

CONFERENCIA BRASIL

ÍNDICE

1. EL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR): UN CAMINO LOGICO.	4
2. LAS PRESAS DE HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO (HCR) EN ESPAÑA.	9
2.1 HORMIGONES H.C.R. EN ESPAÑA	10
2.2 ANTECEDENTES. LA PRESA DE SANTA EUGENIA, PRIMERA GRAN PRESA DE HCR	12
2.3 LAS PRESAS DE HCR EN EL PERIODO 1988-1995.	13
2.4 LAS ÚLTIMAS PRESAS CONSTRUIDAS Y EN CONSTRUCCIÓN. LAS PRESAS DE VAL, RIALB Y LA BREÑA.	18
3. COMENTARIOS SOBRE EL DISEÑO DEL HORMIGON HCR	21
3.1 INTRODUCCION	21
3.2 COMPOSICION DEL HORMIGON HCR. CANTIDAD DE AGUA Y CONTENIDO DE FINOS. METODO DE MEDICION DE CONSISTENCIAS UC	21
3.2.1 Contenido de agua, trabajabilidad.	22
3.2.2 Determinación de la cantidad de pasta –cantidad de finos y de agua-	23
3.2.3 Resultados obtenidos en las presas de Erizana y Santa Eugenia	25
3.2.3.1 La composición de los hormigones y su comportamiento a largo plazo	25
3.2.3.2 Conformidad del comportamiento del hormigón en estado fresco y la forma de puesta en obra	27
3.3 LA UNION ENTRE TONGADAS	27
3.3.1 Influencia de la madurez del hormigón HCR, consistencia y tipo de tratamiento	28
3.3.2 Influencia de la madurez y condiciones ambientales –humedad-	29
3.3.3 Influencia del tipo de tratamiento	30
4. METODOS DE CONTROL DE HORMIGONES	32
4.1 POROSIDAD	32
4.1.1 Desarrollo del método de medición de la porosidad	33
4.1.1.1 Objetivo del ensayo	33
4.1.1.2 Medios de ensayo	33
4.1.1.3 Tamaño de la muestra	34
4.1.1.4 Procedimiento operativo	34
4.1.1.5 Determinación de los parámetros de ensayo	35
4.2 PERMEABILIDAD AL OXIGENO	37
4.2.1 Determinación de la permeabilidad a gases	37

4.2.2	Desarrollo del método de medición de la permeabilidad de hormigones	39
4.2.2.1	Objeto del ensayo	39
4.2.2.2	Revisión de las normativas y recomendaciones existentes	39
4.2.2.3	Medios de Ensayo	40
4.2.2.4	Forma y tamaño de la muestra	41
4.2.2.5	Procedimiento operativo	41
4.2.2.6	Expresión de los resultados	42
4.2.2.7	Comprobación del método de ensayo	43
4.2.2.8	Ventajas del método	43
4.2.2.9	Correlación de la permeabilidad al oxígeno y la permeabilidad al agua	43
5.	ANEJO DE NORMAS	45
5.1	DETERMINACION CONSISTENCIA UC	45
5.1.1	Objeto y campo de aplicación	45
5.1.2	Normas para consulta	45
5.1.3	Muestra	45
5.1.3.1	Aparatos empleados	45
5.1.3.2	Mesa vibratoria	45
5.1.3.3	Varilla de sección circular	45
5.1.3.4	Molde cilíndrico	45
5.1.3.5	Tolva de llenado	46
5.1.3.6	Pesa de compactación	46
5.1.3.7	Reloj con interruptor	46
5.1.3.8	Material complementario	46
5.1.4	Procedimiento operativo	46
5.1.5	Expresión de resultados	46
5.1.6	Informe de resultados	47
5.2	DETERMINACION DE LA POROSIDAD	47
5.2.1	Definición, objeto y campo de aplicación	47
5.2.2	Normas para consulta	47
5.2.3	Aparatos empleados	47
5.2.4	Muestra	47

5.2.5	Procedimiento de ensayo	47
5.2.5.1	Determinación del peso seco de la muestra (m1)	47
5.2.5.2	Determinación del peso de la muestra saturada (m2)	48
5.2.5.3	Determinación del volumen aparente de la muestra (Va)	48
5.2.5.4	Cálculo y expresión de resultados	48
5.2.5.5	Informe del ensayo	48
5.3	DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD AL OXIGENO	49
5.3.1	Objeto y campo de aplicación	49
5.3.2	Normas para consulta	49
5.3.3	Aparatos empleados	49
5.3.3.1	Estufa	49
5.3.3.2	Oxígeno	49
5.3.3.3	Manómetro	49
5.3.3.4	Caudalímetros de pompa de jabón	49
5.3.3.5	Bastidor y gato hidráulico	50
5.3.3.6	Célula y goma de ajuste	50
5.3.3.7	Accesorios	50
5.3.4	Muestra	51
5.3.5	Procedimiento de ensayo	51
5.3.6	Cálculo y expresión de resultados	51
5.3.7	Informe del ensayo	51

1. EL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR): UN CAMINO LOGICO.

“La reflexión a lo largo del tiempo permite al autor creer que con respecto a los costos inferiores y también a la adaptabilidad a los cimientos que pueden parecer cuestionables para la presa actual normal, existe un campo de utilidad que podríamos llamar “presa de relleno de hormigón”; es decir, una sección de presa de gravedad construida con hormigón pobre que se construye desde el fondo hasta arriba como una única masa, capa sobre capa, del mismo modo que se construyen las presas de relleno, con impermeabilidad y durabilidad en las superficies expuestas. Esencialmente de lo que se trata es de una presa de gravedad que con un gran aumento de volumen y de sección transversal permitiese una sustancial reducción en el contenido unitario de cemento y una gran simplificación del proceso constructivo como un caso medio, dando por supuesto que el paramento de aguas arriba tiene un talud de 10:1 y el talud de aguas abajo de 1:1. Podrían usarse encofrados en ambos paramentos, pero, a menos que lo exijan las condiciones de desvío del río, no se necesitarían juntas entre estribos, y la única restricción a los trabajos del contratista, dentro de los límites principales del entorno, sería la impuesta por la construcción de galerías de inspección, conductos y elementos similares.

En el cuerpo principal de la presa podría utilizarse un hormigón pobre, casi seco, de 111-133 kg/m³, acompañado de finos. Este hormigón podría extenderse en capas delgadas y vibrarse por bulldozers que circularan sobre la superficie superior de la presa a medida que prosperara la obra en zonas sucesivas. Con este hormigón de tan bajo contenido de cemento, que presenta resistencias grandes en unos pocos meses, podría generarse sólo de la mitad a las dos terceras partes del calor de hidratación de un hormigón normal de presa y tendría, consecuentemente, menor tendencia al cambio de volumen debido a este hecho”.

Homer Hadley. (Transactions of the A.S.C.E. 1941).

Las proféticas palabras de **Homer Hadley** tendrían su primera confirmación práctica en los años 1960-65 con dos realizaciones que pueden considerarse como precursoras o antecesoras directas de la técnica del hormigón compactado con rodillo (HCR): la ataguía de la **presa de Shihmen** - construida entre 1960 y 1961 - y la **presa de Alpe Gera** - construida entre 1961 y 1965 -.

La primera colocación de un hormigón HCR tuvo lugar en la ejecución del núcleo de la ataguía de la **presa de Shihmen**, en Taiwán. Esta primera realización se caracterizó por:

- el empleo de los mismos áridos que en el hormigón convencional.
- el uso de una granulometría continua.
- la fabricación en la misma planta que el hormigón convencional.

- una dosificación de conglomerante de 107 a 120 kg/m³ y compuesto por cemento pórtland y cenizas volantes a partes iguales.
- la utilización de dumpers para el transporte del material desde la hormigonera al tajo.
- la extensión en tongadas de 0,30 m de espesor con bulldozer.
- la compactación se realizó con el tránsito de los dumpers y bulldozers.
- la cantidad de agua se fijó en base a la definida por la humedad óptima en el ensayo Proctor Modificado.

El hormigón se diferenciaba de los utilizados habitualmente en dos aspectos: una dosificación más baja, siguiendo la tendencia americana en los hormigones convencionales y la definición de la cantidad de agua siguiendo métodos de movimiento de tierras. La puesta en obra siguió casi totalmente los esquemas de las obras de tierra, consiguiéndose la compactación mediante el paso de la maquinaria.

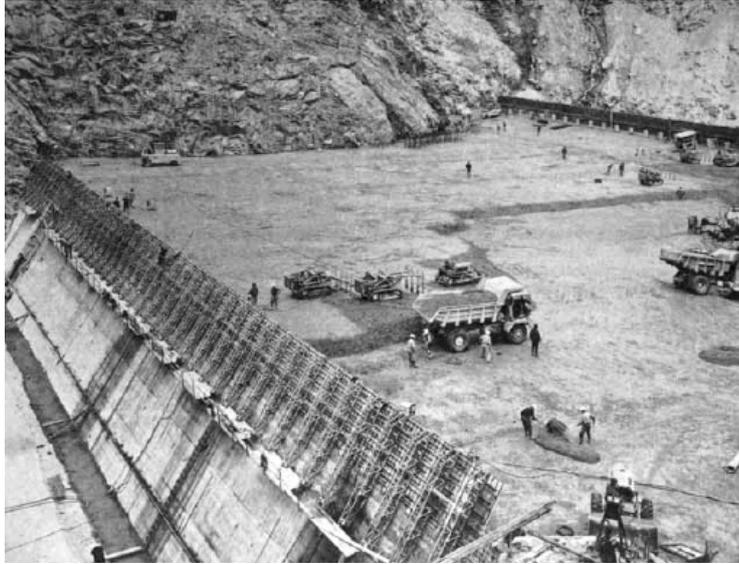
John Lowe III, autor de esta obra, sugirió 1962 la posibilidad de utilizar compactadores de neumáticos o lisos vibrantes en la compactación del hormigón y propuso el empleo de este hormigón en una sección de presa vertedero dentro de una presa de materiales sueltos. Además fue quien acuñó el término **rollcrete**, abreviatura de roller compacted concrete, por el que se le conoce en la actualidad.

Entre 1960 y 1965 se construyó la **presa de Alpe Gera** en Italia - presa de gravedad de 178 metros de altura, paramento de aguas abajo de talud 0,70 y de aguas arriba de 0,03, anchura en la base de 110 metros y longitud de coronación de 520 metros -. En ella se utilizó una pantalla impermeabilizadora de acero de 3 mm de espesor¹ - sistema utilizado en las presas italianas de mampostería de principios del siglo XX - y una forma de puesta en obra consistente en el extendido de tongadas horizontales de poco espesor desde una ladera a la otra sin interrupción (Fotografía 1).

El hormigón, fabricado en una central convencional, se transportó en camiones dumpers de 6 m³ y se extendió en capas de 80 cm mediante angledozers. Posteriormente se vibraba con baterías de cuatro vibradores colocados en bulldozers, quedando el espesor definitivo en 70 cm. Este sistema de transporte y extendido se varió en una franja paralela al paramento de aguas arriba - zona afectada por los conductos de drenaje y los anclajes de la pantalla metálica -, y en la parte superior de la presa - situada a mayor altura que la planta de hormigonado [2].

Tras el extendido y vibrado continuo, a las pocas horas se procedía a cortar la presa en bloques mediante una máquina preparada al efecto que constaba de gatos hidráulicos vibratorios dotados de una cuchilla de 3 metros de ancho por 1 metro de altura.

¹ La pantalla es formada por láminas de 6,00 x 1,80 m unidas mediante juntas de dilatación y ancladas al cuerpo de presa mediante anclajes en malla de 2 x 2 m.



Fotografía 1: Presa Alpe Gera. Italia (1965).

El hormigón empleado en la presa fue de distintas características según las zonas:

- Dosificación de cemento entre 250 y 300 kg/m³ en la cimentación.
- Dosificación de cemento variable entre 200 y 115 kg/m³ en el cuerpo de presa y disminuyendo con la altura de la misma.
- Dosificación de 250 kg/m³ de cemento en ambos paramentos.

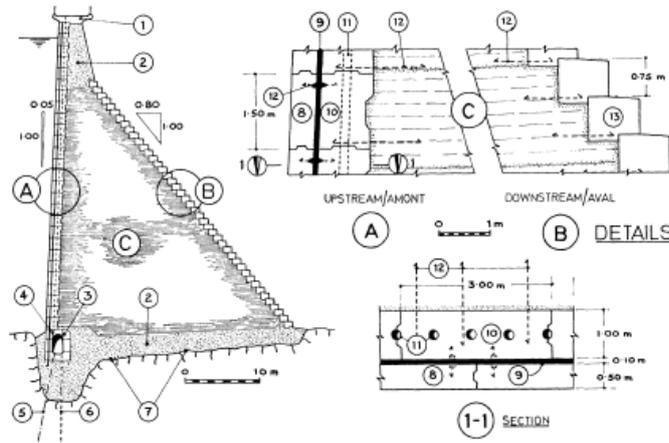
El cemento utilizado fue uno de bajo calor de hidratación según normas italianas. La resistencia a compresión conseguida en estos hormigones se expone en la siguiente tabla.

Presa de Alpe Gera. Resistencias obtenidas en los distintos hormigones utilizados.				
	Resistencia 7 días kg/cm ²	Resistencia 28 días kg/cm ²	Resistencia 90 días kg/cm ²	Resistencia largo plazo kg/cm ²
115 kg/m ³	115	182	228	368 (1200 días)
150 kg/m ³	142	223	272	394 (290 días)
200 kg/m ³	193	309	393	475 (210 días)
250 kg/m ³	262	377	451	627 (1200 días)
300 kg/m ³	307	422	485	655 (300 días)

A partir de aquí la evolución cronológica de los hechos y actuaciones en este campo pueden resumirse de la siguiente forma:

- En el año 1965 se construyen los estribos, de 18 m de altura, de la **presa de Manicouagan I** (Quebec) con un hormigón pobre extendido con bulldozers y vibrado internamente.
- **A.I.B. Moffat** propuso en el XI Congreso ICOLD de Madrid en 1973 un tipo de presa basada en lo que en Inglaterra se conocía como “Dry Lean Concrete” [Q-43 R-21]. Este

material - cuya traducción lo define perfectamente: hormigón magro seco - se utilizó en dicho país desde la década de los 40 en pavimentos, sub-bases y algunos otros usos. Sobre esta base, el autor propuso un tipo de presa basado en la utilización de tres elementos²: una membrana o cubierta impermeable en el paramento de aguas arriba, un cuerpo central de D.L.C y unidades prefabricadas para la formación del paramento de aguas abajo.



Principal Features of a D.L.C. Dam.

- | | |
|--|--|
| (A) Upstream facing zone : Detail A. | (7) Underdrains. |
| (B) Downstream facing zone : Detail B. | (8) Outer precast unit. |
| (C) Rolled D.L.C. core. | (9) Poured Bitumen. |
| (1) Precast deck units. | (10) Inner precast unit. |
| (2) Mass concrete. | (11) Relief drains (200 mm \varnothing at 750 mm centres). |
| (3) Inspection/drainage gallery. | (12) Ties. |
| (4) Provision for local prestress. | (13) Downstream facing unit. |
| (5) Grout curtain. | |
| (6) Relief curtain. | |

Figura 2: Propuesta de Moffat para la presa de "Dry Lean Concrete Dam"

- La construcción de la **presa de Tarbela** (Pakistán) (1974-1982), supone un primer paso práctico importante de la nueva técnica con la colocación de más de 2,5 millones de m³ de hormigón HCR. La aplicación inicial fue la sustitución de una escollera de protección destruida en el colapso de un túnel durante el primer llenado. Esta reparación se continuó con el refuerzo del cuenco amortiguador y de la contraataguía. El árido utilizado fue el aluvial del río, con un tamaño máximo de 150 mm y un contenido inicial de cemento pórtland de 134 kg/m³, realizándose el transporte con dumpers y traíllas y compactándose con rodillos vibrantes. En la rehabilitación de los aliviaderos el árido fue relativamente bien graduado, con un tamaño máximo de 150 mm y aproximadamente un 10% de finos que pasaban por el tamiz 200. El árido se dividió en dos tamaños cortando por el tamiz de 19 mm, y la combinación de ellos con 110 kg/m³ de cemento pórtland y agua se amasó en una mezcladora continua.
- En Japón se inicia la investigación sobre HCR en 1974, dando lugar a la técnica denominada RCD (Rolled Concrete Dam) y que desemboca en la construcción de la **presa de Shimajigawa** (1980) de 89 metros de altura - y la losa de cimentación de la **presa de Ohkawa** (1979-1980). Las mezclas de RCD para estas dos obras tenían un contenido en conglomerante de 130 kg/m³, de los que el 30% correspondían a cenizas volantes, siendo el tamaño máximo del árido de 80 mm.
- En Estados Unidos, el Army Corps desarrolló en 1974 una alternativa de gravedad realizada en HCR para la **presa de Zintel Cayon**, que finalmente se construyó de tierras.

² La utilización de estos tres elementos ya había sido propuesta por Wallinford en el anterior Congreso celebrado en Montreal [Q-39 R-21].

- Si bien la presa anterior no se construyó, si sirvió como base para el desarrollo del proyecto de la **presa de Willow Creek** (1983).

La **presa de Willow Creek** tiene una altura de 51 metros, un volumen de 300.000 m³ de HCR y paramentos vertical el de aguas arriba y con talud 0,8 el de aguas abajo.



Fotografía 2: Presa de *Willow Creek* (Estados Unidos, 1983).

Las características principales del hormigón empleado fueron las siguientes [3] [4]:

- árido de machaqueo de tamaño máximo de 76 mm y entre un 4 y un 10% de finos que pasaban por el tamiz 200.
- la cantidad de conglomerante fue variable, dependiendo de la zona de la estructura. Para el HCR interior se emplearon 47 kg/m³ de cemento y 19 kg/m³ de cenizas volantes.

Con posterioridad el interés acerca de la utilización de esta técnica en la construcción de presas sufrió un importante aumento tal y como pudo apreciarse en los Congresos ICOLD de Lausana en 1985 y San Francisco en 1988.

2. LAS PRESAS DE HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO (HCR) EN ESPAÑA.

Las presas de hormigón compactado con rodillo construidas en España son de gravedad. En la tabla siguiente se recogen las principales características de las más notables por sus características.

Presas de HCR notables.				
Presa.	Año.	Altura (m)	Longitud (m)	Volumen (m3)
Erizana.	1985	12	115	9.700
Santa Eugenia.	1988	83	280	225.000
Arriarán.	1993	58	206	110.000
Cenza.	1993	49	640	215.000
Guadalemar.	1994	13	400	50.000
Puebla de Cazalla.	1994	71	220	205.000
Urdalur.	1994	58	396	160.000
Sierra Brava.	1995	53	800	277.000
Rambla Boquerón.	1996	58	290	133.000
Atance.	1998	45	185	70.000
Val.	1998	90	400	620.000
Rialb.	1999	101	600	1.100.000
La Br eña II	En construcción	119	662	1.400.000
Los valores de los volúmenes corresponden a los de HCR				

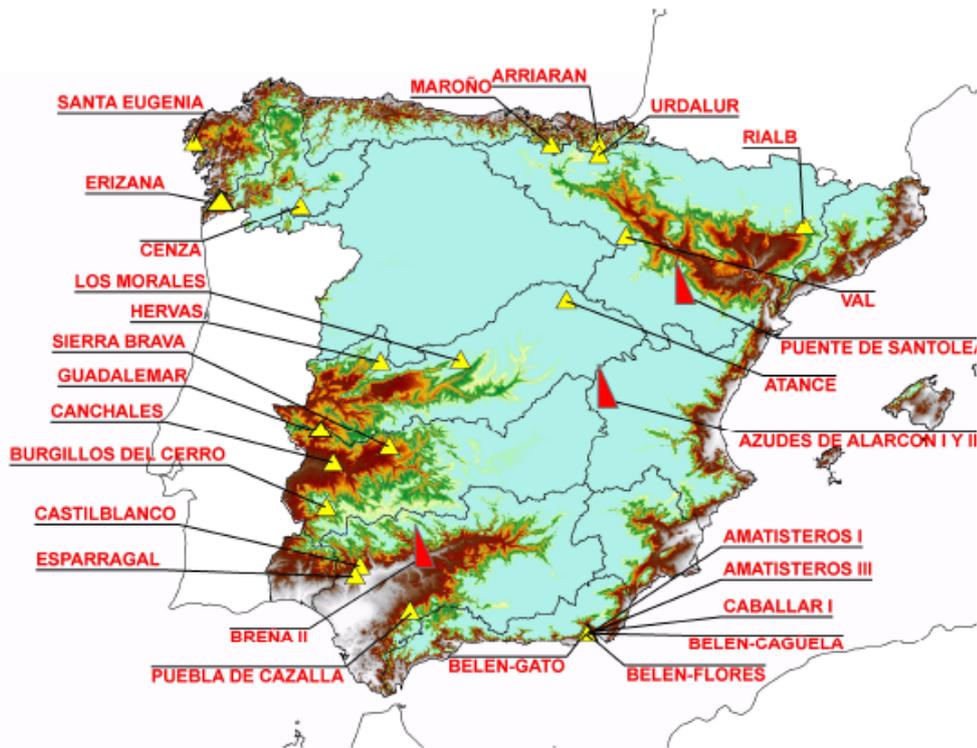


Figura 2: Presas HCR en España.

2.1 HORMIGÓNES H.C.R. EN ESPAÑA

Las características generales de los hormigones españoles son:

- Los áridos utilizados son de idéntica calidad a los utilizados en hormigón convencional.
- Las puzolanas son cenizas volantes silicoaluminosas.
- Si bien lo habitual es la mezcla cemento - cenizas en obra, se observa una cierta tendencia al uso del conglomerante de fábrica - cemento tipo V-.
- El tamaño máximo es en general de 60-80 mm a excepción de los casos de las **presas de Erizana y de Santa Eugenia** que fue de 100 mm, si bien en los últimos años se observa una tendencia a su reducción.
 - En caso de utilizarse HCR en los paramentos el tamaño máximo es en general de valor próximo a 40 mm.
- El número de fracciones utilizadas es de 5 ó 6, siguiendo un esquema parecido al de las dosificaciones de los hormigones convencionales.
- La suma de conglomerante más finos < tamiz 200 ASTM suponen valores próximos a los 250 kg/m³, suficientes para conseguir un hormigón impermeable.
- Ausencia generalizada de aditivos. Tan sólo, y en algunos casos, se ha utilizado aditivos retardadores y reductores de agua.
- La dosificación se realiza utilizando métodos que se basan en la tecnología del hormigón.

A continuación se presenta una tabla resumen de las dosificaciones de los hormigones HCR empleados en las presas españolas.

Presas de hormigón compactado en España.							
Dosificaciones de los hormigones.							
Nombre.	D.max.	Árido grueso.	Arena.	Agua.	Cenizas.	Cemento	A/(c+f)
	mm	Kg/m3	Kg/m3	l/m3	Kg/m3	Kg/m3	
Erizana.	100	1668	532	115	90	90	0.60
Castilblanco.	40	1452	628	102	102	86	0.54
Morales. HCR 1.	40	1426	618	108	81	140	0.46
Morales. HCR 2.	80	1548	562	98	74	128	0.48
St. Eugenia. HCR 1.	70	1635	552	100	88	152	0.42
St. Eugenia. HCR 2.	100	1830	430	90	72	143	0.40
Maroño. HCR 1.	70	1575	670	100	80	160	0.42
Maroño. HCR 2.	100	1575	670	98	65	170	0.42
Hervás.	80	1540	540	95	80	155	0.40
Canchales. HCR 1.	40	1490	620	105	84	156	0.44
Canchales. HCR 2.	80	1650	585	100	70	145	0.46
Burquillos.	60	1662	593	85	75	135	0.40
Belén Gato.	40	1364	800	105	73	109	0.60
P. Cazalla. HCR 1.	40	1409	720	127	85	137	0.57
P. Cazalla. HCR 2.	80	1512	688	113	80	130	0.51
Belén Caguela.	40	1364	800	105	73	109	0.60
Belén Flores.	40	1364	800	105	73	109	0.60
Caballar I.	40	1364	800	105	73	109	0.60
Amatisteros I.	40	1364	800	105	73	109	0.60
Amatisteros III.	40	1364	800	105	73	109	0.60
Urdalur.	80	1524	691	90	72	108	0.50
Arriarán.	80	1730	550	100	85	135	0.45
Cenza.	60	1518	733	95	70	130	0.47
Sierra Brava.	80	1590	610	95	80	140	0.43
Guadalemar.	80	1364	836	100	60	125	0.54

R. Boquerón.	80	1568	616	94	130	55	0.51
Val.	80	1552	660	110	80	146	0,5
Atance.	40	1332	811	109	57	190	0,56
Rialb. HCR-1.	70	1532	625	95	130	70	0.47
Rialb. HCR-2.	100	1610	554	90	130	65	0.46
Esparragal	50	1390	739	110	67	157	0,51
La Breña II	50	1441	678	110	80	150	0,48
Azud de Alto Atance	40	1450	700	108	40	75	0,94
Azud de Bajo Atance	40	1430	700	108	40	75	0,94

2.2 ANTECEDENTES. LA PRESA DE SANTA EUGENIA, PRIMERA GRAN PRESA DE HCR

La primera vez que se utilizó el HCR en una presa fue en el dique lateral de la **presa de Erizana** (1984) en el río Bahiña en la provincia de Pontevedra, de una altura de 12 m de altura y 115 de longitud de coronación. De un total de 11.700 m³ de hormigón, 9.700 fueron HCR - el 83% -. La presa principal se construyó con hormigón vibrado (Fotografía 3).



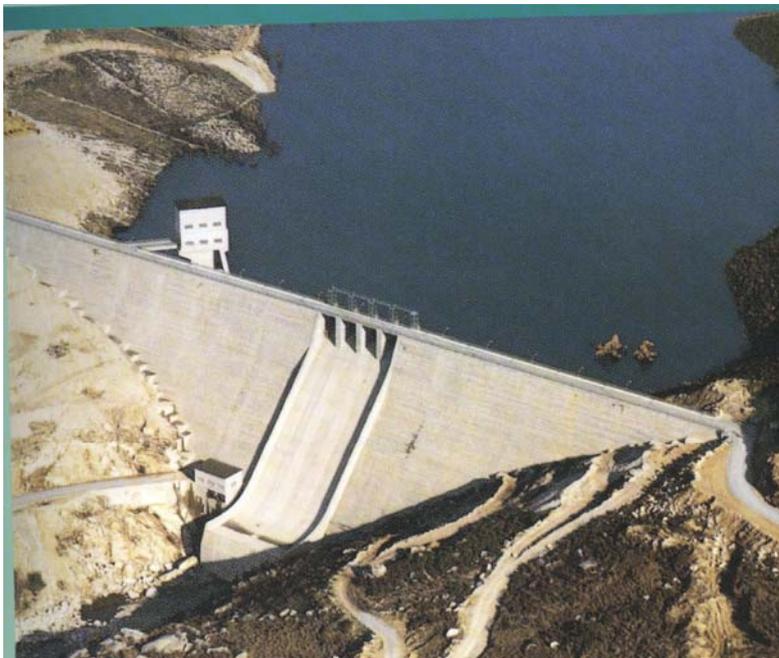
Fotografía 3: Presas de *Erizana*

El año siguiente (1985) se terminó la primera presa construida en España con HCR: la **presa de Castilblanco**, en el río Cala al norte de la provincia de Sevilla, que con una altura máxima de 25 m y una longitud de 124 cierra un valle en U. La sección transversal de la presa tiene el paramento vertical aguas arriba y talud 0,75 aguas abajo. De un total de 20.000 m³ de hormigón, se utilizó HCR en 14.000 m³ - el 70% -.

Los buenos resultados y experiencia conseguida en las dos presas anteriores, permitieron que dos presas comenzadas en 1986 se ejecutaran con esta técnica: la **presa de los Morales** y la

presa de Santa Eugenia. La **presa de Los Morales**, en el río Morales en Madrid, tiene una altura máxima sobre cimientos de 27 m, una longitud de 201 en coronación y taludes vertical el de aguas arriba y 0,75 el de aguas abajo.

La construcción de la **presa de Santa Eugenia**, en río Xallas en la Coruña, supuso el primer gran avance en la aplicación de esta técnica en España. Se trata de una presa de 85 m de altura sobre cimientos, 304 de longitud en coronación y un volumen total de hormigón HCR de 225.000 m³, que suponía el 90% del total. Se utilizó hormigón HCR en todo el ancho del cuerpo de presa, paramentos incluidos. El paramento de aguas abajo se realizó escalonado con alturas de 0,50 metros. En hormigón vibrado se ejecutaron las galerías visitables, el aliviadero y un espesor de 1,50 me en cimentación (Fotografía 4).



Fotografía 4: Presa de Santa Eugenia

2.3 LAS PRESAS DE HCR EN EL PERIODO 1988-1995.

La **presa de Santa Eugenia** marca el comienzo de una etapa de relativa proliferación de presas HCR. Entre 1989 y 1991 se construyen las importantes **presas de Maroño, Canchales** y **Puebla de Cazalla**. En la **presa de Maroño** se utilizaron por primera vez cintas Rotec, si bien sólo hasta el cuerpo de presa, desde donde se descargaba el hormigón en camiones (Fotografía 6).



Fotografía 6: Presa de Maroño

La **presa de Puebla de Cazalla**, en el río Corbones en Sevilla, tiene 71 m de altura máxima y 220 de longitud. En ella se colocaron 205.000 m³ de HCR, lo que significa el 93% del total de la obra. Se empleó el hormigón vibrado en el contacto con la cimentación, cuenco amortiguador, parte superior del aliviadero y contorno de las galerías. En esta presa, y por primera vez en el mundo, se realizó el escalonado del aliviadero con el mismo hormigón HCR que el del resto de la presa (Fotografía 7).



Fotografía 7 : Presa de Puebla de Cazalla

Entre 1991 y 1992 se terminaron de construir las **presas de Hervás y Burguillos** con fines de abastecimiento y cuyas características principales son la pequeña altura y los escasos volúmenes de hormigón compactado. Las alturas son de 33 y 24 m respectivamente, y el hormigón HCR de 25.000 m³ en ambos casos.

En los mismos años se construyeron en Almería 8 presas del tipo gravedad y arco-gravedad de alturas comprendidas entre 10 y 38 m, ejecutándose 2 de ellas con hormigón vibrado y 6 con HCR. Estas son las **presas de Belén-Caguela, Belén Gato, Belén Flores, Amatisteros I, Amatisteros II y Caballar I** (Fotografía 9).

Fotografía 9: Presa de *Belén-Cañuela*

La **presa de Cenza** (1993) tiene una altura sobre cimientos de 49 m, una longitud en coronación de 609. Con un volumen de hormigón de 224.000 m³, el 96% se ejecutó con HCR. (Fotografía 10).

El proyecto inicial databa de 1975 y contemplaba la construcción de una presa de escollera con pantalla asfáltica y aliviadero lateral. Un nuevo estudio comparativo entre una solución similar y otra de hormigón HCR demostró la viabilidad de esta última. El análisis final de costes fue favorable a la HCR por tres motivos:

- un menor coste de ejecución, con un ahorro cifrado en el 10%.
- un menor plazo de ejecución - dos frente a tres años - y un mejor reparto de la inversión, lo que sumado al motivo anterior suponía una mejora económico-financiera de la construcción de la presa superior a un 20%.
- un adelanto en un año en la entrada en funcionamiento de esta parte del salto eléctrico del que forma parte.

El mayor inconveniente venía de las extremas condiciones climatológicas, que habían hecho desechar la opción de presa de hormigón vibrado frente a la de escollera en la década de los 70. El método constructivo se diseñó para poder hormigonar la presa en una sola campaña de verano, colocándose finalmente el hormigón entre la segunda quincena de marzo de 1993 y el catorce de agosto del mismo año, es decir en menos de 5 meses. Se utilizaron cintas de alta velocidad para el transporte del hormigón desde la central hasta el borde del cuerpo de presa, desde donde se transportaba mediante camiones hasta el tajo.



Fotografía 10.
Construcción presa
de Cenza

La **presa de Arriarán** (1993), en el río Oria en Guipúzcoa, tiene una altura de 57 m, una longitud en coronación de 205 y un volumen de 118.000 m³ de hormigón, de los cuales un 89% se ejecutaron con HCR (Fotografía 11).



Fotografía 11: Presas de Arriaran

La **presa de Urdalur** (1994), en el río Alzania en Navarra, se construyó con hormigón vibrado ambos paramentos y todo el aliviadero, además de otras zonas habituales como las galerías o el contacto con la cimentación. La baja relación de volumen de hormigón HCR al total - 62% - complicó la ejecución (Fotografía 12).



Fotografía 12: Presa de Urdalur

La **presa de Guadalemar** (1994), en el río Guadalemar en Badajoz, queda dentro del embalse de La Serena y tiene una altura de tan sólo 13 m, una longitud de 392 y un volumen de 62.000 m³, de los que el 91% se ejecutó en HCR [583] (Fotografía 13). Su diseño tuvo tres fuertes condicionantes:

- el carácter inundable de la presa.
- los fuertes vertidos por coronación en la época en que no está sumergida.
- la rapidez de ejecución en época estival.



Fotografía 13: Presa de Guadalemar

La **presa de Sierra Brava** (1995), en el arroyo Pizarroso en Cáceres, tiene 47 m de altura, 780 de longitud y un volumen de 390.000 m³ de hormigón, de los que 322.000 se ejecutaron con HCR, lo que supone un 83%. Es de destacar la utilización por primera y única vez en España de bordillos prefabricados de 0,90 m de altura para formar los paramentos. Esto condicionó las tongadas, de la misma altura y divididas en tres subtongadas de 0,30 m (Fotografía 14).



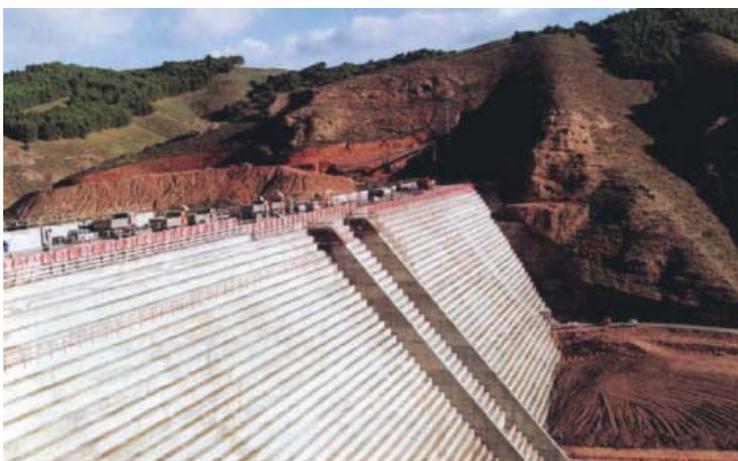
Fotografía 14: Presa de Sierra Brava

2.4 LAS ÚLTIMAS PRESAS CONSTRUIDAS Y EN CONSTRUCCIÓN. LAS PRESAS DE VAL, RIALB Y LA BREÑA.

La **presa de la Rambla del Boquerón** (1997), en la provincia de Murcia, tiene 58 m de altura y 290 de longitud en coronación, con taludes 0,05 y 0,73 en los paramentos de aguas arriba y aguas abajo, siendo escalonado este último. Los hormigones de cimentación y paramentos son los mismos que el del cuerpo de presa, con la única diferencia de que se aportó un fluidificante y un mortero de contacto, para posteriormente ser vibrado y compactado.

La **presa del Atance** (1998), en el río Salado, tiene una altura de 45 m, 185 longitud en coronación, un volumen de hormigón de 80.000 m³, de los que 70.000 fueron HCR, y se construyó en tan sólo 53 días.

La **presa del Val** (1998), en el río Val, tiene una altura de 90 m, una longitud en coronación de 400, unos taludes de 0,80 aguas abajo y vertical aguas arriba y un volumen de 620.000 m³ de hormigón HCR - sobre un total de 740.000 m³ - (Fotografía 15).



Fotografía 15: Presa del Val

La solución adoptada fue la de construcción por bloques y con pantalla de aguas arriba, con un diseño distinto a lo que se intuía en España como tendencia tras diversas presas construidas

de forma continua y posterior cortado de las juntas. Los bloques se construyeron de 60 m de longitud y 2,40 de altura. La pantalla del paramento de aguas arriba tiene un espesor de 1,50 m y en ella se dejaron juntas cada 10 m.

La **presa de Rialb** (2000), en río Segre, tiene una altura de 101 m. 600 de longitud en coronación y 1.100.000 m³ de volumen de hormigón HCR(Figura 3) (Fotografía 16).

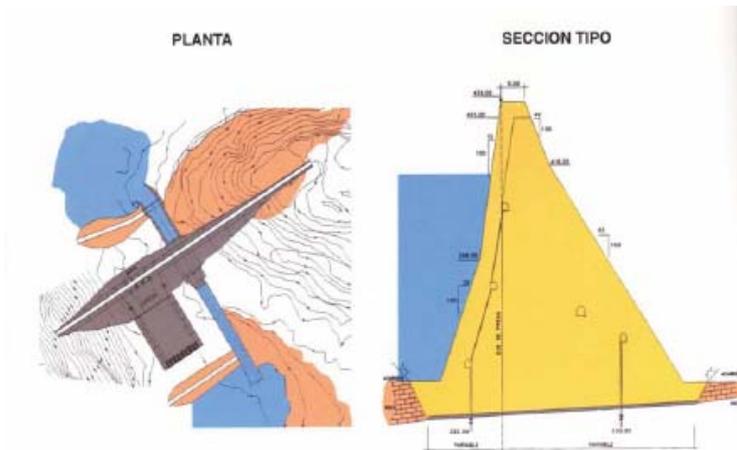


Figura 3. Presa de Rialb

Su proceso constructivo esta caracterizado por:

- construcción continua y ejecución de las juntas por el método de hincado.
- no disposición de pantalla.
- utilización integral - por primera vez en España - de cintas Rotec para la colocación de la casi totalidad del hormigón HCR.



Fotografía 16:
Presa de Rialb

La presa de la Breña II, sobre el río Guadiato, tiene 119 m de altura y un volumen de 1.400.000 m³ de hormigón HCR. Una de las dificultades de esta obra es que se esta construyendo a unos 100 m aguas debajo de la actual presa de la Breña I.

La Breña II tiene un paramento de aguas arriba con un talud 0,05/1 en los 79 m superiores y de 0,30/1 en la parte baja y un paramento aguas abajo con talud 0,75/1. La longitud en coronación es de 119 m y las juntas transversales dividen al cuerpo de presa en 26 bloques de anchura variable entre 15 y 30 m.



Fotografía 17:
Presa de la
Breña II



Fotografía 18:
Presa de la
Breña II

3. COMENTARIOS SOBRE EL DISEÑO DEL HORMIGON HCR

3.1 INTRODUCCION

En la construcción de presas deben emplearse materiales cuyas propiedades intrínsecas, su puesta en obra y la evolución de sus características sean susceptibles de control.

En la técnica de construcción de presas con hormigones HCR existen diferentes caminos de aplicación según los condicionantes específicos de cada obra y país. El fin general es diseñar un hormigón HCR que sea económico, que cumpla con las especificaciones técnicas, que se estabilice con el tiempo en su relación con el medio ambiente, que sus características sean susceptibles de control y que, durante un espacio de tiempo, permita conformar, con una determinada puesta en obra, una fábrica que, en su ensamblaje o no con otros elementos funcionales - pantallas o recubrimientos - dé como resultado una estructura estable, durable, impermeable y resistente.

Es decir, en un determinado diseño de presa, la definición del material para un elemento funcional está condicionada por su relación con los otros elementos y con el medio ambiente. Por lo tanto, no existen diferentes concepciones del hormigón HCR, lo que existen son diferentes diseños.

Por ejemplo, en el caso de las presas con pantalla y/o recubrimiento en su paramento mojado se debe considerar este hecho en la definición del material de construcción y en la forma y condiciones de puesta en obra, es decir se diseña un material para una tipología y función específica. El diseño de presas pantalla, en todas sus variantes e incluido el hardfill, introduce diferentes condicionamientos y flexibiliza y amplía la oferta, es decir, se consideran nuevas variantes en el análisis del binomio seguridad – economía.

3.2 COMPOSICION DEL HORMIGON HCR. CANTIDAD DE AGUA Y CONTENIDO DE FINOS. METODO DE MEDICION DE CONSISTENCIAS UC

El hormigón HCR y el denominado hormigón convencional son materiales porosos, cohesivos y dinámicos en su relación con el medio ambiente y tienen en común todos los conceptos de carácter intrínseco. La primera cuestión objeto de reflexión se extrae de la lectura de los siguientes párrafos del libro³.

³ Jacques Baron et Raymond Sauterey “ Le béton Hydraulique. Connaissance et pratique” Presses Ecole National Pont et Chausses. Paris (1982)

No existen hormigones ricos o pobres en pasta lo que existen son hormigones bien y mal dosificados. Es un grave error establecer distinciones en los hormigones.

En el hormigón HCR la cantidad y distribución geométrica de sólidos y la cantidad de agua y aditivos debe ser la adecuada en orden a obtener un mínimo de porosidad inicial después de la puesta en obra -conformidad entre la puesta en obra y el comportamiento del hormigón en estado fresco-. La cantidad y distribución caracterial de los sólidos – principalmente de los finos – debe ser la adecuada en orden a conseguir las características exigidas en el material endurecido.

Un hormigón bien dosificado es aquel que tiene una cantidad de finos - cemento+ceniza volante (puzolana)+finos < tamiz 200 serie ASTM – y de agua que hace, para una granulometría dada, que la porosidad después de su puesta en obra sea mínima -función de relleno - y que el hormigón endurecido tenga las características exigidas.

3.2.1 Contenido de agua, trabajabilidad.

Es interesante analizar los resultados obtenidos en un simple ensayo. (Figura 4).

“ Le béton résiste d’autant mieux et dure plus qu’il est moins poreux. Sa porosité, c’est-à-dire le volume relatif occupé par l’air et l’eau, décroît lorsque sa maturité augmente ; elle peut atteindre une valeur minimale caractéristique du ciment³ utilisé et de son dosage. Le plus souvent, cependant, cette limite n’est pas atteinte en pratique ; la porosité du béton durci reste alors largement influencée par le valeur de sa porosité initiale, c’est à dire de sa porosité juste après sa mise en place. Or, cette valeur dépend à la fois du mélange de départ et des conditions de mise en oeuvre. Elle est loin d’être calculable a priori (pag 132)

.....on souhaite minimiser la porosité du béton au terme de sa mise en place, pour qu’il soit mécaniquement plus résistant et qu’il dure plus longtemps” (pag 144).

On doit distinguer clairement les deux rôles du ciment : fines de remplissage et liant hydraulique. En tant que liant hydraulique, son dosage dépend de sa classe et de les caractéristiques cherchée ; en tant que fines de remplissage, il existe un dosage optimal pour lequel la porosité du béton est minimale..

.... ; il suffit de jouer a la fois sur la classe du liant hydraulique et sur l’apport de fines inertes. Caquot, et a sa suite Joisel et Faury accordent beaucoup d’ importance a ce dosage optimal en élément fins....

.....il faille ajouter fines inertes. La distinction entre les deux rôles ciment prend plus d’importance encore avec l’ accroissement du coût de l’énergie et l’utilisation presque generalisee de ciments a secondaires. » (pag 157) .

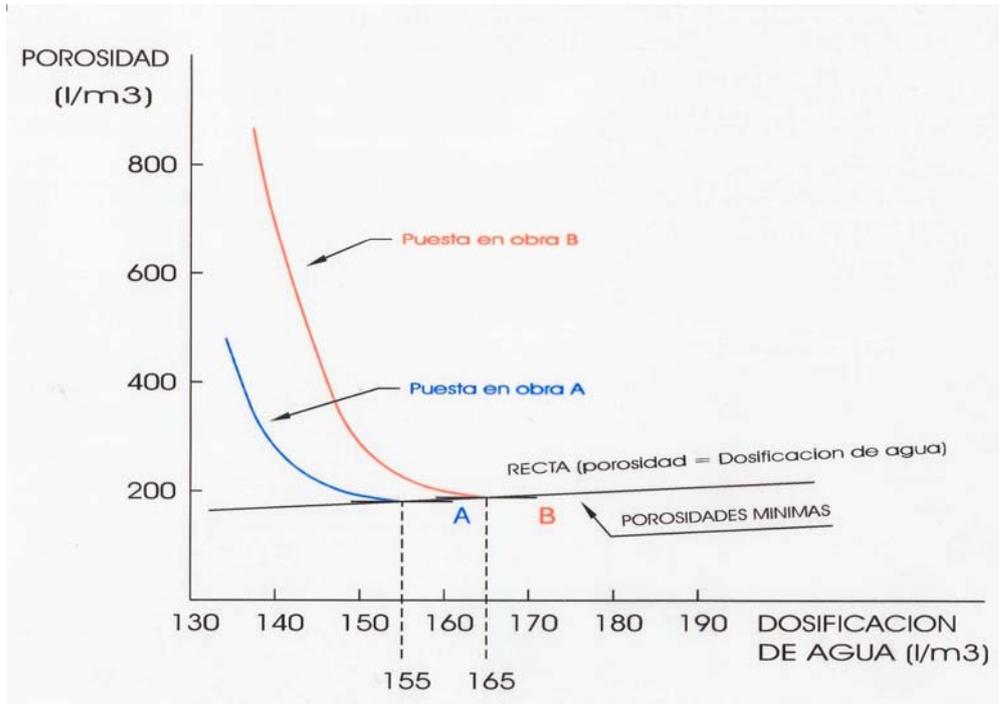


Figura 4. Ensayo

Si se observan los resultados obtenidos se puede colegir que en todo hormigón, y para cualquier tipo de puesta en obra, si se varía su contenido de agua, a partir de una determinada cantidad de agua la porosidad inicial no depende de la puesta en obra y el incremento de porosidad sobre la mínima después de la puesta se reduce a la correspondiente al agua añadida en demasía sobre la cantidad óptima.

De esta simple experiencia se deduce que los hormigones HCR se deben diseñar por el denominado lado húmedo, puesto que la garantía de obtener un hormigón aceptable es mucho mayor frente a cualquier contingencia de puesta en obra. Además, como es obvio, los hormigones son más segregables cuanto menor es la cantidad de agua.

3.2.2 Determinación de la cantidad de pasta –cantidad de finos y de agua-

El ensayo de consistencia UC permite obtener, para unos determinados áridos gruesos, arena, cemento y puzolanas la cantidad óptima de pasta –cantidad de finos y de agua-. Este ensayo de basa en someter a una muestra de hormigón en estado fresco, la que entra en una probeta de 15x30 cm, a un tiempo fijo - 30 segundos - de vibración con un peso de 8,5 kg encima, con la mesa de utilizada en la determinación de la consistencia Vebe, y medir el asiento que se genera.

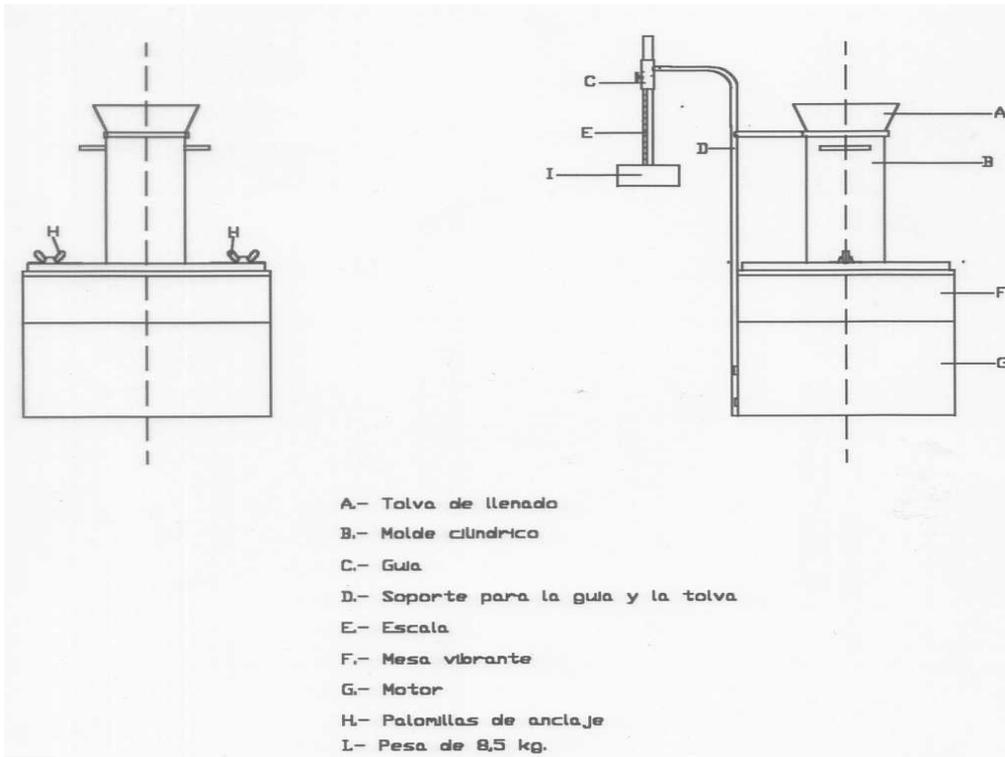


Figura 5. Consistencia UC

Los resultados de asientos UC, tiempo Vebe y características de hormigón endurecido que se presentan a continuación son los obtenidos para una determinada granulometría y variación del contenido de conglomerante y cantidad de agua.

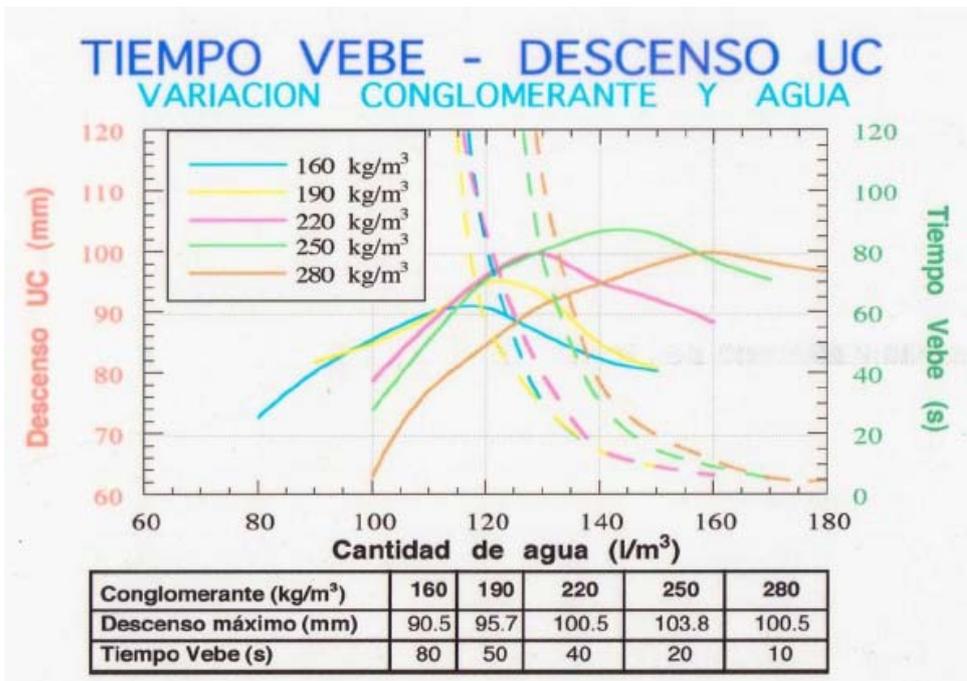


Figura 6. Ensayo contenido óptimo de pasta -finos y agua-

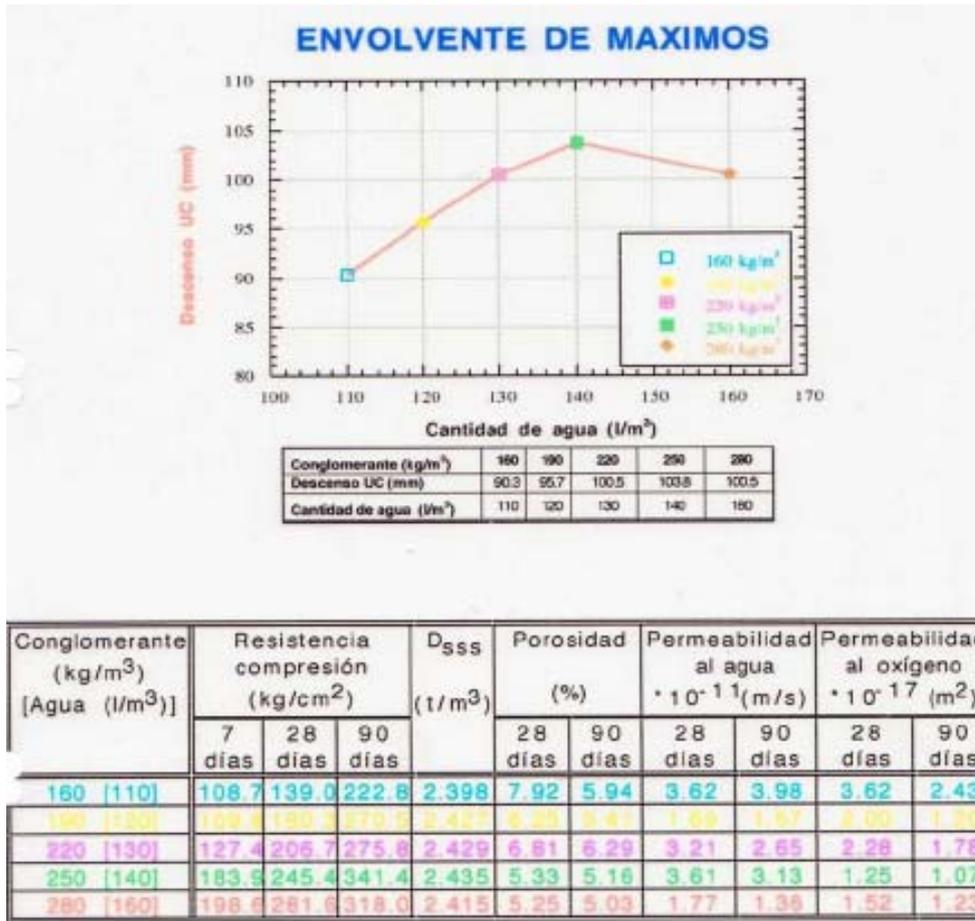


Figura 7. Contenido optimo de pasta –finos y agua-.

Como se observa la zona en el entorno de 250 kg/m³ de contenido de conglomerante y 140 litros de agua es en la que se obtienen mejores características del hormigón HCR.

3.2.3 Resultados obtenidos en las presas de Erizana y Santa Eugenia

3.2.3.1 La composición de los hormigones y su comportamiento a largo plazo

Los hormigones utilizados en las **presas de Erizana y Santa Eugenia** [5] presas fueron bastante diferentes, y se realizo un estudio detallado de sus características de ambos con el ánimo de compararlos. Las dosificaciones son las que se reflejan en la tabla siguiente.

Dosificación hormigones de Erizana y Santa Eugenia.			
ERIZANA.	H.C.R.	S. EUGENIA.	HCR-2.
Áridos.		Áridos.	
100/50	560	100/70	520
50/20	570	70/30	540
20/6	538	30/15	385

		15/5	385
6/0	532	5/0	430
Cemento.		Cemento.	
PA-350	90	PA-350	125
C. Volantes.	90	C. Volantes.	90
Agua.	100	Agua.	90

La **presa de Erizana** (1985) se construyó con un hormigón seco, con tiempos VeBe superiores a 30 segundos, contenido en pasta reducido, medios de fabricación y puesta en obra limitados y una nula experiencia en este tipo de técnica en su momento. La **presa de Santa Eugenia** (1988) se construyó con un hormigón con tiempos VeBe de 10-12 segundos, con un contenido de pasta adecuado y medios de fabricación y puesta en obra potentes. En ella se utilizaron dos tipos de hormigones HCR, el primero de ellos en una franja paralela al paramento de aguas arriba y el segundo para el resto de la presa a excepción de determinadas zonas en las que se empleó el hormigón convencional.

Con los testigos extraídos dos años después de la finalización de las obras se realizaron ensayos para la determinación de la porosidad de la fase mortero, porosidad del hormigón, permeabilidad al agua y al oxígeno, resistencia a tracción y compresión y modulo de elasticidad. Los resultados se muestran en la tabla siguiente.

En la tabla siguiente se pueden ver los resultados comparados de los hormigones de ambas presas, en las que se aprecian sustanciales.

	Densidad Seca t/m3	Porosidad Hormigón %	Porosidad mortero %	P. Oxigeno (m2)x10-6	P. Agua (m/s)x10-9	R. tracción Kg/cm2	Resistencia compresión Kg/cm2	Modulo Elasticidad Kg/cm2
Erizana	2,21	12,8	18,38	8,9	4,00	16,5	151,7	118,2
Santa Eugenia	2,38	6,6	14,48	1,30	3,80	32,4	348,9	216,3

Los hormigones de Santa Eugenia tienen:

- mayor densidad seca - del orden del 5% -.
- menor porosidad - del orden de la mitad -.
- menor permeabilidad al agua y al oxígeno - dos órdenes menores -.
- módulos de elasticidad mayores - prácticamente el doble - y con una menor dispersión.

En el estudio se colige los siguiente [5]:

- Para obtener un hormigón y una fábrica impermeable, densa, duradera y resistente, se deben emplear una adecuada dosificaciones de finos y tiempos VeBe reducidos - del orden de 10-12 segundos -, es decir por el lado húmedo.

- Se pueden establecer en obra medios de control de porosidades y permeabilidades con los métodos, nada sofisticados, desarrollados en este sentido por el **Grupo de Trabajo de HCR de la Universidad de Cantabria (apartados 4.1 y 4.2)**.

3.2.3.2 Conformidad del comportamiento del hormigón en estado fresco y la forma de puesta en obra

Sobre los testigos extraídos de la obra se realizaron ensayos para las determinación las porosidades, permeabilidades al agua y al oxígeno de la parte superior, media e inferior de las tongada. Los resultados de la presa de Bayona se muestran en la figura 8. Los testigos de Santa Eugenia no presentaron las más mínima heterogeneidad en ninguna característica.

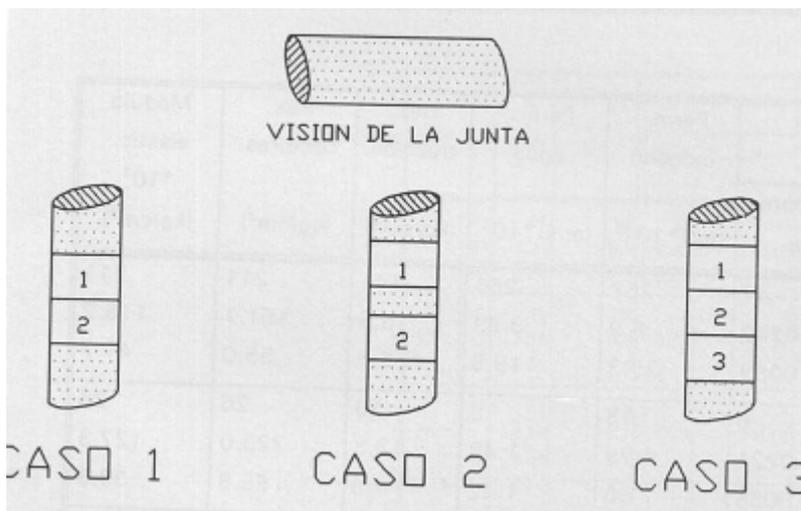


TABLA 7

Caso N°		Porosidad	K_{agua}	$K_{\text{oxígeno}}$	D_{seca}	$T_{\text{trámite}}$
1	superior	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	inferior	100.36	181.88	307.28	99.55	97.82
2	superior	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	inferior	109.60	1003.77	831.98	98.29	88.55
3	superior	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	medio	113.44	546.97	224.86	98.91	92.03
	inferior	120.51	584.53	839.77	98.36	65.12

Figura 8. Presas de Bayona (Erizana). Efecto de la compactación

Como se observa en los hormigones diseñados por el lado húmedo y una adecuada cantidad de pasta se obtiene una óptima compactación en toda la tongada y en los diseñados con una supuesta óptima cantidad de agua se produce una fuerte heterogeneidad en el espesor de la tongada.

3.3 LA UNION ENTRE TONGADAS

En las presas de hormigón convencional se diseñan los hormigones para obtener bloques resistentes e impermeables de una altura de unos 2 m que se unen a otros mediante la aplicación en su superficie superior de una técnica depurada, conocida y, si se realiza bien, de

óptimos resultados. En las presas de hormigón HCR se diseñan los hormigones para obtener bloques resistentes e impermeables de una altura de unos 2 m que se obtienen por unión de tongadas de 30 cm mediante la aplicación de una mezcla de unión o no y con resultados dispares y no predecibles si la puesta en obra no es la adecuada.

Existe la opinión en algunos ambientes técnicos que el contenido de pasta es determinante en el establecimiento de las condiciones adecuadas para unión entre tongadas: admítase.

Llegados a esta situación y preguntándose porque existe esta tendencia, se puede encontrar una posible respuesta: un alto contenido de pasta puede facilitar la unión entre tongadas. ¿Y de que depende esa facilidad o aptitud de unión entre tongadas?; pues depende entre otras de: las características y composición de la pasta, de la cantidad de pasta, de la composición del hormigón y su comportamiento en estado fresco, del tiempo entre tongadas, de que se realice o no algún tipo de tratamiento, del estado medio ambiental hasta que se recubra la superficie de la tongada, del mantenimiento de la tongada, de la compactación y puesta en obra en general, etc.

Dado que la adecuada cantidad de pasta es una de las muchas variables de que depende la facilidad de unión entre tongadas, no parece razonable darle tanta importancia cuando hay otras con igual o mayor trascendencia.

Un comentario final, de acuerdo con los condicionantes estructurales habrá que definir que tipo de unión se requiere, y en función de estos requerimientos –resistencia y permeabilidad-, se establecerán las condiciones de mantenimiento de tongadas, ambientales y temporales bajo las cuales se alcanzan dichos requerimientos.

3.3.1 Influencia de la madurez del hormigón HCR, consistencia y tipo de tratamiento

En la figura siguiente se presentan los resultados de la resistencia a tracción - temperatura de 20º, edad 180 días y humedades ambiental 100%- que se obtiene en juntas de trabajo de hormigones HCR cuando se varía su consistencia, madurez y tipo de tratamiento. Resistencia a tracción de juntas horizontales.

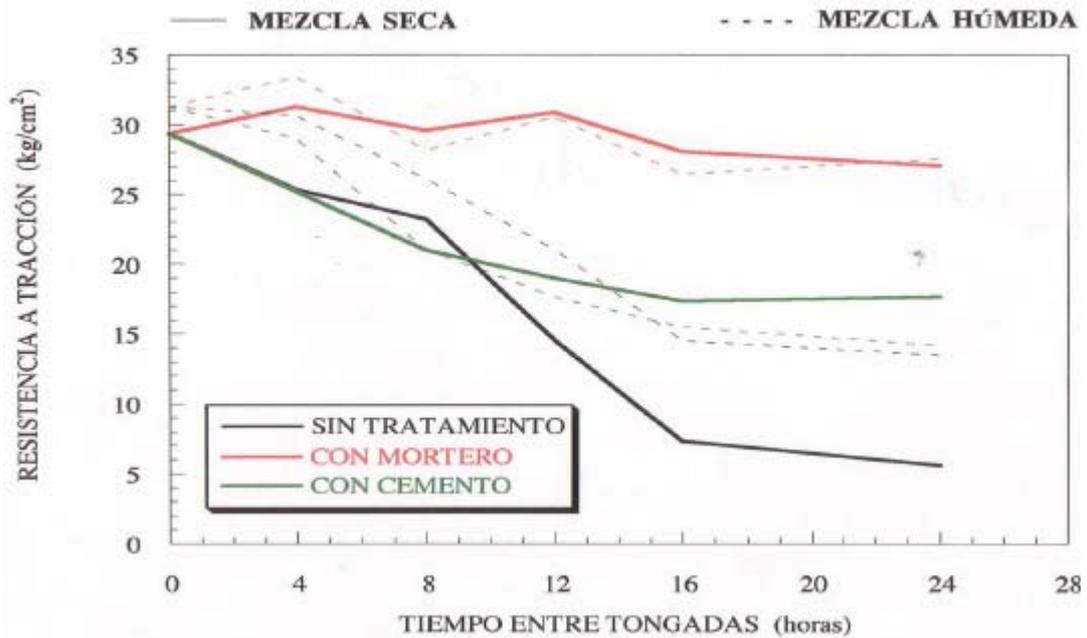


Figura 9. Unión entre tongadas

3.3.2 Influencia de la madurez y condiciones ambientales –humedad-

Resistencia a tracción de juntas horizontales para temperatura de 20°, edad 28 días y humedades ambientales del 50 y 100 % (6).

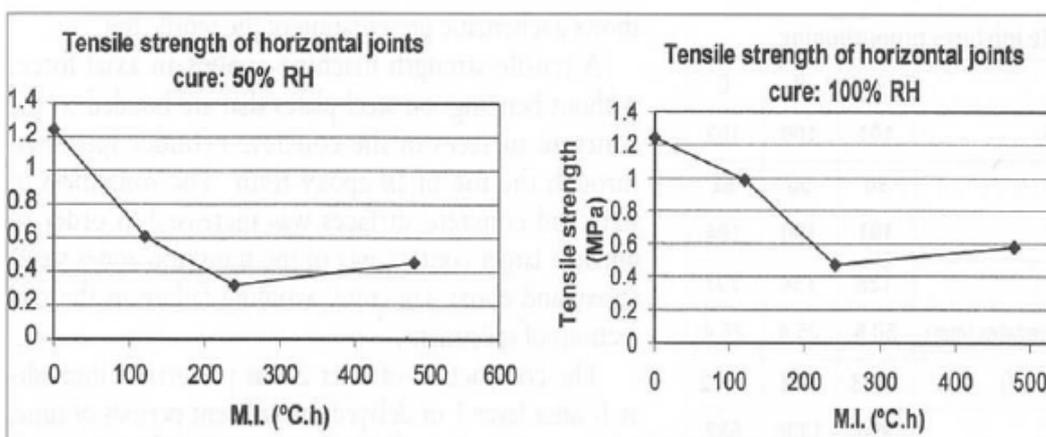


Figura 10. Unión entre tongadas y condiciones ambientales

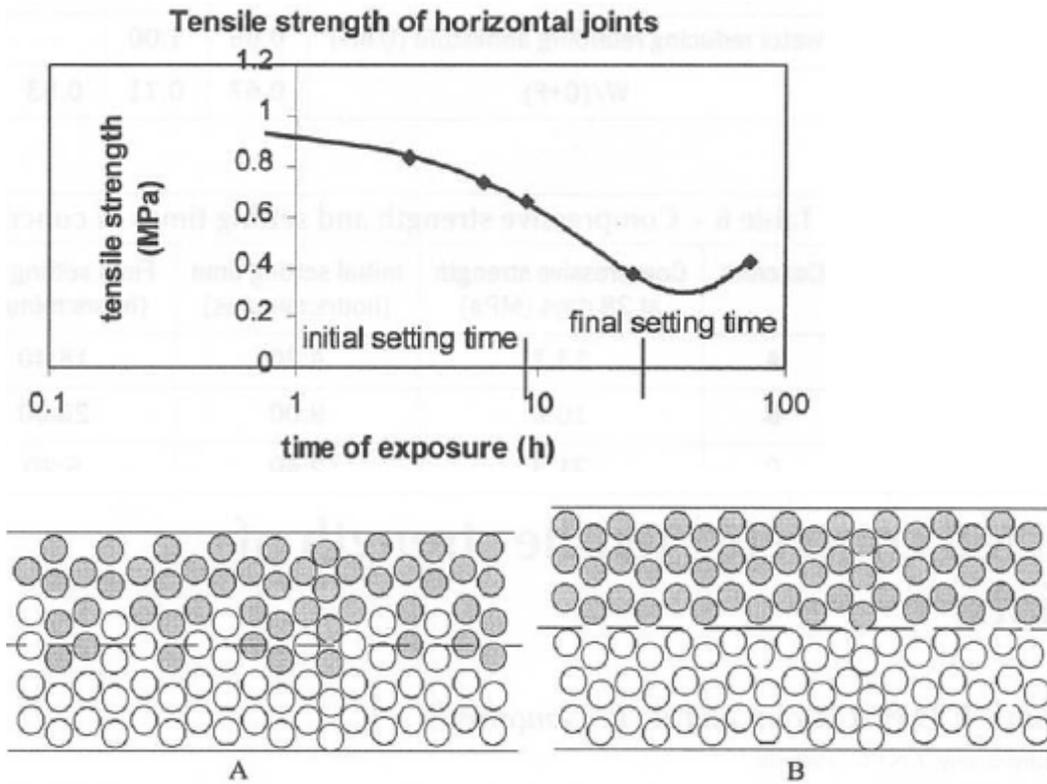


Figura 11. Unión entre tongadas

Norma para determinar el principio y fin de fraguado del hormigón es ASTM C403/C403M-97

3.3.3 Influencia del tipo de tratamiento

En la siguiente figura se muestra la resistencia a tracción de juntas horizontales para temperatura de 20°, edad 28 días, 72 horas de espaciamiento entre tongadas y distintos tipos de tratamiento

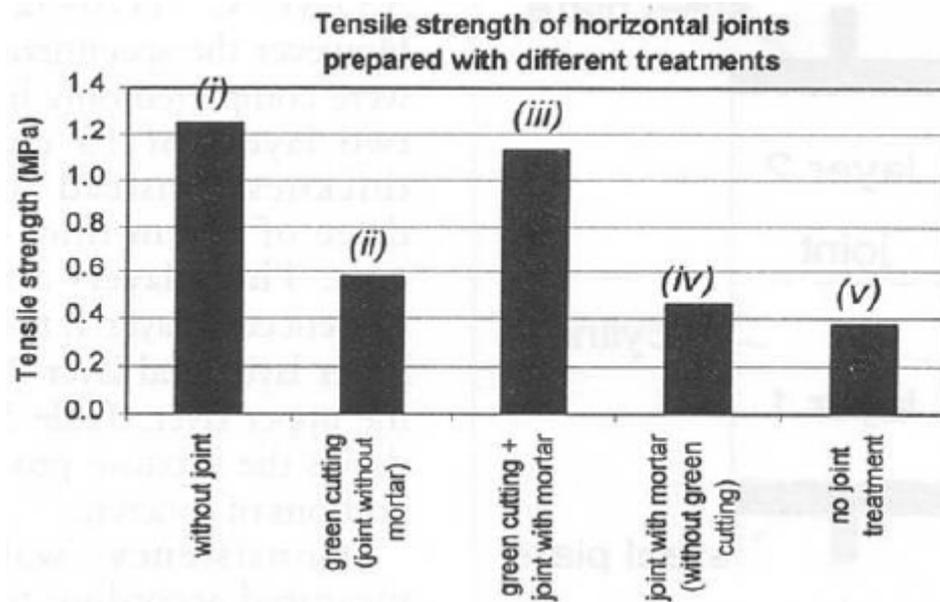


Figura 12. Unión entre tongadas

Como se observa:

- Si se elimina la zona superficial de la tongada y se extiende mortero se obtienen óptimos resultados, similares a la muestra sin junta,
- Si se elimina la zona superficial de la tongada y no extiende mortero se obtienen un resultado equivalente a 50% de la muestra sin junta.
- Si no se elimina la zona superficial de la tongada y si extiende mortero se obtienen un resultado deficiente, lo mismo que sin ningún tratamiento.

4. METODOS DE CONTROL DE HORMIGONES

4.1 POROSIDAD

En general no es la porosidad total el parámetro que interesa conocer, sino aquella porción de la misma que está conectada con el exterior, es decir, la porosidad abierta. La porosidad total puede calcularse, a partir de los valores de las densidades aparente y absoluta, del material:

$$P (\%) = (1 - D_a/SG) \times 100 \quad (1)$$

donde:

P = Porosidad del hormigón en %.

Da = Densidad aparente seca del hormigón

SG = Densidad absoluta (peso específico del hormigón).

Si bien en la normativa española no existe un ensayo específico para la determinación de la porosidad del hormigón en estado endurecido, a partir de la norma UNE 83-312-90 (determinación de la densidad) se puede obtener la porosidad mediante la fórmula:

$$P (\%) = ((P_{sss}-P_s) / V_a) \times 100 \quad (2)$$

donde:

P_{sss}: Peso saturado superficie seca.

P_s: Peso seco.

V_a: Volumen aparente.

La normativa americana recoge, en la Norma ASTM C642-82, la forma de obtención de la densidad y de la porosidad, calculándose mediante la fórmula:

$$P (\%) = ((P_{sss}-P_s) / (P_{sss}-P_w)) \times 100 \quad (3)$$

donde:

P_{sss}: Peso saturado superficie seca.

P_s: Peso seco.

P_w: Peso de la muestra inmersa en agua.

En la recomendación de la RILEM, la Norma CPC 11.3 "Absorption of water by immersion under vacuum", aplicable a todo tipo de hormigones se recoge el siguiente procedimiento operativo para determinar la porosidad es el siguiente:

1. Desechar la probeta, hasta masa constante, en una estufa ventilada a la temperatura de 105 +/- 5° C.
2. Determinar la masa, P_s después de enfriar la probeta hasta 20 +/- 3°. Se considera que se alcanza la masa constante cuando, dos pesadas efectuadas con un intervalo de 24 horas, acusan una diferencia inferior al 0,1% de la masa de la probeta seca.

3. Se coloca la probeta, inmediatamente después de determinado su P_s , en un recipiente de vacío, en el cual la presión de aire sea inferior, en valor absoluto, a 1 kN/m². Este vacío se mantiene al menos durante 24 horas.
4. Se dispone de otro recipiente con agua, que ha estado al menos 2 horas sometida a una presión absoluta aproximadamente igual a la presión de vapor del agua a la temperatura dada (por ejemplo de 1,9 kN/m² a 17° C de 2,8 kN/m² a 23T), para eliminar su contenido de aire. Los dos recipientes, junto con su contenido, deben estar mantenidos a una temperatura de 20 +/- 3° C.
5. Se trasvasa el agua de su recipiente al que contiene a la probeta. La cantidad de agua que se introduce debe ser la suficiente para sumergir la probeta, con un sobre nivel de 20 mm de agua. Durante todo el trasvase debe mantenerse la presión, en los dos recipientes, en un valor absoluto igual a la presión de vapor de agua correspondiente a la temperatura dada.
6. Cuando la probeta está completamente sumergida, se incrementa la presión en el recipiente hasta alcanzar la atmosférica. La probeta se conserva en el agua hasta que la masa sea constante. Se considera que se alcanza la masa constante, P_{sss} , cuando dos pesadas sucesivas, efectuadas con un intervalo de 24 horas, acusan una diferencia inferior al 0,1% de la masa de la probeta sumergida. La primera medida debe realizarse a las 24 horas del restablecimiento de la presión atmosférica. Antes de cada pesada es necesario eliminar el agua superficial.
7. Alcanzada la masa constante P_{sss} se pesa la probeta en el agua, P_w , con una precisión de al menos el 0,1%.
8. La porosidad se calcula como:

$$P (\%) = ((P_{sss}-P_s) / (P_{sss}-P_w)) \times 100 \quad (4)$$

El procedimiento descrito, no acorta tiempos respecto al considerado en la Norma UNE 83-312-90. La ventaja del mismo radica, por un lado, en la extracción del aire acumulado en los poros al aplicar el vacío a la probeta seca, facilitando la entrada posterior del agua; y, por otro lado, en mejorar la penetración al someter al agua a una sobrepresión.

4.1.1 Desarrollo del método de medición de la porosidad

El método para la determinación de la porosidad que se propone toma como referencia el de la norma RILEM CPC 11.3.

4.1.1.1 Objetivo del ensayo

Se pretende medir la porosidad abierta.

4.1.1.2 Medios de ensayo

Los medios de ensayo son similares a los de la Norma RILEM CPC 11.3:

- Estufa con ventilación forzada, regulable a 105 +/- 5°.

- Balanza con una precisión superior al 0,05% del peso de la muestra.
- Depósito que soporte la depresión de vacío, pudiéndose llegar a una presión absoluta de 0,01 kN/m².
- Bomba de vacío capaz de alcanzar una presión de vacío de 0,01 kN/m².

4.1.1.3 *Tamaño de la muestra*

El tamaño de la muestra debe ser tal que:

- $V \text{ (cm}^3\text{)} \geq 150 \times T_{\text{max}} \text{ (cm)}$ del árido utilizado.
- Ningún punto del interior de la muestra debe estar alejado más de 100 mm de la superficie.

4.1.1.4 *Procedimiento operativo*

Para la definición de los parámetros que definen la metodología estos parámetros se realizan múltiples ensayos, chequeos y comprobaciones, que se exponen posteriormente.

El procedimiento operativo para la obtención de la porosidad abierta es:

1. Determinación del peso seco

Las muestras se introducen en estufa ventilada a 105 +/- 5° C hasta peso constante, (Ps). Este peso se determina inmediatamente después de enfriar las probetas a una temperatura de 20 +/- 3°.

2. Aplicación del vacío a la muestra

La muestra, una vez enfriada y pesada, se coloca en un recipiente hermético capaz de soportar la depresión originada por la bomba de vacío. A continuación, se pone en funcionamiento la bomba, de forma que la presión dentro del recipiente se sitúe por debajo de un valor absoluto de 0,01 kN/m². El vacío se mantiene durante un tiempo dado a determinar.

3. Inmersión de la muestra en agua, bajo vacío:

Se introduce agua destilada y desaireada dentro del recipiente que contiene las muestras, manteniendo durante la operación el nivel de vacío. La cantidad de agua debe ser suficiente para que las muestras queden sumergidas, cubriéndolas totalmente con, al menos, 20 mm de agua. A continuación, se mantiene el vacío durante otro intervalo de tiempo a determinar.

4. Determinación del peso saturado:

Transcurrido el tiempo prefijado desde que se sumergen las probetas, se eleva la presión en el recipiente hasta alcanzar la atmosférica.

Transcurrido otro tiempo prefijado, se extraen las muestras, se seca su superficie para eliminar el exceso de agua, se depositan en la balanza y se obtiene su peso saturado superficie seca (Psss).

5. Determinación del volumen de la muestra:

Mediante una balanza hidrostática, se calcula el volumen de agua que desaloja la muestra y se obtiene el volumen aparente (V_a).

La porosidad se calcula según la fórmula (2).

4.1.1.5 Determinación de los parámetros de ensayo

Con el objeto de determinar los parámetros de ensayo, se procede a analizar 15 muestras, que abarcan un amplio espectro de porosidades (del 8% al 22%), las cuales se someten a un completo abanico de situaciones. Los casos analizados y los resultados de porosidad obtenidos, se presentan en la Tabla siguiente.

Según la Norma RILEM CPC 11.3, para la obtención de los pesos, tanto el saturado superficie seca como el seco, de cada una de las muestras, se precisa que entre dos determinaciones sucesivas, espaciadas 24 horas, exista una diferencia inferior al 0.1%. En este ensayo se toman como referencia estos tiempos.

Con el objeto de analizar el error de ensayo con el margen adoptado, supongamos un hormigón de densidad aparente saturada superficie seca de valor d_{ass} t/m. Al realizar la saturación, el error permitido sería de $\pm 0,001 \times P_{ss}$, La situación más desfavorable será aquella en la que obtengamos un P_{ss} menor del real ($-0,001 \times P_{ss}$), lo que conduce a una porosidad:

$$P_{ad} (\%) = \left(\frac{(P_{ss} - 0,001) \times (P_{ss} - P_s)}{V_a} \right) \times 100 = P (\%) - \left(\frac{0,001 \times P_{ss}}{V_a} \right) \times 100$$

$$P_{ad} = P (\%) - 0,1 \times d_{ass}$$

Suponiendo el límite inferior de la d_{ass} , de 2,0 t/m³ para los hormigones normales el error cometido respecto de la situación de máxima saturación es de 0,2 (%)

Las situaciones analizadas para la determinación de los parámetros de ensayo son:

- Caso A: Se somete la muestra a 24 horas de vacío, seguidas de otras 24 horas sumergidas en agua bajo vacío, y se finaliza con 48 horas sumergidas en agua bajo presión atmosférica (porosidad de referencia).
- Caso B: Idéntico al caso A con 24 horas sumergidas en agua a presión atmosférica en lugar de las 48 de éste.
- Caso C: El procedimiento definido en la Norma RILEM CPC 1 1.3.
- Caso D: El procedimiento definido en la Norma RILEM CPC 11.3, con 24 horas más de inmersión de la muestra a presión atmosférica.
- Caso E: Se somete la muestra a una inmersión de 72 horas. siguiendo las indicaciones de la Norma UNE 83-312-90.
- Caso F: Se somete la muestra a una hora en vacío, seguida de una hora en vacío con la muestra sumergida en agua y una hora más de inmersión bajo presión atmosférica.
- Caso G: El caso F más una hora en todas las situaciones.

- **Caso H: El caso F más dos horas en todas las situaciones.**
- Caso I: El caso F más tres horas en todas las situaciones

DETERMINACION PARAMETROS DE ENSAYO

POROSIDADES

Nº	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	8,95	8,95	8,95	8,95	7,13	7,28	8,05	8,93	8,93
2	8,4	8,39	8,40	8,40	6,94	6,96	7,95	8,30	8,33
3	11,16	11,16	11,16	11,15	10,11	10,03	10,45	11,09	11,13
4	9,57	9,56	9,55	9,56	8,50	8,57	8,89	9,52	9,47
5	11,35	11,35	11,35	11,35	9,84	10,00	11,05	11,28	11,30
6	11,78	11,78	11,78	11,79	10,12	10,26	11,23	11,80	11,77
7	8,63	8,63	8,64	8,64	7,79	7,97	8,13	8,54	8,56
8	10,69	10,69	10,68	10,68	9,89	9,95	10,36	10,62	10,62
9	10,09	10,07	10,04	10,06	9,24	9,33	9,46	9,98	9,94
10	10,54	10,53	10,49	10,51	9,91	9,84	10,23	10,53	10,50
11	17,69	17,69	17,70	17,70	17,50	17,56	17,46	17,67	17,62
12	17,65	17,65	17,64	17,66	17,54	17,64	17,50	17,65	17,65
13	14,70	14,71	14,68	14,68	14,43	14,40	14,17	14,69	14,51
14	18,61	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,52	18,62	18,63
15	21,37	21,36	21,38	21,37	21,30	21,33	21,27	21,36	21,36

El método admisible será aquél que obtenga una porosidad nunca inferior a la obtenida por el método A menos 0,2%. Los datos presentados se revelan las siguientes conclusiones:

- 1) En los casos B, C (Norma RILEM CPC 11.3), D, H e I, se obtienen resultados correctos en todas las muestras.
- 2) En los casos E, F y G los resultados no son correctos.

Por lo tanto, se considera que con la situación **H**, dos (2) horas en vacío y dos (2) bajo agua, se determina correctamente y de la forma más rápida la porosidad abierta, por lo cual es la que se escoge como método de determinación de la misma.

El método propuesto se ha contrastado con probetas de mortero elaboradas con arena normalizada, diferentes tipos de conglomerante y a diferentes edades, comparándose sus resultados con los alcanzados mediante ensayo en porosímetro de mercurio. En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos.

POROSIDADES	
Ensayo saturación con vacío	Porosimetria de mercurio
17,7	17,9
16,4	17,7
17,6	18,7
18,5	18,5
18,3	19,2
16,2	16,1
15,3	16,4
16,3	16,4
18,4	18,0
19,4	19,6
16,2	16,3

14,7	15,9
15,6	15,4
17,2	18,2
18,1	18,6

El ensayo desarrollado para la determinación de la porosidad abierta de hormigones, acorta tiempos respecto de los existentes, mostrando además una mayor eficiencia en la saturación total de la muestra.

4.2 PERMEABILIDAD AL OXIGENO

Se considera a la permeabilidad como una propiedad de flujo, característica de los medios porosos y se define como la facilidad con que un fluido pasa a través de ellos cuando están sometidos a un diferencial de presión. Este gradiente de presiones evita la confusión con otros procesos de transferencia de fluidos tales como la difusión o la absorción, en los que las causas que provocan el fenómeno pueden ser, bien la existencia de un gradiente de concentración, bien la ascensión capilar.

Aunque en un principio podría pensarse que un cuerpo es tanto más permeable cuanto más poroso es, eso no es así. Es evidente que la permeabilidad no depende de la porosidad total, sino de la porosidad permeable. En consecuencia, se pueden encontrar materiales que, aún siendo muy elevados sus valores de porosidad, son altamente impermeables; y viceversa.

Para la cuantificación del grado de permeabilidad de un material, se determina el coeficiente de permeabilidad por la aplicación de la ley de Darcy del flujo unidireccional de un fluido en un medio poroso, que en su forma más general (teniendo en cuenta las características del fluido) viene expresada como:

$$V = Q/A = (-K/n) \times (dp/dL) \quad (5)$$

donde:

v = Velocidad de flujo del fluido (m/s).

Q = Caudal que atraviesa la muestra (m³/s).

A = Sección de la muestra perpendicular a la dirección del flujo (m²).

K = Coeficiente de permeabilidad intrínseco (m²).

n = Viscosidad dinámica del fluido (N* s/m²).

dp/dL = Variación de la presión con relación a la longitud L de la muestra (N/m²/m).

El coeficiente de permeabilidad intrínseco, por lo tanto, no depende de las características del fluido actuante, sino únicamente de la geometría del medio poroso.

4.2.1 Determinación de la permeabilidad a gases

De las Normas y recomendaciones que utilizan gases para la obtención de la permeabilidad de medios porosos, se pueden destacar las siguientes:

- Norma ASTM C-577-68 para la obtención de la permeabilidad de refractarios.
- Recomendación PRE para la determinación de la permeabilidad a gases de productos refractarios.
- Recomendación del Cembureau para medida de la permeabilidad al oxígeno del hormigón.
- Recomendación de S. Alegre y J.A. Lechuga para la determinación de la permeabilidad a gases del hormigón. Método del Cale.
- Recomendación del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Leeds (Gran Bretaña) para la determinación de la permeabilidad del hormigón al oxígeno.

Tanto la Norma como las Recomendaciones siguen unas pautas similares en la ejecución del ensayo:

1. Preparación de la muestra:

Esta fase incluye la adecuación geométrica de la muestra a la célula de presión utilizada en cada caso. En las recomendaciones para determinar la permeabilidad en hormigones, se parte, en todos los casos, de muestras totalmente secas.

2. Colocación de la muestra en la célula de presión:

En esta fase, tanto la norma como las diferentes recomendaciones, diseñan su propia célula de presión.

3. Aplicación de una presión de gas:

La norma ASTM C-577-68 para la obtención de la permeabilidad de refractarios, aplica una diferencia de presión única (24 cm de Hg). Las recomendaciones utilizan diferentes escalones de presión, no superando, en ningún caso, las 4,5 atmósferas (absolutas) de presión. Mención aparte requiere el método del Cale, en el cual se aplica una presión absoluta inicial fija (2 atmósferas), cerrándose a continuación el suministro de gas y midiéndose el tiempo que tarda en disminuir la presión hasta un valor prefijado (15 atmósferas).

4. Medida del flujo:

Todos los métodos, a excepción del Cale, establecen un tiempo para la regularización del flujo, entre 5 y 30 minutos, midiéndose posteriormente el caudal de gas mediante el uso de flujómetros o caudalímetros de pompa de jabón. El método del Cale, como se ha mencionado, mide el tiempo transcurrido entre dos presiones prefijadas.

Para el análisis del fenómeno de la permeabilidad a gases de un medio poroso, todos los métodos mencionados se basan en el modelo general de la ley de Darcy aplicada a fluidos compresibles:

$$Q = (K \times A \times (P_2 - P_1)) / \eta \times L \quad (6)$$

donde:

Q = Caudal de gas circulante (m³/s).

K = Permeabilidad intrínseca (m²).

A = Sección de la muestra (m²).

P_2 = Presión en la entrada de la muestra (N/m²).

P_1 = Presión en la salida de la muestra (N/m²).

n = Viscosidad dinámica del gas (N*s/m²).

L = Longitud de la muestra (m).

cumpléndose, para unas condiciones de ensayo dadas, que el producto $P*Q$ es constante en cada sección transversal de la muestra.

Si se define el caudal medio (Q_m) como el correspondiente a la presión media de la muestra $((P_1 + P_2)/2)$, se tiene:

$$Q_m = (2 \times P_1 \times Q_1) / (P_1 + P_2) \quad (7)$$

Introduciendo el caudal obtenido, en la fórmula de Darcy:

$$(2 \times P_1 \times Q_1) / (P_1 + P_2) = (K \times A \times (P_2 - P_1)) / n \times L$$

$$K = (2 \times P_1 \times Q_1 \times n \times L) / A \times ((P_2)^2 - (P_1)^2) \quad (8)$$

donde:

Q_1 = Caudal de gas medido a la salida de la muestra (m³/s).

Las demás variables tienen el mismo significado que anteriormente.

4.2.2 Desarrollo del método de medición de la permeabilidad de hormigones

4.2.2.1 Objeto del ensayo

El objeto del ensayo es la caracterización del hormigón en relación a su permeabilidad frente a un gas.

4.2.2.2 Revisión de las normativas y recomendaciones existentes

En el apartado anterior se han reseñado las posibles Normas y Recomendaciones susceptibles de ser aplicadas para la determinación de la permeabilidad a gases de un material poroso. La principal diferencia existente entre las mismas es la célula de presión utilizada para confinar la muestra.

Se opta por adaptar a las características de las muestras de hormigón la célula reseñada en la normativa ASTM C-557. Para ello, es necesario optimizar las dimensiones de los anillos metálicos, los ángulos de acoplamiento entre dichos anillos y el molde de goma, así como su dureza y espesor.

Los anillos metálicos, en acero inoxidable, se conforman con una tubería cilíndrica de 220 mm de diámetro exterior, 70 mm de longitud y 12,5 mm de espesor, a la que se suelda en una de

sus bases un disco de 16 mm de espesor. En la cara interior se le practica un rebaje troncocónico que forma un ángulo con el eje de la tubería de 12,5°.

El molde de goma consiste en dos troncos de cono unidos por su base mayor, con un taladro cilíndrico pasante de 150 mm de diámetro. Los troncos de cono presentan unas bases de 200 y 220 mm y una altura de 55 mm, lo que equivale a un ángulo de 10° con el eje. Para realizar ensayos sobre testigos de diámetros distintos a las probetas normalizadas, se acopla un anillo de goma, con diámetro exterior de 150 mm y con diámetro interior el del testigo. El caucho con el que se fabrica el molde de goma tiene unas características de dureza de 65 Shore A.

La diferencia de ángulos de la goma y los anillos tiene por finalidad conseguir que, durante la ejecución del ensayo, toda la superficie lateral de la muestra esté comprimida, existiendo una mayor presión en los extremos de la muestra, y no uniforme como en el caso de la célula propuesta en la Norma ASTM C 577. De esta forma se asegura un perfecto ajuste en la superficie lateral cercana a las bases de la probeta. En la figura 13 se esquematiza la célula desarrollada para la medida de permeabilidad al oxígeno, así como la goma de ajuste.

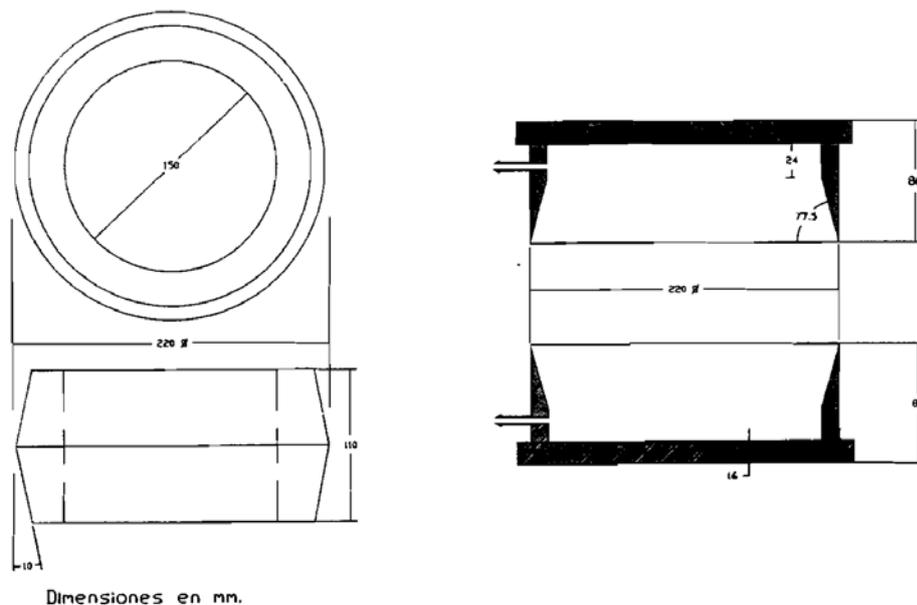


Figura 13. Esquema de célula permeabilidad oxígeno

4.2.2.3 Medios de Ensayo

El aparataje necesario para llevar a cabo el ensayo que se propone consiste en:

- Estufa con ventilación forzada, regulable a 105 +/-5° C.
- Bombona de oxígeno, con manorreductor para control de la presión aplicada.
- Caudalímetros de pompa de jabón, para medida del caudal de salida de oxígeno.
- Bastidor y gato hidráulico, para poder ajustar la muestra de hormigón.
- Célula y goma portamuestras.

4.2.2.4 Forma y tamaño de la muestra

La forma adoptada para la muestra, como se deduce de la definición de la célula utilizada, es cilíndrica, debido a dos razones fundamentales:

1. Es la geometría habitual, tanto en probetas de laboratorio como en probetas testigo. Además, al adoptarse una célula de forma cilíndrica, en el ajuste o apriete de la misma, la presión ejercida por la goma sobre la probeta es uniforme, asegurándose un mejor sellado. No ocurre así en la célula de la ASTM C 577-68, pues al tratarse de muestras paralelepédicas, se produce una mayor presión sobre las aristas que sobre las caras.
2. El escaso trabajo que requiere la preparación de la muestra, debiéndose únicamente realizar un corte para ajustar su longitud.

Respecto al diámetro de muestra, se ha establecido un límite superior de 150 mm (diámetro de la probeta recomendada por la Norma UNE 83-301- 84) y un inferior de 90 mm (mínimo diámetro por debajo del cual, con las dimensiones de la célula desarrollada, se exige un excesivo esfuerzo para ajustar la goma).

Se ha adoptado como altura de la muestra 100 +/- 5 mm, por las siguientes razones:

1. No es aconsejable dimensiones menores, debido al tamaño máximo del árido de los hormigones de uso convencional.
2. La adopción de alturas mayores trae consigo dos problemas adicionales:
 - o Se requiere un mayor esfuerzo para el correcto ajuste del caucho a la muestra.
 - o Se requiere una mayor presión del gas circulante, para producir un flujo medible.

4.2.2.5 Procedimiento operativo

La ejecución del ensayo se desarrolla de la siguiente forma:

1. La muestra se seca en estufa, a 105 +/- 5° C, y se enfría hasta temperatura ambiente. Posteriormente se recubre lateralmente con una fina película de silicona.
2. Se introduce la muestra en el caucho, se coloca entre los dos anillos metálicos y se aproximan ambos elementos mediante la acción de un gato hidráulico, asegurando el buen ajuste de todo el conjunto.
3. Se aplica un flujo de oxígeno a una de las caras de la muestra, mediante una bombona provista de manorreductor. El flujo se estabiliza al cabo de 15 minutos.
4. El caudal de oxígeno que atraviesa la probeta, se conduce hacia unos caudalímetros de pompa de jabón.
5. Se realizan, como mínimo, 5 determinaciones, y se comprueba la repetitividad de resultados.

4.2.2.6 *Expresión de los resultados*

Se calcula la permeabilidad a gases con la fórmula general de Darcy aplicada a fluidos compresibles, que particularizada al oxígeno ($q = 2,02 \times 10^{-5} \text{ N x s/m}^2$) y con una presión de salida (P_1) igual a la presión atmosférica, se transforma en:

$$K_{ox} = (4,04 \times 10^{-10} \times R \times L) / (A \times ((P_2)^2 - 1)) \quad (9)$$

donde:

K_{ox} = Permeabilidad intrínseca (m^2).

R = Caudal de oxígeno medido a la salida de la célula (m^3/s).

L = Longitud de la muestra (m).

A = Sección transversal de la muestra (m^2).

P_2 = Presión absoluta en la entrada de la célula (bar).

La presión del oxígeno en la cara superior de la muestra, necesaria para establecer el flujo, depende de la permeabilidad de la muestra y varía entre 0,5 y 2 bars. Se presenta un esquema general del dispositivo en la figura 14.

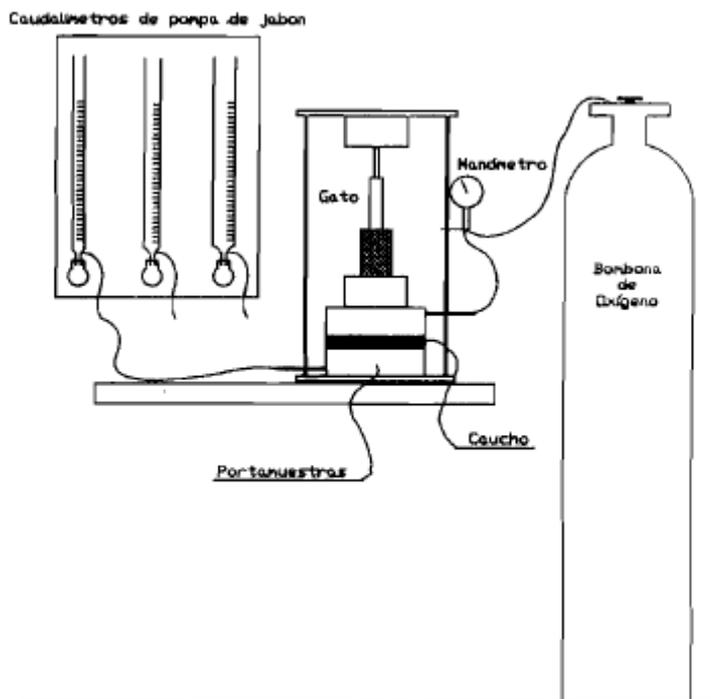


Figura 14. Esquema ensayo de permeabilidad al oxígeno.

4.2.2.7 Comprobación del método de ensayo

Al método de medida de la permeabilidad al oxígeno desarrollado en el presente trabajo, se le pueden hacer, en principio, dos objeciones:

- ¿Resulta adecuado el ajuste obtenido entre muestra y goma?
- ¿Es el método repetitivo y sensible?

Para solventar la primera cuestión, se prepara una muestra totalmente impermeable (acero) y se procede a su ensayo. El ajuste obtenido por la goma es adecuado hasta presiones por encima de los 5 bars (presión muy superior a las de trabajo propuestas).

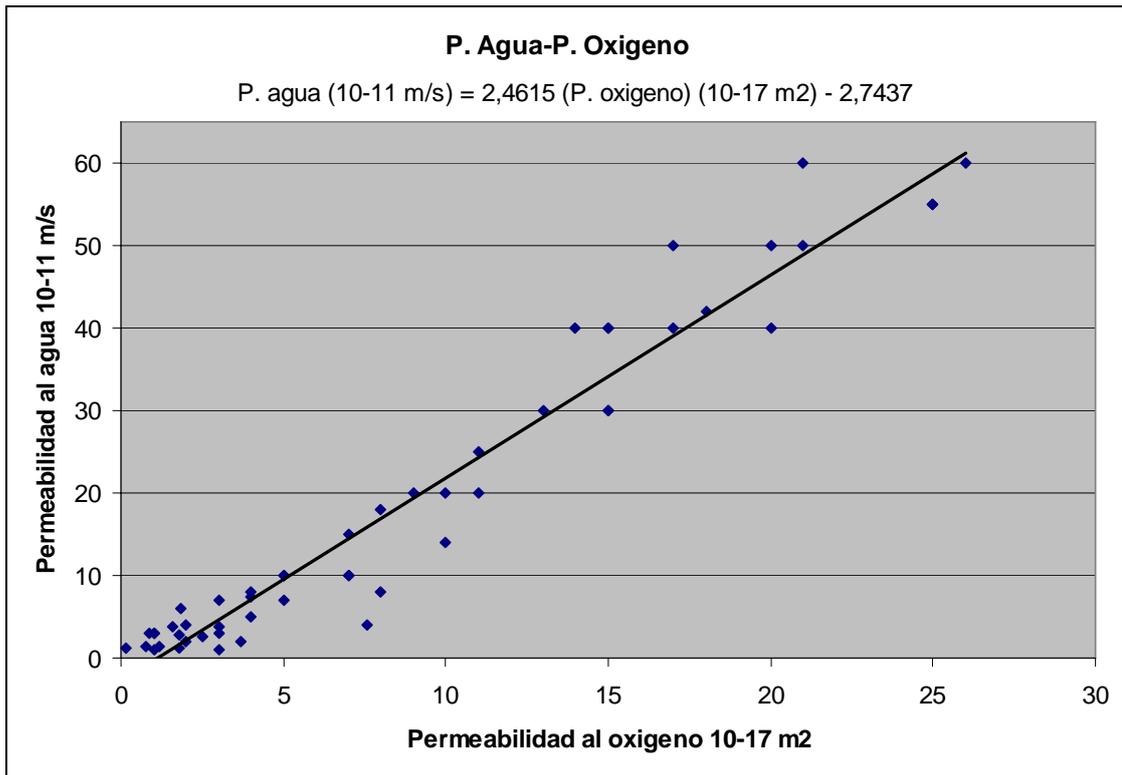
En relación a la segunda pregunta, y después de numerosos ensayos con distintos tipos de muestras se concluye que: las medidas realizadas después de la estabilización del flujo, tiempo mínimo de circulación de 15 minutos, son repetitivos y sensibles a la variación de los parámetros que definen la composición de la mezcla.

4.2.2.8 Ventajas del método

El método desarrollado para la determinación de la permeabilidad al oxígeno de hormigones, se muestra muy sensible, preciso y rápido de ejecución, siendo además un ensayo no destructivo, permitiendo el uso de la muestra para cualquier otra determinación y la correlación obtenida entre la permeabilidad al oxígeno y al agua, permite obtener valores de permeabilidad más familiares en el campo de la ingeniería civil, mediante métodos más precisos y sensibles.

4.2.2.9 Correlación de la permeabilidad al oxígeno y la permeabilidad al agua

Con los datos obtenidos en el último control de hormigones realizado en una presa se ha elaborado la siguiente correlación.



Como se puede observar, en el rango de hormigones de media permeabilidad, existe una buena correlación que nos permite obtener la permeabilidad al agua, parámetro mas utilizado, en función de la permeabilidad al oxígeno.

5. ANEJO DE NORMAS

5.1 DETERMINACION CONSISTENCIA UC

Para la obtención de consistencias de hormigones H.C.R. se propone la siguiente Norma:

5.1.1 Objeto y campo de aplicación

Esta Norma tiene por objeto la determinación de un índice de consistencias de hormigones H.C.R. en estado fresco.

No es conveniente su utilización con árido de tamaño máximo mayor de 40 mm, determinado según la Norma UNE 83-100.

5.1.2 Normas para consulta

UNE 83-100 Áridos para hormigones. Clasificación en fracciones granulométricas.

UNE 83-300 Ensayos de hormigón. Toma de muestras de hormigón fresco.

UNE 83-301 Fabricación y conservación de probetas.

UNE 83-314 Ensayos de hormigón. Determinación de la consistencia del hormigón fresco. Método Vebe.

5.1.3 Muestra

La muestra se tornará de acuerdo con la Norma UNE 83-300.

5.1.3.1 Aparatos empleados

5.1.3.2 Mesa vibratoria

Se trata de la misma mesa vibratoria utilizada para el Método Vebe (Norma UNE 83-314-90). Tiene 380 mm de longitud y 260 mm de anchura. Se soporta sobre cuatro amortiguadores de caucho y esta provista de un vibrador, apoyado sobre una base que descansa en tres pies de caucho, y situado bajo la mesa vibratoria. El vibrador opera con una frecuencia aproximada de 3000 vibraciones por minuto, con una amplitud vertical, con el recipiente vacío, de aproximadamente +/- 0.5 mm.

Debe tener un brazo móvil para guiado de la pesa durante la vibración.

5.1.3.3 Varilla de sección circular

Varilla de sección circular, recta, fabricada de acero o de otro metal similar con un diámetro de 16 mm y 600 mm de longitud y punta redondeada (Norma UNE 83-301-91)

5.1.3.4 Molde cilíndrico

El molde deberá ser de acero, fundición u otro material no absorbente y que no reaccione con el hormigón. Deberá conservar su estanqueidad y sus dimensiones con el uso, dentro de los límites

que posteriormente se especifican. Las superficies interiores deberán estar exentas de irregularidades.

El plano de la base del molde deberá ser normal al eje del mismo. Las dimensiones del molde son 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, a lo largo de su período de uso no deberán de variar estas dimensiones en +/- 1 % su sección y +/- 2 % su altura.

5.1.3.5 *Tolva de llenado*

Se utiliza el mismo tipo de tolva que el utilizado para la fabricación de probetas (Norma UNE 83-301-91).

5.1.3.6 *Pesa de compactación*

Se utiliza una pesa cilíndrica, de 8.500 +/- 50 gr unida a una varilla con escala para medición del descenso. El diámetro de la pesa es de 145 +/- 1mm, debiendo tener las superficies exentas de irregularidades.

5.1.3.7 *Reloj con interruptor*

Se utiliza un reloj con interruptor para automatizar y precisar el tiempo determinado de vibración.

5.1.3.8 *Material complementario*

Un cogedor y unos dispositivos que permitan sujetar firmemente el molde a la mesa vibrante.

5.1.4 Procedimiento operativo

1. Se procede a sujetar firmemente el molde cilíndrico a la mesa vibratoria mediante los dispositivos oportunos.
2. Se coloca la tolva de llenado sobre el molde cilíndrico y se procede al relleno de este. Durante el proceso de llenado se apoya siempre el cogedor sobre la tolva en el momento de verter el hormigón.
3. Se procede a retirar la tolva y, por medio de la varilla, se elimina el material sobrante, enrasando con el borde superior del molde.
4. Se coloca el peso sobre la superficie libre del hormigón, guiado por la varilla, y se somete el conjunto a una vibración durante 30 segundos.
5. Se procede a medir el descenso que se produce utilizando la escala impresa en la varilla-guía. Este descenso da la medida de la consistencia del hormigón.

5.1.5 Expresión de resultados

Anotar el descenso sufrido por la pesa en la escala de la varilla con apreciación del milímetro. Este descenso expresa la consistencia de la muestra objeto de ensayo.

5.1.6 Informe de resultados

En el informe figurarán los datos especificados en la Norma UNE 83-300, así como el descenso en milímetros de la muestra y la referencia a esta Norma.

5.2 DETERMINACION DE LA POROSIDAD

No existe Norma española específica para el cálculo de la porosidad abierta en hormigones endurecidos. Basada en la Norma RILEM CPC 11.3 se propone la Norma.

5.2.1 Definición, objeto y campo de aplicación

La porosidad abierta (accesible) de un hormigón endurecido por inmersión en agua bajo vacío se define como: la diferencia entre la masa de una muestra saturada por inmersión de agua bajo vacío y la masa de esa misma muestra seca, expresada en términos de volumen de la muestra seca.

La presente Norma especifica un método para la determinación de la porosidad abierta de un hormigón endurecido. Es aplicable tanto a probetas moldeadas como a probetas testigo.

5.2.2 Normas para consulta

UNE 83-301-91 Ensayos de hormigón. Fabricación y conservación de probetas.

UNE 83-302-84 Ensayos de hormigón. Extracción y conservación de probetas testigo.

5.2.3 Aparatos empleados

Los aparatos necesarios para la realización del ensayo son los siguientes:

- Estufa con ventilación forzada y regulable a $105 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Balanza hidrostática con una precisión de 0.05 %.
- Tanque de agua para la determinación del volumen aparente de la muestra.
- Tanque, para la colocación de las muestras, que soporte una presión de 0.01 KN/m² (presión de vacío).
- Bomba de vacío capaz de alcanzar una depresión de 0.01 KN/m².

5.2.4 Muestra

La muestra objeto de ensayo no tendrá un volumen inferior a 0.001 m³. El volumen y la forma de la muestra debe ser tal que ningún punto del interior quede alejado más de 75 mm de la superficie exterior.

5.2.5 Procedimiento de ensayo

5.2.5.1 Determinación del peso seco de la muestra (m₁)

Secar la muestra en la estufa a $105 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ hasta que entre dos pesadas, con un intervalo de 24 horas, se obtenga una diferencia de menos del 0.1 %.

El peso (m_1) se determina inmediatamente después de haber enfriado la muestra a $20 \pm 3 \text{ C}^\circ$

5.2.5.2 *Determinación del peso de la muestra saturada (m_2)*

Después de haber determinado la masa (m_1) se coloca la muestra en el tanque de vacío, de forma que no exista un contacto directo con el propio tanque o con otras muestras utilizando los separadores oportunos.

Se cierra el tanque y se procede a realizar el vacío hasta alcanzar una depresión mantenida de 0.01 KN/m^2 , momento a partir del cual se comienza a medir el tiempo transcurrido.

Una vez transcurridas tres horas, se llena el tanque donde se encuentran las muestras con agua destilada hasta que el nivel de agua cubra con al menos 20 mm. la muestra objeto de ensayo. Durante el llenado del tanque con agua destilada debe mantenerse el nivel de vacío. Esta situación se mantiene durante tres horas.

Se pone el tanque a presión atmosférica, y se mantiene la probeta inmersa en agua durante otras tres horas más.

Antes de pesar la muestra, se seca utilizando un paño húmedo para retirar el agua superficial de la misma. Se toma la masa de la muestra (m_2).

5.2.5.3 *Determinación del volumen aparente de la muestra (V_a)*

Se equilibra la balanza hidrostática y se asegura que el cestillo que cuelga de ella este totalmente sumergido en el tanque de agua. El cestillo se sumerge a la misma profundidad cuando este con o sin la muestra. Se coloca la muestra en el cestillo sumergiéndolo completamente en agua. Se obtiene el peso de la muestra (m_3). El volumen aparente (V_a) de la muestra es:

$$V_a = (m_1 - m_3) / d_w$$

donde:

d_w es la densidad del agua

5.2.5.4 *Cálculo y expresión de resultados*

La porosidad abierta de un hormigón endurecido, obtenida por inmersión en agua bajo vacío, se obtiene mediante la fórmula: donde:

$$P (\%) = ((m_2 - m_1) / V_a) \times 100$$

m_1 es la masa de la muestra seca

m_2 es la masa de la muestra saturada

V_a es el volumen aparente de la muestra

Los resultados se expresan en tanto por ciento.

5.2.5.5 *Informe del ensayo*

El informe debe contener la siguiente información:

- identificación del hormigón
- tipo de muestra (probeta o testigo)
- forma y dimensiones de la muestra
- edad del hormigón ensayado
- método de curado hasta la realización del ensayo

pudiéndose añadir información adicional como pueden ser observaciones sobre el estado de la muestra, defectos producidos sobre la muestra en la estufa, etc.

5.3 DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD AL OXIGENO

No existe Norma española para la determinación de la permeabilidad al oxígeno, o gases en general, de hormigones. Basado en la Norma americana ASTM C557-68 de permeabilidad de refractarios, para el desarrollo de la célula, en recomendaciones de diversos autores e Instituciones y en la experiencia propia, se propone el siguiente Proyecto de Norma:

5.3.1 Objeto y campo de aplicación

Esta Norma tiene por objeto la determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno del hormigón. Es aplicable tanto a probetas moldeadas como a probetas testigo.

5.3.2 Normas para consulta

UNE 83-301-91 Ensayos de hormigón. Fabricación y conservación de probetas.

UNE 83-302-84 Ensayos de hormigón. Extracción y conservación de probetas testigo.

5.3.3 Aparatos empleados

5.3.3.1 Estufa

Estufa con ventilación forzada regulable a $105 \pm 5 \text{ C}^\circ$

5.3.3.2 Oxígeno

Botella de oxígeno provista de manorreductor y reloj de presión capaz de regular la presión suministrada. El regulador de presión debe permitir controlar la presión de admisión en la célula en una gama de presión absoluta de 1 a 5 bar y mantener el nivel de presión fijado en los límites del 1 % de la presión elegida.

5.3.3.3 Manómetro

El manómetro debe indicar la presión con una precisión de al menos 0.6% en la gama de presiones utilizadas (0.5 y 3 bar).

5.3.3.4 Caudalímetros de pompa de jabón

Deberán tener diámetros comprendidos entre 2 y 20 mm para poder determinar el volumen de oxígeno circulante.

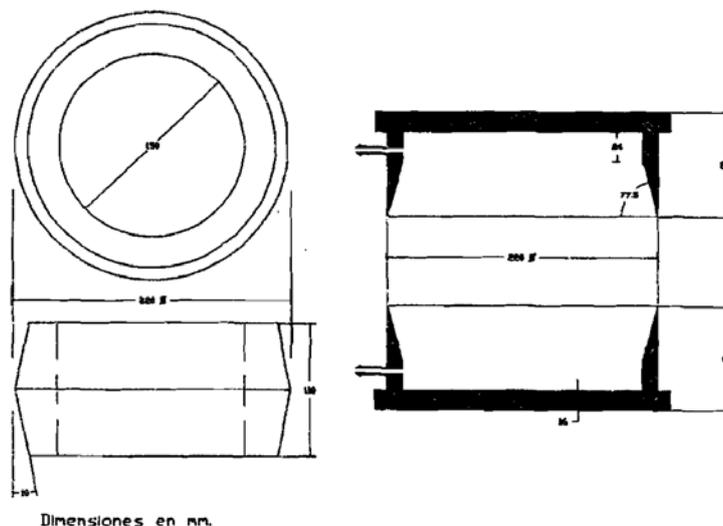
5.3.3.5 Bastidor y gato hidráulico

El bastidor debe tener las dimensiones adecuadas para poder alojar en su interior la célula portamuestras y someterla, mediante el gato hidráulico, a una presión suficiente para que la goma ajuste perfectamente con la muestra.

5.3.3.6 Célula y goma de ajuste

La célula esta conformada (figura 1) por dos anillos metálicos con un diámetro interior de 195 mm y con un diámetro exterior de 220 mm. Una de sus bases, en ambos anillos, se encuentran cerrada por un disco metálico de espesor mínimo 16 mm, la interior de los anillos tiene un rebaje, en los últimos 45 mm., de forma que tenga un ángulo de $12,5^\circ$ con el eje de este. Ambos casquillos poseen una conexión lateral para entrada o salida del oxígeno utilizado en el ensayo.

La goma de ajuste esta conformada por una pieza de forma doble troncocónica, con las bases mayores unidas, y con un orificio interior de diámetro 150 mm. Cada tronco de cono tiene una altura de 55 mm y una base mayor de 220 mm, el eje del conjunto y las caras exteriores de los tronco de cono forman un ángulo de 10° .



Fotografía 3: Célula permeabilidad al oxígeno.

La dureza de la goma utilizada para la fabricación de la pieza de ajuste es de 65 Shore A.

Nota.- Caso de utilizar diámetros inferiores a 150 mm se procederá a colocar anillos de ajuste de goma de las mismas características mecánicas, hasta un diámetro mínimo de probeta de 90 mm.

5.3.3.7 Accesorios

Se dispone de conexiones rápidas y mangueras para interconectar la célula, la bombona de oxígeno y los caudalímetros. Cronómetro y silicona u otro sellante de características similares para garantizar un buen ajuste de la muestra.

5.3.4 Muestra

La muestra objeto de ensayo, de forma cilíndrica, tiene un diámetro comprendido entre 90 y 150 mm y una altura de 100 +/- 5 mm.

5.3.5 Procedimiento de ensayo

1. Se extrae la muestra completamente seca de la estufa, se enfría hasta 20 +/- 3 C°, y se recubre lateralmente con silicona, con el objeto de asegurar un perfecto ajuste con la goma. Se considera seca la muestra cuando dos pesadas, con un intervalo de 24 horas, tienen una diferencia de peso menor que el 0.1 %.
2. Seca la silicona se procede a introducir la muestra en la goma, y ésta en la célula, el conjunto se coloca dentro del bastidor y se procede, mediante el gato hidráulico, al ajuste entre muestra-goma y goma-célula.
3. Se conecta la parte superior de la célula a la bombona de oxígeno, y se abre el manorreductor, hasta obtener una presión en la célula de 0.5 a 2 bars. Se acopla la parte inferior de la célula a la pipeta más adecuada para la medida del caudal circulante. Pasados 15 minutos se procede a la medida del caudal de oxígeno. Se repite el proceso de medida como comprobación de la estabilidad de flujo.

5.3.6 Cálculo y expresión de resultados

Para la obtención de la permeabilidad al oxígeno se aplica la fórmula:

$$K = (4,04 \times 10^{-10} \times R \times L) / (A \times ((P_1)^2 - (P_2)^2))$$

donde:

K = Permeabilidad intrínseca (m²).

R = Caudal de oxígeno medido a la salida de la célula (m³/s).

L = Longitud de la muestra (m).

A = Sección transversal de la muestra (m²).

P₁ = Presión absoluta en la salida de la célula (bar).

P₂ = Presión absoluta en la entrada de la célula (bar).

5.3.7 Informe del ensayo

El informe debe contener la siguiente información:

- identificación del hormigón
- tipo de muestra (probeta o testigo)
- forma y dimensiones de la muestra
- edad del hormigón ensayado
- método de curado hasta la realización del ensayo

Referencias básicas:

1. El hormigón compactado. Discurso de Clausura (1995). Theo Van Robbroeck. Presas de Hormigón Compactado III. CNEGP.
2. Behaviour of Alpe Gera Gravity Dam in its early operational stage. Comparison between the (Parcial) (1970). Cesare Terracini. ICOLD. Montreal. Q 39 R-7.
3. Hormigón compactado. Materiales. Ponencia General (1995). Joaquín Díez-Cascón Sagrado. Presas de Hormigón Compactado III. CNEGP. Santander.
4. Presas de hormigón compactado en los Estados Unidos (1995). Kenneth D. Hansen. Presas de Hormigón Compactado III. CNEGP. Santander.
5. Caracterización de hormigones compactados con rodillo (1994) .Joaquín Díez-Cascón, J. Antonio Polanco y R. García. Revista de Obras Públicas.
6. Bettencourt A.C., Díez-Cascón J., Goncalves A.F. (2001). Roller compacted concrete - tensile strength of horizontal joints. *Materials and Structures/ Matériaux et Constructions*, 34: 413- 417
7. Ingeniería de presas en España. Presas de Fabrica. (2002). Joaquín Díez-Cascón y Francisco Bueno. Servicio Publicaciones Universidad de Cantabria. ISBN. 84-8102-292-6. Santander