

LA IMPERMEABILIZACION DE LA CENTRAL NUCLEAR DE VALDECABALLEROS

CONSTRUCCION

Nicolás NAVALON y Carlos FERNANDEZ

Este trabajo constituye un análisis de los sistemas de protección utilizados en Centrales Nucleares para evitar las filtraciones de agua en el interior de los edificios. Estos sistemas pueden actuar mediante evacuación del agua subálvea o la creación de impedimentos físicos a su paso. Se disponen en forma de barreras redundantes que delimitan áreas cada vez más reducidas.

Se detallan las soluciones adoptadas en la Central Nuclear de Valdecaballeros, donde la protección se consigue mediante un conjunto de cinco barreras redundantes entre sí.

INTRODUCCION

Es de todos conocido el grave problema que puede plantear la entrada de agua en cualquier tipo de instalación industrial. La incidencia se agrava notablemente en una Central Nuclear, donde no sólo se precisa evitar la entrada de agua que pueda afectar a la normal operatividad de la Planta, sino que también es fundamental evitar la salida al exterior de los hipotéticos vertidos con posibilidad de contaminación.

Una impermeabilización defectuosa o incompleta puede originar una serie de efectos perniciosos, que enumerados en orden de importancia se relacionan a continuación:

- Daños a la estructura de los edificios. Las características del agua acumulada en el terreno que penetra en el hormigón, afectan al propio hormigón y al acero de las armaduras, en

función del grado de acidez, dureza, etcétera, de dichas aguas.

- Desprendimiento de las pinturas, al actuar sobre ellas la presión hidrostática exterior. La consecuencia sería una pérdida de la facultad de descontaminación y el taponado de los drenajes.
- Incremento de la humedad ambiental, con influencia perjudicial para los equipos e instalaciones.

La incidencia de estos efectos será muy variable (en función de la importancia de la zona afectada), pero pueden revestir en los casos más desfavorables especial importancia, e incluso forzar la parada de la Central. Los dos últimos defectos pueden ser detectables y evaluables durante el mantenimiento normal de la Central, pero el efecto sobre la estructura es, sin duda, más peligroso, puesto que debilita su capacidad portante, y además no es detectable ni cuantificable. En todo caso la reparación será siempre muy difícil y costosa, ya que gran parte del sistema de impermeabilización es inaccesible.

El agua puede producir en el hormigón armado o pretensado: la disolución de los compuestos hidratados del cemento; formación de sales solubles que serán arrastradas por el agua (tal es el caso de ataques por aguas puras, ácidos orgánicos e inorgánicos, agua de mar, etcétera); formación de cristales y otros compuestos poco solubles con aumento de volumen y la consiguiente creación de tensiones internas (caso de la acción de los sulfatos); oxidación y corrosión de las armaduras (caso de los cloruros), y formación de eflorescencias al cristalizar las sales de calcio y magnesio.

El problema será más o menos importante en función de la situación del emplazamiento y del sistema elegido para la refrigeración de la Central, agravándose cuando el elemento receptor del calor excedente es una masa de agua que fuerza la existencia de un nivel freático por encima de la cota de cimentación de los edificios.

FUNCIONES DE LA IMPERMEABILIZACION

La impermeabilización de las estructuras de una Central Nuclear debe cumplir una triple misión:

- En primer lugar, debe asegurar la imposibilidad de que se produzcan filtraciones hacia el interior de los edificios como consecuencia de aguas freáticas permanentes o de inundaciones eventuales.



Carlos FERNANDEZ BRIONES (31) es Ingeniero de Caminos por la UPM. En la actualidad ocupa el cargo de Jefe de la Obra Civil de la Central Nuclear de Valdecaballeros. Inicia su experiencia en 1975 participando en la Central Nuclear de Cofrentes con Hidroeléctrica Española, como Jefe de la Oficina Técnica de Obra Civil. Desde 1980 es Jefe de la Obra Civil de la Central Nuclear de Valdecaballeros.



Nicolás NAVALON GARCIA (60) es Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la U.P.M., promoción 1961 (Madrid). En la actualidad es Subdirector de la División de Ingeniería Civil de Hidroeléctrica Española y Jefe del Departamento de Construcción y Presas. Su dilatada experiencia profesional se inicia en Hidroeléctrica Española (1961), División de Ingeniería Civil, participando en todas las realizaciones y estudios de los Aprovechamientos Hidroeléctricos realizados por esta Sociedad. Ha participado en diversos Congresos Nacionales e Internacionales, fundamentalmente en el campo de la Mecánica de Rocas y Grandes Presas y es autor de diversos artículos relacionados con su actividad.

Los procedimientos que permiten conseguir este objetivo son muy variados, pudiendo citarse los sistemas que impiden la entrada de agua (pantallas impermeables, inyecciones o láminas de impermeabilización), los sistemas que rebajan el nivel freático mediante la instalación de una red de drenaje, y la impermeabilización del propio hormigón.

— En segundo lugar, debe asegurarse la imposibilidad de salida de aguas contaminadas desde el edificio hacia el exterior, característica peculiar de las instalaciones potencialmente contaminantes y en especial de las Centrales Nucleares.

Es conveniente, en este caso, además de lograr un hormigón lo más impermeable posible, atajar el problema desde el interior, disponiendo de drenajes seguros y suficientes, e impermeabilizando la superficie con pinturas.

Por último, debe proteger al hormigón frente a la posible agresión de los álcalis y sales contenidas en disolución en el agua freática. Las características químicas del agua orientarán sobre el grado de agresividad; su estudio, completado con el del terreno o relleno artificial, puede influir sobre la elección de un tipo especial de conglomerante, resistente a estos ataques.

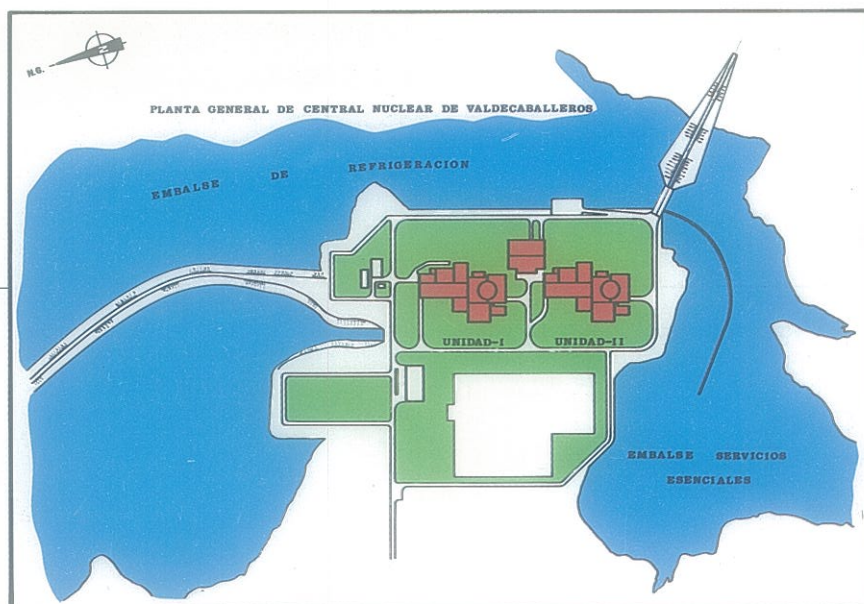
LA IMPERMEABILIZACION DE LA CENTRAL NUCLEAR DE VALDECABALLEROS

La Central Nuclear de Valdecaballeros está situada en la provincia de Badajoz, en la margen derecha del río Guadalupejo, afluente del Guadiana.

El nivel general de explanación se ha establecido en la cota 392,15, que en lo sucesivo se designará como cota cero. La Central se sitúa en la margen del futuro embalse de Valdecaballeros, destinado a la refrigeración de la Central. El nivel normal de este embalse será la cota 387,00, pudiendo llegar a la cota 390,00 en el caso de avenida máxima.

En el emplazamiento de la Central Nuclear de Valdecaballeros, aparecen las siguientes formaciones:

- Recubrimiento moderno cuaternario, de espesor máximo de 2,50 m. constituido por arcilla limo-arenosa.
- Sedimento terciario mioceno, constituido por arcillas limosas sobreconsolidadas, de espesor variable, pero que no sobrepasa los 10 m. de profundidad.
- Capa heterogénea de transición, formada por arcillas con pizarras y grauvacas alteradas, de espesor variable, pero generalmente muy reducido.
- Sustrato precámbrico, formado por



una alternativa de pizarras y grauvacas, con algunas vetas de cuarzo, hasta una profundidad reconocida de 500 m. y que zonalmente aparecen fisuradas y/o fracturadas.

Los materiales arcillosos son impermeables con valores del coeficiente de permeabilidad de 10^{-9} cm/seg.

En el conjunto pizarro grauváquico, los ensayos de permeabilidad Lugeon han presentado valores comprendidos entre 10^{-5} y 10^{-7} cm/seg., pudiendo considerarse, por tanto, como muy impermeable.

En los ensayos realizados en el Laboratorio de Obra se han obtenido valores para la permeabilidad de los acarreos

cuaternarios de $5,8 \times 10^{-5}$ cm/seg., y para el material granular empleado como relleno de excavaciones y formación de terraplenes de $5,0 \times 10^{-4}$ cm/seg.

Los edificios que componen la Central Nuclear, de hormigón armado, se cimentan sobre roca sana (estructuras de Categoría Sísmica I), o sobre relleno granular, a cotas variables que alcanzan los 14 m. de profundidad. El nivel freático teórico, motivado por el embalse de refrigeración, se encontraría a la cota -5,00 por lo que de no existir barreras al paso del agua, alguno de los edificios o estructuras se encontrarán sometidos a la acción de las aguas subterráneas en sus primeros 10 m.

COLUMNA ESTRATIGRAFICA

PERIODO	SÍMBOLOS	PROFUNDIDAD	CAPAS	PERMEABILIDAD
CUATERNARIO		0,20 - 0,40 m.	TIERRA VEGETAL	—
		1,50 - 3,00 m.	GRAVAS Y GRAVILLAS DE CUARCITA CON ARCILLA LIMOARENOSA	5×10^{-4} cm/seg.
TERCIARIO		8,00 - 10,00 m.	ARCILLAS LIMOSAS, COLOR ROJIZO	10^{-9} cm/seg.
		9,00 - 11,00 m.	ZONA DE TRANSICIÓN, ROCA ALTERADA	—
PRECAMBRICO		500 m. (RECONOCIDO)	ALTERNANCIA DE PIZARRAS Y GRAUVACAS CON VETAS DE CUARZO	10^{-5} a 10^{-7} cm/seg.

A la vista de esta situación se ha decidido crear una serie de barreras redundantes al paso del agua que delimitan recintos de protección cada vez más reducidos y cuya impermeabilidad se considera cada vez más importante.

El conjunto de barreras se encuentra constituido por los siguientes elementos:

- 1.º Pantalla impermeable de arcilla.
- 2.º Galería perimetral de drenaje.
- 3.º Lámina de impermeabilización.
- 4.º Hormigón impermeable.
- 5.º Pinturas interiores.

Pantalla Impermeable

La pantalla impide el paso del agua del embalse, creando una defensa flexible anclada en la arcilla del Mioceno, que impermeabiliza los rellenos artificiales que componen la explanación definitiva.

En nuestro caso, la pantalla hubiera podido ser de tres tipos:

- Pantalla impermeable de cemento-bentonita, que se construiría una vez terraplenada la Central hasta la rasante definitiva, ejecutando una zanja de aproximadamente 1m. de espesor, que se rellena con ese material.

Este sistema de construcción, cuya utilización es cada vez más frecuente, permite visualizar la construcción de la pantalla de modo que se conozca su espesor, profundidad, empotramiento y demás características.

- Pantalla constituida por un dique de material impermeable, que rodea la Central.

Esta solución presenta las mismas ventajas que la anterior y permite ejecutar el dique impermeable a medida que se realiza el relleno definitivo de la Central. El sistema es recomendable cuando en las proximidades de la zona de trabajo pueda encontrarse un material impermeable compactable (tal es el caso de nuestra arcilla miocena), puesto que resulta más económico, y las técnicas de construcción son habituales y sencillas.

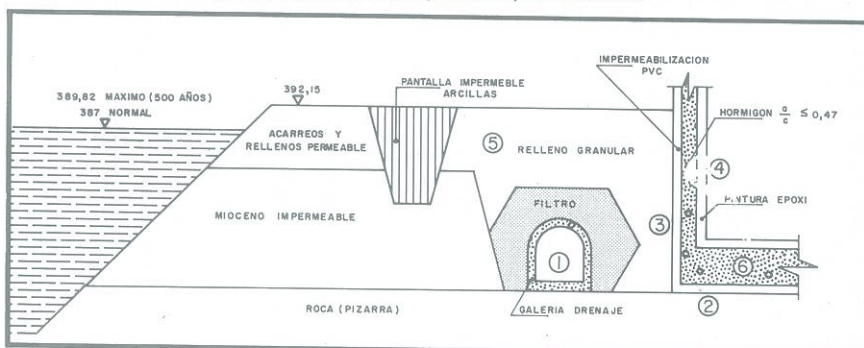
- Colocación de una membrana impermeable (lámina o fieltros impregnados) apoyada directamente sobre los taludes de la excavación.

En principio esta solución presenta la desventaja de que exigiría un tratamiento completo de los taludes de excavación para conseguir una superficie soporte compatible con la colocación de la membrana, y una protección posterior muy cuidadosa de dicha membrana con objeto de evitar su punzonamiento durante el terraplenado.

La solución prevista en la Central Nuclear de Valdecaballeros consiste en realizar una pantalla continua con el



Sección transversal de la galería perimetral de drenaje en el edificio de turbinas.



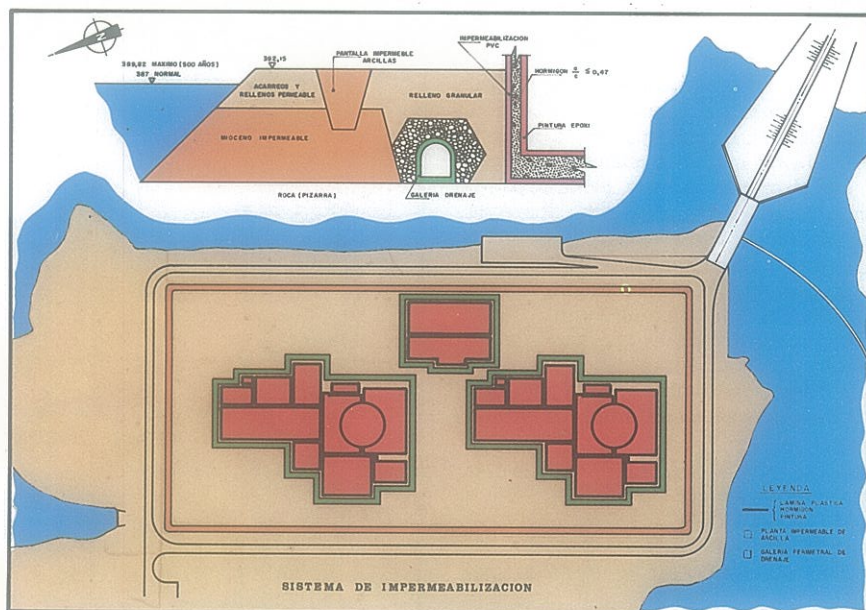
material existente (arcilla de Mioceno), cuyas características (límite líquido 57, límite plástico 32, índice de plasticidad 25, densidad máxima 1,54 kg/dm³, humedad óptima 27 % y permeabilidad 10⁻⁹ cm/seg.) impedirían prácticamente el paso del agua hacia los rellenos granulares, que constituyen el punto más permeable de nuestras cimentaciones.

Galería Perimetral de Drenaje

La misión de la galería de drenaje es doble:

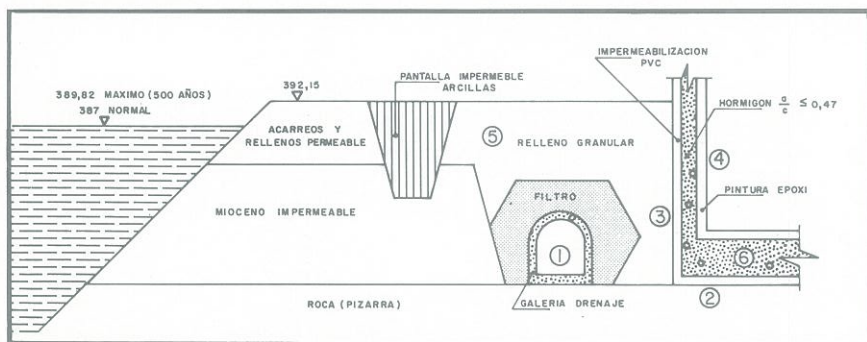
Por una parte permite rebajar el nivel freático mediante agotamiento por bombeo, y recoger las aguas acumuladas en el interior de la pantalla impermeable, que hayan rebasado esta barrera.

En segundo lugar, permite recoger y evacuar las aguas superficiales o pluviales que correspondan a la precipitación entre la barrera perimetral y los edificios. En base a los estudios hidrológicos realizados se ha calculado que si se aísla del embalse la isla nuclear mediante la pantalla, el máximo caudal a evacuar sería el de lluvia y supondría unos 100 a





Impermeabilización horizontal de la losa de cimentación del edificio de residuos radiactivos.



150 l/seg. Una parte muy importante de este caudal sería desalojado directamente por la red superficial de drenaje, compuesta por zanjas y cunetas, de forma que la aportación de agua a la cimentación será mínima.

Si el sistema de bombeo es adecuado, asegura que el nivel freático permanece siempre por debajo de su nivel de recogida. En consecuencia, la situación de la galería de drenaje debe ser siempre próxima a los edificios y a la profundidad de las losas de cimentación, o cuando menos de las primeras juntas de construcción de los alzados del edificio, que constituyen un camino preferente para el paso del agua.

Conviene que la galería sea visitable, puesto que así es posible la inspección en servicio, permitiendo ampliar a voluntad la capacidad filtrante, comprobar las zonas en que las filtraciones son más importantes para actuar localmente contra ellas, etc.

En la Central Nuclear de Valdecaballeros, la sección de la galería es un ovoide, lo que permite su construcción en hormigón en masa (de resistencia característica 150 kg/cm²), y la permeabilidad se consigue mediante mechinales (taladros en la superficie uniformemente distribuidos), está situada a nivel de losa de cimentación, y cierra completamente el perímetro de cada una de las dos Unidades y los edificios comunes.

La longitud total de la galería es de 550 m. en cada Unidad y 240 m. en las zonas comunes, y cuenta con un total

de 8 pozos que permiten el acceso al interior y el bombeo del agua filtrada.

La sección de la galería se ha calculado sísmicamente en los tramos en que circula por debajo de edificios Categoría Sísmica I.

Especialmente importante ha sido la elección del material filtro que rodea la galería en todo su recorrido, cuya misión es retener las partículas finas arrastradas por el agua, para evitar la colmatación de los mechinales. En todo caso, éstos podrían limpiarse e incluso rehacerse, puesto que la galería es visitable.

En la elección del material filtro es necesario evaluar y acotar dos características fundamentales. Por un lado debe cumplir las condiciones granulométricas que aseguren la eficacia del filtrado y, en consecuencia, la no colmatación de sus espacios interpartículas, y además deberá superar unos requisitos mínimos de resistencia y compacidad.

Estas tres condiciones se materializan en los siguientes puntos:

- Para que sea drenante, el porcentaje de áridos de tamaño inferior a 1 mm. debe ser inferior al 15 % y la permeabilidad del material filtro debe ser como mínimo 10 veces superior a la del terreno circundante.
- Para que no se produzca el arrastre de partículas del suelo a drenar es necesario, según Terzaghi que:

$$\frac{d_{f15}}{d_{e85}} < 4 < \frac{d_{f15}}{d_{e15}}$$

siendo:

d_{f15} = diámetro del material del filtro correspondiente al 15 % en peso.

d_{e15} = diámetro del material del suelo a drenar correspondiente al 15 % en peso.

d_{e85} = diámetro del material del suelo a drenar correspondiente al 85 % en peso.

La capacidad resistente se puede garantizar consiguiendo una densidad suficiente, y una resistencia a la deformabilidad próxima a la de terreno circundante para minimizar los asentamientos diferenciales.

El material filtro que se emplea en C. N. Valdecaballeros está compuesto por áridos procedentes de la instalación de machaqueo y clasificación de la Planta de Hormigonado, al no existir en la zona un material de préstamos natural que cumpla los estrictos requisitos necesarios.

Las características del material filtro han sido:

- Composición granulométrica en peso:

Arena fina	0 - 1,2 mm.	4 %
Arena gruesa	1,2 - 5 mm.	10 %
Garbancillo	5 - 10 mm.	60 %
Gravilla	10 - 20 mm.	26 %

- Densidad del material compactado comprendida entre 1,96 y 2,06 kg/dm³.

- Permeabilidad del orden de $2,50 \times 10^{-2}$ cm/seg.

- Los ensayos de placa de carga (placa VSS de 700 cm²) dieron un asiento de 0,10 mm. para una presión de 6 kg/cm².

Lámina de impermeabilización de PVC

La lámina de impermeabilización está concebida como una superficie continua instalada debajo de la solera de los edificios, que se prolonga hasta el nivel de explanación definitiva; su misión es mantener el hormigón estructural permanentemente aislado de las aguas que hayan podido eludir las dos barreras anteriormente citadas.

Tradicionalmente se han utilizado diferentes sistemas para proteger las estructuras de hormigón frente al paso del agua, y todo ello se ha basado en la formación de capas protectoras, o en el revestimiento de la estructura.

La formación de capas protectoras se consigue mediante la pintura de la superficie con productos químicos que forman sales insolubles que cierran los

poros del hormigón o la utilización de tratamientos formadores de películas, como pueden ser el alquitrán o el betún.

Los sistemas de revestimiento de las estructuras abarcan desde el simple revoco de la pared mediante enlucidos hidrófugos o materiales arcillosos, hasta las modernas láminas de impermeabilización; estarían incluidos en esta clasificación los revestimientos cerámicos, fieltros impregnados con materiales impermeables y revestimientos metálicos.

Desde el punto de vista de resistencia, la solución debe exhibir un buen comportamiento frente a la corrosión, desgarr, punzonamiento y alargamiento. La impermeabilización bajo los edificios debe transmitir también al terreno las fuerzas horizontales producidas por solicitaciones tales como terremotos, viento, o empujes de tierras no compensados, transmisión que se realiza por esfuerzo cortante en el material base.

Se le debe también exigir resistencia frente a ataques agresivos de aceites, grasas y carburantes, ácidos orgánicos e inorgánicos, mohos o bacterias.

Por último, es evidente que la impermeabilización debe mantenerse en perfectas condiciones durante la vida útil de la Central, y puesto que no se conoce el comportamiento a largo plazo de la mayor parte de los materiales elásticos o elastoméricos, se recurre a ensayos de envejecimiento acelerado.

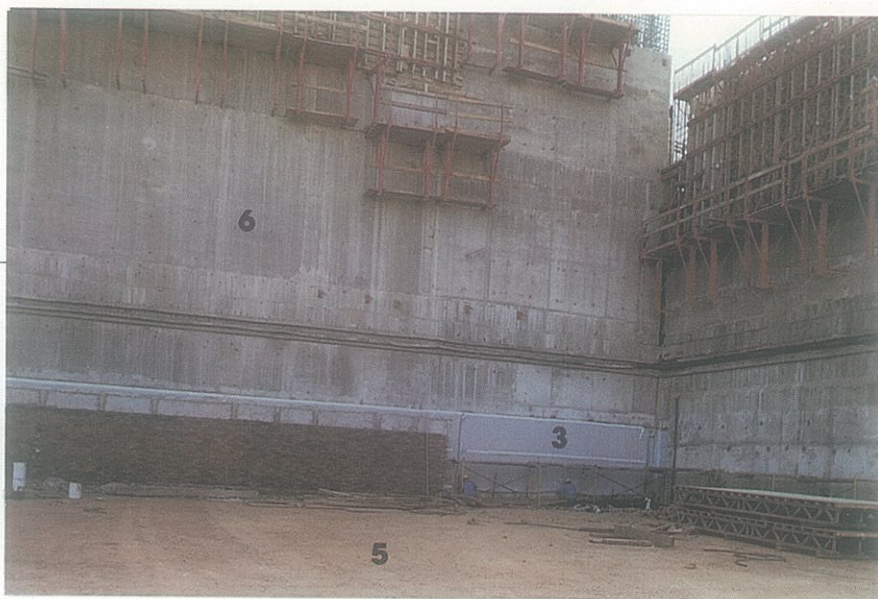
Como es lógico, en función de las condiciones de diseño e instalación predominarán unas acciones sobre otras, y dado que los diferentes materiales se comportarán siempre mejor frente a alguna de ellas, será el análisis de estas acciones el que oriente, en una primera fase, sobre la elección del material.

A la vista de las rigurosas condiciones exigidas, la tendencia generalizada es utilizar dos tipos de láminas:

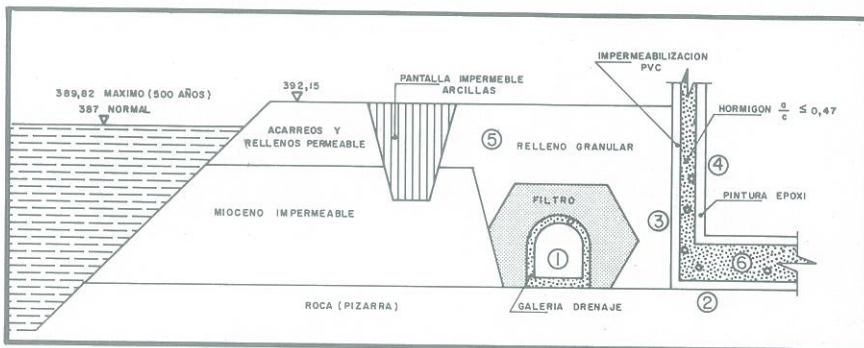
- Láminas formadas por una mezcla plástica elastomérica con una resina básica del tipo de policloruro de vinilo (PVC) o polietileno clorosulfonado.
- Láminas formadas por un sistema multicapa de un soporte de fieltro o tejido de fibra de vidrio, impregnado en un producto bituminoso (asfaltos), alquitranes, o acrílicos de polimerización in situ.

En el diseño del sistema de impermeabilización debe elegirse entre las dos siguientes opciones:

- Realización de la impermeabilización como membrana continua que engloba a todas las losas de los edificios.
- Realización de una membrana independiente para cada edificio.



Protección de la lámina de impermeabilización vertical en el edificio de turbinas.



La primera solución implica mayor economía y menor duración del trabajo, ya que requiere la impermeabilización de una superficie menor, y no condiciona la ejecución de los edificios contiguos a la terminación de las dos impermeabilizaciones correspondientes a la zona de la junta entre edificios. Presenta el inconveniente de que un sólo fallo en la impermeabilización pondría al agua en contacto con todos los edificios; ahora bien, incluso en este caso, si la decisión de impermeabilizar se ha adoptado para proteger al hormigón frente a los ataques químicos de las aguas agresivas, podría seguir siendo válida la impermeabilización en común, puesto que el agua atrapada de este modo entre los edificios no tendría prácticamente renovación, y el ataque no podría progresar.

La ejecución de la impermeabilización en común es más compleja, puesto que al estar cimentados los edificios a diferentes elevaciones obliga a la realización de fuelles que permitan los asientos diferenciales. La ejecución de estos fuelles es difícil, y se complica grandemente en los encuentros de más de dos planos.

En la C. N. Valdecaballeros se ha adoptado la solución de una lámina de PVC plastificado de 2 mm. de espesor en paramentos horizontales y 1 mm. de espesor en paramentos verticales. La membrana engloba conjuntamente a todos los edificios de cada Unidad y asciende desde el hormigón de limpieza de la cimentación hasta la rasante de la explanación definitiva.

Se le han exigido las siguientes características mínimas:

Resistencia a la tracción	150 kg/cm ²
Alargamiento en rotura	200 %
Dureza Shore A	50
Densidad	1,3 kg/dm ³
Absorción de agua	0,15 % max.
Resistencia a tracción tras curación acelerada	115 kg/cm ²
Alargamiento en rotura tras curación acelerada	150 %
Incremento en peso por la acción de los álcalis.	
- A 7 días	0,25 % max.
- A 20 días	0,40 % max.

Los dos primeros requisitos corresponden a características mecánicas y resis-

tentes; la densidad y la dureza permiten caracterizar la uniformidad del material,

y las restantes propiedades están relacionadas con la durabilidad del material en función del tiempo.

La colocación de la lámina requiere una cuidadosa ejecución; se realiza mediante el extendido de los rollos paralelamente entre sí, superponiendo uno sobre otro de forma que se mantenga un solape comprendido entre 4 y 5 cm. La dimensión mínima del solape está marcada por las características resistentes de la junta, y la dimensión máxima en función de la sensibilidad de los aparatos de control utilizados para detectar los poros.

La soldadura se consigue mediante pintado de la junta con un disolvente y aplicación de presión en el contacto. El mantenimiento de la presión depende de la temperatura ambiente.

La soldadura se controla mediante el paso lineal del aparato captapores por el borde, adaptado a una longitud de chispa compatible con la anchura de la junta (5 cm.). A continuación se efectúa el sellado de la junta con un cordón continuo, y una vez endurecido, se dispone un cubrejuntas que se suelda asimismo con el pegamento disolvente, fijándolo por simple presión manual.

Es muy difícil efectuar una revisión de toda la superficie de la lámina mediante el aparato captapores provisto de palpador de aleta, en previsión de posibles perforaciones de la lámina, que se repararán mediante parcheo.

La lámina se recubre a continuación con un mortero de cemento y arena fina para evitar el punzonamiento, y con hormigón de protección en paramentos horizontales, y muro de ladrillo en los verticales, para evitar que resulte dañada durante la colocación de armadura o durante las operaciones de relleno y compactación.

Es muy difícil realizar pruebas de estanqueidad finales en la lámina de impermeabilización, pero en los casos reales en que hemos podido mantener la lámina con una carga de agua real y controlada mediante comprobación del nivel (caso de pozos, artesas, etc.), se ha comprobado el correcto comportamiento de la lámina con resultados totalmente positivos.

Hormigón impermeable

En el examen microscópico del hormigón pueden observarse en la pasta de cemento espacios huecos interiores en forma de capilares, poros esféricos y los denominados poros de gel, consecuencia de la evaporación del exceso de agua de amasado sobre la estrictamente necesaria para la hidratación del cemento.

Existen dos razones fundamentales por las cuales el agua atraviesa la masa de hormigón: el efecto de la presión hidrostática, función de la carga de agua, y un fenómeno de capilaridad que permite que el agua, absorbida a través de una cara del hormigón, se evapore a

través de la opuesta; en consecuencia el hormigón permite el paso del agua, no sólo a través de juntas y discontinuidades, sino incluso a través de su propia masa.

La permeabilidad de un elemento de hormigón puede, pues, considerarse compuesta por dos factores:

- La permeabilidad primaria, o del material en sí mismo, que es función de la dosificación, contenido de cemento, relación agua-cemento, aditivos, etc.
- Una permeabilidad secundaria, consecuencia de la buena o mala ejecución y puesta en obra, y del estado de fisuración del elemento.

Para reducir la permeabilidad primaria es preciso conseguir una granulometría adecuada que asegure la máxima compacidad. Interesa rebajar la relación agua-cemento y el empleo de cementos finamente molidos, de fraguado rápido, y de bajo calor de hidratación.

Respecto a la permeabilidad secundaria, es fundamental asegurar una cuidadosa y correcta puesta en obra, un vibrado suficiente y un curado satisfactorio del elemento hormigonado.

La medida del coeficiente de permeabilidad del hormigón es complicada y sólo puede realizarse sobre muestras pequeñas, poco representativas de la masa total de hormigón. Por ello, y con objeto de conseguir la impermeabilidad necesaria, el Proyecto suele limitar la consistencia del hormigón y la relación agua-cemento. En particular el Código ASME III Div. 2, aplicable a las Centrales Nucleares de tecnología americana, en su artículo CC 2232.2.2, recomienda no superar el valor de 0,48 para la relación agua-cemento en el caso de hormigones potencialmente sometidos al contacto con el agua.

No conviene olvidar, sin embargo, que en muchas ocasiones las características y parámetros del hormigón que realmente se pueda fabricar en obra quizá no superen los requisitos fijados por el Proyecto, puesto que factores como la naturaleza del árido (canto rodado o procedente de machaqueo), o el procedimiento de puesta en obra (en particular el bombeo) pueden exigir el empleo de un hormigón más fluido (o una relación agua-cemento más alta) que la óptima, desde el punto de vista de la permeabilidad primaria.

En consecuencia es una postura más coherente que la Ingeniería permita la elección de la consistencia y relación agua-cemento más adecuadas para el hormigón, condicionado al cumplimiento de los requisitos de resistencia mínima, con viabilidad y facilidad de puesta en obra, impermeabilidad máxima, y sea la Obra quien envíe periódicamente a la Ingeniería información de las características del hormigón con objeto de que la Ingeniería pueda emplear esos parámetros en el Proyecto.

Independientemente de las medidas de buena práctica en la ejecución de la obra de hormigón, se puede actuar sobre la impermeabilidad de la masa mediante la utilización de aditivos.

Entre los productos utilizados como impermeabilizantes de masa puede mencionarse la utilización de materiales constituidos por partículas muy finas (bentonitas, caliza o puzolana molida), de sales de ácidos grasos (oleatos, estearatos) y productos seleccionados del petróleo, o de aditivos en general (plastificantes que aumentan la docilidad y permiten reducir la relación agua-cemento, e impermeabilizantes.

La influencia de los aditivos, por regla general, es dudosa y no se conocen bien sus efectos sobre la resistencia y durabilidad del hormigón a largo plazo, por lo que la tendencia usual es a actuar sobre la masa o la dosificación del hormigón.

El hormigón estructural utilizado en la C. N. Valdecaballeros es un hormigón bombeable, que se fabrica con cemento puzolánico PUZ-350 muy finamente molido y de bajo calor de hidratación (inferior a 70 cal/gr. a los 7 días y a 80 cal/gr. a los 28 días). La relación agua-cemento máxima permitida en hormigones, por debajo de la cota de explanación, es de 0,50 y el contenido máximo de aire, en los hormigones fabricados, no supera el 1 %. El único aditivo utilizado es un plastificante habitual, dosificado en la proporción del 0,2 %, no empleándose impermeabilizantes ni aireantes.

La resistencia mínima que se exige al hormigón estructural a 28 días es de 250 kg/cm² y la consistencia no supera los 9 cm. en el cono de Abrahams.

La dosificación del hormigón habitualmente empleado es la siguiente:

Grava (40-20)	27 %	511 kg/m ³
Gravilla (20-10)	19 %	360 kg/m ³
Garbancillo (10-5)	11 %	208 kg/m ³
Arena gruesa (5-1, 2)	24 %	443 kg/m ³
Arena fina (1, 2-0)	19 %	362 kg/m ³
Cemento PUZ-I-350	—	350 kg/m ³
Agua	—	170 l/m ³

Con un hormigón de estas características, es fácil obtener una permeabilidad comprendida entre 10⁻⁷ y 10⁻⁹ cm/seg.,

que corresponde a un material realmente impermeable.

Para reducir la permeabilidad secundaria a través de las juntas de construcción, camino preferente al paso del agua, se dispone una llave de conexión y una chapa de acero galvanizado de 30 cm., de anchura, en toda su longitud, con objeto de dificultar el recorrido del agua dentro del hormigón.

Pinturas interiores

La pintura de los paramentos constituye la última barrera del sistema de impermeabilización. Protege recintos de equipos fundamentales en el interior de los edificios cumpliendo una triple misión:

- Obtener superficies fácilmente descontaminables.
- Impedir la salida de agua potencialmente contaminada hacia el exterior de la Planta, lo que constituye la característica peculiar de esta barrera frente a las anteriormente estudiadas.
- Debe ser también capaz de impedir el acceso de agua al interior de los recintos protegidos, lo que exige que su adherencia al soporte sea superior a la presión hidrostática del agua exterior.

En la C. N. Valdecaballeros se está utilizando una formulación epoxídica. Los sistemas epoxi empleados en la construcción están formados generalmente por dos componentes (resina base y agente de curado o flexibilizador reactivo) que al ser mezclados reaccionan entre sí, dando lugar a un plástico sólido termoestable.

Las características superficiales del hormigón base tienen mucha influencia sobre la adherencia y durabilidad de la pintura. Para obtener una unión eficaz a una superficie de hormigón es preciso que ésta sea resistente y limpia. En general conviene que el hormigón tenga una cierta edad, y es necesario efectuar una limpieza y saneado de la superficie, cuyo objeto es por una parte eliminar las materias que la contaminan (manchas de aceite y grasa, o salpicaduras), repararlas (latiguillos y oquedades), y por otra conseguir una determinada rugosidad y eliminar las partes más débiles.

Existen diferentes métodos para efectuar la preparación de las superficies (chorro de arena, preparación hidroneumática, escarificado, cepillado manual, ataque con ácidos, etc.). En todo caso conviene conferir a la superficie de hormigón la rugosidad necesaria para que el revestimiento tenga un buen anclaje. El método que se considera más eficaz es el de chorro de arena, y se ha adoptado en la C. N. Valdecaballeros; aun-

que el coste es elevado, puede reducirse con un equipo mecánico que tenga un buen rendimiento, que recupere la arena, y que sea manejado por personal bien formado.

La puesta en obra se efectúa aplicando una capa de imprimación seguida de 2 o 3 capas de cobertura. El número de capas a aplicar es variable, dependiendo de las características del recinto, de la formulación, y del espesor que se pretenda conseguir; como mínimo se aplican dos capas, extendiendo la segunda cuando la primera ha endurecido. También es frecuente disponer entre las dos capas del sistema epoxi una armadura de tela de vidrio, con objeto de mejorar en lo posible las características mecánicas y de estanqueidad del revestimiento.

Para que la aplicación de la pintura sea adecuada es necesario que la base esté adecuadamente preparada y que no exista ningún tipo de incompatibilidad entre la formulación y los aditivos del hormigón. En particular es muy conveniente estudiar detalladamente el tipo de encofrado a utilizar de forma que la superficie resultante sea compatible con la pintura y no se precisen costosos trabajos de preparación de superficie.

El espesor del recubrimiento se determina mediante mediciones de espesor de película húmeda o seca, aunque las medidas son únicamente orientativas debido a las irregularidades de la superficie del hormigón.

Para comprobar la adherencia entre pintura y soporte se procede a la colocación y arrancamiento de testigos. La Norma ANSI 5.12 define un valor mínimo de 14 kg/cm² para la adherencia con el hormigón, que en nuestro caso es suficiente para resistir la carga de agua, en caso de que fallasen las barreras anteriores.

CONCLUSIONES

La impermeabilización de una Central Nuclear constituye una actividad característica durante la fase de construcción, a la que no se suele reconocer su indudable importancia.

Cualquier sistema que establezca una barrera efectiva al paso del agua es eficaz, pero es fundamental realizar una ejecución cuidadosa y mantener una supervisión responsable, puesto que un sólo fallo puntual arruina completamente el sistema y un funcionamiento defectuoso puede ocasionar grandes problemas durante la explotación de la Planta, que exigen soluciones costosas y siempre difíciles.

Para asegurar la defensa frente al agua se disponen barreras redundantes que acotan áreas cada vez más importantes y, en consecuencia, cada vez más protegidas. En la Central Nuclear de Valdecaballeros se han dispuesto cinco barreras redundantes, lo que constituye el sistema de impermeabilización más completo en el conjunto de las Centrales Nucleares españolas.

La inversión que supone el capítulo de impermeabilizaciones, así como la repercusión de las hipotéticas reparaciones es muy fuerte. Se recomienda considerar la influencia y el coste de la impermeabilización en la elección del sistema de refrigeración de la Central puesto que ambos temas se encuentran íntimamente relacionados, y en pocas ocasiones es tenido en cuenta en el momento de realizar la comparación económica entre los diferentes sistemas.

BIBLIOGRAFIA

- Jiménez Salas y otros: **Geotécnica y Cimientos**. Edit. Rueda (1975).
- Jiménez Montoya y otros: **Hormigón armado**. Edit. Gustavo Gili (1979).
- Schulze y Simmer: **Cimentaciones**. Edit. Blume (1970).
- Fernández Cánovas: **Las resinas epoxi en la construcción**. IETCC (1974).
- Bureau of Reclamation **Manual de Tierras**. Edit. Técnica Bellisco (1980).
- Domínguez, J.: **Control de Calidad en el Proyecto y Construcción de la Obra Civil de Centrales Nucleares** (capítulo 4.5). Universidad Politécnica de Madrid (1979).
- Vivo S. y Muñoz R.: **Permeabilidad al agua de tubos de hormigón**. Monografía del IETCC, núm. 344 (1977).
- D'Appolonia, D.: **Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoffs**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, abril 1980.
- Ruettges, A. y otros: **An investigation of the permeability of mass concrete**. Journal of the ACI, marzo 1935.
- Tiller, Shirato: **The role of porosity in filtration. New definition of filtration resistance**. Boletín RILEM, núm. 27, junio 1965.
- Schwiete y otros: **Measuring gas diffusion for the valuation of open porosity on mortars and concretes**. Materiaux et Constructions, vol. 2, núm. 7 (1969).
- Normas UNE**: Números: 7103, 7130, 7131, 7136, 7137, 7178, 7234, 7236, 53020, 53025, 53028, 53510.
- Normas ACI**: Números: 211.1-74, 301-72, 302-69, 304-73, 308-71, 309-72, 347-68.
- Informes ACI**: 58-24 (ACI Committee 621, noviembre 1961).
- 68-56 (ACI Committee 212, septiembre 1961).
- Normas ANSI**: 5-12
- N-45.2.5(1974).
- N-101-2.
- Normas NRC**: 1-54.
- Normas ASTM**: Números: C-33, C-125, C-127, C-128, C-138, C-143, C-144, C-231, C-232, C-260, C-309, C-465, C-494, C-566, D-41-73, D-140-70 (1976), D-449-73, D-450-71, D-1668-73, D-1672-76.
- Código ASME**: III Div. 2.