

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

SOLDADURA ENTRE TONGADAS EN PRESAS DE HCR

Emilio Benítez Pascual¹

RESUMEN: Se propone un estudio en laboratorio de roturas de probetas a corto plazo para hallar la relación entre madurez (resistencia a compresión), temperaturas y tiempos para sustituir a la clásica y simplista fórmula del factor de madurez (temperatura multiplicada por tiempo igual a constante) y calcular el tiempo de recubrimiento máximo para cada temperatura, acompañado por el empleo de un esclerómetro, con sus hipótesis teóricas de resistencias calibradas con las roturas de las probetas, para su posterior y fácil control en la losa de ensayo y/o la obra. También se profundiza en la importancia de la rugosidad en la interfase entre tongadas para impedir los movimientos diferenciales entre ellas, causa posible de rotura de la soldadura, y la posibilidad de obtener esta rugosidad usando un pequeño compactador de tacos o similar de forma limpia, sin necesidad de limpieza posterior.

¹ Consultor de presas de Hormigón Compactado

1. CÁLCULO CONVENCIONAL DEL TIEMPO DE RECUBRIMIENTO (TR)

El TR entre tongadas que define el tiempo máximo para considerar la junta como caliente (y, por tanto, sin tratamiento, siempre costoso e interferente, salvo humectación y limpieza) para cada temperatura, se calcula hasta ahora prácticamente siempre mediante la construcción de una losa de ensayos, la perforación de sondeos en ella y la observación y conteo de los porcentajes de juntas soldadas para las distintas circunstancias de temperaturas y tiempos entre tongadas. El TR así calculado es el plazo transcurrido hasta que los porcentajes de juntas no soldadas se considera inaceptable. Naturalmente, puesto que el plazo de construcción de la losa es breve, la temperatura climática durante su ejecución es bastante uniforme. Cuando se construye la presa se comparan las temperaturas durante dicha construcción con la habida durante la de la losa mediante el factor de madurez que relaciona temperaturas, TR para las distintas temperaturas durante dicha construcción y madurez del hormigón. Esta relación o factor de madurez es muy simple y suele ser el producto de la temperatura (en °C o °F, real o modificada) por el TR, que se iguala a una constante, que mide la madurez que se considera adecuada y deducido del TR y temperatura de la losa. A veces, esta constante viene ya definida por el proyectista.

2. CÁLCULO DEL TR MEDIANTE ENSAYOS A CORTO PLAZO

Como se puede observar en lo escrito anteriormente existen dos ciertos inconvenientes en este cálculo: la necesidad de ejecutar la losa y esperar a que madure aunque sea moderadamente (el plazo mínimo suele ser de tres meses) y el empleo de una fórmula (factor de madurez) bastante simple y, por tanto, con una fiabilidad dudosa.

Sin embargo, ese dato del TR y una fórmula más fiable del factor de madurez se pueden averiguar de forma mucho más rápida mediante ensayos a corto plazo durante la etapa de ensayos de laboratorio.

Se propone hacer estos ensayos con probetas normales (cilíndricas de 0,15 m de diámetro y 0,30 de altura), curadas con 2 o 3 temperaturas (10, 20 y 30 °C, por ejemplo) y diferentes plazos (4, 8, 12 y 24 h y, mejor, otra serie a 48 h). Considerando que la madurez se puede medir con la resistencia a compresión simple, se obtiene, para la mezcla elegida a emplear en obra, un estudio pormenorizado y muy fiable de la relación entre TR, temperatura y madurez (resistencia a compresión simple). Así se ha hecho para la presa El Esparragal (Sevilla) (foto 1), sin problema (salvo el pequeñísimo de un ligero descascarillado de una probeta a 20 °C y 4 h, que no impidió su rotura correcta en la prensa. Véanse las fotografías 2, 3 y 4 de la probeta descascarillada y de otras dos sin la menor tacha). De todas formas, si alguna probeta, en los plazos menores, no se puede desmoldar, es señal de que su madurez es cero y, por tanto, ese plazo es menor del TR.



Foto 1. Presa HCR El Esparragal. Estribo derecho y aliviadero



**Foto 2. Probeta curada a 20 °C y desmoldada a 4 h.
(obsérvese el ligero descascarillado)**



**Foto 3. Probeta curada a 30 °C y desmoldada a 8 h.
sin ninguna anomalía**



Foto 4. Probeta curada a 30 °C y desmoldada a 24 h

En los ensayos previos de la presa de Upper Stillwater (USA), muy prolijos y que duraron mucho tiempo, lo intentaron pero no lograron realizar los ensayos antes de un día por lo que desistieron de ellos (referencia 1), aunque ese hecho significaba (cosa que no comprendieron, al parecer) que la madurez seguía siendo convenientemente pequeña y cuando ejecutaron la losa de ensayo calcularon que el TR era de tres días (la temperatura de la zona era muy baja, solo podían trabajar por este motivo cinco meses al año y el hormigón se colocaba a menos de 10 °C), lo que está de acuerdo con los ensayos de laboratorio, aunque parecían fallidos. El comportamiento de la presa, concluida y llena, fue excelente en lo concerniente a filtraciones entre juntas horizontales, con 0,65 l/s (ref 2).

En cuanto a la definición de la madurez (resistencia a compresión simple) admisible para que el hormigón de una tongada esté todavía lo suficientemente blando para que la junta se considere caliente, se llegó a la conclusión en los citados ensayos de la presa El Esparragal que esta resistencia debía ser, como máximo, de 2,5 MPa, sin poderse asegurar por entonces que pudiese ser todavía mayor, a la espera de más datos. Esta conclusión fue confirmada por el comportamiento de la presa durante los cinco años en que ha permanecido siempre llena (o vertiendo) pues ése es su objetivo como humedal, por motivos medioambientales, ya que su permeabilidad entre tongadas ha sido bastante menor de 0,1 l/s, según cálculos estimativos para una presa de 380 m de longitud por 20 m de altura,

aunque ha sido imposible calcular esta permeabilidad de forma más exacta por carecer de galería de servicio y de pantalla de drenaje, pero la obligación de mantenerla siempre llena, la escasez o carencia total de escorrentía en muchas épocas causada por las largas sequías de esta zona durante estos años y la posibilidad de usar el embalse aguas arriba de El Pintado para suplir la falta de lluvia que se ha demostrado innecesario confirman ese comportamiento tan satisfactorio.

En los ensayos de la losa de Upper Stillwater se definió el TR (con colocación del hormigón a menos de 10 °C) en tres días. Pues bien, en los ensayos a corto plazo la resistencia que se alcanzaba en estos tres días y en condiciones de temperatura adiabática, comenzando con los 10 °C, era de 3,1 MPa, ligeramente superior pero del orden de la definida para El Esparragal (ref 1).

Estos ensayos a corto plazo harían innecesaria la construcción de una losa de ensayo a estos efectos, únicos que obligan a un periodo dilatado de espera antes de realizar los ensayos pertinentes.

A otros efectos (comportamiento de la mezcla frente a la segregación, entrenamiento de personal, maquinaria e instalaciones, etc.) se podrían realizar los ensayos inmediatamente antes del comienzo de ejecución de la presa, con todos los medios operativos y posiblemente en una parte no crítica de la propia presa como puede ser la zona superior de un estribo, cuenco amortiguador u otra.

3. CLASES DE JUNTAS

a. Juntas calientes. Según el ICOLD (ref 2) la soldadura se produce por combinación química de los conglomerantes y/o por penetración (mejor sería decir interpenetración). Pero los efectos de ambas causas es diferente. Mientras la combinación química suelda realmente, la penetración impide la destrucción de esta soldadura en las primeras horas en que la primera causa es aún muy débil (pues el porcentaje de cemento, único conglomerante activo en ese momento, suele ser muy escaso) al evitar el desplazamiento diferencial horizontal "despegante" entre ambas tongadas en la interfase de la misma, al romper la suave superficie "planchada" por el compactador liso y crear una rugosidad antideslizante. El desplazamiento diferencial es principalmente causado por los diferentes movimientos volumétricos de dos hormigones de distintas edades, causado a su vez por la retracción y el aumento de la temperatura debida a la hidratación del cemento. Otros efectos positivos de la rugosidad causada por la penetración son que aumenta bastante la superficie de contacto y la longitud de la filtración. Supuesto que en los hormigones ricos en pasta, ésta es suficiente para soldar aunque la inferior esté ya bastante madura (otra cosa sería en los hormigones pobres en pasta), lo fundamental es que exista esa rugosidad, que se consigue si el hormigón de la tongada inferior es susceptible de ser clavado por los áridos de la tongada superior al ser golpeados intensamente por la vibración del rodillo vibrante. En definitiva, la junta es caliente si la madurez del hormigón inferior permite esta penetración o creación de rugosidad. En las presas HCR ricas en pasta lo fundamental no

es la soldadura sino impedir la rotura de esa soldadura. Aunque también es verdad que a veces se produce soldadura sin penetración, esto es más cuestionable.

b. Juntas templadas o frías. En el caso de estar bastante seguro de que no se consigue esa rugosidad, esa penetración, porque el hormigón inferior está ya excesivamente maduro (su resistencia se ha incrementado demasiado), la consecución de esa rugosidad se puede obtener de manera muy eficaz con el descarnado y de forma algo más dudosa con el escarificado o cepillado con un cepillo de púas metálicas de los usualmente utilizados en carretera. Pero, aunque ambos sistemas son satisfactorios, son costosos e interferentes no solo por su ejecución en sí sino también por la necesidad de limpiar escrupulosamente la superficie retirando los detritos producidos, además del vertido de una capa de retoma de hormigón con pequeño tamaño de árido, mortero o lechada (lo que algún autor ha llamado humorísticamente "hojaldrillo"), si se emplea, también costosa e interferente.

Se suele llamar junta fría el caso del descarnado y junta templada al del cepillado. En este último caso queda una cierta posibilidad de que el hormigón inferior posea una cierta aptitud para la obtención de penetración, aunque esta sea escasa.

Existe en la tecnología de las presas de hormigón convencional o vibrado una analogía muy ilustrativa para comparar sus juntas frías, corroborada por la prolongada tradición de construcción de este tipo de presas, con las practicadas en el hormigón compactado. Aparte de limpieza y humectación de la superficie, comunes a ambas tecnologías, en la primera hay que ejecutar en las juntas frías sucesivamente las operaciones siguientes: descascarillado, descarnado y extensión de capa de retoma. El descascarillado, indispensable en los hormigones vibrados porque la relación agua/cementicio, elevada, hace posible la creación de una película de lechada empobrecida, porque descienden más los materiales más pesados al vibrar y reducir, por tanto, el rozamiento interno, lo que impide una buena soldadura entre tongadas al crear esta interfase debilitada, no es necesaria en el HCR por su menor humedad (aunque en realidad, también en el HCR se realiza este descascarillado cuando se descarna o cepilla). El descarnado sí es común a ambos tipos de hormigones, vibrado y compactado, mientras el cepillado no se realiza en el hormigón vibrado porque la superficie de tongada entre juntas transversales y, en ciertos casos, longitudinales es pequeña y dificulta este tratamiento.

En cuanto al extendido de capa de retoma, aunque es usual en los bloques de hormigón vibrado, no siempre se ha realizado. Por ejemplo, en la presa de Dworshack (USA), de 220 m de altura, se estudió este tema, no se ejecutó en todos los bloques y se ensayó la tracción directa entre tongadas dando como resultado que no se detectó disminución de soldadura (ref 3). Por tanto, no se debe considerar imprescindible.

En las presas de HCR se pueden citar también algunos ejemplos de carencia de capa de retoma en juntas templadas y frías, con resultado satisfactorio si se había ejecutado el descarnado o el cepillado. En Upper Stillwater (USA) no se usó nunca retoma (ref 4), aunque se paraba la ejecución siete meses al año a causa del frío invierno y solo se preparaba con descarnado la última tongada antes de esta paralización, pero sin usar retoma, con el resultado de soldadura entre tongadas referido anteriormente de una filtración de 0,65 l/s. En la presa de Ghatgar (India) no se usó nunca retoma y el resultado cuando se ha llenado la presa ha sido satisfactorio (ref 5).

En la presa La Breña II (ref 6) se realizaron juntas templadas de 33 h y temperatura climática de 17 °C, sin retardador, que dieron el 100% de juntas soldadas y tracciones simples a 180 días muy buenas (entre 1,24 MPa y 1,39 MPa), con tres tratamientos diferentes y resultados parecidos: solo cepillado, solo mortero y cepillado más mortero, sin que se apreciara ventaja para cualquiera de ellos. Ello demuestra que la creación de rugosidad, sin retoma, es suficiente para conseguir una buena soldadura y también que sin rugosidad, pero con mortero, también se puede obtener el mismo resultado (a menos que la madurez del hormigón inferior hubiese todavía permitido una cierta penetración, dado lo moderada que era la temperatura climática cuando se ejecutó la losa). Con ello se demuestra, una vez más, que una buena rugosidad no necesita de capa de retoma para conseguirse una buena soldadura, aunque también que sin rugosidad (a menos de que se hubiese producido alguna penetración) y con retoma también se podría obtener lo mismo.

Hay que esperar al llenado de la presa para conocer el comportamiento global.

En la presa de Olivenhain (USA) (ref 7) también se realizaron ensayos con y sin rugosidad en juntas templada y fría, siempre con lechada interpuesta, con diferentes TR, la junta templada (hasta 39 h en verano y 59 h en invierno) sin rugosidad (salvo, como dijimos para La Breña II, que todavía se produjese alguna penetración con estos plazos) y la junta fría con cepillado (además, se ensayó una junta que llamaban superfría, con descarnado). A largo plazo (con curado acelerado, sin especificar plazo equivalente) daba una tracción directa magnífica, de 1,93 MPa. Aquí sí se ensayó además la junta caliente, también con un magnífico, aunque menor, resultado a largo plazo, 1,36 MPa. El comportamiento global frente a la permeabilidad no se puede conocer aunque la presa está en funcionamiento porque tiene un revestimiento textil impermeable aguas arriba. Lo anterior demuestra que siempre que existe rugosidad, existe una buena soldadura y que cuando no la hay puede haberla también con retoma interpuesta, si bien este caso muestra alguna duda por la posibilidad, como antes se dijo, de que se produjese todavía penetración en las juntas templadas.

4. CONTROL DE LA MADUREZ MEDIANTE ESCLERÓMETRO

Hasta ahora no se ha controlado con algún ensayo fácil el estado de madurez del hormigón de una tongada. Pero ello se puede realizar con un esclerómetro

que debe estar calibrado aprovechando las probetas ejecutadas para el ensayo a corto plazo, disparándolo sobre la cara circular horizontal de cada probeta que va a romperse, relacionando el índice de rebote con la resistencia real y haciendo caso omiso de las resistencias teóricas dadas por el fabricante, menos fiables.

Además, se observará visualmente la marca producida en cada disparo, lo que hará aún más cómodo el control posterior en la losa de ensayo (si se construye) y en la misma obra. La producción de huella (fotos 5 y 6), aunque sea débil, coincide con la resistencia límite del TR, 2,5 MPa. Para efectuar el disparo (o, mejor, los disparos) en la tongada, debe elegirse una zona claramente con pasta refluida, sin nidos de grava. Esto es muy fácil ya que si la dosificación es correcta y tiene suficiente pasta (volumen de esta superior en más de cinco puntos al índice de huecos de la arena compactada, llamando índice de huecos a la relación de huecos frente a huecos más llenos), la reflujo será total en toda la superficie.



Foto 5. Probeta con huellas del esclerómetro en su cara superior.

Foto 6. Disparo del esclerómetro sobre una probeta.

También puede relacionarse este índice de rebote y/o obtención de marca con otras huellas creadas por las distintas máquinas en circulación por la tongada en el momento de extender la tongada siguiente, lo que ayudará aún más a la dirección de la obra a controlar esa madurez, incluso sin usar el esclerómetro. Así se realizó en la presa El Esparragal.

5. FORMAS DE CONSEGUIR RUGOSIDAD

Ya se ha indicado que las formas usadas hasta ahora de conseguir rugosidad son la penetración (o interpenetración), el cepillado y el descarne.

La penetración se obtiene al actuar el compactador vibrante sobre la tongada superior clavando los áridos en la tongada "caliente" inferior, que todavía está lo suficientemente blanda. El cepillado (mediante cepillo de carreteras, con cerdas metálicas) y el descarne (mediante chorros a presión de aire /agua) son muy eficaces, sobre todo el segundo (foto 7), pero tienen el inconveniente de producir residuos que es necesario limpiar intensamente.



Foto 7. Superficie de una tongada bien descarnada con chorro de aire/agua a presión

Se propone en esta ponencia otro método para conseguir esta rugosidad sin producir residuos. Consiste en hacer circular una máquina que produzca esta rugosidad por la configuración de su equipo de rodadura cuando la tongada a tratar esté todavía blanda. Por ejemplo, usar un rodillo rugoso (fotos 8 y 9) u otra máquina adaptada para ello. Este método no ha sido aún experimentado pero se estima conveniente hacerlo y ensayarlo, porque en caso de ser eficaz, sería una gran ayuda para esta tecnología.



Foto 8 y 9. Dos modelos de compactadores "rugosos"

REFERENCIAS

En estas referencias se incluyen brevemente las frases y datos considerados más esclarecedores de los conceptos referenciados. Las palabras en cursiva son del autor de la ponencia, no del autor de la referencia.

1- Bureau of Reclamation. Mix design investigation- RCC Upper Stillwater dam, Utah. June 1984, pg. 67. “No tests could be performed at 1 day due to the low strenght of the RCC.” and “Table 1B. Temperature condition Adiabatic. Age 2 days Compressive strength 445 lb/in²”

2- ICOLD- Comité Español de Grandes Presas. Estado del Arte de las Presas de HCR. Madrid 2003, pg. 182, “Aparte de las fisuras verticales, la filtración media a través de la presa es inferior a 0´65 l/s.” y pg 105. “La adherencia entre las tongadas de HCR se produce mediante dos mecanismos: unión del conglomerante (química) y penetración del árido de la nueva tongada en la superficie de la tongada previamente colocada.”

3- Jerome H. Raphael. Development of Dam Engineering in the United States. Kollgaard and Chadwik, 1988, pg. 38. “...and tests showed that grouting the interface between lifts had no advantage in bonding or in strength over a well cleaned ungrouted interface.”

4- Ángel Fernández-Aller Ruiz. Nota informativa sobre la presa Upper Stillwater (UTAH, USA), construida con HCR. Curso sobre HCR en presas. Madrid. España, 1 989, pag. 132. “En esta presa no se coloca mortero de retoma entre dos tongadas consecutivas en ningún caso, pues se considera que la mezcla posee suficiente cantidad de mortero (el 45 % aproximadamente) para garantizar la unión entre tongadas.”

5- Shelke, Sapre and Dunstan. Construction of the first dam in India at Ghatgar. New Progress on RCC Dams. Guiyang. China 2003, pg. 809. “For none of these joints (*hot, warm and cold*) was a bedding mix of whatever form used.”

6- F. Romero, A. Sandoval, R. Ibáñez de Aldecoa, G. Noriega. La presa de La Breña II. Jornadas sobre presas de hormigón compactado. Córdoba (España). 17 de Junio de 2008. Pag 13 de la ponencia. “Para los tres tipos (*de soldadura templada*), los resultados fueron excelentes en términos del porcentaje de juntas bien soldadas y de la resistencia a tracción directa en juntas.”

7- M. R. H. Dunstan. Hydropower & Dams. Volume 9. Issue 3. 2002. Simplicity leads to value- engineered changes at Olivenhain, USA. Pag 73. “Table 2: Results of testing of cores from full-scale trials”