

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN POR HUMEDAD EN LOS PRODUCTOS CERÁMICOS DE USO ESTRUCTURAL

Federico de ISIDRO GORDEJUELA. Dr. Arquitecto
Escuela Politécnica Superior. Universidad San Pablo-CEU.

En el texto recogido a continuación se resumen las conclusiones más relevantes obtenidas en el trabajo de investigación desarrollado por el arquitecto Federico de Isidro Gordejuela en su Tesis Doctoral, que ha sido presentada en el Departamento de Estructuras de la Edificación de la ETS de Arquitectura de Madrid (UPM), y dirigida por el Dr. Ingeniero de Caminos Eduardo Gómez López. Dicho trabajo es de carácter experimental. Las conclusiones se refieren a aspectos relativos a los procedimientos de ensayo, a la expansión por humedad (EPH) que se observa de forma natural y acelerada en piezas cerámicas, y a la relación que se observa entre ambas. También se analiza la expansión que se produce en piezas compuestas de tipo muro, y qué relación existe entre ésta y la que se observa en piezas. Por último se ofrecen una serie de conclusiones útiles relativas a la forma en que debe interpretarse la expansión por humedad, y a cómo debe considerarse este fenómeno en obra.

En la campaña de ensayos se ha utilizado material de 22 ceramistas de todo el territorio nacional. Se ha observado la etiología del material en varios tipos de condiciones medioambientales y se han realizado ensayos complementarios relativos a la reversibilidad de los ciclos de recocido, la retracción que experimenta el material en temperaturas de servicio, la sensibilidad a la expansión del material en distintos procesos de expansión acelerada o la influencia del proceso experimental en la bondad de las medidas obtenidas. En total se han utilizado un número elevado de probetas (aproximadamente unas 1000), de las cuales se han obtenido globalmente más de 16000 medidas. Dicho trabajo se ha desarrollado a lo largo de 8 años en los laboratorios de Materiales de Construcción del Centro de Enseñanza Superior CEU-Arquitectura (UPM) y la Escuela Politécnica Superior (Universidad San Pablo-CEU), y ha sido financiado por HISPALYT (Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas) y la Fundación Universitaria San Pablo-CEU. Los datos obtenidos y reducidos se pueden encontrar en la memoria de la Tesis Doctoral.

ÍNDICE DEL TRABAJO

- 1 Procedimientos de ensayo
- 2 Estudio de la expansión por humedad que se observa de forma natural
- 3 Estudio de la expansión por humedad que se observa en procedimientos acelerados
- 4 Estudio de la expansión por humedad en muros
- 5 Interpretación del fenómeno y eficiencia de la normativa
- 6 Consideración del fenómeno de la expansión por humedad en obra

1 Procedimientos de ensayo

1.1 Sobre el método de medida

La fiabilidad de los resultados depende del método de medida que ha de ser optimizado antes de llevar a cabo una campaña de ensayos que se extenderá durante varios años. Por ello, se ha hecho un estudio pormenorizado de los factores que influyen y se ha puesto a punto una técnica de medida.

Las conclusiones son las siguientes:

- La **medida** es más **fiable si se sitúa la probeta en vertical** aprovechando la gravedad, **utilizando comparadores convencionales, practicando cavidades semiesféricas** en el propio material y **alojando éstas en palpadores semiesféricos de un diámetro algo menor**. El hecho de que no se describa este procedimiento en las normativas sobre EPH, puede inducir a una deficiente ejecución del ensayo. La manipulación en horizontal de las probetas, utilizada por diversos autores, es totalmente desaconsejable.
- La **precisión de los comparadores** destinados a la medida de probetas cerámicas (que tienen habitualmente una distancia entre palpadores de 210 a 240 mm) debe ser de **$\pm 0,001$ mm**.

1.2 Sobre el control de los posibles errores que derivan de las técnicas empleadas

Los **factores que introducen errores** en el proceso de medida son los siguientes:

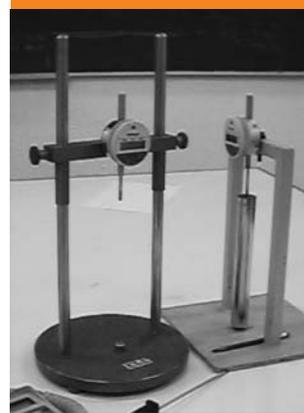
- Las **deformaciones del bastidor del micrómetro comparador debidas a las variaciones de la temperatura** ambiente del laboratorio. Estas variaciones son poco relevantes debido a que la variación de la temperatura es pequeña.

Probetas extraídas del material recibido en laboratorio

Comparadores digitales de medida y de control

Orificio practicado en los extremos de la probeta

Posición de la probeta en el palpador superior del micrómetro



- Las **deformaciones de las probetas debidas a las variaciones de la temperatura**. Éstas pueden ser importantes en ciertos procesos, como es el de la medida de la expansión natural de los materiales expuestos a la intemperie.
- El **desgaste de los palpadores del medidor**. Su magnitud puede ser importante al cabo de varios años de ensayos, por lo que se necesita un segundo medidor dedicado a su control. Puede considerarse que los resultados obtenidos en un ensayo a largo plazo son homogéneos si la velocidad de desgaste es sensiblemente constante en el tiempo.
- El **desgaste en los orificios de las probetas**, que puede ser más relevante en los ensayos a largo plazo, en los que se efectúan numerosas medidas sobre la misma pieza. Depende del tipo de material y de la condición medioambiental en la que permanece a lo largo del ensayo; en esta campaña de ensayos se ha acotado su valor en cada caso.

En consecuencia, debe tenerse en cuenta que:

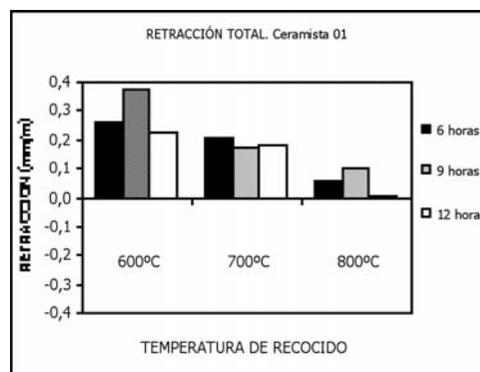
- **En los ensayos a largo plazo**, menos frecuentes y cuyo interés es más científico y experimental, es **necesario tener en cuenta todos estos factores para la oportuna corrección en cada medida obtenida**.
- **En los ensayos a corto plazo**, que son los que habitualmente se hacen según las normativas vigentes, **deben tenerse en cuenta los dos primeros**. No es necesario controlar el desgaste del aparato de medida ni el del material, ya que la toma de medida sobre la misma pieza no se efectúa más de 8 ó 10 veces. **Este aspecto debe incorporarse a la normativa vigente**.

1.3 Sobre la optimización de los ciclos de desecado y recocido. Estudio de la reversibilidad en el recocido

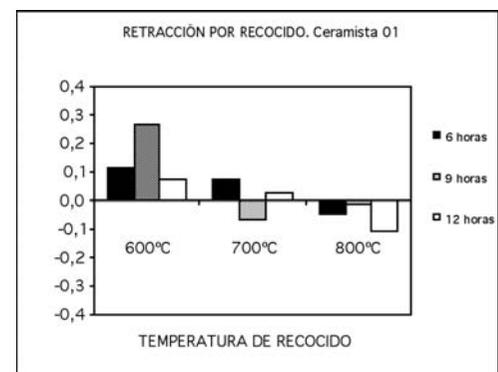
La descripción de un buen ciclo de desecado y recocido es necesario para garantizar la retracción suficiente tal, que pueda hacerse la hipótesis de que cualquier pieza cerámica se encuentra en condiciones similares a las de la primera cocción. Este aspecto es fundamental para validar cualquier procedimiento de ensayo para la medida de la EPH, tanto a corto como a largo plazo.

En esta campaña de ensayos se han encontrado las siguientes conclusiones relativas al comportamiento de las cerámicas españolas:

- Se detecta la existencia de una temperatura y tiempo de recocido óptimos a partir de los cuales, **temperaturas o tiempos de cocción mayores no implican retracciones mayores**.
- Como han aseverado diversos autores, **la eficacia del recocido también depende del tipo de cerámica**. Esto dificulta la definición de un ciclo de recocido tipo que pueda ser válido para cualquier material. Sin embargo, **es posible y se ha conseguido fijar un ciclo tipo, que se adapte suficientemente bien a todas las cerámicas, y que se pueda incorporar a la normativa vigente**.
- Los **ciclos** cuyas temperaturas se sitúan **entre 600 y 700°C**, y cuyos **tiempos** se sitúan entre **6 y 9 horas** son, en general, **los más eficaces**. Pueden darse por **válidos los ciclos de desecado y recocido establecidos por las normas UNE del año 86, 94 y 99**. Puede considerarse para el grupo de cerámicas analizado que **el ciclo tipo más eficaz** de los ensayados sobre material de ladrillo y bovedilla es el de **600°C durante 9 horas**.
- Las **temperaturas elevadas, superiores a 700°C**, no sólo no son más eficaces, sino que pueden producir cambios físico-químicos en el material. Se han encontrado en algunos **casos expansiones**.



Retracción total (desecado a 110°C/24h + recocido)



Retracción que corresponde a la fase de recocido

Respecto a la **reversibilidad** que se aprecia en el proceso de expansión y posterior recocido, cabe resaltar las siguientes conclusiones:

- La **retracción parcial** del material **por desecado, aumenta con la temperatura y el tiempo**. El recocido debe producirse a partir del material desecado, aumentando progresiva y lentamente la tem-

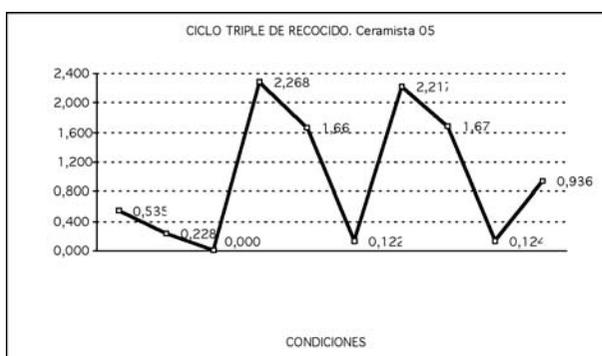
peratura para evitar desórdenes en la estructura interna del material debido a contracciones y dilataciones del agregado cristalino de la cerámica o al cambio de fase del cuarzo. La velocidad en el incremento de temperatura debe ser inferior a 100°C/h.

- El **ciclo de recocido de 600°C durante 9 horas** se adapta bien a las cerámicas españolas. Partiendo de material expandido previamente, **se obtienen valores similares a los de partida después de un ciclo de recocido seguido de otro de expansión**. En un conjunto suficientemente representativo de cerámicas se han obtenido **variaciones inferiores a un 7%** sobre las medidas iniciales, **en todos los casos estudiados**.

- Las **pequeñas variaciones** que se encuentran en ciclos realizados sobre el mismo material pueden ser **debidas a pequeñas alteraciones y desórdenes** provocados en la estructura física de la cerámica. Parece existir una **leve tendencia a que las retracciones sucesivas por recocido sean inferiores a las conseguidas por primera vez**, que **no es relevante a efectos prácticos**.

- Las **cerámicas que contienen fases más fácilmente hidratables** (que expanden con más facilidad y llegan antes a estabilizar su crecimiento) **son también más sensibles a los ciclos de desecado y recocido**. Los **desecados tradicionales a 110°C** producen acortamientos mucho más fuertes en este tipo de cerámicas, que en otras. Estos ciclos de desecado se han utilizado para poder establecer un **valor de referencia** con el que comparar la expansión potencial de distintas cerámicas, como ocurría en la norma UNE 67036-86. En consecuencia, **los resultados provenientes de estos ciclos son erróneos** ya que, si bien, el recocido tiene una eficacia similar con independencia del material ensayado, **en el proceso de desecado a 110°C se observan grandes variaciones**.

CI:	Condiciones iniciales del material
DS 110/24h:	Desecado a 110°C durante 24 horas
RC 600/9h:	Recocido a 600°C durante 9 horas
AU 1/5:	Autoclave a 1 MPa durante 5 horas
AH 24h:	Agua hirviendo durante 24 horas



Ciclo triple de recocido correspondiente a uno de los ceramistas de la campaña de ensayos

1.4 Sobre el estudio de la reversibilidad parcial que se produce en temperaturas de servicio

La norma UNE 67036-86 establecía la medida del material después del ciclo de desecado como valor de referencia para la estimación de la expansión potencial. Esta consideración es incorrecta, y por lo tanto ha sido necesario **establecer un valor de referencia más realista** que, de hecho, se ha introducido en el procedimiento operatorio de la norma UNE 67036:1999. Para ello se ha investigado la influencia que puede tener en la retracción de una cerámica una temperatura de servicio elevada (60°C).

Pueden extraerse las siguientes conclusiones:

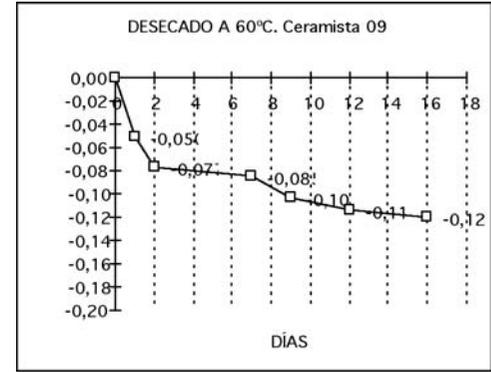
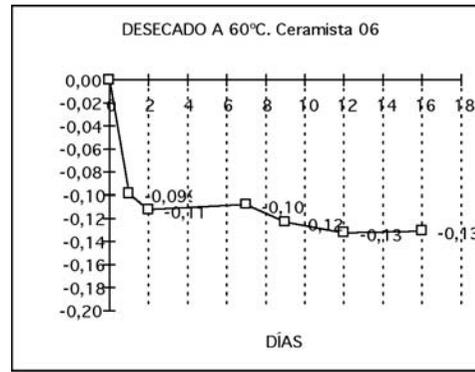
- La retracción observada a 60°C no es despreciable, aunque es, en general, pequeña. En ningún caso se han encontrado acortamientos superiores a los 0,2 mm/m. Puede considerarse que la **reversibilidad natural del fenómeno está en torno a 0,1 mm/m**. Este dato es de importancia en relación con el **comportamiento de grandes paños expuestos al sol** y la **distancia entre juntas de movimiento**.

- Manteniendo la temperatura a 60°C, la retracción se estabiliza entre los 10 y los 15 días. Los valores encontrados oscilan **entre un 5% y un 20% de la retracción más eficaz (la conseguida a 600°C durante 9 horas)**.

- La **sensibilidad a los desecados a 60°C**, al igual que ocurre con los desecados a 110°C, **depende del tipo de cerámica**, aunque la variabilidad es menor en el primer caso. La **magnitud media de los desecados encontrados a 60°C después de 15 días está entre el 25% y el 30% de la encontrada en el desecado clásico de 110°C durante 24 horas**.

- Las cerámicas con tendencias rápidas a la expansión pueden superar ligeramente los valores recogidos anteriormente, de la misma manera que aquellas que tienen crecimientos prolongados pueden dar valores ligeramente inferiores.

- Se propuso **establecer un ciclo de 60°C durante dos días** a fin de **obtener el valor de referencia para el cálculo de la expansión potencial según norma UNE 67036:1999**. Se comprobó que en todos los casos se superaba al menos un 50% de la retracción que se obtenía después de 15 días, y que el material no suele estar expuesto en verano más de 12 horas a esa temperatura, debido al ciclo diario.



Desecado a 60°C para dos ceramistas de la campaña de ensayos

CERAMICA	RETRACCIONES A 60 °C SEGUN TIEMPO DE DESECADO												OTROS CICLOS DE RETRACCIÓN SOBRE EL MISMO MATERIAL			
	Valores en mm/m												Valores en mm/m			
	60°C/1 DÍA			60°C/2 DÍAS			60°C/7 DÍAS			60°C/15 DÍAS			110°C/24 horas		600°C/9horas	
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	C	A	C
06	0,099	(75%)	14.9%	0,113	(86%)	17.0%	0,107	(82%)	16,1%	0,131	(100%)	19.7%	0.391	58.8%	0,665	100%
09	0,050	(42%)	3.1%	0,077	(65%)	4.7%	0,085	(71%)	5,2%	0,119	(100%)	7.3%	0.454	27.7%	1.638	100%
15	0,036	(31%)	1.8%	0,061	(52%)	3.0%	0,081	(70%)	4,0%	0,116	(100%)	5.8%	0.550	27.4%	2.009	100%
21	0,070	(38%)	3.5%	0,097	(53%)	4.8%	0,127	(69%)	6,3%	0,185	(100%)	9.2%	0.677	33.8%	2.002	100%

Columnas A: Retracción en mm/m

Columnas B: % sobre la retracción a 15 días (ver 4º grupo de datos de la tabla)

Columnas C: % sobre la retracción tras un ciclo de recocido de 600°C/9 horas aplicado al material del mismo fabricante

Comparación entre el ciclo de desecado a 60°C y otros ciclos de desecado o recocido, para cuatro ceramistas de la campaña de ensayos

1.5 Sobre los procedimientos operatorios que deben seguirse en ensayos de expansión natural y acelerada

Una vez asumido que en el proceso de medida se consigue minimizar el margen de error, y que mediante un proceso de recocido se consiguen restituir las condiciones en las que estaba el material a la salida del horno del ceramista, pueden establecerse los procedimientos de ensayo de expansión natural y acelerada.

Respecto al procedimiento a seguir en cada caso, se ha llegado a las conclusiones siguientes:

- En los **ensayos de expansión a largo plazo** debe tenerse especial cuidado en todos los **factores** que pueden influir en la **correcta toma de datos**. Debe disponerse de al menos **dos medidores**, de forma que mediante una barra de comparación se pueda **controlar el desgaste progresivo del medidor principal**. La reducción de datos se simplifica si se considera la **velocidad de desgaste constante**, para lo cual debe organizarse la campaña de **medidas** de forma que éstas **se efectúen de una manera constante y progresiva**.
- En los **ensayos acelerados** o en los que la duración y la frecuencia de la toma de medidas son pequeñas, puede **prescindirse** del control del desgaste por medio **de un segundo comparador**, ya que éste no es relevante. Tampoco lo suele ser el desgaste de la propia probeta.
- Deben conocerse los **coeficientes de dilatación de bastidores y probetas** para efectuar las correspondientes correcciones en la medida. Se recomienda una **precisión de $\pm 0,001$ mm** en la medida, que se consigue con comparadores muy económicos que se encuentran fácilmente en el mercado. También se recomienda una **precisión en la toma de temperaturas superior a 0,5°C**. Debe **evitarse** cualquier influencia de la **radiación solar** sobre bastidores y aparatos, para lo cual es recomendable situar el **sistema de medida en laboratorio** y trasladar el material cerámico a él. También debe **evitarse la alteración de las condiciones medioambientales en las que deben permanecer las probetas** durante un periodo dilatado, **cuando son trasladadas al laboratorio**; este extremo es especialmente importante para aquellas que se preservan en condiciones de exposición a la intemperie.
- Deben extremarse los **cuidados en la fabricación y mantenimiento de las probetas**, especialmente en los huecos semiesféricos en los que se alojan los palpadores de los micrómetros.

2 Estudio de la expansión por humedad que se observa de forma natural

2.1 Sobre la expansión natural a largo plazo. Valores representativos de las cerámicas españolas

En el presente trabajo se ha considerado el estudio en **tres condiciones medioambientales**:

- a) **de interior (NL)**, es decir, en laboratorio con temperatura y humedad uniformes y sensiblemente constantes,
- b) **de exterior (NE)**, es decir, en exposición a la intemperie, con temperaturas y humedades variables,
- c) **en una atmósfera saturada de humedad (NH)**, más desfavorable que las anteriores y que cualquier otra condición.

Se ha contado con productos de **20 ceramistas de todo el territorio nacional**, y se han elegido **10 procedentes de ladrillos y 10 procedentes de bovedillas**. El material suministrado por los ceramistas era de formato comercial y procedía de procesos de fabricación normal.

Se han empleado más de 600 probetas en ensayos de expansión natural y acelerada, llegando a las 1000 si se consideran el resto de ensayos complementarios. El **volumen de material ensayado es elevado y suficiente para caracterizarlo**. Puede considerarse que los resultados del ensayo muestran un **panorama representativo de la EPH en España**.

La escala temporal característica del ensayo se sitúa en 1651 días (4,52 años).

Valores medios de expansión a 4 años:

Valores medios a 4 años	NE	NL	NH	EN ₁₄₆₀
	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m
	0,643	0,460	0,819	0,641

Cuadro resumen de los valores medios de expansión por humedad encontrados en las distintas condiciones medioambientales después de 4 años de estudio, expresados en mm/m.

Expansividad:

	EXPANSIVIDAD*	EXPANSIÓN mm/m	TOTAL	LADRILLO	BOVEDILLA
EN _{med}	Baja	<0.40	5 (25%)	1	4
	Media	0.40-0.80	10 (50%)	6	4
	Alta	>0.80	5 (25%)	3	2
EN _{max}	Baja	<0.40	4 (20%)	1	3
	Media	0.40-0.80	6 (30%)	3	3
	Alta	>0.80	10 (50%)	6	4

* Según el criterio de Lomax y Ford

VALORES MEDIOS:	EN _{med}	obtenida como media aritmética de las expansiones obtenidas en las tres condiciones medioambientales
VALORES MÁXIMOS:	EN _{max}	obtenida a partir del valor máximo encontrado en cualquiera de las tres condiciones medioambientales

Clasificación por expansividad, según el criterio de Lomax y Ford, utilizando valores medios (obtenidos como media aritmética de los valores obtenidos en las tres condiciones medioambientales), y valores máximos (obtenidos a partir del valor más elevado en cualquiera de las tres condiciones medioambientales). Se recoge el número de ceramistas que cumplen cada criterio.

A partir de los valores encontrados se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

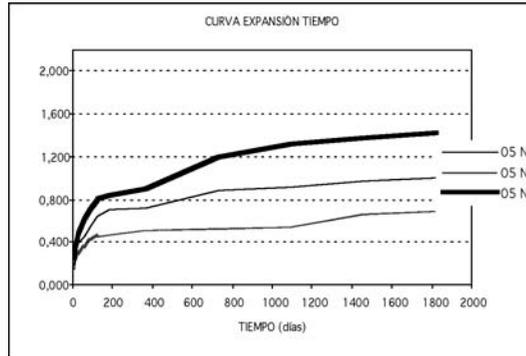
- Puede decirse que, a la vista de los valores encontrados en toda la campaña, **la expansión de las cerámicas españolas toma valores medios** (el 50% de ellas se sitúan entre 0,4 y 0,8 mm/m). **La expansión media al final de la campaña toma un valor de 0,65 mm/m**. La **expansión máxima** (es decir, considerando los valores pésimos de cada cerámica, con independencia de su condición medioambiental) se sitúa en torno a los **0,85 mm/m**.
- La **tendencia a la expansión de los ladrillos es ligeramente superior a las bovedillas** (aproximadamente un 10%). Así, el número de bovedillas cuya expansión toma valores considerados como bajos (<0,4 mm/m) es mayor (4 frente a 2), mientras que el número cuya expansión toma valores elevados (>0,8 mm/m) es menor (2 frente a 4). Entre otras causas está la mejor y más prolongada cocción del ladrillo.
- La expansión que se observa en condiciones de saturación de humedad es un 28% mayor que la observada en condiciones de exposición a la intemperie y un 78% mayor que en condiciones de laboratorio. El valor que toma **la expansión es, por consiguiente, muy sensible a la humedad del ambiente**.
- En comparación con las cerámicas de otros países, las españolas se encuentran en una situación intermedia. Algunos han acusado una mayor frecuencia en apariciones de patologías, como Australia, Sudáfrica o Estados Unidos; en otros, la incidencia de este fenómeno ha sido algo menor, como en Inglaterra.
- El **valor medio de EPH** comentado es próximo al valor límite recogido en las normativas españolas; también es cierto que **los resultados anticipados de esta campaña han permitido actuar a numerosos fabricantes sobre su propio material y se ha tomado conciencia de la importancia del fenómeno**, pudiendo afirmarse que **en los últimos 5 años se tiende a una rebaja muy significativa en los valores anteriormente citados**.

Condiciones medioambientales en las que se preservan las probetas.



Condiciones medioambientales de estudio
 NL: de interior, en laboratorio
 NE: de exterior, a la intemperie
 NH: de saturación de humedad

2.2 Sobre la forma de crecimiento. Curvas expansión-tiempo



Curvas expansión-tiempo del ceramista 05, en las tres condiciones estudiadas

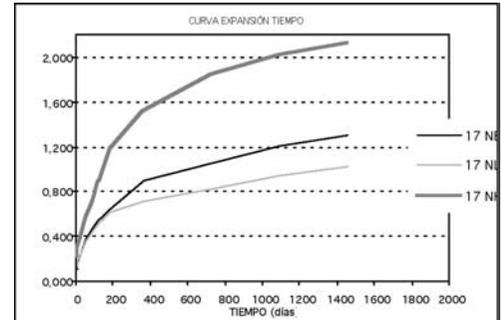
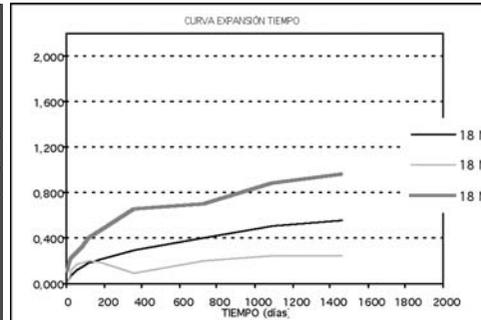
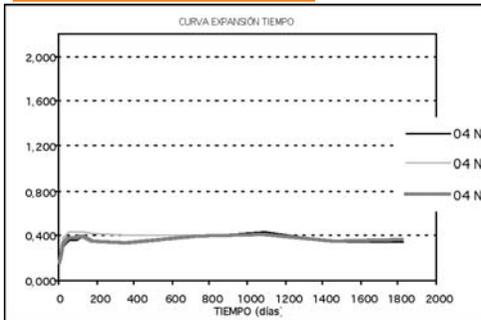
Para obtener una idea precisa del comportamiento de las cerámicas es necesario analizar las **curvas de evolución temporal de la expansión**, que denominaremos **curvas expansión/tiempo**.

A la vista de ellas pueden establecerse las siguientes conclusiones básicas:

- El **crecimiento debido a la EPH** se manifiesta **a lo largo de toda la vida de la cerámica**. Es más **brusco al principio**, tendiéndose a una **estabilización progresiva**. La estabilización definitiva se produce

en algunos casos con rapidez (en periodos de pocas semanas o meses), y en otros no se aprecia después de 4 ó 5 años de ensayo. Dicha fecha es de difícil determinación, y el proyectista no puede obtener ese dato si no es con un ensayo a largo plazo que a él, obviamente, no le reporta datos para la aplicación inmediata en obra. Puede acotarse con una cierta fiabilidad, a partir de la experiencia de esta campaña de ensayos.

- Se observan **tres tipos de curvas expansión/tiempo características**: con crecimientos fuertes en pocos días y una estabilización rápida del crecimiento, con crecimientos importantes en los primeros días y una estabilización progresiva que se dilata en el tiempo con valores de crecimiento pequeños a partir de los primeros años, y con crecimientos iniciales bajos, y finales grandes y muy dilatados en el tiempo.



Curvas correspondientes a tres ceramistas con comportamientos diferenciados: el ceramista 04 estabiliza su crecimiento con rapidez, con independencia de su valor final de expansión, el ceramista 18 tiene un crecimiento sostenido moderado, que en condiciones de laboratorio muestra que su estabilización definitiva se encuentra próxima, el ceramista 17 muestra crecimientos sostenidos y valores de expansión elevados.

El ceramista 17 ha mostrado un comportamiento excepcional en la campaña de ensayos. Fue seleccionado porque existían referencias de un comportamiento patológico para hacer de él un estudio específico, y en ningún caso es representativo del panorama nacional

A la vista de los resultados obtenidos, puede decirse que es difícil encontrar un **modelo general de comportamiento** que se ajuste bien a cualquier material cerámico. Se han obtenido curvas promedio para cada condición medioambiental, utilizando los datos de todas las probetas; si se utiliza este promedio como un modelo de predicción, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La curva expansión/tiempo media coincide sensiblemente, a lo largo de la vida de la cerámica, con la correspondiente a la condición de **exposición a la intemperie (NE)**. Puede considerarse dicha condición como **representativa del comportamiento promedio** de las cerámicas, en el sentido de que los valores de expansión obtenidos coinciden con la media de los encontrados en las tres condiciones ensayadas: intemperie, laboratorio y saturación de humedad.

- En el **primer mes**, la **EPH media** observada supone un **25% de la encontrada a 4 años**. Oscila entre un 22,5% en condiciones de saturación de humedad y un 32,4% en condiciones de laboratorio.

- En el **primer año**, la **EPH media** observada supone un **62% de la encontrada a 4 años**. Oscila entre un 61,3% en condiciones de exposición a la intemperie y un 62,2% en condiciones de saturación de humedad (la dispersión que se produce en los resultados de las distintas condiciones medioambientales es mínima cuando se comparan valores por encima de los seis meses, y mucho menor que en el caso anterior).

- La **forma de las curvas** correspondientes a las **tres condiciones medioambientales** es sensiblemente **homotética**. Se ha observado que el material conservado en **condiciones de exposición a la intemperie** tiene un **comportamiento "promedio"**.

La **relación clásica de McDowall y Birtwistle** entre la expansión encontrada a 1 mes y a 127 días (para la que proponen un valor de 1,8), toma en esta campaña un **valor medio aproximado**, que oscila entre 2,17 y 1,75 dependiendo de las condiciones en que se encuentre el material. El valor más elevado corresponde a condiciones de expansión en saturación de humedad, y el más bajo a condiciones de laboratorio. El **valor medio de la relación en condiciones de intemperie** es de **2,03**. Por otro lado, un **estudio individual de cada cerámica desaconseja este valor como método de predicción, debido a la ele-**

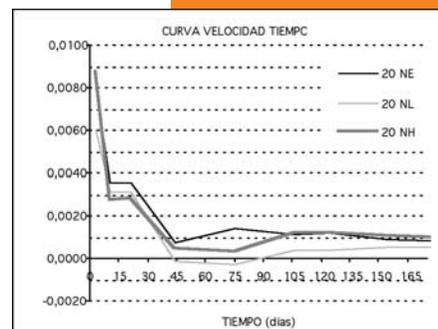
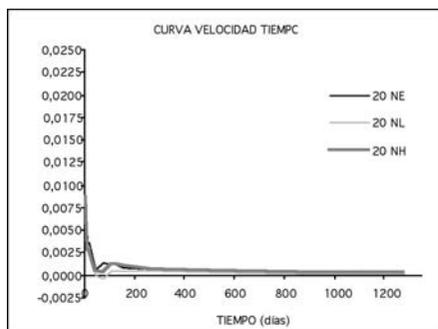
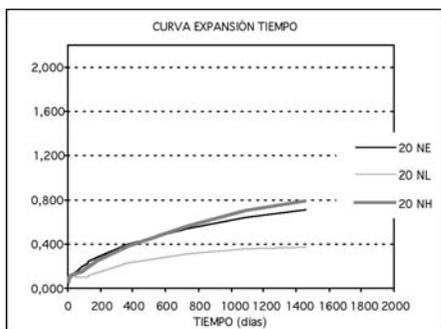
vada dispersión que se observa, y que oscila entre 1,25 y 3,50 según sea el material considerado. Puede concluirse que el sistema propuesto por McDowall y Birtwistle **no es válido para el material estudiado**.

La **velocidad media de expansión entre 1 y 4 años** puede considerarse como indicativa de la tendencia al crecimiento y sirve como parámetro de comparación entre distintos materiales. La mitad de las cerámicas encontradas muestran tendencias a crecer nulas, bajas o moderadas, con valores inferiores a $2,3 \cdot 10^{-4}$ mm/m.día (es decir, crecimientos inferiores a 0,25 mm/m en el periodo señalado). La otra mitad, muestran tendencias al crecimiento superiores a las comentadas anteriormente; en 6 casos, el valor es superior a $3 \cdot 10^{-4}$ mm/m.día (es decir, crecimientos superiores a 0,30 mm/m en el periodo señalado). El **valor de la velocidad media es $2,17 \cdot 10^{-4}$ mm/m.día**, que puede considerarse como **moderada**.

En general, la **tendencia al crecimiento es algo menor en bovedillas que en ladrillos**. El 40% de las bovedillas muestran valores de crecimiento bajos o nulos.

2.3 Sobre la velocidad de crecimiento. Curvas velocidad-tiempo

Para un análisis más riguroso y preciso de la forma en que crecen las distintas cerámicas se han obtenido los valores de velocidad de expansión a partir de los datos de expansión. Las curvas velocidad/tiempo ofrecen parámetros de análisis interesantes, como la **velocidad inicial de crecimiento** (relacionada con el tiempo de almacenado tras su fabricación), el **decaimiento inicial** de su valor, el **descenso** del valor de la velocidad **a medio plazo** (entre 6 meses y 4 años) y la **velocidad de crecimiento de salida**. De su análisis se propondrá un sencillo modelo de crecimiento para estimar valores de expansión en lapsos de tiempo superiores a 4 años.



Las conclusiones son las siguientes:

Relativas a la **velocidad inicial de crecimiento**:

- Durante la primera semana se aprecian las mayores velocidades de crecimiento, que se corresponden con expansiones bruscas. Los valores de **velocidad inicial de crecimiento durante la primera semana ($VE_{3,5}$)** pueden llegar a ser superiores a 200×10^{-4} mm/m.día (del orden de 100 veces mayores de las que se observan al cabo de 4 años). Prácticamente la mitad de las cerámicas presentan valores de velocidad elevados ($VE_{3,5} > 100 \times 10^{-4}$ mm/m.día). Sólo 4 cerámicas muestran valores de velocidad inicial de crecimiento ($VE_{3,5} < 50 \times 10^{-4}$ mm/m.día) que pueden considerarse bajos, de las cuales 3 son ladrillos. La **dispersión en los valores de la velocidad inicial** en la campaña de ensayos **es grande**.
- Comparativamente, las **bovedillas presentan velocidades iniciales de crecimiento mayores** que los ladrillos. Tienen velocidades elevadas el 60% de las bovedillas y el 20% de los ladrillos.

Velocidad media de crecimiento en la primera semana

VE _{med} (VE _{inicial} ~VE _{3,5}) EN LA PRIMERA SEMANA	VALOR DE LA VELOCIDAD (mm/m.día)	SERIES	NÚMERO DE SUCESOS	
			Ladr.	Bov.
Velocidad baja	Inferior a 50×10^{-4}	13, 14, 16, 19	4	3
Velocidad moderada	Entre 50 y 100×10^{-4}	01, 08, 09, 11, 12, 15, 18, 20	8	5
Velocidad elevada	Entre 100 y 200×10^{-4}	07, 10, 21, 22	4	3
	Superior a 200×10^{-4}	04, 05, 06, 17	4	3

Relativas al **decaimiento inicial de la velocidad** de crecimiento:

- Tras el periodo de desaceleración brusca, se produce en el material una fase en que la velocidad de expansión tiende a estabilizar su valor. Por lo general, este periodo comienza al mes, o mes y medio, en la mayoría de las cerámicas, y termina entre mes y medio y seis meses, dependiendo del fabricante.

Curvas expansión-tiempo y velocidad-tiempo del ceramista 20 en las tres condiciones estudiadas.

El tercer gráfico corresponde al comportamiento observado en los primeros 175 días, convenientemente escalado.

Cuadro resumen de la velocidad media de crecimiento en la primera semana.

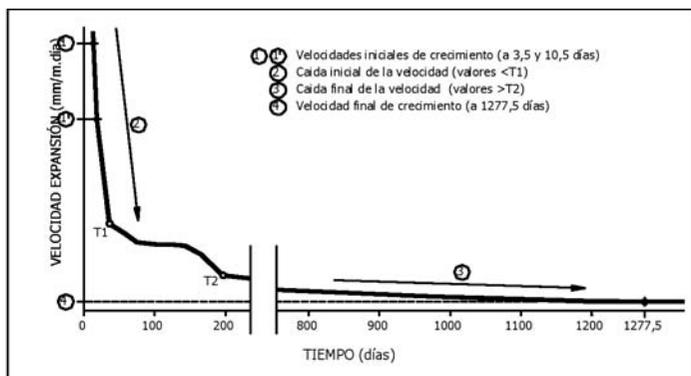
Hemos denominado a ésta **fase de meseta**. Se aprecia mejor en unos materiales que en otros, y dependiendo de su composición, su duración también es variable. Después de la fase de meseta, el material sufre una fase de caída progresiva y continua en el valor de su velocidad, que permitirá la propuesta de un modelo sencillo para acotar la expansión que se produce en las cerámicas a largo plazo.

- La forma de la curva en la fase de meseta depende de cada cerámica. En este trabajo se han acotado los tipos en función de su amplitud. Sólo en un 15% de los casos no se aprecia dicha fase.

- La aparición de la fase de meseta induce a pensar que **la forma de crecimiento no puede modelizarse mediante una función sencilla** si lo que se pretende es un ajuste preciso que permita extrapolar expansiones en periodos dilatados de tiempo. Se han acotado los valores de **T1** (momento en que **comienza la fase de meseta**) y **T2** (momento en que **termina la fase de meseta**) para todas las cerámicas. Los valores de T1 están entre 10 y 45 días, según los casos (**en el 75% de los casos T1 se observa sensiblemente a los 45 días**). Los valores de T2 están entre 45 y 155 días, para la mayoría de las cerámicas (**en el 60% de los casos T2 se observa claramente alrededor de los 155 días**). Con posterioridad a T2, la caída del valor de la velocidad puede considerarse fundamentalmente continua.

- **Las relaciones** que han buscado diversos autores **entre expansiones a cortos y largos periodos de tiempo** y que utilizan **valores obtenidos en un periodo inferior a T2 son poco fiables** y en absoluto generalizables a todas las cerámicas (anteriormente se ha considerado este extremo en la relación clásica de McDowall y Birtwistle).

- Encontrar una **expresión para una curva de crecimiento** a corto o largo plazo **que contenga valores de EN inferiores a T2, no tiene interés ni es, en absoluto, extensible a todas las cerámicas.**



Parámetros de interés para el fabricante:

- Velocidad inicial de crecimiento (para $T < T1$)
- Comienzo de la desaceleración (T1), y duración del periodo de meseta (T1 a T2)
- Extrapolación de la expansión a medio/largo plazo (para $T > T2$)

Parámetros más relevantes de las curvas velocidad-tiempo

Relativas al descenso de la **velocidad a medio plazo** y a la **velocidad final de crecimiento**:

- **A partir de los 155 días** la mayoría de las cerámicas estudiadas experimentan un **crecimiento con velocidades bajas pero constantes**. En esta fase sí puede proponerse un **modelo para acotar el valor final del crecimiento**.

- La **velocidad final de crecimiento al cabo de 4 años (VE_{1277,5})** es, en la gran mayoría de los casos, un mínimo en las curvas encontradas. En el 75% de los casos las velocidades son inferiores a $2,3 \times 10^{-4}$ mm/m.día.

- **El material de bovedilla parece tender más rápidamente a la estabilización**, pudiendo influir en este caso la utilización de ciclos de cocción más cortos y/o de más baja temperatura.

Velocidad media de crecimiento a los 4 años

VE _{med} A LOS 4 AÑOS (VE _{1277,5})	VALOR DE LA VELOCIDAD (mm/m.día)	SERIES	NÚMERO DE SUCESOS		
			Ladr.	Bov.	
Velocidad baja o nula	Inferior a $1,0 \times 10^{-4}$	01, 04, 06, 14, 16	5	2	3
Velocidad moderada	Entre $1,0$ y $2,3 \times 10^{-4}$	05, 07, 10, 11, 12, 15, 18, 20, 21, 22	10	4	6
Velocidad elevada	Entre $2,3$ y $2,8 \times 10^{-4}$	08, 13, 17, 19	4	3	1
	Superior a $2,8 \times 10^{-4}$	09	1	1	0

Cuadro resumen de la velocidad media de crecimiento a los 4 años de ensayo

En conclusión, las cerámicas españolas muestran un crecimiento progresivo en el que, a partir de los datos de velocidad de expansión, pueden apreciarse discontinuidades en su crecimiento. Como se ha visto, aparece una

fase de meseta, que hace difícil la modelización de la curva expansión-tiempo. **Los modelos propuestos por diversos autores para la predicción de la expansión no se adaptan bien a la etiología de la mayoría de las cerámicas españolas**, y esto es debido al comportamiento peculiar de cada una de ellas. Se ha propuesto un modelo promedio, que da idea del comportamiento general del fenómeno, pero con el cual no se pueden establecer conclusiones en cada caso concreto.

Más aún, a la vista de los resultados obtenidos, **no parece tener interés buscar una expresión general que nunca se adaptará con facilidad a un comportamiento físico tan variable en el tiempo y dependiente de las características del material o de las condiciones medioambientales**. La mayor homogeneidad en el comportamiento se observa en la **última fase del ensayo**, y es donde centramos el análisis para **acotar el valor que toma la EPH a largo plazo**.

2.4 Sobre la estimación del valor de la expansión por humedad final, a partir de los valores de la campaña de ensayos

Para la estimación del valor de la EPH final se ha propuesto un modelo de ajuste exponencial, que se aplicaría a los datos obtenidos a partir de T₂ en las curvas velocidad-tiempo obtenidas experimentalmente. Dicha expresión, del tipo **VE_{med}=k.e^{-a.T}**, tendría una asíntota en el eje de abscisas (VE_∞=0).

Para valores de T > 182,5 días, se obtienen curvas cuya integración nos permite acotar el valor de la EPH final. Se utilizan las curvas de VE_{med}, y por lo tanto se obtiene la EN_{med} a partir de 4 años (EN_{1460,∞}).

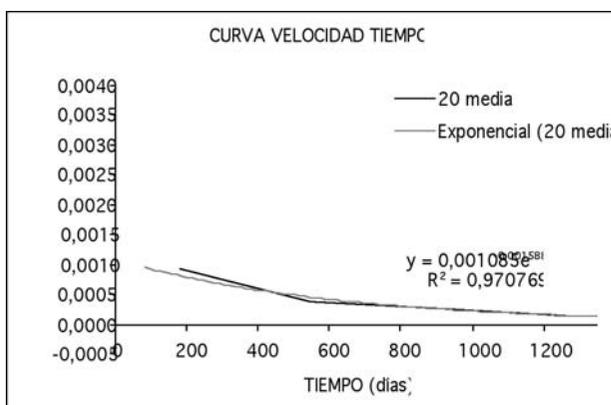
Pueden extraerse las siguientes conclusiones relevantes:

- El crecimiento residual (EN_{1460,∞}) es inferior al 20% del valor de la expansión producida en el 4º año (EN₁₄₆₀), en la mayoría de los casos. Considerando las cerámicas cuyos ajustes presentan una bondad mayor, dicho crecimiento residual siempre es inferior al 15%. En 14 de los 20 casos, EN_{1460,∞} es inferior al 10%. En 8 de los 20 casos, el material ha estabilizado sensiblemente o está en vías de hacerlo.

- Por lo tanto, **el crecimiento residual a partir de 4 años es leve, alrededor del 10% de la expansión producida en el 4º año**.

Es decir, **EN_{1460,∞} ≤ 10% EN₁₄₆₀**.

- **El valor de la expansión que se produce entre 3 y 4 años (EN_{1095,1460}) es parecido al valor de la expansión residual (EN_{1460,∞})**.



Ajuste de la forma VE_{med}=k.e^{-a.T} a la curva obtenida en el ensayo para el ceramista 20

CERÁMICA	EN _{1460,00} mm/m	EN _{1460,00} / EN ₁₄₆₀ %
01	0,0326	5,6 %
04	ESTABILIZADA	
05	0,0593	5,9 %
06	ESTABILIZADA	
07	ESTABILIZADA	
08	0,1163	28,4 %
09	0,2653	38,2 %
10	0,0530	10,4 %
11	0,0828	21,7 %
12	0,0708	10,5 %

CERÁMICA	EN _{1460,00} mm/m	EN _{1460,00} / EN ₁₄₆₀ %
13	0,1300	14,8 %
14	ESTABILIZADA	
15	0,0570	7,7 %
16	0,0028	1,6 %
17	0,0697	4,7 %
18	0,0537	9,2 %
19	0,1283	13,1 %
20	0,0671	10,8 %
21	0,0718	7,2 %
22	0,0957	14,9 %

$$EN_{T_1, T_2} = \int_{T_1}^{T_2} k \cdot e^{-a \cdot T} \cdot dT = \frac{k}{a} [e^{-a \cdot T_1} - e^{-a \cdot T_2}]$$

se obtiene por integración de la expresión VE_{med}=k.e^{-a.T}

Estimación de la expansión entre T₁=1460 días y T₂=∞, e incremento que supone sobre la expansión encontrada a 1460 días, expresada en %.



Autoclave empleado para presiones de 1 MPa



Autoclave empleado para presiones de 0,2 MPa

Resultados por rangos de expansión natural y acelerada en autoclave (1 MPa)

3 Estudio de la expansión por humedad que se observa en procedimientos acelerados

3.1 Sobre los procedimientos de ensayo tradicionales que utilizan presión

Los procedimientos para la determinación acelerada de la EPH que se realizan bajo presión han sido muy utilizados por numerosos investigadores para estudiar los mecanismos de hidratación, pero su empleo para predecir cuantitativamente índices de expansión no da buenos resultados.

A partir de los datos de esta campaña de ensayos se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Se comprueba inmediatamente que las **expansiones que se obtienen por procedimientos con presión son mayores que las que se alcanzan de forma natural**. Debido a esto, existe una **dificultad en la interpretación de los datos obtenidos**, y se hace necesario la obtención de un coeficiente de correlación entre los datos que se obtienen de ambas.
- Se ha constatado experimentalmente que **la expansión obtenida del ensayo acelerado con presiones de 1 MPa no se supera de forma natural**.
- La **expansión media** obtenida a partir de todo el material ensayado, utilizando presiones de 1MPa, es de **1,468 mm/m**.

Valor medio en ladrillos	1,560 mm/m
Valor medio en bovedillas	1,385 mm/m
Valor medio de expansión	1,468 mm/m

Valores medios de expansión acelerada con presiones de 1 MPa

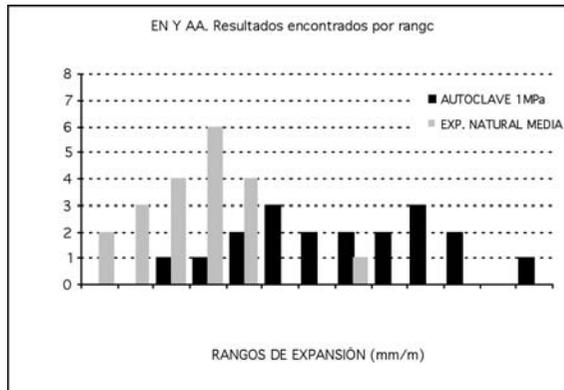
- Las **relaciones entre dicha expansión media y la natural después de 4 años**, obtenidas como media aritmética de las encontradas en las 20 cerámicas estudiadas, serían las siguientes:

Utilizando valores medios de expansión natural, **AA/EN_{med} = 2,585**.

Utilizando valores máximos de expansión natural, **AA/EN_{max} = 1,981**,

con independencia de las condiciones de conservación de las probetas durante la campaña de ensayos.

En ambas relaciones, el valor que se obtiene para ladrillo o bovedilla es similar. Los coeficientes podrían emplearse para estimar valores de expansión natural a partir de los obtenidos en este tipo de ensayo. Sin embargo **se aprecia una gran dispersión en los valores de las relaciones AA/EN_{med} y AA/EN_{max}**, que oscilan en el caso de la primera entre 1,0 y 5,5. Por lo tanto, **el método acelerado clásico del autoclave trabajando a 1MPa no es apropiado para estimar expansiones naturales**.



- El **concepto de dilatación potencial (DP)**, que se utiliza para estimar el crecimiento potencial de una cerámica a partir de un momento dado, **no es adecuado ni fiable para evaluar su peligrosidad**:

♦ Habitualmente se ha utilizado cuando aparece un proceso patológico, y el valor que se obtiene en el ensayo, que no tiene en cuenta la expansión producida hasta el momento de la evaluación, **se compara indebidamente con las limitaciones** que se recogen en las normas **que afectan al material**.

♦ Queda claro pues que **el valor que se obtiene con presión se relaciona mal con el obtenido de forma natural**, lo que **invalida este tipo de procedimientos** a efectos de evaluar la EPH.

Sin embargo, este tipo de ensayos bajo presión se han prescrito durante mucho tiempo en las normativas de países europeos, entre ellos España. Como se ha dicho, en la UNE 67036-86 se especificaba un ensayo acelerado con presiones de 1MPa para la determinación de la dilatación potencial del material, y los resultados que se obtenían quedaban para la interpretación de técnicos o peritos. La fracción de este trabajo desarrollada entre los años 92 y 94 puso inmediatamente de manifiesto **carencias graves en esta normativa**, tanto **de interpretación** como **de operatividad**. **No existía constatación experimental de la relación existente entre expansiones obtenidas de forma natural y acelerada con presión**. Se inició una campaña de ensayos acelerados en paralelo a los de expansión natural, y con los datos de los dos primeros años pudo apreciarse que dicha relación se establecía de forma deficiente.

Las conclusiones obtenidas en el ámbito de este trabajo se elevaron al Comité Técnico Nacional "AEN/CTN 136: Materiales Cerámicos de Arcilla Cocida para la Construcción", para la discusión de la norma vigente.

3.2 Sobre los procedimientos de ensayo que no utilizan presión

A partir de la experiencia de investigadores australianos, que comenzaron a utilizar procedimientos en ausencia de presión, se ha propuesto un tipo de ensayo que permite un ajuste mejor entre los datos de EA y EN, y cuyos resultados se recogen en el apartado 4.4.2.

Para ello se ha desarrollado una campaña previa de comparación entre distintos sistemas, con el fin de decidir cuál es el más adecuado. Los resultados más relevantes han sido los siguientes:

- El empleo del **agua fría** en ciclos de expansión acelerada **no es adecuado**, debido a que los valores de expansión encontrados son muy bajos para apreciar una tendencia clara al crecimiento. El empleo del **agua caliente hasta 80°C**, ensayo utilizado en nuestro país en algún momento, da valores de expansión bajos y **no ofrece tampoco buenas relaciones entre EA y EN**.
- El **empleo del agua hirviendo (AH) y del vapor de agua (VA)** en lapsos de tiempo de 24 horas **ofrece buenos resultados**, en el sentido de que **las expansiones son apreciables y similares**, en orden de magnitud, **a las que se observan de forma natural**. Los ensayos con bajas presiones (0,2 MPa) no dan mejores resultados y no ofrecen ventajas sobre los anteriores.
- Los **valores que se encuentran en los ensayos de AH y VA son similares**. Coinciden cuando la temperatura de cocción de la cerámica es tal que obtenemos un máximo en el ensayo de expansión. Por debajo de esa temperatura, el ensayo de AH da valores de expansión algo mayores que el de VA, y por encima, ocurre lo contrario. Este fenómeno parece estar relacionado con la porosidad del material y la mayor difusividad del vapor de agua.
- La relación AH/VA encontrada en esta campaña de ensayos es igual a 0,996, prácticamente coincidente con la unidad. Es decir, **los ensayos de vapor de agua y agua hirviendo producen expansiones del mismo orden** en las cerámicas comerciales estudiadas.
- En consecuencia **se ha optado por el empleo del ensayo de AH**, más cómodo desde un punto de vista operatorio. Para ello fue necesario diseñar un hervidor que garantiza el mantenimiento de un depósito de agua hirviendo durante 24 horas, sin fluctuaciones en la temperatura, cuyo esquema se recoge en el apartado 4.2.2.1.
- La **expansión media** obtenida a partir de todo el material ensayado, en agua hirviendo durante 24 horas, es de **0,613 mm/m**. Es mayor en ladrillos (0,703 mm/m) que en bovedillas (0,532 mm/m).

Valor medio en ladrillos	0,703 mm/m
Valor medio en bovedillas	0,532 mm/m
Valor medio de expansión	0,613 mm/m

Valores medios de expansión acelerada en agua hirviendo

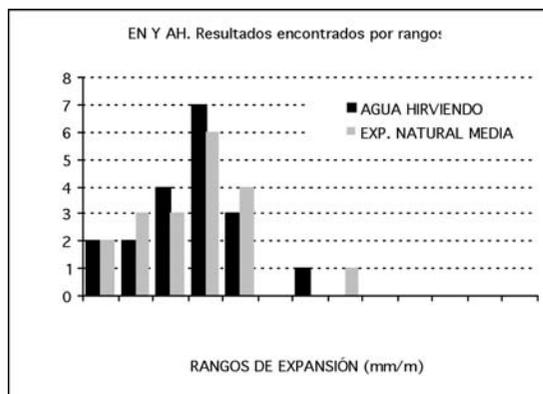
Las **relaciones entre dicha expansión media y la natural después de 4 años**, obtenidas como media aritmética de las encontradas en las 20 cerámicas estudiadas serían las siguientes:

- Utilizando valores medios de expansión natural, **AH/EN_{med} = 0,954**.
- Utilizando valores máximos de expansión natural, **AH/EN_{max} = 0,735**,
- con independencia de las condiciones de conservación de las probetas durante la campaña de ensayos.

En ambas relaciones, el valor que se obtiene para ladrillo o bovedilla vuelve a ser similar. Se observa una relación entre ambas próxima a la unidad, cuando utilizamos valores medios.

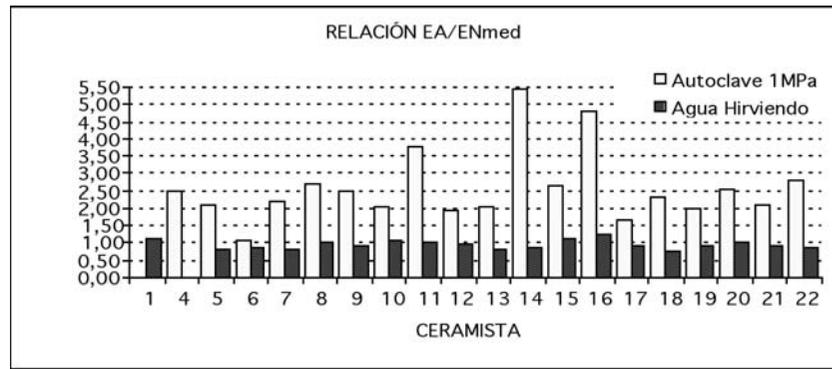
La **dispersión en los valores de las relaciones AH/EN_{med} y AH/EN_{max}** es mucho menor que en el ensayo de autoclave, oscilando los valores encontrados para la primera de ellas entre **0,78 y 1,26**.

Por ello, **el método del agua hirviendo es más adecuado y preciso que el del autoclave** a 1MPa, y da unos resultados altamente concordantes con la realidad.



Resultados por rangos de expansión natural y acelerada en agua hirviendo

Relación entre expansiones aceleradas (EA) en autoclave a 1 MPa (AA) y agua hirviendo (AH) respectivamente, y la expansión natural tomando valores medios (EN_{med})



3.3 Sobre la correlación que se establece entre valores de expansión acelerada en agua hirviendo (AH) y de expansión natural (EN)

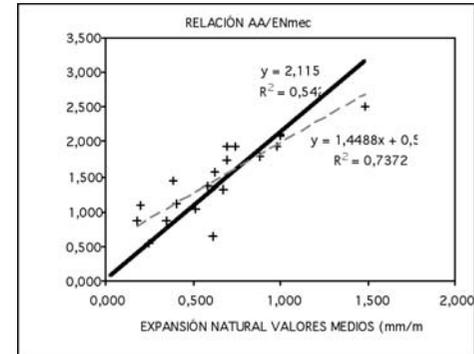
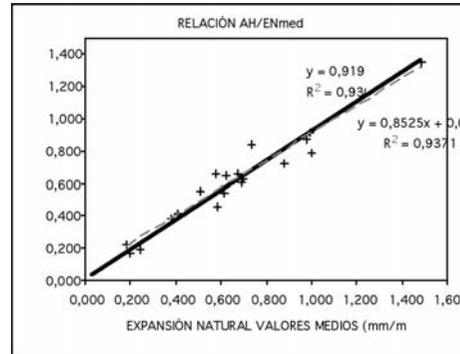
A partir de los valores encontrados en esta campaña de ensayos pueden hacerse las siguientes afirmaciones: Se obtienen los siguientes ajustes, cuyas rectas de tendencia son las siguientes:

	Expresión I	(R ²)	Expresión II ⁽¹⁾	(R ²)
Relación AH/ EN_{med}	$AH = 0,8525 \cdot EN + 0,0537$	(0,9371)	$AH = 0,9192 \cdot EN$	(0,9301)
Relación AA/ EN_{med}	$AA = 1,4488 \cdot EN + 0,5351$	(0,7372)	$AA = 2,1152 \cdot EN$	(0,5426)

(1) En el ajuste se impone la condición de que la recta pasa por el origen

- siendo AH expansión acelerada en agua hirviendo (24 horas)
- AA expansión acelerada en autoclave a 1 MPa (5 horas)
- EN_{med} expansión natural, utilizando valores medios obtenidos a partir de las condiciones estudiadas (NE, NL y NH)
- EN_{max} expansión natural, utilizando valores máximos obtenidos en cualquiera de las tres condiciones estudiadas (NE, NL y NH)
- R² coeficiente de regresión del ajuste

Ajustes de las relaciones entre expansión acelerada en agua hirviendo y natural (AH/EN_{med}), y expansión acelerada en autoclave a 1 MPa y expansión natural (AA/EN_{med}).



- Observando R² puede apreciarse que **la bondad de los ajustes en el ensayo de agua hirviendo durante 24 horas es mucho mayor. La mejor relación se establece entre los valores AH y EN_{med}** ; puede apreciarse que existe casi una **proporcionalidad directa**.
- Desde un punto de vista práctico puede establecerse que la relación que existe entre el ensayo de agua hirviendo y la expansión media natural al cabo de 4 años es la siguiente:

$$EN_{4años} = AH / 0,92$$

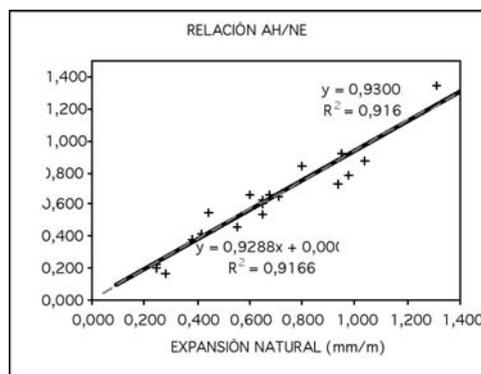
Esta relación se puede utilizar para estimar la expansión natural a partir del ensayo acelerado.

- Estudiando las relaciones que se establecen entre el ensayo acelerado y las distintas condiciones en que se han conservado las probetas en el ensayo de expansión natural, se obtienen los siguientes datos:

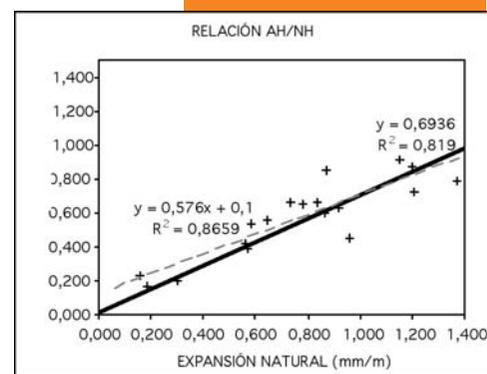
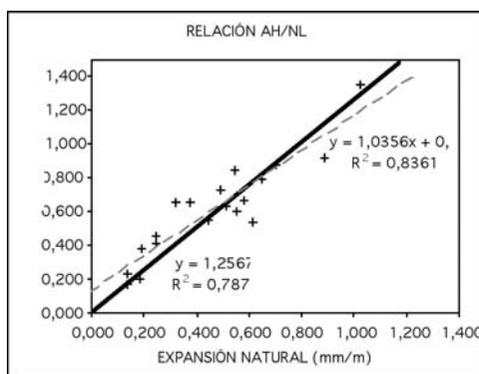
	Expresión I	(R ²)	Expresión II ⁽¹⁾	(R ²)
Relación AH/NE	$AH = 0,9288 \cdot EN + 0,0009$	(0,9166)	$AH = 0,9300 \cdot EN$	(0,9166)
Relación AH/NL	$AH = 1,0356 \cdot EN + 0,1310$	(0,8361)	$AH = 1,2567 \cdot EN$	(0,7876)
Relación AH/NH	$AH = 0,5760 \cdot EN + 0,1270$	(0,8659)	$AH = 0,6936 \cdot EN$	(0,8197)

(1) En el ajuste se impone la condición de que la recta pasa por el origen

- siendo AH Expansión acelerada en agua hirviendo (24 horas)
- NE Expansión natural del material expuesto a la intemperie (T: variable, HR variable)
- NL Expansión natural del material conservado en laboratorio (T: ~20°C, HR ~60%)
- NH Expansión natural del material en saturación de humedad (T: ~20°C, HR 100%)



R^2 Coeficiente de regresión del ajuste



- Observando R^2 puede apreciarse que **la mejor relación se establece entre los valores AH y NE**; puede apreciarse que existe una **proporcionalidad directa**. La expansión natural que se produce en condiciones expuestas puede considerarse como una condición promedio, a la vista de ambos cuadros.
- Desde un punto de vista práctico, los valores que toma la **expansión natural en función de las condiciones medioambientales** en que permanece el material pueden acotarse como sigue desde un punto de vista práctico:

Condiciones de **saturación de humedad** (condición pésima)

$$\mathbf{NH = AH / 0,69}$$

Condiciones **expuestas** (o de exterior)

$$\mathbf{NE = AH / 0,93}$$

Condiciones de **laboratorio** (o de interior)

$$\mathbf{NL = AH / 1,26}$$

4 Estudio de la expansión por humedad en muros

4.1 Sobre el procedimiento de ensayo en piezas de muro y la influencia de factores externos en la medida

A partir de los ensayos en muros puede establecerse una **relación entre la expansión que se encuentra en las probetas** (de forma natural o acelerada) **y en el material compuesto** por ladrillos y mortero. Desde la segunda mitad de la década de los años 60 se ha intentado conseguir dicho parámetro reológico a partir de experimentación con muretes de distintos tamaños, con protocolos de medida y condiciones medioambientales diversas, tal y como se ha recogido en la literatura sobre expansión. El número de experiencias realizadas ha sido comparable a la diversidad de resultados obtenidos, y sigue existiendo una incertidumbre entre la relación que debe establecerse entre la EPH de ladrillos y muros.

Para garantizar la fiabilidad de los resultados en esta fase del ensayo se ha dedicado un esfuerzo considerable a estudiar las condiciones de experimentación. Cabe hacer las siguientes afirmaciones:

- Se asume que la expansión horizontal de un muro (nos referiremos a la que es paralela a tendeles), depende fundamentalmente de la expansión de las piezas cerámicas. En la expansión vertical influye de una manera muy significativa el espesor de los tendeles y el comportamiento del mortero. Por lo tanto y desde un punto de vista experimental es correcto **estudiar la expansión horizontal**, que es además un parámetro relacionado más comúnmente con movimientos en fachadas y dimensionado de juntas.
- Debe mantenerse una **homogeneidad en las condiciones y el procedimiento de medida de ladrillos y muros**. Es desaconsejable utilizar muros excesivamente largos y debe existir una correspondencia entre la precisión en la medida de muros y probetas y sus longitudes correspondientes.
- Debe **evitarse** la influencia de la **coacción** que pueden ejercer otros elementos, como la debida al rozamiento del suelo con el muro o la unión de éste a otros muros; la del **soleamiento**, que puede introducir distorsiones en la planeidad del muro cuando su longitud es grande; la debida a la **dilatación de tipo térmico**, para lo cual se han mantenido los muretes en interior; la de cualquier otra influencia que pudiera producir la **aparición de fisuras** entre los puntos de medida, tanto en el murete-probeta como en las soleras de apoyo. Por ello se ha optado por muretes de 5 hiladas, no adheridos al suelo ni enjarjados con otros, en los que se ha fijado uno de sus extremos y permitido su libre movimiento por el otro. Se han instalado muros y medidores sobre una solera de hormigón ejecutada hace décadas y de la que no se esperan movimientos.

Ajustes de las relaciones entre expansión acelerada en agua hirviendo (AH) y expansión natural en las tres condiciones de estudio consideradas: en condiciones de exposición a la intemperie (NE), de laboratorio (NL) y de saturación de humedad (NH)

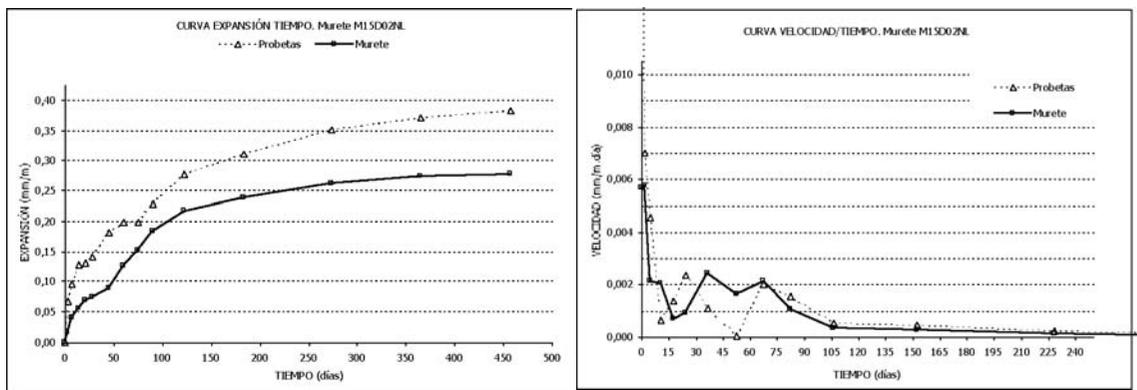


Muretes utilizados en el ensayo. Aspecto del murete de 5 hiladas, punto de medida en el murete de 8 hiladas y detalle de la posición del medidor en el murete de 5 hiladas.

4.2 Sobre la forma de crecimiento. Curvas expansión-tiempo y velocidad-tiempo

De los datos obtenidos en los ensayos con muretes-probeta se obtienen las siguientes conclusiones:

- El comportamiento más errático de los muros se produce en los primeros días después de su construcción. Es el momento en que el ladrillo está en contacto constante con la humedad del mortero, cuando se produce la adherencia entre ambos y la retracción más importante de los morteros. En esta fase de la campaña es cuando se ha apreciado una menor constancia en los valores encontrados.
- Los muretes experimentan un **crecimiento mayor en los primeros días del ensayo**, y una **tendencia a ralentizar su crecimiento posterior**. En todos los casos, se aprecia que los mayores crecimientos se dan en los primeros 15 días después de su fabricación.
- La **forma de crecimiento de muretes y cerámicas es similar**. Existe una **proporcionalidad entre los valores de expansión en muretes (EN_m) y probetas (EN_p)**. Se aprecia mejor en valores que están por encima de los 100 días.
- En general, **los valores de velocidad de expansión en muretes (VE_m) son menores que los encontrados en probetas (VE_p)**. Por lo tanto, **también lo son las expansiones acumuladas**. En los primeros 50 días se acusa más claramente este efecto, siendo especialmente relevante en los 10 primeros días de la construcción de la fábrica, momento en que se aprecian los mayores valores de VE_m y VE_p.



Curvas expansión-tiempo y velocidad-tiempo, en muretes probeta y en probetas de acompañamiento

4.3 Sobre la correlación que se establece entre expansión en probetas cerámicas y en muros

Puede observarse que los valores de la relación entre EN_m y EN_p son similares para valores superiores a 183 días, donde se aprecia que existe una homogeneidad en el comportamiento de los muros. Puede concluirse que:

- Los valores de la **relación EN_m/EN_p** son similares en todos los casos.
- Se propone una **relación sencilla y útil para estimar la expansión en muros a partir de la que tiene el material cerámico**:

$$EN_m/EN_p = 0,76$$

MURETES-PROBETA	RELACIÓN	INTERVALOS DE TIEMPO								
		7 días	28 días	60 días	90 días	122 días	183 días	274 días	365 días	
V. medios	EN _p /AH	0,105	0,138	0,188	0,217	0,258	0,323	0,363	0,379	
	EN _m /AH	0,069	0,102	0,145	0,178	0,206	0,253	0,275	0,281	
	EN_m/EN_p	0,747	0,736	0,767	0,845	0,843	0,790	0,758	0,741	

Relaciones entre expansión natural en muros y expansión en agua hirviendo (EN_m/AH), expansión natural en probetas y expansión en agua hirviendo (EN_p/AH), y expansión natural en muros y probetas (EN_m/EN_p)

- A la vista de los resultados encontrados durante el primer año de ensayo, puede asumirse que esta relación se mantendrá en torno a estos valores para tiempos de ensayo mayores, o al menos, no aumentará. Se aprecia una pequeña tendencia a la baja, de forma que el último valor tomado nos daría una relación fiable que, en todo caso, estaría del lado de la seguridad.

5 Interpretación del fenómeno y la eficiencia de la normativa

En el capítulo 1 se ha recogido la evolución que la normativa española ha tenido en los últimos 25 años. Además de los que se encuentran en dicho capítulo, la experiencia acumulada en este trabajo permite hacer los siguientes comentarios adicionales:

- Se ha visto que **los datos que se han obtenido por aplicación de las normas del 77 y el 86 no permiten una adecuada interpretación del fenómeno. Tampoco deberían utilizarse en cualquier tipo de peritación o evaluación de un material que haya manifestado patologías**, aunque la fecha de su fabricación esté en el periodo de vigencia de la norma.
- Las normas de expansión contienen el procedimiento operatorio necesario para obtener unos datos que, en ciertos casos, se comparan con valores limitativos de otras normas. Este proceso, que es adecuado para hacer un control del producto, **no sirve para acotar el valor de la expansión** en distintos momentos de la vida de la cerámica.
- Para acotar la evolución de la expansión en una cerámica, se propone este sencillo **protocolo**:

1º. **Obtener una estimación de la expansión que se consigue a 4 años de forma natural, mediante ensayo acelerado.**

El valor de expansión por humedad convencional (AH) que se obtiene de la norma UNE 67036:1999 puede relacionarse con la expansión natural a los 4 años (EN_{1460}) mediante la relación recogida en este trabajo

$$EN_{4años} = AH / 0,92$$

Si las piezas cerámicas van a permanecer en **ambientes saturados de humedad**, debe aumentarse dicho valor en un 34%, pudiéndose utilizar la relación **$EN_{4años} = AH / 0,69$** . Éste supone un límite superior, que debe utilizarse cuando las condiciones sean muy desfavorables desde el punto de vista higrométrico.

Si las piezas cerámicas van a permanecer **en interior**, este valor puede disminuir un 35% pudiéndose utilizar la relación **$EN_{4años} = AH / 1,26$** .

2º. El **crecimiento residual medio** a partir de ese momento puede **estimarse en un 10% del valor encontrado en el punto anterior**. Este valor **puede elevarse hasta un 20%** si existen antecedentes de que la cerámica estabiliza lentamente.

3º. Este valor **puede aplicarse a piezas cerámicas simples**, como bovedillas o ladrillos.

4º. Si quiere obtenerse el crecimiento de una **pieza compuesta de tipo muro**, el valor encontrado en los puntos anteriores debe **corregirse mediante la relación propuesta** en este trabajo.

$$EN_m = 0,76 \cdot EN_p$$

Puede completarse el estudio del material con los siguientes ensayos:

5º. **Ensayo de expansión natural a 45 días**, obteniendo valores de expansión y de velocidad de expansión. El valor de T1, conclusión de la primera fase de crecimiento, y el valor de la velocidad de crecimiento en la primera semana son datos de interés para fabricantes y direcciones facultativas. Dichos valores pueden ser comparados con los obtenidos en este trabajo.

6º. **Ensayos de desecado a 60°C durante 15 días**. Las cerámicas que acusan retracciones rápidas suelen también hidratarse con mayor facilidad; estabilizan su crecimiento más rápidamente y el valor residual de su expansión después de 4 años es bajo. Este dato puede ayudar a proponer un valor en el punto 2º de este protocolo.

7º. **Ensayos de expansión natural a 4 meses** para la determinación de T2, **y a 4 años**, para la determinación más precisa del decaimiento del valor de la velocidad de expansión y del valor residual de la misma. Dicho valor puede estimarse a partir de los datos de expansión obtenidos a 2,8 y 4 años de edad. Estos ensayos no tendrían tanto un interés práctico como científico, debido a su excesiva duración.

6 Consideración del fenómeno de la expansión por humedad en obra

Desde los años 80 han aparecido de forma recurrente daños relacionadas con la expansión, que han alertado a técnicos y direcciones facultativas debido a la espectacularidad de los daños. El hecho de que el comportamiento de las distintas cerámicas sea variable, de que el valor que toma la EPH en cada caso sea muy diferente y difícil de determinar con el marco normativo al uso y de que aparezca unos meses o años después de etapas de gran actividad industrial en el sector, ha causado que se asocie a este fenómeno con algo que es intrínsecamente patológico.

Sin embargo se trata de un **movimiento que se produce de forma natural** en el material al igual que ocurre con la retracción que experimenta el hormigón, fenómeno que se conoce e identifica fácilmente en obra y para el que existen una serie de recomendaciones conocidas por técnicos y operarios, que se aplican sistemáticamente. Posiblemente, el número de patologías que hemos detectado y que están relacionadas directamente con la EPH hubiera sido considerablemente menor si, además de cuantificar su magnitud, se hubieran tenido en cuenta algunas **consideraciones elementales**:

1°. Como se ha visto en este trabajo, el material presenta la mayor velocidad de expansión durante los primeros días, cuyo valor aumenta si el ambiente es húmedo. A medida que se favorece este crecimiento, la expansión potencial en el momento de la colocación es menor. Por lo tanto, **debe posponerse la colocación del material** hasta que hayan pasado varios días después de su cocción. Es aconsejable que entre la fecha de salida del horno y la colocación transcurra un tiempo tal que se produzca una desaceleración suficiente en la velocidad de crecimiento. Esto es especialmente recomendable en el caso de las bovedillas.

2°. En este trabajo se ha estimado que la duración media del periodo en que se producen las mayores aceleraciones está entre 10,5 y 44 días, según sea el material considerado. Por lo tanto, es recomendable por parte del fabricante hacer **ensayos de expansión natural a 45 ó 60 días** para tener un mejor conocimiento del comportamiento de sus productos durante el almacenamiento.

3°. **Debe propiciarse la humectación del material**, y dar tiempo a éste para que produzca. Desde un punto de vista práctico, este se consigue evitando un empaquetado total, no impidiendo la humectación natural en los acopios, quitando los plásticos de embalaje, o mojando el material con suficiente antelación antes de su colocación, especialmente en verano y en épocas de gran actividad en la construcción.

4°. **Conociendo la fecha de fabricación** (es decir, la de salida del horno), un técnico de obra puede tomar decisiones sobre el tiempo que el material debe permanecer acopiado. En épocas en las que la actividad de la construcción es grande, este dato puede ser muy indicativo.

5°. Deben **conocerse los resultados de los ensayos de expansión**, tanto de la convencional como de la potencial. A partir de estos datos pueden estimarse las expansiones de muros o bovedillas.

6°. Deben utilizarse las conclusiones contenidas en este trabajo para **establecer las relaciones entre datos de expansión acelerada, expansión natural y expansión en materiales compuestos de tipo muro**.

7°. Los materiales que se colocan con **juntas de mortero**, como los ladrillos, pueden tener una **cierta capacidad de acomodación** en su movimiento que no tienen otros materiales, como las bovedillas. En muros se recomienda **utilizar morteros bastardos** con adiciones de hidróxido de cal, que resultan más flexibles que los morteros de cemento. Debe tenerse en cuenta también que los morteros menos ricos en cemento son más deformables.

8°. Debe considerarse la posible influencia de la EPH en muros y cuantificarla, a efectos de **dimensionar adecuadamente la distancia entre juntas de movimiento**. La distancia entre juntas es, con frecuencia, excesiva (aspecto que ha sido propiciado por las normas MV-201/72 y FL-90), y el espesor de éstas escaso. Debe tenerse en cuenta que, a diferencia de la dilatación térmica, **la EPH causa movimientos fundamentalmente irreversibles**.

9°. Las **piezas de formatos grandes** son **más sensibles a la aparición de patologías**, ya que sus crecimientos netos son mayores. Es especialmente recomendable extremar los cuidados en el caso de bovedillas para forjados.

10°. Debe **extremarse el cuidado en el diseño** de esquinas, huecos, retranqueos, nichos, elementos separados por membranas impermeabilizantes y fábricas situadas entre elementos de mayor rigidez, donde más frecuentemente aparecen patologías relacionadas con movimientos del material.