguas abajo:

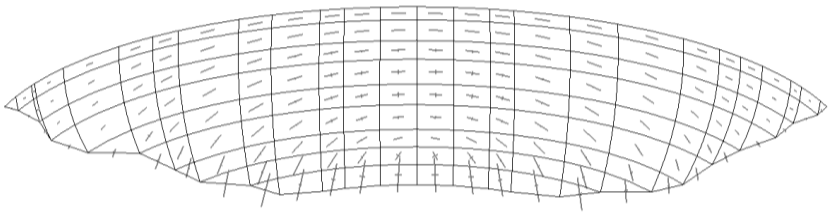


Figura 43. Campo de rosetas aguas abajo el 30 de Julio de 1963

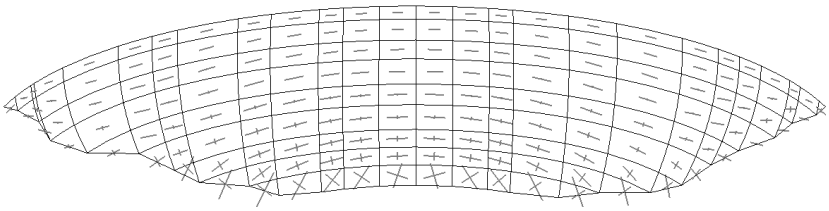


Figura 44. Campo de rosetas aguas abajo el 30 de abril de 2010

El valor del esfuerzo principal de compresión ha, por lo tanto cambiado desde el final de la construcción. La expansión del gel a causa de la AAR provoca un aumento de las compresiones internas de la presa. Los contactos presa-macizo rocoso en los márgenes del rio serán por ello más solicitados. En las siguientes imágenes, hemos extraído los isovalores del esfuerzo principal de compresión lo que nos permite ilustrar lo explicado previamente:

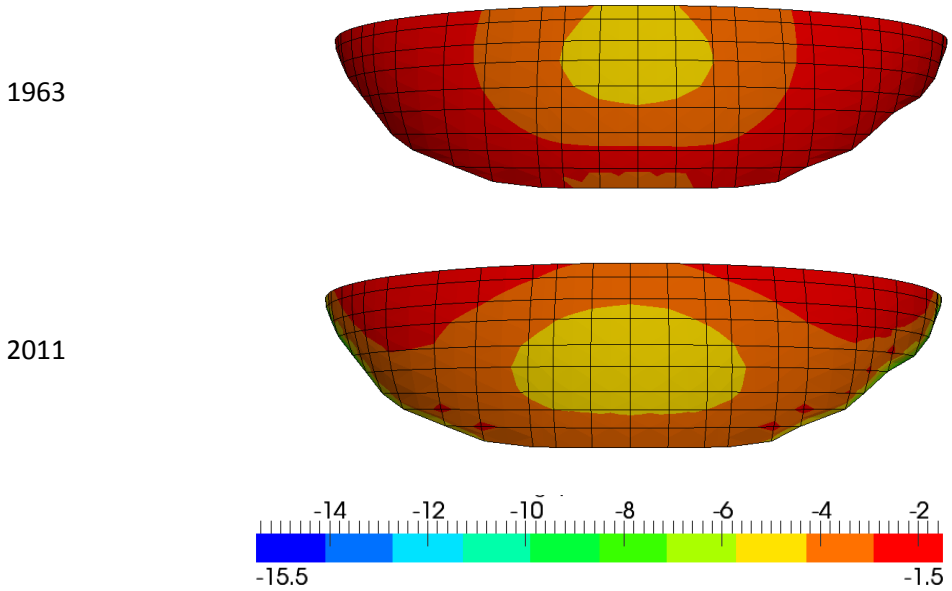


Figura 45. Esfuerzos principales de compresión en la cara aguas arriba (MPa)

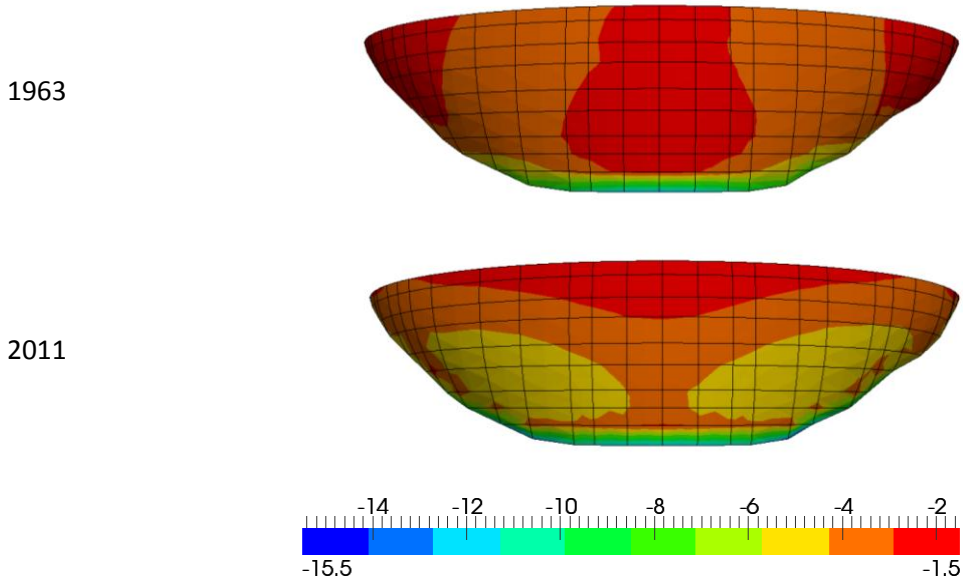


Figura 46. Esfuerzos principales de compresión en la cara aguas abajo (MPa)

La reacción AAR provoca, tal y como hemos visto, un aumento de los esfuerzos internos en la presa que pueden llegar a poner en riesgo su estabilidad. Es por ello que las reacciones a nivel del apoyo deben ser verificadas a fin de comprobar que no sobrepasen los límites establecidos en el estudio de estabilidad y que no hay movimiento relativo entre los cimientos y la presa.

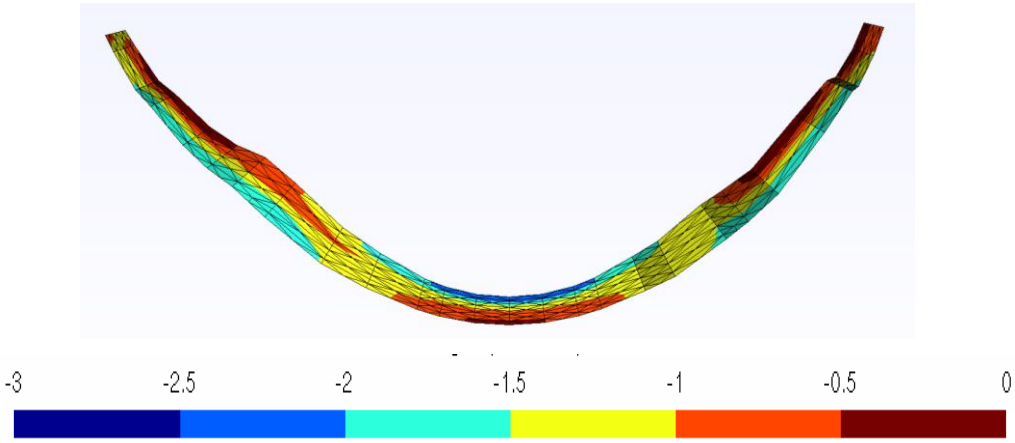


Figura 47. Esfuerzos normales en el contacto presa-macizo rocoso (2011) [MPa]

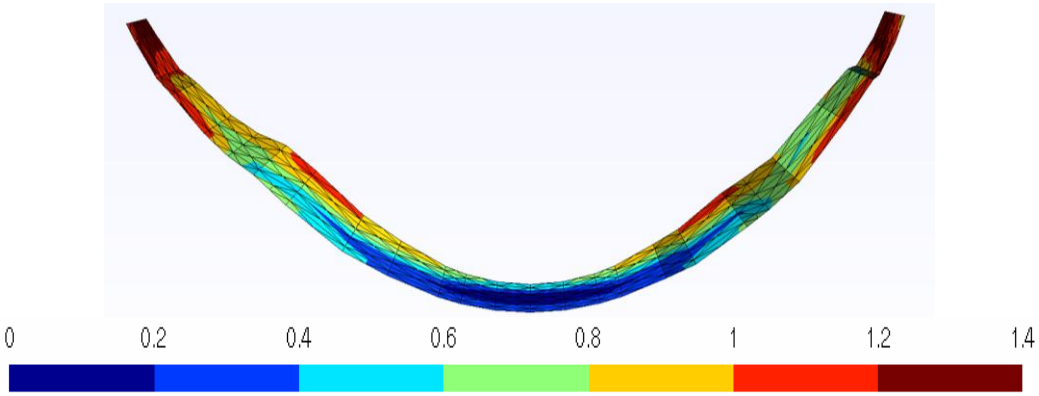


Figura 48. Esfuerzos tangenciales en el contacto presa-macizo rocoso (2011) [MPa]

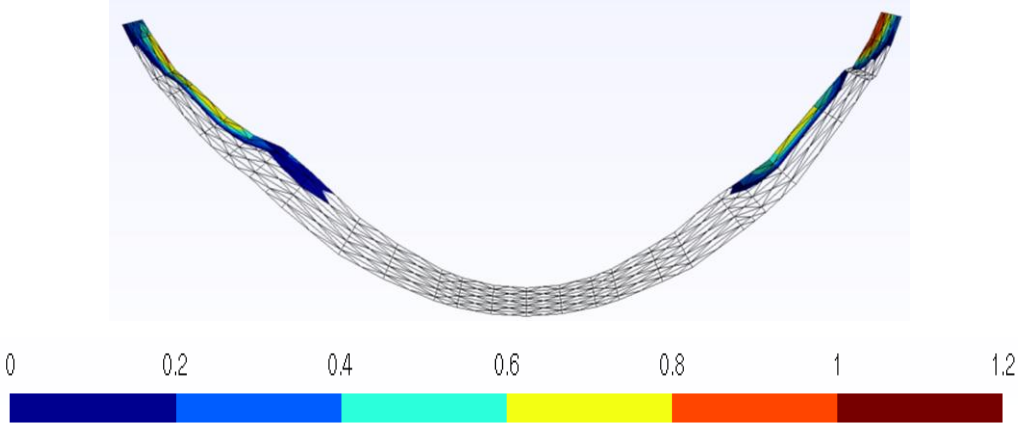


Figura 49. Potencial de cohesión en el contacto presa-macizo rocoso (2011) [MPa]

Ahí donde el esfuerzo tangencial es superior al normal (potencial de cohesión) podemos encontrar problemas de estabilidad. Ante la falta de datos sobre los esfuerzos que puede

soportar el contacto, dejo los resultados obtenidos sin concluir si la AAR puede ser origen de problemas de estabilidad a finales de 2010.

El modelo nos permite obtener el deterioro de la presa, lo que nos ayudara a localizar las zonas donde la fisuración puede ser importante y donde será necesario repararla. La siguiente imagen nos muestra el campo de deterioro de la presa en 2010:

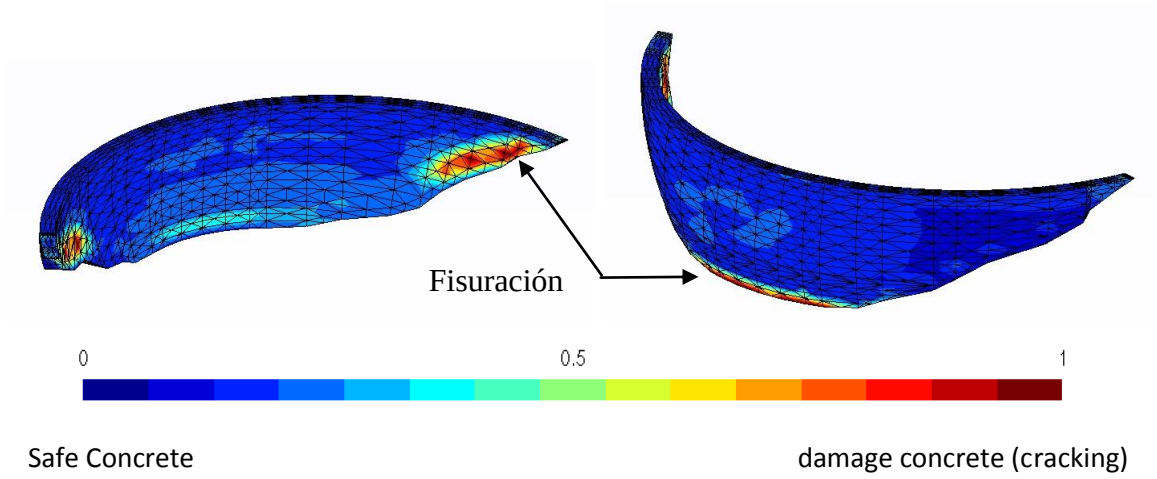


Figura 50. Campo de deterioro de la presa (2011).

Los deterioros calculados son importantes en las zonas alrededor de los cimientos, en la base y en los márgenes de la presa. Puede ser posible que una fisuración horizontal se desarrolle en las zonas dañadas, por lo que una estrategia de control debe ser llevada a cabo con el fin de evitar riesgos.

Conclusión

La reacción Alcalino Árido es una patología conocida desde hace mucho tiempo, sin embargo no existe hoy en día ninguna metodología definida y aprobada por la mayoría que nos permita predecir el comportamiento de las estructuras afectadas por este fenómeno. Es por ello importante comparar los modelos existentes con el fin de estudiar su eficacia para representar la evolución de la AAR en estructuras de ingeniería civil.

EDF en cooperación con el LMDC Toulouse ya ha creado un modelo que nos permite representar casos de expansión gel. Pese a ello, nuevos desarrollos han sido efectuados con el objetivo de simplificar el modelo existente y mejorar su convergencia. En este proyecto, vamos a verificar los desarrollos llevados a cabo con el fin de comprobar su robustez al mismo tiempo que identificamos los parámetros del modelo. El modelo, ha conseguido resolver la mayor parte de los ensayos de verificación (fluencia y deterioro) y, pese a algunos cambios a hacer, parece capaz de reproducir correctamente la AAR. Quedan pendientes ciertas mejoras sobre la gestión de la anisotropía en la expansión del gel.

En el proyecto, vamos también a modelizar la presa de Kariba la cual ha diagnosticado efectos de expansión desde su puesta en servicio. La modelización y el estudio de esta presa se presentan muy interesantes. Con el modelo original instalado en el programa Code Aster (desarrollado por EDF), hemos conseguido representar de manera aproximada el comportamiento real de la presa. Existen aún ciertas divergencias que pueden ser achacadas a las simplificaciones llevadas a cabo. La consideración de los efectos térmicos o la fluencia pueden producir desplazamientos importantes a tomar en cuenta en la identificación de los parámetros de nuestro modelo. Queda pendiente comprobar la capacidad del modelo a predecir el comportamiento futuro de la presa. Para ello tendremos que esperar a finales de Octubre, donde serán presentados los resultados del estudio en el Benchmark Workshop en Valencia. Sin embargo, antiguos estudios, muestran que nuestros resultados son bastante próximos a la realidad. Quedará pendiente la capacidad de predecir el estado de esfuerzos.

Bibliografía

Trabajos imprimidos

SELLIER, A. *Crack opening assessment throughout concrete structures: A continuum three dimensional finite element model based on orthotropic multi level damage concept and crack reclosure function.* Toulouse, 24 Enero 2011.

SELLIER, A. *Coupling between diffuse damage, localized damage and basic creep in a poromechanics framework.* Toulouse, 14 Abril 2011.

SALGUES, M. *Note de synthèse sur la réaction sulfatique interne.* Le Bourget du Lac, 30/11/2011.

OLIVIER, J. *Etat de l'art en 1995 concernant le phénomène d'alcali-réactions dans les bétons.* Le Bourget du Lac, 14/07/1996

Trabajos universitarios

GRIMAL, E. *Caractérisation des effets du gonflement provoqué par la réaction alcali-silice sue le comportement mécanique d'une structure en béton.* Tesis doctoral, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 7 Febrero 2007, 197 p.

HUCKERT Audrey. *Modélisation du couplage hydromécanique dans les structures en béton de type barrages.* Proyecto de Fin de Carrera, ENTP, 2010, 188 p.

Comunicaciones en un congreso

OZANAM, O. *Effet du niveau d'exploitation de la retenue sur le taux de gonflement du béton*. 19th International Symposium on Large Dams (ICOLD), *Florencia, 1997*.

CHARLWOOD, R. *Managing AAR affected dams*. In : C. Pina, E. Portela, J. Gomes (éd.), 6th International Conference on Dam engineering, Lisbon, Portugal, Febrero 15-17, 2011.

GRIMAL, E. *Concrete modeling for expertise of structure affected by alkali aggregate reaction*. In: Maarten A.T.M. Broekmans and Borge J. Wigum (éd.), 13th ICAAR Trondheim 2008, Noruega, 16-17 Junio 2008.

SELLIER, A. *Assessment of the residual expansion for expertise of structures affected by AAR.* In: Maarten A.T.M. Broekmans and Borge J. Wigum (éd.), 13th ICAAR Trondheim 2008, Noruega, 16-17 Junio 2008

GOGUEL, B. et GURUKUMBA, K. *Chemical expansion of concrete in dams and hydro-electric projects*. In: (éd.), International Journal on hydropower and dams, Workshop, Granada, España, Octubre 18 and 19, 2007.

CURTIS, D. D. *Modeling of AAR affected structures using the grow3D FEA program.* In: Acres International Corporation, Stone and Webster Engineering Corporation. Chattanooga, Tennessee, Octubre 22-27, 1995.

Sitios web consultados

EDF [referencia du 01/09/2011] http://france.edf.com.

LMDC Toulouse [referencia du 01/09/2011] http://lmdc.insa-toulouse.fr/

Code-Aster [consultada frecuentemente] http://www.code-aster.org

Cast3m [consultada frecuentemente] http://www-cast3m.cea.fr/

Benchmark Workshop [consultada frecuentemente] http://www.ipresas.upv.es/IIIsemana.html

Anejos

Anejo 1. Fichero de comandos para el ensayo Gopalaskrishnan uniaxial

Cet essais a été fait avec le logiciel Cast3m

```
*maillage 1/8 eprouvette 11*22
opti dime 3 elem cu20;
nh1=1;
nl1=1;
np1=1;
p1=0. 0. 0.;
p2=1. 0. 0.;
p3=1. 1. 0.;
p4=0. 1. 0.;
p5=0. 0. 1.;
d12=droi nl1 p1 p2;
d23=droi np1 p2 p3;
d34=droi nl1 p3 p4;
d41=droi np1 p4 p1;
d15=droi nh1 p1 p5;
*surface inferieuer
s3=daller d12 d23 d34 d41;
v1=s3 volu nh1 tran p5;
elim (v1 et d15) 0.0005;
*surface superieure
s4=(s3 plus p5) coul roug ;
elim (v1 et s3) 0.0001;
elim (v1 et s4) 0.0001;
*axe
d3=d15;
elim (v1 et d3) 0.0001;
*surface de coupe avant
s11=d12 tran nh1 p5;
s10=s11;
elim (s10 et v1) 0.0001;
*surface de coupe laterale gauche
s41=d41 tran nh1 p5;
s40=s41;
elim (s40 et v1) 0.0001;
oeil1=-0.25 -0.5 2.;
*surface de droite
s23=d23 tran nh1 p5;
*surface arriere
s34=d34 tran nh1 p5;
elime (v1 et s23 et s34) 0.0001;
*trac v1 cach oeil1 qual;
*opti donn 5;

*modele et materiau
mod1=mode v1 mecanique elastique
viscoplastique fluage3d;
*taille des elements finis
tail1=tail direction mod1;

*materiau
rc1=29.;
youn1=11000*(rc1**0.33);
youn1=41838.;
nu1=0.17;
mu11=(youn1/2.)/(1.+nu1);
k11=(youn1/3.)/(1.-(2.*nu1));


mat1=mate mod1 YOUN youn1 NU nu1 RHO
2400. ALPH 1.e-6
 HYDR 1. HYDS 0.2 RC 37.6 EPC 2.e-3 RT
3. EPT 1.3e-4
 Y1SY 4.1 TAU1 1. TAU2 14.  FLUS 0.4
NRJA 3.65e4
 EPS0 2.e-3  DFMX 0.2 EPSP 3.e-3 BIOT
0.3  PORO 0.12
 VW 0.12 MW 0. AW 1.5  VG 0. MG 100.
VG0 0.01 TAUG 1.d0;

*conditions aux limites et chargement
cl1=bloq s3 UZ;
cl4=bloq s10 UY;
cl5=bloq s40 UX;
cl6=bloq s4 UX UY;
cl0=cl1 et cl4 et cl5;
pres1=PRES 'MASS' MOD1 12.54 s23;
lp1=prog 0. 1. 1. 0.0001 0.0001;
lt1=prog 0. 0.1 28. 28.1 200.;
evol1=evol manu 'TEMPS' lt1 'PRES1'
lp1;
char1=char 'MECA' (pres1) evol1;

*difinitions pour le calcul pas a pas
du cahrgement initial
tab1=table;
ltc1=prog 0. pas 0.025 0.2 pas 0.5 10.
pas 1. 28.
pas 0.01 28.2 pas 0.2 30 pas 2. 50.;
tab1.temps_calcules=ltc1;
tab1.caracteristiques=mat1;
tab1.modele=mod1;
tab1.blocages_mecaniques=cl0;
tab1.mova='CCF1';
tab1.chargement=char1;
tab1.precision=1.d-4;
tab1.maxiteration=100;
*opti donn 5;
pasapas tab1;
*opti donn 5;
```

Anejo 2. Fichero de comandos para el ensayo Gopalaskrishna biaxial

Cet essais a été fait avec le logiciel Cast3m

```
*maillage 1/8 eprouvette 11*22
opti dime 3 elem cub8;
nh1=1;
nl1=1;
np1=1;
p1=0. 0. 0.;
p2=1. 0. 0.;
p3=1. 1. 0.;
p4=0. 1. 0.;
p5=0. 0. 1.;
d12=droi nl1 p1 p2;
d23=droi np1 p2 p3;
d34=droi nl1 p3 p4;
d41=droi np1 p4 p1;
d15=droi nh1 p1 p5;
*surface inferieuer
s3=daller d12 d23 d34 d41;
v1=s3 volu nh1 tran p5;
elim (v1 et d15) 0.0005;
*surface superieure
s4=(s3 plus p5) coul roug ;
elim (v1 et s3) 0.0001;
elim (v1 et s4) 0.0001;
*axe
d3=d15;
elim (v1 et d3) 0.0001;
*surface de coupe avant
s11=d12 tran nh1 p5;
s10=s11;
elim (s10 et v1) 0.0001;
*surface de coupe laterale gauche
s41=d41 tran nh1 p5;
s40=s41;
elim (s40 et v1) 0.0001;
oeil1=-0.25 -0.5 2.;
*surface de droite
s23=d23 tran nh1 p5;
*surface arriere
s34=d34 tran nh1 p5;
elime (v1 et s23 et s34) 0.0001;
*trac v1 cach oeil1 qual;
*opti donn 5;

*modele et materiau
mod1=mode v1 mecanique elastique
viscoplastique fluage3d;
*taille des elements finis
tail1=tail direction mod1;
*materiau
rc1=29.;
*youn1=11000*(rc1**0.33);
youn1=41838.;
nu1=0.17;
mu11=(youn1/2.)/(1.+nu1);
k11=(youn1/3.)/(1.-(2.*nu1));
*limite du fluage spherique visqueux
e2lim1=-100./k11;

mat1=mate mod1 YOUN youn1 NU nu1 RHO
2400. ALPH 1.e-6
 HYDR 1. HYDS 0.2 RC 37.6 EPC 2.e-3 RT
3. EPT 1.3e-4
 Y1SY 4.1 TAU1 1. TAU2 14.  FLUS 0.4
NRJA 3.65e4
 EPS0 2.e-3  DFMX 0.2 EPSP 3.e-3 BIOT
0.3  PORO 0.12
 VW 0.12 MW 0. AW 1.5  VG 0. MG 100.
VG0 0.01 TAUG 1.d0;

*conditions aux limites et chargement
cl1=bloq s3 UZ;
cl4=bloq s10 UY;
cl5=bloq s40 UX;
cl6=bloq s4 UX UY;
cl0=cl1 et cl4 et cl5;
pres1=PRES 'MASS' MOD1 12.54 s23;
pres2=PRES 'MASS' MOD1  7.25 s34;
lp1=prog 0. 1. 1. 0.0001 0.0001;
lt1=prog 0. 0.1 28. 28.1 200.;
evol1=evol manu 'TEMPS' lt1 'PRES1'
lp1;
char1=char 'MECA' (pres1 et pres2)
evol1;

*difinitions pour le calcul pas a pas
du cahrgement initial
tab1=table;
ltc1=prog 0. pas 0.025 0.2 pas 0.5 10.
pas 1. 28.
pas 0.01 28.4 pas 0.2 30 pas 2. 50.;
tab1.temps_calcules=ltc1;
tab1.caracteristiques=mat1;
tab1.modele=mod1;
tab1.blocages_mecaniques=cl0;
tab1.mova='CCF1';
tab1.chargement=char1;
tab1.precision=1.d-4;
tab1.maxiteration=100;
*opti donn 5;
pasapas tab1;
*opti donn 5;
```

Anejo 3. Fichero de comandos para el ensayo Gopalaskrishna triaxial

Cet essais a été fait avec le logiciel Cast3m

```
**maillage 1/8 eprouvette 11*22
opti dime 3 elem cu20;
nh1=1;
nl1=1;
np1=1;
p1=0. 0. 0.;
p2=1. 0. 0.;
p3=1. 1. 0.;
p4=0. 1. 0.;
p5=0. 0. 1.;
d12=droi nl1 p1 p2;
d23=droi np1 p2 p3;
d34=droi nl1 p3 p4;
d41=droi np1 p4 p1;
d15=droi nh1 p1 p5;
*surface inferieuer
s3=daller d12 d23 d34 d41;
v1=s3 volu nh1 tran p5;
elim (v1 et d15) 0.0005;
*surface superieure
s4=(s3 plus p5) coul roug ;
elim (v1 et s3) 0.0001;
elim (v1 et s4) 0.0001;
*axe
d3=d15;
elim (v1 et d3) 0.0001;
*surface de coupe avant
s11=d12 tran nh1 p5;
s10=s11;
elim (s10 et v1) 0.0001;
*surface de coupe laterale gauche
s41=d41 tran nh1 p5;
s40=s41;
elim (s40 et v1) 0.0001;
oeil1=-0.25 -0.5 2.;
*surface de droite
s23=d23 tran nh1 p5;
*surface arriere
s34=d34 tran nh1 p5;
elime (v1 et s23 et s34) 0.0001;
*trac v1 cach oeil1 qual;
*opti donn 5;

*modele et materiau
mod1=mode v1 mecanique elastique
viscoplastique fluage3d;
*taille des elements finis
tail1=tail direction mod1;

*materiau
rc1=29.;
*youn1=11000*(rc1**0.33);
youn1=41838.;
nu1=0.17;
mu11=(youn1/2.)/(1.+nu1);
k11=(youn1/3.)/(1.-(2.*nu1));
*limite du fluage spherique visqueux
e2lim1=-100./k11;

mat1=mate mod1 YOUN youn1 NU nu1 RHO
2400. ALPH 1.e-6
 HYDR 1. HYDS 0.2 RC 37.6 EPC 2.e-3 RT
3. EPT 1.3e-4
 Y1SY 4.1 TAU1 1. TAU2 14.  FLUS 0.4
NRJA 3.65e4
 EPS0 2.e-3  DFMX 0.2 EPSP 3.e-3 BIOT
0.3  PORO 0.12
 VW 0.12 MW 0. AW 1.5  VG 0. MG 100.
VG0 0.01 TAUG 1.d0;

*champ constant nul
zero1=manu 'CHML' mod1 'EPGS' 0.d0
'RIGIDITE' ;

*conditions aux limites et chargement
cl1=bloq s3 UZ;
cl4=bloq s10 UY;
cl5=bloq s40 UX;
*cl6=bloq s4 UX UY;
cl0=cl1 et cl4 et cl5;
pres1=PRES 'MASS' MOD1 13.23 s23;
pres2=PRES 'MASS' MOD1  12.84 s34;
pres3=PRES 'MASS' MOD1 1. s4;
lp1=prog 0. 1. 1. 0.0001 0.0001;
lt1=prog 0. 0.1 94. 94.1 200.;
lp2=prog 0. 6.37 6.37 13.43 13.43
 0.0001 0.0001;
lt2=prog 0. 0.1 63. 63.1 94.
 94.1 200.;
evol1=evol manu 'TEMPS' lt1 'PRES1'
lp1;
evol2=evol manu 'TEMPS' lt2 'PRES2'
lp2;
char1=char 'MECA' (pres1 et pres2)
evol1;
char2=char 'MECA' pres3 evol2;
char0=(char1 et char2);

*difinitions pour le calcul pas a pas
du cahrgement initial
tab1=table;
ltc1=prog 0. pas 0.025 0.2 pas 0.5 10.
pas 2. 63.
pas 0.01 63.4 pas 0.2 65 pas 2. 94.
pas 0.01 94.4
pas 0.2 96. pas 2. 120.;
tab1.temps_calcules=ltc1;
```

```
tab1.caracteristiques=mat1;
tab1.modele=mod1;
tab1.blocages_mecaniques=cl0;
tab1.mova='CCF1';
tab1.chargement=(char0);
tab1.precision=1.d-5;
tab1.maxiteration=100;
*opti donn 5;
pasapas tab1;
*opti donn 5;
```

Anejo 4. Fichero de comandos para el ensayo William local

Cet essais a été fait avec le logiciel Cast3m

```
opti dime 3 elem cub8 eptr 4;

cas1='ENDO3D';
nh1=1;
nl1=1;
np1=1;

*points
p1=0. 0. 0.;
p2=0.1 0. 0.;
p3=0.1 0.1 0.;
p4=0. 0.1 0.;
p5=0. 0. 0.1;
p6=0.1 0. 0.1;
p7=0.1 0.1 0.1;
p8=0. 0.1 0.1;

*droites
d12=droi nl1 p1 p2;
d23=droi np1 p2 p3;
d34=droi nl1 p3 p4;
d41=droi np1 p4 p1;
d15=droi nh1 p1 p5;
d26=droi nh1 p2 p6;
d37=droi nh1 p3 p7;
d48=droi nh1 P4 p8;
d56=droi nl1 p5 p6;
d67=droi np1 P6 P7;
d78=droi nl1 P7 P8;
d85=droi np1 P8 P5;

*surface inferieuer
s3=daller d12 d23 d34 d41;

*volume
v1=s3 volu nh1 tran p5;
elim v1 d15 0.0005;

*surface superieure
s4=(s3 plus p5) coul roug ;
elim v1 s3 0.0001;
elim v1 s4 0.0001;

*axe
d3=d15;
elim v1 d3 0.0001;

*surface de coupe avant
s11=d12 tran nh1 p5;
s10=s11;
elim s10 v1 0.0001;

*surface de coupe laterale gauche
s41=d41 tran nh1 p5;
s40=s41;
elim s40  v1 0.0001;
oeil1=-0.25 -0.5 2.;

*surface de droite
s23=d23 tran nh1 p5;

*surface arriere
s34=d34 tran nh1 p5;
elime v1 s23 0.0001;
elime v1 s34 0.0001;
elim v1 (P6 et P7 et P8) 0.0001;


*trac v1 cach qual;
*opti donn 5;

*modele et materiau

********   materiau

rc1=38.3;
youn1=32000.;
epc1=2.e-3;
nu1=0.2;
mu11=(youn1/2.)/(1.+nu1);
k11=(youn1/3.)/(1.-(2.*nu1));
rt1=3.;
ept1=1.20*(rt1/youn1);


si (ega cas1 'ENDO3D');
 mod1=mode v1 mecanique elastique
 viscoplastique endo3d;
*taille des elements finis
 tail1=tail direction mod1;



mat1=(mate mod1 YOUN youn1 NU nu1
RHO 2400. ALPH 1.e-5
 RC rc1 EPC 2.e-3 RT 3. EPT 1.3e-4
 GFTL 4.e-4 WREF 5.e-6 TPHI 1.
DELT 0.15 GFCL 2.12e-2
 HYDR 1. HYDS 0.2 NRJA 3.65e4 EPSP
3.e-3 BIOT 0.3  PORO 0.12
```

```
 VW 0.12 MW 0. AW 1.5  VG 0. MG 0.
VG0 0.01 TAUG 0.d0) et tail1;
mova1='DTL1';


sinon;
 at1=1.e0;
 ac1=1.2e0;
 bc1=1.5e3;
 bt1=10000.;
 epsd0=1.e-04;
 YG1=youn1;
 mod1=mode v1 mecanique elastique
isotrope endommagement mazars;
 mat1=matr mod1  YOUN YG1 NU 0.2
RHO 2.3E+03
 btra bt1 ktr0 epsd0 atra at1 acom
ac1 bcom bc1 beta 1.06e0;
 mova1='D';
finsi;

********   conditions aux limites
et chargement

b1234z=bloq s3 UZ;
b4158x=bloq s40 UX;
b1265y=bloq s10 UY;
cl1=b1234z et b4158x et b1265y;

******** condition pour chargement
en deplacement
b2673x=bloq s23 UX;
b3784y=bloq s34 UY;
b2673y=bloq s23 UY;
b3784x=bloq s34 UX;

********   nombre d'iteration
entre pas de temps
nite1=10.;
t1=1.e-2;
t2=10.e-2;
dt1=(1.e-2/nite1);

********   chargement
********   definitions pour le
calcul pas a pas du chargement
initial
********   1. Traction et
compression (jusqu'au pic)

dep1=DEPI b2673x 1.;
D1=1.-(exp(-0.5));
e1=3./(youn1*(1-D1));
lp1=prog 0. e1;
lt1=prog 0. t1;
evol1=evol manu 'TEMPS' lt1
'COEFF' lp1;
char1=char dimp dep1 evol1;

tab1=table;
ltc1=prog 0. pas dt1 t1;
tab1.temps_calcules=ltc1;
tab1.caracteristiques=mat1;
tab1.modele=mod1;
tab1.blocages_mecaniques=b1234z et
b4158x et b1265y et b2673x;
tab1.mova=mova1;
tab1.chargement=char1;
tab1.precision=1.d-8;
tab1.maxiteration=100;
tab1.mes_sauvegardes=table;
tab1.mes_sauvegardes.defto=vrai;
tab1.processeurs="AUTOMATIQUE";
pasapas tab1;
*opti donn 5;
```

Anejo 5. Fichero de comandos para el ensayo cíclico local

Cet essais a été fait avec le logiciel Cast3m

```
OPTI DIME 3 ELEM CUB8;

cas1='ENDO3D';
n1=1;
n2=1;
l1=0.1;
h1=0.1;
p1=0. 0. 0.;
p2=l1 0. 0.;
p3=l1 l1 0.;
p4=0. l1 0.;
p33=l1 l1 h1;
p11=0. 0. h1;
p22=l1 0. h1;
p44=0. l1 h1;
d12=droi n1 p1 p2;
d23=droi n1 p2 p3;
d34=droi n1 p3 p4;
d41=droi n1 p4 p1;
d111=droi n2 p1 p11;
d222=droi n2 p2 p22;
d333=droi n2 p3 p33;
d444=droi n2 p4 p44;
d2233=droi n1 p22 p33;
d3344=droi n1 p33 p44;

surf1=daller d12 d23 d34 d41
plan;
surf2=surf1 plus (0. 0. h1);
vol1=surf1 volu trans n2 (0. 0.
h1);
sxz0=d12 trans n2 (0. 0. h1);
syz0=d41 trans n2 (0. 0. h1);
elim 1.e-4 vol1 (surf2 et sxz0 et
syz0 et p33 et d333 et d444 et
d222
 et d111 et d2233 et d3344);
trac vol1 qual;
*opti donn 5;


rt0=3.;
E0=32000.;
ep0=1.2*(rt0/E0);

*si (ega  cas1 'ENDO3D');
 mod1=modele vol1 mecanique
elastique isotrope
 viscoplastique endo3d;

*taille des elements finis
 tail1=tail direction mod1;


mat1=(mate mod1 YOUN E0 NU 0.2
RHO 2400. ALPH 1.e-5
 RC 38.3 EPC 2.e-3 RT rt0 EPT ep0
 GFTL 6.e-5 WREF 5.e-6 TPHI 1.
DELT 0.15 GFCL 6.e-3
 HYDR 1. HYDS 0.2 NRJA 3.65e4
EPSP 3.e-3 BIOT 0.3  PORO 0.12
 VW 0.12 MW 0. AW 1.5  VG 0. MG
0. VG0 0.01 TAUG 1.d0) et tail1;
mova1='DTL1';
*sinon;

*comparaison avec Mazars
* at1=1.e0;
* ac1=1.2e0;
* bc1=1.5e3;
* bt1=10000.;
* epsd0=1.e-04;
* YG1=E0;
* mod1=mode vol1 mecanique
elastique isotrope endommagement
mazars;
* mat1=matr mod1  YOUN YG1 NU 0.2
RHO 2.3E+03
* btra bt1 ktr0 epsd0 atra at1
acom ac1 bcom bc1 beta 1.06e0;
* mova1='D';
*finsi;

*construction de la matrice des
connectivites pour le non local
*conn1=conn mod1 lcar1 normal
interieur;

*blocage meca
cl1=bloq sxz0 uy;
cl2=bloq surf1 uz;
cl3=bloq syz0 ux;
*cp1=press mass mod1 surf2 -1.;
```

```
cl4=bloq surf2 uz;
cl0=cl1 et cl2 et cl3 et cl4;
cd1=depi cl4 1.;
rig1=rela 1. 'UY' d444 - 1. 'UY'
d333;
rig2=rela 1. 'UX' d222 - 1. 'UX'
d333;
rig3=rela 1. 'UX' d23 - 1. 'UX'
d2233;
rig4=rela 1. 'UY' d34 - 1. 'UY'
d3344;
rig5=rela 1. 'UY' d333 - 1. 'UX'
d333;
dep1=depi rig1 1.;
dep2=depi rig2 1.;
dep3=depi rig3 1.;
dep4=depi rig4 1.;
dep5=depi rig5 1.;

* chargement meca
*cycles traction compression
(definis / pic de traction a 1)
list1=prog 0. 2. 0. 10. 0. -40 0.
15. -50.;
*cycle en traction
*list1=prog 0. 1. 0. 1.25 0. 1.5
0. 2. 0.
* 2.5 0. 3. 0. 3.5 0. 4. 0. 7. 0.
10. 0.;
* list1=2.*list1;
*traction simple pour verif gft
*list1=prog 0. 0.5 0. 1. 0. 2. 0.
3.5 0. 5. 0.;
*cycles en compression
*list1=prog 0. -10. 0. -30. 0. 5.
0. -50.;


n1=dime list1;
*construction de la liste des
temps
list2=prog 0.;
x0=0.;
x2=0.;
repe bou1 (n1-1);
 x1=extr list1 (&bou1+1);
 dx2=abs(x1-x0);
 x0=x1;
 x2=x2+dx2;
 list2=list2 et (prog x2);
fin bou1;

*amplitude du chargement
list2=h1*ep0*list2;
list1=(h1*ep0)*list1;
list3=prog 0. (extr list2 (dime
list2));
list4=prog 0. 0.;
evol4=evol manu 'TEMPS' list3
'COEF' list4;
evol1=evol manu 'TEMPS' list2
'DEPI' list1;
dess evol1 titre 'chargement';
dess evol4 titre 'Relation
cinematiques';
@excel1 evol1
'cycles_chargement_temps.xls';
char1= char meca cd1 evol1;
char2= char meca dep1 evol4;
char3= char meca dep2 evol4;
char4= char meca dep3 evol4;
char5= char meca dep4 evol4;
char5=char meca dep5 evol4;

*temperature imposee
*temp1=manu chpo vol1 'T' 200.;
*char2=char 'T' temp1 evol1;


tab1=table;
tab1.modele=mod1;
tab1.caracteristiques=mat1;
tab1.blocages_mecaniques=cl0 et
rig1 et rig2 et rig3 et rig4 et
rig5;
tab1.chargement=char1 et char2 et
char3 et char3 et char4;
tab1.mova=mova1;
tab1.precision=1.e-3;
tab1.precflex=tab1.precision;
tab1.mes_sauvegardes=table;
tab1.mes_sauvegardes.defto=vrai;
tab1.processeurs="AUTOMATIQUE";
tmax0=extr list2 (dime list2);
dt0=h1*ep0/4.;

list3=prog 0. pas dt0 tmax0;
tab1.temps_calcules=list3;
pasapas tab1;
```

Anejo 6. Fichero de comandos para el ensayo del prisma

Cet essai a été fait avec le logiciel Cast3m :

```
*-------------------------------
*             PRISME            *
*-------------------------------
*
*CALCUL GEOMETRIE
*
opti dime 3 elem cub8;
*
* Longueurs principaux
*
nr1=0.065;
nh1=0.12;
ef1=0.03;
ef2=0.015;
*
* Calcul base
*
*nxB=nr1*cos(pi/8);
*nyB=nr1*sin(pi/8);
*nxB=nr1*0.923879533;
*nyB=nr1*0.382683432;
*P0=0. 0. 0.;
*PA=nr1 0. 0.;
*PB=0. nr1 0.;
*dorth=-1*nyB nxB 0.;
*nor1=norm dorth;
*vnorm=dorth/nor1;
P0=0. 0. 0.;
PA=nr1 0. 0.;
PB=0. nr1 0.;
L0A=P0 droit 1 PA;
L0B=PB droit 1 P0;
arc1=cerc 1 PA P0 PB;
arct=arc1 et L0A et L0B;
base=surf plan arct;
elim (base et arct) 0.0001;
*trac base;
*
* Surfaces laterales
*
P1=0. 0. nh1;
axev=P0 droit 8 P1;
s1=L0A trans 8 P1;
elim (s1 et axev) 0.0001;
s2=L0B trans 8 P1;
elim (s2 et axev) 0.0001;
sp=arc1 trans 8 P1;
*
* Surface supérieure
*
ssup=base plus P1;
*
* Prisme
*
prism=base volu 8 trans P1;
elim (prism et axev et base) 0.0001;
elim (prism et s1) 0.0001;
elim (prism et s2) 0.0001;
elim (prism et sp) 0.0001;
elim (prism et ssup) 0.0001;
*
* frettés par un anneau d'acier
*
d1=0. 0. ef1;
d2=0. 0. ef2;
ac1=arct plus d2;
elim (prism et ac1) 0.0001;
ac2=ac1 plus d1;
elim (prism et ac2) 0.0001;
ac3=ac2 plus d1;
elim (prism et ac3) 0.0001;
ac4=ac3 plus d1;
elim (prism et ac4) 0.0001;
actot=ac1 et ac2 et ac3 et ac4;

*trac prism cach;

*
* MODELE
*

*Béton

mod1=mode prism mecanique elastique
viscoplastique fluendo3d;
*taille des elements finis
tail1=tail direction mod1;

*Aciers

*mod2=mode fretot mecanique elastique
coq4;
mod2=mode actot mecanique elastique
barr;

*
* MATERIAU
*

*béton

rc1=29.;
youn1=11000*(rc1**0.33);
youn1=37200.;
```

```
nu1=0.2;
mu11=(youn1/2.)/(1.+nu1);
k11=(youn1/3.)/(1.-(2.*nu1));

*creattion de l evolution pour la rag
lx1=prog 0. 1.;
ly1=prog 0. 1.;
evvg1=evol manu 'RAG' lx1 'VG' ly1;
*evolution volume de gel (rag)
*dess evvg1 titr 'VG(RAG)';

mat1=( mate mod1 YOUN youn1 NU nu1
RHO 2400. ALPH 1.e-5
 RC 38.3 EPC 2.e-3 RT 3.7 EPT 2.e-4
 GFTL 1.57e-4 WREF 5.e-6 TPHI 1. DELT
0.15 GFCL 2.36e-2
 HYDR 1 HYDS 0.2 EPSP 3.5e-3 BIOT 0.3
 PORO 0.112 VW 0. MW 0.  AW 1.5  VG
evvg1 MG 27.7e3 VG0 0.0e-2
 Y1SY 6.1 TAU1 1. TAU2 14.  FLUS 0.4
NRJA 4.7e4
 EPS0 1.5e-3 DFMX 0.2 TAUG 1) et
tail1;
mova1='E1S';

*acier

epa0=0.03;
ray0=0.008;
sect0=(pi*(ray0**2));
carmat1=mate mod2 YOUN 200000 NU 0.3
RHO 0 ALPH 0.e-5;
*cargeo1=cara mod2 EPAI epa0;
cargeo1=cara mod2 sect sect0;
mat2=carmat1 et cargeo1;

*
* CONDITIONS DE CONTOUR
*

COND1=BLOQ UZ base;
COND2=BLOQ UX s2;
*COND3=BLOQ DIRECTION vnorm s1;
COND3=BLOQ UY s1;
cl0=COND1 ET COND2 ET COND3;

*
* CHARGEMENT
*
*creation d une pression impossee en
surface superieure
pres1=PRES 'MASS' MOD1 1.e-4 ssup;
lpr1=prog 1. 1.;
ltpr1=prog 0. 500.;
evol1=evol manu 'TEMPS' ltpr1 'PRES1'
lpr1;
charm1=char 'MECA' (pres1 ) evol1;

*creation d un chargement thermique
defini par un champ variable
temp1=manu chpo prism 'T' 1.;
lstth1=prog 0. 500.;
lscth1=prog 20. 20.;
evth1=evol manu 'TEMPS' lstth1
'COEFF' lscth1 coul roug;
*dess evth1 titr 'TEMPERATURE';
chath1=char 'T' temp1 evth1;

*creation d un chargement de rag
rag1=manu chpo prism 'RAG' 1.;
lstrag1=prog 0. 275 500.;
lscrag1=prog 0. 0.26e-2 0.26e-2;
evrag1=evol manu 'TEMPS' lstrag1
'COEFF' lscrag1 coul bleu;
*dess evrag1 titr 'RAG';
charag1=char 'RAG' rag1 evrag1;

*creation d un chargement de poids
propre
mas1 = masse mod1 mat1;
ppro1=manu chpo prism UZ (-9.81e-6);
fpp1=mas1 * ppro1;
ltcM1=prog 0. 2000.;
lblo1=prog 1. 1.;
evclz1=evol manu 'TEMPS' ltcM1 'FZ'
lblo1;
charPP1=char 'MECA' fpp1 evclz1;
*
* RESOLUTION PASABAS
*
*difinitions pour le calcul pas a pas
du chargement initial
tab1=table;
ltc1=prog 0. pas 1. 2000.;
tab1.temps_calcules=ltc1;
tab1.caracteristiques=mat1;
tab1.modele=mod1;
tab1.blocages_mecaniques=cl0;
tab1.mova=mova1;
tab1.chargement=charm1 et charPP1 et
charag1 et chath1;
tab1.precision=1.d-5;
tab1.maxiteration=100;
*opti donn 5;
pasapas tab1;
```

Anejo 7. Fichero de comandos para el ensayo del cubo en expansión libre

Cet essai a été fait avec le logiciel Cast3m :

```
*-------------------------------
*          CUBE                *
*-------------------------------
*CALCUL GEOMETRIE
*
*maillage 1/8 eprouvette 11*22
opti dime 3 elem cub8;
*cu20;
nh1=1;
nl1=1;
np1=1;
p1=0. 0. 0. ;
p2=0.1  0. 0. ;
p3=0.1 0.1  0. ;
p4=0. 0.1  0. ;
p5=0. 0. 0.1 ;
d12=droi nl1 p1 p2;
d23=droi np1 p2 p3;
d34=droi nl1 p3 p4;
d41=droi np1 p4 p1;
d15=droi nh1 p1 p5;
*surface inferieuer
s3=daller d12 d23 d34 d41;
v1=s3 volu nh1 tran p5;
elim (v1 et d15) 0.0005;
*surface superieure
s4=(s3 plus p5) coul roug ;
elim (v1 et s3) 0.0001;
elim (v1 et s4) 0.0001;
*axe
d3=d15;
elim (v1 et d3) 0.0001;
*surface de coupe avant
s11=d12 tran nh1 p5;
s10=s11;
elim (s10 et v1) 0.0001;
*surface de coupe laterale gauche
s41=d41 tran nh1 p5;
s40=s41;
elim (s40 et v1) 0.0001;
*oeil1=-0.25 -0.5 2.;
*surface de droite
s23=d23 tran nh1 p5;
*surface arriere
s34=d34 tran nh1 p5;
elime (v1 et s23 et s34) 0.0001;
trac v1 cach;
*opti donn 5;
*
* MODELE
*
mod1=MODE v1 MECANIQUE ELASTIQUE
VISCOPLASTIQUE
FLUENDO3D;
*taille des elements finis
tail1=tail direction mod1;
*
* MATERIAU
*
rc1=29.;
youn1=11000*(rc1**0.33);
youn1=41838.;
nu1=0.17;
mu11=(youn1/2.)/(1.+nu1);
k11=(youn1/3.)/(1.-(2.*nu1));

*creation de l evolution pour la
rag
lx1=prog 0. 1.;
ly1=prog 0. 1.;
evvg1=evol manu 'RAG' lx1 'VG'
ly1;
*evolution volume de gel (rag)
dess evvg1 titr 'VG(RAG)';

mat1=( mate mod1 YOUN youn1 NU
nu1 RHO 2400. ALPH 1.e-5
 RC 37.6 EPC 2.e-3 RT 3. EPT
1.3e-4
 GFTL 1.e-4 WREF 5.e-6 TPHI 1.
DELT 0.15 GFCL 100.2e-1
 HYDR 1 HYDS 0.2 EPSP 3.5e-3 BIOT
0.45
 PORO 0.112 VW 0. MW 0.  AW 1.5
VG evvg1 MG 30.e3 VG0 1.e-3
 Y1SY 6.1 TAU1 1. TAU2 14.  FLUS
0.4  NRJA 3.65e4
 EPS0 1.5e-3 DFMX 0.2 TAUG 0.01)
et tail1;
*
```

```
* CONDITIONS DE CONTOUR
*
COND1=BLOQ UX s40;
COND2=BLOQ UY s10;
COND3=BLOQ UZ s3;
*bs4=BLOQ UZ s4;
*cl0=COND1 ET COND2 ET COND3 ET
bs4;
cl0=COND1 ET COND2 ET COND3;
*

*creation d un chargement
thermique defini par un champ
variable
temp1=manu chpo v1 'T' 1.;
lstth1=prog 0. 400.;
lscth1=prog 38. 38.;
*lscth1=prog 0. 0.;
evth1=evol manu 'TEMPS' lstth1
'COEFF' lscth1 coul roug;
dess evth1 titr 'TEMPERATURE';
chath1=char 'T' temp1 evth1;

*creation d un chargement de rag
rag1=manu chpo v1 'RAG' 1.;
lstrag1=prog 0. 200. 400.;
lscrag1=prog 0. 1.e-2 1.e-2;
evrag1=evol manu 'TEMPS' lstrag1
'COEFF' lscrag1 coul bleu;
dess evrag1 titr 'RAG';
charag1=char 'RAG' rag1 evrag1;

*creation d un chargement de
poids propre
mas1 = masse mod1 mat1;
ppro1=manu chpo v1 UZ (-9.81e-6);
fpp1=mas1 * ppro1;
ltcM1=prog 0. 400.;
lblo1=prog 1. 1.;
evclz1=evol manu 'TEMPS' ltcM1
'FZ' lblo1;
charPP1=char 'MECA' fpp1 evclz1;

*creation d une pression impossee
en surface superieure
pres1=PRES 'MASS' MOD1 10. s4;
lpr1=prog 1. 1.;
ltpr1=prog 0. 400.;
evol1=evol manu 'TEMPS' ltpr1
'PRES1' lpr1;
charm1=char 'MECA' (pres1 )
evol1;

*opti donn 5;

*
* RESOLUTION PASABAS
*
RIGI1=RIGI mod1 mat1;
RGIPOUT=RIGI1 ET cl0;

*difinitions pour le calcul pas a
pas du chargement initial
tab1=table;
ltc1=prog 0. pas 1.  400.;
tab1.temps_calcules=ltc1;
tab1.caracteristiques=mat1;
tab1.modele=mod1;
tab1.blocages_mecaniques=cl0;
tab1.mova='E1S';
tab1.chargement=chath1 et charag1
et charPP1 et charm1;
tab1.precision=1.d-4;
tab1.maxiteration=100;
*opti donn 5;
pasapas tab1;
*opti donn 5;
```

Anejo 8. Fichero de comandos para el ensayo de la viga bi-apoyada

Cet essai a été fait avec le logiciel Cast3m :

```
*-------------------------------
*            POUTRE             *
*-------------------------------
*CALCUL GEOMETRIE
*
OPTI DIME 3 ELEM CUB8;
*
*COTE APPUI
*
P11=0. 0. 0.;
P12=0. 0.2 0;
P13=0. 0. 0.5;
P14=0. 0.2 0.5;
*
*DROITE APPUI
*
Pap1=0.05 0. 0.05;
Pap2=0.05 0.2 0.05;
app=Pap1 droit 4 Pap2;
*
*COTE APPUI
*
L11=P11 DROI 4 P12;
L12=P12 DROI 10 P14;
L13=P14 DROI 4 P13;
L14=P13 DROI 10 P11;
*
CONT1=L11 ET L12 ET L13 ET L14;
*
COTE1=SURFACE PLAN CONT1;
*
*COTE SYM
*
P21=2.5 0. 0.;
P22=2.5 0.2 0;
P23=2.5 0. 0.5;
P24=2.5 0.2 0.5;
p51=2.5 0.1 0.25;
p52=0. 0.1 0.25;
*
Lax=p52 droi 50 p51;
L21=P21 DROI 4 P22;
L22=P22 DROI 10 P24;
L23=P23 DROI 10 P21;
*
*DROITE DE CHARGE
*
L24=P24 DROI 4 P23;
*
CONT2=L21 ET L22 ET L24 ET L23;
*
COTESYM=SURF PLAN CONT2;
*
*ACIERS
*
Pa11=0. 0.05 0.05;
Pa12=2.5 0.05 0.05;
Pa21=0. 0.15 0.05;
Pa22=2.5 0.15 0.05;
ac1=Pa11 droit 50 Pa12;
ac2=Pa21 droit 50 Pa22;
ac=ac1 et ac2;
*
*COTE LATERAL
*
Ly=P12 DROIT 50 P22;
COTY=Ly TRAN 10 P13;
*
*POUTRE
*
POUTRE=COTE1 VOLU 50 COTESYM;
elim (POUTRE et Ly et COTY  et ac1 et
ac2 et app) 0.0001;
TRACER POUTRE CACH;

*
* MODELE
*

*Béton

mod1=MODE POUTRE MECANIQUE ELASTIQUE
VISCOPLASTIQUE
FLUENDO3D;
*taille des elements finis
tail1=tail direction mod1;

*Aciers

mod2=mode ac1 mecanique elastique
barr;
mod3=mode ac2 mecanique elastique
barr;

*
* MATERIAU
*

*béton

rc1=29.;
youn1=11000*(rc1**0.33);
```

```
youn1=37200.;
nu1=0.27;
mu11=(youn1/2.)/(1.+nu1);
k11=(youn1/3.)/(1.-(2.*nu1));


mat1=( mate mod1 YOUN youn1 NU nu1
RHO 2400. ALPH 0.e-5
 RC 36. EPC 2.e-3 RT 3.45 EPT
((1.2*3.45)/youn1)
 GFTL 0.186e-4 WREF 5.e-6 TPHI 1.
DELT 0.15 GFCL 1.e-2
 HYDR 1 HYDS 0.2 EPSP 3.5e-3 BIOT 0.3
 PORO 0.112 VW 0. MW 0.  AW 1.5  VG
0. MG 0. VG0 0.01
 Y1SY 6.1 TAU1 1. TAU2 14.  FLUS 0.4
NRJA 4.7e4
 EPS0 1.5e-3 DFMX 0.2 TAUG 1) et
tail1;
mova1='E1S';


*acier

ry0=(0.032/2);
sec0=(pi*(ry0**2));
carmat1=mate mod2 YOUN 200000 NU 0.3
RHO 0 ALPH 0.e-5;
cargeo1=cara mod2 SECT sec0;
mat2=carmat1 et cargeo1;
carmat2=mate mod3 YOUN 200000 NU 0.3
RHO 0 ALPH 0.e-5;
cargeo2=cara mod3 SECT sec0;
mat3=carmat2 et cargeo2;

*
* CONDITIONS DE CONTOUR
*
COND1=BLOQ UZ app;
COND2=BLOQ UX COTESYM;
COND3=BLOQ UY COTY;
cl0=COND1 ET COND2 ET COND3;
*
* DESPLACEMENT IMPOSÉ
*
bL24=BLOQ UZ L24;
depl0=DEPI bL24 1.;
ldp1=prog 0. -0.01;
ldt1=prog 0. 0.5;
evoldp=evol manu 'TEMPS' ldt1
'DEPL_IMPOSE' ldp1;
dess evoldp;
depl1=CHAR 'DIMP' depl0 evoldp;

*creation d un chargement de poids
propre
mas1 = masse mod1 mat1;
ppro1=manu chpo POUTRE UZ (-9.81e-6);
fpp1=mas1 * ppro1;
ltcM1=prog 0. 100.;
lblo1=prog 1. 1.;
evclz1=evol manu 'TEMPS' ltcM1 'FZ'
lblo1;
charPP1=char 'MECA' fpp1 evclz1;

*creation d un chargement thermique
defini par un champ variable
temp1=manu chpo POUTRE 'T' 1.;
lstth1=prog 0. 100.;
lscth1=prog 20. 20.;
evth1=evol manu 'TEMPS' lstth1
'COEFF' lscth1 coul roug;
dess evth1 titr 'TEMPERATURE';
chath1=char 'T' temp1 evth1;

*creation d un chargement hydratation
defini par un champ variable
*hydra1=manu chpo POUTRE 'CHYD' 1.;
*lsthyd1=prog 0. 100.;
*lschyd1=prog 1. 1.;
*evhyd1=evol manu 'TEMPS' lsthyd1
'COEFF' lschyd1 coul roug;
*dess evhyd1 titr 'HYDRATATION';
*chahyd1=char 'CHYD' hydra1 evhyd1;

*
* RESOLUTION PASABAS
*

*difinitions pour le calcul pas a pas
du chargement initial

tab1=table;
tab1.modele=mod1 et mod2 et mod3;
tab1.caracteristiques=mat1 et mat2 et
mat3;
tab1.blocages_mecaniques=cl0 et bL24;
tab1.chargement=depl1 et chath1 et
charPP1;
tab1.mova=mova1;
tab1.precision=1.e-3;
tab1.precflex=tab1.precision;
tab1.mes_sauvegardes=table;
tab1.mes_sauvegardes.defto=vrai;
tab1.processeurs="AUTOMATIQUE";
list3=prog 0. pas 0.005 0.5;
tab1.temps_calcules=list3;
pasapas tab1;
```

Anejo 9. Fichero de comandos de la construcción de Kariba

Ce calcul a été fait avec Code-Aste

```
DEBUT();

PRE_IDEAS();

mail=LIRE_MAILLAGE();

mail=MODI_MAILLAGE(reuse =mail,
            MAILLAGE=mail,
            ORIE_PEAU_3D=_F(GROUP_MA='AMONT',),);


modl=AFFE_MODELE(MAILLAGE=mail,
          AFFE=_F(TOUT='OUI',
               PHENOMENE='MECANIQUE',
               MODELISATION='3D',),);

modl01=AFFE_MODELE(MAILLAGE=mail,
            AFFE=_F(GROUP_MA=('FONDAT','PAIRS',),
                PHENOMENE='MECANIQUE',
                MODELISATION='3D',),);

modl02=AFFE_MODELE(MAILLAGE=mail,
            AFFE=_F(GROUP_MA=('FONDAT','IMPAIRS',),
                PHENOMENE='MECANIQUE',
                MODELISATION='3D',),);

E0=DEFI_CONSTANTE(VALE=2.2E10,);

NU0=DEFI_CONSTANTE(VALE=0.2,);

ALP0=DEFI_CONSTANTE(VALE=0.E-10,);

beton=DEFI_MATERIAU(ELAS_FO=_F(E=E0,
                    NU=NU0,
                    TEMP_DEF_ALPHA=27.0,
                    ALPHA=ALP0,
                              RHO=2350),
                             BETON_RAG=_F(
```

```
                                        #OPERANDES LIEES AU FLUAGE

                                         #OPERANDES LIEES A L'ENDOMMAGEMENT

                                         #OPERANDES LIEES AU RETRAIT ENDOGENE

                                         #OPERANDES LIEES A LA FORMATION DE GEL

rocher=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=1.e10,
                     NU=0.2,
                     RHO=0,),);


SECHI=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                 OPERATION='AFFE',
                       MAILLAGE=mail,
                       AFFE=_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                               NOM_CMP='TEMP',
                               VALE=1.,),);

SECHF=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                 OPERATION='AFFE',
                       MAILLAGE=mail,
                       AFFE=_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                               NOM_CMP='TEMP',
                               VALE=1.,),);

SECH=CREA_RESU(OPERATION='AFFE',
               TYPE_RESU='EVOL_THER',
               NOM_CHAM='TEMP',
               AFFE=(_F(CHAM_GD=SECHI,
                     INST=0,),
                        _F(CHAM_GD=SECHF,
                          INST=2011,),),);

TEMPI=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                 OPERATION='AFFE',
                       MAILLAGE=mail,
                       AFFE=_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                               NOM_CMP='TEMP',
                               VALE=27.0,),);

TEMPF=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                 OPERATION='AFFE',
                       MAILLAGE=mail,
                       AFFE=_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                               NOM_CMP='TEMP',
```

```
                                VALE=27.0,),);

TEMP=CREA_RESU(OPERATION='AFFE',
               TYPE_RESU='EVOL_THER',
               NOM_CHAM='TEMP',
               AFFE=(_F(CHAM_GD=TEMPI,
                     INST=0,),
                         _F(CHAM_GD=TEMPF,
                           INST=2011,),),);

SECHI01=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                OPERATION='AFFE',
                      MAILLAGE=mail,
                      AFFE=_F(GROUP_MA='PAIRS',
                                NOM_CMP='TEMP',
                                VALE=1.,),);

SECHF01=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                OPERATION='AFFE',
                      MAILLAGE=mail,
                      AFFE=_F(GROUP_MA='PAIRS',
                                NOM_CMP='TEMP',
                                VALE=1.,),);

SECH01=CREA_RESU(OPERATION='AFFE',
               TYPE_RESU='EVOL_THER',
               NOM_CHAM='TEMP',
               AFFE=(_F(CHAM_GD=SECHI01,
                     INST=0,),
                         _F(CHAM_GD=SECHF01,
                           INST=2011,),),);

TEMPI01=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                OPERATION='AFFE',
                      MAILLAGE=mail,
                      AFFE=_F(GROUP_MA='PAIRS',
                                NOM_CMP='TEMP',
                                VALE=27.0,),);

TEMPF01=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                OPERATION='AFFE',
                      MAILLAGE=mail,
                      AFFE=_F(GROUP_MA='PAIRS',
                                NOM_CMP='TEMP',
                                VALE=27.0,),);

TEMP01=CREA_RESU(OPERATION='AFFE',
```

```
                TYPE_RESU='EVOL_THER',
                NOM_CHAM='TEMP',
                AFFE=(_F(CHAM_GD=TEMPI01,
                      INST=0,),
                          _F(CHAM_GD=TEMPF01,
                            INST=2011,),),);


SECHI02=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                 OPERATION='AFFE',
                       MAILLAGE=mail,
                       AFFE=_F(GROUP_MA='IMPAIRS',
                                   NOM_CMP='TEMP',
                                   VALE=1.,),);

SECHF02=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                 OPERATION='AFFE',
                       MAILLAGE=mail,
                       AFFE=_F(GROUP_MA='IMPAIRS',
                                   NOM_CMP='TEMP',
                                   VALE=1.,),);

SECH02=CREA_RESU(OPERATION='AFFE',
                TYPE_RESU='EVOL_THER',
                NOM_CHAM='TEMP',
                AFFE=(_F(CHAM_GD=SECHI02,
                      INST=0,),
                          _F(CHAM_GD=SECHF02,
                            INST=2011,),),);

TEMPI02=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                 OPERATION='AFFE',
                       MAILLAGE=mail,
                       AFFE=_F(GROUP_MA='IMPAIRS',
                                   NOM_CMP='TEMP',
                                   VALE=27.0,),);

TEMPF02=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
                 OPERATION='AFFE',
                       MAILLAGE=mail,
                       AFFE=_F(GROUP_MA='IMPAIRS',
                                   NOM_CMP='TEMP',
                                   VALE=27.0,),);

TEMP02=CREA_RESU(OPERATION='AFFE',
                TYPE_RESU='EVOL_THER',
                NOM_CHAM='TEMP',
```

```
                AFFE=(_F(CHAM_GD=TEMPI02,
                      INST=0,),
                          _F(CHAM_GD=TEMPF02,
                            INST=2011,),),);


affe=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=mail,
              AFFE=(_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                  MATER=beton,),
                _F(GROUP_MA='FONDAT',
                  MATER=rocher,),),
              AFFE_VARC=(_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                                        EVOL=SECH,
                      NOM_VARC='SECH',
                                        NOM_CHAM='TEMP',
                                        PROL_DROITE='CONSTANT',
                                        PROL_GAUCHE='CONSTANT',),
                                      _F(GROUP_MA='BARRAGE',
                                        EVOL=TEMP,
                      NOM_VARC='TEMP',
                                        NOM_CHAM='TEMP',
                                        VALE_REF=27,),),);


affe01=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=mail,
              AFFE=(_F(GROUP_MA='PAIRS',
                  MATER=beton,),
                _F(GROUP_MA='FONDAT',
                  MATER=rocher,),),
              AFFE_VARC=(_F(GROUP_MA='PAIRS',
                                        EVOL=SECH01,
                      NOM_VARC='SECH',
                                        NOM_CHAM='TEMP',
                                        PROL_DROITE='CONSTANT',
                                        PROL_GAUCHE='CONSTANT',),
                                      _F(GROUP_MA='PAIRS',
                                        EVOL=TEMP01,
                      NOM_VARC='TEMP',
                                        NOM_CHAM='TEMP',
                                        VALE_REF=27,),),);

affe02=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=mail,
              AFFE=(_F(GROUP_MA='IMPAIRS',
                  MATER=beton,),
                _F(GROUP_MA='FONDAT',
                  MATER=rocher,),),
              AFFE_VARC=(_F(GROUP_MA='IMPAIRS',
```

```
                                        EVOL=SECH02,
                    NOM_VARC='SECH',
                                        NOM_CHAM='TEMP',
                                        PROL_DROITE='CONSTANT',
                                        PROL_GAUCHE='CONSTANT',),
                                       _F(GROUP_MA='IMPAIRS',
                                        EVOL=TEMP02,
                    NOM_VARC='TEMP',
                                        NOM_CHAM='TEMP',
                                        VALE_REF=27,),),);


charg=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl,
                PESANTEUR=_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                        GRAVITE=9.81,
                        DIRECTION=(0,0,-1,),),);


charg01=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl01,
                PESANTEUR=_F(GROUP_MA='PAIRS',
                        GRAVITE=9.81,
                        DIRECTION=(0,0,-1,),),);


charg02=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl02,
                PESANTEUR=_F(GROUP_MA='IMPAIRS',
                        GRAVITE=9.81,
                        DIRECTION=(0,0,-1,),),);



fixe=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl,
               DDL_IMPO=_F(GROUP_MA='SSFONDAT',
                    DX=0,
                    DY=0,
                    DZ=0,),);

fixe01=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl01,
                DDL_IMPO=_F(GROUP_MA='SSFONDAT',
                     DX=0,
                     DY=0,
                     DZ=0,),);

fixe02=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl02,
                DDL_IMPO=_F(GROUP_MA='SSFONDAT',
                     DX=0,
                     DY=0,
```

```
                    DZ=0,),);

etape0X=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=1956,
                INTERVALLE=_F(JUSQU_A=1957,
                        PAS=1,),);

resu01=STAT_NON_LINE(MODELE=modl01,
            CHAM_MATER=affe01,
            EXCIT=(_F(CHARGE=fixe01,),
                        _F(CHARGE=charg01,),),
            COMP_INCR=(_F(RELATION='BETON_RAG',
                                    GROUP_MA='PAIRS',),
                                  _F(RELATION='ELAS',
                                    GROUP_MA='FONDAT'),),
            INCREMENT=_F(LIST_INST=etape0X,
                    INST_INIT=1956,),);

resu02=STAT_NON_LINE(MODELE=modl02,
            CHAM_MATER=affe02,
            EXCIT=(_F(CHARGE=fixe02,),
                        _F(CHARGE=charg02,),),
            COMP_INCR=(_F(RELATION='BETON_RAG',
                                    GROUP_MA='IMPAIRS',),
                                  _F(RELATION='ELAS',
                                    GROUP_MA='FONDAT'),),
            INCREMENT=_F(LIST_INST=etape0X,
                    INST_INIT=1956,),);

assemb=STAT_NON_LINE(MODELE=modl,
            CHAM_MATER=affe,
            EXCIT=(_F(CHARGE=fixe,),
                        _F(CHARGE=charg,),),
            COMP_INCR=(_F(RELATION='BETON_RAG',
                                    GROUP_MA='BARRAGE',),
                                  _F(RELATION='ELAS',
                                    GROUP_MA='FONDAT'),),
            INCREMENT=_F(LIST_INST=etape0X,
                    INST_INIT=1956,),);

sig01=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_SIEF_R',
          OPERATION='EXTR',
          RESULTAT=resu01,
          NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
          INST=1957,);

sig02=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_SIEF_R',
          OPERATION='EXTR',
```

```
            RESULTAT=resu02,
            NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
            INST=1957,);

sigassem=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_SIEF_R',
              OPERATION='EXTR',
              RESULTAT=assemb,
              NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
              INST=1957,);

varin01=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_VARI_R',
              OPERATION='EXTR',
              RESULTAT=resu01,
              NOM_CHAM='VARI_ELGA',
              INST=1957,);

varin02=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_VARI_R',
              OPERATION='EXTR',
              RESULTAT=resu02,
              NOM_CHAM='VARI_ELGA',
              INST=1957,);

varin=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_VARI_R',
              OPERATION='EXTR',
              RESULTAT=assemb,
              NOM_CHAM='VARI_ELGA',
              INST=1957,);


siginit=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_SIEF_R',
            OPERATION='ASSE',
            MODELE=modl,
            ASSE=(
            _F(GROUP_MA=('BARRAGE','FONDAT',),
              CHAM_GD=sigassem,
              CUMUL='NON',
              COEF_R=0,),
            _F(GROUP_MA=('FONDAT','PAIRS',),
              CHAM_GD=sig01,
              CUMUL='OUI',
              COEF_R=1.0,),
            _F(GROUP_MA=('FONDAT','IMPAIRS',),
              CHAM_GD=sig02,
              CUMUL='OUI',
              COEF_R=1.0,),),);

varinit=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_VARI_R',
```

```
            OPERATION='ASSE',
            MODELE=modl,
            ASSE=(
            _F(GROUP_MA=('BARRAGE','FONDAT',),
              CHAM_GD=varin,
              CUMUL='NON',
              COEF_R=0,),
            _F(GROUP_MA=('FONDAT','PAIRS',),
              CHAM_GD=varin01,
              CUMUL='OUI',
              COEF_R=1.0,),
            _F(GROUP_MA=('FONDAT','IMPAIRS',),
              CHAM_GD=varin02,
              CUMUL='OUI',
              COEF_R=1.0,),),);



defo01=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_DEPL_R',
            OPERATION='EXTR',
            RESULTAT=resu01,
            NOM_CHAM='DEPL',
            INST=1957,);


defo02=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_DEPL_R',
            OPERATION='EXTR',
            RESULTAT=resu02,
            NOM_CHAM='DEPL',
            INST=1957,);


defo=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_DEPL_R',
            OPERATION='EXTR',
            RESULTAT=assemb,
            NOM_CHAM='DEPL',
            INST=1957,);

defoin=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_DEPL_R',
            OPERATION='ASSE',
                        MODELE=modl,
            ASSE=(
            _F(GROUP_MA=('CONTACT'),
              CHAM_GD=defo,
                          CUMUL='NON',
              COEF_R=0,),
            _F(GROUP_MA=('CONTACT',),
```

```
                CHAM_GD=defo01,
                CUMUL='OUI',
                COEF_R=1.0,),
              _F(GROUP_MA=('CONTACT',),
                CHAM_GD=defo02,
                CUMUL='OUI',
                COEF_R=1.0,),),);


etapX=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=1957,
                 INTERVALLE=_F(JUSQU_A=1958,
                        PAS=1,),);

fixe2=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl,
               DDL_IMPO=_F(GROUP_MA='CONTACT',
                      DX=0,
                      DY=0,
                      DZ=0,),);


resu=STAT_NON_LINE(MODELE=modl,
              CHAM_MATER=affe,
              EXCIT=(_F(CHARGE=fixe,),
                            _F(CHARGE=charg,),),
                      RECH_LINEAIRE=_F(METHODE='MIXTE',
                                 ITER_LINE_MAXI=10,),
                      COMP_INCR=(_F(RELATION='BETON_RAG',
                                        GROUP_MA='BARRAGE',),
                                 _F(RELATION='ELAS',
                                        GROUP_MA='FONDAT'),),
              INCREMENT=_F(LIST_INST=etapX,
                                INST_INIT=1957,),
              ETAT_INIT=_F(SIGM=siginit,VARI=varinit),
              CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=1E-4,
                                ITER_GLOB_MAXI=10,
                        ARRET='NON',),);



FIN();
```

Anejo 10. Fichero de comandos para Kariba sin AAR

On fait une poursuite de la construction du barrage :

```
POURSUITE();


##############################################

#              MATERIAU              #

##############################################

beton2=DEFI_MATERIAU(ELAS_FO=_F(E=E0,
                     NU=NU0,
                     TEMP_DEF_ALPHA=27.0,
                     ALPHA=ALP0,
                                  RHO=2350),
                                 BETON_RAG=_F(
                                 #OPERANDES LIEES AU FLUAGE

                                  #OPERANDES LIEES A L'ENDOMMAGEMENT

                                  #OPERANDES LIEES AU RETRAIT ENDOGENE

                                  #OPERANDES LIEES A LA FORMATION DE GEL

affe2=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=mail,
                AFFE=(_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                    MATER=beton2,),
                  _F(GROUP_MA='FONDAT',
                    MATER=rocher,),),
                AFFE_VARC=(_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                                        EVOL=SECH,
                        NOM_VARC='SECH',
                                        NOM_CHAM='TEMP',
                                        PROL_DROITE='CONSTANT',
                                        PROL_GAUCHE='CONSTANT',),
                                       _F(GROUP_MA='BARRAGE',
                                        EVOL=TEMP,
                        NOM_VARC='TEMP',
```

```
                                        NOM_CHAM='TEMP',
                                        VALE_REF=27,),),);

##############################################

#          CHARGES ET C.L.              #

##############################################


pesant=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl,
                PESANTEUR=_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                             GRAVITE=9.81,
                             DIRECTION=(0,0,-1,),),);

clim=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl,
              DDL_IMPO=_F(GROUP_MA='SSFONDAT',
                      DX=0,
                      DY=0,
                      DZ=0,),);

linst=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=1958,
              INTERVALLE=(_F(JUSQU_A=1963,
                        PAS=5,),
                      _F(JUSQU_A=1974,
                        PAS=11,),
                      _F(JUSQU_A=1982,
                        PAS=8,),),);



niv_am=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='INST',VALE=(1958,0,
                1963, 483.8,
                1974, 486.1,
                1982,479.9,),
                             PROL_GAUCHE='CONSTANT',
                             PROL_DROITE='CONSTANT',
                             INTERPOL=('LIN','LIN',));



pres = FORMULE(VALE='max(1000*9.8*(niv_am(INST)-Z),0)',
          NOM_PARA=('Z','INST',),);

pres_k=AFFE_CHAR_MECA_F(VERI_NORM='OUI',
                 MODELE=modl,
                 PRES_REP=_F(GROUP_MA='AMONT',
```

```
                    PRES=pres,),);


##############################################

#          RESOLUTION              #

##############################################



calc_k=STAT_NON_LINE(MODELE=modl,
            CHAM_MATER=affe2,
            EXCIT=(_F(CHARGE=pres_k,
                        TYPE_CHARGE='SUIV',),
                        _F(CHARGE=clim,
                        TYPE_CHARGE='FIXE_CSTE',),
                        _F(CHARGE=pesant,
                        TYPE_CHARGE='FIXE_CSTE',),),
            RECH_LINEAIRE=_F(METHODE='MIXTE',
                        ITER_LINE_MAXI=10,),
            COMP_INCR=(_F(RELATION='BETON_RAG',
                                GROUP_MA='BARRAGE',),
                              _F(RELATION='ELAS',
                                GROUP_MA='FONDAT'),),
            INCREMENT=_F(LIST_INST=linst,),
                  NEWTON=_F(PREDICTION='ELASTIQUE',
              MATRICE='TANGENTE',),
                  ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=resu,
                INST_ETAT_INIT=1958,),
            CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=1E-6,
                        ITER_GLOB_MAXI=10,
                  ARRET='NON',),);

FIN();
```

Anejo 11. Fichero de comandos para Kariba con AAR

On fait une poursuite de la construction du barrage :

```
POURSUITE();

##############################################

#              MATERIAU              #

##############################################


beton2=DEFI_MATERIAU(ELAS_FO=_F(E=E0,
                     NU=NU0,
                     TEMP_DEF_ALPHA=27.0,
                     ALPHA=ALP0,
                                  RHO=2350),
                                 BETON_RAG=_F(
                                 #OPERANDES LIEES AU FLUAGE

                                  #OPERANDES LIEES A L'ENDOMMAGEMENT

                                  #OPERANDES LIEES AU RETRAIT ENDOGENE

                                  #OPERANDES LIEES A LA FORMATION DE GEL

affe2=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=mail,
               AFFE=(_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                   MATER=beton2,),
                 _F(GROUP_MA='FONDAT',
                   MATER=rocher,),),
               AFFE_VARC=(_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                                     EVOL=SECH,
                     NOM_VARC='SECH',
                                     NOM_CHAM='TEMP',
                                     PROL_DROITE='CONSTANT',
                                     PROL_GAUCHE='CONSTANT',),
                                    _F(GROUP_MA='BARRAGE',
                                     EVOL=TEMP,
                     NOM_VARC='TEMP',
                                     NOM_CHAM='TEMP',
                                     VALE_REF=27,),),);
```

```
##############################################

#          CHARGES ET C.L.                #

##############################################



pesant=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl,
                PESANTEUR=_F(GROUP_MA='BARRAGE',
                             GRAVITE=9.81,
                             DIRECTION=(0,0,-1,),),);

clim=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=modl,
              DDL_IMPO=_F(GROUP_MA='SSFONDAT',
                      DX=0,
                      DY=0,
                      DZ=0,),);


linst=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=1958,
              INTERVALLE=_F(JUSQU_A=2011,
                        PAS=1,),);

niv_am=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='INST',VALE=(1958, 378,
                             1959, 443.69,
                             1960,  457.90,
                             1961, 468.77,
                             1962, 477.73,
                             1963, 485.33,
                             1964, 481.94,
                             1965, 484.20,
                             1966, 483.58,
                             1967, 483.33,
                             1968, 484.06,
                             1969, 484.75,
                             1970, 483.91,
                             1971, 483.92,
                             1972, 484.14,
                             1973, 483.09,
                             1974, 486.17,
                             1975, 485.09,
                             1976, 486.04,
                             1977, 486.30,
                             1978, 486.65,
                             1979, 486.20,
```

```
                    1980, 485.88,
                    1981, 486.32,
                    1982, 483.76,
                    1983, 481.19,
                    1984, 478.69,
                    1985, 478.46,
                    1986, 478.86,
                    1987, 478.67,
                    1988, 479.57,
                    1989, 482.50,
                    1990, 481.39,
                    1991, 480.30,
                    1992, 477.73,
                    1993, 479.13,
                    1994, 480.04,
                    1995, 477.96,
                    1996, 477.13,
                    1997, 479.64,
                    1998, 482.39,
                    1999, 485.86,
                    2000, 486.31,
                    2001, 485.75,
                    2002, 484.18,
                    2003, 483.59,
                    2004, 484.30,
                    2005, 481.61,
                    2006, 480.13,
                    2007, 480.13,
                    2008, 483.39,
                    2009, 484.75,
                    2010, 486.06),
                    PROL_GAUCHE='CONSTANT',
                    PROL_DROITE='CONSTANT',
                    INTERPOL=('LIN','LIN',));


pres=FORMULE(VALE='max(1000*9.8*(niv_am(INST)-Z),0)',
        NOM_PARA=('Z','INST',),);

pres_k=AFFE_CHAR_MECA_F(VERI_NORM='OUI',
                MODELE=modl,
                PRES_REP=_F(GROUP_MA='AMONT',
                        PRES=pres,),);


sigmin=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_SIEF_R',
            OPERATION='EXTR',
```

```
            RESULTAT=resu,
            NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
            INST=1958,);

deplin=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_DEPL_R',
            OPERATION='EXTR',
            RESULTAT=resu,
            NOM_CHAM='DEPL',
            INST=1958,);


##############################################

#           RESOLUTION              #

##############################################

calc_k=STAT_NON_LINE(MODELE=modl,
            CHAM_MATER=affe2,
            EXCIT=(
                        _F(CHARGE=pres_k,
                              TYPE_CHARGE='SUIV',),
                        _F(CHARGE=clim,
                              TYPE_CHARGE='FIXE_CSTE',),
                  _F(CHARGE=pesant,
                              TYPE_CHARGE='FIXE_CSTE',),),
                        RECH_LINEAIRE=_F(METHODE='MIXTE',
                                    ITER_LINE_MAXI=10,),
            COMP_INCR=(_F(RELATION='BETON_RAG',
                                          GROUP_MA='BARRAGE',),
                                         _F(RELATION='ELAS',
                                          GROUP_MA='FONDAT'),),
            INCREMENT=_F(LIST_INST=linst,),
                        NEWTON=_F(PREDICTION='ELASTIQUE',
                  MATRICE='TANGENTE',),
                        ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=resu,
                     INST_ETAT_INIT=1958,),
            CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=1E-6,
                                    ITER_GLOB_MAXI=10,
                      ARRET='NON',),);

FIN();
```

Anejo 12. Explicacion mallado de Kariba

I. Mesh description

Two meshes are proposed by the formulator. Both describe the dam with 3 or 4 elements in the thickness of the arch. The foundation is built with 4 layers of element around the dam.

The contact between the arch and its foundation is modelled by two ways:

- In the *BW11A_Model1.mesh* file, the arch is fully bonded to the foundation. No contact (joint) is modelled.
- In the *BW11A_Model2.mesh* file, joint elements are inserted between the dam and the foundation. Depending on the Finite Element software used, joints can modelled non linear contact behaviour like a Coulomb friction between two bodies for instance.

Both files are in text format.

II. File format

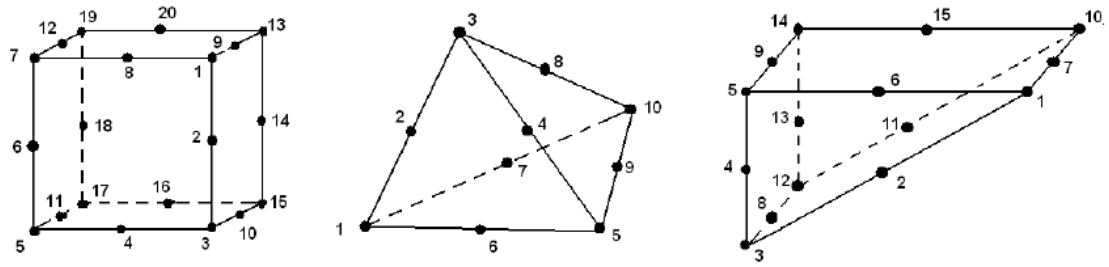
1. Line 1: COBMAIL
2. Line 2: Number of nodes, number of elements and number of elements groups
3. Line 3: Title of the study
4. Coordinate X, Y and Z of each node (1 node / line). The nodes numbers are automatically assigned from 1 to N.
5. For each group of elements:
    - Name of the group, Element type and Number of elements belongs to this group. Element types are described in section III.
    - Connectivity of each element (1 element / line)

III. Description of element types

Two element types are use in the model:

- Element type **VOLU**, which corresponds to 3D quadratic elements (). It can be a brick (20 nodes), tetrahedron (10 nodes) or prism (15 nodes).

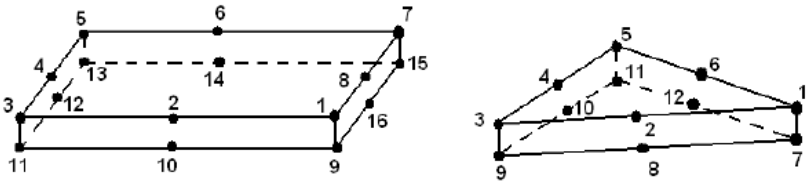
Figure 1: Connectivity of solid elements



Element 1: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Element 2: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Element 3: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 0 0 0 0 0

- Element type **JOIN**, which corresponds to a joint surface. It can be a quadrilateral (16 nodes) or a triangle (12 nodes).

Figure 2: Connectivity of joint elements



Element 4: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 0 0 0 0
Element 5: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 0 0 0 0 0 0 0 0

Pour faire la conversion a maillage idea on a du faire :

```
      program transcob

      implicit real(A-H,O-Z)

      character*20 NOM
      integer MODEL

      integer NBNOEUDS,NOEUDS,COUL
      real    XNOEUD(100000,3)

      integer NBELF,ELEMT,IDENT,MAT,ECOUL,NONOE,NE(10000,20)

      character*40 SETNAM
      integer NRS,SETNUM,SETTYP,NOERS,ICL1,ICL2
      real    VCL1,VCL2
      character*25 nomfn,nomfel
c-----------------------------------------------------------------
      write(*,997)


      nomfn = "noeuds.mesh"
      nomfel = "elements.mesh"

      open(unit=2,status='old',file=nomfn)
      open(unit=3,status='old',file=nomfel)

C     lecture des noeuds...
      read(2,2000) NBNOEUDS
      Do I=1,NBNOEUDS
          read(2,2010) (XNOEUD(I,K),K=1,3)
```

```
      enddo

C     lecture des elements...
      read(3,2000) NBELF
      Do I=1,NBELF
          read(3,3000) (NE(I,K),K=1,20)
      enddo

C     ecriture unv
      open(unit = 4,file = "maillage.unv")

C     ecriture des noeuds
      write(4,2020) "-1"
      write(4,2021) 2411
      do N=1,NBNOEUDS
        write(4,2022) N,0,0,11
        write(4,2023) (XNOEUD(N,K),K=1,3)
      enddo
      write(4,2020) "-1"

C     ecriture des elements
      write(4,2020) "-1"
      write(4,2021) 2412
      do N=1,NBELF
         if(NE(N,15).eq.0) then
         write(4,4000) N,118,2,1,7,10
         write(4,4001) (NE(N,K),K=1,10)
            else
            if(NE(N,20).eq.0) then
            write(4,4000) N,113,2,1,7,15
            write(4,4001) (NE(N,K),K=1,15)
```

```
            else
            write(4,4000) N,116,2,1,7,20
            write(4,4001) (NE(N,K),K=1,20)
            endif
        endif
    enddo
    write(4,2020) "-1"

2000 format(I7)
2010 format(3E11.4)
2020 format(4X,A2)
2021 format(I6)
2022 format(4I10)
2023 format(1P3D25.16)
3000 format(20I5)
4000 format(6I10)
4001 format(8I10)
997  format
   .('-------------------------------------------------',/,
   . '|      Ce programme est une interface permettant |',/,
   . '|      de convertir un maillage COB en maillage  |',/,
   . '|      ideas                                     |',/,
   . '|      le fichier noeuds est dans noeuds.mesh    |',/,
   . '|      le fichier elements est dans elements.msh |',/,
   . '|      nb de noeuds et elements en début de fichi ',/,
   . '|                                                |',/,
   . '|      fichier resultat : maillage.unv           |',/,
   . '-------------------------------------------------',//)

    end
```