

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de  
Ingeniería Civil**



**Materiales puzolánicos para uso en conglomerantes especiales  
basados en yeso**

**Tesis Doctoral presentada por:  
D. Walter Leopoldo Roldán Latorre**

**Dirigida por:  
Pr.Dr.D. José María Monzó Balbuena  
Pr. Dra.Dña. María Victoria Borrachero Rosado**

**Valencia (España), Febrero de 2011**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
**Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de**  
**Ingeniería Civil**

**Tesis Doctoral**

**Materiales puzolánicos para uso en conglomerantes**  
**especiales basados en yeso**

Presentada por: D. Walter Leopoldo Roldán Latorre

Para la obtención del

**Grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Valencia**

Dirigida por: Pr.Dr.D. José María Monzó Balbuena

Pr. Dra.Dña. María Victoria Borrachero Rosado

Tribunal Calificador:

Presidente: Dr.

Secretario: Dr.

Vocales: Dr.

Dr.

Dr.

Calificación:

Valencia (España), Febrero de 2011



## DEDICATORIAS

- *A Alicia mi esposa, dedico este trabajo, porque también es fruto de su esfuerzo. Me ha acompañado y ha estado conmigo en todo lugar, siempre. Con su salud resentida, las circunstancias de la vida nos puso a prueba; sin embargo, con la gracia de Dios, juntos nuevamente emprendimos este desafío, lo que es un acto de abnegación inspirado por la vehemencia del amor.*
- *A mis cuatro hijas, un legado: Daniela, Natalia, Francisca y Camila. Porque hace años otros me indicaron un camino y es deseo que aprendan de la vida. Porque nada es fácil, pero con esfuerzo, todo es posible. No dejen nunca de estudiar, porque siempre hay mucho que aprender...más, si desean saber cuanto tiempo se requiere, pues, toda una vida y me temo que aún no será suficiente. La senda está marcada, los que vienen de atrás, la deben continuar. Hacerlo, también les hará feliz.*
- *A mi nieto Benjamín, porque representa la continuidad de la vida. Porque también fue parte de este esfuerzo de familia y así le tocó nacer en España. Por ello simbolizo hoy en él a todos los nietos(as) que en el futuro integrarán el “Clan Familiar”. Sus Padres, les mostrarán el camino adecuado.*
- *A mi hermana Gaby, que fue un permanente apoyo durante mi formación profesional. Quien como buena hermana mayor, ha suplido adecuadamente el rol aglutinante de nuestra Madre, velando por nuestro bienestar. Gracias por ser como eres, gracias por ser mi hermana. Esta conclusión también es tu resultado.*
- *También, a mis otros hermanos, Winston y Williams. Les dedico este trabajo, porque antes que nada quiero decirles que los quiero. Hermanos, con este testimonio, doy por finalizado un trabajo breve, pero que emprendo otro más extenso, que es aplicar lo que aquí se me ha enseñado. Les digo que en este esfuerzo solo he aplicado el legado de nuestros Padres, y si de ellos alguna virtud sostengo, también ustedes la poseen, por lo que las vicisitudes de la vida nos deben predisponer a enfrentarlas, a disfrutarlas o superarlas, según lo sea, sin claudicar ni renunciar.*

(continúa)

## DEDICATORIAS (continuación)

- *A Pedro Roldán Vargas (Q.E.P.D.), mi abuelo paterno, a quien lo recuerdo muy trabajador y pujante en su fábrica de molduras y planchas de yeso. Por alguna ignota razón, el destino me llevó a investigar las mezclas con yeso, continuando su senda, para aportar con un granito de arena al nuevo conocimiento de este noble material constructivo. Espero que las mejoras que se aventuran en el presente estudio, beneficien a los que necesitan con urgencia una vivienda digna, a menor coste; es decir, los pobres.*
- *A mi hermano Washington (Q.E.P.D.), protector de nuestras inseguridades. En su pronta partida, por estar lejos, no lo pude asistir y no alcance a decirle que le estimaba, que le quería como se quiere a un hermano. Aunque ya no estés, te dedico este esfuerzo.*
- *A Aída mi Madre (Q.E.P.D.), quién con su abnegación me forjó el espíritu de superación; con mucha inteligencia nos indicó los caminos de la vida. También a Oscar, mi Padre (Q.E.P.D.), que contribuyó a mi formación como una fuente inagotable de sabiduría; al crecer y pretender mirarlo a su altura, descubrí que no era infalible, pero cuando la vida me dio el privilegio de ser Padre, le descubrí y descubrí la pequeñez en que aún me encontraba. Por eso, a mi Madre y a mi Padre dedico también este trabajo, porque este resultado, desde antes de su inicio, es fruto de sus esfuerzos.*

## AGRADECIMIENTOS

- *A la Universidad Católica del Norte, Chile, donde ejerzo la labor académica, por permitir completar mi formación investigativa, lo que era un deseo personal muy anhelado.*
- *Al Proyecto “Mecesup UCN-0205” (Mejoramiento de la Calidad de la Educación Superior del Ministerio de Educación-Chile) por impulsar semejante iniciativa y proveer recursos para realizar mejoras en el proceso de enseñanza-aprendizaje de nuestra Carrera, según el proyecto elaborado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Católica del Norte.*
- *A mis directores de la investigación, a M. V. Borrachero Rosado y a J. M. Monzó Balbuena; por su acertada orientación, por su entusiasmo, por su dedicación, por su paciencia y por su comprensión...por el enorme trabajo que han desarrollado leyendo y corrigiendo minuciosamente el presente trabajo escrito. No puedo dejar de mencionar al profesor J. Payá Bernabeu, quien ha adicionado sus correspondientes indicaciones y recomendaciones en el desarrollo de la investigación.*
- *A todos los compañeros integrantes del Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción: a Lourdes Soriano, a Luis Felipe Lalinde, a Mauro Tashima, a Erich Rodríguez, a Jesús Eiras, a Gonzalo Marmol y a David Ariño. Gracias a vosotros, por compartir conocimientos y así hacer más fácil lo que no es; por vuestra presencia, recomendaciones y por acompañarme. A todos los que han colaborado en este esfuerzo y que no he nombrado, mis disculpas por ello.*
- *A mí amada esposa y a mis hijas, que son fuente de inspiración en la lucha diaria por la vida. Gracias por seguirme y perseverar conmigo.*

**A todos...¡¡Muchas Gracias!!**



---

**RESUMEN - RESUM - SUMMARY**

---



## RESUMEN DE LA TESIS

El cemento portland y el yeso son conglomerantes que de forma separada, son muy utilizados en la construcción. El cemento portland en estado endurecido presenta buena resistencia y durabilidad en ambiente húmedo, pero tiene un fraguado lento, y es caro. En cambio el yeso, tiene la ventaja de ser más barato y tiene un fraguado rápido; sin embargo su uso está limitado por su baja resistencia mecánica y por su sensibilidad a los ambientes húmedos.

Se conoce ampliamente que las mezclas de combinación “cemento/yeso” son incompatibles, ya que en ambientes húmedos producen la formación de etringita y otros compuestos, que causan una disminución drástica de resistencia y expansiones excesivas que lo destruyen. Sin embargo, algunos autores han comprobado que la adición de materiales puzolánicos mejora dicha incompatibilidad.

En este trabajo se estudian las propiedades mecánicas y de durabilidad de mezclas “cemento /yeso” con adición de puzolanas, como la “ceniza volante” de la clase F y se comparan resultados con mezclas que contienen “filler calizo” como adición no puzolánica.

Se desarrolla un amplio programa experimental de laboratorio, en donde se ensayan diferentes morteros de conglomerantes con combinaciones del tipo “cemento/yeso/puzolana” a fin de compatibilizar la necesidad de una buena resistencia mecánica con un bajo nivel de expansión volumétrica.

Los resultados son variados y los sistemas ternarios “cemento/yeso/ceniza volante”, con bajo contenido en “cemento portland”, presentan características mecánicas y de durabilidad muy notables. Se pone de manifiesto en estos sistemas, el efecto beneficioso de una puzolana como la “ceniza volante”. A la luz de los resultados, se generan expectativas interesantes al reemplazar un porcentaje importante del “cemento portland” por “ceniza volante” y favorecer la compatibilidad entre el yeso y el cemento, lo que lo hace más económico y presenta ventajas que bien puede extender su uso, principalmente a otras aplicaciones constructivas por ser en muchas regiones, más asequible y de bajo coste.

Se comprueba que la adición de “ceniza volante”, en adecuada proporción, favorece la compatibilidad entre el yeso y el cemento y aporta una ganancia de resistencia, más aún con un ahorro considerable de cemento, reafirmando así el aporte puzolánico en las mejoras de las condiciones de durabilidad.

Los resultados sugieren una posible utilización de estos morteros en aplicaciones constructivas, sobre todo en viviendas sociales o protegidas por cuanto, al reemplazar una buena parte del “cemento portland” por “ceniza volante”, hay una considerable reducción de coste.



## RESUM DE LA TESI

El ciment pòrtland i l'algeps són conglomerants que de forma separada, són molt utilitzats en la construcció. El ciment pòrtland en estat endurit presenta bona resistència i durabilitat en ambient humit, però té un forjat lent, i és car. En canvi l'algeps, té l'avantatge de ser més barat i té un forjat ràpid; no obstant el seu ús està limitat per la seua baixa resistència mecànica i per la seua sensibilitat als ambients humits.

Es coneix àmpliament que les barreges de combinació "ciment/algeps" són incompatibles, ja que en ambients humits produïxen la formació d'etringita i altres compostos, que causen una disminució dràstica de resistència i expansions excessives que el destrüïxen. No obstant, alguns autors han comprovat que l'addició de materials puzolànics millora la dita incompatibilitat.

En aquest treball s'estudien les propietats mecàniques i de durabilitat de barreges "ciment/algeps" amb addició de putzolanes, com la "cendra volant" de la classe F i es comparen resultats amb barreges que contenen "filler calcari" com a addició no puzolànica.

Es desenvolupa un ampli programa experimental de laboratori, on s'assagen diferents morters de conglomerants amb combinacions del tipus "ciment/algeps/putzolana" a fi de compatibilitzar la necessitat una bona resistència mecànica amb un baix nivell d'expansió volumètrica.

Els resultats són variats i els sistemes ternaris "ciment/algeps/cendra volant", amb baix contingut en "ciment pòrtland", presenten característiques mecàniques i de durabilitat molt notables. Es posa de manifest en aquests sistemes, l'efecte beneficiós d'una putzolana com la "cendra volant". A la llum dels resultats, es generen expectatives interessants en reemplaçar un percentatge important del "ciment pòrtland" per "cendra volant" i afavorir la compatibilitat entre l'algeps i el ciment, la qual cosa el fa més econòmic i presenta avantatges que bé pot estendre el seu ús, principalment a altres aplicacions constructives per ser en moltes regions, més assequible i de baix cost.

Es comprova que l'addició de "cendra volant", en adequada proporció, afavorix la compatibilitat entre l'algeps i el ciment i aporta un guany de resistència, més encara amb un estalvi considerable de ciment, reafirmant així l'aport puzolànic en les millores de les condicions de durabilitat.

Els resultats suggerixen una possible utilització d'aquests morters en aplicacions constructives, sobretot en vivendes socials o protegides per quant, en reemplaçar una bona part del "ciment pòrtland" per "cendra volant", hi ha una considerable reducció de cost.



## SUMMARY

Portland cement and gypsum are binder materials that in a separate way are widely used in construction. Once hardened, Portland cement has good strength and durability properties in wet environments; however it is expensive and has a slow setting process. On the other hand, the gypsum has the advantage of being cheaper and having a faster setting, however its use is limited due to its low mechanical strength and its sensibility to wet environments.

The incompatibility of the combination of “cement/gypsum” in mixtures is widely known. In wet environment, they form “ettringite” and other compounds that cause a drastic decrease in the mechanical strength and excessive expansions that destroy them. However, some authors has proved that the addition of pozzolanic materials improve such incompatibility.

In this research, the mechanical properties and durability of mixtures “cement/gypsum”, with the addition of pozzolans such as type F fly ash, are studied. To investigate the pozzolan action, the results are compared with mixes containing a non-pozzolanic material know as “limestone filler”.

A complete laboratory experimental program was developed, where mortars binders based on different combinations of “cement/gypsum/pozzolan” were tested. The goal was to obtain a good mechanical strength in combination with a low level of volumetric expansion.

The results show that the ternary systems “cement/gypsum/fly ash”, with low Portland cement content, presented remarkable mechanical characteristics and durability. It was noted in these systems the beneficial effect produced by the fly ash acting as a pozzolan. Based on the results, new and interesting applications arise considering the fact that an important percentage of cement can be replaced by fly ash, with an important improvement in the compatibility between cement and gypsum also. All this make the final product less expensive, widening the range of applications considering that in many regions, the fly ash and the gypsum are more accessible and cheaper.

It was demonstrated that the addition of an adequate proportion of fly ash not only has a favorable effect in the compatibility between gypsum and the cement but also contribute to the increase in the final strength. Considering also the saving related to the replacement of the cement, the beneficial effect of the pozzolanic material in the durability is confirmed.

The results of this research suggest a possible utilization of these mortars in construction applications, particularly in low income houses where a reduction in the amount of Portland cement due to the use of fly ash would produce a considerable reduction in the final cost.



---

## ÍNDICE

---



# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1	<b>El uso del yeso como adición al cemento. Planteamiento del Problema .....</b>	<b>1</b>
1.2	<b>Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1	<b>Adiciones minerales al hormigón de cemento .....</b>	<b>5</b>
2.2	<b>Materiales puzolánicos .....</b>	<b>6</b>
2.3	<b>Beneficios del uso de adiciones Puzolánicas en mezclas con Cemento .....</b>	<b>8</b>
2.4	<b>Ceniza Volante (CV) .....</b>	<b>8</b>
2.4.1	<i>Naturaleza y producción .....</i>	<b>8</b>
2.4.2	<i>Propiedades de la CV .....</i>	<b>9</b>
2.4.2.1	<i>Propiedades Físicas .....</i>	<b>9</b>
2.4.2.2	<i>Propiedades químicas y mineralógicas de la CV ....</i>	<b>10</b>
2.4.2.3	<i>Reactividad Puzolánica de la CV .....</i>	<b>10</b>
2.4.2.4	<i>Efectos de la CV en el Hormigón .....</i>	<b>11</b>
2.5	<b>Filler Calizo como adición en mezclas de mortero .....</b>	<b>11</b>
2.6	<b>El Yeso .....</b>	<b>11</b>
2.6.1	<i>Antecedentes del Yeso .....</i>	<b>11</b>
2.6.2	<i>Hidratación, fraguado y endurecimiento de mezclas de yeso</i>	<b>12</b>

2.7	El cemento Portland .....	13
2.8	El cemento portland blanco .....	15
2.9	Efectos de la presencia de sulfato en hormigones de cemento .....	15
2.10	Utilización de yesos de desecho proveniente de un proceso químico, como conglomerante .....	18
2.11	Propiedades físicas y mecánicas de mezclas de yeso-cemento portland-puzolana natural .....	23
2.12	Mejoras de las propiedades de las mezclas “yeso-cemento” por uso de Humo de Sílice .....	28
2.13	Los conglomerantes cementicios ante las ingentes necesidades de edificación .....	40
	2.13.1 <i>Condiciones iniciales</i> .....	40
	2.13.2 <i>Cuantificación del déficit universal de viviendas</i> .....	41
	2.13.3 <i>La tugurización de la población</i> .....	41
	2.13.4 <i>“Bajo coste” y “vivienda mínima”</i> .....	42
	2.13.5 <i>El consumo de cemento y la importancia del sector 'informal'</i> .....	45
	2.13.6 <i>A modo de conclusiones</i> .....	48
3.	<b>DESARROLLO DEL PLAN EXPERIMENTAL</b> .....	49
3.1	<b>Materiales Empleados</b> .....	49
	3.1.1 <i>Cemento</i> .....	49
	3.1.2 <i>Filler Calizo</i> .....	50
	3.1.3 <i>Yeso y Escayola</i> .....	50
	3.1.4 <i>Ceniza Volante</i> .....	51
	3.1.5 <i>Árido fino</i> .....	52
	3.1.6 <i>Agua</i> .....	52
	3.1.7 <i>Aditivo</i> .....	53
	3.1.8 <i>Catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC)</i> .....	53
3.2	<b>Equipos y procedimientos utilizados</b> .....	54
	3.2.1 <i>Proceso de amasado</i> .....	54
	3.2.2 <i>Moldes de probetas</i> .....	55

3.2.3	<i>Mesa compactadora</i> .....	56
3.2.4	<i>Equipos para ensayos de rotura a Compresión y Flexotracción</i> .....	56
3.2.5	<i>Molienda de materiales base</i> .....	57
3.2.6	<i>Cámara Húmeda</i> .....	57
3.2.7	<i>Microscopía electrónica de barrido (SEM)</i> .....	57
3.2.8	<i>Analizador de humedad por halógenos (BH)</i> .....	58
3.2.9	<i>Análisis Termogravimétrico (TG)</i> .....	62
3.2.10	<i>Comparador de longitudes</i> .....	68
3.3	<b>Procedimientos de laboratorio</b> .....	68
3.3.1	<i>Preparación de mezclas y probetas de mortero “Cemento-Yeso(Escayola)-Puzolana”</i> .....	68
3.3.2	<i>Curado de probetas de Cemento-Yeso(Escayola)-Puzolana. Ensayos de resistencia</i> .....	70
3.3.3	<i>Curado de probetas de Cemento-Yeso(Escayola)-Puzolana. Ensayos de expansión</i> .....	71
3.3.4	<i>Mediciones de tiempos de fraguado en pastas de Escayola</i> .....	72
3.3.5	<i>Mediciones de Expansión-Retracción en probetas de mortero</i> .....	74
4.	<b>PASTAS CON ESCAYOLA. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN</b> .....	77
4.1	<b>Tiempos de “Principio y Fin de Fraguado”</b> .....	77
4.1.1	<i>Resultados experimentales en Pasta Escayola Pura (cemento/escayola = 0/100)</i> .....	77
4.1.2	<i>Resultados experimentales en Pastas “Cemento/Escayola”, sin Ceniza Volante</i> .....	80
4.1.3	<i>Resultados experimentales en Pastas “Cemento/Escayola”, con adición de Ceniza Volante</i> .....	81
4.2	<b>Análisis de resultados. Tiempos de fraguado en pastas de escayola</b> .....	83
4.3	<b>Presencia de hemihidrato y dihidrato en pastas de Escayola. Mediciones efectuadas con analizador por halógenos (BH) y análisis termogravimétrico (TG)</b> .....	85
4.3.1	<i>Mediciones efectuadas a pastas de escayola pura</i> .....	85
4.3.2	<i>Mediciones efectuadas a pastas de escayola con aditivo</i> ....	86

<b>5.</b>	<b>MORTEROS DE DOSIFICACIÓN “CEMENTO PORTLAND BLANCO-ESCAYOLA(YESO)-PUZOLANA”</b> .....	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>Morteros de Cemento Blanco BL II/B-LL 42,5R y Escayola. Adiciones con Ceniza Volante y Filler Calizo</b> .....	<b>89</b>
5.1.1	<i>Morteros Control “Cemento Portland Blanco BL II/B-LL 42,5R / Escayola”</i> .....	90
5.1.2	<i>Morteros “Cemento Portland Blanco BL II/B-LL 42,5R/Escayola/Puzolana = 20/50/30”</i> .....	92
5.1.3	<i>Control de Cemento Portland Blanco BL II/B-LL 42,5R. Comparación de resistencias en morteros según tipo de curado y el uso de aditivo superplastificante</i> .....	93
5.1.4	<i>Análisis de resultados</i> .....	95
<b>5.2</b>	<b>Morteros de Cemento Portland Blanco BL I 52,5R y Yeso. Adiciones con Ceniza Volante y Filler Calizo</b> .....	<b>98</b>
5.2.1	<i>Morteros Control “Cemento Portland Blanco BL I 52,5R / Yeso”</i> .....	99
5.2.2	<i>Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 10/40/50”</i> ...	102
5.2.3	<i>Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 15/40/45”</i> ...	104
5.2.4	<i>Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 20/40/40”</i> ...	105
5.2.5	<i>Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 20/50/30”</i> ...	108
5.2.6	<i>Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 15/50/35”</i> ...	111
5.2.7	<i>Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 10/50/40”</i> ...	113
5.2.8	<i>Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 20/60/20”</i> ...	116
5.2.9	<i>Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 15/60/25”</i> ...	117
5.2.10	<i>Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 10/60/30”</i> ...	119
5.2.11	<i>Otros análisis comparativos de “Rc” entre morteros “cemento (BL I 52,5R)/yeso/puzolana</i> .....	122
5.2.12	<i>Mortero Control “Cemento BL I 52,5R: 100% (Mortero de Cemento)”</i> .....	126
5.2.13	<i>Morteros “cem BL 52,5R/yeso/puzolana”. Análisis de la resistencia a compresión “Rc” según la resistencia a flexotracción “Rf”</i> .....	127
5.2.14	<i>Morteros “cem BL 52,5R/yeso/CV”. Ajuste exponencial de la Resistencia a Compresión “Rc” según relación “Agua/Conglomerante”</i> .....	128
<b>5.3</b>	<b>Definición de “Factor de Carga” como indicador de la actividad puzolánica</b> .....	<b>130</b>

<b>6.</b>	<b>ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL EN PASTAS Y MORTEROS “CEMENTO-YESO-PUZOLANA” .....</b>	<b>135</b>
<b>6.1</b>	<b>Pastas Control .....</b>	<b>136</b>
6.1.1	<i>Análisis de pérdida de agua combinada. Correlación entre resultados experimentales obtenidos en “TG” y “B.H.” .....</i>	<b>137</b>
6.1.2	<i>Análisis de pérdida de agua combinada correspondiente a la deshidratación CH .....</i>	<b>138</b>
6.1.3	<i>Micrografías SEM en Pastas Control .....</i>	<b>140</b>
<b>6.2</b>	<b>Pastas y morteros de relación "cem BL 42.5R/Escayola/Pz = 20/40/40". Análisis de agua combinada y resistencia a compresión</b>	<b>141</b>
6.2.1	<i>Vinculación de resultados experimentales de pérdidas de agua combinada en B.H. y TG, en pastas y morteros “20/40/40” .....</i>	<b>142</b>
6.2.2	<i>Comportamiento de la Resistencia a Compresión y Agua Combinada, con la edad de curado. Morteros “20/40/40” ...</i>	<b>144</b>
6.2.3	<i>Micrografías SEM. Pastas de “Cem BL 42,5R/Escayola/Pz = 20/40/40” .....</i>	<b>146</b>
<b>6.3</b>	<b>Pastas y morteros de relación "cem BL 42.5R/Escayola/Pz = 20/50/30". Análisis de pérdida de agua combinada y resistencia a compresión .....</b>	<b>148</b>
6.3.1	<i>Vinculación de resultados experimentales de pérdidas de agua combinada en B.H. y TG, en pastas y morteros “20/50/30” .....</i>	<b>148</b>
6.3.2	<i>Comportamiento de la Resistencia a Compresión y Agua Combinada, con la edad de curado. Morteros “20/50/30” ...</i>	<b>149</b>
6.3.3	<i>Micrografías SEM. Pastas de “Cem BL 42,5R/Escayola/Pz = 20/50/30” .....</i>	<b>151</b>
<b>6.4</b>	<b>Pastas y morteros de relación "cem BL 42.5R/Escayola/Pz = 30/40/30". Análisis de pérdida de agua combinada y resistencia a compresión .....</b>	<b>156</b>
6.4.1	<i>Vinculación de resultados experimentales de pérdidas de agua combinada en B.H. y TG, en pastas y morteros “30/40/30” .....</i>	<b>156</b>
6.4.2	<i>Comportamiento de la Resistencia a Compresión y Agua Combinada, con la edad de curado. Morteros “30/40/30” ...</i>	<b>157</b>
6.4.3	<i>Micrografías SEM. Pastas de “Cem BL 42,5R/ Escayola/Pz = 30/40/30” .....</i>	<b>158</b>

6.5	<b>Análisis de vinculación resistencia a compresión (Rc) y agua combinada en B.H.</b> .....	159
6.6	<b>Conclusiones generales del análisis Microestructural en Pastas y Morteros “Cemento BL 42,5R/Escayola/Puzolana”</b> .....	162
7.	<b>INFLUENCIA DE ALGUNOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE MORTERO “CEMENTO-YESO-PUZOLANA” EN LA RESISTENCIA MECÁNICA</b> .....	163
7.1	<b>Morteros con Yeso Grueso</b> .....	164
7.2	<b>Morteros con Escayola</b> .....	170
7.3	<b>Mortero de Control del cemento</b> .....	174
8.	<b>BÚSQUEDA DE LA COMPOSICIÓN ÓPTIMA DEL CONGLOMERANTE EN MEZCLAS DE MORTERO “CEMENTO-YESO-PUZOLANA” PARA MEJORAR LA RESISTENCIA MECÁNICA</b> .....	177
8.1	<b>Morteros de Composición 1. “Cemento gris CEM I 52,5R/ Yeso/ Pz = 20/40/40”</b> .....	179
8.2	<b>Morteros de Composición 2. “Cemento gris CEM I 52,5R/ Yeso/ Pz = 20/50/30”</b> .....	182
8.3	<b>Morteros de Composición 3. “Cemento gris CEM I 52,5R/ Yeso/ Pz = 20/60/20”</b> .....	184
8.4	<b>Morteros de Composición 4. “Cemento gris CEM I 52,5R/ Yeso/ Pz = 15/50/35”</b> .....	186
8.5	<b>Morteros de Composición 5. “Cemento gris CEM I 52,5R/Yeso/ Pz = 10/50/40”</b> .....	188
8.6	<b>Mortero de Control del Cemento</b> .....	190
8.7	<b>Determinación del “Conglomerante” óptimo</b> .....	191

<b>9.</b>	<b>EXPANSIÓN DE MORTEROS “CEMENTO BLANCO-YESO-PUZOLANA”</b> .....	<b>195</b>
9.1	Morteros "cemento BL II 42.5R/yeso/Puzolana=20/50/30" .....	197
9.2	Morteros "cemento BL II 42.5R/escayola/Puzolana=20/50/30" .....	201
9.3	Morteros "cemento BL II 42.5R/yeso/Puzolana=20/40/40" .....	204
9.4	Morteros "cemento BL II 42.5R/escayola/Puzolana=20/40/40" ....	206
9.5	Morteros " cemento BL II 42.5R/yeso/Puzolana=30/40/30" .....	209
9.6	Morteros "cemento BL II 42.5R/escayola/Puzolana=30/40/30" ....	211
9.7	Morteros Control "cemento BL II 42.5R/yeso(escayola)=50/50" ...	214
9.8	Morteros Control "cemento BL II 42.5R/yeso(escayola)=60/40" ...	216
9.9	Morteros Control "cemento BL II 42.5R = 100%" .....	219
9.10	Representación conjunta de Morteros "cemento BL II 42.5R/yeso(escayola)/CV". Comparación con morteros control ...	221
<b>10.</b>	<b>EXPANSIÓN DE MORTEROS CON “CEMENTO GRIS-YESO-PUZOLANA”</b> .....	<b>225</b>
10.1	Morteros con cemento Portland gris CEM I 42,5 SR (sulfato resistente) .....	228
10.1.1	Morteros “Cemento Gris CEM I 42,5 SR/Yeso-Escayola/ CV = 20/40/40” .....	228
10.1.2	Morteros “Cemento Gris CEM I 42,5 SR/Yeso-Escayola/ CV(m) = 20/40/40” .....	232
10.1.3	Morteros Control “Cemento Gris CEM I 42,5 SR/Yeso-Escayola = 60/40” .....	237
10.2	Morteros con Cemento Portland Gris tipo CEM I 52,5 R .....	241
10.2.1	Morteros "CEM I 52,5 R/Yeso-Escayola/CV = 20/40/40"...	241
10.2.2	Morteros "CEM I 52,5 R/Yeso-Escayola/CV(m)=20/40/40"	245

10.2.3	Morteros con combinaciones de "Puzolanas Especiales". "CEM I 52,5R/Yeso/CV-CV(m)/FCC(m) = 20/40/30/10" ...	250
10.2.4	Análisis comparativo del efecto de la "CV" frente a la combinación "CV/FCC(m)" .....	255
10.2.5	Morteros Control "CEM I 52,5 R/Yeso-Escayola = 60/40"..	257
10.2.6	Análisis comparativo de morteros con puzolana frente a morteros control, sin puzolana .....	261
10.3	Morteros con Cemento Portland Gris tipo CEM I 52,5R Cemex ...	264
10.3.1	Morteros "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso-Escayola/CV(m) = 20/40/40" .....	265
10.3.2	Morteros Control "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso-Escayola = 60/40" .....	268
10.4	Morteros especiales con Cemento Portland Gris tipo CEM I 52,5 R Cemex .....	272
10.4.1	Morteros especiales "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso/CV = 20/40/40" .....	273
10.4.2	Morteros especiales "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso/CV = 20/50/30" .....	275
10.4.3	Morteros especiales "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso/CV = 20/60/20" .....	276
10.4.4	Morteros especiales "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso/CV = 15/50/35" .....	277
10.4.5	Morteros especiales "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso/CV = 10/50/40" .....	278
10.5	Morteros Especiales "CEM I 52,5 R /Yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10" .....	280
10.6	Morteros de referencia. Yeso 100% y Escayola 100% .....	282
11.	CONCLUSIONES .....	285
	BIBLIOGRAFÍA .....	291
	ANEXO A .....	299
	ANEXO B .....	305

<b>ANEXO C</b> .....	<b>309</b>
<b>ANEXO D</b> .....	<b>315</b>
<b>ANEXO E</b> .....	<b>333</b>



---

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

---



**1. INTRODUCCIÓN****1.1 El uso del yeso como adición al cemento. Planteamiento del Problema**

En la fabricación del cemento Portland, el yeso generalmente en forma de dihidrato, se utiliza como adición al clínker para regular la velocidad de fraguado; sin embargo, se debe tener la precaución de usar yeso en mezclas con cemento, ya que estos materiales no son compatibles y más bien deben usarse separados [1-3].

Además, el yeso no debe utilizarse en los morteros para albañilería, pues en presencia de humedad se disuelve parcialmente produciéndose eflorescencias y fuertes expansiones. La incorporación de yeso en los morteros tradicionales se considera perjudicial ya que ante la presencia de humedad pueden favorecer fenómenos de expansión que afectarán a su durabilidad y disminuirán drásticamente la resistencia mecánica.

Por todas estas razones, el yeso suele utilizarse en construcción en demandas específicas que están relacionadas con aplicaciones más de tipo estético (retapes, enlucidos de muros interiores en zonas secas; cielos interiores, y en general, donde se exija una terminación superficial lisa) y aplicaciones funcionales específicas (retape y nivelación de pisos interiores en zonas sin humedad con algún recubrimiento posterior, paneles prefabricados de yeso no estructurales, y otros).

En el presente estudio se profundiza en la elaboración de morteros especiales “cemento-yeso-puzolana” con el fin de mejorar las prestaciones mecánicas y de durabilidad, frente a la humedad, mejorando así las demandas específicas y aplicaciones funcionales del yeso, para su utilización en la industria de la construcción.

El uso del “Yeso” se justifica por ser un material natural de gran disponibilidad en el mundo, cuyo proceso industrial es más sencillo, menos contaminante y de menor coste que la fabricación de cemento [4]. Ello impulsa a la necesidad de compatibilizar el cemento y yeso en mezclas de mortero, sobre todo en ambientes de gran humedad.

En este sentido, el uso de la “Ceniza Volante (CV)” como adición puzolánica a las mezclas de “cemento-yeso”, permite mejorar los comportamientos mecánicos y de durabilidad y a su vez, ayuda a conservar el medio ambiente, por cuanto la “CV” es un sólido inorgánico residual, que proviene de la combustión del carbón mineral en plantas termoeléctricas de carbón.

El uso de ambos materiales, “yeso” y “ceniza volante” como reemplazo de un porcentaje significativo del cemento, ayudará a consumir menos cemento, reduciendo el coste de la mezcla, el consumo de energía y el impacto que producen las emisiones de gases de efecto invernadero, en la producción industrial del cemento.

## **1.2 Objetivos**

### ***General:***

- Estudiar el comportamiento de morteros de tipo “Cemento Portland-Yeso-Puzolana” con la finalidad de lograr un nuevo material para uso en construcción, con claros beneficios económicos y sociales que se traduzcan en un menor coste, en mejoras en el medio ambiente (reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de la materia prima y dar uso alternativo a un material de desecho industrial) y con buenas propiedades mecánicas y de durabilidad.

### ***Específicos:***

- Ofrecer, fundamentalmente a países en vías de desarrollo, una opción más económica en el uso de materiales constructivos, privilegiando el uso de un material como el yeso, que se encuentra disponible en condiciones naturales en gran parte del mundo.
- Aprovechar la disposición local de materiales de carácter puzolánico, ya sea naturales o artificiales, con la finalidad de reducir el uso de cemento. De paso, reducir costes y ayudar a resolver problemas de polución ambiental, ya sea reduciendo las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera (al reducir la demanda de cemento) y otorgando un uso alternativo a materiales de desecho industrial como lo es la ceniza volante u otros materiales de características puzolánicas.
- Reducir o eliminar la incompatibilidad de mezclas cemento-yeso en presencia de humedad, incorporando una puzolana activa. Para ello se

estudiará la resistencia mecánica y la estabilidad dimensional de éste tipo de mezclas con el tiempo de curado, en distintas proporciones y sometidas a un ambiente húmedo.

- Estudiar la reactividad de pastas de cemento-yeso-puzolana con la edad de curado y establecer los cambios de fase del hemihidrato al dihidrato durante el fraguado.
- Estudiar en pastas de cemento-yeso-puzolana los procesos de fraguado y endurecimiento de las mezclas.



---

## **Capítulo 2. MARCO TEÓRICO**

---



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Adiciones minerales al hormigón de cemento

Para analizar la composición de los morteros de cemento-yeso, es necesario entender previamente la composición tradicional de los hormigones como mezcla de cemento, áridos y agua. Esta constitución tradicional ha dado paso a la introducción de nuevos materiales, de carácter orgánico e inorgánico, que modifican los procesos de mezclado, su puesta en obra, sus prestaciones mecánicas y su durabilidad.

Se puede entender por adición inorgánica, aquel material de origen mineral que se presenta finamente dividido y que al ser añadido al hormigón mejora o confiere alguna propiedad especial deseada [3]. Ciertos materiales pueden ser considerados como adiciones minerales no activas como el filler calizo; pero son aquellas que debido a su acción puzolánica o hidráulica sobre el hormigón, las que realmente se consideran como adiciones activas.

El término puzolana incluye "todos los materiales inorgánicos, tanto naturales como artificiales, capaces de combinarse directamente con la cal, a temperatura ambiente y en presencia de agua, para formar compuestos cementantes similares a los originados en la hidratación de los constituyentes principales del cemento Portland" [5].

El uso de puzolanas en la industria del cemento y del hormigón ha ido cobrando una importancia cada vez mayor en las últimas décadas. Son varios los beneficios conseguidos con el uso de puzolanas, entre ellos se puede destacar la mejora de resistencias mecánicas, el aumento de durabilidad y en muchos casos beneficios económicos y ecológicos [6]. Se considera en el futuro, que un hormigón sin adiciones puzolánicas o materiales puramente cementantes serán una excepción a la regla [7].

En general la adición de un material inorgánico de origen mineral puede general dos efectos (uno de ellos o ambos):

- (a) la actividad química (comúnmente llamada actividad puzolánica) [7]; y
- (b) el efecto físico [5].

La actividad química de un material inorgánico, es la acción generada por el material silíceo o silicoaluminoso que posee, el cual por si solo tiene una baja o nula capacidad cementante, y que al estar finamente dividido, en presencia de humedad, a temperatura ambiente, reacciona químicamente con el hidróxido cálcico “Ca(OH)<sub>2</sub>” o portlandita formado en la reacción de hidratación del cemento, generando compuestos de propiedades cementantes (comúnmente denominada acción puzolánica) [7].

El efecto físico de un material inorgánico se distingue por la confluencia de tres diferentes fenómenos:

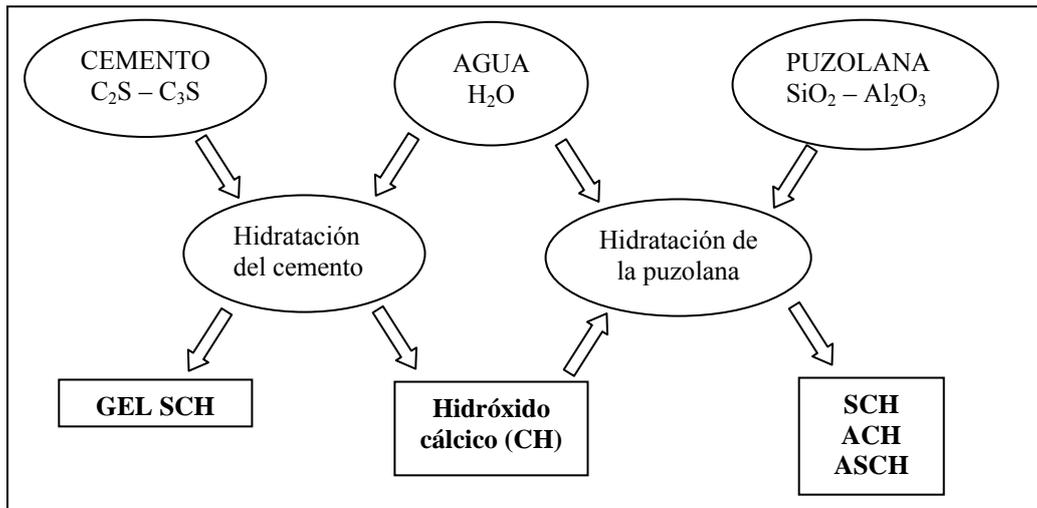
- i) Efecto de dilución del cemento
- ii) Modificación de la distribución de partículas (este y el anterior, como consecuencia directa de la sustitución parcial de cemento por una adición mineral).
- iii) Efecto partícula. Se trata de un efecto de nucleación, donde las partículas de la hidratación del cemento se sitúan sobre las partículas de la adición mineral, permitiendo que el grano de cemento puedan continuar hidratándose y, por tanto, como efecto neto, se produce un aumento en la velocidad de hidratación del cemento [8].

El efecto físico sobresale en aquellas mezclas con adiciones minerales inorgánicas no activas (como el filler calizo) ya que se mejora la trabajabilidad y se reduce la porosidad [5].

Finalmente, en el caso de los morteros y hormigones, la presencia de puzolana también suele afectar la naturaleza de la interfase árido/pasta, produciendo mejoras, en cuanto al tamaño y distribución de la portlandita, así como a la reducción de la porosidad en dichas zonas.

## 2.2 Materiales puzolánicos

Para que un material pueda ser considerado una puzolana, debe cumplir algunas condiciones necesarias [9]. La composición química debe ser rica en óxidos de carácter ácido, tales como el óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y el óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); y que todos ellos tengan carácter parcial o totalmente amorfo.



**Fig. 2-1. Reacción puzolánica y productos de la hidratación**

En la reacción puzolánica se combinan los óxidos ácidos ( $Al_2O_3$  y  $SiO_2$ ) con el hidróxido cálcico, generando hidratos con carácter cementante e hidráulico [9]. De esta manera, se deben tener en cuenta dos reacciones (Fig. 2-1):

- la primera, es la hidratación del cemento, hidratación de los silicatos bicálcico ( $C_2S$ ) y tricálcico ( $C_3S$ ), formando el gel silicato cálcico hidratado ( $C_3S_2H_3$ , comúnmente llamada fase SCH) y el hidróxido cálcico (CH) o portlandita.



- la segunda, es la reacción del hidróxido cálcico (CH) resultante de la hidratación del cemento, con los componentes de la puzolana formando silicatos (SCH), aluminatos (ACH) y sílico-aluminatos cálcicos hidratados (ASCH).



### 2.3 Beneficios del uso de adiciones Puzolánicas en mezclas con Cemento

En la actualidad, son muchos los beneficios que se obtienen por el uso de adiciones puzolánicas minerales provenientes de residuos industriales. Por ejemplo el uso de una tonelada de ceniza volante representa en término medio, la reducción del consumo de cemento en cerca de 0,8 T y la reducción de 3.000 MJ de energía obtenida de combustibles fósiles [10]. Las ventajas de la sustitución de cemento por puzolanas, se pueden clasificar en:

- Ventajas de tipo tecnológico: algunas adiciones puzolánicas permiten obtener materiales, con mejores resistencias y mayor durabilidad.
- Ventajas de tipo económico: las adiciones pueden sustituir parcialmente constituyentes de alto valor económico, especialmente al cemento; además, generalmente las adiciones, por tratarse de subproductos, son materiales baratos.
- Ventajas de tipo ecológica: el uso de las adiciones en cementos y hormigones, además de evitar su depósito en vertederos, preserva el consumo de recursos naturales o materias primas (tanto en la fabricación del clínker, cementos de adición, como en la sustitución de cemento en hormigones), produce ahorro energético y un ahorro en la emisión de gases de efecto invernadero, en particular de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

### 2.4 Ceniza Volante (CV)

#### 2.4.1 Naturaleza y producción

La norma UNE 450-1 [11], define la ceniza volante como “polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión de carbón pulverizado, con o sin materiales de cocombustión, que tienen propiedades puzolánicas y que está compuesto fundamentalmente de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”. Durante este proceso, las partículas inorgánicas del carbón no sufren una combustión completa, produciéndose partículas de ceniza.

Las reacciones que se generan dependen de la temperatura del hogar, del tipo de carbón combustible, de la finura de molido del carbón y del tiempo de permanencia en la zona caliente del hogar. Las cenizas de la combustión del carbón (coal ash) pueden ser de dos tipos:

- las que quedan en la parrilla, llamadas “cenizas de hogar (bottom ash)”.
- las cenizas que escapan del hogar con los gases de combustión, llamadas “cenizas volantes (fly ash o pulverized fly ash)” [9].

Del total, aproximadamente el 80% corresponde a cenizas volantes y 20% a cenizas de hogar. En España, más del 15% de la energía eléctrica se obtiene a partir de la combustión del carbón; debido a esto, el volumen de producción de cenizas es muy elevado y en la actualidad supera los 10 millones de toneladas/año. A su vez en Japón durante el 2004, la producción de ceniza volante fue de 6,4 millones de toneladas y sólo la mitad se reutilizó, proyectando para el año 2010 una producción de 12,8 millones toneladas [10].

**Tabla 2-1. Producción y valorización de las cenizas volantes en España y Europa.**

		1999				2004			
		ESPAÑA(*)		EUROPA (**)		ESPAÑA(*)		EUROPA (**)	
		kt	%	kt	%	kt	%	kt	%
Producidas	Cenizas volantes	6.654	84,3	37.144	85	-	-	43.476	88
	Cenizas hogar	1.236	15,7	5.622	15	-	-	5.840	12
	<b>TOTAL</b>	<b>7.890</b>	<b>100</b>	<b>43.654</b>	<b>100</b>	<b>7.464</b>	<b>100</b>	<b>49.316</b>	<b>100</b>
Valorizadas	Cenizas volantes	-	-	-	-	-	-	22.016	51
	Cenizas hogar	-	-	-	-	-	-	2.295	39
	<b>TOTAL</b>	<b>3.114</b>	<b>39,5</b>	<b>20.669</b>	<b>55,6</b>	<b>4.329</b>	<b>58</b>	<b>24.311</b>	<b>49</b>

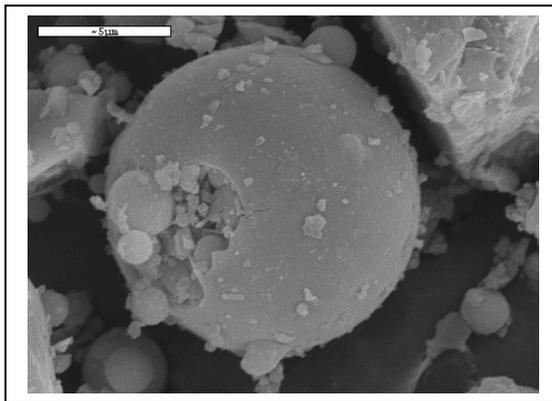
(\*): Información facilitada por UNESA (Asociación Española de la Industria Eléctrica)

(\*\*): Información obtenida en [www.ecoba.com](http://www.ecoba.com) (ECOBA: European Association for use of the By-products of Coal-Fired Power-Stations)

## 2.4.2 Propiedades de la CV

### 2.4.2.1 Propiedades Físicas

La CV se presenta en polvo, a veces formando grumos, es suave al tacto y dependiendo de la proporción de hierro y carbón sin quemar, su coloración adquiere distintas tonalidades grisáceas. Su finura es similar al cemento y oscila entre 0,1 y 150µm, con un diámetro medio entre 15 y 45µm. La densidad aparente es aproximadamente de 0,89 g/cm<sup>3</sup> y el peso específico de las partículas oscila entre 2 y 2,9 g/cm<sup>3</sup>. En general, debido al enfriamiento rápido de las gotas de material fundido, las partículas son de formas esférica o esferoideal (**Fig. 2-2**). Es posible encontrar partículas de carbono inquemado, partículas huecas llamadas cenósferas y pequeñas partículas que se depositan en su interior llamadas plerósferas [9-10].



**Fig. 2-2. Ceniza Volante. Cenósfera conteniendo plerósferas**

#### 2.4.2.2 Propiedades químicas y mineralógicas de la CV

Se pueden distinguir dos clases de CV (**Tabla 2-2**), dependiendo de la composición química del carbón de origen. Clase C, ricas en calcio (calcáreas o sulfa-cálcicas) y Clase F, ricas en silicio (silíceas o sílico-aluminosas).

**Tabla 2-2. Composición química de las cenizas volante [10].**

Compuesto	Cenizas con alto contenido en calcio. Clase C (% en peso)	Cenizas con bajo contenido en calcio. Clase F (% en peso)
SiO <sub>2</sub>	34,1	42,6-59,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,2	21,8-34,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,2	6,3-18,1
CaO	38,0	2,8-7,0
SO <sub>3</sub>	4,2	0,19-1,9
MgO	1,5	1,2-2,6
K <sub>2</sub> O	1,4	0,38-6,0
Na <sub>2</sub> O	0,44	0,15-0,94
Sílice reactiva	30,9	0,94
Cal libre	17,1	inapreciable-0,74
Carbono total	0,34	0,27-3,9

Los minerales que suelen encontrarse en las CV son: mullita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), cuarzo (SiO<sub>2</sub>), magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), hematites (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), wustita (FeO), goethita (FeO-OH), pirita (Fe<sub>2</sub>S), calcita (CaCO<sub>3</sub>), anhidrita (CaSO<sub>4</sub>), periclasa (MgO) y óxido de calcio libre (CaO) [10].

#### 2.4.2.3 Reactividad Puzolánica de la CV

La actividad puzolánica más importante ocurre con las CV de la “clase F”, debido a su elevado carácter vítreo y a su alto contenido en óxidos de silicio y aluminio. Estos compuestos reaccionan con el hidróxido cálcico generando silicatos, aluminatos y alumino-silicatos cálcicos hidratados (ver ecuaciones “**Ec 2-1**”, “**Ec 2-2**” y “**Ec 2-3**”). La reactividad de la CV se observa generalmente a tiempos prolongados, entre los 28 y 90 días de curado.

La reactividad puzolánica se puede medir en una pasta de acuerdo al consumo del hidróxido cálcico, el que se compara con el consumo proporcional de una pasta control con cemento puro, sin puzolana. La superposición de la actividad química con el efecto físico lo observa entre otros Amahjour [12], quien al estudiar la fijación de portlandita para una pasta de cemento con un 20% de CV, determinó que a temprana edad resulta negativa, esto es debido al “efecto partícula” de la CV, que activa la hidratación del cemento, incrementándose la cantidad de hidróxido cálcico liberado, mayor al valor obtenido para la pasta control, sin CV. A temprana edad la reactividad puzolánica es baja, sin embargo no se manifiesta una disminución importante de la resistencia con respecto a la

pasta control, ya que el efecto partícula de la CV, además de acelerar la hidratación del cemento, distribuye mejor los productos que se generan.

#### 2.4.2.4 Efectos de la CV en el Hormigón

El uso de CV como sustitución parcial del cemento genera efectos variados sobre el hormigón, que dependen de la forma y tamaño de las partículas, además del porcentaje de sustitución. Estos efectos pueden representar mejoras sobre los procesos de mezclado, puesta en obra, prestaciones mecánicas y durabilidad; según se indica en el siguiente desglose [10, 12-13].

- Se reduce la cantidad de agua necesaria para obtener una docilidad equivalente a la de un hormigón sin cenizas, produce un aumento de la plasticidad y una mayor cohesión.
- Permite una reducción en la cantidad de cemento.
- Genera un aumento en los tiempos iniciales y finales de fraguado; se debe aclarar que esta condición puede ser un inconveniente cuando se requiera rapidez en el endurecimiento de la mezcla.
- Disminuye el calor de hidratación.
- Reduce la fisuración superficial.
- Disminuye la segregación de los áridos, disminuyendo la exudación.
- Se produce una disminución de las resistencias iniciales, pero se igualan o superan a edades posteriores.
- Aumenta la resistencia al ataque de sulfatos.

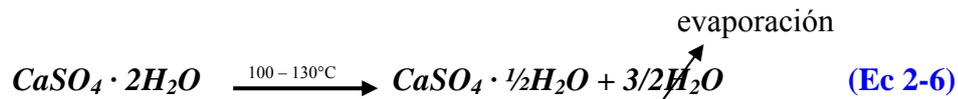
## 2.5 Filler Calizo como adición en mezclas de mortero

El filler calizo es un material mineral, de origen natural, fabricado por molienda a partir de rocas calizas con una composición mayoritaria en  $\text{CaCO}_3$  y que utilizadas como adición a mezclas de cemento, generan cambios en sus propiedades, como una mejora de la trabajabilidad, disminución de la porosidad y una mayor retención de agua. Adicionando filler calizo en reemplazo del cemento, en bajas dosis (menor que 5%) y dependiendo de su contenido, granulometría y composición mineralógica, se pueden obtener algunas mejoras en las propiedades hidráulicas de la mezcla [14-17]; pero en dosis mayores produce una disminución de la resistencia mecánica de estas mezclas y una alteración de su reología [18].

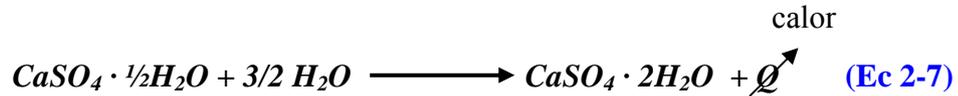
## 2.6 El Yeso

### 2.6.1 Antecedentes del Yeso

Químicamente, el yeso conglomerante es sulfato cálcico hemihidrato cuya fórmula química es " $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ". Se obtiene por deshidratación parcial de la piedra de yeso natural " $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ " (aljez) al aplicarle calor, en cuyo proceso, parte del agua constituyente, se evapora.



El fraguado se produce al rehidratar el hemihidrato, donde el yeso endurece en un tiempo que puede oscilar entre 5 y 30 minutos mediante un proceso químico.



Los microcristales de dihidrato formados van precipitando por saturación. Los cristales van aumentando y creciendo con el tiempo y la masa, en principio moldeable, va adquiriendo consistencia (inicio de fraguado) hasta tornarse rígida e impenetrable (final de fraguado) (Teoría de le-Chatelier). Durante el fraguado se produce un aumento de volumen (expansión) y un desprendimiento de calor (reacción exotérmica).

El yeso hemihidrato es un buen material de construcción, porque cuando se calienta pierde rápidamente su agua de hidratación y recupera su estructura cristalina cuando se hidrata, fraguando y endureciendo (reacción inversa). Estos procesos, deshidratación y rehidratación, son la base de la tecnología del yeso.

### 2.6.2 Hidratación, fraguado y endurecimiento de mezclas de yeso

El sulfato de calcio hemihidrato, por hidratación en condiciones ambientales, se convierte en sulfato de calcio dihidrato. La hidratación se debe realizar con una cantidad de agua adecuada para producir una mezcla homogénea, fluida y estable, que con el tiempo pierde su carácter plástico y endurece.

Se han realizado múltiples investigaciones sobre el mecanismo de la hidratación. Hacia 1900, Le Chatelier, estableció una teoría sobre la cristalización que tuvo gran aceptación [4]. Según ésta, el sulfato de calcio hemihidrato en presencia de agua, forma una solución saturada, aproximadamente 1.8 g/l, a 20 °C, que reacciona precipitando el sulfato cálcico dihidrato.

Cavazzi, y más tarde Baykoff, promovieron la teoría coloidal, que señala que la hidratación se realiza mediante una etapa intermedia en fase de coloide, formándose un tipo de gel, o mediante una adsorción entre el sulfato de calcio y el agua. Esta teoría no se ha podido demostrar de forma experimental [4].

El fraguado y el endurecimiento pueden acelerarse o retardarse por medio de numerosos aditivos. Los retardantes son normalmente ácidos orgánicos y sus sales y coloides orgánicos, procedentes de la descomposición y de la hidrólisis de biopolímeros, como las proteínas, así como las sales del ácido fosfórico o del ácido bórico. El mecanismo de retardo es diferente según el aditivo que se utilice. Por ejemplo, los coloides de alta masa molecular prolongan el período de

inducción. Otros retardantes disminuyen la solubilidad del hemihidrato o el crecimiento de los cristales de dihidrato [4].

En todos los casos, la temperatura afecta al proceso de hidratación del yeso; se observa que se acelera hasta temperaturas de unos 30 °C y decrece posteriormente.

La resistencia del yeso seco fraguado es directamente proporcional a su densidad; por consiguiente, depende principalmente de su porosidad, es decir, del tamaño y estructura de los poros y también, depende directamente de la proporción de agua/yeso. La resistencia varía también con la humedad y con la presencia de aditivos sin que cambie su densidad. La resistencia del yeso con un contenido en humedad superior al 5 % es aproximadamente la mitad de la del yeso en estado seco. Durante el secado, la resistencia del yeso va aumentando hasta alcanzar su valor final cuando se ha llegado al equilibrio con el contenido en humedad ambiental [4].

En ambientes húmedos, disminuye la resistencia del yeso fraguado debido a cambios cristalinos y estructurales; aparece una recrystalización como consecuencia de la solubilidad del yeso en agua. La deformación de los yesos en estado húmedo es consecuencia de sus cambios estructurales. También la presencia de aditivos provoca un cambio en la estructura del cristal, modificando la hidratación, lo que provoca variaciones en la resistencia, aún cuando no haya una modificación de la densidad, incluso en estado seco .

Un caso extremo es la reducción de la resistencia en presencia del ácido cítrico que se usa normalmente como retardador. Usado en proporciones inferiores al 0,1 %, tiene un efecto retardante y sólo rebaja la resistencia ligeramente. Con cantidades superiores al 0,2 %, cambia la forma del cristal del dihidrato de manera que no se produce un endurecimiento del yeso porque los cristales ya no se entrelazan ni se entrecruzan [19].

En resumen, los factores de los que depende el tiempo de fraguado y endurecimiento del yeso, son las impurezas en el yeso calcinado, el área superficial, el pH, el tamaño de partícula y la temperatura en el momento del mezclado [19].

## 2.7 El cemento Portland

El cemento es un conglomerante hidráulico que se presenta habitualmente en forma de polvo finísimo, de color gris que, mezclado con agua, forma una pasta que endurece tanto bajo agua como al aire. Para la fabricación del cemento, se buscan materias primas que aporten fundamentalmente los siguientes óxidos:

<u>Compuestos</u>	<u>Porcentaje %</u>
Oxido de calcio "cal" (CaO)	60 - 69
Oxido de Silicio "sílice" (SiO <sub>2</sub> )	18 - 24
Oxido de Aluminio "alúmina" (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4 - 8
Oxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1 - 8

La obtención de la proporción adecuada de los distintos óxidos se realiza mediante la dosificación de los siguientes componentes minerales de partida:

- Caliza y marga para el aporte de CaO
- Arcilla y pizarras (eventualmente escoria de alto horno) para el aporte del resto óxidos.

Estos componentes son mezclados en proporciones adecuadas y sometidos a un proceso de clinkerización en un horno rotatorio, del cual se obtiene un material granular denominado clinker, constituido por 4 constituyentes básicos:

- Silicato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), designado como  $\text{C}_3\text{S}$
- Silicato bicálcico ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), designado como  $\text{C}_2\text{S}$
- Aluminato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), designado como  $\text{C}_3\text{A}$
- Ferroaluminato tetracálcico ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), designado como  $\text{C}_4\text{AF}$

Estos constituyen un 95 % del peso total del clinker, siendo el 5 % restante componentes menores, principalmente óxidos de sodio, potasio, titanio, residuos insolubles y otros [2].

El clinker es sometido a molienda hasta convertirlo en el polvo finísimo, adicionándose en esta etapa una proporción de yeso de no más de 5 % de su peso, destinado a regular el proceso de fraguado de la pasta de cemento, ya que de otra manera endurecería de forma casi instantánea, rompiendo por contracción térmica. El cemento así obtenido se denomina Cemento Pórtland.

Durante la molienda del clinker se pueden adicionar otros productos naturales o artificiales, constituyendo así los Cementos Pórtland con adiciones o Especiales, los que, además de poseer las propiedades típicas del Pórtland puro (fraguado y resistencia), presentan además otras características relacionadas con la durabilidad, resistencia química y mecánicas. Entre las adiciones más conocidas y utilizadas están las puzolanas naturales, las cenizas volantes y las escorias básicas granuladas de alto horno.

Estas adiciones presentan una reactividad química potencial, que se activa durante la hidratación del clinker a temperatura ambiente. Así, las puzolanas y cenizas volantes reaccionan con la cal liberada durante la hidratación de los componentes activos del clinker. En cambio, en el caso de las escorias, este efecto se produce porque la cal liberada activa el carácter hidráulico de la escoria.

El cemento al ser mezclado con agua forma una pasta, que tiene la propiedad de endurecer progresivamente, hasta constituir un sólido de creciente dureza y resistencia. Estas características son causadas por un proceso físico-químico derivado de la reacción química del agua con las fases mineralizadas del clinker y que en su primera etapa incluye la reacción de los compuestos anhidros del

cemento con agua, formando compuestos hidratados. Los compuestos del cemento se hidratan a distinta velocidad, iniciándose con el  $C_3A$  y continuando posteriormente con  $C_4AF$ ,  $C_3S$  y  $C_2S$  en ese mismo orden [20].

El endurecimiento de la pasta de cemento muestra particularidades que son de interés para su control en el desarrollo de obras de ingeniería:

- La reacción química producida es exotérmica, con desprendimiento de calor, especialmente en los primeros días.
- Durante su desarrollo se producen variaciones de volumen, de dilatación si el ambiente tiene un alto contenido de humedad o de contracción si éste es bajo.

El proceso de endurecimiento que se produce es dependiente de las características del cemento, principalmente de su composición y de su finura, los cuales condicionan en especial la velocidad de su generación.

En cuanto a la selección del cemento apropiado, deberá efectuarse considerando, al menos: la aplicación del hormigón, las circunstancias del hormigonado y las condiciones de agresividad ambiental a las que va a estar sometido el elemento de hormigón [21].

## 2.8 El cemento portland blanco

Se obtiene a partir de la producción de un clínker de color blanco; luego en la molienda del clínker se adiciona yeso y adición de filler calcáreo (caliza) en algunos tipos de cemento. El clínker blanco se obtiene por calcinación a una temperatura del orden de 1.450-1.500 °C de una mezcla finamente dividida de piedra caliza y arcillas blancas de tipo caolín. La adición controlada de yeso al clínker en la molienda tiene como objetivo regular el tiempo de fraguado al igual que en los cementos grises.

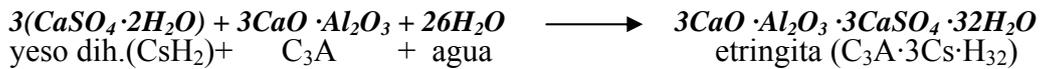
El color blanco del cemento se consigue a través de una selección de materias primas libres de hierro, manganeso y cromo; y de un permanente cuidado en todas las etapas de fabricación, especialmente la molienda. Los cementos blancos tienen las mismas resistencias e incluso mayores que los cementos grises.

## 2.9 Efectos de la presencia de sulfato en hormigones de cemento

La presencia de sulfato en el hormigón es un fenómeno conocido que puede conducir a la degradación de las estructuras de hormigón [22-24]. Generalmente, la presencia de sulfato genera algunas reacciones importantes.

Algunas, son de muy rápida reacción ya que ocurren simultánea y sucesivamente a distintas velocidades e influenciándose unas a otras cuando se mezclan cemento y agua. Una de ellas, donde los iones sulfato reaccionan con el

$C_3A$  del cemento, para formar etringita; conceptualmente el fenómeno se explica según la siguiente relación estequiométrica:



(Ec 2-8)

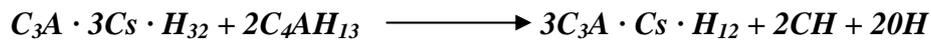
También ocurre que el  $C_3A$  en presencia de humedad, reacciona con el CH proveniente de la hidratación del cemento para formar aluminato tetracálcico hidratado ( $C_4AH_{13}$ ), según la siguiente reacción:



Luego, al continuar hidratando, es el  $C_4AH_{13}$  el que también puede reaccionar con el yeso presente en fase dihidrato ( $C_sH_2$ ) para formar etringita y CH, de acuerdo con la reacción siguiente:



Cuando todo el sulfato ha sido agotado, la etringita reacciona con el  $C_4AH_{13}$  para formar monosulfoaluminato ( $3C_3A \cdot C_s \cdot H_{12}$ ) de acuerdo a la siguiente estequiometría:



(Ec 2-11)

Es decir, se requiere la presencia de yeso dihidrato,  $C_3A$  y humedad para formar inmediatamente etringita. Adicionalmente, la presencia de  $C_3A$ , CH y humedad permiten la formación de aluminato tetracálcico hidratado, el que reacciona con el yeso hidratado presente generando más etringita y más CH; esta etringita reacciona con el aluminato tetracálcico y forma monosulfoaluminato y más CH.

Por su parte, la fase ferrítica que contiene hierro, o el aluminoferrito tetracálcico ( $C_4AF$ ) también se hidrata, aunque mucho más lentamente, para formar compuestos químicamente similares, en los que el hierro ( $Fe_2O_3$ ) reemplaza una porción del aluminio ( $Al_2O_3$ ).

Se pueden nombrar otros sulfatos que pueden estar o hacerse presentes en la masa del hormigón, como el sulfato de sodio o de magnesio, que reaccionan con el hidróxido de calcio proveniente de la hidratación del cemento para formar yeso y posteriormente, etringita.



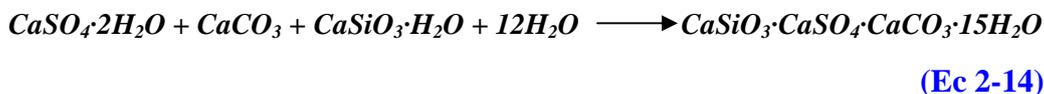


Por ello, todas estas reacciones generan un aumento de volumen, lo que produce expansión y posterior degradación y/o agrietamiento del hormigón [23, 25].

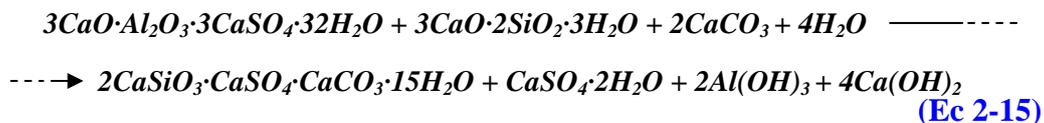
Más recientemente, se ha investigado otro tipo de ataque por sulfato; éste consiste en la formación de taumasita [26-29], tan o más destructiva que la etringita. La taumasita destruye por completo la capacidad conglomerante del cemento, transformándolo en un simple polvo sin capacidad cementicia.

La taumasita es una sal compleja ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ), cuya presencia en morteros y hormigones produce daños irreparables de manera expansiva o por desintegración del gel SCH a una velocidad lenta. A pesar de la investigación realizada en este campo, todavía no se ha explicado adecuadamente su formación, por la complejidad de las reacciones y porque se puede formar por combinación de varios compuestos cementicios y condiciones medioambientales que la propicien [30]. El deterioro se produce en hormigones elaborados a partir de agregados con alto contenido de carbonatos (calizas o dolomitas) o expuestos a atmósferas con altas concentraciones de  $\text{CO}_2$ . Adicionalmente esta reacción requiere de una acción frecuente o permanente de elevada humedad y baja temperatura. En general se acepta que este deterioro ocurre a temperaturas cercanas a los  $5^\circ\text{C}$  aunque se han reportado casos de deterioro a temperaturas mayores.

La formación simple de la taumasita la describen Crammond [29] y Ramachandran [31], de acuerdo a la siguiente expresión.



Además, Schmidt [28] describe la formación de taumasita directamente de la etringita, que reacciona con los SCH, carbonatos,  $\text{Ca}^{2+}$  y agua, según la siguiente expresión.



También Blanco et al. [26] y Martínez et al. [27] han investigado la formación de taumasita por ataque del sulfato de magnesio. En la reacción, los SCH y el  $\text{Ca(OH)}_2$  reaccionan con los carbonatos y sulfatos para dar yeso y taumasita.

Mientras los sulfatos reaccionan con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para formar yeso, la taumasita se forma a partir de la descomposición de los compuestos SCH en  $\text{SiO}_2$ , que se combina con los iones carbonato y los iones sulfato de la solución formada por el medio húmedo.

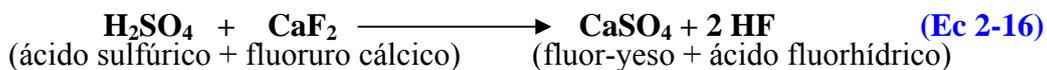
Se describen así los principales efectos nocivos de los sulfatos y su disolución en un medio húmedo cuando hacen presencia en la masa de un hormigón. Por ello, cualquier pretensión de vinculación (yeso-cemento) debe buscar reducir las reacciones consecuentes, para así atenuar la expansión, evitar las fuertes reducciones de resistencia y en lo posible, eliminar la degradación y/o agrietamiento del material.

### 2.10 Utilización de yesos de desecho proveniente de un proceso químico, como conglomerante

Es bien sabido que el yeso natural se añade al clínker para retrasar la rápida reacción exotérmica que se produce entre el aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) del cemento y el agua que se añade a la mezcla. Sin embargo, en algunos países, básicamente por una preocupación medioambiental, una nueva fuente de yeso ha surgido, ya que cierta industria química está produciendo permanentemente una gran cantidad de yeso residual en sus procesos, sin tener un definido uso económico. Este yeso residual también se le llama “yeso químico” y puede ser utilizado en la producción de cemento o en la fabricación de conglomerantes a base de yeso.

#### a) Fluor-yeso

Uno de éstos, es el fluor-yeso, un tipo de yeso químico, subproducto de la producción de ácido fluorhídrico.



Puede observarse que la principal fase mineral del fluor-yeso es la anhidrita. El yeso anhidro no es adecuado para una aplicación externa, en consideración a su solubilidad en agua ya que se produce con demasiada lentitud para utilizarlo directamente en la producción de elementos de construcción. Gracias a procesos de adecuación, algunos de los fluor-yeso se utilizan como reguladores del fraguado del cemento en reemplazo del yeso natural, sin embargo, la producción principal sigue siendo colocada en las zonas de eliminación de residuos.

El problema medioambiental impulsa la investigación de usos alternativos de este gran volumen de fluor-yeso residual. Es así que Yan and You [32], investigan un nuevo conglomerante utilizando la ceniza volante y fluor-yeso como principales materias primas, así como el cemento Portland como activador. Fluor-yeso, ceniza volante, y el cemento se mezclan de acuerdo con la proporción que se muestra en la **Tabla 2-3**, y los resultados de los ensayos de resistencia de muestran en la **Tabla 2-4**.

**Tabla 2-3.** Proporción de materiales y razón agua/conglomerante (W/B)

	Fluor-yeso	CV	Cemento Portland	Cemento Aluminoso	W/B
<b>G1</b>	36	64			0,22
<b>G2</b>	36	60	4		0,22
<b>G3</b>	35	57	8		0,22
<b>G4</b>	31	53	16		0,22
<b>A4</b>	31	53		16	0,20

**Tabla 2-4.** Resistencia de Conglomerante estudiado [MPa]

	Probetas curadas al aire						Probetas curadas en Agua			
	Resistencia Compresión			Resistencia Flexión			Resistencia Compresión		Resistencia Flexión	
	3 días	28 días	91 días	3 días	28 días	91 días	28 días	91 días	28 días	91 días
<b>G1</b>	muy baja			muy baja						
<b>G2</b>	4,4	28,1		0,90	4,41					
<b>G3</b>	7,5	31,5		1,37	4,84					
<b>G4</b>	15,4	52,7	72,7	3,54	7,32	7,75	59,3	77,3	5,99	7,11
<b>A4</b>	14,8	40,8	44,3	3,05	4,28	4,56	38,9		4,24	

De los resultados de resistencia expuestos en la **Tabla 2-4** se puede observar que la mezcla normal de fluor-yeso y ceniza volante no tiene propiedades cementicias, como cabría esperar. Un activador debe añadirse a la mezcla para activar su propiedad cementicia; el activador probado fue cemento Portland y cemento aluminoso (\*). Las resistencias de la pasta a temprana edad, no son elevadas, pero el aumento de resistencia se acompaña al desarrollo continuo de la hidratación.

Cuando la proporción de cemento aumenta del 8% (G3) al 16% (G4), las propiedades se mejoran notablemente. G4 tiene una resistencia inicial satisfactoria y una excelente resistencia tardía. Una vez que la reacción puzolánica de la ceniza volante actúa, es eliminada la deficiencia del yeso normal que pierde su resistencia, además, hay más producción de gel SCH en la pasta curada en agua que curada en aire.

Finalmente, los investigadores concluyen en la disposición de un nuevo conglomerante con alta resistencia, buena estabilidad de volumen y excelente resistencia al agua.

(\*): Si bien los investigadores citan el uso de “cemento aluminoso”, no entregan detalle de su composición química, razón por la cual, puede ser un cemento con elevada concentración de C<sub>3</sub>A, que no es lo mismo.

El cemento Portland como activador tiene un mejor comportamiento que el cemento aluminoso, porque genera en la pasta un medio alcalino más alto lo que mejora la transformación de anhidrita en yeso y mejora la reacción puzolánica de la ceniza volante. De forma homogénea, la mezcla del gel de SCH, microcristales de yeso, y la anhidrita restante, garantiza la buena resistencia al agua del conglomerante y proporciona una satisfactoria estabilidad de volumen.

La investigación la continúan Yan et al. [33] y posteriormente Yan y Yang [34], pero con la posibilidad de utilizar cenizas volante de baja calidad.

También Martínez et al. [35] realizan una interesante investigación con escoria granulada de alto horno. En todas ellas, se pudo comprobar que las propiedades potenciales cementicias de las mezclas pueden provocar la generación de productos de hidratación estables.

#### b) Yeso fosforado

El yeso fosforado o fosfoyeso es otro tipo de yeso químico, como subproducto de la producción de ácido fosfórico por reacción del fosfato mineral (apatita) con ácido sulfúrico, según la reacción siguiente [36]:



Donde “X” puede incluir “OH”, “F”, “Cl” o “Br”. La adición de fosfoyeso directamente a la mezcla cruda de cemento antes de la clinkerización, disminuye la temperatura de clinkerización y retrasa el fraguado. Esto fue investigado por Mehta y Brady [37]. Concluyen que las desventajas asociadas con la presencia de impurezas en el yeso fosforado pueden ser superadas cuando, en lugar de añadirlo (en bajo %) directamente al cemento Portland como aditivo para el retardo del fraguado, se agrega a la mezcla de crudos antes de clinkerización. Debido a la acción mineralizante del fosfoyeso, el clinker puede ser fabricado a una temperatura considerablemente reducida.

Si bien el proceso del fosfoyeso se visualiza precedentemente, en realidad, este se obtiene contaminado con impurezas como el  $\text{P}_2\text{O}_5$  (óxido fosfórico), F<sub>2</sub> (flúor), etc. Estas impurezas ponen en peligro la aplicación directa del fosfoyeso al crudo del cemento, ya que afectan el desarrollo de resistencias del producto calcinado. Para la utilización racional y adecuada, Singh et al. [38] han desarrollado un proceso de purificación de fosfoyeso por tamizado húmedo en tamiz de 300 micras, para lo cual utilizan un hidrociclón.

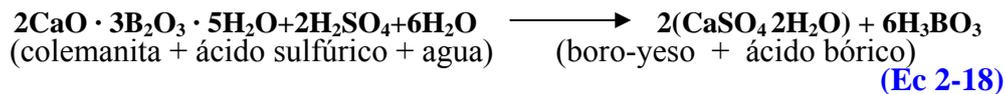
Por su parte en Turquía, Altun et al. [39], investigaron la posibilidad de usar fosfoyeso degradado como retardador del fraguado en el cemento Portland. Se estudiaron los efectos sobre el endurecimiento y las propiedades mecánicas del fosfoyeso añadido en proporciones de 1, 3, 5, 7, 10 y 12,5% en peso a los cementos Portland y se compararon con un cemento Portland con yeso natural. Se encontró que el fosfoyeso se puede utilizar en lugar del yeso natural para

cemento Portland de acuerdo a las normas turcas. La mayor resistencia a compresión de 28 días la proporcionó la probeta con 3% en peso de fosfoyeso.

En otras investigaciones, Singh et al. [40-43], Garg et al. [44] y Taneja and Sing [45], en la búsqueda de un conglomerante resistente al agua y a las condiciones medioambientales, aprovechan estos residuos industriales que en gran volumen se producen en fábricas de fertilizantes de ácido fosfórico en la India. Los yesos producidos son sometidos a procesos de calcinado y molienda para producir un producto más uniforme como es el yeso fosforado anhidro y el yeso fosforado  $\beta$ -hemihidrato. Estos yesos los mezclan con escoria granulada de alto horno y cemento Portland, sometiéndolos a condiciones de humedad y secado alternativo, así como al calentamiento y enfriamiento en el intervalo de temperatura de 27° a 60°C. Los resultados muestran que con el aumento de la temperatura, la resistencia del conglomerante de yeso anhidro se reduce, aumentando la pérdida de su peso; con una reducción drástica de resistencia al calentar por encima de 45°C. En comparación, el conglomerante con yeso hemihidrato, muestra mucha menor caída de resistencia y pérdida de peso. Logran así demostrar que es posible disponer de un conglomerante a base de yeso fosforado resistente.

### c) Boroyeso

El boro-yeso, un material de desecho formado durante la producción de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) a partir de la colemanita ( $2CaO \cdot 3B_2O_3 \cdot 5H_2O$ ). El boro-yeso es otra fuente importante de yeso químico.



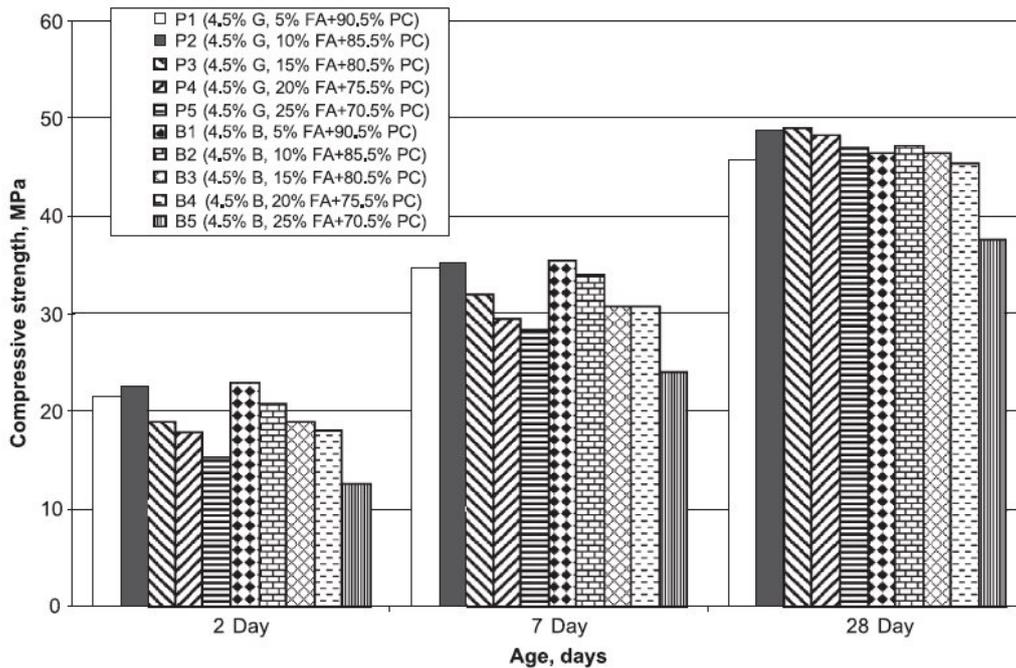
Varios estudios se han realizado sobre la posible utilización del boro-yeso en lugar del yeso natural en la producción de cemento. Boncukoglu et al. [46] muestra que el boro-yeso en reemplazo de hasta el 10% del clinker de cemento podría ser utilizado como retardador de fraguado. Sin embargo, el aumento del nivel de boro-yeso en el cemento Portland de 5% a 20% causa una disminución de la resistencia a compresión y tracción. Elbeyli et al. [47] sugieren que boro-yeso tratado térmicamente para reducir el nivel de impurezas en aplicaciones de cemento disminuye la solidez y aumenta notablemente el tiempo de fraguado y la resistencia a compresión de 28 días del mortero en comparación con la del boro-yeso no tratado.

Una desventaja de la utilización de desechos que contengan boro en la producción de cemento es su mayor tiempo de fraguado y menores valores de resistencia a tiempos cortos. Por estas razones, se limita el uso de elevadas proporciones de estos materiales de desecho en la producción de cemento. Así, hay una fuerte necesidad de encontrar una mezcla adecuada que permita un aumento en la proporción utilizada de residuos.

En Turquía, los investigadores Kavas et al. [48], realizan un estudio que pone de manifiesto peculiaridades específicas del fraguado y endurecimiento de mezclas

de cemento Portland con boro-yeso y adición de ceniza volante. El comportamiento del boro-yeso en el cemento Portland-ceniza volante se comparó con las del yeso puro.

La optimización la hicieron para dos series de conglomerantes designadas como P y B. La primera serie fue preparada con 4,5% en peso de yeso natural (G), diversos niveles de reemplazo de ceniza volante (FA) y clinker de cemento Portland (PC). En la segunda serie, repitieron las proporciones pero utilizaron boro-yeso (B) en lugar del yeso natural. La Fig. 2-3 muestra la comparación de la resistencia a compresión de estos morteros.



**Fig. 2-3. Comparación de Resistencia a Compresión. Morteros conteniendo Yeso Natural (G) y Boro-yeso (B). Además, Ceniza Volante (FA) y Cemento Portland (PC)**

Puede observarse, que independientemente de la edad de curado, la resistencia a compresión de la mezcla boroyeso añadido fue un poco menor que la de la mezcla de yeso añadido. Estas observaciones indican que la presencia de boro en el yeso interfiere en el endurecimiento del cemento, lo que resulta en una reducción de resistencia a compresión sobre todo a edades tempranas.

De los resultados de su investigación, concluyen entre otras cosas, lo siguiente:

- El boro-yeso tiene el efecto general de retardar el tiempo de fraguado del cemento.

- La sustitución de yeso natural por boro-yeso causa una ligera reducción en la resistencia de los morteros. Sin embargo, los valores de resistencia obtenidos están dentro del rango aceptable por las normas.
- Basándose en las conclusiones de este estudio, parece posible el uso de boro-yeso en lugar del yeso natural en la producción de cemento Portland.

#### **d) Otros subproductos de yeso químico**

El desulfoyeso, obtenido a partir del proceso de desulfuración del carbón en plantas de incineración, y citroyeso, un subproducto de la producción de ácido cítrico, son otras fuentes importantes de yeso químico. Ozkul [49] probó el uso de citroyeso y desulfoyeso en la industria del cemento como retardadores del fraguado en lugar de yeso natural. Aplicó una comparación de resultados en ensayos de tiempos de fraguado, estabilidad de volumen y resistencia a compresión y flexión. Logra probar una igualdad de resultados a las edades de 3, 7 y 28 días.

Como se demuestra, el yeso químico puede ser utilizado en la producción de cemento y en la generación de conglomerantes cementicios (conglomerante) con adición en porcentajes significativos conjuntamente de una puzolana activa y cemento Portland como activador. Así el yeso químico pasa a ser otra gran fuente de residuos industriales aprovechables.

### **2.11 Propiedades físicas y mecánicas de mezclas de yeso-cemento portland-puzolana natural**

El uso de las puzolanas naturales se remonta a la antigüedad. Los morteros de cal y puzolana fueron usados por los romanos en muchas clases de estructuras, incluyendo las obras de carácter marítimo. El buen estado en que se encuentran hoy muchas de estas construcciones pone de manifiesto la durabilidad del conglomerante utilizado [50]. Las puzolanas se usan hoy día habitualmente en morteros y hormigones y como componentes de cementos puzolánicos o como mezclas finamente divididas con cemento Portland.

En general, las puzolanas naturales tienen diversas composiciones mineralógicas dependiendo de su origen, por lo que es interesante conocer la variabilidad en el comportamiento de los cementos portland adicionados con puzolanas así como la incorporación de yeso. Con el fin de aportar conocimientos sobre dichos aspectos, Rahhal et al [51], exponen un estudio sobre la influencia de la incorporación de puzolanas naturales y de yeso, en la hidratación de cementos portland con composiciones mineralógicas extremas.

Las viviendas de bajo coste económico y ecológico requieren consumir productos fácilmente disponibles y a un precio accesible para la población con menos recursos, por esta razón Colak [52], estudió un nuevo tipo de conglomerante conteniendo yeso, puzolana natural y cemento Portland utilizando un sencillo proceso de molienda.

En la **Tabla 2-5** se muestran los resultados de ensayos de medición del agua de absorción a los 7 días de diversas mezclas fabricadas con “yeso-cemento-

puzolana natural” y puede observarse que la disminución del agua de absorción puede ser debida a una reducción en la porosidad de dichas mezclas.

**Tabla 2-5. Propiedades físicas y mecánicas para mezclas con conglomerante yeso/cemento portland/puzolana natural, para la relación “Agua/Conglomerante = 0,5”.**

Tipo de Pasta Yeso/cemento/puzolana	Densidad (28 días) [g/cm <sup>3</sup> ]	Porosidad (28 días) [%]	Absorción (7 días) [%]	Resistencia Compresión (28 días) [MPa]	
				Seco	Húmedo
100/0/0	1,313	34	25,7	12,54	5,857
50/50/0	1,53	23,95	16	13,37	12,00
60/40/0	1,54	21	17	12,22	10,88
70/30/0	1,54	21,33	16	12,23	10,95
80/20/0	1,45	26,25	20	13,05	10,31
0/100/0	1,678	9	7	31,00	22,22
0/60/40	1,503	18	10	21,27	17,77
0/70/30	1,56	15,09	10	23,43	19,63
0/80/20	1,567	15,6	9	18,15	18,82
41/41/18	1,42	30	20	13,05	17,51
41/41/18s1	1,44	23	15	14,51	15,59
44/44/11	1,42	27,5	19	11,14	11,14
50/30/20	1,55	12	8	14,78	14,78
50/40/10	1,3425	36,8	27	12,73	17,66
62,5/30/7,5	1,348	33	25	19,9	12,48
75/20/5	1,3496	32,3	24	20,53	14,10

La porosidad es medida para tiempos de curado de 28 días y períodos superiores. Puede observarse que el yeso afecta el progreso de la hidratación del cemento Portland y por tanto afecta a la porosidad dentro de la pasta hidratada de cemento. Por otro lado, se observa una disminución de la porosidad, para las pastas de cemento Portland con puzolana natural.

Puede concluirse que en mezclas de yeso-cemento Portland, el grado de llenado de los poros producto de la hidratación es más baja que en mezclas de cemento Portland-puzolana natural. Esto es al menos en parte, porque la puzolana natural proporciona más espacio para ser llenado por los productos de la hidratación; por lo que, parece razonable asumir que las partículas de puzolana natural que contienen grandes poros, sirven como sitios de nucleación para el crecimiento de los SCH y otros hidratos.

Dado que relación “agua/conglomerante” es la misma, tanto para mezclas de “yeso/cemento Portland” como para aquellas que contienen puzolana natural, podría atribuirse el aumento en la porosidad a una disminución en el grado de hidratación y, por consiguiente, a una porosidad más alta o a un cambio en la micro-estructura de la pasta.

Para analizar la influencia de las condiciones de curado, la **Tabla 2-6** da la variación de resistencias a compresión a distintas condiciones de curado para una mezcla de “yeso-cemento Portland-puzolana natural” y para ese mismo conglomerante pero con adición de un 1% de un superplastificante.

**Tabla 2-6. Resistencia a compresión [MPa]. Efecto del curado en pastas de “yeso/cemento Portland/puzolanas naturales” a 28 días, para relación “agua/conglomerante = 0,5”**

Tipo de Pasta	Curado Tipo		
	A	B	C
41/41/18	20,12	17,51	13,05
41/41/18s1	21,05	15,59	14,51

**Curado Tipo A:** en agua durante 28 días a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

**Curado Tipo B:** en niebla durante 28 días a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  y 95% humedad relativa.

**Curado Tipo C:** en niebla durante 28 días a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  y 95% humedad relativa, continuando con curado en horno a  $40^\circ\text{C}$  hasta peso constante.

Es evidente que las condiciones de curado influyen en el desarrollo de la resistencia mecánica. Las mezclas señaladas muestran significativamente una mayor resistencia a 28 días para la condición curado en agua. La obtención de una mayor resistencia puede atribuirse a la hidratación del conglomerante “yeso/cemento Portland/puzolana natural”, en una magnitud mayor que lo que ocurre en los otros dos regímenes.

Las mezclas en los otros dos regímenes de curado sufren pérdida considerable de resistencia a 28 días cuando se comparan con el curado en agua. Sin embargo, la pérdida de resistencia es más pronunciada en los especímenes con curado tipo C. Independiente del curado, no hay ninguna diferencia significativa en la pérdida de resistencia entre las mezclas originales y con súperplastificante. De estos resultados, es evidente que el curado en seco causa un daño mecánico debido a la cristalización de sales en los poros de la mezcla.

Para evaluar la influencia de la humedad en la resistencia mecánica de las distintas mezclas, se comparan los tipos de curado B y C que se señalan en la anterior **Tabla 2-5**. Como puede observarse, la máxima resistencia de compresión a 28 días de mezclas de “cemento Portland-puzolana natural” ocurre para un 30% de contenido de puzolana natural y que, las resistencias de compresión de mezclas de “cemento Portland” y de “cemento Portland-puzolana natural” son afectadas por el cambio en el contenido de humedad al instante del ensayo.

Puede apreciarse que la mezcla de “cemento Portland” resulta con una considerable disminución en la resistencia a compresión cuando son curadas al horno a  $40^\circ\text{C}$  hasta peso constante y que las mezclas de “cemento Portland-puzolana natural” son más resistentes a esta degradación. Estos resultados indican que la puzolana natural reduce la sensibilidad a la humedad.

El efecto de la puzolana natural en la resistencia a compresión a 28 días en mezclas “yeso-cemento Portland-puzolana natural” también se puede observar en la anterior **Tabla 2-5**. Los mayores incrementos en la resistencia a compresión en presencia de puzolana se obtienen para el curado en seco. Sin

embargo, no existe ninguna diferencia significativa entre la resistencia de compresión para los morteros secos y húmedos que contienen 50% de yeso o más. Los resultados muestran que la humedad no tiene un efecto perjudicial importante en la resistencia a compresión para las mezclas de “yeso-cemento-puzolana natural”.

Colak también estudió el comportamiento a más largo plazo, en lo que a durabilidad se refiere, para este tipo de mezclas. Por ello, las probetas sometidas a curado tipo B por 28 días, se sumergen en agua y se retiran a distintos tiempos para continuar con curado en horno a 40°C hasta peso constante, determinando así el efecto de la inmersión en agua en la resistencia mecánica. La **Tabla 2-7** proporciona datos de resistencia a compresión para distintos conglomerante en función de la relación “yeso/cemento Portland/puzolana natural”.

**Tabla 2-7. Resistencia a Compresión [MPa] de probetas de mortero de “yeso/cemento Portland/puzolana natural” sumergidas en agua.**

Yeso/Cemento/ Puzolana	Tiempo (hora)								
	0	24	240	432	480	720	744	1464	2280
100/0/0	12,54	5,888	4,265	5,65					
50/50/0	13,37	11,3			12,29	13,21			
60/40/0	12,22	10,63			10,185	11,28			
70/30/0	12,23	9,89			8,99	9,8			
80/20/0	13,05	9,056			9,14	10,1			
0/100/0	31,00	22,22	16,36	23,94		16,87			
0/60/40	21,27		19,93	21,52		18,78			
0/70/30	23,43	19,29	28,32			30,08			
0/80/20	18,15		20,37	17,46		22,92			
41/41/18	13,05	16,23					21,34	19,75	21,34
41/41/18s1	14,51	16,65					22,61	20,70	24,50
44/44/11	11,14	14,37					16,08	18,92	
50/30/20	14,78		14,45	14,19		19,13			
50/40/10	12,73	14,06	15,597			15,47			
62,5/30/7,5	19,9	12,286	10,5			15,92			
75/20/5	20,53	11,96	10,63			9,55			

En la probeta de solo yeso, se observa una disminución de la resistencia a compresión al sumergir en agua. Dicho valor no se modifica con el tiempo de inmersión.

Mezclas consistentes en 50% de cemento Portland y 50% de yeso en peso después de un mes bajo agua no muestran una disminución significativa en la resistencia a compresión, con respecto a los valores iniciales. Si se produce una pérdida en la resistencia a medida que aumenta la proporción de yeso, observándose una disminución de resistencia al sumergir en agua para probetas con mezclas “60/40/0”, “70/30/0” y “80/20/0”.

La resistencia de mezclas “yeso-cemento Portland-puzolana natural”, presenta un comportamiento diferente de manera que la resistencia aumenta con el

tiempo de inmersión, llegando a valores por encima de los 20 MPa. La adición de superplastificante no afecta el comportamiento de estas mezclas.

Por otra parte, Colak continuó su investigación y también estudió el comportamiento de estas mezclas a largo plazo sumergidas en agua o sometiénolas alternativamente a ciclos hielo-deshielo [53]. En este estudio se investigaron propiedades como la densidad, porosidad, trabajabilidad, resistencia mecánica y las características de durabilidad de las mezclas “yeso-cemento Portland-puzolana natural”.

Los resultados indican que las variaciones en las proporciones de la mezcla constituyen causas de cambios en la densidad. Los efectos de adicionar un superplastificante dependen de la cantidad agregada. Las altas dosis de un superplastificante de base naftaleno permiten un aumento importante de la trabajabilidad. Esta mejora en la trabajabilidad, puede usarse para disminuir la relación “agua/conglomerante”, manteniendo constante la trabajabilidad. Las mezclas “yeso/cemento Portland/puzolana natural” dan más baja resistencia que el yeso a la edad de 1 día. Sin embargo, la resistencia continúa aumentando desde 1 día y excede al yeso a los 28 días. El efecto de la porosidad sobre la resistencia puede ser expresada por una ecuación exponencial de segundo grado:

$$\sigma = \sigma_o e^{-(ap + bp^2)} \quad (\text{Ec 2-19})$$

Donde p es la porosidad,  $\sigma_o$  es la resistencia de la mezcla a cero porosidad,  $\sigma$  es la resistencia de la mezcla con porosidad p; a y b son constantes del material.

La porosidad tiende a disminuir significativamente con el tiempo de curado. La reducción de la porosidad puede ser provocada por el llenado de los poros con productos de hidratación. Los resultados experimentales muestran una disminución significativa de la porosidad hasta los 28 días de curado; sin embargo, la disminución de la porosidad más allá de los 28 días, es muy reducida.

Los ensayos de durabilidad se han efectuado examinando el comportamiento de mezclas “yeso-cemento Portland-puzolana natural” en agua. Del estudio se observa que mezclas con alta proporción de yeso tienen un aumento en la sensibilidad al agua y por tanto, sufren una reducción de la resistencia con el aumento del tiempo de curado en agua. Por su parte, las mezclas con las composiciones “41:41:18” y “41:41:18S1”, cuyo contenido de yeso es menor que otros sistemas ensayados, resultan poco afectadas por el ambiente húmedo. Estas mezclas muestran un ligero aumento de resistencia, probablemente debido al curado en agua.

Para predecir la variación de resistencia de compresión de estas mezclas sumergidas en agua, en función del tiempo, propone la siguiente expresión.

$$\sigma = \sigma_0 [1 + (1 - e^{-bt})/a ] \quad (\text{Ec 2-20})$$

Dónde  $\sigma_0$  es la resistencia inicial,  $\sigma$  es la resistencia de la mezcla al tiempo “t” de duración de exposición al agua; a y b son constantes materiales por determinar. Esta ecuación muestra una excelente relación con los datos en “41:41:18” y “41:41:18S1” para un período de 95 días, pero no es aplicable a mezclas con un alto contenido de yeso.

Por otra parte, estas mezclas se comportan muy bien durante los ciclos hielo-deshielo, no presentándose ningún deterioro a 20 ciclos. Sin embargo, los resultados del ensayo después de 30 ciclos muestran valores de resistencia algo mejores en probetas con superplastificante.

La investigación concluye, que las variaciones de densidad son generalmente causadas por los cambios en la composición de la mezcla. Densidades más bajas se pueden obtener aumentando el contenido de yeso o de puzolana en la mezcla. El superplastificante mejora la trabajabilidad de las pastas y que la adición entre el 1%-1,5% en peso del conglomerante reduce drásticamente la demanda de agua en comparación a pastas sin superplastificante. Hay una fuerte tendencia a disminuir la porosidad con el aumento del tiempo de curado.

Finalmente concluyen que la adición de puzolana natural es una forma eficaz de mejorar la resistencia a la humedad de las mezclas de “yeso-cemento Portland”. El contenido de yeso y la relación “agua/conglomerante” desempeñan un papel muy importante en el comportamiento de estas mezclas frente al agua y a ciclos hielo-deshielo.

## 2.12 Mejoras de las propiedades de las mezclas “yeso-cemento” por uso de Humo de Sílice

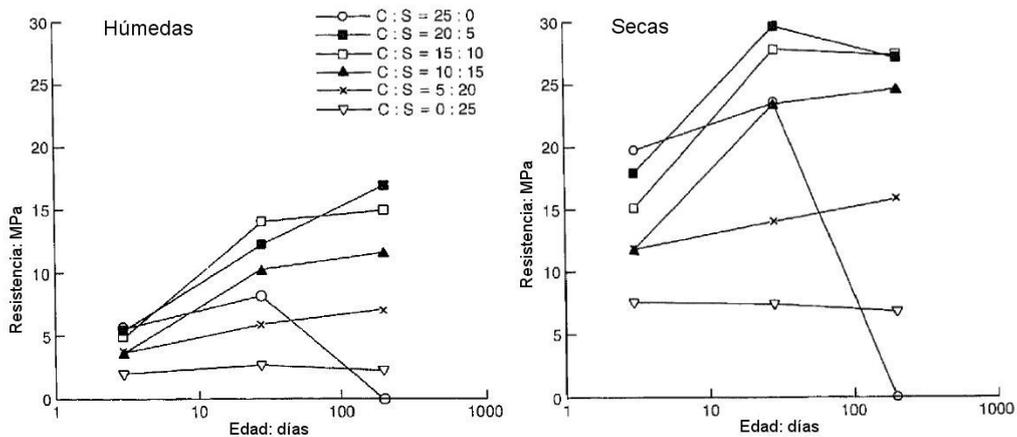
Otros autores, previamente han utilizado con éxito mezclas de yeso, cemento Portland y materiales tales como escorias de alto horno o puzolana natural y los investigadores Bentur et al. los citan en uno de sus estudios publicados [54]. Destacan que, una combinación de este tipo puede ofrecer las condiciones para eliminar la formación de etringita, que es inestable en un medio menos básico. La presencia de una puzolana reactiva puede proporcionar este medio, lo que puede hacer factible la producción de conglomerantes de “yeso-cemento Portland-puzolana”, que posee las ventajas de ambos, pero que no está sujeto a un deterioro por formación de etringita.

Respaldándose en los citados estudios, estos investigadores amplían la investigación y logran describir los resultados favorables obtenidos al desarrollar una mezcla de pasta de yeso y cemento Portland con las ventajas del yeso (alta resistencia inicial y buena trabajabilidad) y las del cemento Portland (mayor durabilidad en condiciones de humedad, libre de los efectos perjudiciales de etringita, que se forma cuando el yeso y cemento Portland

interactúan). Esto lo logran mediante la preparación de una mezcla con 75% de yeso complementada con una mezcla del 25% de cemento Portland y humo de sílice; mezcladas en diferentes proporciones, en el rango de 0,25 - 0,66; disponiendo así de un sistema conglomerante con niveles de resistencia dos veces mayor que las del yeso puro.

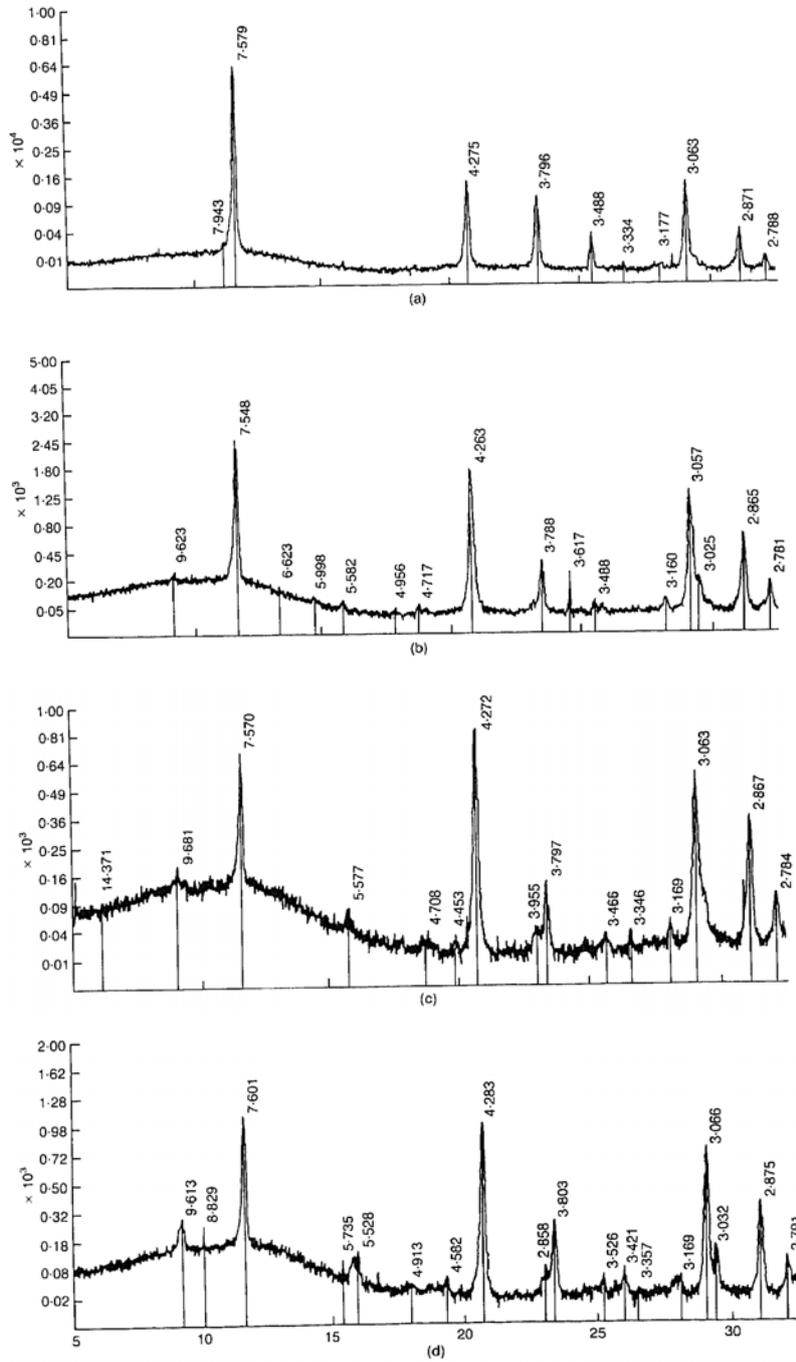
El humo de sílice como puzolana activa fue elegido por ser altamente reactivo y por lo tanto representa el efecto más favorable que dichos materiales puedan ofrecer.

Estos investigadores prepararon pastas en probetas cúbicas de 25mm con mezclas en proporción “agua/conglomerante = 0,50”. Las probetas fueron desmoldadas después de 1 día y posteriormente curadas bajo agua y sometidas a ensayo de resistencia a compresión a los 3, 28 y 200 días de edad. Algunas probetas las han ensayado saturadas en estado húmedo, y las otras secadas al horno a 50°C durante 2 días antes del ensayo. Los resultados de ensayos de resistencia a compresión se muestran en Fig. 2-4.



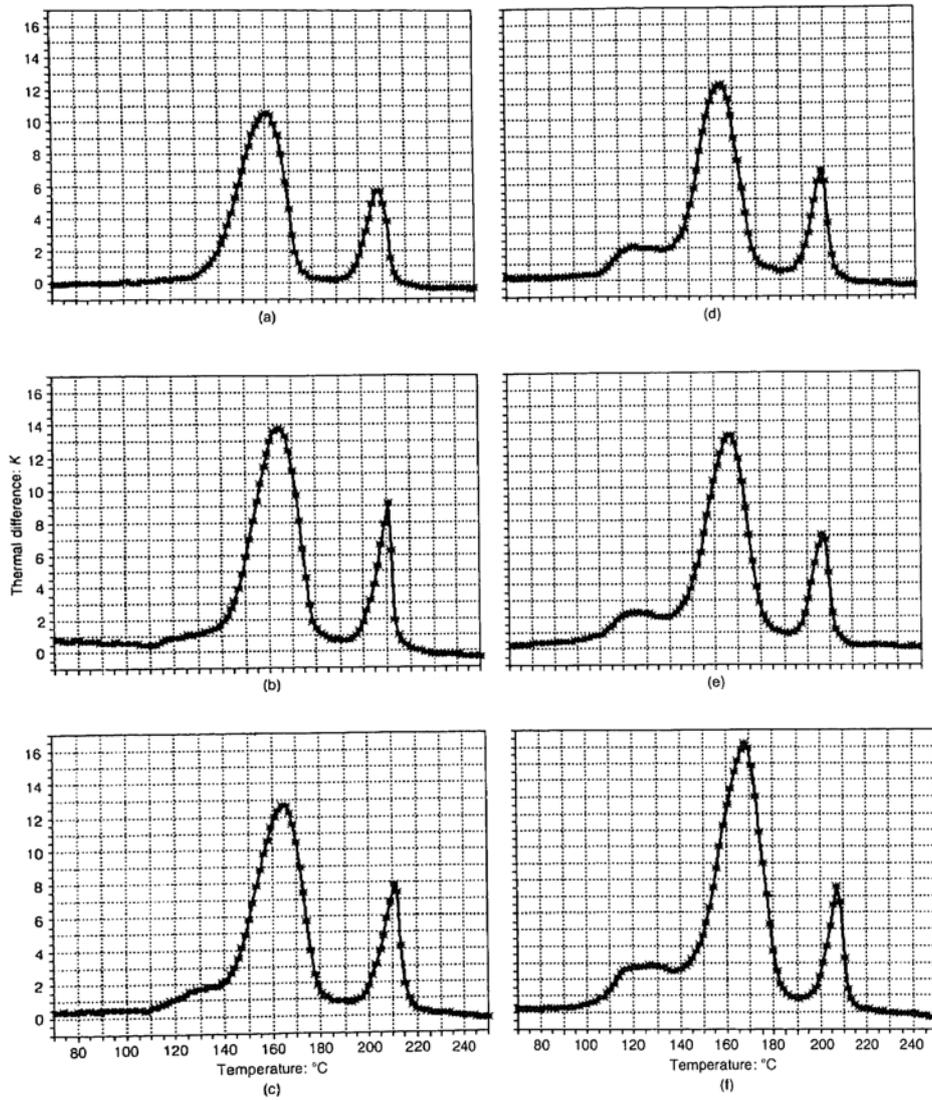
**Fig. 2-4. Curvas Resistencia a compresión vs Edad de pastas de “yeso-cemento Portland-humo de sílice” con 75% de yeso y diversas relaciones de cemento-humo de sílice (C:S), curadas en agua y ensayadas húmedas y secas.**

Los patrones de difracción de rayos X después de 200 días de curado húmedo se muestran en Fig. 2-5. La muestra con yeso y humo de sílice (a) sólo muestra los picos característicos del yeso (7,56; 4,27; 3,79; 3,05 Å). Como el humo de sílice es amorfo, no aparece en los diagramas de difracción de rayos X.



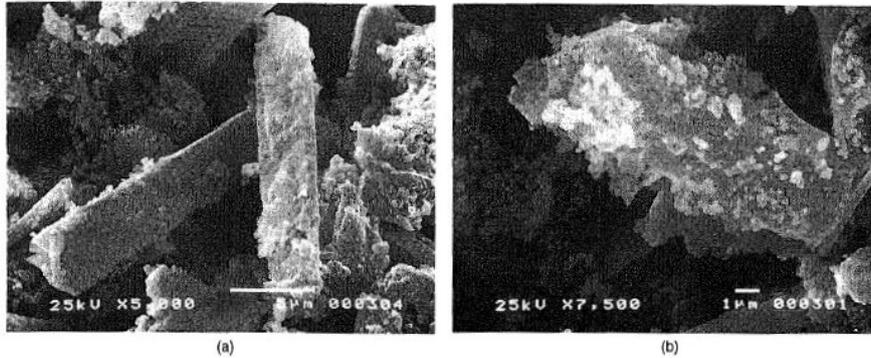
**Fig. 2-5.** Patrones de difracción de rayos X. Varias pastas (C:S) después de 200 días de curado en agua: (a) 0:25, (b) 10:15, (c) 20:5, (d) 25:0.

Las curvas DTA (Fig. 2-6) muestran los dos picos característicos de la descomposición del yeso dihidrato (150°C) y hemi-hidrato (200°C). Con un contenido cada vez mayor de cemento por encima del 15%, hay un aumento en la intensidad del pico a 120°C, que es característico de la presencia de etringita.



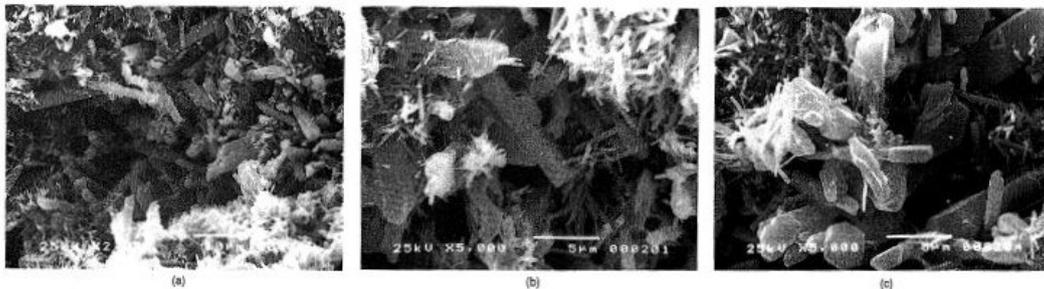
**Fig. 2-6.** Curvas DTA. Pastas C:S, después de 200 días de curado en agua:  
 (a) 0:25, (b) 5:20, (c) 10:15; (d) 15:10; (e) 20:5; (f) 25:0

Respecto a observaciones SEM; el sistema “yeso-humo de sílice” (**Fig. 2-7**) presenta una microestructura abierta donde los cristales de yeso, en forma de varilla, son claramente visibles (a). A mayor aumento, las pequeñas partículas de humo de sílice ( $\sim 0,1 \mu\text{m}$ ) son observadas adheridas a la superficie de los cristales de yeso que son mucho más grande (b).



**Fig. 2-7. Micrografías SEM. Pastas 75% yeso-25% humo de sílice después de 200 días de curado en agua: (a) 5000x (b) 7500x**

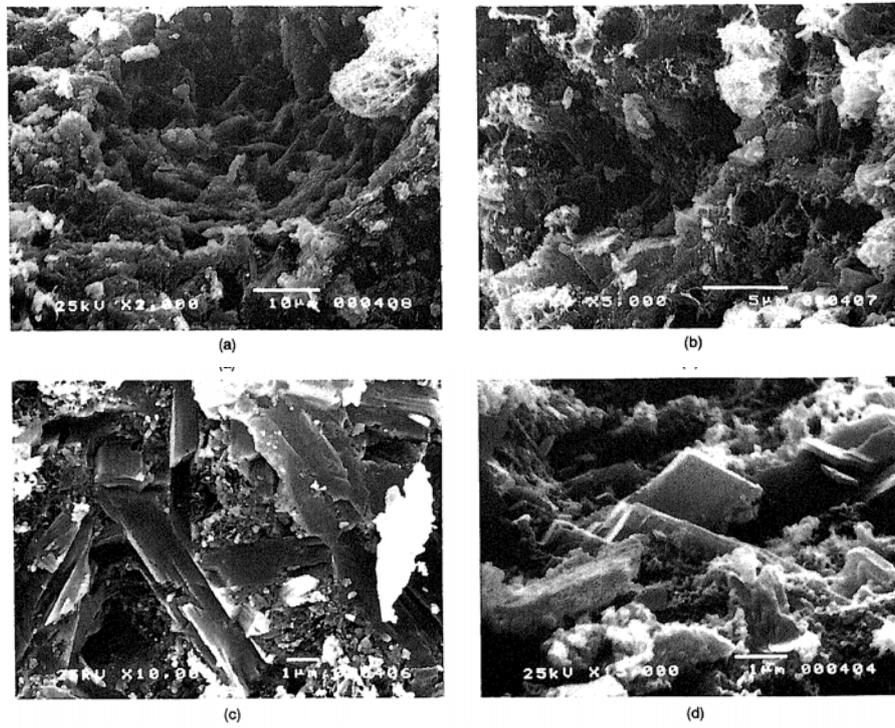
El sistema “yeso-cemento” (**Fig. 2-8**) también presenta una microestructura abierta donde los grandes cristales del yeso, de forma de varilla son evidentes (a). Entre la red de cristales de yeso, se observa un material disperso más pequeño. A mayor aumento (b y c) se observa un material tipo aguja, al parecer, etringita, sobre placas hexagonales, característico de cristales de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .



**Fig. 2-8. Micrografías SEM. Pasta 75% yeso-25% cemento Portland. Edad 200 días curado en agua: (a) 2000x (b) 5000x (c) 5000x**

La mezcla “yeso-cemento Portland-humo de sílice = 75-20-5” se caracterizó por una microestructura mucho más densa (**Fig. 2-9** (a) y (b)), donde la red de cristales de yeso no es fácilmente observable. Para aumentos superiores (c y d) se observan cristales característicos de yeso envueltos con material de una

microestructura tímidamente indefinida, al parecer SCH. Este material, también tiende a llenar los espacios entre los cristales de yeso más grande. La etringita no es fácilmente detectable en el sistema.



**Fig. 2-9. Micrografías SEM. Pastas de 75% yeso-20% cemento Portland-5% humo de sílice después de 200 días de curado en agua: (a) 2000x (b) 5000x (c) 10000x; (d) 15000x**

El efecto de la composición de mezcla (en términos del contenido de humo de sílice) en los niveles de resistencia después de 3, 28 y 200 días de curado se describe según las siguientes tendencias.

- A 3 días de edad, las mezclas con más del 5% de humo de sílice son más débiles que las de yeso puro (cuya resistencia es de 17,5 MPa seca y 5,5 MPa húmeda); mientras que aquellas con menor cantidad de humo de sílice (es decir, una mayor cantidad de cemento Portland) tuvieron la misma resistencia o ligeramente mayor.
- A 28 días de edad, las mezclas con menos del 15% de humo de sílice fueron considerablemente más fuertes que las de yeso puro (cuya resistencia es de 16,5 MPa seca y 4,2 MPa húmeda); también, es notable el nivel de resistencia obtenida para la composición de la mezcla en el rango de 5% - 15% de humo de sílice.

- A 200 días de edad, la tendencia fue similar, y en este momento ya que el yeso puro se ha disuelto completamente y su resistencia se ha reducido a valor cero.

Como resultado de la presencia de SCH, la resistencia obtenida es la más alta (**Fig. 2-4**), y supera con creces la resistencia de una pasta de yeso puro. Esta influencia no se observa a los 3 días debido a que la hidratación de los silicatos cálcicos no avanza lo suficiente. Además, la razón de resistencia húmeda/seca después del curado húmedo es mayor en estas composiciones. Esto podría explicarse por el papel que los SCH juegan en la provisión de resistencia y tal vez por la influencia en la protección que pueden tener al envolver a los cristales de yeso. Hacen notar el alto nivel de la razón de resistencia “húmeda/seca” (hasta ~ 60%) a los 28 y 200 días, en comparación con el bajo nivel (~ 30%) del yeso puro a los 3 y 28 días y prácticamente sin resistencia para el yeso puro después de 200 días.

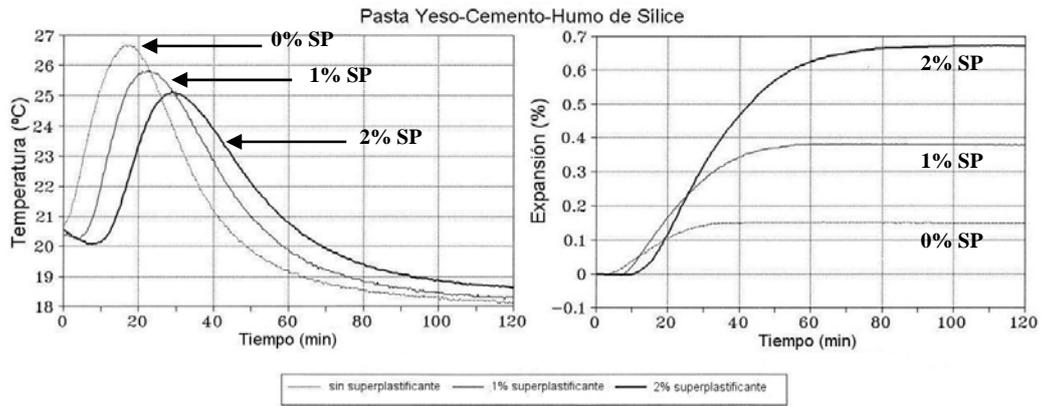
A mayores niveles de humo de sílice, al parecer no hay suficiente cemento para formar SCH y liberar Portlandita. Así pues, el silicato cálcico hidratado tiene aquí una limitación de influencia, en particular al extremo de un contenido de 25% de humo de sílice cuando no hay cemento Portland (es decir, el humo de sílice puede ser considerado como un filler no reactivo). Esto puede incluso conducir a valores más bajos de resistencia que el yeso puro, porque el material hidráulicamente es menos reactivo.

En el rango de bajo contenido de humo de sílice, la mezcla con 25% de cemento Portland es rica en silicatos de calcio, y los resultados por XRD, DTA y SEM indican claramente la formación de etringita. Así, en este rango de composición, la influencia positiva de los SCH es aparentemente contrarrestado por el crecimiento de etringita, que es suficiente para eliminar toda la resistencia después de 200 días de curado húmedo (**Fig. 2-4**).

Concluyen que la mejora en el comportamiento de mezclas con una composición óptima se explica en términos de la composición de los productos de hidratación y su microestructura. En estas mezclas se ha formado suficiente SCH para proporcionar un efecto de fortalecimiento resistente, así como una influencia de mitigación sobre la sensibilidad al agua, y al mismo tiempo, la presencia de humo de sílice previene la formación de etringita, que tuvo un efecto negativo en las mezclas ricas en cemento Portland.

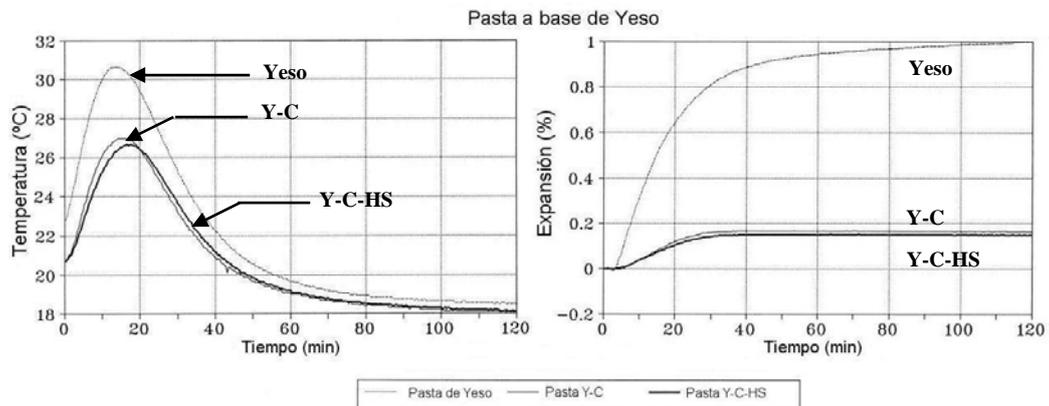
Esta es una gran ventaja, aunque también hay datos obtenidos recientemente por el investigador Kovler [55] que indican que la adición de humo de sílice en cantidades óptimas previene la formación de taumasita, que es mucho más "peligrosa" que la etringita.

Kovler [56-57], continuó trabajando con mezclas frescas de “yeso-cemento Portland-humo de sílice”, estudiando la reacción de fraguado y el efecto que tiene el uso de un superplastificante (SP) sobre el fraguado y el endurecimiento. La temperatura y la expansión de fraguado de la mezcla fresca son medidas por medio de un termopar y LVDT, respectivamente, de fabricación casera. Parte de sus resultados se ilustran en las figuras siguientes.



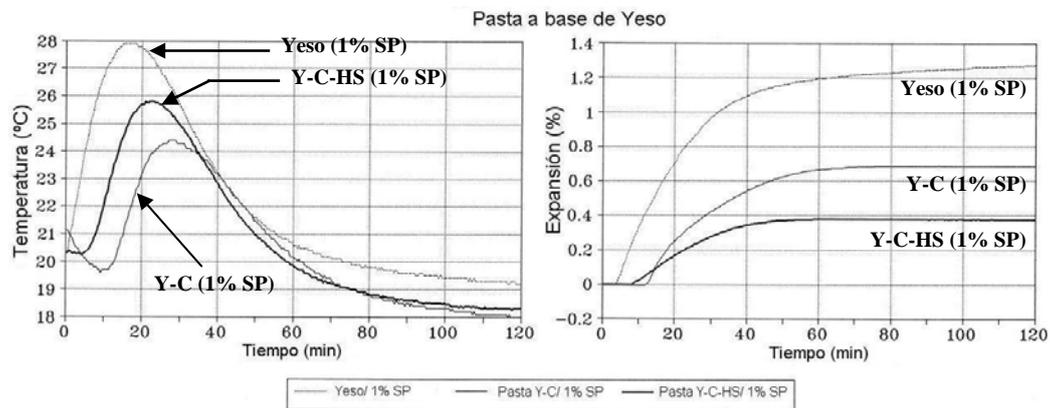
**Fig. 2-10.** T° y Expansión vs edad para mezclas “yeso-cemento-humo de sílice” con y sin superplastificante (SP)

La Fig. 2-10 muestra curvas de temperatura alcanzada durante el proceso de fraguado y el aumento de volumen o expansión para mezclas “yeso-cemento-humo de sílice” (composición 75:20:5) con diferentes cantidades de superplastificante. Ellas muestran tendencias similares a las del sistema yeso-cemento.

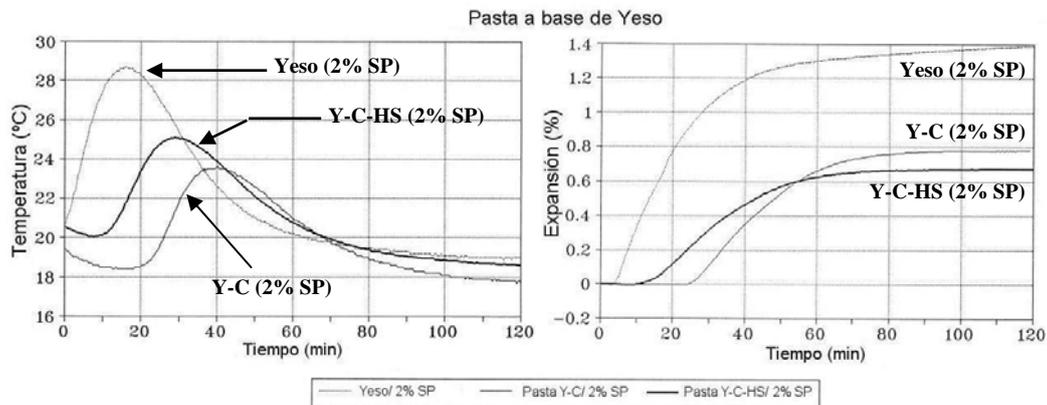


**Fig. 2-11.** T° y Expansión vs edad para diferentes mezclas a base de yeso, sin SP

La Fig. 2-11 muestra que no hay ninguna diferencia en el comportamiento de mezclas frescas de “yeso-cemento (Y-C)” y de “yeso-cemento-humo de sílice (Y-C-HS)” sin superplastificante.



**Fig. 2-12.** T° y Expansión vs edad para diferentes mezclas a base de yeso con 1% de SP.



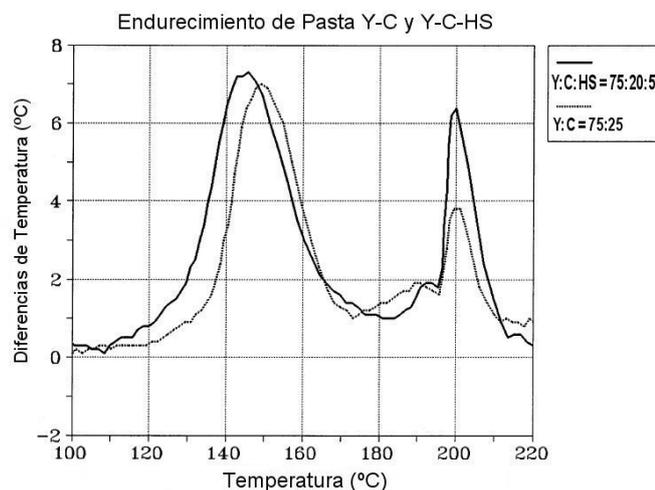
**Fig. 2-13.** T° y Expansión vs edad para diferentes mezclas a base de yeso con 2% de SP.

Sin embargo, la adición de súperplastificante hace que el comportamiento de estas mezclas cambie. La cantidad de súperplastificante tiene influencia en la temperatura y expansión, manifestando una menor expansión en las mezclas con menos súperplastificante. Esto puede verse claramente en la **Fig. 2-12** y **Fig. 2-13** en que se muestran las curvas de comportamiento para 1% y 2% de súperplastificante, respectivamente.

La explicación que da el investigador a la acción menos eficaz del súperplastificante en las mezclas de “Y-C-HS” es simple; la sustitución de un 5% del cemento del conglomerante por humo de sílice genera una mayor superficie específica por lo que se incrementa la adsorción de súperplastificante en las partículas sólidas. En consecuencia, la parte más activa del súperplastificante, que permanece en la fase líquida, disminuye.

También explica que el superplastificante tiene una influencia limitada en la temperatura y en la expansión de la pasta de yeso puro, pero cuando es adicionado a pastas de “yeso-cemento” ocasiona una disminución de la solubilidad inicial del hemihidrato retrasando el endurecimiento, y además, provoca un crecimiento muy significativo (de 4-5 veces) de la expansión. Concluye que el superplastificante actúa sobre la parte de cemento de la mezcla, de tal manera que se refleja indirectamente en la cristalización de sulfato de calcio dihidratado, en la liberación de tensiones internas en la microestructura formada y por lo que mejora las condiciones de desarrollo de una estructura hecha de cristales de yeso.

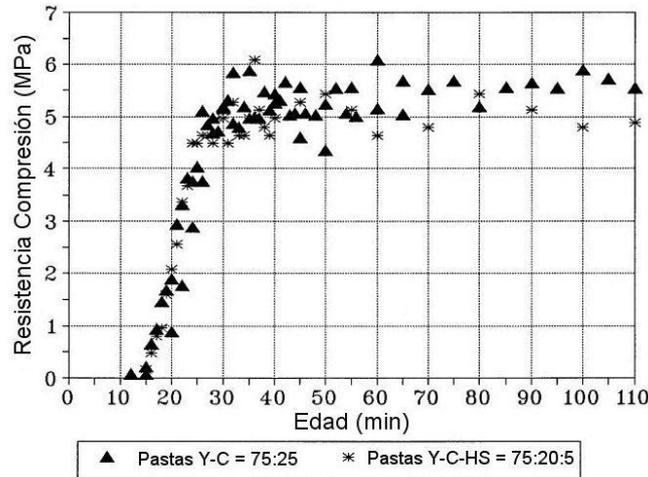
Este investigador realiza ensayos DTA a probetas de pastas endurecidas de “Y-C” y de “Y-C-HS” a distintos tiempos después de ensayar mecánicamente la probeta. Todas las mezclas fueron preparadas en una proporción “agua/conglomerante = 0,50”, con incorporación de súperplastificante del 2% en masa de la pasta. Las probetas las seca en metanol, y el DTA lo lleva a cabo a una velocidad de calentamiento de 10°C/min, hasta una temperatura de 250°C. El material de referencia fue anhidrita ó sulfato de calcio anhidro. Parte de los resultados obtenidos se visualizan en la figura siguiente.



**Fig. 2-14.** Diagrama DTA para mezclas Y-C y Y-C-HS a 1 semana de edad.

Se observan dos picos característicos de la descomposición de yeso (150°C) y del sulfato de calcio hemihidrato (200°C). A mayor tiempo de curado, mayor es la proporción entre el pico de yeso y el sulfato de calcio hemihidrato. Esto muestra que la cantidad de cristales de yeso crece con la edad en la pasta. La formación de etringita era esperable, sin embargo no se observan picos característicos a 125-130°C que denuncien su presencia, probablemente dichos picos estén solapados con el pico debido al paso de dihidrato a hemihidrato. Se detecta un muy pequeño pico a 190 °C, lo que podría indicar la presencia de monosulfato (sulfoaluminato cálcico hidratado), que habitualmente se ponen de manifiesto con la presencia de picos entre 190-195°C.

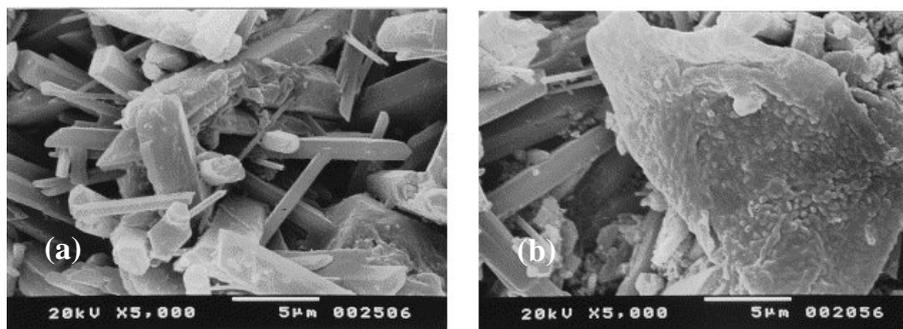
Respecto a la resistencia a compresión obtenida del ensayo de probetas cúbicas de 25 mm, curadas al aire a una temperatura de 20°C y una HR de 65%, se muestra en la siguiente figura.



**Fig. 2-15.** Resistencia a Compresión para pastas “Y-C” y “Y-C-HS”.

Se puede observar que la resistencia aumenta de manera similar para ambas mezclas “Y-C” y “Y-C-HS”. En otras palabras, la presencia de 5% de humo de sílice no tiene influencia sobre la resistencia mecánica a temprana edad, debido a que la reacción puzolánica entre humo de sílice, el hidróxido de calcio y el agua requiere más tiempo de curado.

Pastas “Y-C” y “Y-C-HS” de 4 hrs de edad fueron secadas a horno a 50°C y su microestructura se observó con la ayuda de SEM, lo que se observa en la siguiente figura.



**Fig. 2-16.** Micrografías de pastas Y-C (a) y Y-C-HS (b) a temprana edad (4 hrs).

Partículas de humo de sílice son absorbidas por las superficies de los grandes cristales característicos del yeso (b), pero no poseen una propiedad de microrrelleno. La microestructura se observa abierta y estable, como las de yeso-cemento (a).

El investigador concluye que la continuidad del trabajo es de gran importancia, ya que debe solucionar los problemas teóricos y aplicados. La importancia teórica para la comprensión y explicación de los mecanismos de fraguado e hidratación de un sistema tan complicado como la mezcla “Y-C-HS”. La importancia de aplicar formas de mejorar la resistencia al agua del conglomerante sin la pérdida de las ventajas del yeso (endurecimiento precoz, alta resistencia inicial, trabajabilidad mejorada, y un fino acabado).

Finalmente, De Milito [58], como parte de su tesis doctoral realiza una evaluación del comportamiento de pastas de yeso con cemento Portland y sílica activa (Y-C-SA) para revestimientos. Se plantea el objetivo de estudiar las propiedades de pastas de mezclas de Y-C-SA aplicadas en paneles de bloques de hormigón sometidas a dos condiciones: ambiente interno, protegido de la intemperie y en ambiente externo sujeto a las variaciones ambientales. De su estudio es posible extraer algunas conclusiones.

- La relación agua/conglomerante de 0,70 es ideal para la preparación de pastas empleadas en el estudio experimental. Esta relación es adecuada también para su aplicación.
- Es preciso adicionar superplastificante a las pastas cuando parte del yeso es sustituido por cemento portland. Lo mismo ocurre cuando parte del cemento es sustituido por sílice activa.
- En la pasta 100% de yeso y sometida a curado interno se observó una gran cantidad de hemihidrato en el difractograma. Este patrón ocurre tanto a los 28 como a los 180 días, lo que indica que no todo el hemihidrato se hidrata para formar sulfato de calcio dihidratado.
- En pastas Y-C (85-15 y 75-25) y en pastas Y-C-SA (85-10-5 y 75-20-5), incluso cuando absorben una mayor cantidad de agua se provoca una menor pérdida de peso en relación a pastas con 100% de yeso cuando se sumergen en agua.
- Los resultados obtenidos muestran que la adición de sílice activa a la mezcla que contiene cemento, reduce la formación de etringita, especialmente en revestimientos sujetos a humedad. Se observa también que la sílice activa no contribuye al aumento de resistencias. No se observan mejoras en la absorción de agua con la adición de sílice activa en las mezclas.
- Incluso, sustituyendo parte del yeso por cemento, y con la sustitución de parte del cemento por sílice activa, los revestimientos externos han presentado porosidades y pérdida de masa, pero no presentan agrietamientos, fisuras o ampollas antes de 180 días. Se nota la aparición de hongos de color

verde en los paneles, en las zonas donde permanece más largo tiempo la humedad (lugares con sombra).

Así, los resultados obtenidos permiten concluir una posible coexistencia de éxito entre el yeso y cemento.

### 2.13 Los conglomerantes cementicios ante las ingentes necesidades de edificación

#### 2.13.1 Condiciones iniciales

Algunos aspectos del mayor de los retos que tiene planteado el sector de la construcción a nivel cosmopolita es ayudar a solucionar las ingentes necesidades de habitabilidad básica que padece la humanidad, centrándose en lo que ello supone para la industria de materiales básicos de edificación. Necesidades que se traducen en la mayor demanda histórica de soluciones ex-novo y en el aumento exponencial de rehabilitación y mejoras de tugurios (viviendas irregulares, informales, subnormales o chabolas).

Al convocar el Día Universal del Hábitat (2007) la Secretaria General de UN - Hábitat, Anna Tibaijuka, anunciaba: “...2007 será el año en el que por primera vez, la mitad de la humanidad vivirá en ciudades. Esto marca el comienzo de una nueva era urbana. Y las previsiones indican que para 2030 esta proporción aumentará hasta los dos tercios. Las ciudades que crecerán en forma más rápida serán las del mundo en desarrollo y aún crecerán más rápidamente los tugurios” [59].

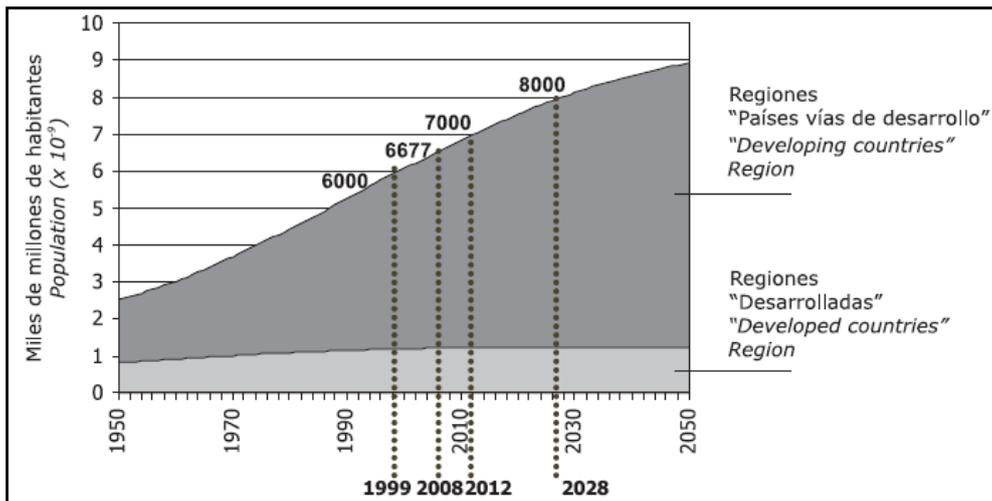


Fig. 2-17. Crecimiento población mundial según regiones (1950 - 2050).

Tal y como muestra la **Fig. 2-17**, entre 1999 y 2012 el mundo está experimentando un crecimiento neto de población de 1.000 millones de personas, pasando de 6.000 a 7.000 millones de habitantes. Resulta estremecedor pensar que desde el paleolítico hasta el año 1811 no se alcanzaron los primeros 1.000 millones de habitantes en la Tierra, y que ahora, en tan sólo 13 años, la población aumentará en otros mil millones, ello significa que durante el siguiente lustro habrá que alojar anualmente una media de 77 millones de nuevos seres, lo que adoptando la razón de “4,5” personas por vivienda, supondría tener que construir anualmente unos 17 millones de nuevas viviendas en todo el mundo, es decir, del orden de 680 millones de metros cuadrados (a razón de 40 m<sup>2</sup> por vivienda construida) o, lo que es equivalente, producir y utilizar más de 600 millones de metros cúbicos de materiales de construcción (unos 1.500 millones de toneladas anuales de materiales); y eso, sólo para atender la edificación de las nuevas necesidades generadas por el incremento vegetativo de población [60].

### 2.13.2 Cuantificación del déficit universal de viviendas

A comienzos del presente siglo XXI se estimó en 100 millones, las personas urbanas que no contaban con ningún tipo de cobijo, los llamados “sin techo”. Por otra parte, para atender a los nuevos hogares que se formarán, se requerirán según Naciones Unidas [61] unos 22 millones de viviendas anuales en los tres primeros lustros del presente siglo y 27 millones anuales en los siguientes 15 años, si se tienen en cuenta necesidades de reposición causadas por desastres naturales y desalojos forzados (ver **Tabla 2-8**).

**Tabla 2-8. Necesidades anuales de nuevas viviendas urbanas, de 2000 a 2030.**

Continentes	Años 2000 a 2015 (En miles de viviendas)	Años 2015 a 2030 (En miles de viviendas)
África	3.941	6.169
Asia	14.513	18.043
América Latina y Caribe	3.081	3.113
Total De Los Tres Continentes / Total	21.535	27.325

### 2.13.3 La tugurización de la población

No resulta fácil encontrar datos contrastables sobre la situación del hábitat de los más pobres, menos aún en las áreas rurales, por ello, son significativos los que aporta la **Tabla 2-9**, en la que destaca el dato de población urbana “tugurizada” que en el año 2001 se fijó en 924 millones de personas, lo que suponía el 31,6% de la población urbana mundial y que llegaba hasta el 78,2% en los países menos desarrollados [62].

**Tabla 2-9. Población que vive en tugurios (Estimaciones de UN HABITAT, 2003 [61]).**

Áreas de estudio <i>Area</i>	Población total (en millones) <i>Total population (in millions)</i>	Población urbana (total en millones y en %) <i>Urban population (total in millions &amp; in %)</i>		Población en tugurios urbanos (total en millones) <i>Population in urban slums (total in millions)</i>	% de población urbana en tugurios <i>% of urban population in slums</i>
		2001	2001		
<b>Años / Years</b>	<b>2001</b>	<b>2001</b>	<b>2001</b>	<b>2001</b>	<b>2001</b>
Mundo (total) <i>World (total)</i>	6.134	2.923	43,5	924	31,6
Regiones desarrolladas (MD) <i>Developed regions (DW)</i>	1.194	902	73,7	54	5,9
Regiones en vías de desarrollo (PVD) <i>Developing regions (DC)</i>	4.940	2.022	35,0	870	43,0
Países menos desarrollados <i>Least developed countries</i>	685	179	20,8	140	78,2
Norte de África <i>North Africa</i>	76			21	
Países sub-saharianos <i>Sub-Saharan countries</i>	231			166	

Los programas de mejora y rehabilitación de tugurios ganan adeptos por su utilización como herramienta de lucha contra la pobreza e impulso para sentar bases del desarrollo productivo. Los llamados 'Objetivos del Milenio' fijan como meta el mejorar sustancialmente, antes de 2020, las condiciones de vida de por lo menos 100 millones de personas alojadas en tugurios. Ello supone un reto prácticamente imposible de conseguir sin la industria, pero absolutamente inabordable sin la participación real de estos pobladores. La convergencia entre la participación ciudadana y el concurso de la industria lleva a la necesidad ineludible de perfilar nuevos enfoques de futuro [63].

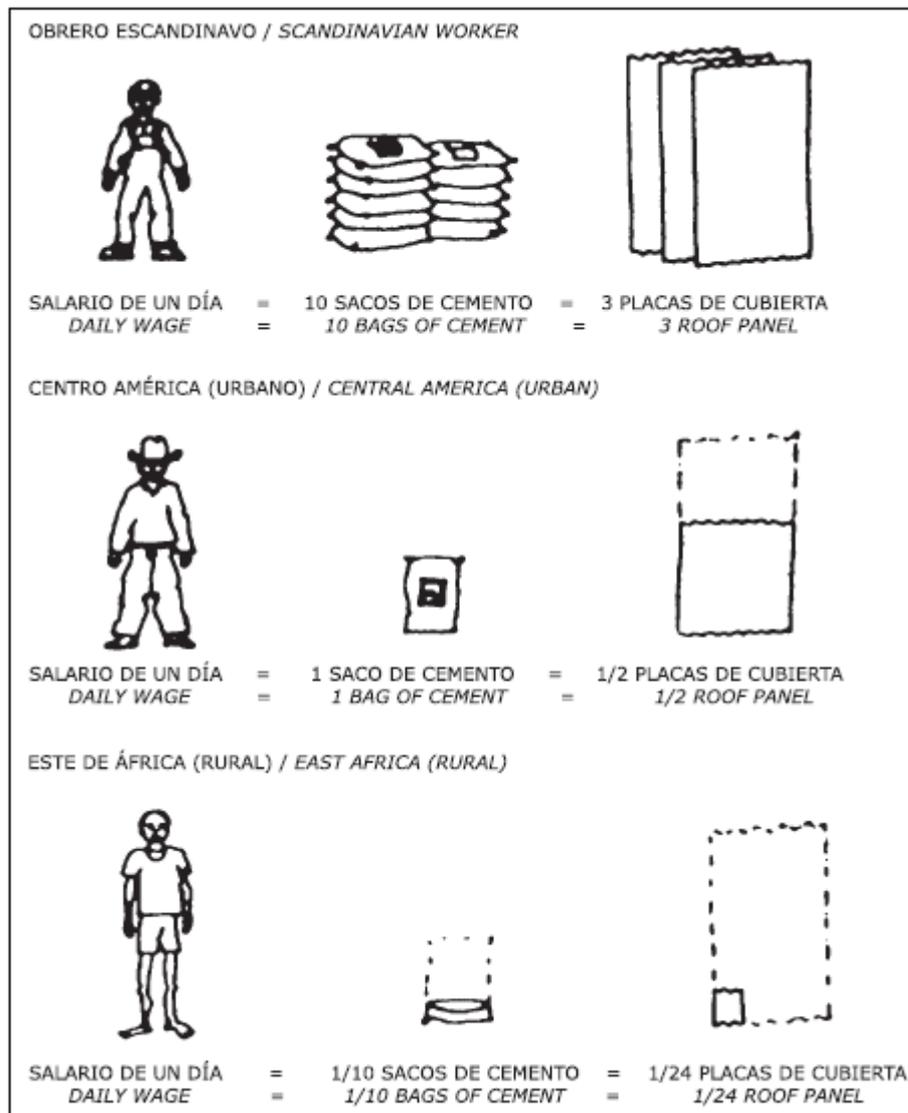
#### 2.13.4 “Bajo coste” y “vivienda mínima”

No es factible acotar de forma global que entender por 'bajo coste' de construcción de una vivienda, entre otras razones, por la imposibilidad de llegar a consensos universales sobre lo que es o no una 'vivienda mínima'.

Sin otro referente de legitimación que la práctica profesional de quien escribe, se adopta el criterio de definir 'bajo coste' por metro cuadrado de superficie construida, a valores situados entre dos y tres salarios mínimos mensuales. Por otra parte, en lo relativo a la superficie, las propuestas de 'vivienda mínima' suelen oscilar entre 25 y 50 m<sup>2</sup> construidos, en una primera etapa, como unidad de vivienda semilla y de crecimiento posterior progresivo.

Siendo muy importante referir el coste de la “vivienda mínima” al número de salarios mínimos mensuales, también es conveniente, como un patrón de medida más universal y representativa, el precio de mercado del saco de cemento, *pues puede que sea la unidad de referencia más homogénea del sector construcción*, de cuyo empleo resultan algunas conclusiones sumamente impactantes.

Hace algo más de dos décadas, el 'Informe de Conclusiones de la Primera Consulta sobre la Industria de los Materiales de Construcción', organizada por Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial [64], presentaba (ver Fig. 2-18) la equivalencia, en ese momento (1985), entre el salario mínimo interprofesional por día de trabajo y el número de sacos de cemento o de placas onduladas de cubierta que se podían adquirir con el mismo.

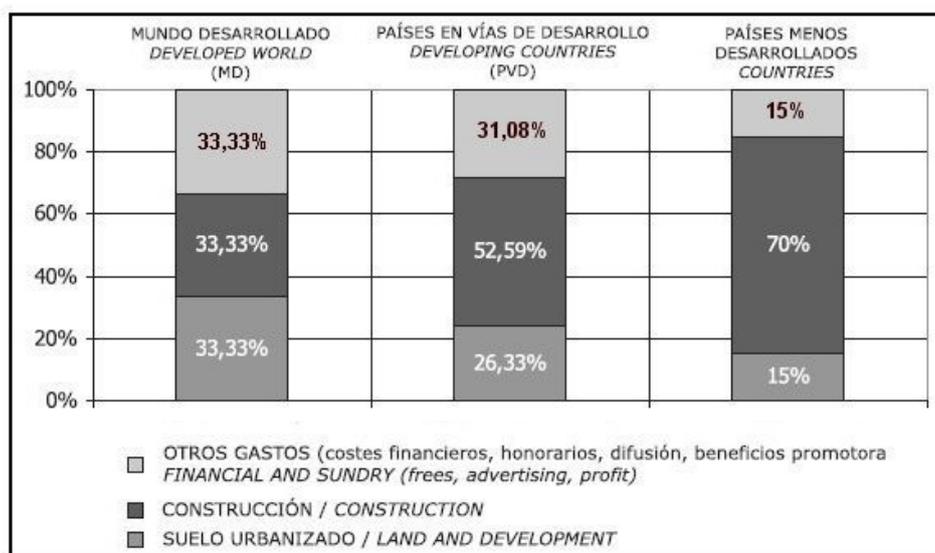


**Fig. 2-18.** Reproducción de una diapositiva de la presentación aludida. ONUDI - 1985.

De estas abultadas diferencias pueden deducirse, cuando menos, tres conclusiones parciales:

- Queda en evidencia las desigualdades en las remuneraciones de trabajadores ante trabajos similares, lo que puede justificar el difícil acceso a las soluciones habitacionales de los más pobres en el mundo moderno.
- Que la industria cementera ha evolucionado poco, en la razón “prestaciones/precios” de mercado, lo que supone una excepción entre los sectores productivos industriales tradicionales.
- Que los técnicos en los países en vías de desarrollo (PVD) deberían asignar al cemento como conglomerante, según los contextos de su utilización, un empleo de mayor responsabilidad estructural y de diseño mejor ajustado, que los que se le otorgan en la actualidad; especialmente en los casos de construcción de viviendas económicas.

Tratando de desglosar los costes totales de edificación para facilitar posteriores comparaciones, de acuerdo a lo que es usual hacer, se asumirán tres tipos de costes: “Terreno y urbanización”, “Construcción (vivienda)” y “Costes financieros, utilidades y otros”. Esto nos lleva a presentar la descomposición de costes de construcción basados en una investigación realizada por Salas y Oteiza [65], que se indican en Fig. 2-19 siguiente.



**Fig. 2-19. Cuantificación aproximada de la repercusión del coste de construcción en el precio final de viviendas mínimas de protección oficial.**

Los valores porcentuales de la primera columna corresponden a países del mundo desarrollado (MD), caso concreto de las poblaciones del Sur de Madrid. La columna central, obedece al seguimiento de la construcción de cuatro

proyectos de viviendas con características similares; de entre 100 y 200 viviendas por proyecto, de 45 a 60 m<sup>2</sup> construidos por vivienda, realizadas entre los años 1995 y 2000 en Brasil, Chile, Colombia y El Salvador. En el caso de la columna tercera correspondiente a los “Países menos desarrollados”, los datos adoptados no tienen más justificación que la experiencia en proyectos de cooperación para el desarrollo de los investigadores citados precedentemente.

Fundamentándose en los antecedentes de la **Fig. 2-19**, a su vez, es posible desglosar la partida “construcción” en: “materiales”, “mano de obra” y “otros”, para las que se plantean las proporciones indicadas en la **Tabla 2-10**.

**Tabla 2-10. Factores proporcionales. Desglose de la partida “Construcción” de vivienda**

Desglose	Mundo desarrollado	Países en vías de Desarrollo	Países menos Desarrollados
<b>Materiales</b>	2/5	3/5	7,0/10
<b>Mano de obra</b>	2/5	1/5	1,5/10
<b>otros</b>	1/5	1/5	1,5/10

Conforme con lo anterior, se deduce que la repercusión en la demanda de “Materias primas, materiales elaborados, componentes y subsistemas” presenta valores extremadamente diferenciados: 13,33%, 31,55% y 49,00% para los casos escogidos. Queda en evidencia que la repercusión del ítem “Construcción” en el coste final de la obra es mayor cuanto menor es su presupuesto (**Fig. 2-19**) y que el ítem “Materiales” también aumenta cuanto menor es el presupuesto total y el contexto en el que se realice.

### 2.13.5 El consumo de cemento y la importancia del sector 'informal'

En América Latina, se intuía desde hace décadas, aunque se ha cuantificado recientemente, que el consumidor mayoritario de materiales básicos de edificación es el llamado sector informal, lo que también ocurre en gran parte de los PVD. Valgan como muestra los datos que aporta la Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP [66], asegurando que desde 1989 hasta la fecha, el consumo de cemento en Brasil es siempre superior en el sector informal que en el formal y atribuye los incrementos sostenidos de ventas desde 1995, al aumento del consumidor hormiga que consume más del 60% del cemento producido.

Por su parte, Cemex informaba en México (2007), a través del Director de Comunicaciones Externas de Apasco, que “...ratifica su compromiso con la autoconstrucción ofreciendo al consumidor productos elaborados con la más alta tecnología y calidad, lanzando al mercado su nuevo producto 'Cemento Tolteca' en presentación de bolsas de 25 kilogramos. Ello hay que enmarcarlo en el reconocimiento del crecimiento del consumo hormiga de cemento que actualmente supera el 45% del mercado cementero del país”. Cabe mencionar que el 70% del total de la producción mexicana de cemento se comercializa

embolsado, lo que para Cemex “*demuestra que la autoconstrucción es muy fuerte y nos aleja de las características del mercado de los EEUU, en el que cerca del 90% del cemento se vende a granel*”.

En general, la lógica de los costes de construcción en los países en desarrollo (PVD) no es reflejo de lo que ocurre en los países industrializados (MD), incluso en los primeros, las diferencias entre la repercusión de los materiales en los sectores “formal” e “informal” llegan a ser extraordinarias. Los materiales importados no distinguen en los costes de producción aunque sí, en sus precios si se destinan o no al MD o al los PVD, todo lo contrario. H. Houben [67] cita trabajos del Banco Mundial en los que se constata que en la mayoría de los países africanos, el precio del cemento para los constructores es dos y tres veces superior al pagado por el Estado, y que en el mercado 'informal' del mismo país, el precio llega a ser cuatro veces mayor.

Según datos del US Geological Survey [68] recogidos en la **Tabla 2-10**, puede deducirse que los PVD, son los grandes productores y consumidores de cemento del mundo, con más del 75% de la producción mundial.

**Tabla 2-10. Producción de cemento en millones de toneladas según regiones.**

	2000	2001	2002 estimado (estimate)
España / Spain	38,150	40,512	42,451
Subtotal Unión Europea Subtotal European Union	193,106	192,396	194,461
Subtotal Iberoamérica Subtotal Latin America	118,807	116,347	115,212
China / China	597,000	661,040	704,720
India / India	95,000	100,000	100,000
Estados Unidos United States	89,510	90,450	91,266
<b>TOTAL (aproximado.) TOTAL (approximate)</b>	<b>1 650,000</b>	<b>1 730,000</b>	<b>1 800,000</b>

Conforme a los datos anteriores, China, India junto con los países latinoamericanos producen y consumen más de la mitad del cemento mundial.

Ateniéndose a los datos del Banco Mundial [69] sobre el reparto porcentual del total de 6.055 millones habitantes en el 2002: Asia suponía el 60,85%; Africa el 12,90%; América Latina el 8,60% y los Países Desarrollados el 19,6% y haciendo uso de los valores de producción mundial de cemento facilitados por Oficemen para el mismo año, se ha elaborado la **Tabla 2-11**, en la que se constata que la razón de “producción de cemento/población”, refleja con nitidez los niveles de desarrollo y dinamismo económico de las diferentes áreas

geográficas a nivel macroeconómico de las seis regiones contempladas en la tabla.

**Tabla 2-11. Producción de cemento según regiones.**

Región (Año 2002) Region (Year 2002)	% DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CEMENTO (A) % OF WORLD CEMENT PRODUCTION (A)		% DE LA POBLACIÓN MUNDIAL (6.055 M) (B) % OF WORLD POPULATION (6.055 million) (B)		RELACIÓN: (A) / (B) PRODUCCIÓN / POBLACIÓN RATIO: (A) / (B) PRODUCTION / POPULATION
Europa (Oriental y Occidental) (Eastern & Western) Europe	19,0%	25,62%	Europa Central y Oriental / Central & Eastern Europe 406 M	19,60%	1,307
América del Norte North America	6,62%		EEUU / USA 292,6 M Canadá / Canada 31,6 M		
Oceania Oceania	0,0046%		Oceania / Oceania 30,4 M	0,004%	1,150
Asia Asia	63,0%		Asia Meridional / Southern Asia 1.503 M Asia Oriental / Eastern Asia 1.310 M	60,85%	1,035
Latinoamérica Latin America	6,38%		Latinoamérica / Latin America 540 M	8,60%	0,737
África Africa	5,0%		África Africa 784 M	12,90%	0,388

Se constata en la **Tabla 2-11** que Latinoamérica (0,737) se encuentra en una posición equidistante de Asia (1,035) y de África (0,388).

Por otra parte, relacionando los datos de necesidades de nuevas viviendas anuales proporcionadas por la **Tabla 2-8**, con la demanda de materiales de construcción (40 m<sup>2</sup>/vivienda; 150/68 toneladas/m<sup>2</sup>; con una estimación de 25% de demanda de cemento), se llega a la estimación que en lo inmediato, la producción de cemento en conjunto de China, India y Latinoamérica, debería aumentar en un 50% anual. Esto no contempla el crecimiento normal de la demanda, que debería aumentar de acuerdo al crecimiento económico de los países.

De los 209 países que conforman el mundo, 113 producen cemento con una capacidad del orden de 2.740 millones de toneladas, de lo que puede deducirse que casi un centenar de países no cuentan con plantas productoras de cemento y que la gran mayoría de ellos o son estados pequeños o se encuentran entre los que ostentan los Índices de Desarrollo Humano (IDH) más altos en la lista del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

### 2.13.6 A modo de conclusiones

Es lógico pensar en que los gobiernos fomenten y apoyen el suministro de materiales básicos de construcción de producción local, asequibles y duraderos, por lo que se plantean las siguientes propuestas concretas, las cuales han de entenderse en el contexto de un marco global:

- Hay una creciente demanda de conglomerante (cemento) que la industria no debe de satisfacer sino está vinculada a las necesidades de un desarrollo sostenible y compatible con el medio ambiente. En este sentido, también hay una urgente necesidad de reducir las emanaciones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y disminuir el consumo de energía de producción.
- En este marco, se abren potenciales oportunidades para desarrollar nuevos conglomerantes cementicios, no convencionales que no aumenten los problemas medioambientales y que además, ayuden o contribuyan con soluciones; sin dejar de lado la ingente necesidad de acceder a su uso a menor coste.
- Alentar y apoyar el establecimiento y la expansión de pequeñas industrias locales dedicadas a la producción de nuevos materiales de construcción, así como la expansión de su comercialización recurriendo a incentivos legales y fiscales, concesión de créditos, proyectos de investigación aplicada y campañas de información.
- Fomentar el intercambio de información sobre tecnologías apropiadas de construcción: sustentables, racionales, asequibles, accesibles y fáciles de transferir.
- Crear mecanismos para la producción y distribución comercial de nuevos materiales de construcción básicos destinados a programas de autoconstrucción asistida.
- Alentar la aceptación, y en su caso, la elaboración de normas y especificaciones que permitan el empleo de nuevos materiales y elementos, producidos por el sector “informal” y englobar sistemáticamente estos materiales y elementos en las reglamentaciones de construcción, mediante el concepto de niveles de exigencia.
- Facilitar, en proyectos de construcción estatales, el empleo de materiales de construcción producidos por el sector no estructurado.

Pese a los muchos años transcurridos, se estiman vigentes en plenitud las recomendaciones de ONUDI [64], y es posible concitar el debate y la reflexión entre investigadores y técnicos del sector sobre los grandes retos que ha de afrontar la industria de materiales básicos de edificación ante las ingentes necesidades actuales.

---

## **Capítulo 3. DESARROLLO DEL PLAN EXPERIMENTAL**

---



### 3. DESARROLLO DEL PLAN EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiales Empleados

##### 3.1.1 *Cemento*

Para la elaboración de las mezclas se han utilizado distintos tipos de cemento, dependiendo de los ensayos realizados, a los cuales se irá haciendo mención en cada capítulo en que se describan las distintas realizaciones. A continuación se enumeran los cementos utilizados:

- (Tipo A): Cemento Portland Blanco tipo BL I 52,5R. Suministrado por la empresa Cemex (Buñol-Valencia)
- (Tipo B): Cemento Portland Blanco tipo BL II/B-LL 42,5R. Suministrado por la empresa Cemex (Buñol-Valencia)
- (Tipo C): Cemento Portland Gris tipo CEM II/A-L 42,5 R. Suministrado por la empresa Valderrivas (El Alto - Madrid).
- (Tipo D): Cemento Portland Gris Tipo CEM II/A-V 42,5R. Suministrado por la empresa Asland-Lafarge.
- (Tipo E): Cemento Portland Gris tipo CEM I 52,5 R. Suministrado por la empresa Lafarge procedente de la fábrica de Moncada.
- (Tipo F): Cemento Portland Gris tipo CEM II/A-LL 42,5 R. Suministrado por la empresa Cemex (Buñol-Valencia).
- (Tipo G): Cemento Portland Gris CEM I 52,5R. Suministrado por la empresa Cemex (Buñol-Valencia).

- (Tipo H): Cemento Portland Gris tipo CEM I 52,5 R. Suministrado a granel, por la empresa Asland-Lafarge.
- (Tipo I): Cemento Portland Gris CEM I 42,5 SR. Suministrado a granel, por la empresa Cemex.

La composición química de los cementos utilizados se detalla en la [Tabla 3-1](#).

**Tabla 3-1. Composiciones químicas de los cementos utilizados (%).**

Tipo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P.F.	R.I.	C <sub>3</sub> A
(A) BL I 52,5 R	21,95	4,64	0,28	66,91	0,96	3,02	0,23	n.d	1,96	n.d	11,82
(B) BL II 42,5 R	18,96	2,33	0,19	63,92	0,36	3,62	0,98	0,13	8,63	0,15	5,85
(C) CEM II 42,5 R	20,11	4,82	3,04	62,05	1,68	3,39	1,05	0,12	2,82	0,88	7,64
(D) CEM II 42,5R	22,82	7,18	4,74	57,40	1,39	2,77	1,06	0,15	1,67	n.d	11,02
(E) CEM I 52,5 R	20,14	4,62	3,07	62,91	1,39	3,40	0,95	0,15	2,22	n.d	7,05
(F) CEM II 42,5R	20,21	4,94	2,85	62,87	1,05	3,54	0,92	0,10	3,02	0,95	8,27
(G) CEM I 52,5 R	19,90	5,38	3,62	63,69	2,14	3,66	1,17	0,10	2,02	0,90	8,14
(H) CEM I 52,5 R	19,80	4,90	3,10	62,50	1,60	3,90	0,88	0,35	3,70	n.d.	7,75
(I) CEM I 42,5SR	21,60	3,83	4,60	64,10	1,15	3,01	0,73	0,22	1,40	n.d.	2,38

n.d. no determinado; P.F. pérdida al fuego; R.I. residuos incombustibles

### 3.1.2 Filler Calizo

Este fue tamizado por la malla de 80µm y de acuerdo con ensayo de termogravimetría, el contenido en carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>) es del 87,8%, condiciones adecuadas para poder ser adicionado al cemento [70].

### 3.1.3 Yeso y Escayola

Como “Yeso Grueso” o simplemente “Yeso”, se ha utilizado “Yeso Rápido Iberplast”, sin aditivos reguladores de fraguado, fabricado por la empresa Iberplast S.A. en conformidad a la norma UNE 13279-1 [71]. Este yeso posee un índice de pureza mayor al 75%, retención en el tamiz de 200 micras, menor al 50%, agua combinada máximo de 6%, un pH mínimo de 6 y se asegura una resistencia a flexotracción mayor a 2,0 MPa a 28 días.

Como “Escayola”, se ha utilizado “Yeso Iberyola (Escayola E-35)”, que es un conglomerante a base de yeso, tipo E-35 fabricado por la empresa IberPlaco S.A. (Soneja) en conformidad a la norma UNE-EN 13279-1 [71]. Este yeso posee un índice de pureza mayor al 92%, retención en el tamiz de 200 micras

menor al 1%, agua combinada máximo de 7%, un pH mínimo de 6 y se asegura una resistencia a flexotracción mayor a 3,5 MPa a 28 días.

### 3.1.4 Ceniza Volante

La ceniza volante utilizada es de clase F, del grupo de las cenizas volantes silíceas o silico-aluminosas, posee un peso específico de 2,52 g/cm<sup>3</sup> y fue suministrada por la central termoeléctrica de Andorra-Teruel (ver Fig. 3-1). La composición química está reflejada en la Tabla 3-2 y la granulometría, se indican en la Fig. 3-2 tanto para la ceniza volante original (CV) que posee un tamaño medio de partícula de 20 µm como para la ceniza volante molida (CV(m)) obtenida en molino de bolas de alto impacto Mill2 de Gabbrielli, que reduce el tamaño medio de las partículas a 15 µm.

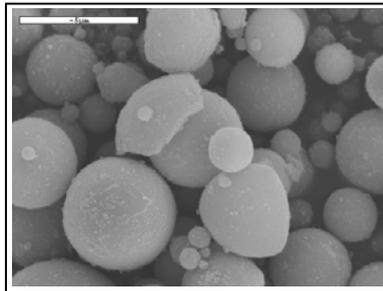


Fig. 3-1. Ceniza volante de la central termoeléctrica de Andorra

Tabla 3-2. Composición química de la CV utilizada (% en peso)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SrO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	*PF
38,85	24,52	19,63	10,52	1,20	0,47	1,17	0,22	0,10	1,44	0,32	1,56

\* pérdida al fuego.

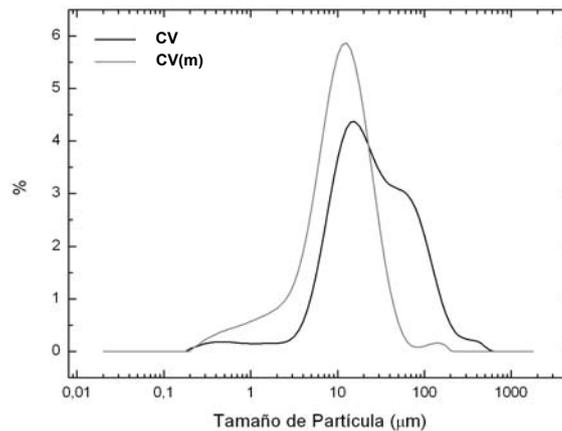


Fig. 3-2 Granulometrías de la CV (CV): original y CV(m): molida).

### 3.1.5 Árido fino

Como componente de los morteros que se incluyen en este trabajo se han utilizado árido silíceo de diferentes procedencias y tamaños. Con ellos se han establecido las siguientes granulometrías, que se indican en la **Tabla 3-3**, utilizadas en las distintas mezclas, según se indicará en los capítulos respectivos.

**Tabla 3-3. Granulometrías Arenas utilizadas. Retenido Acumulado [%]**

Malla [mm]	Límites Norma UNE-EN 196-1	Arena Normsand	Tipo A:		Tipo B:	
			25%AG <sub>1</sub> +35%AI+40%AF <sub>1</sub>		70%AG <sub>2</sub> + 30%AF <sub>2</sub>	
2,00	0	0,1	3,0		0,0	
1,60	7 ± 5	6,4	10,1		0,1	
1,00	33 ± 5	37,2	35,9		31,8	
0,50	67 ± 5	67,9	76,7		66,9	
0,16	87 ± 5	89,3	96,7		98,0	
0,08	99 ± 1	99,8	99,4		99,6	
(<0.08)		100,0	100,0		100,0	
<b>Módulo Finura</b>		<b>3,01</b>	<b>3,22</b>		<b>2,96</b>	

Normsand: Arena normalizada ; AG<sub>1</sub>: Arena Gruesa 1  
 AG<sub>2</sub>: Arena Gruesa 2 ; AI: Arena Intermedia  
 AF<sub>1</sub>: Arena Fina 1 ; AF<sub>2</sub>: Arena Fina 2

Las diferentes combinaciones se han utilizado dependiendo del suministro temporal de arenas, intentando en la medida de lo posible, que el módulo de finura fuese similar en todo los casos. La referencia, es el módulo de finura de la arena "Normsand", la que se ajusta a los límites granulométricos de la Norma EN 196-1 [72]. Esta arena fue suministrada por la empresa Normensand (Beckum-Alemania) y las otras arena, suministradas por la empresa Caolines Lapiedra (Valencia).

### 3.1.6 Agua

En la preparación de pastas y morteros con cemento Blanco se utilizó el agua potable de la red de Valencia, cuyo análisis promedio se indica en la **Tabla 3-4**.

**Tabla 3-4. Análisis promedio de agua potable**

Cloruros(mg/l)	* Ca y Mg	Sulfatos(mg/l)	Conductividad (µS/cm)	pH
93	480	298	939	7,88

\* expresado como mg/l de CaCO<sub>3</sub>.

En la preparación del resto de las probetas, se utilizó agua desionizada así como para todo proceso de curado bajo agua.

### 3.1.7 Aditivo

En ocasiones, cuando el rápido fraguado hace escaso el tiempo para una buena elaboración de probetas o para estudiar algunas propiedades en pastas o morteros, se utiliza el superplastificante Melment L240 de la empresa Degussa Construction Chemicals España S.A. En el presente informe se indican las experiencias en que fue utilizado. En la **Tabla 3-5** se observan sus características técnicas.

**Tabla 3-5. Características técnicas del superplastificante**

<b>Función principal</b>	Superplastificante y Reductor de agua en el hormigón
<b>Función secundaria</b>	Acelerante de endurecimiento
<b>Efecto secundario</b>	Riesgo de disgregación a dosificación elevada
<b>Aspecto físico</b>	Líquido azul grisáceo
<b>Densidad (20°C)</b>	1.190±0,03 gr/cm <sup>3</sup>
<b>pH (20°C)</b>	8 – 11,5
<b>Contenido en cloruros</b>	≤ 0,1%

### 3.1.8 Catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC)

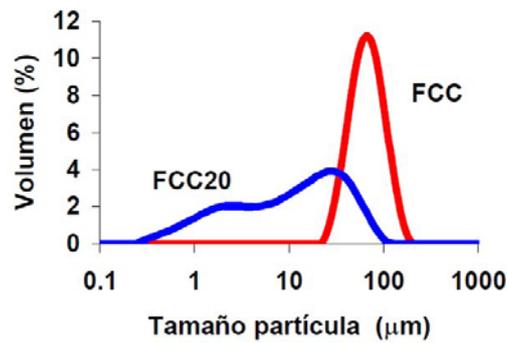
El craqueo (o cráquing) constituye el proceso básico utilizado para aumentar el rendimiento y la calidad en la obtención de las gasolinas (naftas). En dicho proceso, las moléculas orgánicas de elevado peso molecular se rompen, para dar moléculas más pequeñas y estables, que tienen punto de ebullición más bajo y que constituyen la gasolina del craqueo. El residuo de catalizador de craqueo catalítico se trata de un material silicoaluminoso de composición parecida al metacaolín, con unos porcentajes de óxidos de silicio y aluminio cuya suma está sobre el 90% [73], lo que lo transforma en un material puzolánico de alta reactividad, deseable para mejorar propiedades del conglomerante resultante [74]. El catalizador (FCC) ha sido suministrado por la empresa BP OIL España S.A. (Castellón) y su composición, se recoge en la Tabla siguiente.

**Tabla 3-6. Composición química del FCC utilizado (% en peso)**

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	*PF
48,2	46,0	0,95	<0,01	<0,01	-	<0,01	0,50	1,50

\* pérdida al fuego.

El FCC fue molido en molino de bolas para incrementar su reactividad (FCC20) que reduce drásticamente su tamaño, ha sido utilizado en algunas ocasiones como puzolana altamente reactiva para comparar resultados de expansión o resistencia mecánica obtenida con ceniza volante como puzolana tradicional. Su granulometría se indica en la figura siguiente [73].



**Fig. 3-3.** Granulometría del FCC utilizado

## 3.2 Equipos y procedimientos utilizados

### 3.2.1 Proceso de amasado

Para la elaboración de morteros se utilizó una amasadora de la marca Ibertest, modelo IB32-040E, fabricada el año 2000, activada por corriente eléctrica trifásica de 380V y 0,25 Watt. La amasadora tiene un recipiente de acero inoxidable de 5 litros de capacidad con la forma que se muestra en la [Fig. 3-4](#), la que queda fijada firmemente al bastidor durante el amasado, y una pala de acero inoxidable, que cumple con las indicaciones que al respecto se dan en la norma EN 196-1 [72], la cual es accionada por el motor eléctrico a velocidades controladas, con movimientos de rotación sobre su propio eje, y con un movimiento de traslación tipo planetario alrededor del eje del recipiente, ambos, en sentidos opuestos. Se dispone de dos velocidades de rotación: lenta de  $140 \pm 5$  r.p.m. y rápida de  $285 \pm 5$  r.p.m., y se dispone de dos velocidades de movimiento planetario: lenta de  $62 \pm 5$  r.p.m. y rápida de  $125 \pm 5$  r.p.m.



**Fig. 3-4.** Amasadora utilizada en la preparación de probetas de mortero

### 3.2.2 Moldes de probetas

**a) Probetas de Mortero para ensayos de Flexotracción y Compresión.** Para la elaboración de las probetas se utilizan moldes de acero con compartimentos horizontales para la preparación simultánea de tres probetas, con un espesor de pared de 10 mm y una placa base de similar espesor, con un sistema de sujeción que permite mantener fijos los compartimientos durante el proceso de elaboración y compactación (**Fig. 3-5 (a)**). Las dimensiones de cada compartimiento son de 40mm de profundidad, 40mm de ancho y 160mm de longitud. Para el llenado de los moldes con mortero de cemento (control), se utiliza una tolva metálica de 10 mm de espesor y 30 mm de altura bien ajustadas a las paredes del molde. La sujeción de todo el sistema de moldes previo a la compactación, se realiza con un marco metálico abierto y plano de 5 mm de espesor que cubre el perímetro de la tolva y que permite afianzar todo el sistema a la mesa compactadora mediante la presión provocada por pernos colocados en cada extremo. Para el llenado de los moldes con morteros con yeso, debido al poco tiempo que se dispone antes del inicio del fraguado, no se utiliza la tolva metálica porque ella impide una rápida colocación del mortero. Por ello, solo se utiliza el marco metálico abierto y plano de 5 mm de espesor que se coloca cubriendo el perímetro del molde.



(a)

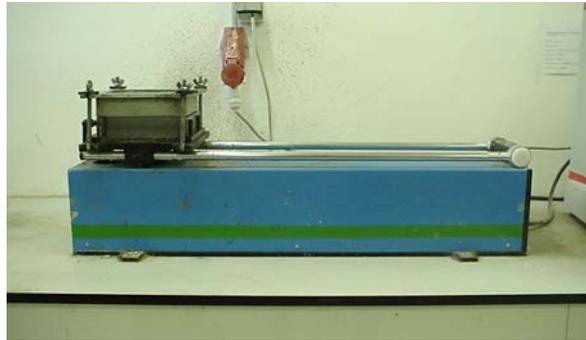


(b)

**Fig. 3-5. Moldes probetas de Mortero para ensayos de Flexotracción-Compresión (a) y para ensayos de Expansión-Retracción (b)**

**b) Probetas de Mortero para ensayos de Expansión-Retracción:** Para la elaboración de las probetas, se utilizan moldes de acero con compartimentos horizontales para la preparación simultánea de cuatro probetas, con un espesor de pared de 10 mm y una placa base de similar espesor con un sistema de sujeción que permite mantener fijos los compartimientos durante el proceso de preparación y compactación (**Fig. 3-5 (b)**). Las dimensiones del interior de cada compartimiento son de 25mm de profundidad, 25mm de ancho y 287mm de longitud. En cada uno de los cabezales extremos, las paredes tienen una perforación de 5mm para insertar vástagos de teflón cilíndricos, rectificadas en una de las caras rectas extremas sobre las cuales se efectuarán las mediciones de variación de longitud. Para el llenado de los moldes con morteros con yeso, se utiliza el marco metálico abierto y plano de 5 mm de espesor que se coloca cubriendo todo el perímetro del molde siendo así posible afianzar todo el sistema a la mesa compactadora también por presión provocada por pernos colocados en cada extremo.

### 3.2.3 Mesa compactadora



**Fig. 3-6. Mesa Compactadora**

Para la compactación del mortero fresco, se utiliza una compactadora electro mecánica compuesta de una mesa rectangular, unida rígidamente por dos brazos ligeros a un eje de rotación (Fig. 3-6). Durante el funcionamiento, la mesa es levantada por una leva de acero de la cual cae libremente desde una altura de 15mm. El accionamiento de la leva se hace por medio de un motor eléctrico, a velocidad uniforme de 1 rev/s, un dispositivo de control y un contador que regula la compactación a 60 golpes. Todos los morteros se compactan a dos series de 60 golpes cada una.

### 3.2.4 Equipos para ensayos de rotura a Compresión y Flexotracción

Para la determinación de las resistencias mecánicas (compresión y flexotracción) de probetas de mortero de dimensiones 40x40x160 mm, se utilizan los equipos establecidos por la norma UNE-EN 196-1 [72], que se visualizan en la figura siguiente.



(a)



(b)

**Fig. 3-7. (a) Prensa Universal para ensayo de Compresión, (b) Equipo para ensayo de Flexotracción**

### 3.2.5 Molienda de materiales base

Para la molienda de la ceniza volante se utilizó un molino de bolas modelo Gabrielli Mill-2, que consiste en un recipiente cerámico de un litro de capacidad, en el cual se introducen 98 bolas de alúmina de 18 mm de diámetro y 450 g de la ceniza volante original; mediante un temporizador se programa el molino para 20 minutos y posteriormente se procede a la recogida de la ceniza volante molida. El molino puede apreciarse en la **Fig. 3-8**.



**Fig. 3-8. Molino de bolas utilizado.**

### 3.2.6 Cámara Húmeda

En general las probetas son curadas al interior de bolsas de polietileno selladas, a fin de mantenerlas en un microambiente de humedad generada por el mortero en su fraguado. Para mantener la temperatura ambiental sin grandes cambios durante el fraguado, las bolsas son mantenidas al interior de cámara de curado del laboratorio. Las condiciones al interior de la cámara húmeda son las siguientes: temperatura ( $20\pm 2^\circ\text{C}$ ) y humedad relativa (95%), de acuerdo a lo establecido por la norma UNE-EN 196-1 [72].

### 3.2.7 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

A través de la microscopía de barrido de electrones (SEM), se obtienen imágenes con una gran resolución, observando la microestructura de los materiales que son analizados. En la preparación, las muestras se recubren con oro para facilitar la conductividad eléctrica y mejorar la calidad de la imagen. Para el caso en que se requiera un microanálisis por energías dispersivas de Rayos X (EDX), se prefiere cubrir las muestras con carbono, con el fin de facilitar la conductividad eléctrica a través de la muestra.

El equipo utilizado es el modelo JEOL JSM6300 (**Fig. 3-9**). Las imágenes se obtienen a partir de los electrones secundarios generados aplicando un voltaje de 20 KV, a una distancia de trabajo de 15mm.



**Fig. 3-9.** Equipo SEM utilizado en microscopía electrónica

### 3.2.8 Analizador de humedad por halógenos (BH)

Sirve fundamentalmente para determinar el contenido de humedad de cualquier sustancia. El instrumento trabaja midiendo la masa de forma continua conforme va aumentando la temperatura. Al inicio de la medición se determina la masa de la muestra, a continuación la muestra se calienta rápidamente con una unidad halógena que posee. Durante el período de calentamiento, el instrumento calcula continuamente la masa y puede visualizarse la pérdida de peso. Una vez concluido el proceso, se conoce la masa final de la muestra y la pérdida de masa expresada como porcentaje de la masa inicial.



**Fig. 3-10.** Equipo analizador de Humedad por Halógenos

El equipo de humedad por halógenos utilizado es un Mettler-Toledo, modelo HR73-P con un radiador halógeno circular como elemento de calefacción (**Fig. 3-10**); funciona para un intervalo de temperatura máxima de 50-200°C con muestras de peso mínimo de 0,1g y peso máximo de 51g. Posee una precisión de indicación de balanza de 1mg.

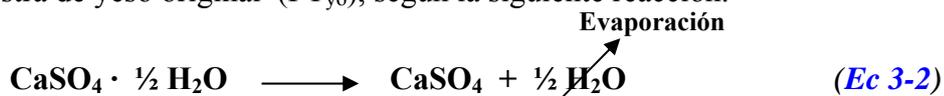
**a) Procedimiento para calcular la cantidad de dihidrato formado y hemihidrato que queda sin reaccionar, en una pasta de yeso.**

En general, cuando se añade agua al yeso (hemihidrato), se va formando una pasta de yeso (dihidrato), primero en estado fresco y luego endurecida cuya reacción se va desarrollando gradualmente en el tiempo, de acuerdo con la estequiometría siguiente.



Ocurre que esta reacción no se completa totalmente durante el tiempo en que se realizan las mediciones específicas, ya que dependiendo del tiempo de fraguado, solo una parte del hemihidrato reacciona con el agua para formar dihidrato; por lo que, el resto del hemihidrato sin reaccionar lo hace más lentamente con el exceso de agua que queda en la pasta. Por ello se establece un método con uso del analizador de humedad por halógenos que permite determinar el porcentaje de dihidrato formado y hemihidrato sin reaccionar, en diferentes instantes del proceso de fraguado de una pasta.

Previamente, una muestra de yeso original en polvo debe secarse en la estufa a 60°C durante 1 hora para eliminar la humedad o el agua libre no combinada. A continuación, la muestra se somete al calentamiento por halógenos, obteniendo la pérdida total de agua químicamente combinada en el hemihidrato presente en la muestra de yeso original ( $PT_{yo}$ ), según la siguiente reacción.



El resultado de este calentamiento es un material conocido como anhidrita o simplemente, sulfato cálcico ( $\text{CaSO}_4$ ).

De cada pasta a ensayar, se saca una pequeña porción, ya sea fresca o endurecida (en función del instante en que se realiza el ensayo). Se coloca en un mortero de porcelana ó ágata y se machaca si es necesario, añadiendo una pequeña cantidad de acetona para detener la reacción de hidratación y obtener una masa homogénea. Toda esta masa se filtra al vacío. A continuación, se retira el papel filtro con el material retenido y se coloca sobre una placa de vidrio para secar en estufa a 60°C durante al menos una hora con la finalidad de eliminar la acetona y el agua libre. Una vez seca, se vuelve a machacar en el mortero limpio y una muestra en polvo de aproximadamente 5 g se introduce en el analizador de humedad a fin de eliminar y medir el agua incorporada químicamente a la pasta. Una muestra de este mismo material se reserva para ensayar en TG.

En el equipo analizador de humedad por halógenos (BH), se eleva la temperatura rápidamente hasta 180°C y cada 30 seg se registra la pérdida de masa de la muestra como un porcentaje referida a la masa inicial. El ensayo se detiene una vez que en dos lecturas consecutivas, la variación de masa resulta

inferior a 1 mg en 90 segundos. Se consigue así, el dato de la pérdida total de humedad en la pasta para el instante elegido ( $PT_{py}$ ). Se deja enfriar el equipo y se repite el ensayo en las mismas condiciones para las siguientes muestras.

El porcentaje de agua total incorporada a la pasta de yeso ( $ATI$ )<sub>pasta yeso</sub>, se puede calcular de acuerdo a la expresión siguiente:

$$\frac{(ATI)_{pasta\ yeso}}{(\% H_2O\ incorporada)} = \frac{(PT_{py}) - (PT_{yo})}{(\% pérdida\ total\ en\ la\ pasta) - (\% pérdida\ yeso\ original)} \quad (Ec\ 3-3)$$

Mediante cálculos estequiométricos podemos determinar el porcentaje de dihidrato formado y la cantidad de hemihidrato que queda sin reaccionar. En efecto, en referencia a la “*Ec 3-2*”, es posible determinar para el yeso original:

$$(Moles\ de\ H_2O)_{yeso\ original} = (PT_{yo}) / PM(H_2O) \quad (Ec\ 3-4)$$

$$(Moles\ Hemihidrato)_{yeso\ original} = 2 \times (Moles\ de\ H_2O)_{yeso\ original} \quad (Ec\ 3-5)$$

$$(\% \text{ de Hemihidrato})_{yeso\ original} = (Moles\ Hemihidrato)_{yeso\ original} \times PM(HH) \quad (Ec\ 3-6)$$

$PM(H_2O) = 18\ g/mol$  ; Peso molecular del agua ( $H_2O$ )

$PM(HH) = 145\ g/mol$  ; Peso molecular del Hemihidrato ( $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O$ )

$PM(DH) = 172\ g/mol$  ; Peso molecular del Dihidrato ( $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ )

Ahora, en referencia a la “*Ec 3-1*”, es posible determinar para la muestra en ensayo, los siguientes términos:

$$(Moles\ H_2O\ incorporada)_{pasta\ de\ yeso} = (ATI)_{pasta\ yeso} / PM(H_2O) \quad (Ec\ 3-7)$$

$$(Moles\ de\ Dihidrato)_{yeso\ original} = (2/3) \times (Moles\ H_2O\ incorp.)_{pasta\ de\ yeso} \quad (Ec\ 3-8)$$

$$(\% \text{ de Dihidrato})_{yeso\ original} = (Moles\ de\ Dihi)_{yeso\ original} \times PM(DH) \quad (Ec\ 3-9)$$

$$(\% \text{ Hemi. sin reaccionar})_{yeso\ original} = (\% \text{ Hemi.})_{yeso\ original} - (\% \text{ Dihi})_{yeso\ original} \quad (Ec\ 3-10)$$

**b) Procedimiento para calcular pérdida de humedad (agua combinada) de los productos hidratados en una pasta o mortero de “cemento-yeso-puzolana”.**

La técnica que provee el equipo analizador de humedad por halógenos, nos permite relacionar la pérdida de masa de una muestra con los procesos térmicos a que están siendo sometidos los materiales y/o compuestos generados al instante en que se desarrolla la medición. La gran ventaja que tiene el equipo “BH” frente al equipo “TG”, es que se pueden ensayar indistintamente pastas y morteros; de este modo, los resultados de pastas en “BH” se pueden

correlacionar con resultados obtenidos en “TG”; sin embargo, esta correlación no es posible para morteros porque la pequeña cantidad de masa que se ensaya en “TG” (< 100 mg), las desviaciones obtenidas para una misma muestra, con el mismo procedimiento la hacen inviable más que nada por la presencia del árido fino (arena) que se hace presente en una distribución no homogénea en la muestra.

De este modo a través del equipo “BH”, para este tipo de conglomerante, se logran medir pérdidas de masa debido a reacciones de deshidratación que ocurren en la muestra cuando se le aplica temperatura y que producen la disociación de moléculas de agua de los compuestos formados y su consecuente evaporación. Por tanto, en el ensayo “BH” se registran pérdidas de agua combinada principalmente de las siguientes deshidrataciones (una, algunas o todas, dependiendo del conglomerante de la muestra en análisis), que es posible nombrarlas en forma resumida: silicatos cálcicos hidratados (SCH), etringita, yeso dihidrato, aluminatos cálcicos hidratados (ACH) y sílico-aluminatos cálcicos hidratados (ASCH).

De cada pasta o mortero a ensayar, se saca una pequeña muestra (aproximadamente 15 g en pastas y 50 g en morteros), se coloca en un mortero de porcelana y se machaca en forma manual para reducir su tamaño a un máximo de 80  $\mu\text{m}$  en pastas y 2 mm en morteros (diámetro nominal de la arena), evitando producir una separación entre arena y pasta. Se procura que el procedimiento de molienda no exceda más allá de 5 minutos a fin de reducir el tiempo de exposición de la muestra al medio ambiente y producir una excesiva evaporación del agua libre.

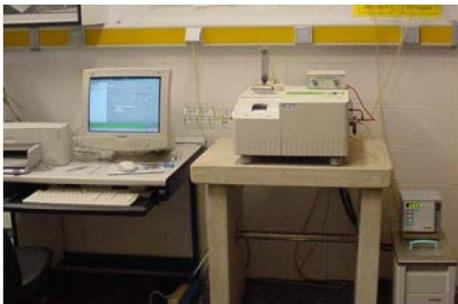
El material triturado se coloca sobre una placa de vidrio, registrando su peso ( $Ph$ ) para secar en estufa a 60°C durante  $24 \pm 2$  horas con la finalidad de eliminar el agua libre. Transcurrido el tiempo de secado, se registra su peso seco ( $Ps$ ) y se calcula la humedad de la muestra respecto al peso seco, de acuerdo con la expresión siguiente:

$$Hum[\%](60^\circ C) = \frac{Ph - Ps}{Ps} \cdot 100 \quad (Ec\ 3-11)$$

La muestra en estado seco (pasta o mortero), es retirada de estufa para rápidamente someterla a ensayo en “BH” y en el caso de pasta, se reserva una muestra de ella en estado seco para ensayar en TG. En “BH” se eleva la temperatura rápidamente desde la temperatura ambiente hasta 200°C (límite del equipo) y cada 2 minutos se registra la pérdida de masa de la muestra como un porcentaje referida a la masa inicial. El ensayo se detiene una vez que en dos lecturas consecutivas, no se producen variaciones significativas en la pérdida de peso (variación de masa inferior a 1 mg en 90 segundos). Se consigue así, el dato de la pérdida total de humedad en la muestra para el instante elegido (B.H.[%](200°C)). Se deja enfriar el equipo y se repite el ensayo en las mismas condiciones para las siguientes muestras.

### 3.2.9 Análisis Termogravimétrico (TG)

Se ha utilizado un módulo TGA 850 Mettler-Toledo, que permite realizar simultáneamente un análisis termogravimétrico (TG) y un análisis termogravimétrico (TG) y un análisis termogravimétrico (TG) y un análisis termogravimétrico (TG). Ver Fig. 3-11. El equipo está compuesto por una termobalanza analítica de precisión de 1  $\mu\text{g}$ , un horno, un sistema de purga de gases y un ordenador para el control y visualización de los datos.



**Fig. 3-11. Equipo Termogravimétrico TGA 850 Mettler-Toledo**

La termogravimetría (TG), es una técnica que permite medir la variación de masa de una muestra ante la variación controlada de la temperatura aplicada, en una atmósfera también controlada. En el gráfico TG o termograma, es posible determinar la variación de la masa debido a las reacciones químicas que se producen en la experiencia. Generalmente se producen pérdidas de masa, debido a que durante el calentamiento se originan reacciones de descomposición donde se forma un producto gaseoso, por lo que se mide la pérdida de masa, atribuida a la cantidad de producto gaseoso que se forma y que se elimina.

La curva DTG es la representación gráfica de la derivada de la curva TG, y suministra información sobre la velocidad de pérdida o ganancia de masa con la temperatura o el tiempo. Esta nos permite identificar con mayor facilidad las alteraciones, especialmente cuando las pérdidas de masa son muy pequeñas o bien cuando hay varios procesos con temperaturas de activación muy cercanas.

Gracias a la aplicación de esta técnica, se pueden conocer entre otras cosas, porcentaje de productos de la hidratación presentes en la pasta del conglomerante, el porcentaje de cal fijada por las puzolanas y la caracterización del yeso hemihidrato y yeso dihidrato utilizado en las mezclas.

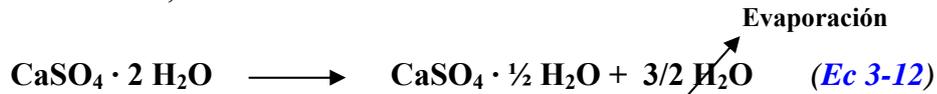
#### **a) Procedimiento para calcular la cantidad de dihidrato formado y hemihidrato que queda sin reaccionar, en una pasta de yeso.**

En el equipo TG, una muestra de pasta en polvo seco de entre 50 a 70 mg es colocada en un crisol de aluminio sellado, en una atmósfera con aire, calentándose incrementalmente desde 35°C hasta 300°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min. El ensayo se detiene una vez que se ha alcanzado la máxima temperatura. El ordenador anexo al equipo TG permite visualizar las

curvas TG y DTG, sobre las cuales es posible efectuar mediciones parciales y/o totales de pérdida de masa u otro tipo de medición, según sea el interés. Superponiendo curvas TG y DTG para una misma pasta es posible visualizar (y calcular) los procesos separados de pérdida de humedad debido a la deshidratación del dihidrato formado en la pasta y a la deshidratación del hemihidrato consecuente. Esta separación, no es posible distinguirla en BH, el que solo entrega valores de pérdidas totales para la máxima temperatura escogida.

Cuando una muestra de una pasta formada por yeso y agua se somete a análisis de TG, se producen fundamentalmente dos pérdidas de masa debida a la formación de productos gaseosos en instantes distintos y producto de las siguientes reacciones.

- entre 100 – 140°C, reacción de deshidratación del Dihidrato formado:



- entre 150 – 180°C, la misma reacción de deshidratación del hemihidrato formado, y consecuentemente de acuerdo con la estequiometria de la ecuación (Ec 3-2) anterior. En este caso, se producen dos pérdidas de masa debidas a la pérdida de H<sub>2</sub>O en las reacciones de deshidratación:

(P<sub>dh</sub>) = Pérdida de masa debida a la deshidratación del Dihidrato

(P<sub>hh</sub>) = Pérdida de masa debida a la deshidratación del Hemihidrato consecuente

Así, el % de dihidrato formado en la pasta de yeso fraguada “(%Dh)<sub>pasta yeso</sub>”, se puede calcular de acuerdo a la pérdida de masa debido a su deshidratación, según la expresión siguiente:

$$(\text{Moles H}_2\text{O})_{\text{incorp}} = (P_{\text{dh}}) / \text{PM}(\text{H}_2\text{O}) \quad (\text{Ec 3-13})$$

Por lo que, el dihidrato formado en la 1ª reacción será:

$$(\text{moles Dh})_{\text{pasta}} = (2/3) \cdot (\text{Moles H}_2\text{O})_{\text{incorp}} \quad (\text{Ec 3-14})$$

$$(\% \text{ Dh})_{\text{pasta}} = [\text{PM}(\text{Dh})] \cdot (\text{moles Dh})_{\text{pasta}} \quad (\text{Ec 3-15})$$

Por su parte, el hemihidrato formado en la pasta, previo a su descomposición, también se puede calcular de acuerdo a la pérdida de masa debido a la deshidratación del dihidrato.

$$(\text{moles Hh})_{\text{pasta}} = (2/3) \cdot (\text{Moles H}_2\text{O})_{\text{incorp}} \quad (\text{Ec 3-16})$$

Por lo que, el dihidrato formado en la 1ª reacción será:

$$(\% \text{ Hh})_{\text{pasta}} = [\text{PM}(\text{Hh})] \cdot (\text{moles Hh})_{\text{pasta}} \quad (\text{Ec 3-17})$$

Finalmente, de la segunda reacción, es posible determinar la cantidad total de hemihidrato que debería formarse en la pasta de yeso, de acuerdo a la pérdida de masa por la deshidratación del hemihidrato, según la siguiente expresión.

$$(\text{Moles H}_2\text{O})_{\text{incorp}} = (\text{P}_{\text{hh}}) / \text{PM}(\text{H}_2\text{O}) \quad (\text{Ec } 3-18)$$

Entonces, debido al hemihidrato:

$$(\text{moles Hh})_{\text{total}} = (2) \cdot (\text{Moles H}_2\text{O})_{\text{incorp}} \quad (\text{Ec } 3-19)$$

$$(\% \text{ Hh})_{\text{total}} = [\text{PM}(\text{Hh})] \cdot (\text{moles Hh})_{\text{total}} \quad (\text{Ec } 3-20)$$

De este modo, los hemihidratos sin reaccionar se pueden calcular por simple diferencia:

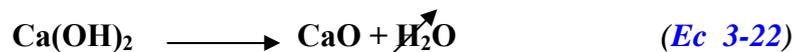
$$(\% \text{ Hh})_{\text{sin reaccionar}} = (\% \text{ Hh})_{\text{total}} - (\% \text{ Hh})_{\text{pasta}} \quad (\text{Ec } 3-21)$$

Como la reacción puede completarse en un instante determinado y la *Ec 3-21* representa la diferencia de dos valores calculados independientemente, entonces, una diferencia negativa indica que el porcentaje sin reaccionar es “cero”. Los valores de hemihidrato (aún sin reaccionar) y de dihidrato formado, calculados con ayuda de la técnica TG, es posible compararlos con los que se obtienen a través de la técnica BH.

#### b) Técnica de análisis termogravimétrico (ATG) y su aplicación a pastas de “cemento-yeso-puzolana”.

La técnica “ATG” nos permite relacionar la pérdida de masa de una muestra con los procesos térmicos a que están siendo sometidos los materiales y/o compuestos generados al instante en que se desarrolla la medición. Como principalmente son pastas cementicias las que se someten a ensayos termogravimétricos, las pérdidas de masa se deben fundamentalmente a reacciones de deshidratación que se producen con el calor aplicado por el equipo (hasta 600°C) y que producen la disociación de moléculas de agua de los compuestos formados y su consecuente evaporación. Por tanto, en el ensayo termogravimétrico se registran las pérdidas de masa principalmente de las siguientes deshidrataciones, que es posible describirlas en forma resumida:

- hidróxido de calcio (CH):



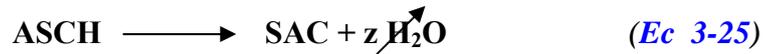
- silicatos cálcicos hidratados (SCH):



- aluminatos cálcicos hidratados (ACH):



- sílico-aluminatos cálcicos hidratados (ASCH):



- yeso dihidrato a hemihidrato:

De acuerdo con la estequiometria de la (Ec 3-12)

- yeso hemihidrato a anhídrido:

De acuerdo con la estequiometria de la (Ec 3-2)

- etringita:



Como se mencionó, el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es un compuesto proveniente de la hidratación del cemento, cuya generación en presencia de puzolana como la CV genera los compuestos SCH-ACH-ASCH; también, el sulfato cálcico al reaccionar con el  $\text{C}_3\text{A}$  (aluminato tricálcico) del cemento, forma etringita. Estos compuestos, en ciertas circunstancias es posible detectarlos y cuantificarlos por “ATG”, lo que se visualiza en la Fig. 3-12 anterior, en la cual se observa una curva “DTG” típica obtenida para una pasta de cemento a 28 días de edad, con “FCC” como puzolana y con velocidad de calentamiento de  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , en que se denotan de mejor manera los puntos de inflexión de la termogravimetría ante los cambios de masa singulares.

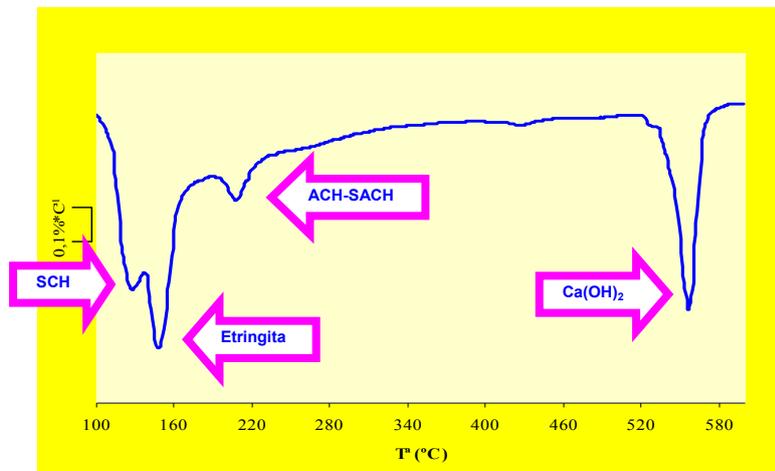
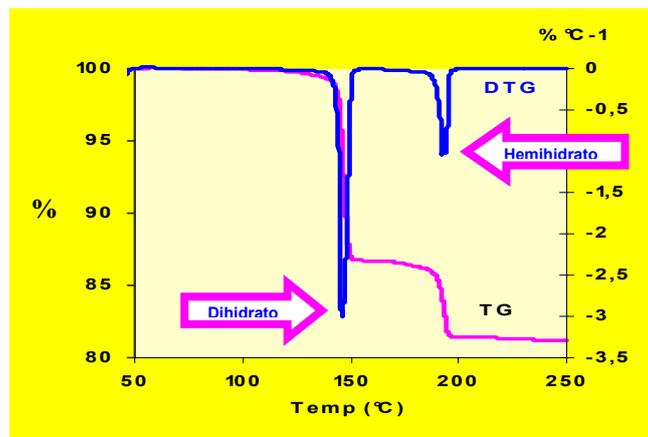


Fig. 3-12. Curva DTG típica para pasta de “Cemento-Puzolana” [73]

La deshidratación característica del compuesto, se puede obtener para una ubicación térmica más precisa si se aplican técnicas de alta resolución ya que estos cambios singulares varían en un rango de temperatura dependiendo de la

velocidad de calentamiento. A modo de referencia, para pastas de cemento con diferentes contenidos de puzolana, la termogravimetría de alta resolución [75], fija el rango de temperatura característico en que están ocurriendo las distintas descomposiciones típicas para este tipo de material cementicio, en los siguientes rangos: para SCH, entre 120-125 °C; para etringita, entre 136-143 °C y para ACH-ASCH, entre 200-205 °C. Este rango depende de la edad de las muestras; sin embargo, ellas pueden variar en un rango más amplio dependiendo también de la velocidad de calentamiento. También, a modo de referencia, se citan los resultados obtenidos por Velázquez [74] que trabajando también con pastas de cemento con “FCC” y aplicando una velocidad de calentamiento de 10 °C/min a los 28 días de edad, fija la ocurrencia de estas descomposiciones de deshidratación en los siguientes rangos: para SCH, entre 100-180 °C; para ACH-ASCH, entre 180-300 °C y para  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , entre 520-580°C.



**Fig. 3-13.** Curva TG-DTG típica para pasta de “yeso” [74]

En la figura anterior se describe el comportamiento termogravimétrico típico de una pasta de yeso hidratada efectuada con alta resolución (a velocidad de calentamiento variable dependiendo de la velocidad de la pérdida de masa), la que permite dissociar los procesos de deshidratación; en una primera etapa, la descomposición del yeso dihidrato, que se transforma en hemihidrato y en una segunda etapa al continuar aumentando la temperatura, la descomposición del yeso hemihidrato en anhídrido.

Estos dos procesos, ocurren en un rango de temperatura variable que depende de la velocidad de calentamiento del equipo. A modo de referencia, a 2 °C/min la temperatura de descomposición “Dihidrato-hemihidrato” ocurre a “131°-147°”; a 10 °C/min, ocurre a “159°-185°” y a 40 °C/min, la descomposición se fija a “180°-227°” [75].

El mayor inconveniente de aplicar las técnicas “ATG” a pastas de “cemento-yeso-puzolana” es la superposición de estos procesos de descomposición ya que la mayoría de ellos están ocurriendo en rangos de temperaturas coincidentes en

que, tal vez las técnicas de alta resolución puedan lograr separar. El inconveniente es aún mayor cuando se aplica “B.H.” ya que la temperatura aplicada no es tan alta como para registrar la descomposición CH y además, no hay posibilidad de separar estos procesos.

En estos estudios, al trabajar con pastas “cemento-yeso-puzolana”, los ensayos termogravimétricos (TG y DTG) se han efectuado a distintas edades, calibrando el equipo para velocidad de calentamiento constante de 25 °C/min, para un máximo de 600°C, utilizando flujo de aire. Al menos esta configuración permite disociar la descomposición CH sin superposición con otro proceso y con ello, estudiar la actividad puzolánica mediante la aplicación de esta técnica.

El estudio de la actividad puzolánica en este tipo de pasta, demanda calcular las pérdidas de masa (agua combinada) para la descomposición CH, para así poder calcular la cantidad de CH presente y el “%” de cal fijada por la puzolana. Para obtener la cantidad de CH presente en la pasta, la estequiometría de la reacción (*Ec 3-22*) nos indica que el número de moles de Ca(OH)<sub>2</sub> es igual al número de moles del agua combinada que se evapora, por lo que se calcula como:

$$CH = H \cdot \frac{PM_{CH}}{PM_H} \quad (\text{Ec 3-27})$$

Donde  $H$  es la pérdida de agua combinada para la descomposición CH (registrada en forma tangencial puesto que la línea base antes de la descomposición, no es horizontal),  $PM_{CH}$  es el peso molecular del hidróxido de calcio (74 mg/mmol) y  $PM_H$  es el peso molecular del agua (18 mg/mmol).

Por su parte, la cal fijada por la reacción puzolánica de la muestra se calcula simplemente por comparación entre cantidades de CH o entre cantidades de pérdida de agua combinada de la muestra con la muestra patrón y de acuerdo con la siguiente expresión [74]:

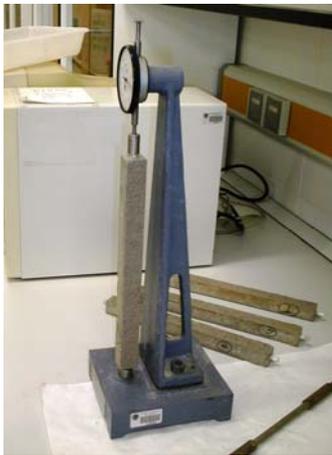
$$\text{Cal Fijada (\%)} = \frac{CH_{C_t} \cdot C_{\%} - CH_{m_t}}{CH_{C_t} \cdot C_{\%}} \cdot 100 \quad (\text{Ec 3-28})$$

Donde  $CH_{C_t}$  es la pérdida de agua combinada (%) para la descomposición CH en la pasta de control (solo cemento) al tiempo “t” de curado;  $CH_{m_t}$  es la pérdida de agua combinada (%) para la descomposición CH en la muestra con puzolana al mismo tiempo “t” de curado y  $C_{\%}$  es la proporción de cemento presente en la pasta con sustitución de cemento por puzolana. Nótese que en las pastas del presente estudio, el cemento está presente solo en una proporción del “Conglomerante” por lo cual, para el cálculo de la cal fijada, debe considerarse esta reducción en la participación del CH referencial que proviene de la muestra de control, es decir, pasta con 100% cemento.

Establecida la “Cal Fijada” en cada instante, es posible relacionarla en el tiempo y establecer la fijación temporal de la reactividad puzolánica y/o relacionarla con la cantidad de cemento-puzolana y la resistencia mecánica de modo de establecer la mejor combinación del “Conglomerante” desde este punto de vista.

### 3.2.10 Comparador de longitudes

Para determinar la influencia que tiene la humedad en la variación de longitud de las probetas de mortero de expansión-retracción, en lo pertinente se han seguido las indicaciones de la norma UNE 80-112 [76] y UNE 80-113 [77]. El equipo comparador de longitudes, consta de un soporte de hierro fundido para medir la retracción o expansión, una barra metálica patrón de 300 mm de longitud (invariable ante cambios de temperatura ambiental), un reloj comparador (deformímetro) que registra en una vuelta completa del dial ( $360^\circ$ ) la deformación equivalente de  $1/4''$  (un cuarto de pulgada), donde “1 unidad” de medida equivale a  $0,01''$  (un centésimo de pulgada) y con precisión de  $1/1000''$  (un milésimo de pulgada).



**Fig. 3-14. Equipo comparador de longitudes, para mediciones de expansión-retracción en probetas de mortero.**

## 3.3 Procedimientos de laboratorio

### 3.3.1 Preparación de mezclas y probetas de mortero “Cemento-Yeso (Escayola -Puzolana)”

Todos los morteros seguirán el procedimiento de preparación indicado a continuación, ya sea probetas que se someterán a ensayos de resistencia a rotura por flexotracción-compresión, así como probetas que se someterán a ensayos de expansión-retracción.

La composición en masa del mortero será una parte de conglomerante (cemento + yeso + puzolana); tres partes de árido y la parte de agua que corresponda a la relación “agua/conglomerante” especificada. En aquellos casos en que la mezcla

no tenga trabajabilidad suficiente y no sea posible una elaboración adecuada de las probetas, se adicionará el aditivo superplastificante mencionado en el apartado 3.1.7 en cantidad de 1% en peso (del conglomerante). Normalmente ocurre para bajas relaciones “agua/conglomerante” y en su caso, se procurará rectificar la dosificación manteniendo las anteriores proporciones.

El orden en que se incorporan los materiales a la amasadora difiere de lo que señalan las normas para el amasado del yeso, ya que éstas indican la adición controlada del yeso al agua. Habiendo probado diversos procedimientos de incorporación del yeso al agua, el mayor inconveniente se tiene para mezclas de baja relación “agua/conglomerante” ya que los tiempos de inicio de fraguado son breves y no proporcionan el tiempo necesario para amasar, vaciar adecuadamente la mezcla al molde y compactar. Finalmente, en la búsqueda de un procedimiento estándar, se observó que el más conveniente para el amasado mecánico del mortero, es el que se especifica según el procedimiento siguiente:

- a) Verter los conglomerantes en estado seco dentro del recipiente metálico de la amasadora en el siguiente orden: yeso, cemento, puzolana. Mezclar mecánicamente, a velocidad lenta, durante 60s para homogenizar el conglomerante en estado seco. Detener la amasadora y devolver cronómetro en cero.
- b) Verter todo el árido. Mezclar a velocidad lenta durante 60s para homogenizar la mezcla en estado seco. Detener la amasadora y devolver cronómetro en cero.
- c) Verter toda el agua de amasado de una sola vez; activar el cronómetro y de inmediato poner la amasadora en marcha a velocidad lenta durante 30 segundos, para luego cambiar a velocidad rápida por otros 30 segundos. Procurar una amasada homogénea. Si el mortero lleva aditivo, éste se adicionará previamente al agua de amasado.
- d) Retirar de la amasadora e inmediatamente iniciar la elaboración de las probetas.

Con una cuchara se introduce en una sola capa el mortero fresco en los compartimientos del molde, procurando extenderlo uniformemente. Habiéndose llenado el molde, que deberá estar unido firmemente a la compactadora, se compacta el mortero fresco con dos series de 60 golpes cada una.

Terminadas las dos series, el molde se retira con precaución de la compactadora. Inmediatamente se quita el exceso de mortero con la regla metálica plana, manteniéndola casi vertical, con lentos movimientos transversales de sierra, una vez en cada dirección en sentido longitudinal. Procurando mantener limpia la regla metálica, se alisa la superficie de las probetas. Se etiqueta o marca el molde con las probetas para su identificación con una adecuada nomenclatura.

Las probetas de expansión, a diferencia de las probetas de resistencia, llevan vástagos de teflón insertos en los cabezales extremos, por lo cual, para que no sufran corrimientos en la mesa de compactadora y queden adecuadamente embebidos en el mortero, estos deben asegurarse a contrapresión en la

perforación que a propósito trae el molde colocándoles (de ser necesario) cinta de teflón u otro material que permita un fácil desmoldado.

Las probetas una vez elaboradas en el molde, deberán llevarse a cámara húmeda de curado según lo especificado en lo pertinente en los apartados 4.1 y 8.1 de la norma EN-196-1 [72].

Las probetas se desmoldan a las  $24 \pm 2$  horas, para luego limpiarlas superficialmente con un paño a fin de retirar restos de mezcla en exceso o a punto de desprenderse; se identificarán fijando el orden de moldeado y se pesarán en forma individual o en su conjunto. Quedando así en condiciones de continuar con el proceso de curado según sea el caso.

### 3.3.2 *Curado de probetas de Cemento-Yeso(Escayola)-Puzolana. Ensayos de resistencia*

En la preparación para el curado de estas probetas, en general (a no ser que se indique un procedimiento distinto, según el caso), se introducirán en una bolsa de plástico con sistema de sellado hermético a fin de proveer un ambiente interior húmedo generado por la propia agua del mortero. Se mantendrán en dicha condición durante todo el proceso de curado, según se especifique. Este sistema general de curado se ilustra en Fig. 3-15.



**Fig. 3-15. Probetas de mortero en bolsa plástica con sistema de sellado hermético**

En general, se especifican dos procedimientos de curado (también, a no ser que se indique un procedimiento distinto, según el caso):

- **Curado en Bolsa (B)**, en que las probetas se mantienen todo el tiempo de curado al interior de la bolsa plástica sellada hasta cumplir la edad prefijada para su ensayo (ver Fig. 3-15); luego, se retiran de la bolsa y a las probetas se les controla el peso con la finalidad de controlar la hermeticidad del sellado. Así, quedan aptas para ser ensayadas.

- **Curado en Bolsa y Agua (B + A)**, en que las probetas son mantenidas al interior de la bolsa plástica hasta 1 día antes de cumplir la edad prefijada para su ensayo; se retiran de la bolsa y las probetas se someten a control de peso, luego se introducirán en un recipiente con agua desionizada manteniéndose sumergidas en esa condición por otras 24 horas. Transcurridas las 24 horas de estar sumergidas, las probetas se retiran del agua y se dejan escurrir y secar por espacio de 30 minutos, procurando que todas las caras estén con contacto con el aire (**Fig. 3-16**). Transcurridos los primeros 15 minutos se procederá a secar o eliminar el agua superficial con papel absorbente, cuidando evitar el desprendimiento de mortero. Las probetas continuarán su secado al ambiente de laboratorio y se pesarán individualmente al transcurrir los primeros 30 minutos desde que se han retirado del agua. Así, ya están en condiciones para ser ensayadas.



**Fig. 3-16.** Secado de probetas al retirar de agua (1/2 hora)

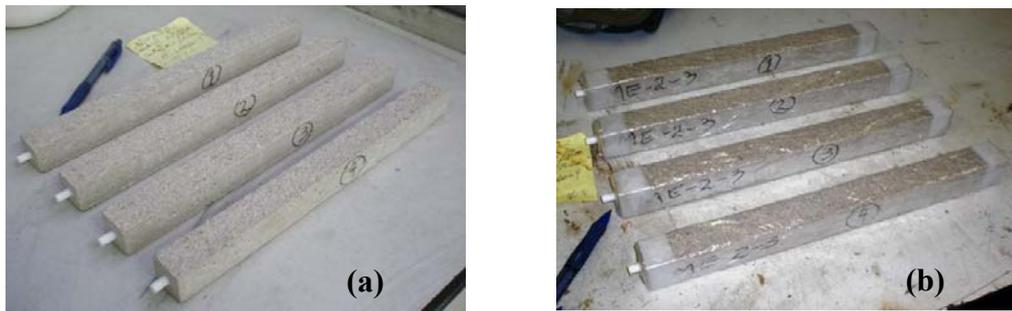
Luego de esto, las probetas serán ensayadas a resistencia a rotura por flexotracción y compresión según los procedimientos especificados en apartado 9 de la norma EN-196-1 [72].

### 3.3.3 *Curado de probetas de Cemento-Yeso(Escayola)-Puzolana. Ensayos de expansión*

Dado que se pretende disponer de un sellado de protección similar o equivalente a la bolsa de plástico utilizada en los morteros sometidos a ensayos de resistencia; en la preparación para el curado de estas probetas, en general (a no ser que se indique un procedimiento distinto, según el caso), se seguirá el siguiente procedimiento.

- Las probetas individualmente serán envueltas en un film de plástico delgado de 30 x 45 cm. De este modo se asegura que cada cara quede protegida por al menos cuatro espesores del film de plástico.

- Los extremos cabezales que contienen los vástagos de las probetas, también se protegerán con film de plástico procurando que el vástago quede libre hacia el exterior. Se buscará que el sistema de protección sea lo más hermético posible de modo que impida que escape la humedad interior y que por otra parte, no impida o altere la libre expansión o retracción longitudinal de la probeta, que es lo que se trata de medir.
- Las probetas protegidas con plástico se pesarán en conjunto a fin de llevar un control efectivo del sistema.
- Las probetas se colocarán en una bandeja de protección a fin de evitar esfuerzos internos de cualquier naturaleza que puedan fracturarlas y así se llevará a cámara húmeda a fin de mantener condiciones medioambientales constantes.



**Fig. 3-17. Probetas Expansión-Retracción. Sin plástico(a) y con plástico de protección(b)**

### 3.3.4 Mediciones de tiempos de fraguado en pastas de Escayola

#### a) Preparación de la pasta

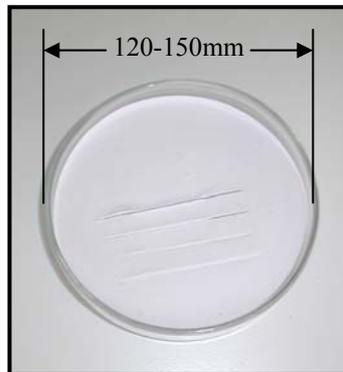
Para la elaboración de las pastas de escayola, se requiere disponer de los aparatos que se indican en el apartado 4.4.1.3 de la Norma UNE-EN 13279-2 [78], siguiendo el procedimiento de mezclado que se señala a continuación.

Se añade al recipiente de amasado la cantidad de conglomerante prefijado (yeso, cemento y puzolana) y se revuelven en seco manualmente con la varilla durante 60 segundos describiendo movimientos circulares en forma de  $\infty$ , en un sentido y en otro, procurando homogenizar el material. Se adiciona el agua de una sola vez y se pone el cronómetro en marcha. Se registra el tiempo en que el agua entra en contacto con el conglomerante ( $t_0$ ). La pasta se revuelve manualmente durante 60 segundos, de la misma forma indicada anteriormente.

Con la pasta fresca, se preparan las “galletas” (Fig. 3-18), siguiendo el siguiente procedimiento:

- Se vierte la pasta fresca sobre dos placas Petri, para formar “galletas” de escayola de unos 5 mm de espesor.

- Con el fin de distribuir homogéneamente la pasta y también para eliminar burbujas de aire incorporado, la cápsula de vidrio con la pasta fresca se deja caer durante 20 veces desde una altura de 60-90mm sobre el paño de amortiguación; todo esto, en un tiempo no mayor de 30 seg. Luego se deja reposar.



**Fig. 3-18.** “Galleta” de pasta sobre placa Petri, con cortes para medición de inicio de fraguado

#### b) Medición del tiempo de “Principio de Fraguado”

El tiempo de “Principio de Fraguado”, se mide por el método del cuchillo siguiendo las indicaciones del apartado 4.4.1 de la Norma UNE-EN 13279-2 [78] y se define como el tiempo en minutos, transcurridos desde que se adiciona el agua de amasado al conglomerante seco hasta que los bordes de una hendidura producida por la hoja de un cuchillo sobre la pasta de yeso (o escayola) dejan de unirse.

Para su medición se requiere el siguiente equipamiento:

- 1 Cuchillo de 10cm de largo de filo, de 1,6cm. de ancho y espesor superior de 1mm.
- 2 placas Petri (vidrio o plástica) de 120-150mm de diámetro y paredes 10-15mm de altura.
- Cronómetro
- Paño de amortiguación

El tiempo de “Principio de Fraguado ( $T_i$ )”, se determina haciendo cortes en las “galletas”. Para ello, con la punta del cuchillo colocado en forma vertical, se hacen cortes longitudinales a la primera “galleta” repitiéndolos cada un minuto. Los cortes deben ser paralelos entre si y antes de hacerlos, el cuchillo debe estar limpio. Una vez que visualmente se aprecien cambios en la viscosidad de la pasta, se realizarán cortes definitivos en la segunda “galleta” cada 30 seg. Se alcanza el “Principio de Fraguado” cuando los bordes de la hendidura dejan de acercarse ( $t_1$ ). El tiempo para el principio de fraguado viene dado por la expresión “ $T_i = t_1 - t_0$ ” (fórmula (6) Norma UNE-EN 13279-2 [78]).

### c) Medición del tiempo de “Fin de Fraguado”

El tiempo de “Fin de Fraguado”, se determina siguiendo las indicaciones del texto “Prácticas de química de los materiales” [79] y se define como el tiempo transcurrido desde el momento en que se añade agua al conglomerante seco, hasta que la yema del dedo índice no deje huella superficial apreciable. El procedimiento establecido para su medición es el siguiente:

- Una vez determinado el principio de fraguado y sin parar el cronómetro, se presiona en forma moderada, la parte central de la primera “galleta” con la yema del dedo índice. Esta operación se repite cada minuto.
- Cuando la pasta oponga visiblemente resistencia a la presión del dedo (el dedo no se hunde con facilidad en la superficie de la pasta), se repite la operación en la segunda “galleta” cada 30 seg, hasta que la yema del dedo no deje huella apreciable (ni salga agua de exudación). Se anota el tiempo transcurrido como final de fraguado ( $t_2$ ). El tiempo para el fin de fraguado viene dado por la expresión “ $T_f = t_2 - t_0$ ”.

La medición del tiempo de “Fin de Fraguado” es subjetiva ya que depende de la presión del dedo índice, no siendo posible precisar una cuantía a dicha presión; por ello, en las mediciones debe imperar el buen criterio aunque también se puede desarrollar una metodología más precisa tal como aparece en el informe DEA de este mismo autor [80].

#### 3.3.5 Mediciones de Expansión-Retracción en probetas de mortero

Las mediciones de expansión-retracción se efectúan a probetas de mortero de expansión-retracción previamente elaboradas, adecuándose a las indicaciones del apartado 6 de la norma UNE 80-113 [77]. Cada vez que se inicia un proceso de medición, se debe efectuar la lectura de la barra patrón en el dial del reloj comparador, que se asume mide invariablemente 300 mm y por tanto proporciona una equivalencia de deformación. A esta lectura se le denominará “ $\Omega_t$ ”.

La medición de expansión-retracción más importante de todas es la primera medición que se efectúa luego del desmolde de las probetas e inmediatamente de haber terminado de protegerlas con el film plástico, de acuerdo con los procedimientos indicados en el apartado 3.3.3 anterior. A la primera lectura en el reloj comparador la designaremos como “ $l_0$ ” y se le asignará el valor de deformación “0,0” (cero). A las siguientes lecturas de mediciones de expansión-retracción que se efectúen transcurridos un tiempo “ $t$ ” de curado, se designará como “ $l_t$ ”. Así, con cada lectura en el reloj comparador y con los datos disponibles, es posible calcular la longitud total que tiene la probeta entre extremos de vástagos en un instante de tiempo “ $t$ ” determinado.

$$H_t = 300 + (l_t - \Omega_t + K) 25,4/100 \quad (Ec 3-29)$$

Donde  $H_t$  = Longitud total de la probeta, incluidos los 2 vástagos extremos, válido para el instante “t” de la medición, en [mm].

$l_t$  = Lectura en el reloj comparador, de la probeta en el instante “t”, en unidades del dial, donde una unidad equivale a 0,01”

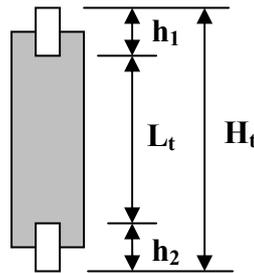
$\Omega_t$  = Lectura en el reloj comparador, de la barra patrón, válida para el mismo instante “t”, en unidades del dial.

K = Constante de lectura, la que permite leer siempre dentro del rango del dial. Asume valores enteros de 25, 50, 75, ..., etc. Su valor inicial se define en la primera lectura midiendo con un flexómetro (cinta métrica) la longitud total de la probeta.

De esta forma es posible calcular la variación de longitud o deformación de la probeta en el instante de tiempo “t” de la medición ( $\Delta_t$ ), simplemente por diferencia de longitudes entre la probeta en el instante “t” ( $H_t$ ) y la probeta inicial ( $H_0$ ).

$$\Delta_t = (H_t - H_0) \quad (Ec\ 3-30)$$

Nótese que cuando  $\Delta_t > 0$ , la probeta tiene una longitud mayor que la longitud inicial y por tanto, hay expansión. Para  $\Delta_t < 0$ , hay retracción.



**Fig. 3-19.** Esquema de medición en probeta de expansión para el cálculo de deformaciones

Finalmente, la deformación  $\delta_t$ , expresada en [%] de la longitud efectiva inicial de la probeta se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\delta_t [\%] = 100 (\Delta_t / L_0) \quad (Ec\ 3-31)$$

Donde:  $L_0 = H_0 - (h_1 + h_2) \quad (Ec\ 3-32)$

$L_0$  es longitud efectiva inicial de la probeta, descontando de la longitud total inicial “ $H_0$ ”, los dos vástagos de dimensiones  $h_1$  y  $h_2$  (ver Fig. 3-19).

De este modo es posible graficar las curvas de deformación o curvas de expansión en función del tiempo “t” de curado, en referencia a la primera lectura, para cada una de las probetas sometidas a ensayo.

---

**Capítulo 4. PASTAS CON ESCAYOLA.  
RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN**

---



## 4. PASTAS CON ESCAYOLA. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

### 4.1 Tiempos de “Principio y Fin de Fraguado”

Se miden los tiempos de fraguado en pastas de escayola pura con y sin plastificante, en pastas de “cemento-escayola” y en pastas de “cemento-escayola-ceniza volante”; para distintas relaciones “agua/conglomerante”; según los procedimientos descritos en el apartado “3.3.4”. Para cada mezcla se le efectúan 5 mediciones (ensayos) de tiempos de fraguado. El cemento utilizado corresponde al “Cemento Blanco BL II/B-LL 42,5 R” (definido como tipo B, en apartado 3.1.1); la escayola utilizada corresponde al “Yeso Iberyola (Escayola E-35)” (apartado 3.1.3) y la “ceniza volante corresponde a la suministrada por la central termoeléctrica de Andorra-Teruel (apartado 3.1.4). Como aditivo plastificante se utiliza el superplastificante Melment L240 descrito en el apartado 3.1.7.

#### 4.1.1 Resultados experimentales en Pasta Escayola Pura (cemento/escayola = 0/100)

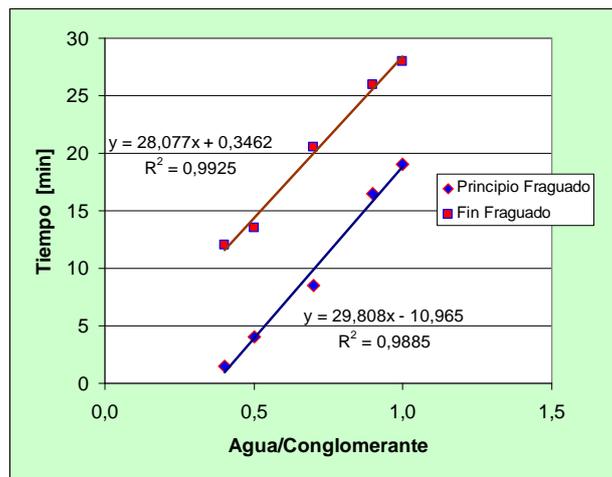
##### a) Pasta de Escayola Pura, sin Superplastificante

Las mediciones de tiempos de fraguado se describen en la tabla siguiente, para distintas relaciones “Agua/Conglomerante”.

**Tabla 4-1.** Medición de “Principio y Fin Fraguado”. Pasta Cemento/Escayola = 0/100.

		Medición de Tiempos [min:seg]				
		Agua/Conglomerante				
Ensayo N°	Medición Tipo	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0
1	Principio Fraguado	02:30	04:00	09:00	19:00	19:00
	Fin Fraguado	16:00	13:30	22:00	31:30	28:00
2	Principio Fraguado	02:00	07:00	08:30	18:30	20:00
	Fin Fraguado	19:30	18:30	21:30	28:30	29:00
3	Principio Fraguado	02:00	06:00	08:30	17:00	20:30
	Fin Fraguado	21:00	18:00	20:30	26:00	28:00
4	Principio Fraguado	02:30	04:30	08:30	16:30	21:00
	Fin Fraguado	18:00	17:30	21:00	26:30	29:30
5	Principio Fraguado	01:30	04:00	08:30	17:30	21:00
	Fin Fraguado	12:00	13:30	21:30	27:30	28:30
Valor Menor	Principio Fraguado	01:30	04:00	08:30	16:30	19:00
	Fin Fraguado	12:00	13:30	20:30	26:00	28:00

En la Fig. 4-1 se representan los menores tiempos de fraguado que figuran en la Tabla 4-1 frente a los valores “Agua/Conglomerante”, obteniéndose una correlación lineal entre ambos parámetros. Teniendo en cuenta este comportamiento, en adelante se estudiarán las siguientes relaciones “Agua/Conglomerante”: “0,5”, “0,7” y “1,0”.



y = tiempo de fraguado (min) ; x = Relación “agua/conglomerante”

**Fig. 4-1 . “Principio y Fin de Fraguado” en pastas de escayola pura.**

**b) Pastas de Escayola pura con aditivo Superplastificante**

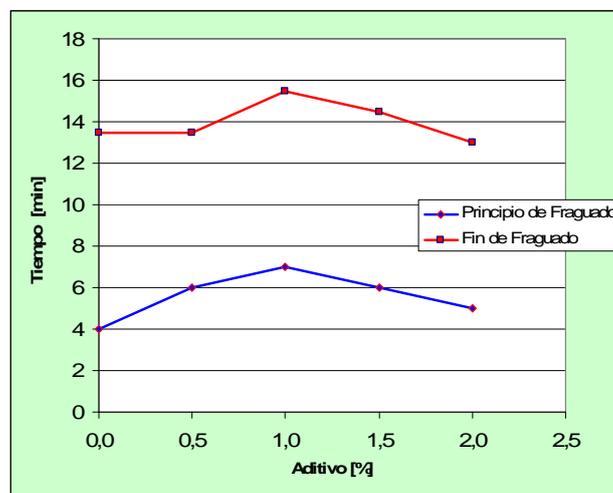
Para mejorar la fluidez y trabajabilidad de la pasta, sobre todo, en las de baja relación “Agua/Conglomerante”, se adiciona un plastificante. Se busca además,

el mantener más tiempo fluida la pasta para una mejor trabajabilidad. Como aditivo se utiliza el superplastificante Melment L240 que se incorpora al agua en cantidad referida al peso del conglomerante seco. Las mediciones de tiempo de fraguado con una relación “Agua/Conglomerante” constante e igual a “0,5” se describen en **Tabla 4-2**.

**Tabla 4-2. “Principio y Fin Fraguado”. Pasta Escayola pura. Agua/conglomerante = 0,5**

Ensayo N°	Medición Tipo	Medición de Tiempos [min:seg]				
		% Aditivo Superplastificante				
		0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
1	Principio Fraguado	04:00	06:00	07:00	07:00	06:00
	Fin Fraguado	13:30	15:00	16:30	16:30	13:30
2	Principio Fraguado	07:00	06:30	07:00	06:30	06:00
	Fin Fraguado	18:30	15:30	15:30	14:30	13:00
3	Principio Fraguado	06:00	06:30	07:30	06:30	05:30
	Fin Fraguado	18:00	15:00	16:00	14:30	13:00
4	Principio Fraguado	04:30	06:00	07:00	07:00	05:00
	Fin Fraguado	17:30	13:30	15:30	14:30	13:00
5	Principio Fraguado	04:00	06:00	07:30	06:00	05:30
	Fin Fraguado	13:30	13:30	15:30	14:30	13:30
Valor Menor	Principio Fraguado	04:00	06:00	07:00	06:00	05:00
	Fin Fraguado	13:30	13:30	15:30	14:30	13:00

En **Fig. 4-2** se representan los menores tiempos de fraguado que figuran en **Tabla 4-2**, frente a la cantidad de superplastificante referida al peso del conglomerante seco.



**Fig. 4-2. “Principio y Fin de Fraguado” en pastas de Escayola pura (Agua/Conglomerante = 0,5) con adición de Plastificante Melment L240.**

Los resultados anteriores ponen de manifiesto que los mayores tiempos de fraguado se consiguen con aditivo plastificante Melment L240 en cantidad de 1% del peso del conglomerante seco.

La adición de 1% de superplastificante, incrementa el tiempo de principio de fraguado de la pasta de escayola pura en 3 minutos; de igual forma, el tiempo de fin fraguado se incrementa en 2 minutos.

#### 4.1.2 Resultados experimentales en Pastas “Cemento/Escayola”, sin Ceniza Volante

Las mediciones de tiempo de fraguado para pastas “Cemento/Escayola = 50/50” se describen en la **Tabla 4-3**, para distintas relaciones “Agua/Conglomerante”.

**Tabla 4-3. “Principio y Fin Fraguado”. Cemento/Escayola = 50/50.**

Ensayo N°	Medición Tipo	Medición de Tiempos [min:seg]		
		Agua/Conglomerante		
		0,5	0,7	1,0
1	Principio Fraguado	02:00	02:30	04:30
	Fin Fraguado	04:00	07:30	41:00
2	Principio Fraguado	< 01:30 (*)	03:00	04:30
	Fin Fraguado	03:30	07:00	38:00
3	Principio Fraguado	< 01:30 (*)	02:00	04:00
	Fin Fraguado	03:30	07:30	43:00
4	Principio Fraguado	< 01:30 (*)	02:00	03:30
	Fin Fraguado	04:00	07:30	13:00
5	Principio Fraguado	01:30	02:00	03:30
	Fin Fraguado	03:30	07:00	17:00
<b>Valor Menor</b>	<b>Principio Fraguado</b>	< 01:30 (*)	02:00	03:30
	<b>Fin Fraguado</b>	03:30	07:00	13:00

(\*): Tiempo inferior a 01:30 min

La relación de los resultados obtenidos para pastas “50/50”, se visualizan conjuntamente con los resultados obtenidos para “Escayola Pura” en **Fig. 4-3**, asumiendo para los resultados experimentales observados en **Tabla 4-3**, que el tiempo inferior a 01:30 min, corresponde a un tiempo de 01:00 min.

En **Fig. 4-3**, se observa que la incorporación de cemento supone una aceleración de los tiempos de fraguado con respecto a la escayola pura por lo que, algunos tiempos de “Principio de Fraguado” no se alcanzan a medir adecuadamente ya que el fraguado se ha iniciado sin concluir la elaboración de las probetas.

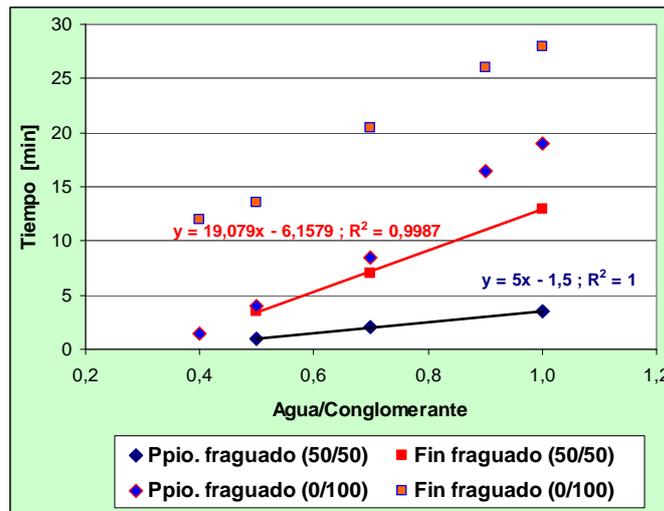


Fig. 4-3. “Principio y Fin de Fraguado” en pastas de Cemento/Escayola = 50/50 y Escayola Pura (0/100).

4.1.3 Resultados experimentales en Pastas “Cemento/Escayola”, con adición de Ceniza Volante

a) Pastas “Cemento/Escayola/CV = 20/50/30”

Las mediciones de tiempo de fraguado se describen en la tabla siguiente, para distintas relaciones “Agua/Conglomerante”.

Tabla 4-4. “Principio y Fin Fraguado”. Cemento/Escayola/CV = 20/50/30.

Ensayo N°	Medición Tipo	Medición de Tiempos [min:seg]		
		Agua/Conglomerante		
		0,5	0,7	1,0
1	Principio Fraguado	01:30	04:30	11:00
	Fin Fraguado	04:00	08:00	18:00
2	Principio Fraguado	01:30	03:30	06:00
	Fin Fraguado	04:00	08:00	15:00
3	Principio Fraguado	01:30	03:30	06:00
	Fin Fraguado	04:00	08:30	15:00
4	Principio Fraguado	01:30	03:30	06:00
	Fin Fraguado	04:30	08:00	16:00
5	Principio Fraguado	01:30	04:00	07:00
	Fin Fraguado	04:00	08:00	17:00
Valor Menor	Principio Fraguado	01:30	03:30	06:00
	Fin Fraguado	04:00	08:00	15:00

b) Pastas “Cemento/Escayola/CV = 30/50/20”

Las mediciones de tiempo de fraguado se describen en la tabla siguiente, para distintas relaciones “Agua/Conglomerante”.

**Tabla 4-5. “Principio y Fin Fraguado”. Cemento/Escayola/CV = 30/50/20.**

Ensayo N°	Medición Tipo	Medición de Tiempos [min:seg]		
		Agua/Conglomerante		
		0,5	0,7	1,0
1	Principio Fraguado	01:30	02:30	04:00
	Fin Fraguado	04:00	06:30	10:30
2	Principio Fraguado	01:30	02:30	04:00
	Fin Fraguado	03:30	07:00	10:30
3	Principio Fraguado	01:30	02:30	04:30
	Fin Fraguado	03:30	06:30	11:00
4	Principio Fraguado	01:30	02:30	04:30
	Fin Fraguado	04:00	07:00	10:30
5	Principio Fraguado	01:30	02:30	04:00
	Fin Fraguado	04:00	07:30	11:00
Valor Menor	Principio Fraguado	01:30	02:30	04:00
	Fin Fraguado	03:30	06:30	10:30

**c) Pastas de “Cemento/Escayola/CV = 20/30/50**

Las mediciones de tiempo de fraguado se describen en la tabla siguiente, para distintas relaciones “Agua/Conglomerante”.

**Tabla 4-6. “Principio y Fin Fraguado”. Cemento/Escayola/CV = 20/30/50.**

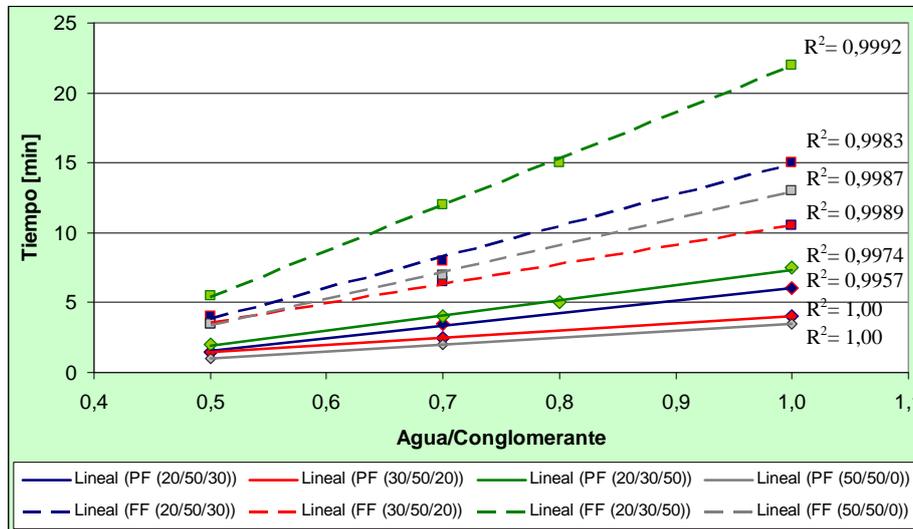
Ensayo N°	Medición Tipo	Medición de Tiempos [min:seg]			
		Agua/Conglomerante			
		0,5	0,7	0,8	1,0
1	Principio Fraguado	02:00	05:00	05:00	08:30
	Fin Fraguado	06:00	15:30	17:00	22:00 ( * )
2	Principio Fraguado	02:00	04:30	05:30	09:00
	Fin Fraguado	05:30	16:00	15:30	-
3	Principio Fraguado	02:00	05:00	05:00	10:30
	Fin Fraguado	06:00	16:30	16:00	-
4	Principio Fraguado	02:00	05:00	05:30	13:30
	Fin Fraguado	06:00	17:30	15:00	-
5	Principio Fraguado	02:30	04:00	05:30	07:30 ( ** )
	Fin Fraguado	06:00	12:00	16:00	-
Valor Menor	Principio Fraguado	02:00	04:00	05:00	07:30
	Fin Fraguado	05:30	12:00	15:00	22:00

(\*): Se estima este tiempo para todos los casos. Es difícil mayor precisión porque la mezcla presenta pequeñas hendiduras con la presión del dedo, no aflorando agua superficial.

(\*\*): El fraguado inicial posee consistencia, sin embargo aún hay agua superficial exudada que confunde.

Para el caso de la pasta “20/30/50”, se optó por disponer de otra referencia de valores experimentales y se incluyen mediciones para la relación “Agua/Conglomerante = 0,8”.

En Fig. 4-4 se representan conjuntamente los menores tiempos de fraguado indicados en Tabla 4-4, Tabla 4-5 y Tabla 4-6, correspondientes a pastas “Cemento/Escayola/CV”, frente a los valores “Agua/Conglomerante” y, para facilitar la comparación, se les superpone resultados correspondiente a la pasta “Cemento/Escayola = 50/50” de la Tabla 4-3.



PF: Principio de Fraguado; FF: Fin de Fraguado  
**Fig. 4-4. “Principio y Fin de Fraguado” en pastas “20/50/30”, “30/50/20”, “20/30/50” y “50/50/0”.**

En general, se observa una buena correlación lineal entre ambos parámetros. Se comenta que la incorporación de ceniza volante en detrimento del cemento Portland, supone en general, un incremento de los tiempos de fraguado. Para porcentajes menores de ceniza volante, se aprecia un comportamiento muy similar con la pasta sin ceniza volante.

El incremento del contenido en cemento Portland, supone en general, una disminución de los tiempos de fraguado, como cabría esperar y teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente.

Se observa que el incremento del contenido de CV en detrimento del yeso, supone un incremento de los tiempos de fraguado.

#### 4.2 Análisis de resultados. Tiempos de fraguado en pastas de escayola

A la luz de la medición de tiempos de fraguado para distintas pastas, es posible discriminar resumidamente los resultados experimentales de principio y fin de fraguado para su análisis y discusión, según se muestran en las figuras precedentes. Se aprecia que los mayores tiempos se disponen siempre para pasta

de yeso puro (Cemento/Escayola = 0/100) y los menores tiempos, por lo general para pasta de combinación Cemento/Escayola = 50/50. De igual modo, para un mismo conglomerante, los menores tiempos se disponen siempre para baja relación “Agua/Conglomerante” y, consecuentemente para alta, los mayores tiempos.

En Fig. 4-5 se representa la medición de los menores tiempos de fraguado frente al contenido de cemento para cada pasta, con relación “Agua/Conglomerante = 0,5”.

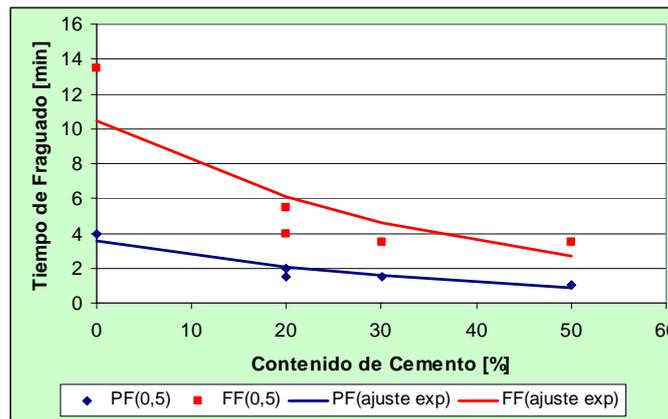


Fig. 4-5. “Principio y Fin de Fraguado” vs Contenido de Cemento. Pastas “Cemento/Escayola/CV” para “Agua/Conglomerante = 0,5”

Puede observarse, que efectivamente, a baja relación “Agua/Conglomerante”, el incremento en el contenido de cemento Portland, supone en general, una disminución de los tiempos de fraguado.

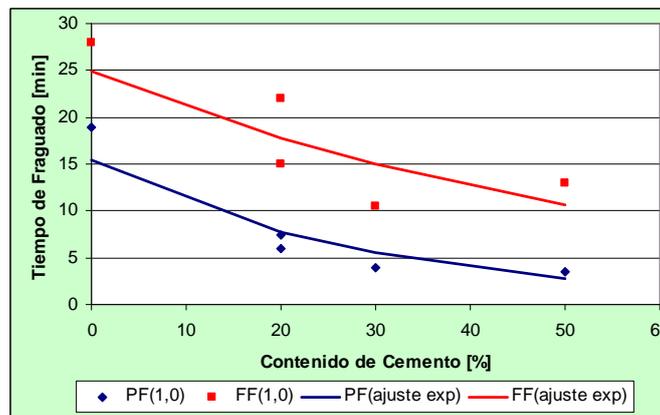


Fig. 4-6. “Principio y Fin de Fraguado” vs Contenido de Cemento. Pastas “Cemento/Escayola/CV” para “Agua/Conglomerante = 1,0”

De observar la Fig. 4-6, puede concluirse que también, para alta relación “Agua/Conglomerante”, el incremento en el contenido de cemento Portland, supone en general, también una disminución de los tiempos de fraguado.

Se postula que quizás, la presencia de cemento en el yeso produce un aumento de la solubilidad de la pasta, que influye en la disolución del yeso y en el crecimiento de núcleos de dihidrato.

También puede observarse que la incorporación de Ceniza Volante, en sustitución parcial de cemento, aumenta los tiempos de fraguado pero no retarda significativamente el principio y fin de fraguado de la pasta.

### 4.3 Presencia de hemihidrato y dihidrato en pastas de Escayola. Mediciones efectuadas con analizador halógeno de humedad (BH) y análisis termogravimétrico (TG)

Para su determinación, se requiere preparar de una misma pasta varias muestras para someterlas a mediciones simultáneas en BH y TG a distintos instantes de tiempo: (en este caso) 5 minutos, 10 minutos, 20 minutos, 1 hora, 4 horas y 24 horas; para relaciones “Agua/Conglomerante” de “0,5”, “0,6”, “0,7” y “1,0”.

#### 4.3.1 Mediciones efectuadas a pastas de escayola pura

En forma resumida, se presentan los valores de perdida total de agua químicamente combinada en pastas de escayola pura, para distintas relaciones “Agua/Conglomerante”, desde los 5 minutos, en que en muchos casos la pasta está aún fluida, hasta 24 horas; manteniendo el fraguado de la pasta al ambiente de laboratorio.

**Tabla 4-7. Perdida Total agua combinada (%). Análisis comparativo en escayola pura**

Análisis Pérdida de Humedad por B.H. [%]	Tiempo [min]	Pastas de Escayola Pura			
		Agua/Esc = 0,5	Agua/Esc = 0,6	Agua/Esc = 0,7	Agua/Esc = 1,0
		5	7,73	6,87	7,80
10	11,45	7,87	8,64	8,21	
20	17,23	11,05	12,99	8,60	
60	18,16	18,44	18,77	18,53	
240	18,82	18,99	18,82	18,98	
1440	19,02	19,28	19,19	19,36	

Análisis Pérdida de Humedad por T.G. [%]	Tiempo [min]	Pastas de Escayola Pura			
		Agua/Esc = 0,5	Agua/Esc = 0,6	Agua/Esc = 0,7	Agua/Esc = 1,0
		5	7,82	7,27	8,54
10	11,97	8,17	8,08	7,35	
20	17,56	11,40	13,24	9,01	
60	18,32	18,64	18,88	18,69	
240	19,09	19,06	19,03	19,30	
1440	19,28	19,40	19,46	19,56	

Puede observarse la coincidencia de valores experimentales obtenidos entre el analizador halógeno de humedad (BH) y del equipo termogravimétrico (TG), a pesar que ambos equipos utilizan distintos procedimientos de calentamiento, con distintas temperaturas límites y distintas velocidades. Si comparamos ambas series de valores tabulados, la diferencia (en valor absoluto) promedio que se encuentra es de 0,25% con una desviación estándar de 0,12; lo que proporciona una idea de la bondad del método de secado por halógenos, lo que es mucho más sencillo y bastante menos costoso que el TG.

Nótese que los valores de pérdida de agua combinada no varían significativamente a partir de 1 hora de fraguado, lo que indica que probablemente todo el hemihidrato disponible en la muestra se ha transformado en dihidrato y el tiempo necesario parece no depender de manera importante de la relación “Agua/Conglomerante”

#### 4.3.2 Mediciones efectuadas a pastas de escayola con aditivo

En forma resumida, en **Tabla 4-8**, se presentan los valores de pérdida total de agua químicamente combinada en pastas de relación fija “Agua/Conglomerante = 0,5” a las que se agregan distintas dosis de aditivo Melment L240 y ensayadas desde los 5 minutos en que en muchos casos la pasta está aún fluida, hasta 24 horas; manteniendo el fraguado a temperatura de laboratorio.

**Tabla 4-8. Pérdida total agua combinada. Análisis comparativo pasta escayola y aditivo**

Análisis Pérdida de Humedad por B.H. [%]	Tiempo [min]	Pastas de Escayola + Aditivo (Melment L240)			
		Agua/Esc = 0,5 + 0,5% Aditivo	Agua/Esc = 0,5 + 1,0% Aditivo	Agua/Esc = 0,5 + 1,5% Aditivo	Agua/Esc = 0,5 + 2,0% Aditivo
		5	8,26	8,52	8,71
10	9,02	8,38	11,87	13,20	
20	16,85	15,14	17,06	17,11	
60	18,16	18,25	18,42	18,23	
240	18,90	19,10	18,80	18,79	
1440	18,92	19,22	19,08	18,97	

Análisis Pérdida de Humedad por T.G. [%]	Tiempo [min]	Pastas de Escayola + Aditivo (Melment L240)			
		Agua/Esc = 0,5 + 0,5% Aditivo	Agua/Esc = 0,5 + 1,0% Aditivo	Agua/Esc = 0,5 + 1,5% Aditivo	Agua/Esc = 0,5 + 2,0% Aditivo
		5	8,46	8,57	8,60
10	9,75	9,02	12,13	13,38	
20	16,90	15,56	17,27	17,19	
60	18,42	18,51	18,59	18,27	
240	19,05	18,90	19,03	19,07	
1440	19,07	19,12	19,34	19,21	

Nuevamente puede observarse la coincidencia de valores entre los obtenidos en el analizador halógeno de humedad y los del equipo termogravimétrico (TG). Comparando ambas series de valores tabulados, la diferencia (en valor absoluto) promedio que se encuentra es de 0,22% con una desviación estándar de 0,17;

nuevamente, se aprecia la bondad del método de secado por halógenos, en comparación con TG.



---

**Capítulo 5. MORTEROS DE DOSIFICACIÓN**  
**“CEMENTO PORTLAND BLANCO-ESCAYOLA(YESO)-PUZOLANA”**

---



## **5. MORTEROS DE DOSIFICACIÓN “CEMENTO PORTLAND BLANCO-ESCAYOLA (YESO) - PUZOLANA”**

Corresponde a una fase preliminar de ensayos realizados en mezclas de morteros con cemento Portland blanco. El cemento Portland blanco, difiere del Portland gris únicamente en el color ya que posee características mecánicas similares.

La selección de las materias primas para fabricar cemento blanco es mucho más estricta que en la fabricación del cemento gris, debido a que deben ser de naturaleza muy pura y con cantidades mínimas de óxido de hierro. Por su composición, es menos resistente a condiciones agresivas que el cemento gris, como el contacto con el agua de mar o la presencia de sulfatos.

En este sentido, la inclusión de adiciones puzolánicas a mezclas con este tipo de cemento y con cantidades significativas de escayola (o yeso), permitirá cuantificar de mejor manera los beneficios o no, que causa su inclusión. La filosofía intrínseca en este esfuerzo, es conocer el comportamiento de estos morteros desde la perspectiva de la resistencia mecánica y de durabilidad. Si los resultados son prometedores, es de esperar que en mayor medida lo serán utilizando cementos Portland grises.

### **5.1 Morteros de Cemento Blanco BL II/B-LL 42,5R y Escayola. Adiciones con Ceniza Volante y Filler Calizo**

En la elaboración de este tipo de morteros se han utilizado los siguientes materiales:

- Cemento Portland Blanco BL II/B-LL 42,5R, identificado como “Tipo B”.

- “Yeso Iberyola (Escayola E-35)”.
- Ceniza Volante suministrada por la central termoeléctrica de Andorra-Teruel.
- Filler Calizo tamizado por la malla de 80µm.
- Árido fino Normsand (arena normalizada), suministrada por Normensand (Beckum-Alemania).
- Aditivo superplastificante Melment L240 (de ser necesario).

Las mezclas se dosifican de acuerdo con la combinación conglomerante seco (en peso), expresada a través de la relación “Cemento/Escayola/Puzolana = 20/50/30”. Las dosificaciones se diseñan a partir de la igualdad de partes de cemento y escayola (considerada muestra patrón o referencial), con la idea de sustituir un porcentaje importante del cemento por puzolana como la Ceniza Volante (CV) y en comparación, se reemplaza similar cantidad por un material inerte como el Filler Calizo (FC).

El árido fino ó arena, se fija en cantidad de tres veces el peso del conglomerante seco. El agua, en la parte que corresponda para la relación “Agua/Conglomerante” especificada; estas últimas, se especifican arbitrariamente en “0,5”, “0,6”, “0,7” y “1,0”.

Los morteros se elaboran evitando el uso de aditivo súper plastificante para no aumentar los parámetros que pueden tener incidencia en el comportamiento mecánico y de durabilidad. En aquellas ocasiones en que las mezclas sean muy poco fluidas, que no permitan una adecuada elaboración de las probetas; se adicionará superplastificante en cantidad de 1% respecto del peso seco del conglomerante. Cuando se utilice este aditivo, se procede a rectificar la dosificación de agua, a fin de tener en cuenta la fracción sólida del aditivo (29%) y el agua del aditivo (71%).

Las probetas de mortero una vez elaboradas, se mantienen en el molde metálico por 24 horas en cámara húmeda para luego desmoldarlas y mantenerlas curando en el interior de una bolsa de plástico sellada hasta un día antes de completar la edad del ensayo. El último día, las probetas se mantienen sumergidas en agua desionizada (curado en “Bolsa y Agua”). Finalmente, las probetas son ensayadas a flexotracción y compresión a los 28 y 90 días.

### **5.1.1 Morteros Control “Cemento Portland Blanco BL II/B-LL 42,5R/ Escayola”**

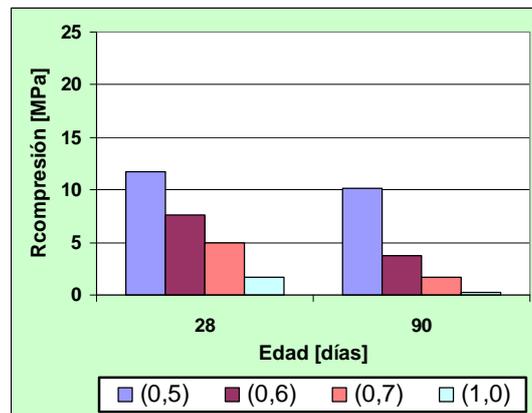
Dado que las adiciones de CV y FC se realizan en reemplazo de cemento; se considera como “Mortero Control” para el caso, aquella proporción de cemento que complementa la proporción conocida de escayola; es decir: “Cemento/Escayola = 50/50”. En **Tabla 5-1** se muestran los resultados experimentales de resistencia mecánica obtenidos.

**Tabla 5-1. Resultados experimentales. Mortero Control “cemento/ escayola = 50/ 50”.**

Edad [días]	Relación agua/conglomerante	Tipo de curado	Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión
28	0,50 (*)	Bolsa + Agua	1,6	11,7
28	0,60 (*)	Bolsa + Agua	1,2	7,6
28	0,70	Bolsa + Agua	0,7	5,0
28	1,00	Bolsa + Agua	0,3	1,7
90	0,50 (*)	Bolsa + Agua	1,2	10,1
90	0,60 (*)	Bolsa + Agua	0,6	3,8
92	0,70	Bolsa + Agua	0,0	1,7
92	1,00	Bolsa + Agua	0,0	0,2

(\*): Adición de 1% de aditivo súper plastificante

Los resultados de resistencia a compresión “Rc” según la edad de curado, se visualizan en Fig. 5-1 siguiente.



**Fig. 5-1. Rc v/s edad. Morteros cemento Bl 42,5R/escayola = 50/50 para distinta relación agua/conglomerante (Mortero control). Curado “Bolsa y Agua”**

Se observa una disminución de resistencia a compresión con la edad de curado para todas las relaciones “Agua/Conglomerante”, lo que demuestra que la humedad del ambiente de curado tiene una acción degradante en el mortero de cemento-escayola. Este comportamiento es una clara demostración que estas mezclas tienen mal comportamiento cuando son sometidas a ambientes de alta humedad como el ambiente del curado empleado.

5.1.2 Morteros “Cemento Portland Blanco BL II 42,5R/Escayola/Puzolana = 20/50/30”

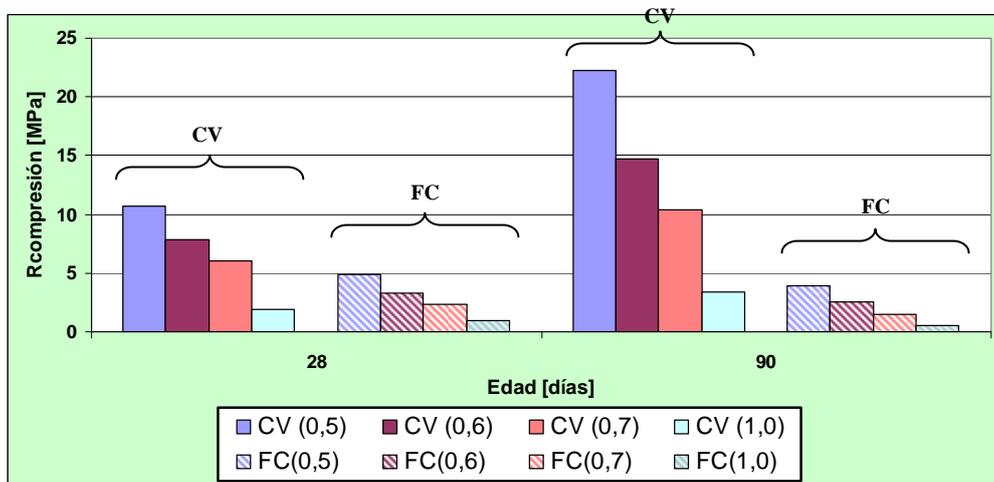
En **Tabla 5-2** se muestran resultados experimentales de resistencia a flexotracción y compresión a distintas edades, para distinta relación “Agua/Conglomerante”, utilizando ceniza volante (CV) y filler calizo (FC) como adiciones, según se indica.

**Tabla 5-2. Resultados experimentales. Mortero “Cem BL 42,5R/Esc/Pz = 20/50/30”**

Edad [días]	Relación agua/conglomerante	Tipo de curado	Ceniza Volante		Filler calizo	
			Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión	Flexotracc.	Compresión
28	0,50 (*)	Bolsa + Agua	1,4	10,7	0,7	4,8
28	0,60 (*)	Bolsa + Agua	1,5	7,9	0,5	3,3
28	0,70	Bolsa + Agua	1,3	6,0	0,4	2,3
28	1,00	Bolsa + Agua	0,3	1,9	0,2	1,0
90	0,50 (*)	Bolsa + Agua	4,1	22,3	0,4	4,0
90	0,60 (*)	Bolsa + Agua	3,7	14,8	0,2	2,6
90	0,70	Bolsa + Agua	2,8	10,4	0,2	1,5
90	1,00	Bolsa + Agua	1,0	3,4	0,1	0,5

(\*): Adición de 1% de aditivo súper plastificante

Los resultados resistencia a compresión “Rc” según edad, se visualizan en **Fig. 5-2**.



**Fig. 5-2. Rc v/s edad. Morteros “cemento BL 42,5R/escayola/Pz = 20/50/30 para distinta relación agua/conglomerante. Curado “Bolsa y Agua”.**

En **Fig. 5-2**, se observa un incremento de resistencia a compresión con la edad de curado para morteros con adiciones de CV en reemplazo de cemento, para todas las relaciones “Agua/Conglomerante”, llegando a valores de 22 MPa a 90 días de curado a pesar de haber estado las probetas 24 horas (antes del ensayo) sumergidas en agua.

Para morteros con FC, se observa una drástica caída de la resistencia a compresión respecto a los morteros con CV. Además, en las probetas con FC, existe una disminución de la resistencia a compresión con la edad de curado para todas las relaciones “Agua/Conglomerante”, lo que demuestra que el FC no es una adición activa como lo es la CV, resaltando a la vez, lo agresivo que resulta la excesiva humedad que provee el medio de curado dentro de la bolsa plástica.

Al comparar resultados experimentales de **Tabla 5-2** para este tipo de morteros, con los de la **Tabla 5-1** válidos para el “Mortero Control”; destaca de manera notable las mejoras en la resistencia con el tiempo que se logran para morteros con adiciones de “Ceniza Volante”, sobre todo a 90 días de curado y a bajas relaciones “Agua/Conglomerante” (0,5 y 0,7).

### **5.1.3 Control de Cemento Portland Blanco BL II/B-LL 42,5R. Comparación de resistencias en morteros según tipo de curado y el uso de aditivo superplastificante**

Como siempre es conveniente controlar el cemento utilizado en las experiencias; también a través de este control, es posible analizar el efecto en los resultados de resistencias que puede causar el modo de curado aplicado. A tal efecto, se ensayan probetas de mortero de cemento con distinta relación “Agua/Conglomerante” curadas en “Bolsa + Agua”, similar a las probetas con escayola, y se comparan con otras que son curadas según Norma UNE-EN 196-1 [72], siendo estas últimas una referencia para la comparación. Los resultados obtenidos se muestran en **Tabla 5-3**.

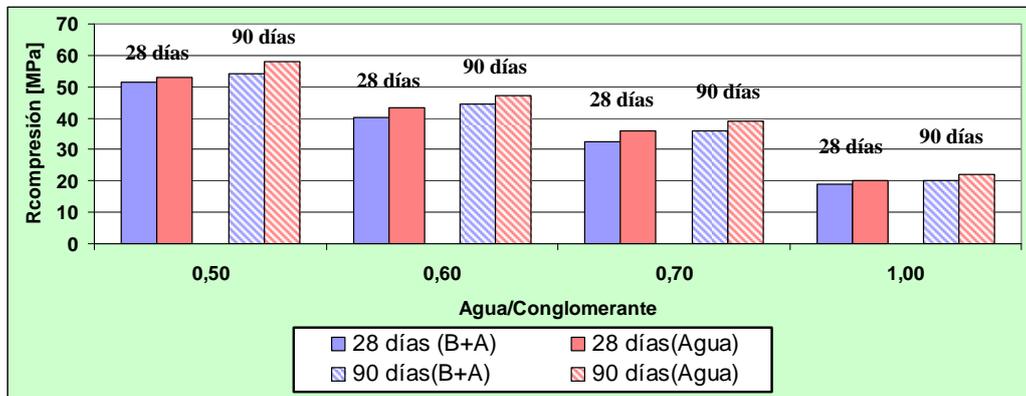
En los resultados experimentales expuestos en **Tabla 5-3**, se ha incorporado una serie de mortero, de relación “Agua/Conglomerante” de valor “0,5” y “0,6”, a los que se les incorpora aditivo superplastificante con la finalidad de analizar el efecto que tiene en las mezclas.

**Tabla 5-3. Resultados experimentales. Mortero de “cimento”. Dos tipos de curado: similar a probetas de morteros de escayola (Bolsa y Agua) y según EN 196-1 (Agua).**

Edad [días]	Relación agua/conglomerante	Tipo de curado	Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión
28	0,50 (*)	Bolsa + Agua	6,3	51,5
28	0,50 (*)	Agua	6,5	54,6
28	0,50	Agua	6,8	52,9
28	0,60 (*)	Bolsa + Agua	5,9	40,3
28	0,60 (*)	Agua	7,4	45,0
28	0,60	Agua	6,9	43,2
28	0,70	Bolsa + Agua	5,5	32,3
28	0,70	Agua	6,3	35,9
28	1,00	Bolsa + Agua	3,4	18,9
28	1,00	Agua	3,7	20,1
90	0,50 (*)	Bolsa + Agua	5,7	54,3
90	0,50 (*)	Agua	7,7	56,8
90	0,50	Agua	7,5	58,0
90	0,60 (*)	Bolsa + Agua	6,6	44,3
90	0,60 (*)	Agua	7,5	46,7
90	0,60	Agua	6,9	47,3
90	0,70	Bolsa + Agua	5,2	35,9
90	0,70	Agua	6,5	39,1
90	1,00	Bolsa + Agua	3,9	20,3
90	1,00	Agua	4,1	21,9

(\*): Adición de 1% de aditivo súper plastificante

En Fig. 5-3, se representan la resistencia a compresión frente a la relación “Agua/Conglomerante” para los dos tipos de curado utilizado.



**Fig. 5-3. Rc v/s “Agua/Conglomerante”. Mortero de Cemento. Distintos tipos de curado**

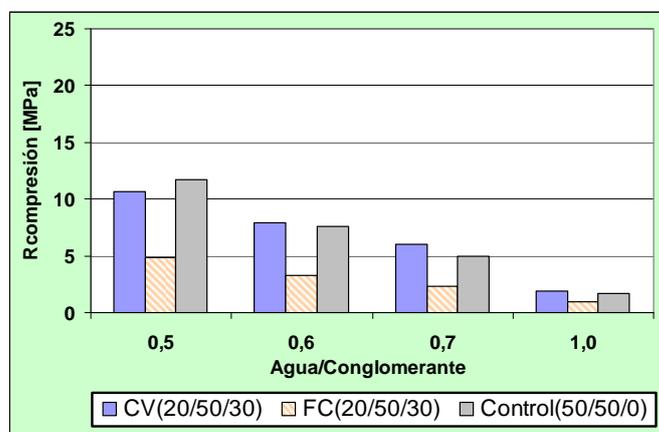
De **Fig. 5-3** puede apreciarse que si bien hay una ligera diferencia a favor del curado normalizado (bajo agua), que se mantiene para todas las relaciones “Agua/Conglomerante” estudiadas, este efecto no es significativo respecto del curado en bolsa, por cuanto las diferencias de este último están en promedio un 7% menores que las probetas normalizadas y en el caso más desfavorable, esta diferencia es de 10% menor.

Este hecho respalda el diseño del sistema del curado en bolsa plástica la mayor parte del tiempo, para las probetas que contienen mezclas de cemento y yeso, por cuanto con seguridad, el fraguado bajo agua podría provocar una disminución de parte de la matriz cementante, lo que podría provocar la ruptura de las mismas. Este hecho dificultaría comentar la influencia real de las puzolanas en las experiencias realizadas.

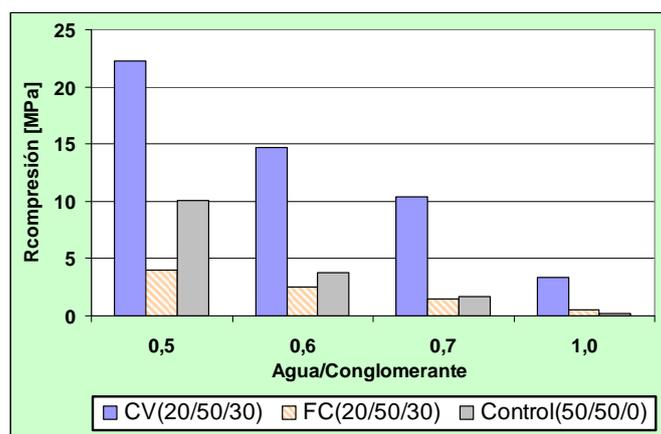
Por otra parte, al analizar el efecto de la incorporación del aditivo superplastificante a los morteros de cemento, el efecto sobre la resistencia no parece tan importante ya que las diferencias obtenidas no pueden considerarse significativas.

#### 5.1.4 Análisis de resultados

Para interpretar adecuadamente las conclusiones, se resumirán los resultados de resistencia a compresión “Rc” en dos gráficos, de acuerdo con la edad de curado, según se muestran en **Fig. 5-4** y **Fig. 5-5**.



**Fig. 5-4.** Rc v/s “Agua/Conglomerante”. Morteros “cemento BL 42,5R/escayola/puzolana”. Edad: 28 días de curado.



**Fig. 5-5. Rc v/s “Agua/Conglomerante”. Morteros “cimento BL 42,5R/escayola/puzolana”. Edad: 90 días de curado.**

De los resultados experimentales obtenidos, es posible concluir lo siguiente:

- A los 28 días de curado, la sustitución de cemento por CV proporciona un mortero con una “Rc” similar al mortero control (cem/esc = 50/50), que disminuye al aumentar la relación “Agua/Conglomerante”.
- A los 28 días, la sustitución de cemento por CV proporciona un mortero con una “Rc” superior el doble de su homologa con filler calizo, lo que pone de manifiesto la contribución de la reacción puzolánica al incremento de la resistencia.
- A los 28 días, la sustitución de cemento por FC disminuye notablemente la “Rc” en comparación con la del mortero control. Estos resultados reafirman la inactividad del filler como material puzolánico.
- A los 90 días de curado, la sustitución de cemento por CV proporciona una “Rc” casi el doble de la resistencia a los 28 días, independiente de la relación “Agua/Conglomerante”, lo que evidencia una gran actividad puzolánica entre los 28 y 90 días de curado, que produce incrementos significativos de la “Rc” y una fijación de yeso dentro de la matriz conglomerante.
- A los 90 días, la sustitución de cemento por CV proporciona una resistencia de más del doble de la resistencia del mortero control a la misma edad, lo que pone de manifiesto el comportamiento puzolánico de la CV, que tiene una influencia positiva sobre la durabilidad de las probetas, dificultando la formación de compuestos expansivos.
- En el mortero control (50/50), las resistencias decaen con la edad lo que evidencia la incompatibilidad de la mezcla y el efecto del ambiente de curado húmedo, que facilita la formación de compuestos expansivos, con la consiguiente disminución de resistencia.
- A los 90 días de curado, la “Rc” del mortero control es superior al mortero con FC, estas diferencias se van reduciendo conforme aumenta la relación “Agua/Conglomerante”.

- Resulta significativo comprobar que aunque el mortero control “cemento/escayola”, contienen un 50% de cemento, al continuar el conglomerante hidratando con el tiempo, la “Rc” no aumente sino que disminuye y al parecer, por la presencia de compuestos expansivos que impiden el desarrollo de resistencia de al menos la parte del cemento de la probeta. Sin embargo, la sustitución del cemento por CV provoca la reacción puzolánica con formación de productos conglomerantes que densifican la matriz y aumentan la resistencia de los morteros con el tiempo de curado.
- La ceniza volante, en este tipo de morteros, en presencia de humedad como la de los ensayos, hace un aporte extraordinario a la ganancia de resistencia mecánica, más aún con el ahorro considerable de cemento; reafirmando así el aporte puzolánico en las mejoras de las condiciones de la durabilidad.
- De forma general, se puede concluir que la incorporación de CV produce mejoras muy significativas en lo que a mejora de la “Rc” y reducción de costes se refiere.

En la **Tabla 5-4**, se expresan las curvas de ajuste “Rc”, con su coeficiente de variación R<sup>2</sup> respectivo para los valores experimentales obtenidos.

**Tabla 5-4. Ajuste exponencial de curvas Rc en morteros con escayola. Determinadas con valores experimentales de “Rc” para relación “agua/conglomerante = 0,5; 0,6; 0,7 y 1,0.**

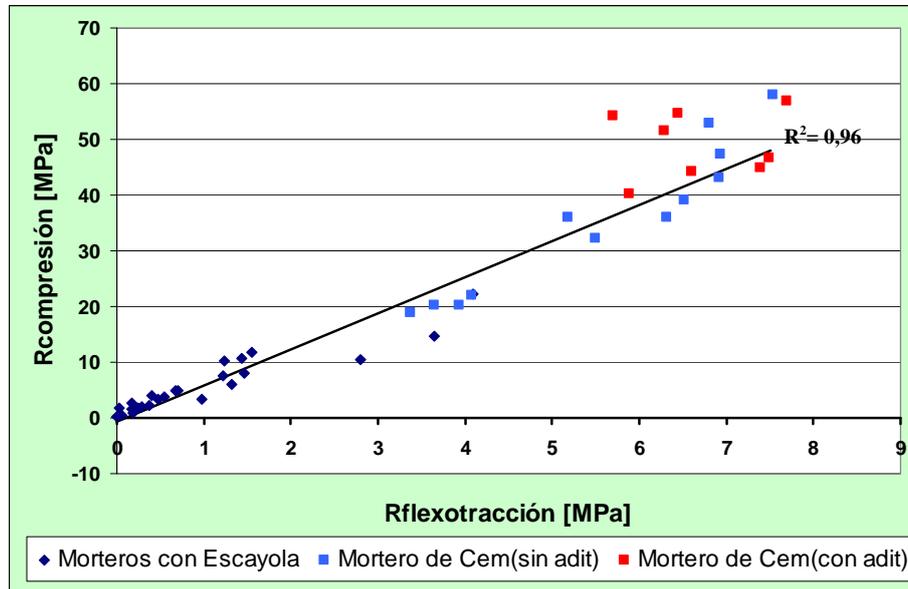
Sustitución	Mortero Tipo	Edad [días]	Curva de Ajuste	R <sup>2</sup>
			Rc [MPa]	
Ceniza volante	cpb/ y /cv = 20/ 50 /30	28	62,581 e <sup>-3,4512(a/b)</sup>	0,9956
Filler calizo	cpb/ y /fc = 20/ 50 /30	28	22,161 e <sup>-3,1472(a/b)</sup>	0,9945
-	cpb/ y = 50/ 50	28	77,939 e <sup>-3,8635(a/b)</sup>	0,9981
-	cpb = 100 (normalizado)	28	137,92e <sup>-1,9247(a/b)</sup>	0,9999
Ceniza volante	cpb/ y /cv = 20/ 50 /30	90	142,62 e <sup>-3,7445(a/b)</sup>	0,9996
Filler calizo	cpb/ y /fc = 20/ 50 /30	90	30,757 e <sup>-4,1725(a/b)</sup>	0,9952
-	cpb/ y = 50/ 50	90	416,09 e <sup>-7,7013(a/b)</sup>	0,9951
-	cpb = 100 (normalizado)	90	152,38e <sup>-1,9414(a/b)</sup>	0,9999

(a/b) = (agua/conglomerante)

La tendencia que muestran los resultados de “Rc” según la relación “Agua/Conglomerante”, es de tipo exponencial, evidenciando una similitud en dicha forma con el comportamiento del hormigón estándar.

De acuerdo con la **Tabla 5-4**, se puede concluir que la resistencia a compresión de los morteros “Cem/Esc/Pz”, a una edad determinada, depende de la relación “Agua/Conglomerante”.

De igual forma, en la Fig. 5-6 se muestra la relación entre los valores experimentales de la resistencia a compresión y la resistencia a flexotracción, separado por tipo de mortero.



**Fig. 5-6. Resistencia de Compresión vs Resistencia de Flexotracción. Morteros de “Cem/Esc/Pz” y Morteros de cemento.**

De la observación de Fig. 5-6, después de haber dado ubicación en la gráfica a 36 pares de puntos ordenados, se puede concluir que muestran un buen ajuste coincidente con una curva tipo lineal (con  $R^2 = 0,96$ ). Este ajuste permite aseverar que se espera que la resistencia a flexotracción sea en promedio, un 15,4% la resistencia a compresión; de este modo, a mayor resistencia a compresión, se espera una mejora en la resistencia a flexotracción.

La proporcionalidad que provee el ajuste entre los datos experimentales expuestos en Fig. 5-6, podrían permitir realizar en principio, los análisis de resultados en referencia a un solo parámetro de resistencia (como la resistencia a compresión) y su vinculación con otros parámetros como ha sido hasta aquí, como lo es la edad de curado y la relación “Agua/Conglomerante”.

## 5.2 Morteros de Cemento Portland Blanco BL I 52,5R y Yeso. Adiciones con Ceniza Volante y Filler Calizo

En la elaboración de este tipo de morteros se han utilizado los siguientes materiales:

- Cemento Portland Blanco (CPB) BL I 52,5R, identificado como “Tipo A”.
- Yeso Rápido Iberplast, fabricado por la empresa Iberplast S.A.
- Ceniza Volante suministrada por la central termoeléctrica de Andorra-Teruel.
- Filler Calizo tamizado por la malla de 80µm.
- Arido fino Normsand (arena normalizada)
- Aditivo superplastificante Melment L240 (de ser necesario).

A diferencia de la mezcla con escayola del apartado 5.1, las mezclas con yeso se dosifican de acuerdo con distintas combinaciones de conglomerante seco (en peso), expresadas a través de la relación “Cemento BL I 52,5R/Yeso/Puzolana” y que se especifican para cada caso en análisis. Las demás indicaciones para la elaboración de mezclas y probetas, son las mismas descritas para las mezclas de mortero del apartado 5.1.

Estos morteros utilizan yeso, porque es un producto comercialmente más económico que la escayola, además, porque es un material abundante en la naturaleza y es más factible su utilización en países en vías de desarrollo y en países menos desarrollados. Se utiliza Cemento Portland Blanco I 52,5R porque al no contener adiciones, hay menos variables que pueden incidir en los resultados.

Las probetas una vez elaboradas, se mantienen en el molde metálico por 24 horas en cámara húmeda para luego desmoldarlas y mantenerlas curando en el interior de una bolsa de plástico sellada hasta un día antes de completar la edad de ensayo. En general, el último día, las probetas se mantienen sumergidas en agua desionizada (curado en “Bolsa y Agua”); en particular, una serie con CV y FC es ensayada luego del curado en bolsa, sin sumergir en agua (curado en “Bolsa”).

Finalmente, las probetas son ensayadas a rotura por flexotracción y compresión a los 7, 28 y 90 días.

### **5.2.1 Morteros Control “Cemento Portland Blanco BL I 52,5R / Yeso”**

Según la definición de “Mortero Control” dada en el apartado 5.1.1, y según las distintas dosificaciones de los morteros “cemento/yeso/puzolana” a ensayar, en este caso, se requiere disponer de las siguientes dosificaciones

:

- Mortero Control 1: “Cemento/Yeso = 40/60”
- Mortero Control 2: “Cemento/Yeso = 50/50”
- Mortero Control 3: “Cemento/Yeso = 60/40”

Adicionalmente, se define el siguiente mortero control, como referencia en los análisis de resultados:

- Mortero Control 4: “Cemento/Yeso = 0/100” (Mortero de Yeso Puro)

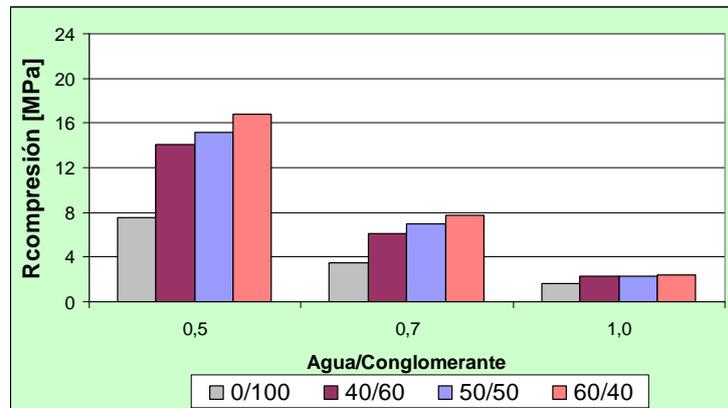
Los resultados experimentales de resistencia a compresión y flexotracción de los distintos “Morteros Control”, para la condición de curado en “Bolsa y Agua”, para distintas relaciones “Agua/Conglomerante” y a 7, 28 y 90 días de curado, se exponen en **Tabla 5-5**.

**Tabla 5-5. Resistencia a Flexotracción y Compresión. Morteros Control “cem BL 52,5R/yeso”. Curados en “Bolsa y Agua”. Distintas relaciones “Agua/Conglomerante”.**

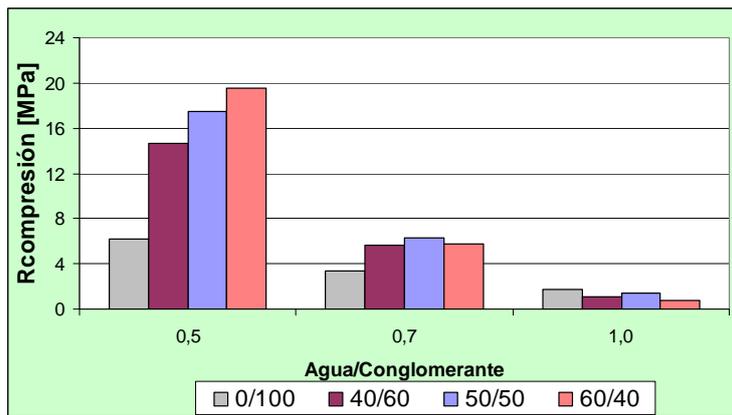
Edad [días]	"a/c"	Control 1 : "40/60"		Control 2 : "50/50"		Control 3 : "60/40"		Control 4 : "0/100"	
		Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
		Flex.	Comp.	Flex.	Comp.	Flex.	Comp.	Flex.	Comp.
7	0,5	2,2	14,1	2,5	15,2	2,4	16,8	1,0	7,5
7	0,7	1,1	6,1	1,2	7,0	1,3	7,8	0,7	3,5
7	1,0	0,3	2,3	0,3	2,3	0,3	2,4	0,4	1,6
28	0,5	2,2	14,7	2,5	17,5	2,5	19,6	0,8	6,2
28	0,7	0,9	5,6	0,9	6,3	0,8	5,8	0,6	3,4
28	1,0	0,1	1,1	0,0	1,4	0,0	0,8	0,4	1,7
90	0,5	2,0	15,8	1,8	17,3	2,1	18,6	0,7	5,2
90	0,7	0,6	4,7	0,7	2,7	0,1	1,9	0,4	3,3
90	1,0	0,0	1,2	0,3	0,5	0,0	0,6	0,3	1,8

“a/c” : agua/conglomerante

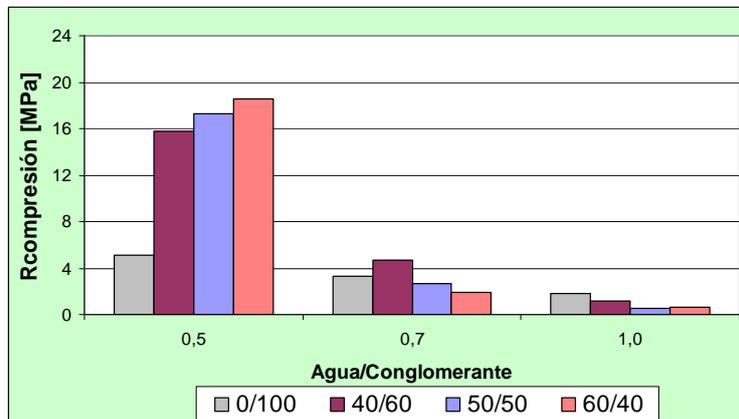
Los resultados resistencia a compresión “Rc” según la relación “Agua/Conglomerante” y ordenados de menor a mayor contenido de cemento, se visualizan en **Fig. 5-7**, en **Fig. 5-8** y en **Fig. 5-9**, para las edades de ensayo de 7, 28 y 90 días, respectivamente.



**Fig. 5-7. Rc v/s “agua/conglomerante”. Morteros Control “Cem BL 52,5R/Yeso”. Edad: 7 días. Curado en “Bolsa y Agua”.**



**Fig. 5-8.** Rc v/s “agua/conglomerante”. Morteros Control “Cem BL 52,5R/Yeso”. Edad: 28 días. Curado en “Bolsa y Agua”.



**Fig. 5-9.** Rc v/s “agua/conglomerante”. Morteros Control “Cem BL 52,5R/Yeso”. Edad: 90 días. Curado en “Bolsa y Agua”.

De las **Fig. 5-7**, **Fig. 5-8** y **Fig. 5-9**, es posible observar que la “Rc” es mayor conforme aumenta el contenido de cemento en la relación “Agua/Conglomerante = 0,5”, para toda edad de curado; así como también, a 7 días de curado, para toda relación “Agua/Conglomerante”. Sin embargo, esta dependencia de “Rc” con el contenido de cemento se va perdiendo paulatinamente a partir de los 28 días de edad de curado y para relaciones “Agua/Conglomerante” iguales o superiores a “0,7”. En general, la “Rc” disminuye, lógicamente, conforme aumenta la relación “Agua/Conglomerante”.

Para el mortero control “40/60”, en lo que se observa, la evolución de la “Rc” con la relación “Agua /Conglomerante”, tiene similitud con el comportamiento del mortero “50/50”, y en ese caso, las caídas de “Rc” con la edad, no son tan bruscas.

Para el mortero control “50/50” y su relación “Agua/Conglomerante = 0,5”, se observa un aumento de la “Rc” de 7 a 28 días de curado y una estabilización a los 90 días de curado. Para relaciones “Agua/Conglomerante = 0,6”, el aumento de 7 a 28 días es muy reducido, observándose una caída significativa a los 90 días. Para las relaciones “Agua/Conglomerante” de “0,7” y “1,0”, se observa una disminución de la “Rc” con el tiempo de curado, reduciéndose de forma muy significativa la “Rc” a los 90 días de curado, debido posiblemente a la formación de compuestos expansivos.

Para el mortero “60/40”, se observan mejores valores de la “Rc” para una relación “Agua/Conglomerante” de “0,5”, que los otros dos morteros de control anteriores, lo cual es lógico, teniendo en cuenta que la cantidad de cemento Portland es superior. Para relaciones “Agua/Conglomerante” superiores (“0,7” y “1,0”), la “Rc” se reduce con el tiempo de curado, observándose valores bajos a los 90 días de curado.

Para el mortero “0/100” (yeso puro), se observa que la “Rc” también disminuye conforme aumenta la edad de curado. Esta es lógico por cuanto las probetas quedan expuestas a un ambiente de alta humedad aumentando con el tiempo de curado la disolución de la matriz conglomerante del yeso.

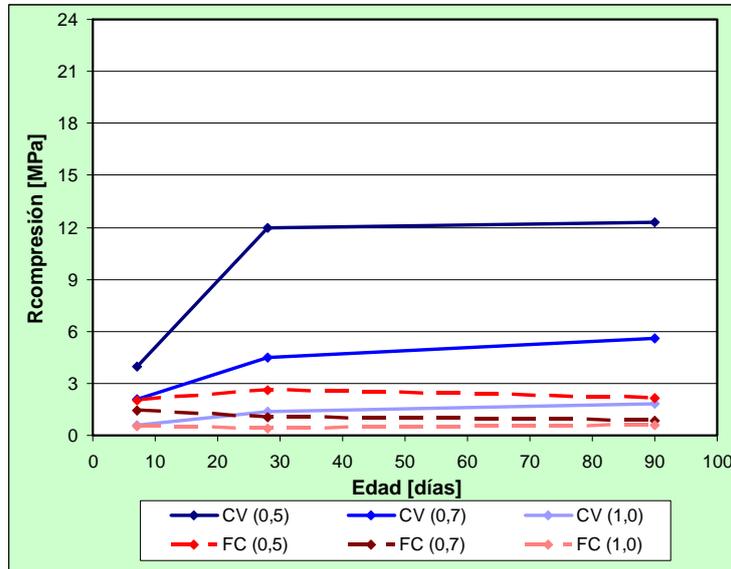
**5.2.2 Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 10/40/50”**

En **Tabla 5-6** se muestran resultados experimentales de resistencia a flexotracción y compresión obtenidos utilizando ceniza volante y filler calizo, con dos diferentes curados.

**Tabla 5-6. Resultados experimentales. Mortero “cem Bl 52,5R/ yeso /Pz = 10/ 40 /50”**

Edad [días]	Relación agua/congl.	Tipo de Curado	Ceniza Volante		Filler Calizo	
			Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión	Flexotracc.	Compresión
7	0,5	Bolsa + Agua	1,1	4,0	0,3	2,0
7	0,7	Bolsa + Agua	0,6	2,1	0,2	1,4
7	1,0	Bolsa + Agua	0,2	0,6	0,1	0,5
28	0,5	Bolsa + Agua	3,0	12,0	0,4	2,6
28	0,7	Bolsa + Agua	1,2	4,5	0,2	1,0
28	1,0	Bolsa + Agua	0,3	1,4	0,0	0,4
90	0,5	Bolsa + Agua	2,5	12,3	0,2	2,2
90	0,7	Bolsa + Agua	1,3	5,6	0,0	0,8
90	1,0	Bolsa + Agua	0,2	1,8	0,0	0,6

Interpretando los valores de **Tabla 5-6**, en **Fig. 5-10** es posible observar la variación de resistencia a compresión “Rc” con la edad de curado para morteros con adición de ceniza volante y filler calizo, para el curado en “Bolsa y Agua” y para distintas relaciones “Agua/Conglomerante”.



**Fig. 5-10. Rc v/s Edad. Mortero “cem/yeso/Pz= 10/40/50”. Con CV y FC. Distinta relación (Agua/Conglomerante). Curado en Bolsa y Agua.**

De acuerdo con los datos de **Tabla 5-6** y observando **Fig. 5-10**, es posible concluir lo siguiente.

- En morteros con CV, hay un aumento de la “Rc” con el tiempo de curado para todas las relaciones “Agua/Conglomerante”. No hay un aumento significativo de la “Rc” entre 28 y 90 días.
- En morteros con FC, al comparar con anteriores mezclas que poseen similar proporción de cemento (10%), es esta serie la que posee más bajos resultados de la “Rc”. Esto reafirma conclusiones anteriores en cuanto a que este tipo de mezclas, la “Rc” depende de manera importante de la proporción de yeso y de la proporción de cemento. La reducción de la proporción de yeso, reduce las resistencias comparativamente con todas las otras combinaciones anteriores que poseen mayor proporción de yeso.
- Al comparar valores de esta misma serie con CV y FC, la adición de CV tiene un significativo mejor comportamiento en resistencia que el FC, sobre todo para bajas relaciones “Agua/Conglomerante”.

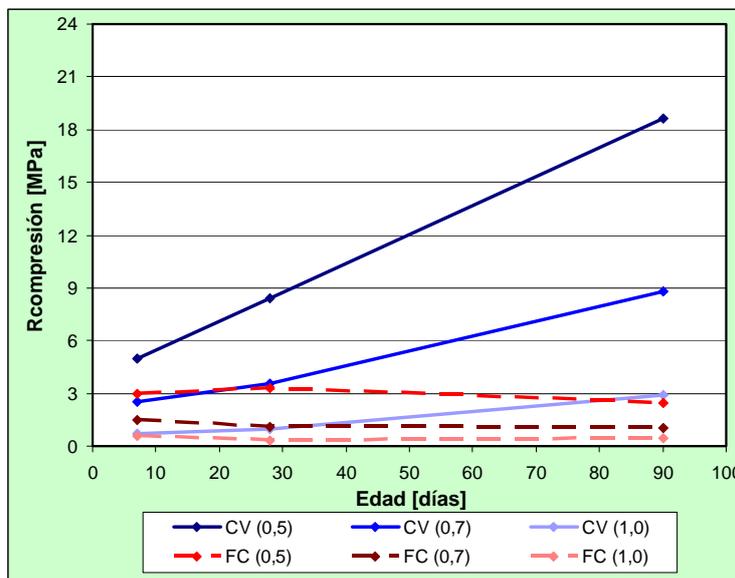
5.2.3 Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 15/40/45”

En **Tabla 5-7**, se muestran resultados experimentales de resistencia a flexotracción y compresión para una nueva mezcla, en que se mantiene fijo el yeso base respecto a la mezcla anterior, se aumenta el cemento y se disminuye la cantidad de ceniza volante (o filler calizo).

**Tabla 5-7. Resultados experimentales. Mortero “cem Bl 52,5R/ yeso /Pz = 15/ 40 /45”**

Edad [días]	Relación agua/congl.	Tipo de Curado	Ceniza Volante		Filler Calizo	
			Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión	Flexotracc.	Compresión
7	0,5	Bolsa + Agua	1,2	5,0	0,6	3,0
7	0,7	Bolsa + Agua	0,7	2,5	0,4	1,5
7	1,0	Bolsa + Agua	0,2	0,7	0,1	0,6
28	0,5	Bolsa + Agua	1,2	8,4	0,5	3,3
28	0,7	Bolsa + Agua	0,7	3,6	0,1	1,1
28	1,0	Bolsa + Agua	0,1	1,0	0,0	0,3
90	0,5	Bolsa + Agua	3,8	18,6	0,0	2,5
90	0,7	Bolsa + Agua	2,0	8,8	0,0	1,0
90	1,0	Bolsa + Agua	0,6	2,9	0,0	0,5

Los resultados resistencia a compresión “Rc” según edad, se visualizan en **Fig. 5-11**.



**Fig. 5-11. Rc v/s Edad. Mortero “cpb/yeso/Pz= 15/40/45”. Con CV y FC. Distinta relación (Agua/Conglomerante). Curado en Bolsa y Agua.**

De acuerdo con los datos de **Tabla 5-7** y observando **Fig. 5-11**, es posible concluir lo siguiente:

- En probetas con CV, el aumento del cemento respecto de la combinación anterior, no evidencia una mejora de la “Rc” a 28 días, pero si a 90 días por lo que, nuevamente es la CV, con su carácter puzolánico, la que provee un incremento de la resistencia a tiempos largos. En general, la resistencia crece con la edad de curado.
- En probetas con FC, el aumento del cemento respecto a la combinación anterior (“10/40/50”), con igual proporción de yeso, causa una leve mejoría en las “Rc”.
- Al comparar valores de esta misma serie con CV y FC, la adición de CV tiene un significativo mejor comportamiento en resistencia que el FC, sobre todo para bajas relaciones “Agua/Conglomerante”; además la resistencia aumenta con el tiempo de curado, reduciendo los problemas de incompatibilidad entre el yeso y el cemento.

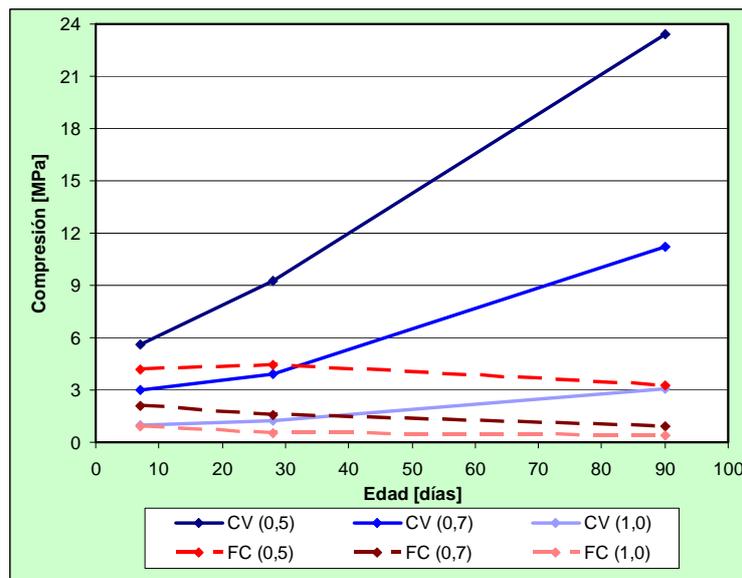
**5.2.4 Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 20/40/40”**

En **Tabla 5-8**, se muestran resultados experimentales de resistencia a flexotracción y compresión para una nueva mezcla, en que se mantiene fijo el yeso base respecto a las dos anteriores mezclas, continuando con el aumento de cemento y disminuyendo la cantidad de ceniza volante (o filler calizo).

**Tabla 5-8. Resultados experimentales. Mortero “cem BI 52,5R/ yeso /Pz = 20/ 40 /40”**

Edad [días]	Relación agua/congl.	Tipo de Curado	Ceniza Volante		Filler Calizo	
			Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión	Flexotracc.	Compresión
7	0,5	Bolsa + Agua	1,2	5,6	0,9	4,2
7	0,7	Bolsa + Agua	0,8	3,0	0,5	2,1
7	1,0	Bolsa + Agua	0,3	1,0	0,2	0,9
28	0,5	Bolsa + Agua	1,5	9,3	0,7	4,4
28	0,7	Bolsa + Agua	0,7	3,9	0,2	1,6
28	1,0	Bolsa + Agua	0,2	1,2	0,0	0,5
90	0,5	Bolsa + Agua	3,8	23,4	0,1	3,3
90	0,7	Bolsa + Agua	2,6	11,2	0,0	0,9
90	1,0	Bolsa + Agua	0,6	3,1	0,0	0,4

Los resultados resistencia a compresión “Rc” según edad, se visualizan en **Fig. 5-12**.



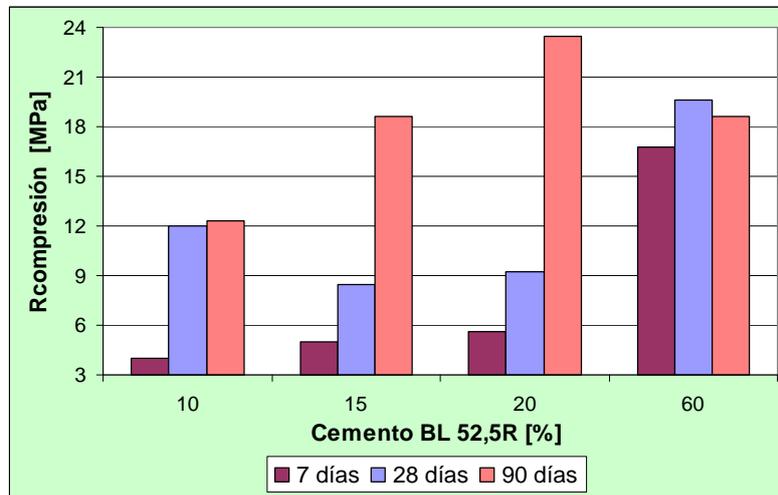
**Fig. 5-12. Rc v/s Edad. Mortero “cpb/yeso/Pz= 20/40/40”. Con CV y FC. Distinta relación (Agua/Conglomerante). Curado en Bolsa y Agua.**

De acuerdo con los datos de **Tabla 5-8** y observando **Fig. 5-12**, es posible concluir lo siguiente:

- En probetas con CV, parece predominar el carácter puzolánico de la CV, para relaciones “Agua/Conglomerante” de “0,5” y “0,7”, ya que es a 90 días cuando se produce un importante incremento de la “Rc”. A los 90 días, resultan mejoras notables de resistencia respecto a las anteriores dosificaciones (“10/40/50” y “15/40/45”) e incluso, significativamente superior a la “Rc” del “Mortero Control 3 (60/40)”, a esa misma edad.
- En probetas con FC, el aumento del contenido de cemento respecto a las dosificaciones anteriores, que poseen igual cantidad de yeso, evidencia una mejora de la “Rc”.
- Al comparar valores de “Rc” de esta serie, con CV y con FC, la adición de CV tiene un significativo mejor comportamiento en resistencia que el FC, sobre todo para bajas relaciones “Agua/Conglomerante”; además, en los morteros con CV, la “Rc” aumenta con el tiempo de curado, reduciendo los problemas de incompatibilidad entre el yeso y el cemento.

Discriminando para los resultados de “Rc” más promisorios, en **Fig. 5-13**, se representa la “Rc” frente al porcentaje de cemento, para una relación

“Agua/Conglomerante” fija de “0,5” de las tres anteriores series que utilizan CV, definidas como “10/40/50”, “15/40/45” y “20/40/40”; y para efectos de comparación, se agregan los resultados de “Rc” del “Mortero Control 3” que contiene 60% de cemento.

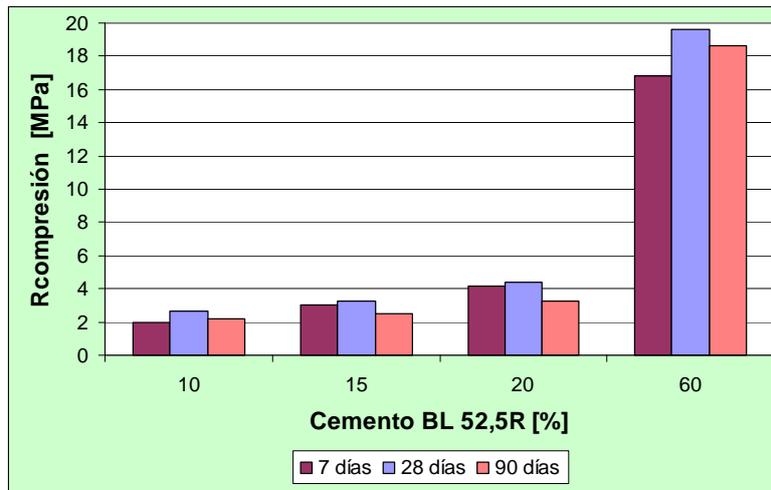


**Fig. 5-13.** Rc v/s “Contenido de cemento”. Mezclas con CV y 40% de yeso. Distintas edades. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en bolsa y agua.

De **Fig. 5-13** puede observarse:

- En probetas a 90 días de curado, es claro el efecto que a mayor contenido de cemento en el conglomerante, mayor “Rc”; sin embargo, a 28 días, la reactividad puzolánica de la CV no es suficiente, por lo que no se aprecia una tendencia clara de la evolución de la “Rc”.
- Un contenido de 20% de cemento, no evidencia una mejora de resistencia a los 28 días, pero sí a los 90 días, que incluso supera significativamente la “Rc” del “Mortero Control 3” que posee un 60% de cemento, por lo que, es posible ver, que una adecuada cantidad de ceniza volante, es responsable de los incrementos de resistencia con la edad producto de la reacción puzolánica.

Efectuando similar análisis, pero con FC, en **Fig. 5-14**, se representa la “Rc” frente al porcentaje de cemento, para la relación “Agua/Conglomerante” fija de “0,5” de las tres anteriores series, agregándose los resultados de “Rc” del “Mortero Control 3”.



**Fig. 5-14.** Rc v/s “Contenido de cemento”. Mezclas con FC y 40% de yeso. Distintas edades. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en bolsa y agua.

De **Fig. 5-14** puede observarse lo siguiente:

- A 7 y 28 días de curado, se cumple que a mayor contenido de cemento, mayor “Rc”, en donde los incrementos se reducen conforme aumenta el contenido de cemento. Sin embargo, a 90 días, se produce una disminución de la “Rc” evidenciando problemas de compatibilidad entre el yeso y el cemento, por la formación de compuestos expansivos.

### 5.2.5 Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 20/50/30”

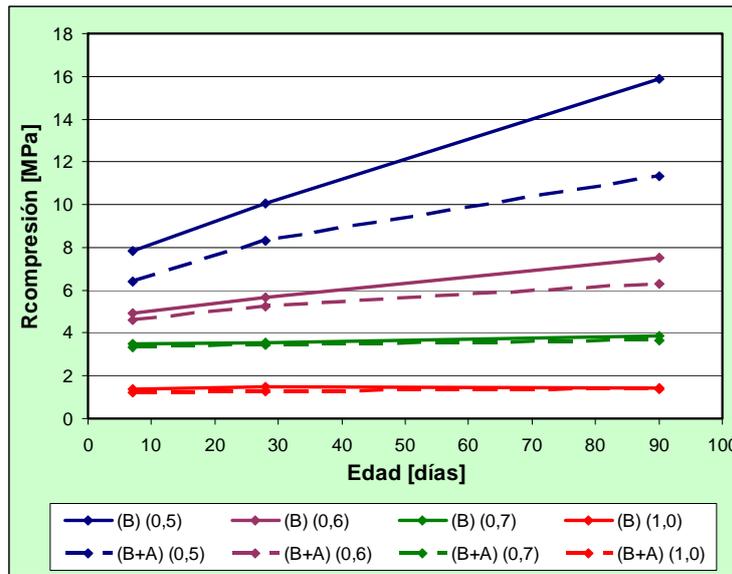
En **Tabla 5-9** se muestran resultados experimentales de resistencia a flexotracción y compresión para una mezcla con una nueva variación en las proporciones del conglomerante. Se aumenta la cantidad de yeso base (de 40% a 50%), y el complemento, se distribuye en la parte de cemento (20%) y ceniza volante o filler calizo (30%).

Cabe mencionar, que solo para esta dosificación se desarrollan experiencias comparativas más completas entre ceniza volante y filler calizo, al agregar una serie para la relación “Agua/Conglomerante = 0,6” y en donde también se efectúa una comparación entre dos tipos de curados: “Bolsa y Agua” (últimas 24 horas antes del ensayo, sumergida en agua) y “Bolsa” (sin inmersión de la probeta en agua).

**Tabla 5-9. Resultados experimentales. Mortero “cem BI 52,5R/ yeso /Pz = 20/ 50 /30”**

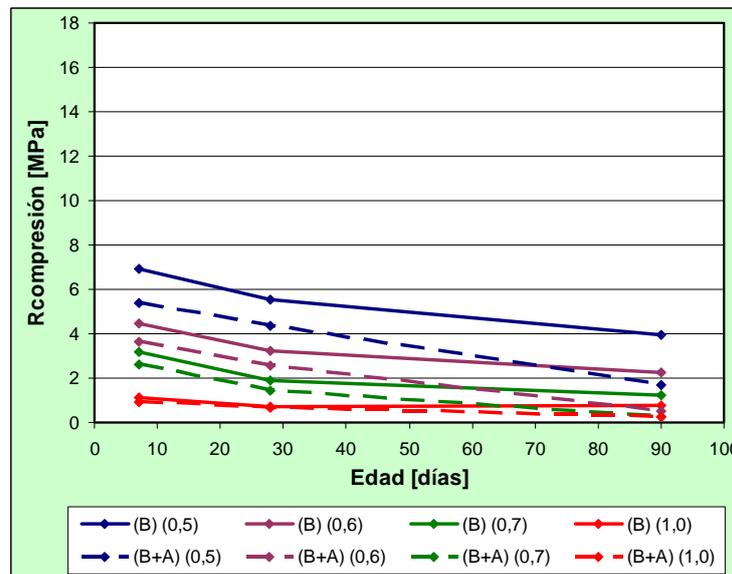
Edad [días]	Relación agua/congl.	Tipo de curado	Ceniza Volante		Filler Calizo	
			Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión	Flexotracc.	Compresión
7	0,5	Bolsa + Agua	1,0	6,4	1,1	5,4
7	0,6	Bolsa + Agua	0,9	4,6	0,9	3,6
7	0,7	Bolsa + Agua	0,7	3,4	0,6	2,6
7	1,0	Bolsa + Agua	0,2	1,2	0,2	0,9
28	0,5	Bolsa + Agua	1,5	8,3	0,7	4,4
28	0,6	Bolsa + Agua	1,0	5,3	0,3	2,6
28	0,7	Bolsa + Agua	0,7	3,5	0,2	1,4
28	1,0	Bolsa + Agua	0,2	1,3	0,1	0,7
90	0,5	Bolsa + Agua	1,7	11,4	0,0	1,7
90	0,6	Bolsa + Agua	0,9	6,3	0,0	0,5
90	0,7	Bolsa + Agua	0,5	3,7	0,0	0,3
90	1,0	Bolsa + Agua	0,2	1,4	0,0	0,3
7	0,5	Bolsa	1,6	7,8	1,6	6,9
7	0,6	Bolsa	1,3	4,9	1,1	4,5
7	0,7	Bolsa	1,0	3,5	0,8	3,2
7	1,0	Bolsa	0,3	1,4	0,3	1,1
28	0,5	Bolsa	2,2	10,1	1,0	5,5
28	0,6	Bolsa	1,2	5,7	0,6	3,2
28	0,7	Bolsa	0,8	3,6	0,4	1,9
28	1,0	Bolsa	0,3	1,5	0,1	0,7
90	0,5	Bolsa	3,3	15,9	0,6	4,0
90	0,6	Bolsa	1,7	7,5	0,3	2,3
90	0,7	Bolsa	0,6	3,9	0,1	1,2
90	1,0	Bolsa	0,3	1,5	0,0	0,8

Interpretando los valores de **Tabla 5-9**, en la **Fig. 5-15** es posible observar la variación de resistencia a compresión “Rc” con la edad de curado para morteros con adición de ceniza volante, para los dos tipos de curado utilizado y para distintas relaciones “Agua/Conglomerante”.



**Fig. 5-15.** Rc v/s Edad de curado. Morteros “cpb/yeso/CV = 20/50/30”. Efectos de curado para distintas relaciones Agua/Conglomerante.

Similarmente, en Fig. 5-16 se observa la variación de “Rc” con la edad de curado, para morteros con adición de filler calizo.



**Fig. 5-16.** Rc v/s Edad de curado. Morteros “cpb/yeso/FC = 20/50/30”. Efectos de curado para distintas relaciones Agua/Conglomerante.

Los resultados expuestos anteriormente en **Fig. 5-15** y **Fig. 5-16**, ponen de manifiesto que el curado en “Bolsa y Agua” producen “Rc” inferiores al curado en “Bolsa”, para todas las edades de curado y para toda relación “Agua/Conglomerante”, como era de esperar. Estas diferencias son tanto más acusadas cuanto menor es la relación “Agua/Conglomerante” utilizada. Las diferencias de “Rc” observadas entre un tipo de curado y otro, pueden deberse a la mayor disolución de yeso y a la mayor facilidad en la formación de compuestos expansivos en las probetas sumergidas.

En los morteros con CV, se observa un aumento de la “Rc” con la edad de curado, y también, un aumento de la “Rc” conforme disminuye la relación “Agua/Conglomerante”. Situación contraria ocurre en los morteros con FC, observándose una disminución de la “Rc” con la edad de curado y también una disminución conforme aumenta la relación “Agua/Conglomerante”. Este comportamiento es lógico teniendo en cuenta que el FC no tiene actividad puzolánica. Debido a la ausencia del carácter puzolánico, el FC no puede fijar portlandita y no puede formar cantidades adicionales de productos conglomerantes hidratados que aumentarían la “Rc”, y por otro lado, al no fijar portlandita, facilita que éste reaccione con el aluminato tricálcico y con los sulfatos aportados por el yeso para formar compuestos expansivos, que producen esa reducción de la “Rc”.

También hay que destacar, que en general, las probetas con FC, resultan con valores de “Rc” drásticamente menores que las probetas con CV, a medida que aumenta la edad de curado, para todas las relaciones “Agua/Conglomerante”. Esto es debido a las razones anteriormente expuestas y a la disolución de la matriz conglomerante.

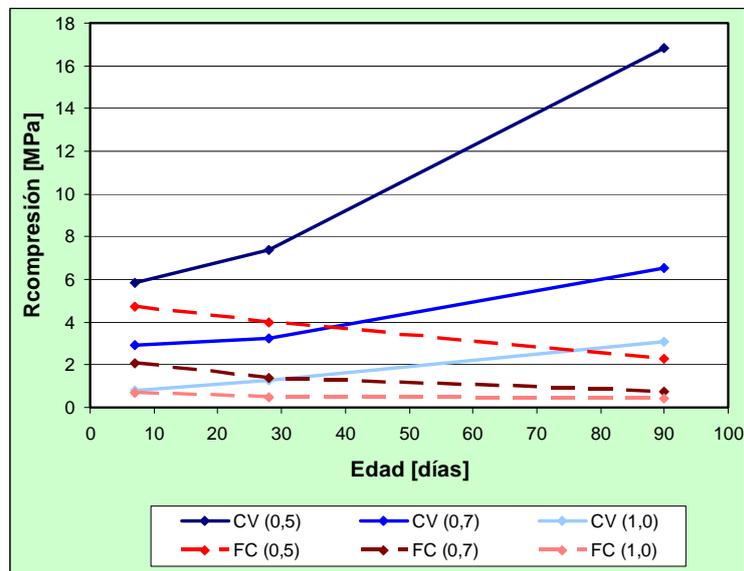
### 5.2.6 Morteros “CPB BL I 52,5R/Yeso/Puzolana = 15/50/35”

En **Tabla 5-10**, se muestran los resultados experimentales de resistencia a flexotracción y compresión obtenidos para CV y FC. Manteniendo constante la proporción de yeso (50%), se disminuye el cemento y aumenta la adición de puzolana respecto de la dosificación anterior (20/50/30).

**Tabla 5-10. Resultados experimentales. Mortero “cem BI 52,5R/ yeso /Pz = 15/ 50 /35”**

Edad [días]	Relación agua/congl.	Tipo de curado	Ceniza Volante		Filler Calizo	
			Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión	Flexotracc.	Compresión
7	0,5	Bolsa + Agua	1,2	5,9	0,9	4,7
7	0,7	Bolsa + Agua	0,6	2,9	0,5	2,1
7	1,0	Bolsa + Agua	0,2	0,8	0,2	0,7
28	0,5	Bolsa + Agua	1,3	7,4	0,7	4,0
28	0,7	Bolsa + Agua	0,6	3,3	0,2	1,4
28	1,0	Bolsa + Agua	0,2	1,3	0,1	0,5
90	0,5	Bolsa + Agua	3,5	16,8	0,0	2,3
90	0,7	Bolsa + Agua	1,4	6,5	0,0	0,8
90	1,0	Bolsa + Agua	0,5	3,1	0,0	0,4

Los resultados de la variación de resistencia a compresión “Rc” con la edad de curado, para morteros con adición de ceniza volante y filler calizo, para el curado utilizado y para las distintas relaciones “Agua/Conglomerante”, se observan en Fig. 5-17.



**Fig. 5-17. Rc v/s Edad de curado. Morteros “cem/yeso/Pz= 15/50/35”. Con CV y FC. Distinta relación (Agua/Conglomerante). Curado en “Bolsa y Agua”.**

Observando los datos graficados en Fig. 5-17, es posible concluir lo siguiente:

- En morteros con CV, la reducción en cemento respecto a la dosificación “20/50/30”, genera una reducción de la resistencia a temprana edad (hasta 28 días), para toda relación “Agua/Conglomerante”; sin embargo, a mayor edad de curado, el incremento en el contenido de ceniza volante, genera un incremento de la resistencia, lo que pone de manifiesto una mayor reactividad puzolánica, para toda relación “Agua/Conglomerante”.
- En morteros con CV, en general, la resistencia crece con la edad de curado; incluso para relaciones “agua/conglomerante” altas, se produce un aumento gradual de la resistencia con la edad de curado.

- En morteros con FC, se observa tendencia similar a la obtenida en la dosificación anterior (20/50/30) mostrada en Fig. 5-16, lo cual es lógico ya que tan solo difiere en un 5% de cemento. Esta pequeña reducción en la cantidad de cemento genera una ligera reducción en la “Rc” en los ensayos realizados con 7 y 28 días, mientras que, se incrementa ligeramente en los ensayos realizados a 90 días, lo que podría explicarse por la menor cantidad de compuestos expansivos que podrían haberse formado al partir de una menor cantidad de cemento.
- La adición de CV, tiene un significativo mejor comportamiento en resistencia que el FC, sobre todo para bajas relaciones “Agua/Conglomerante”.

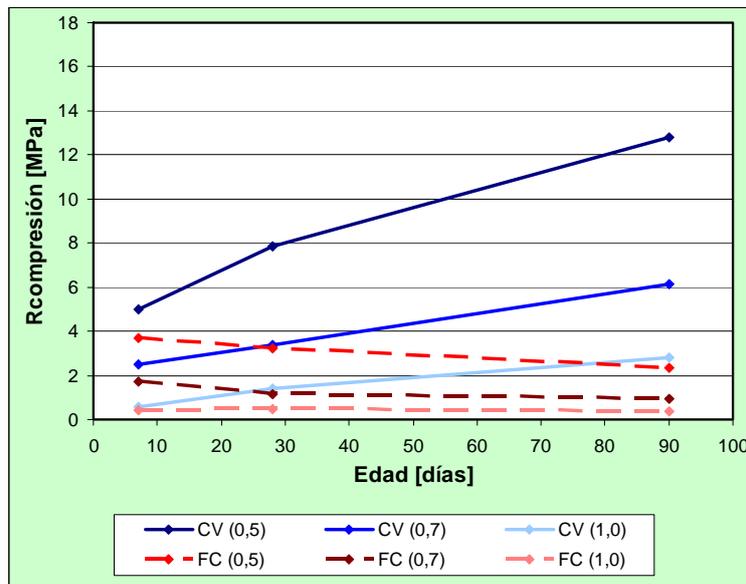
**5.2.7 Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 10/50/40”**

En **Tabla 5-11** se muestran resultados experimentales de resistencia a flexotracción y compresión para una mezcla con una nueva variación en las proporciones del conglomerante, en que se disminuye el cemento y aumenta la adición de puzolana respecto de la combinación anterior (15/50/35).

**Tabla 5-11. Resultados experimentales. Mortero “cem BI 52,5R/ yeso /Pz = 10/ 50 /40”**

Edad [días]	Relación agua/congl.	Tipo de curado	Ceniza Volante		Filler Calizo	
			Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión	Flexotracc.	Compresión
7	0,5	Bolsa + Agua	1,0	5,0	0,7	3,7
7	0,7	Bolsa + Agua	0,6	2,5	0,4	1,7
7	1,0	Bolsa + Agua	0,1	0,6	0,1	0,4
28	0,5	Bolsa + Agua	1,8	7,9	0,7	3,2
28	0,7	Bolsa + Agua	0,8	3,4	0,2	1,1
28	1,0	Bolsa + Agua	0,3	1,4	0,1	0,5
90	0,5	Bolsa + Agua	2,5	12,8	0,2	2,4
90	0,7	Bolsa + Agua	1,4	6,1	0,0	0,9
90	1,0	Bolsa + Agua	0,5	2,8	0,0	0,4

Los resultados de la variación de resistencia a compresión “Rc” según edad de curado, se visualizan en la **Fig. 5-18**.

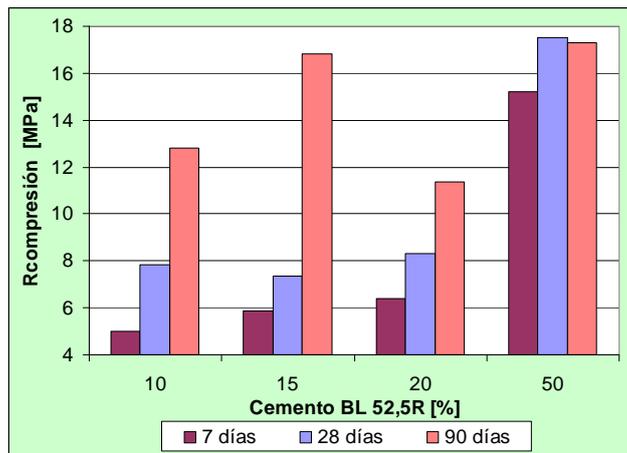


**Fig. 5-18.** Rc v/s Edad. Morteros “cpb/yeso/Pz= 10/50/40”. Con CV y FC. Distinta relación (Agua/Conglomerante). Curado en Bolsa y Agua.

Analizando los datos de **Tabla 5-11** y observando la **Fig. 5-18** anterior, es posible concluir lo siguiente:

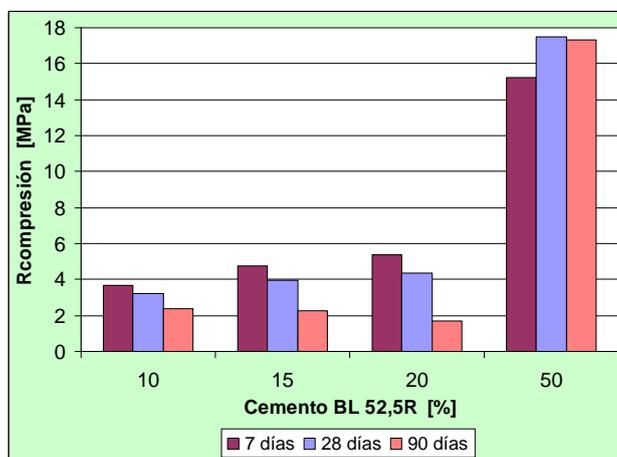
- En morteros con CV, en general, las tendencias observadas son parecidas a las dosificaciones anteriores “20/50/30” y “15/50/35”. Se constata una disminución de la “Rc” con la relación “Agua/Conglomerante” y un aumento con el tiempo de curado, que es tanto más acusado cuanto menor es la relación “Agua/Conglomerante”.
- En morteros con FC, la tendencia observada es análoga a la dosificación “15/50/35”, observándose respecto a esta, una disminución de la “Rc” para 7 y 28 días de curado y un ligero aumento para los ensayos realizados a 90 días. La interpretación de estos resultados sería la expuesta en el caso anterior (apartado **5.2.6**).

En **Fig. 5-19**, para probetas de mortero con CV, se representan resultados experimentales de las “Rc” frente al contenido de cemento (%), con una proporción fija del 50% de yeso y con una relación “Agua/Conglomerante, también fija de “0,5”. Para facilitar la comparación, se agregan los resultados de la “Rc” de las probetas “Mortero Control 2” que contienen 50% de cemento.



**Fig. 5-19.** Rc v/s “contenido de cemento”. Mezclas con CV y 50% de yeso. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en bolsa y agua.

Los resultados expuestos en Fig 5-19, ponen de manifiesto que, en morteros con CV, en general, la “Rc” se incrementa con la edad de curado; a corta edad (7 días), la “Rc” aumenta conforme aumenta el contenido de cemento, no existiendo diferencias muy significativas entre las tres dosificaciones estudiadas; sin embargo, a 90 días de curado, la serie con 10% de cemento presenta un resultado superior a la serie con 20% de cemento, lo que pondría de manifiesto la influencia de la reacción puzolánica, ya que es la dosificación con mayor contenido en CV. Por su parte, la serie con 15% de cemento, presenta resultados prácticamente iguales al “Mortero Control 2” a 90 días, con 50% de cemento, con un ahorro significativo de cemento.



**Fig. 5-20.** Rc v/s “contenido de cemento”. Mezclas con FC y 50% de yeso. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en “Bolsa y Agua”.

Efectuando similar análisis, pero con FC, en Fig. 5-20 anterior, se representa la “Rc” frente al porcentaje de cemento, para la relación “Agua/Conglomerante” fija de “0,5” de las tres anteriores series (con 50% de yeso), agregándose los resultados de “Rc” del “Mortero Control 3”.

De Fig. 5-20, puede deducirse lo siguiente:

- A 7 y 28 días de curado, a mayor porcentaje de cemento, mayor valor de la “Rc”. A 90 días, la “Rc” disminuye por la formación de productos expansivos.

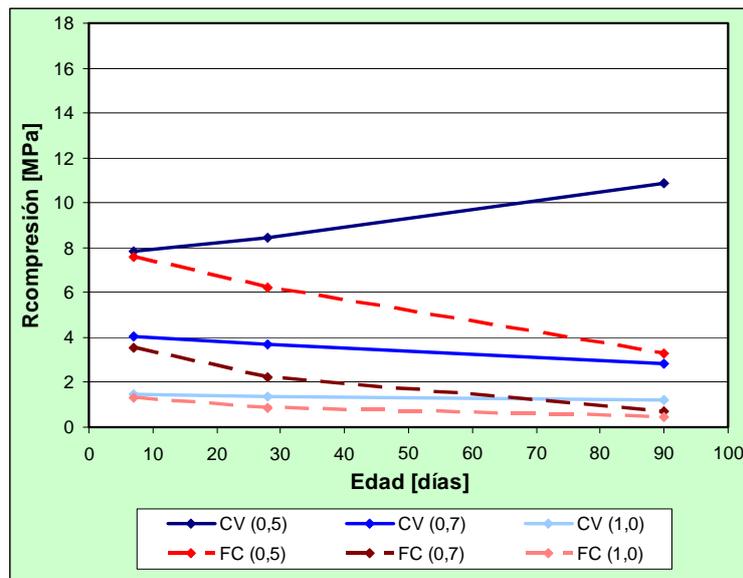
**5.2.8 Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 20/60/20”**

En Tabla 5-12 se muestran resultados experimentales de resistencia a flexotracción y compresión para una mezcla con CV y FC, con un mayor contenido de yeso (60%).

**Tabla 5-12. Resultados experimentales. Mortero “cem BI 52,5R/ yeso /Pz = 20/ 60 /20”**

Edad [días]	Relación agua/congl.	Tipo de Curado	Ceniza Volante		Filler Calizo	
			Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión	Flexotracc.	Compresión
7	0,5	Bolsa + Agua	1,3	7,9	1,3	7,6
7	0,7	Bolsa + Agua	0,8	4,1	0,7	3,6
7	1,0	Bolsa + Agua	0,3	1,5	0,2	1,3
28	0,5	Bolsa + Agua	1,4	8,5	1,0	6,2
28	0,7	Bolsa + Agua	0,7	3,7	0,3	2,2
28	1,0	Bolsa + Agua	0,3	1,4	0,1	0,9
90	0,5	Bolsa + Agua	1,4	10,9	0,1	3,3
90	0,7	Bolsa + Agua	0,3	2,8	0,0	0,7
90	1,0	Bolsa + Agua	0,0	1,2	0,0	0,4

Los resultados resistencia a compresión “Rc” según edad de curado, se visualizan en Fig. 5-21, y en el caso de los morteros con CV, se pone de manifiesto un cambio de tendencia parcial con respecto a las experiencias anteriores que utilizaban un 50% de yeso. En esta ocasión, se observa una disminución de la “Rc” con el tiempo de curado para relaciones “Agua/Conglomerante” elevadas (“0,7” y “1,0”), lo que aportaría la posibilidad de formación de compuestos expansivos. Para la relación “Agua/Conglomerante = 0,5”, se mantiene la tendencia anterior pero con un incremento de resistencias menor a las anteriores.



**Fig. 5-21. Rc v/s Edad. Mortero “cem/yeso/Pz = 20/60/20”. Con CV y FC. Distintas relaciones (Agua/Conglomerante). Curado en “Bolsa y Agua”.**

Para el caso de los morteros con FC, la Fig. 5-21 muestra una disminución de la “Rc” conforme aumenta el tiempo de curado, análoga a lo observado en las series anteriores con 50% de yeso (“20/50/30”, “15/50/35” y “10/50/40”), si bien en esta serie la “Rc” inicial de partida es superior a las de las series anteriores, por la dosificación utilizada, que contiene más yeso.

Al comparar valores de esta dosificación con su homóloga, con ceniza volante, la adición de ceniza volante tiene un significativo mejor comportamiento en resistencia que el filler calizo, sobre todo para bajas relaciones “Agua/Conglomerante”.

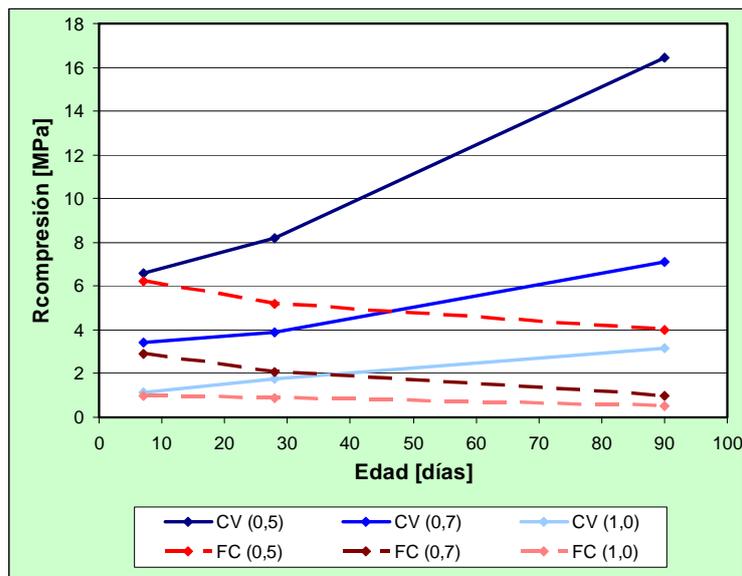
### 5.2.9 Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 15/60/25”

En **Tabla 5-13** se muestran resultados experimentales de resistencia a flexotracción y compresión para una mezcla, en que se mantiene el yeso base, se disminuye el cemento y se aumenta la cantidad de puzolana (ceniza volante o filler calizo), respecto a la mezcla anterior.

**Tabla 5-13.** Resultados experimentales. Morteros “cem B1 52,5R/ yeso /Pz = 15/ 60 /25”

Edad [días]	Relación agua/congl.	Tipo de Curado	Ceniza Volante		Filler Calizo	
			Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión	Flexotracc.	Compresión
7	0,5	Bolsa + Agua	1,2	6,6	1,0	6,2
7	0,7	Bolsa + Agua	0,6	3,4	0,6	2,9
7	1,0	Bolsa + Agua	0,2	1,1	0,2	1,0
28	0,5	Bolsa + Agua	1,4	8,2	0,9	5,2
28	0,7	Bolsa + Agua	0,8	3,9	0,3	2,1
28	1,0	Bolsa + Agua	0,3	1,8	0,1	0,9
90	0,5	Bolsa + Agua	2,8	16,5	0,2	4,0
90	0,7	Bolsa + Agua	1,4	7,1	0,0	1,0
90	1,0	Bolsa + Agua	0,5	3,2	0,0	0,5

Los resultados resistencia a compresión “Rc” según edad, se visualizan en **Fig. 5-22**, y para el caso de las series de mortero con CV, se pone de manifiesto nuevamente la tendencia observada para las experiencias con 50% de yeso, en que aumenta la “Rc” con el tiempo de curado para todas las relaciones “Agua/Conglomerante”.



**Fig. 5-22.** Rc v/s Edad. Mortero “cem/yeso/Pz = 15/60/25”. Con CV y FC. Distinta relación (Agua/Conglomerante). Curado en Bolsa y Agua.

Para las series con FC, la observación de **Fig. 5-22** permite concluir lo siguiente.

- La reducción en la proporción de cemento respecto a la combinación anterior (15% de cemento frente a 20% de la serie anterior), causa en general una disminución en las resistencias.
- La resistencia decrece con la edad de curado como hemos visto en las series anteriores, lo que demuestra que el filler calizo no detiene la incompatibilidad del cemento con el yeso.
- Al comparar valores de esta combinación con su homóloga, con ceniza volante, la adición de ceniza volante tiene un significativo mejor comportamiento en resistencia que el filler calizo, sobre todo para bajas razones “Agua/Conglomerante”; además, la resistencia aumenta con el tiempo de curado, reduciendo los problemas de incompatibilidad entre el yeso y el cemento.
- Nuevamente se observa que el aumento en la proporción de yeso, aumenta las resistencias respecto a las combinaciones anteriores (“20/50/30”, “15/50/35” y “10/50/40”) en que la proporción de yeso es menor.

**5.2.10 Morteros “CPB (BL I 52,5R)/Yeso/Puzolana = 10/60/30”**

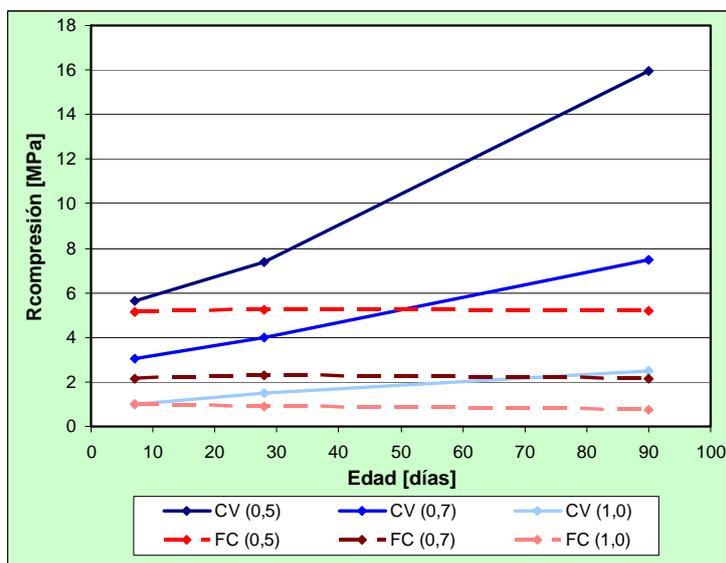
En **Tabla 5-14** se muestran resultados experimentales de resistencia a flexotracción y compresión para una nueva mezcla, en que se mantiene el yeso base de los dos casos anteriores; se disminuye aún más el cemento y se aumenta la cantidad de puzolana (ceniza volante o filler calizo), respecto a la mezcla del caso anterior.

**Tabla 5-14. Resultados experimentales. Mortero “cem Bl 52,5R/ yeso /Pz = 10/ 60 /30”**

Edad [días]	Relación agua/congl.	Tipo de Curado	Ceniza Volante		Filler Calizo	
			Resistencia [MPa]		Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión	Flexotracc.	Compresión
7	0,5	Bolsa + Agua	0,9	5,6	0,9	5,1
7	0,7	Bolsa + Agua	0,5	3,1	0,4	2,2
7	1,0	Bolsa + Agua	0,1	1,0	0,1	1,0
28	0,5	Bolsa + Agua	1,0	7,4	0,7	5,3
28	0,7	Bolsa + Agua	0,6	4,0	0,4	2,3
28	1,0	Bolsa + Agua	0,2	1,5	0,1	0,9
90	0,5	Bolsa + Agua	2,8	15,9	0,6	5,2
90	0,7	Bolsa + Agua	1,4	7,5	0,1	2,1
90	1,0	Bolsa + Agua	0,3	2,5	0,0	0,7

Los resultados de resistencia a compresión según la edad de curado, se visualizan en **Fig. 5-23**. Para los morteros con CV, se observa que sigue manteniéndose la tendencia observada en la experiencia anterior (“15/60/25”),

pero con menores valores de la “Rc”, debido a una menor cantidad de cemento (10% de cemento frente al 15% utilizado en la experiencia anterior).



**Fig. 5-23.** Rc v/s Edad. Mortero “cem/yeso/Pz= 10/60/30”. Con CV y FC. Distinta relación (Agua/Conglomerante). Curado en “Bolsa y Agua”.

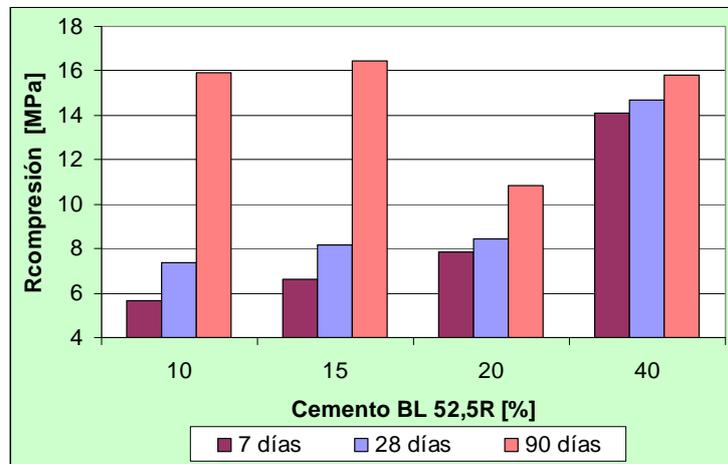
Para los morteros con FC, la observación de la **Fig. 5-23** permite concluir lo siguiente.

- La disminución de dosis de cemento en el conglomerante, causa una reducción de las resistencias iniciales respecto a las mezclas anteriores que poseen igual proporción de yeso. Sin embargo, a 90 días de curado, la “Rc” aumenta respecto a las anteriores y siendo la causa probable la menor formación de compuestos expansivos, al reducirse la cantidad de cemento, y por tanto, de aluminato tricálcico.
- En general, en esta serie, las resistencias se mantienen con la edad o decrecen muy levemente, situación interesante que no se había presentado hasta ahora.

Al comparar valores de esta combinación con su homóloga, con CV, la adición de CV tiene un significativo mejor comportamiento en resistencia que el FC, sobre todo para bajas razones “Agua/Conglomerante”.

Con el fin de analizar la influencia del contenido de cemento, en **Fig. 5-24** se representa la “Rc” frente al “% de Cemento”, para las tres dosificaciones que contienen un 60% de yeso. Se discrimina para la relación “Agua/Conglomerante = 0,5” y uso de CV, por representar los mejores resultados experimentales para

la “Rc”. Para efectos de comparación, se agregan los resultados de la “Rc” del “Mortero Control 1” (“40/60”) con 40% de cemento.

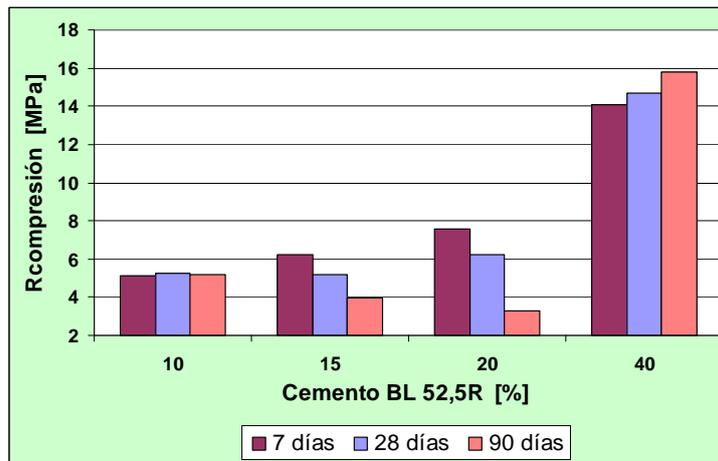


**Fig. 5-24.** Rc v/s “Contenido de cemento”. Mezclas con CV y 60% de yeso. Distintas edades. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en bolsa y agua.

Los resultados obtenidos en [Fig. 5-24](#) vuelven a poner de manifiesto, que la “Rc” se incrementa con el tiempo de curado, para todos los casos estudiados. Sin embargo, a 90 días de curado, la “Rc” de las probetas con un 20% de cemento cae bruscamente, obteniendo menor resistencia que para las probetas con 10% y 15% de cemento, existiendo diferencias significativas con ellas. Si comparamos con la experiencia realizada con un 50% de yeso (ver [Fig. 5-19](#)), se observan tendencias similares; cabría destacar, resultados muy similares para 15% de cemento. Por otra parte, a los 90 días de curado, ambas series (con 10% y 15% de cemento), presentan resultados de la “Rc” similares e incluso superiores al “Mortero Control 1” que contiene 40% de cemento, con el consiguiente ahorro de cemento.

En general, a tiempos largos de curado (90 días), se observa el buen comportamiento que proporciona la CV, en todos los casos; si bien este comportamiento es óptimo para un 15% de cemento (25% de CV)

Para efectuar el mismo análisis, pero con FC, en [Fig. 5-25](#), se representa la “Rc” frente al porcentaje de cemento, para la relación “Agua/Conglomerante” fija de “0,5” de las tres anteriores series (con 60% de yeso), agregándose los resultados de “Rc” del “Mortero Control 1” con 40% de cemento.



**Fig. 5-25.** Rc v/s “contenido de cemento”. Mezclas con FC y 60% de yeso. Distintas edades. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en “Bolsa y Agua”.

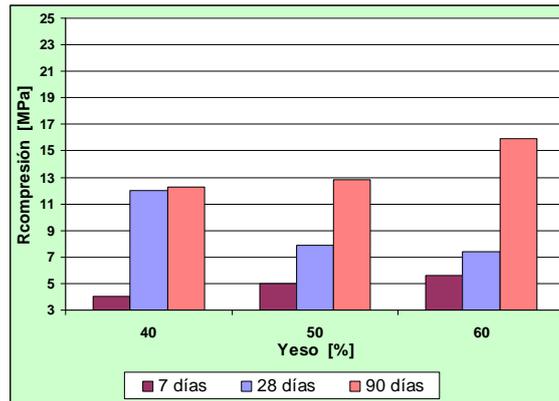
De **Fig. 5-25**, puede deducirse lo siguiente:

- A edades de 7 y 28 días de curado, la tendencia que se manifiesta es, a mayor porcentaje de cemento mayor valor de la “Rc”.
- A 90 días, la “Rc” disminuye conforme aumenta el contenido de cemento por la formación de productos expansivos y retoma el crecimiento con el aumento del contenido de cemento (40%).

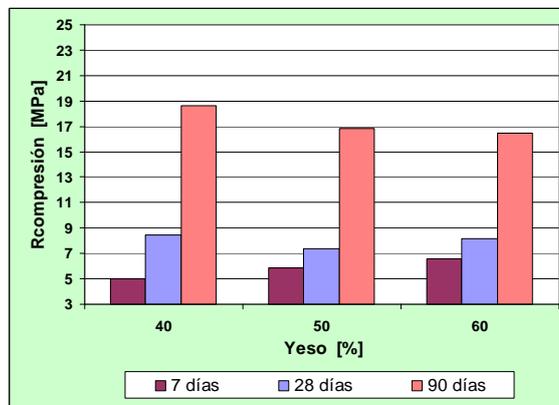
#### 5.2.11 Otros análisis comparativos de “Rc” entre morteros “cemento (BL I 52,5R)/yeso/ puzolana”

Con los datos experimentales expuestos desde el apartado **5.2.2** hasta el apartado **5.2.10**, es posible analizar los efectos que ocasiona en la “Rc”, las distintas cantidades de yeso en el conglomerante, manteniendo constante la dosis de cemento. A tal efecto se grafican resultados de la “Rc” según dosis de yeso, a distintas edades, discriminando valores para mezclas con relación “Agua/Conglomerante = 0,5”.

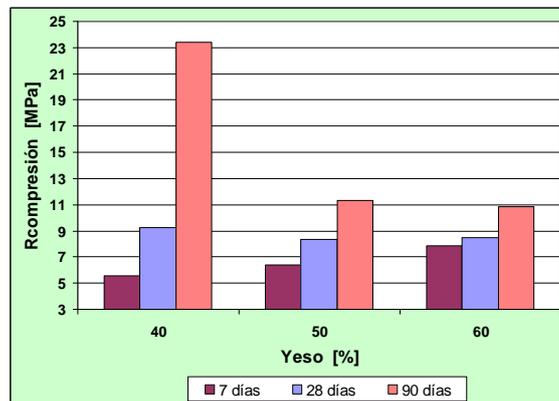
Para morteros con CV, en **Fig. 5-26**, **Fig. 5-27** y **Fig. 5-28**, se representa la “Rc” frente al contenido de yeso y con 10, 15 y 20% de cemento respectivamente.



**Fig. 5-26.** Rc v/s “contenido de yeso”. Mezclas con CV y 10% de cemento. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en “Bolsa y Agua”.



**Fig. 5-27.** Rc v/s “contenido de yeso”. Mezclas con CV y 15% de cemento. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en “Bolsa y Agua”.



**Fig. 5-28.** Rc v/s “contenido de yeso”. Mezclas con CV y 20% de cemento. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en “Bolsa y Agua”.

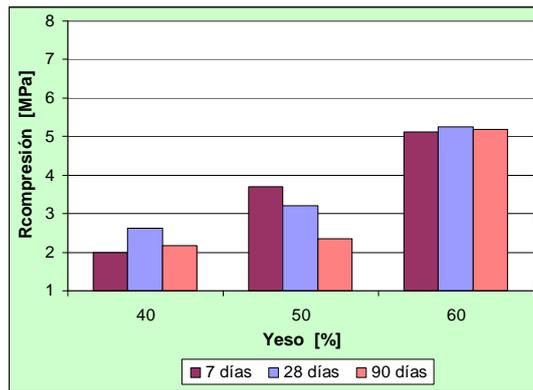
De la observación de **Fig. 5-26**, **Fig. 5-27** y **Fig. 5-28**, se puede concluir lo siguiente:

- En general, se observan diferencias significativas entre tiempos cortos (7 y 28 días) y tiempos largos de curado (90 días), lo cual es lógico teniendo en cuenta la influencia de la reacción puzolánica sobre la resistencia final.
- A 7 días, la “Rc” aumenta con el contenido de yeso; sin embargo, a 28 días, la “Rc” tiende a disminuir con el contenido de yeso. Esto pone de manifiesto que a corta edad, la CV no actúa puzolánicamente por lo que, quien sustenta la resistencia en la matriz conglomerante, es el yeso.
- A 28 días, la “Rc” tiende a incrementarse conforme aumenta la dosis de CV o conforme disminuye la dosis de yeso, evidenciando alguna reactividad puzolánica.
- A 90 días, queda de manifiesto la mayor reactividad puzolánica de la CV ya que se aportan las mayores resistencias; sin embargo, no se puede ser concluyente en una regla de comportamiento general ya que la “Rc” va variando con el contenido en cemento. Para dosis de 40% de yeso; a mayor dosis de cemento, mayor resistencia. Para dosis de 50% y 60% de yeso; las mejores resistencias se obtienen para una condición óptima intermedia en la dosis de cemento (15%). Al parecer, existe un óptimo en la cantidad de cemento para que la reactividad puzolánica de la CV se manifieste de manera más rápida.
- Los valores óptimos de “Rc” a 90 días de curado, para un porcentaje fijo de cemento, varía con el contenido de yeso; así para el 10% de cemento, el óptimo es el 60% de yeso, y para un 15% y 20% de cemento, el óptimo es el 40% de yeso.
- El valor superior que se obtuvo en todas las experiencias realizadas correspondió al mayor porcentaje de cemento (20%), lo que es lógico ya que se requiere que la cantidad de portlandita sea la máxima para que la CV pueda actuar.

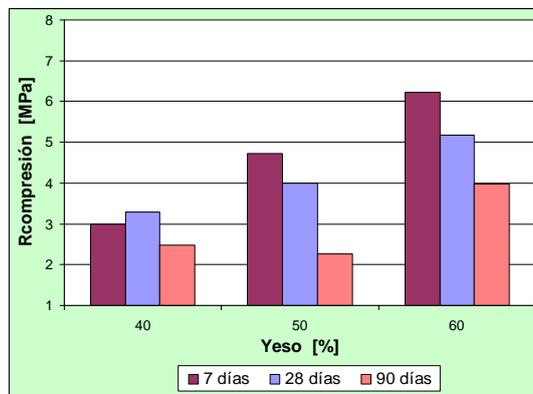
Como conclusiones finales podemos decir en general:

- Para una misma cantidad de yeso, la “Rc” aumenta con el contenido de cemento.
- Para una misma cantidad de cemento, la “Rc” disminuye con el contenido de yeso.

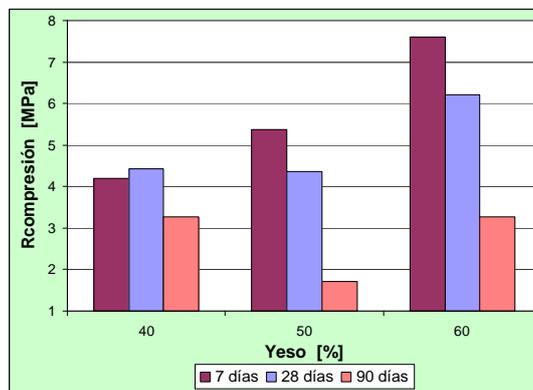
Para morteros con FC, en **Fig. 5-29**, **Fig. 5-30** y **Fig. 5-31**, se representa la “Rc” frente al contenido de yeso y con 10, 15 y 20% de cemento respectivamente.



**Fig. 5-29.** Rc v/s “contenido de yeso”. Mezclas con FC y 10% de cemento. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en “Bolsa y Agua”.



**Fig. 5-30.** Rc v/s “contenido de yeso”. Mezclas con FC y 15% de cemento. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en “Bolsa y Agua”.



**Fig. 5-31.** Rc v/s “contenido de yeso”. Mezclas con FC y 20% de cemento. Relación (Agua/Conglomerante = 0,5). Curado en “Bolsa y Agua”.

De **Fig. 5-29**, **Fig. 5-30** y **Fig. 5-31**, es posible concluir lo siguiente:

- A bajos contenidos de cemento (10%), la dosificación óptima de yeso corresponde al 60%, no observándose en este caso, una disminución de la “Rc” con el tiempo de curado.
- Para este mismo porcentaje de yeso (60%), se constata una disminución de la “Rc” con el tiempo de curado que se amplía más en el mayor porcentaje de cemento utilizado (20%), lo que pondría de manifiesto la formación de compuestos expansivos.
- Para un mismo porcentaje de cemento, a mayor contenido de yeso, mayor “Rc”. En general, se observa una disminución de la “Rc” con el tiempo de curado.
- A las edades de 7 y 28 días, la “Rc” aumenta conforme aumenta el yeso. También a esas edades, la “Rc” tiende a aumentar conforme aumenta la dosis de cemento. Esto se debe a que a esas edades, quien sustenta la resistencia es el yeso, y la participación del cemento como refuerzo en la matriz conglomerante, tiende a incrementar la resistencia con el incremento en el contenido de cemento.
- A 90 días, la resistencia en mezclas de mortero con altas dosis de yeso tiende a disminuir conforme aumenta la dosis de cemento. Esto se debe a la incompatibilidad de la mezcla yeso-cemento, que en presencia de humedad pondría de manifiesto la formación de compuestos expansivos que afectan la resistencia.

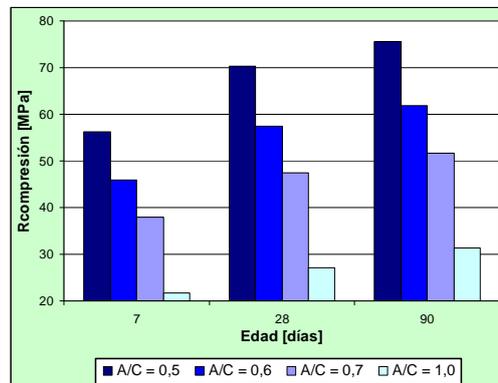
#### 5.2.12 Mortero Control “Cemento BL I 52,5R: 100% (Mortero de Cemento)”

En **Tabla 5-15**, se muestran resultados experimentales de resistencia a flexotracción (Rf) y compresión (Rc) de probetas con curado bajo agua (según norma EN 196-1), a distintas edades y con distinta relación “Agua/Cemento”, con la finalidad de controlar el cemento utilizado.

**Tabla 5-15. Rf y Rc. Mortero “cemento BL 52,5R”. Curado en agua.**

Edad [días]	Relación agua/conglom.	Tipo de curado	Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión
7	0,5	Agua	7,9	56,3
7	0,6	Agua	7,6	46,0
7	0,7	Agua	6,6	37,9
7	1,0	Agua	4,8	21,7
28	0,5	Agua	8,6	70,3
28	0,6	Agua	8,7	57,5
28	0,7	Agua	7,4	47,4
28	1,0	Agua	4,9	27,1
90	0,5	Agua	9,2	75,5
90	0,6	Agua	8,2	61,8
90	0,7	Agua	7,3	51,6
90	1,0	Agua	4,6	31,3

Los resultados resistencia a compresión según edad, se visualizan en Fig. 5-32.

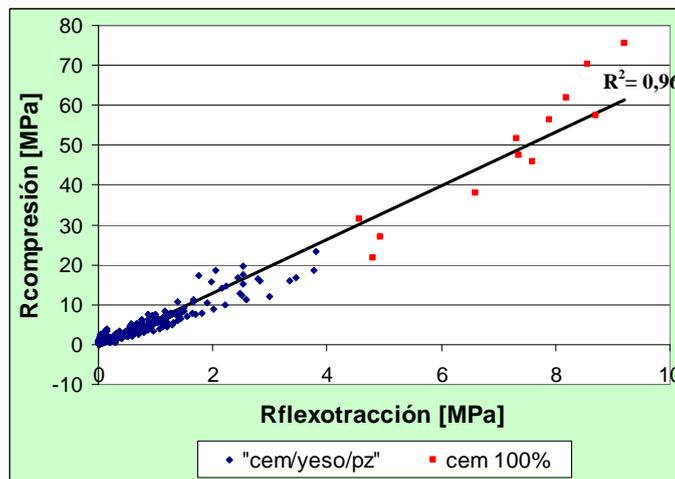


**Fig. 5-32.** Rc v/s Edad. Mortero “cimento BL 52,5R”. Distinta relación (Agua/Cemento). Curado en agua.

De Fig. 5-32, se observa, como se esperaba, un aumento de la “Rc” con el tiempo de curado, para todas las relaciones “Agua/Cemento” estudiadas.

**5.2.13 Morteros “cem BL 52,5R/yeso/puzolana”. Análisis de la resistencia a compresión “Rc” según la resistencia a flexotracción “Rf”**

En la Fig. 5-33 se muestra el comportamiento de los valores experimentales de la resistencia a compresión “Rc” según la resistencia a flexotracción “Rf”, separando aquellos morteros que contienen yeso (con o sin adición de puzolana) de aquellos morteros de cemento.



**Fig. 5-33.** Resistencia de Compresión vs Resistencia de Flexotracción. Morteros de “Cem/Esc/Pz” y Morteros de cemento.

De la observación de **Fig. 5-33**, se puede concluir que la resistencia a compresión, según la resistencia a flexotracción, de los morteros “cemento/yeso” con adición o sin adición de puzolana y de los morteros de “cemento Portland BL 52,5R”, muestran un buen comportamiento de ajuste coincidente con una curva tipo lineal (con  $R^2 = 0,96$ ).

La proporcionalidad que provee el ajuste lineal entre los datos experimentales graficados en **Fig. 5-33**, permite esperar que en promedio la “Resistencia a Flexotracción ( $R_f$ )” sea un 14,9% de la “Resistencia a Compresión ( $R_c$ )”.

Ello permite realizar en principio, los análisis de resultados en referencia a un solo parámetro de resistencia (como “ $R_c$ ”) y su vinculación con otros parámetros como ha sido hasta aquí, como lo es la edad de curado y la relación “Agua/Conglomerante”.

#### **5.2.14 Morteros “cem BL 52,5R/yeso/CV”. Ajuste exponencial de la Resistencia a Compresión “ $R_c$ ” según relación “Agua/Conglomerante”**

La resistencia a compresión de los morteros “cemento BL 52,5R/yeso/puzolana” depende de la relación “Agua/Conglomerante”, con una clara tendencia de tipo exponencial. Para demostrar esta afirmación, en **Tabla 5-16** se establecen para 7, 28 y 90 días de curado las curvas de ajuste con indicación del coeficiente de variación “ $R^2$ ” respectivo.

De **Tabla 5-16**, es posible apreciar que los mejores ajustes se obtienen para mezclas con ceniza volante y que los ajustes, con escasas excepciones, están dentro de un rango de dispersión “ $R^2$ ” aceptable.

**Tabla 5-16.** Ajuste exponencial en morteros “Cemento BL 52,5R/Yeso/puzolana”. “Rc” v/s “Agua/Conglomerante”

Dosificación	Edad [días]	Curado	Ceniza Volante		Filler Calizo	
			Curva de Ajuste Rc [MPa]	R <sup>2</sup>	Curva de Ajuste Rc [MPa]	R <sup>2</sup>
20/50/30	7	B+A	$33,147e^{-3,2832x}$	0,9999	$30,276e^{-3,5014x}$	0,9993
	28	B+A	$49,02e^{-3,6804x}$	0,9938	$23,575e^{-3,6714x}$	0,9564
	90	B+A	$75,332e^{-4,0651x}$	0,9749	$4,7204e^{-3,2561x}$	0,6013
	7	B	$38,928e^{-3,3603x}$	0,9914	$40,03e^{-3,5922x}$	0,9979
	28	B	$55,399e^{-3,6971x}$	0,9727	$35,953e^{-3,9801x}$	0,9801
	90	B	$127,18e^{-4,5987x}$	0,9530	$14,921e^{-3,0872x}$	0,8852
15/50/35	7	B+A	$43,831e^{-3,956x}$	0,9975	$31,636e^{-3,8377x}$	0,9992
	28	B+A	$40,543e^{-3,5006x}$	0,9948	$30,273e^{-4,2215x}$	0,9869
	90	B+A	$80,585e^{-3,3402x}$	0,9687	$9,4965e^{-3,2112x}$	0,9104
10/50/40	7	B+A	$28,323e^{-3,8244x}$	0,9954	$33,418e^{-4,3261x}$	0,9971
	28	B+A	$41,028e^{-3,4237x}$	0,9905	$18,964e^{-3,7701x}$	0,9730
	90	B+A	$54,837e^{-3,0088x}$	0,9905	$13,62e^{-3,6558x}$	0,9862
20/60/20	7	B+A	$41,904e^{-3,3414x}$	1,0000	$43,166e^{-3,5171x}$	0,9987
	28	B+A	$49,524e^{-3,6144x}$	0,9959	$39,214e^{-3,8712x}$	0,9806
	90	B+A	$76,23e^{-4,266x}$	0,9400	$16,802e^{-3,8301x}$	0,8475
15/60/25	7	B+A	$39,126e^{-3,5239x}$	0,9992	$39,232e^{-3,6944x}$	0,9999
	28	B+A	$35,774e^{-3,0509x}$	0,9912	$28,098e^{-3,5389x}$	0,9838
	90	B+A	$78,295e^{-3,2595x}$	0,9850	$22,623e^{-3,9191x}$	0,9054
10/60/30	7	B+A	$32,303e^{-3,436x}$	0,9976	$24,055e^{-3,2536x}$	0,9804
	28	B+A	$37,051e^{-3,2054x}$	0,9995	$28,712e^{-3,4968x}$	0,9929
	90	B+A	$100,39e^{-3,6929x}$	0,9999	$34,13e^{-3,8616x}$	0,9954
10/40/50	7	B+A	$28,323e^{-3,8244x}$	0,9954	$8,8779e^{-2,8247x}$	0,9752
	28	B+A	$100,67e^{-4,339x}$	0,9970	$17,83e^{-3,9399x}$	0,9933
	90	B+A	$81,69e^{-3,8112x}$	0,9997	$6,7338e^{-2,5934x}$	0,8878
15/40/45	7	B+A	$37,512e^{-3,9568x}$	0,9971	$14,615e^{-3,2059x}$	0,9988
	28	B+A	$74,3e^{-4,3471x}$	1,0000	$28,841e^{-4,49x}$	0,9910
	90	B+A	$117,89e^{-3,7012x}$	0,9999	$12,065e^{-3,3182x}$	0,9824
20/40/40	7	B+A	$32,451e^{-3,4626x}$	0,9982	$18,822e^{-3,0606x}$	0,9967
	28	B+A	$68,684e^{-4,0422x}$	0,9994	$36,882e^{-4,3623x}$	0,9933
	90	B+A	$184,63e^{-4,0709x}$	0,9983	$19,873e^{-3,9838x}$	0,9293

x = “Agua/Conglomerante”

De la misma manera, se puede apreciar, que para el caso de morteros de dosificación “cemento BL 52,5R/yeso” (Morteros Control), así como el mortero “cemento BL 52,5R 100%”, la resistencia a compresión también depende de la relación “Agua/Conglomerante”, con una clara tendencia de tipo exponencial, como era de esperar. En **Tabla 5-17** se muestran para 7, 28 y 90 días, las expresiones de las curvas de ajuste con indicación del coeficiente de correlación “R<sup>2</sup>” respectivo.

**Tabla 5-17. Ajuste exponencial de morteros “Cemento BL 52,5R/Yeso” y Mortero “cemento BL 52,5R 100%”. “Rc” v/s “Agua/Conglomerante”**

Dosificación	Edad [días]	Curado	Curva de Ajuste Rc [MPa]	R <sup>2</sup>
40/60	7	B+A	$80,873e^{-3,586x}$	0,9946
	28	B+A	$199,23e^{-5,1617x}$	0,9989
	90	B+A	$189,71e^{-5,1105x}$	0,9936
50/50	7	B+A	$98,741e^{-3,7576x}$	0,9998
	28	B+A	$222,13e^{-5,0682x}$	0,9998
	90	B+A	$493,44e^{-7,0089x}$	0,9815
60/40	7	B+A	$116,95e^{-3,8742x}$	0,9999
	28	B+A	$511,16e^{-6,464x}$	0,9992
	90	B+A	$334,54e^{-6,5247x}$	0,9009
0/100 (yeso)	7	B+A	$30,593e^{-2,9917x}$	0,9855
	28	B+A	$18,815e^{-2,4126x}$	0,9733
	90	B+A	$13,971e^{-2,0494x}$	0,9965
100/0 (cemento)	7	A	$144,31e^{-1,8986x}$	0,9997
	28	A	$180,7e^{-1,9017x}$	0,9997
	90	A	$177,46e^{-1,7419x}$	0,9984

En **Tabla 5-17**, es posible apreciar que los ajustes, expresados a través del coeficiente de correlación R<sup>2</sup>, están dentro de un bajo rango de dispersión, dando así validez al ajuste exponencial expuesto.

### 5.3 Definición de “Factor de Carga” como indicador de la actividad puzolánica

De un amplio espectro de mezclas desarrolladas, fundamentalmente en uso del cemento portland blanco 52,5R, en la búsqueda de la mejor combinación, se comparan resultados de resistencia de morteros con ceniza volante y filler calizo con su equivalente mortero control. Se discrimina a favor de los morteros con 90

días de curado, por ser aquellos en que mejor se visualiza la actividad puzolánica en curso.

El presente análisis, forma parte de un trabajo presentado al Congreso NOCMAT 2008 [81].

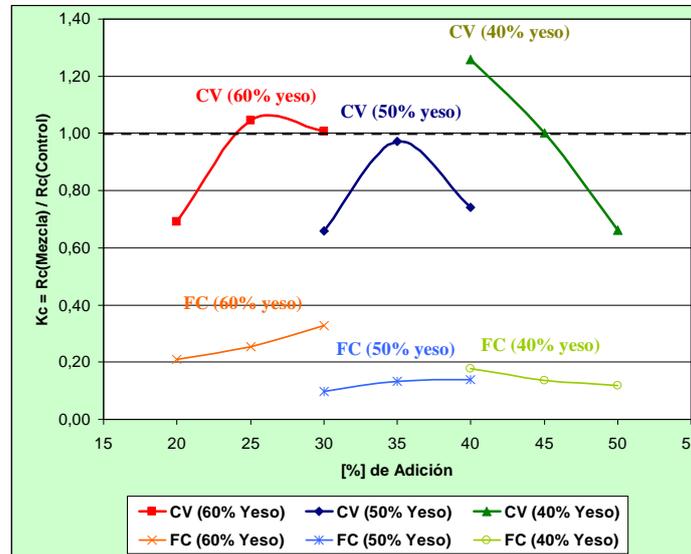
Para la comparación se define el factor de carga “Kc” como el cociente entre la resistencia del mortero con puzolana y la resistencia de su equivalente mortero control (sin adición), el que permite comparar la bondad del reemplazo parcial del contenido de cemento del “control” por una adición, sea esta “ceniza volante” de tipo puzolánicos o “filler calizo” de tipo inerte, según corresponda. Ordenándolos según el resultado del factor de carga “Kc”, de mayor a menor, en **Tabla 5-18** se muestra parcialmente el resultado de la ordenación correspondiente.

**Tabla 5-18. Determinación del Factor de Carga “Kc”. Morteros “cemento BL 52,5R/yeso/Pz”. 90 días de edad. “Agua/binder = 0,5”. Curado “Bolsa y Agua”**

Nº	Tipo de Mezcla	Tipo de Puzolana	Rc(Mezcla) [MPa]	Rc(Control) [MPa]	$K_c = \frac{Rc(Mezcla)}{Rc(Control)}$
1	“20/ 40 /40”	CV	23,4	18,6	1,26
2	“15/ 60 /25”	CV	16,5	15,8	1,04
3	“10/ 60 /30”	CV	15,9	15,8	1,01
4	“15/ 40 /45”	CV	18,6	18,6	1,00
5	“15/ 50 /35”	CV	16,8	17,3	0,97
6	“10/ 50 /40”	CV	12,8	17,3	0,74
7	“20/ 60 /20”	CV	10,9	15,8	0,69
8	“20/ 50 /30”	CV	11,4	17,3	0,66
9	“10/ 40 /50”	CV	12,3	18,6	0,66
1	“10/ 60 /30”	FC	5,2	15,8	0,33
2	“15/ 60 /25”	FC	4,0	15,8	0,25
3	“20/ 60 /20”	FC	3,3	15,8	0,21
4	“20/ 40 /40”	FC	3,3	18,6	0,18
5	“10/ 50 /40”	FC	2,4	17,3	0,14
6	“15/ 50 /35”	FC	2,3	17,3	0,13
7	“15/ 40 /45”	FC	2,5	18,6	0,13
8	“10/ 40 /50”	FC	2,2	18,6	0,12
9	“20/ 50 /30”	FC	1,7	17,3	0,10

De **Tabla 5-18**, puede observarse que el mejor resultado para “Kc” se obtiene para la combinación “20/40/40”, en donde el reemplazo de los “2/3” de la dosis de cemento por ceniza volante, permite disponer de una capacidad resistente un 26% mayor que el mortero control con dosificación “cem/yeso = 60/40”.

También, es posible ordenar los tipos de mezcla según la dosis de “yeso” y visualizar gráficamente el comportamiento del factor de carga “Kc” según el contenido de “adición”, lo que se aprecia en Fig. 5-34 siguiente.



**Fig. 5-34.** Factor de carga “Kc” v/s “Contenido de Adición” (CV o FC). 90 días de edad. Relación “agua/binder = 0,5”. Con uso de cemento BL 52,5R. Curado “Bolsa y Agua”.

De Fig. 5-34, puede concluirse lo siguiente. Para el caso de morteros con “ceniza volante”, puede observarse que para mezclas con 60% de yeso, el mejor comportamiento se obtiene para contenidos de “ceniza volante” entre 25% y 30%; es decir, para contenidos de “cemento portland” entre 10% y 15%. Por otra parte, para mezclas con 50% de yeso, el mejor comportamiento se obtiene para un contenido de “ceniza volante” del 35%; es decir, para contenido de “cemento portland” del 15%. Finalmente, para mezclas con 40% de yeso, se aprecia que los resultados más interesantes se obtienen para contenidos de “ceniza volante” del 40%, esto es para contenidos de cemento del 20%. En este último caso, se observa un aumento del “factor de carga” conforme aumenta el contenido de cemento.

Las mezclas de mortero de proporciones “20/40/40”, “15/40/45” y “15/50/35”, a los 90 días, exhiben los mejores valores de resistencia a compresión. Sin embargo, se debe ser cuidadoso ya que un aumento en el contenido de “ceniza volante”, supone una disminución de la resistencia a compresión.

Para el caso de morteros con “filler calizo”, los factores de carga “Kc” resultan menores que sus equivalentes con “ceniza volante” evidenciando su carácter inerte. En este caso, la influencia del contenido de FC sobre el factor de carga es poco significativo.

Para finalizar, en morteros de dosificación “cemento BL 42,5/escayola/CV = 20/50/30”, a 90 días de edad, para la relación “Agua/Conglomerante = 0,5”, el factor de carga “Kc” que se obtiene es de “2,21”. Esto es producto de que la “Rc” de la mezcla fue 22,3 [MPa] y la correspondiente “Rc” del mortero control fue 10,1 [MPa]. Es así, que el resultado óptimo de “Kc” se obtiene para una dosificación con uso de cemento portland blanco del tipo BL-II 42,5R. Esto reafirma lo obtenido por “Zornoza et al” [82] en cuanto a que, el mejor comportamiento puzolánico se obtiene para cementos portland de menor resistencia, que cuando se utiliza cementos portland de mayor resistencia.



---

**Capítulo 6. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL EN  
PASTAS Y MORTEROS “CEMENTO-YESO-PUZOLANA”**

---



## 6. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL EN PASTAS Y MORTEROS “CEMENTO-YESO-PUZOLANA”

En este Capítulo se abordan estudios en pastas y morteros. Con pastas, se efectúan análisis a través de ensayos termogravimétricos (TG y DTG) a distintas edades, ajustando el equipo para una velocidad constante de 25 °C/min entre 25°C y 600°C, utilizando flujo de aire de 75 ml/min.

Paralelamente, se efectúan los ensayos mediante un analizador de humedad denominado “Balanza de Halógenos (B.H.)”, calibrando el equipo para elevar rápidamente la temperatura desde el ambiente hasta 200°C y criterio de desconexión para variación de masa inferior a 1 mg en 90 segundos. Con morteros, se efectúan ensayos de resistencia a compresión a distintas edades y con trozos obtenidos de estas probetas se efectúan ensayos de pérdida de agua químicamente combinada en B.H. para así poder comparar estos resultados con su similar en pasta.

Las combinaciones del conglomerante “cemento/yeso/puzolana” que se desarrollan en el presente estudio son las siguientes:

- Combinación 1: “20/40/40”
- Combinación 2: “20/50/30”
- Combinación 3: “30/40/30”

Como cemento, se utiliza únicamente “Cemento Blanco tipo BL II/B-LL 42,5R” (individualizado con Tipo A en apartado **3.1.1**). Como yeso, se utiliza escayola definida como “Yeso Iberyola (Escayola E-35)”. Como puzolana activa se utiliza ceniza volante de clase F suministrada por la central termoeléctrica de Andorra-Teruel (sin moler). Paralelamente, cada combinación se prepara con

“Filler Calizo” como material inerte a fin de comparar los resultados con la puzolana activa. Como árido fino se utiliza árido silicio definida como tipo A (apartado 3.1.5) en la relación “Conglomerante/Arena = 1/3”. La relación “Água/Conglomerante” se fija arbitrariamente en “0,6” a fin de mantenerla invariante respecto a la mayoría de las probetas de mortero del presente estudio.

Tanto las pastas como los morteros, se preparan en la máquina amasadora. Las pastas son colocadas en botes cilíndricos plásticos con tapa rosca con el fin de mantener un ambiente estanco a la humedad interior, emulando las condiciones de curado de las probetas de mortero que se guardan selladas al interior de bolsa plástica. Tanto las pastas en botes, como los morteros en bolsas plásticas, se mantienen todo el tiempo curándose en cámara húmeda a fin de no variar las condiciones de temperatura. Los ensayos se realizan en la fecha estipulada (7, 14, 28, 60, 90, 180 y 360 días), procurando que las muestras que deben curarse las últimas 24 horas sumergidas en agua, se retiren de su condición de curado en cámara húmeda, un día antes de la fecha de ensayo.

Las probetas de mortero sometidas a ensayos de resistencia a compresión, fueron elaboradas utilizando los mismos moldes metálicos tradicionales, de tres probetas prismáticas de 40x40x160 mm cada una (Fig. 3-5(a), apartado 3.2.2), pero sub-dividiendo cada probeta en tres partes, para lo cual se utiliza una placa rígida de plástico que se inserta al molde antes de vaciar el mortero fresco. De este modo, quedan disponibles 9 probetas prismáticas de 40x40x50 mm cada una, para utilizarlas en los ensayos de resistencia a compresión. Se preparan series de probetas de mortero para ser curadas en “Bolsa (B)” y en “Bolsa y Agua (B+A)” siguiendo las indicaciones que se especifican en el apartado 3.3.2.

Una vez que la probeta es ensayada a la compresión, se reserva un trozo de aproximadamente 50 g para determinar la pérdida de agua combinada en Balanza de Halógenos, según procedimiento indicado en apartado 3.2.8 b).

## 6.1 Pastas Control

Se desarrollan combinaciones de pastas sin puzolana, a fin de disponerlas de referencias o control para análisis posteriores. Las combinaciones del conglomerante “cemento/escayola” en análisis son las siguientes:

- Control 1: “60/40”
- Control 2: “50/50”
- Control 3: “0/100” ; (escayola 100%)
- Control 4: “100/0” ; (cemento 100%)

Los resultados experimentales de cada una de estas cuatro “Pastas Control” se muestran en [Tabla A-1](#), [Tabla A-2](#), [Tabla A-3](#) y [Tabla A-4](#) del [Anexo A](#), respectivamente, en las cuales, en la columna “B.H.(200°C)” se muestran datos en “%” de pérdida de agua combinada en “B.H.” a 200°C; en la columna “TG (600°C)”, se muestran datos en “%” de pérdida total de agua combinada del ensayo “TG” para el rango de 25°C a 600°C y medida con línea base horizontal,

y en la columna “CH”, se muestran datos en “%” de pérdida de agua combinada de la pasta debido a la deshidroxilación del hidróxido cálcico, medida en ensayo de “TG”, la que, para la velocidad de calentamiento aplicada, ocurre habitualmente en un rango de 500-600°C y que se mide de forma tangencial, puesto que la línea base antes de la descomposición no es horizontal.

### **6.1.1 Análisis de pérdida de agua combinada. Correlación entre resultados experimentales obtenidos en “TG” y “B.H.”.**

Dado que en los laboratorios hay mayor facilidad de acceso a un equipo analizador de humedad por halógenos (B.H.) que a un equipo analizador termogravimétrico (TG), hay necesidad de homologar los resultados experimentales obtenidos para muestras de pastas en “TG”, con los resultados obtenidos en muestras de las mismas pastas en “B.H.”.

Para ello se debe tener en consideración que en el ensayo “TG”, hasta la temperatura de 300°C aproximadamente, se registran las pérdidas de masa por deshidratación (agua combinada), principalmente de los hidratos compuestos SCH, ACH, ASCH, etringita y yeso dihidrato, cuya descomposición se superponen debido a la velocidad de calentamiento aplicado (25 °C/min); posteriormente y antes de los 600°C, se registra la pérdida de masa debido al compuesto CH (descritos en el apartado **3.2.9 b**, **Capítulo 3**). Por tanto, con los datos experimentales obtenidos en “TG” es posible calcular el porcentaje de agua combinada de estos hidratos [%H] como:

$$[\%H] = [P_{TG}]_{600^{\circ}C} - [P_{CH}] \quad (\text{Ec 6-1})$$

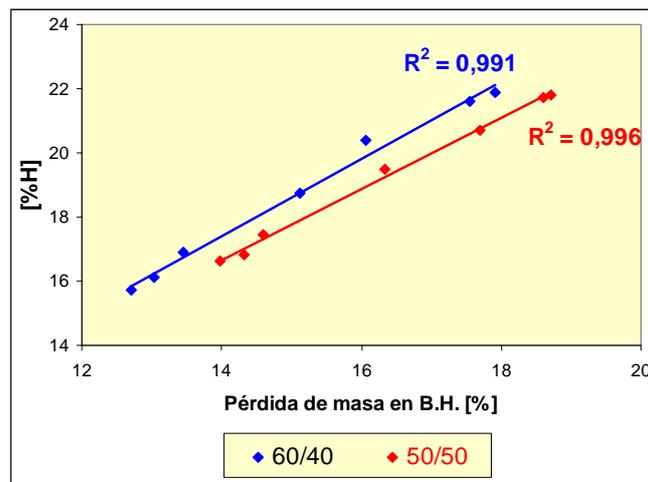
Donde:

[%H]: Agua combinada de los hidratos obtenida en “TG”

[ $P_{TG}$ ]<sub>600°C</sub>: Pérdida de masa total entre 35-600°C. Los datos experimentales se encuentran en la columna “TG (600°C)” de las Tablas respectivas.

[ $P_{CH}$ ]: Pérdida de masa debido a la deshidroxilación de la portlandita presente (compuesto CH). Los datos experimentales se encuentran en la columna “CH” de las Tablas respectivas.

A tal efecto en **Fig. 6-1** se muestran las correlaciones entre resultados de agua combinada en pastas obtenidas al calcular la expresión [%H] de la “**Ec 6-1**” con las obtenidas en el ensayo realizado en “B.H.”, los que se encuentran en la columna “B.H. (200°C)” de las Tablas respectivas. En la correlación, se muestran resultados solo de probetas con curado en “Bolsa (B)” ya que como puede observarse en cada una de las Tablas individualizadas anteriormente, los resultados de pérdida de masa en “B.H.” y “TG” con probetas curadas en “Bolsa y Agua (B+A)”, son muy similares, presentando una diferencia promedio entre ellos de 0,14%, para las cuatro “Pastas Control” consideradas.



**Fig. 6-1.** Correlación de “Pérdida de Agua Combinada” de los hidratos entre resultados experimentales efectuados en equipos “B.H.” y “TG”. Pastas Control. Probetas Curadas en (B).

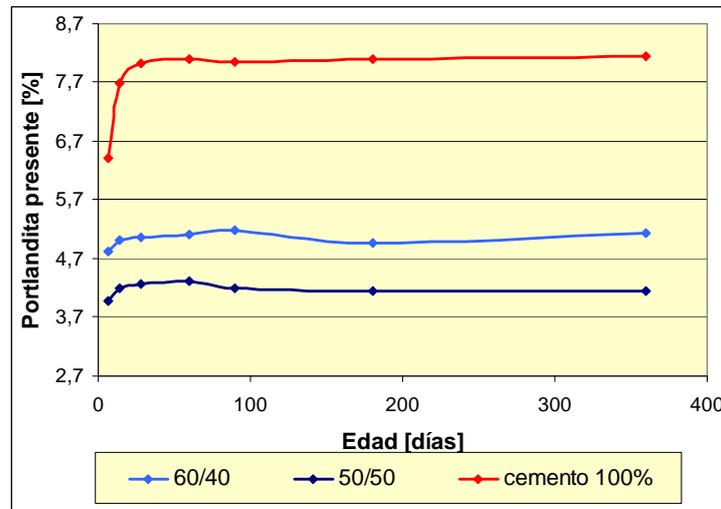
De observar la **Fig. 6-1**, es posible concluir que en general para una misma pasta, existe una buena correlación entre los datos experimentales de pérdida de agua combinada realizados en “TG” con datos experimentales realizados en “B.H.”.

### 6.1.2 Análisis de pérdida de agua combinada correspondiente a la deshidratación CH

Como se ha comentado en “apartado 3.2.9 b)”, la deshidratación CH ocurre entre 500-580°C y la velocidad de calentamiento aplicada al equipo “TG” permite disociarla sin superposición con otro proceso y con ello, conocer si esta deshidratación se debe al hidróxido de calcio aportado exclusivamente por el proceso de hidratación del cemento (**Capítulo 2: Ec 2-1, Ec 2-2, Ec 2-10 y Ec 2-11**) o si la combinación “cemento-escayola” genera algún cambio químico diferente que altere estas formaciones, ya sea aportando mayor o menor cantidad de hidróxido de calcio.

En **Fig. 6-2** siguiente, se muestra una gráfica con los valores en “% de portlandita” presente frente a la edad de curado, efectuando un cálculo según la expresión “**Ec 3-27**” utilizando los valores correspondientes a la deshidratación CH medidos experimentalmente en cada una de las pastas control que contienen cemento (columna CH de **Tabla A-1, Tabla A-2 y Tabla A-4** del **Anexo A**).

Similarmente a lo descrito en el apartado **6.1.1** para el caso, aquí también se representan solo valores experimentales correspondiente al curado en “Bolsa (B)” por cuanto los valores para el curado en “Bolsa y Agua (B+A)” son muy similares al anterior, y presentan una diferencia promedio entre ellos de 0,01%.



**Fig. 6-2. Portlandita presente en la pasta vs edad. Pastas Control. Curados en (B).**

De **Fig. 6-2** es posible observar que la portlandita presente se completa aproximadamente a los 14 días de curado para morteros de “Control 1” y “Control 2” y, a los 28 días aproximadamente para mortero de “Control 4”, para permanecer estables a más tiempo.

Comparando valores estables promedios, de cualquiera de las dos pastas control “cemento/escayola” (Control 1 y Control 2) con la pasta control de “cemento 100%” (Control 4), la portlandita que se manifiesta en estado de régimen es proporcional al aporte de “cemento” en la pasta. En efecto, en **Tabla 6-1** siguiente se aprecian los valores promedios y el cálculo de esta proporcionalidad.

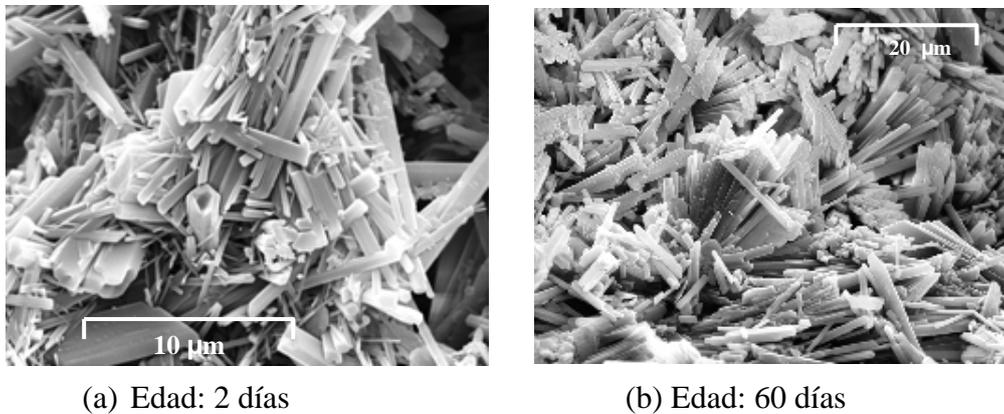
**Tabla 6-1. Cálculo de la proporcionalidad de la descomposición CH. Pastas Control**

	Pasta Control "cemento/escayola"		
	Control 1 (60/40)	Control 2 (50/50)	Cemento 100% (100/0)
Promedio "Portlandita" (estable)	5,08	4,21	8,06
$\text{Portlandita}_{\text{Control } k} / \text{Portlandita}_{\text{cemento 100\%}}$	0,631	0,521	1,000

De **Tabla 6-1** se aprecia que el valor calculado “ $\text{Portlandita}_{\text{Control } k} / \text{Portlandita}_{\text{cemento 100\%}}$ ” resulta similar con la proporción en que participa el “cemento” en la pasta, esto permite concluir que la proporción de yeso (o escayola) en el conglomerante, casi no afecta el aporte de hidróxido de calcio que hace el “cemento” a la pasta.

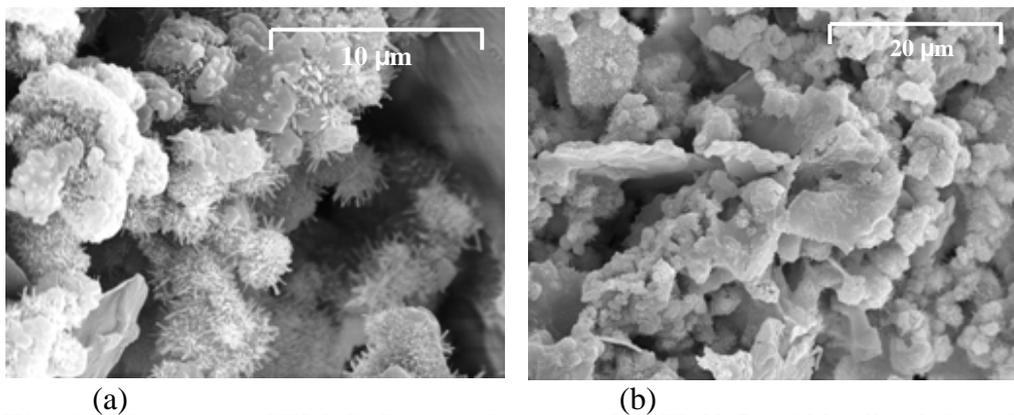
### 6.1.3 Micrografías SEM en Pastas Control

Se muestran a continuación imágenes SEM de pastas control obtenidas a distintas edades.



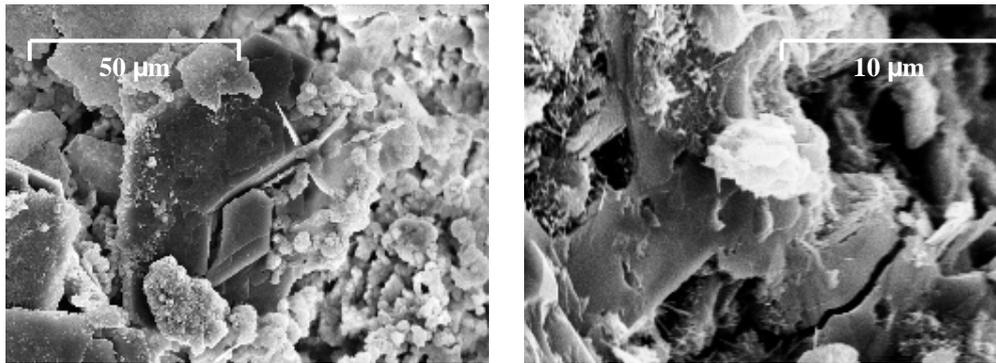
**Fig. 6-3.** Imágenes SEM de Pasta “Escayola = 100%”

En las micrografías (a) y (b) de la **Fig. 6-3**, se aprecian la formación característica de cristales de yeso (típicos), sin alteraciones en su formación por edad.



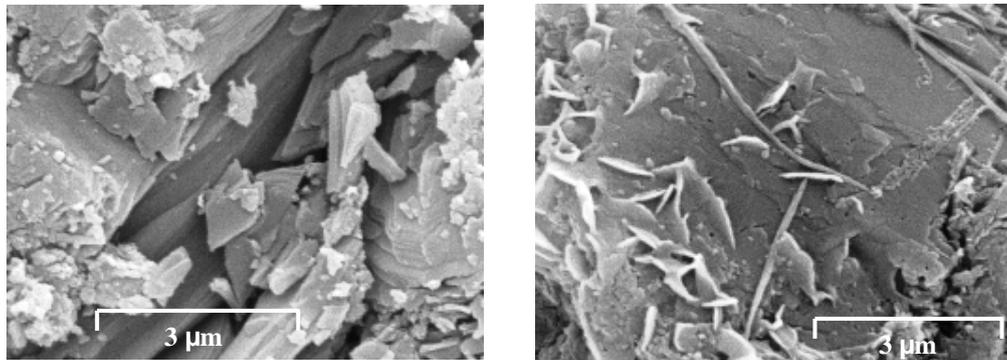
**Fig. 6-4.** Imágenes SEM de Pasta “Cemento BL II 42,5 = 100%” a 2 días de edad

En la Micrografía (a) de la **Fig. 6-4**, se aprecia a formación temprana de etringita; en (b), se observa la formación (precipitación) de material amorfo en la superficie de los granos de cemento. En esta última, no es fácilmente apreciable cristales de etringita que ya están presentes en una gran dispersión [83-84].



(a) (b)  
**Fig. 6-5.** Imágenes SEM de Pasta “Cemento BL II 42,5 = 100%” a 7 días de edad

En la **Fig. 6-5** anterior, en (a) se aprecia, al parecer, la formación de hidróxido cálcico; en (b), se observa la formación de gel SCH.



(a) Edad: 28 días (b) Edad: 60 días  
**Fig. 6-6.** Imágenes SEM de Pasta “Cemento BL II 42,5 = 100%” a 28 y 60 días de edad

En la **Fig. 6-6** anterior, en (a) y (b) se aprecia a formación de hidróxido cálcico [83-84].

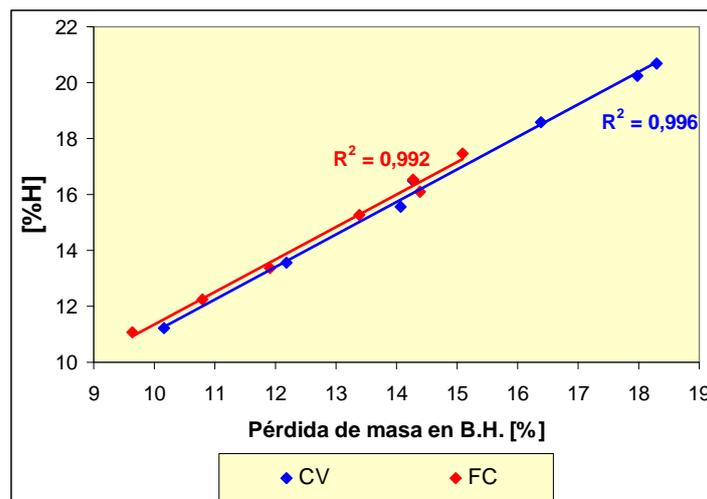
## 6.2 Pastas y morteros de relación "cem BI 42.5R/Escayola/Pz = 20/40/40". Análisis de agua combinada y resistencia a compresión

Mediante el análisis de los procesos de deshidratación, se pretende dejar establecida la opción de vincular la resistencia a compresión en probetas de mortero “20/40/40”, con el agua combinada obtenidas en “B.H.” a muestras del mismo mortero.

### 6.2.1 Vinculación de resultados experimentales de pérdidas de agua combinada en B.H. y TG, en pastas y morteros “20/40/40”.

En **Tabla A-5** del **Anexo A**, se muestran resultados experimentales de pérdida de agua combinada en “%”, realizados en “B.H.”, a distintas edades de curado (datos en columna respectiva identificada como “B.H.(200°C)” ), tanto en pastas como en morteros. De igual modo, se muestran resultados experimentales realizados de pérdida total de agua combinada en “%”, realizados solo a pastas, utilizando “TG”, hasta los 600°C (ver columna “TG(600°C)”) y de pérdida de agua combinada correspondiente a la descomposición CH (ver columna “CH”), a distintas edades de curado, para la combinación señalada. También, en la misma Tabla, para morteros, se describen resultados experimentales de resistencia a compresión en “MPa”(ver columna Rc), para distintas edades de curado.

En **Fig. 6-7**, se muestra la correlación superpuesta de pérdidas de agua combinada, en pastas con ceniza volante (CV) y filler calizo (FC), medidas indistintamente en equipo “TG” y “B.H.”, bajo el mismo principio de correlación considerado en el apartado **6.1.1**, es decir, agua combinada de los hidratos obtenida en “TG” ([%H]), con las obtenidas en el ensayo realizado en “B.H.”; en este caso para pastas “cemento/escayola/puzolana”. Se han considerado solo probetas con curado en “Bolsa (B)” ya que como puede observarse en **Tabla A-5**, los resultados de pérdida de masa en “B.H.” y “TG” con probetas curadas en “Bolsa y Agua (B+A)”, son muy similares, presentando una diferencia promedio entre ellos de 0,32%, para CV y de 0,19% para FC.

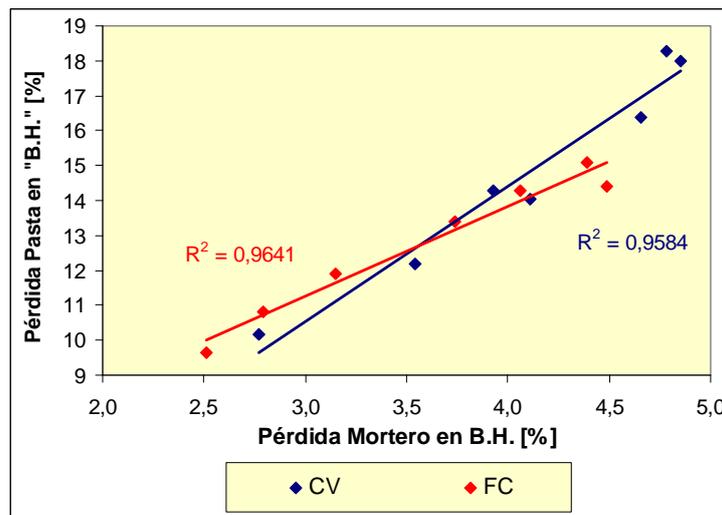


**Fig. 6-7.** Correlación de “Pérdida de Agua Combinada” de los hidratos entre resultados experimentales efectuados en equipos “B.H.” y “TG”. Pasta “cem/escayola/CV = 20/40/40” y Pasta “cem/escayola/FC = 20/40/40”. Probetas Curadas en (B).

De observar la **Fig. 6-7**, es posible concluir que para las pastas ensayadas, existe una buena correlación entre los datos experimentales de pérdidas de agua

combinada realizadas en “TG”, con las realizadas en “B.H.”, tanto para CV como FC.

Se comprueba así, para esta combinación de pasta, la validez de la correlación entre resultados experimentales utilizando el equipo “B.H.” con el equipo “TG”, sin embargo, las pretensiones del estudio son correlacionar también resultados experimentales efectuados a morteros utilizando el equipo “B.H.”. A tal efecto, en **Fig. 6-8** se muestra la correlación superpuesta, entre las pérdidas de agua combinada de muestras de mortero obtenidas en “B.H.”, con muestras de pasta (del mismo conglomerante del mortero), obtenidas también en “B.H.”, tanto para CV como FC. Nuevamente, por la similitud de resultados experimentales, se han considerado solo probetas con curado en “Bolsa (B)”.

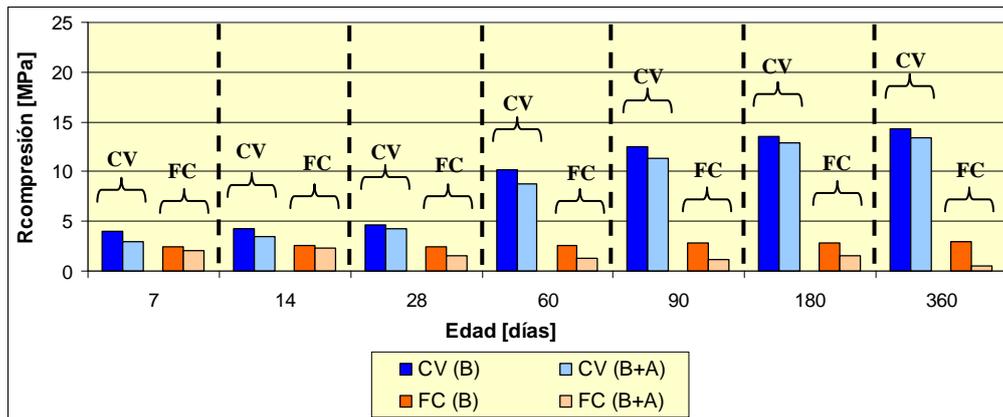


**Fig. 6-8.** Correlación de “Pérdida de Agua Combinada” entre resultados experimentales efectuados a morteros y pastas en equipo “B.H.”. Combinación “cem/escayola/CV = 20/40/40” y “cem/escayola/FC = 20/40/40”. Probetas Curadas en (B).

De observar la **Fig. 6-8**, a pesar que los coeficientes de correlación “ $R^2$ ” asociados a cada ajuste lineal, han disminuido respecto al de **Fig. 6-7** anterior, estos se mantienen dentro de un rango de valores aceptables, por lo que es posible concluir para la presente combinación conglomerante, que existe una buena correlación entre datos experimentales de agua combinada en morteros y pastas; ambos medidos en equipo “B.H.”, tanto para CV como FC, como se esperaba. La validez de esta correlación y la anterior, permiten concluir, que existe una buena correlación entre datos de pérdida de humedad obtenidas en muestras de mortero, con pérdidas de humedad obtenidas en muestras de pastas.

### 6.2.2 Comportamiento de la Resistencia a Compresión y Agua Combinada, con la edad de curado. Morteros “20/40/40”

Para probetas de morteros con CV y FC se exponen valores experimentales de “Resistencia a Compresión (Rc)” en MPa en la columna “Rc” de la **Tabla A-5** del **Anexo A**. Con dichos datos experimentales, en la **Fig. 6-9** siguiente se visualiza la variación de resistencia de compresión con la edad de curado, para puzolana tipo “CV” y “FC” tanto con curado en “B” como curado en “B+A”.



**Fig. 6-9.** Rc vs Edad. Morteros “Cem BL 42,5R/Escayola/CV = 20/40/40” y “Cem BL 42,5R/Escayola/FC = 20/40/40”. Con curado en “Bolsa (B)” y en “Bolsa y Agua (B+A)”.

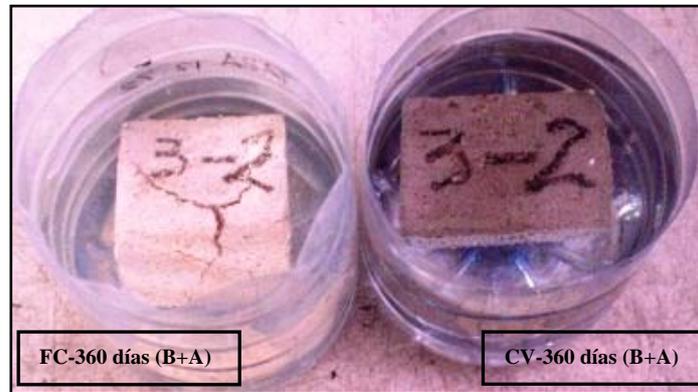
De la **Fig. 6-9** puede observarse en los morteros con CV, que a partir de los 60 días muestran una clara tendencia al incremento de resistencia con la edad y que sus homólogos curados en “B+A” muestran una menor resistencia que aquellos curados en “B”.

En el caso de los morteros con FC, estos muestran menor resistencia que sus homólogos con CV; se observa que los morteros curados en “B”, tienen una clara tendencia a mantener la resistencia con la edad lo que no sucede con aquellos curados en “B+A” donde se aprecia un decrecimiento de la resistencia con la edad, evidenciando que ellos sienten de manera más agresiva la presencia de la alta humedad ya que esta decae significativamente respecto de su similar curada en “B”; incrementándose esta diferencia con la edad.

El incremento significativo de resistencia en los morteros con CV, deja en evidencia la actividad puzolánica que se desarrolla a partir de los 28 días y que sustenta este crecimiento, lo que no ocurre en los morteros con FC.

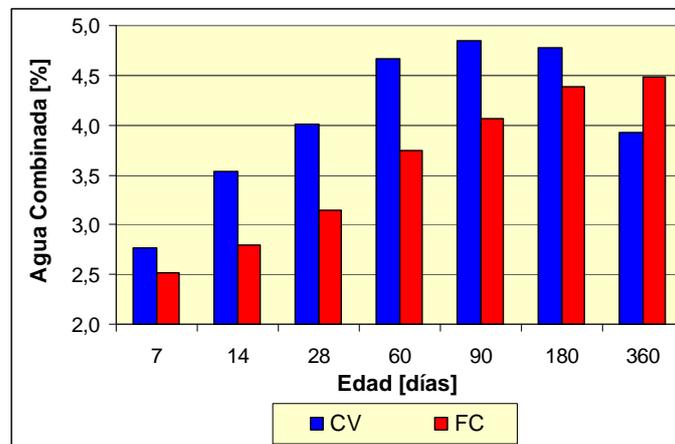
En la **Fig. 6-10**, se muestra una imagen fotográfica de probetas de mortero con FC y con CV, mantenidas por 359 días con curado en “B” y luego, por 24 horas bajo agua (curado “B+A”). En ella puede apreciarse el estado en que se encuentra la probeta con FC, evidenciando visualmente lo que los datos

experimentales acusan; es decir incompatibilidad con la alta humedad que reduce drásticamente la resistencia con la generación de productos de hidratación expansivos que la llevan al deterioro. No sucede lo mismo en la probeta con CV ya que ella se mantiene íntegra, sin daños o cambios geométricos visibles.



**Fig. 6-10. Probetas de mortero 20/40/40. 360 días, curado “B+A”**

Finalmente, en la **Fig. 6-11** se muestra la variación de datos experimentales de porcentaje de agua combinada con la edad de curado, en muestras de morteros con CV y FC y medidas en “B.H.” (columna “B.H.(200°C)”, correspondiente a “Morteros 20/40/40”, **Tabla A-5, Anexo A**), descartándose valores de curado en “Bolsa y Agua (B+A)” por ser similares al curado en “Bolsa (B)”.



**Fig. 6-11. Porcentaje de Agua Combinada en B.H. vs Edad. Mortero "cem Bl 42.5R/Escayola/CV = 20/40/40" y mortero "cem Bl 42.5R/Escayola/FC = 20/40/40". Curado en (B)**

De **Fig. 6-11** puede observarse en morteros con CV un crecimiento gradual de la cantidad de agua combinada con el tiempo. Esta forma especial de variación con la edad, se justifica fundamentalmente por la formación de compuestos producto de la reacción puzolánica.

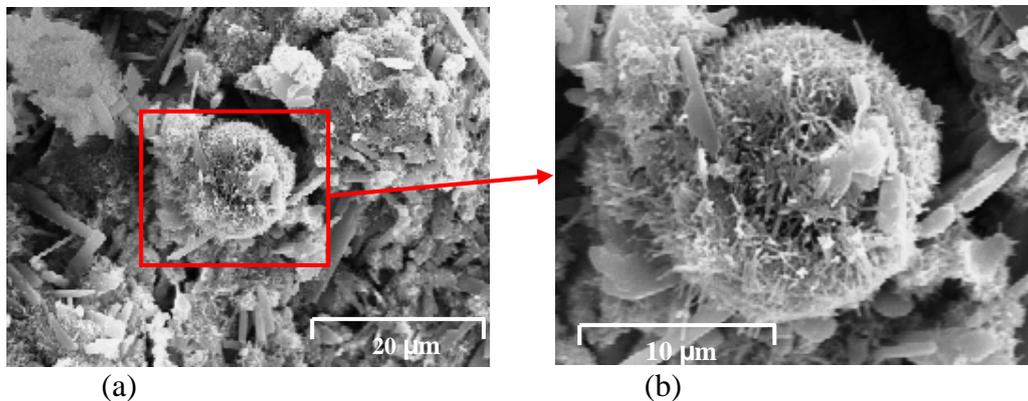
En general se observa un aumento del porcentaje de agua combinada con la edad de curado, hasta 90 días.

En el caso de la CV, a mayor tiempo de curado, se observa una disminución en el porcentaje de agua combinada, debido probablemente a una transformación de los productos de hidratación con relaciones diferentes de agua combinada.

En el caso del FC, al no haber productos de hidratación derivados de la reacción puzolánica, no parece producirse este efecto.

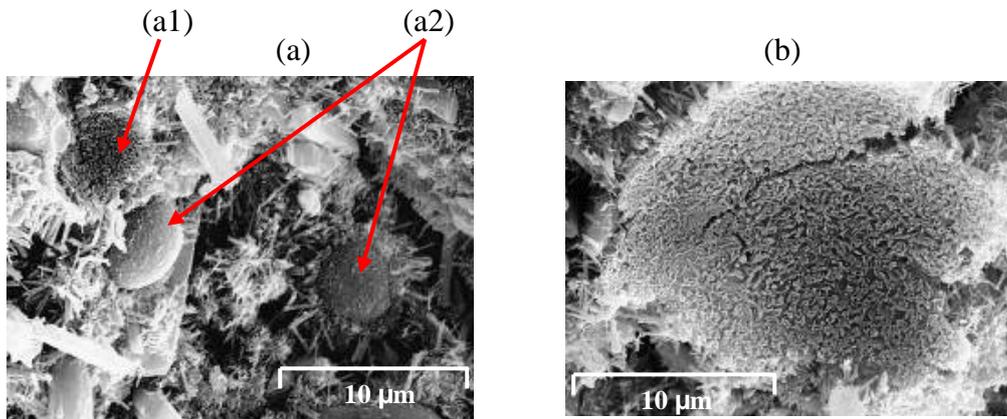
### 6.2.3 Micrografías SEM. Pastas de “Cem BL 42,5R/Escayola/Pz = 20/40/40”

Se muestran a continuación imágenes SEM de pastas “20/40/40” obtenidas a distintas edades.



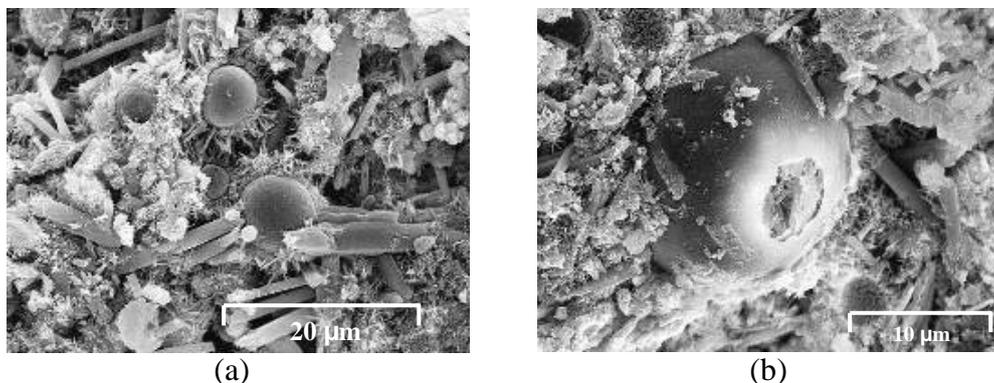
**Fig. 6-12.** Imágenes SEM. Pasta “20/40/40” con “CV” a 53 días de edad

En la **Fig. 6-12** se muestra en la micrografía (a) una partícula característica de la CV esférica con formación de productos de hidratación tipo SCH y ASCH. La micrografía (b) corresponde a una vista aumentada del recuadro marcado en (a). En el entorno, se aprecian cristales estables de yeso.



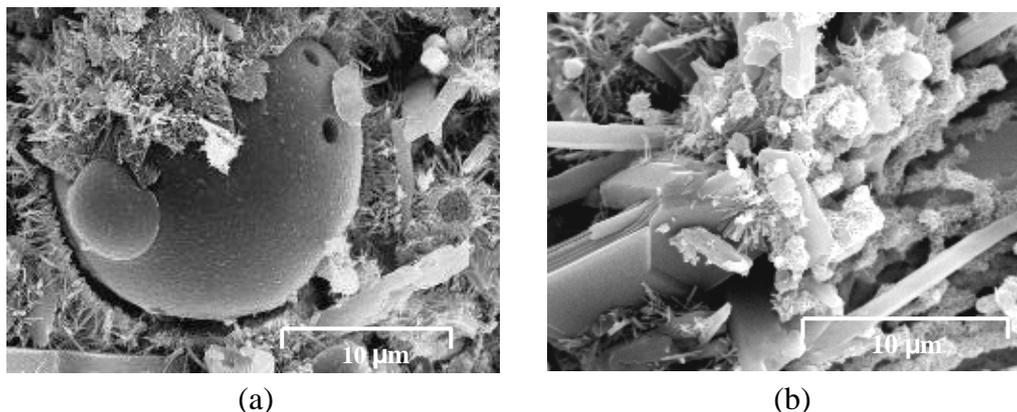
**Fig. 6-13.** Imágenes SEM. Pasta “20/40/40” con CV a 90 días de edad

En la **Fig. 6-13**, la imagen (a1) en micrografía (a) muestra el residuo de un manto de nucleación característico de una CV esférica con productos formados SCH-ASCH. La imagen (a2), muestra CV esféricas en proceso de nucleación con formación de su manto con productos de hidratación. La micrografía (b) muestra la formación del manto residual característico que se forma como envoltorio a la CV esférica. En ella se aprecia la formación consecuente de SCH y ASCH en formas muy irregulares [83], así como agujas de etringita.



**Fig. 6-14.** Imágenes SEM. Pasta “20/40/40” con CV a 172 días de edad

En la **Fig. 6-14**, la micrografía (a) muestra la formación de productos SCH y ASCH de forma irregular envolviendo a la CV. Ya no es fácil detectar la presencia de etringita. La micrografía (b) muestra una nucleación de CV con formación de productos de hidratación al interior de la cenósfera.



**Fig. 6-15.** Imágenes SEM. Pasta “20/40/40” con CV a 172 días de edad

En la **Fig. 6-15**, la micrografía (a) muestra la formación de productos de hidratación entorno a la CV. El adosamiento que se produce en la superficie de la CV, puede ser SCH [83]. La micrografía (b) muestra la formación de compuestos de hidratación de morfología similar a ACH [54, 74, 84]. Hay una característica común en las imágenes SEM precedentes, se torna difícil observar etringita, y la que se ha formado a temprana edad, es altamente probable que se ha transformado en monosulfoaluminato confundiendo con otros productos de hidratación en formación.

### 6.3 Pastas y morteros de relación "cem Bl 42.5R/Escayola/Pz = 20/50/30". Análisis de pérdida de agua combinada y resistencia a compresión

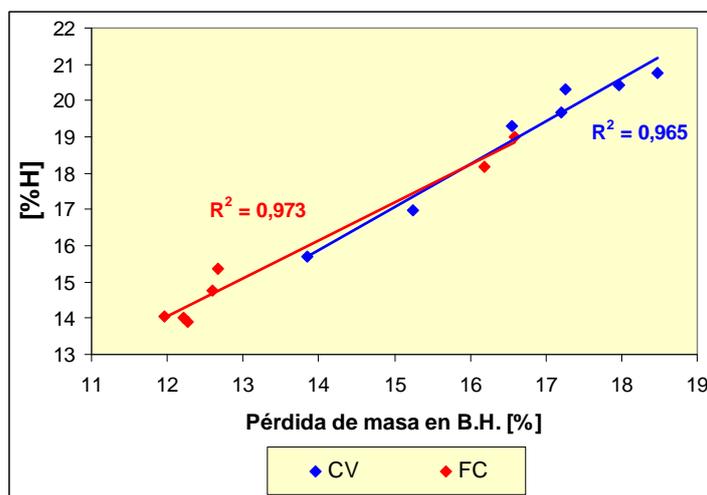
Nuevamente, mediante el análisis de los procesos de deshidratación, se pretende establecer la opción de vincular la “Rc” en probetas de mortero “20/50/30”, con el agua combinada obtenidas en “B.H.” a muestras del mismo mortero.

#### 6.3.1 Vinculación de resultados experimentales de pérdidas de agua combinada en B.H. y TG, en pastas y morteros “20/50/30”.

En **Tabla A-6** del **Anexo A**, se muestran resultados experimentales de pérdida de agua combinada realizados en equipo “B.H.” y “TG”, al igual que resultados de resistencia a compresión, encontrándose en las columnas similares que se han descrito para el caso al inicio del apartado **6.2.1**.

En **Fig. 6-16**, se muestran la correlación superpuestas, bajo el mismo principio de correlación considerado en el apartado **6.1.1** y luego en el apartado **6.2.1**, es decir, agua combinada de los hidratos obtenida en “TG” ([%H]), con las obtenidas en el ensayo realizado en “B.H.”, con uso de ceniza volante (CV) y

filler calizo (FC), considerando solo probetas con curado en “Bolsa (B)” ya que como puede observarse en [Tabla A-6](#), los resultados de pérdida de masa en “B.H.” y “TG” con probetas curadas en “Bolsa y Agua (B+A)”, son muy similares, presentando una diferencia promedio entre ellos de 0,05%, para CV y de 0,01% para FC.

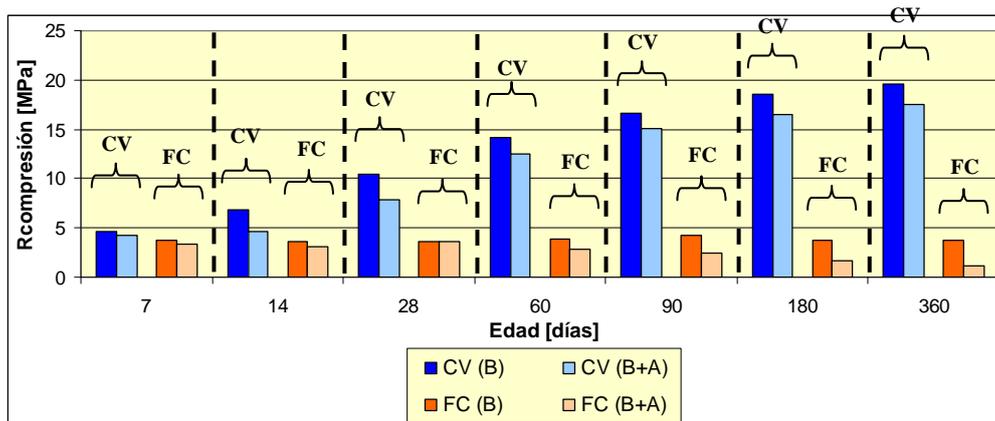


**Fig. 6-16.** Correlación de “Pérdida de Agua Combinada” de los hidratos entre resultados experimentales efectuados en equipos “B.H.” y “TG”. Pasta “cem/escayola/CV = 20/50/30” y Pasta “cem/escayola/FC = 20/50/30”. Probetas Curadas en (B).

De observar la [Fig. 6-16](#), es posible concluir que al igual que lo observado en [Fig. 6-8](#), para esta pasta, existe también una buena correlación entre los datos experimentales de pérdidas de agua combinada realizadas en “TG”, con datos experimentales realizados en “B.H.”, tanto para CV como FC.

### 6.3.2 Comportamiento de la Resistencia a Compresión y Agua Combinada, con la edad de curado. Morteros “20/50/30”

Para probetas de morteros con CV y FC se exponen valores experimentales de “Resistencia a Compresión (Rc)” en MPa en la columna “Rc” de la [Tabla A-6](#) del [Anexo A](#). Con dichos datos experimentales, en la [Fig. 6-17](#) siguiente se visualiza la variación de resistencia de compresión con la edad de curado, para puzolana tipo “CV” y “FC” tanto con curado en “B” como curado en “B+A”.



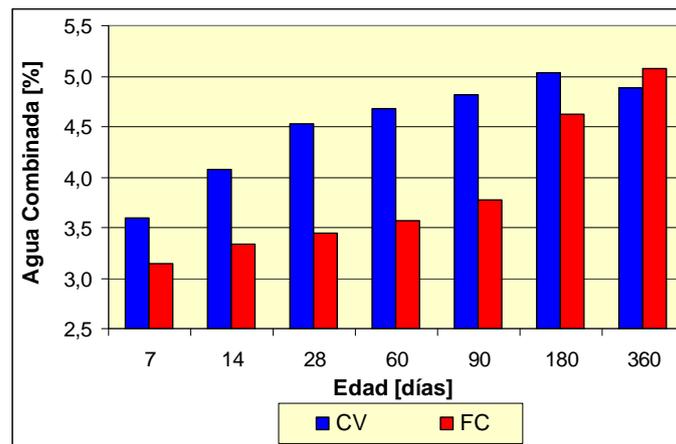
**Fig. 6-17. Rc vs Edad. Morteros “Cem BL 42,5R/Escayola/CV(FC) = 20/50/30”. Con curado en “Bolsa (B)” y en “Bolsa y Agua (B+A)”.**

De la **Fig. 6-17** puede observarse en morteros con CV, a partir de los 28 días hay un notorio incremento de resistencia con la edad y que sus homólogos curados en “B+A” muestran menor resistencia que los curados en “B”.

Queda en evidencia que con el tiempo de curado se desarrolla una actividad puzolánica que sustenta el crecimiento de resistencia.

Sin embargo, en los morteros con FC, se detecta una menor resistencia con la edad que sus homólogos con CV; se observa que los morteros curados en “B”, mantienen la resistencia con la edad lo que no sucede con aquellos curados en “B+A” que decrece con la edad, evidenciando la agresividad de la alta humedad ya que la resistencia decae (69% en promedio) respecto de su similar curada en “B”. La ausencia de actividad puzolánica del FC más bien hace que esta adición actúe disminuyendo la dosis de cemento, lo que debilita la resistencia.

Finalmente, en la **Fig. 6-18** se muestra la evolución de datos experimentales de pérdida de agua combinada según el tiempo de curado, en muestras de morteros con CV y FC y medidas en “B.H.” (columna “B.H.(200°C)”, correspondiente a “Morteros 20/50/30”, **Tabla A-6, Anexo A**).

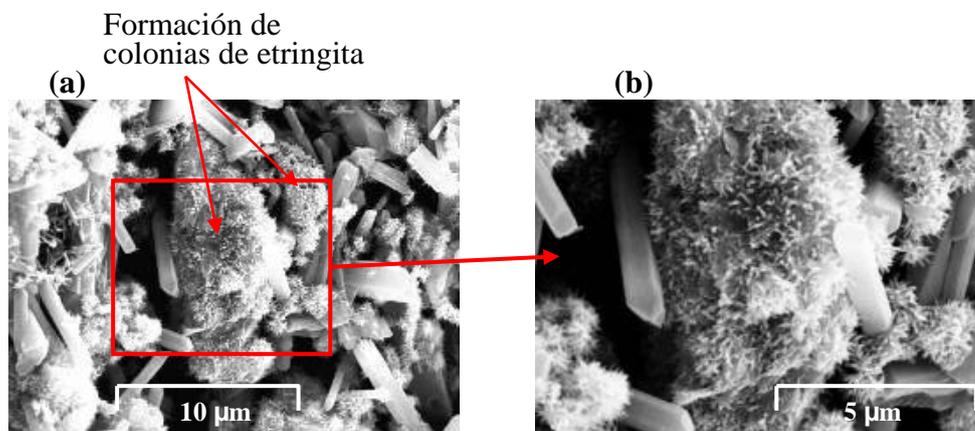


**Fig. 6-18.** Agua Combinada en B.H. vs Edad. Mortero "cem Bl 42.5R/Éscayola/CV(FC) = 20/50/30". Curado en (B).

De **Fig. 6-18** puede observarse una similitud con lo observado para el conglomerante "20/40/40"; es así que para el mortero con CV hay un crecimiento gradual de la cantidad de agua combinada con la edad de curado hasta los 180 días, para iniciar una disminución a edad mayor. Las razones de esta variación fueron anteriormente expuestas en el apartado **6.2.1**.

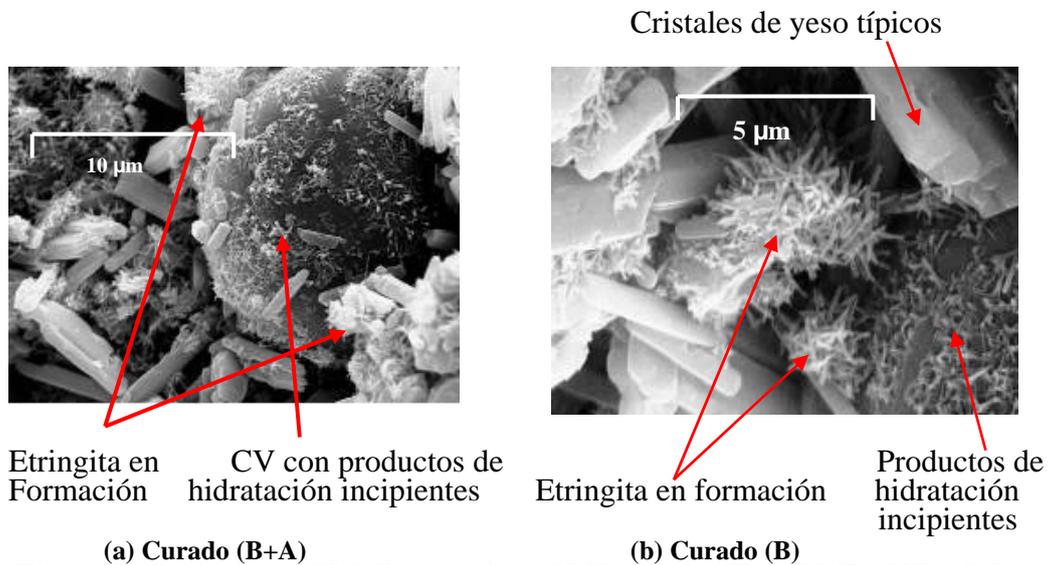
**6.3.3 Micrografías SEM. Pastas de "Cem BL 42,5R/Éscayola/Pz = 20/50/30"**

Se muestran a continuación micrografías con imágenes SEM de pastas "20/50/30" obtenidas a distintas edades.



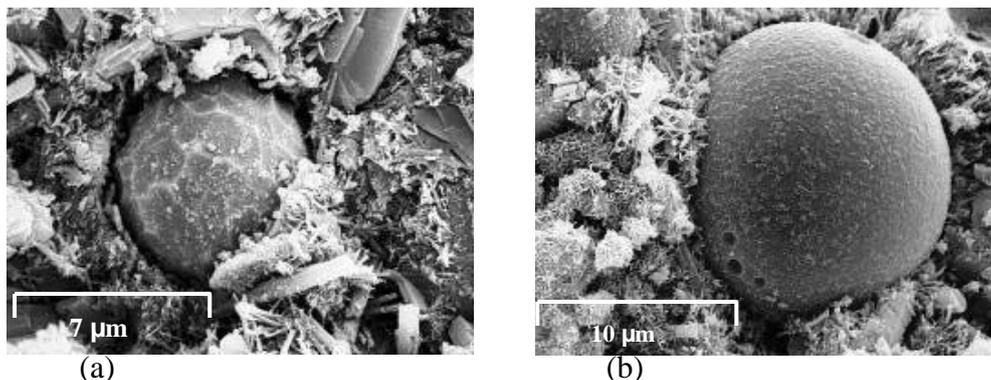
**Fig. 6-19.** SEM. Pasta "Cem Bl/Ésc/FC = 20/50/30". 7 días. curado (B+A)

La micrografía (a) de la **Fig. 6-19** muestra la formación típica de colonias etringita, como producto de hidratación en pasta con FC a 7 días de edad, bajo condiciones de mucha humedad (B+A). La micrografía (b) corresponde a una ampliación del recuadro de la micrografía (a), pudiéndose observar con más detalle esta formación característica.



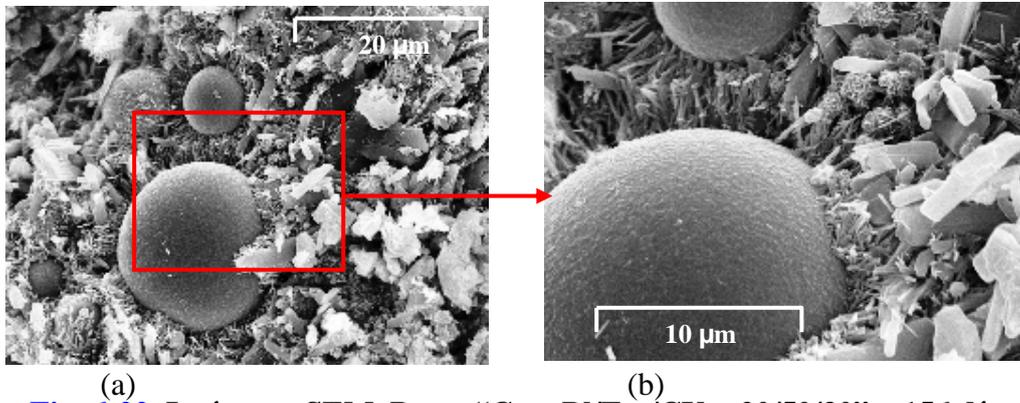
**Fig. 6-20.** Imágenes SEM. Pasta “Cem BI/Escayola/CV = 20/50/30” a 7 días de curado.

En las micrografías (a) y (b) de la **Fig. 6-20**, se muestran algunas formaciones incipientes de productos de hidratación sobre la superficie esférica de una partícula de CV, así como también la formación incipiente de colonias de etringita.



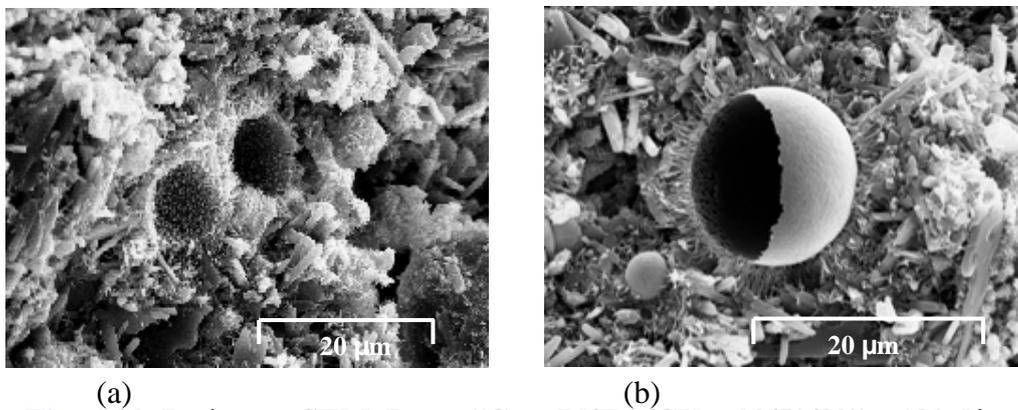
**Fig. 6-21.** Imágenes SEM. Pasta “Cem BI/Esc/CV = 20/50/30” a 60 días, con curado (B)

La micrografía (a) de la **Fig. 6-21** muestra productos de hidratación sobre la superficie esférica de la CV. La micrografía (b) muestra una cenósfera típica envuelta de por un manto de productos de hidratación muy característico, que se entrelazan ocupando espacios volumétricos disponibles.



(a) (b)  
**Fig. 6-22.** Imágenes SEM. Pasta “Cem BI/Esc/CV = 20/50/30” a 156 días, con curado (B)

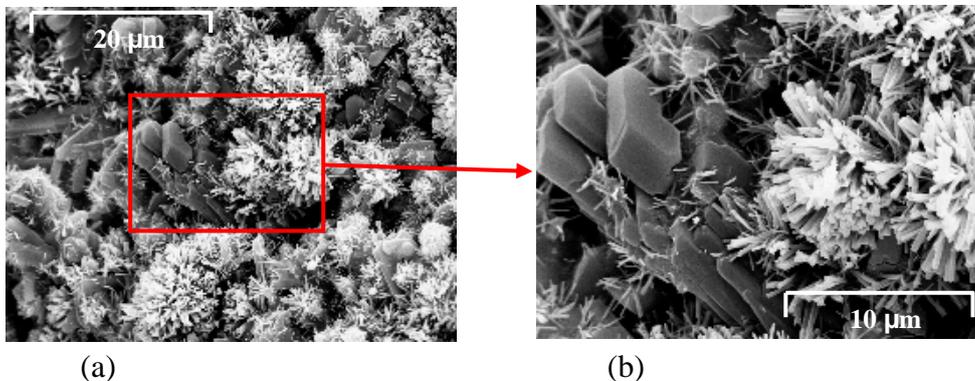
En la micrografía (a) de la **Fig. 6-22** es posible observar una caracterización típica de productos de hidratación sílico-aluminoso en el entorno inmediato de la CV. La micrografía (b) muestra el entorno de la CV con el manto de productos de hidratación, que se entrelazan con la formación de otro manto en la vecindad.



(a) (b)  
**Fig. 6-23.** Imágenes SEM. Pasta “Cem BI/Esc/CV = 20/50/30” a 180 días, con curado (B)

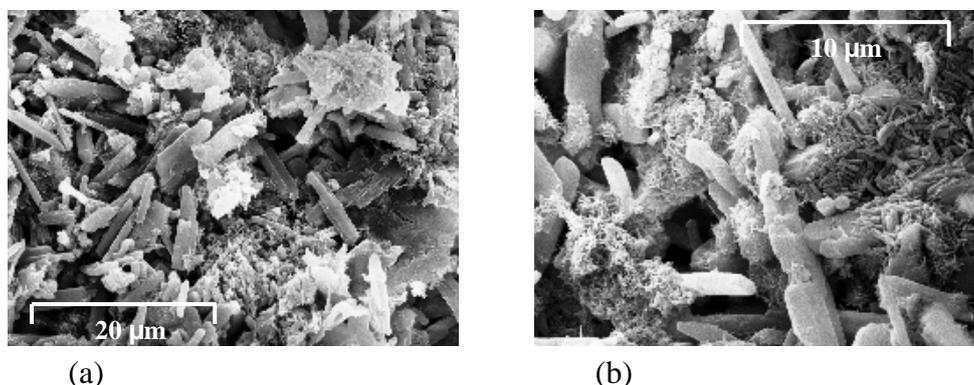
En la **Fig. 6-23**, la micrografía (a) muestra la evolución de la CV, la que sirve de nucleación para la formación de un manto de productos de hidratación que se observan en el entorno de su ubicación primitiva. La cenósfera ha desaparecido

quedando un cráter característico. La micrografía (b) muestra parte de esta evolución, en que la CV luego de reaccionar con el hidróxido cálcico, pierde su forma esférica típica dejando un manto de productos de hidratación. En ambas micrografías se observa además, cristales de yeso típicos.



**Fig. 6-24.** Imágenes SEM. Pasta “Cem BI/Esc/CV = 20/50/30” a 282 días, con curado (B)

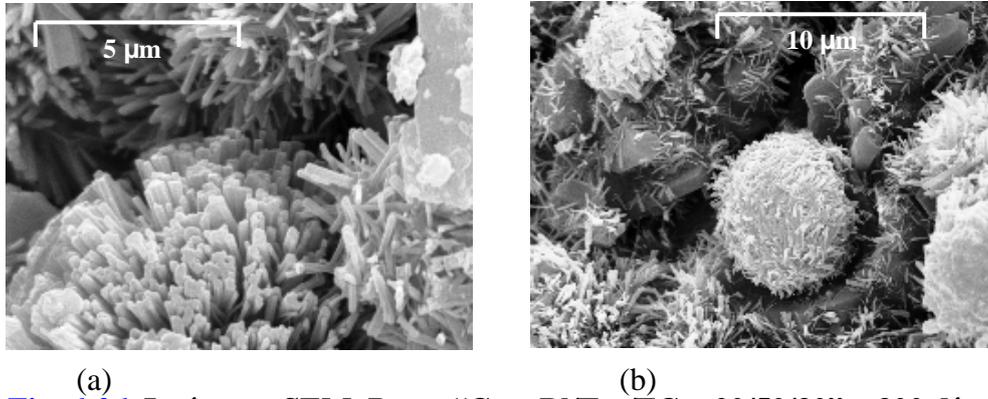
En la **Fig. 6-24**, la micrografía (a) muestra una vista general a la edad de 282 días de curado en que se observan cristales de yeso característicos y la formación de productos de hidratación debido a la presencia de cal libre y probablemente por efecto del aire ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico, lo que ocasiona una carbonatación parcial de la muestra [83, 85]. La micrografía (b) muestra una ampliación del sector enmarcado en la micrografía (a).



**Fig. 6-25.** Imágenes SEM. Pasta “Cem BI/Esc/FC = 20/50/30” a 282 días, con curado (B)

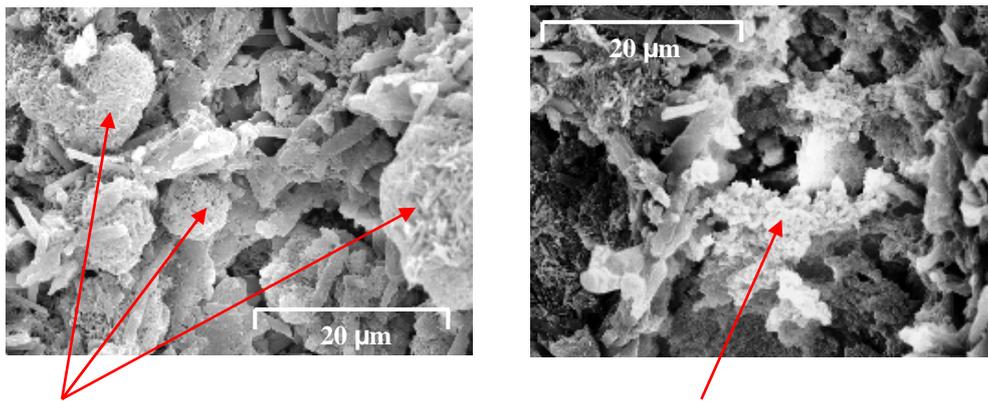
En la **Fig. 6-25**, la micrografía (a) muestra una vista amplia de esta pasta con Filler Calizo, sin puzolana activa, en que se observan algunas formaciones de compuestos de hidratación y presencia de cristales de yeso estables. No se aprecia formación de etringita. La micrografía (b) muestra la formación de

hidratos de tipo silicoaluminatos o formación de etringita con incorporación de silicio [74].



(a) (b)  
**Fig. 6-26.** Imágenes SEM. Pasta “Cem BI/Esc/FC = 20/50/30” a 300 días, con curado (B)

En la Fig. 6-26, en ambas micrografías, se observan colonias de etringita y partículas de FC rodeadas de productos de hidratación.



Nucleación del FC

Carbonatación de hidratos

(a) (b)  
**Fig. 6-27.** Imágenes SEM. Pasta “Cem BI/Esc/FC = 20/50/30” a 300 días, con curado (B)

En la Fig. 6-27, la micrografía (a) y (b) muestra el estado en que se encuentra la pasta con Filler calizo a 300 días de edad, en que también se aprecian productos de hidratación como nucleación de partículas de FC, de tipo SCH, observándose

además, una gran porosidad. Se observa la presencia de cristales de yeso típico, pero no se observan formaciones de colonias de etringita.

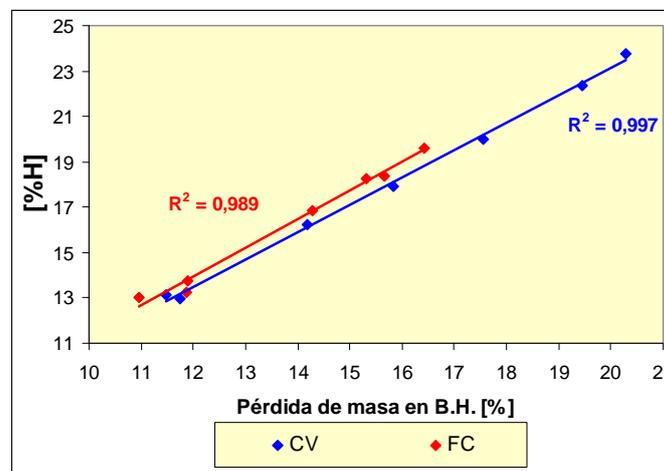
#### 6.4 Pastas y morteros de relación "cem BI 42.5R/Escayola/Pz = 30/40/30". Análisis de pérdida de agua combinada y resistencia a compresión.

Mediante el análisis de los procesos de deshidratación, se pretende dejar establecida la opción de vincular la resistencia a compresión en probetas de mortero "30/40/30", con el agua combinada obtenidas en "B.H." a muestras del mismo mortero, al igual como se ha hecho anteriormente con el mortero "20/40/40" y "20/50/30".

##### 6.4.1 Vinculación de resultados experimentales de pérdidas de agua combinada en B.H. y TG, en pastas y morteros "30/40/30"

En **Tabla A-7** del **Anexo A**, se muestran resultados experimentales de pérdida de agua combinada realizados en equipo "B.H." y "TG", al igual que resultados de resistencia a compresión, encontrándose los valores en las columnas similares que se han descrito para el caso al inicio del apartado **6.2.1**.

En **Fig. 6-28**, se muestran las correlaciones superpuestas, bajo el mismo principio de correlación considerado en el apartado **6.1.1**, en este caso para pastas "cem/esc/pz = 30/40/30", con uso de ceniza volante (CV) y filler calizo (FC), considerando solo probetas con curado en "Bolsa (B)" ya que como puede observarse en **Tabla A-7**, los resultados de pérdida de masa en "B.H." y "TG" con probetas curadas en "Bolsa y Agua (B+A)", son muy similares, presentando una diferencia promedio entre ellos de 0,21%, para CV y de 0,19% para FC.



**Fig. 6-28.** Correlación entre resultados experimentales efectuados en equipos "B.H." y "TG". Pasta "cem/escayola/CV = 30/40/30" y Pasta "cem/escayola/FC = 30/40/30". Probetas Curadas en (B).

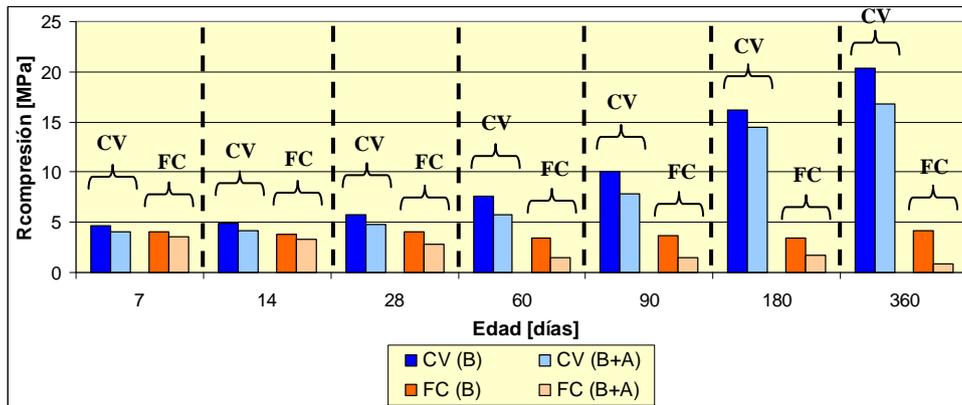
De Fig. 6-28, es posible observar la buena correlación que se produce para el ajuste lineal y de ello concluir que al igual que lo observado en Fig. 6-8 (para pastas “20/40/40”) y Fig. 6-16 (para pastas “20/50/30”), para esta pasta, existe también una buena correlación entre los datos experimentales de pérdidas de agua combinada realizadas en “TG”, con datos experimentales realizados en “B.H.”, tanto para CV como FC.

**6.4.2 Comportamiento de la Resistencia a Compresión y Agua Combinada, con la edad de curado. Morteros “30/40/30”**

Todas las probetas sometidas a ensayos de resistencia a compresión tienen dimensiones similares a las probetas de mortero “20/40/40” y “20/50/30” y han sido ensayadas a los 7, 14, 28, 60, 90, 180 y 360 días de curado, para dos series, una con curado en “Bolsa (B)” y la otra, con curado en “Bolsa y Agua (B+A)”.

Así, para probetas de morteros con CV y FC se exponen valores experimentales de “Resistencia a Compresión (Rc)” en MPa en la columna “Rc” de la Tabla A-7 del Anexo A.

Con dichos datos experimentales, en la Fig. 6-29 siguiente se visualiza la variación de resistencia de compresión con la edad, para puzolana tipo CV y FC tanto con curado en “B” como curado en “B+A”.



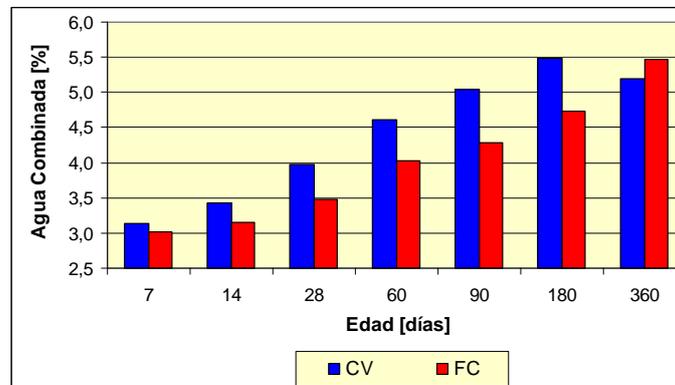
**Fig. 6-29. Rc vs Edad. Morteros “Cem BL 42,5R/Escayola/CV = 30/40/30” y “Cem BL 42,5R/Escayola/FC = 30/40/30”. Con curado en “Bolsa (B)” y en “Bolsa y Agua (B+A)”.**

De la Fig. 6-29 puede observarse en los morteros con CV, que a partir de los 90 días hay un notorio incremento de resistencia con la edad, y que sus homólogos curados en “B+A” muestran una menor resistencia que aquellos curados en “B”.

Queda en evidencia que a partir de los 28 días de curado, estos morteros desarrollan una actividad puzolánica que sustenta el crecimiento de resistencia.

El comportamiento de los morteros con FC, es similar a las otras dos combinaciones anteriores por lo que, la resistencia de morteros curados en "B+A" decae significativamente respecto de su similar curada en "B". Nuevamente queda en evidencia la ausencia de actividad puzolánica ya que el FC actúa más bien disminuyendo la dosis de cemento lo que debilita la resistencia.

Finalmente, en la **Fig. 6-30** se muestra la evolución de datos experimentales el porcentaje de agua combinada según el tiempo de curado, en muestras de morteros con CV y FC y medidas en "B.H." (columna "B.H.(200°C)", correspondiente a "Morteros 30/40/30", **Tabla A-7, Anexo A**).

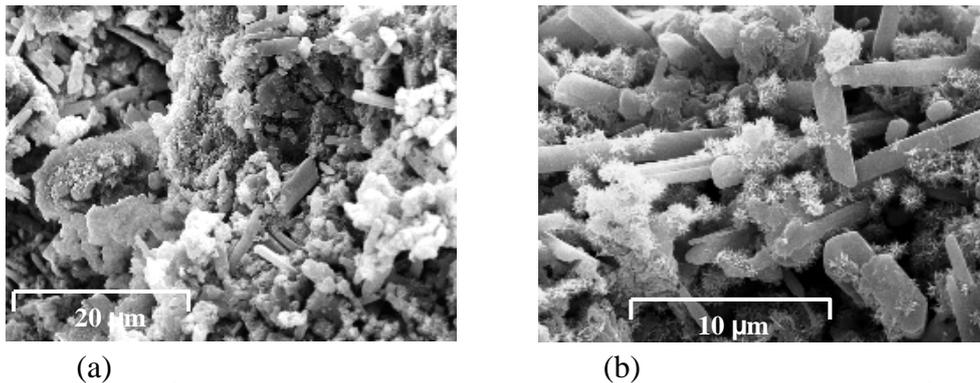


**Fig. 6-30. Agua Combinada en B.H. vs Edad. Mortero "cem Bl 42.5R/Escayola/CV = 30/40/30" y mortero "cem Bl 42.5R/Escayola/FC = 30/40/30". Curado en (B).**

De **Fig. 6-30** puede observarse una similitud con lo observado para el conglomerante "20/40/40" y "20/50/30"; con un crecimiento gradual de la cantidad de agua combinada con la edad de curado.

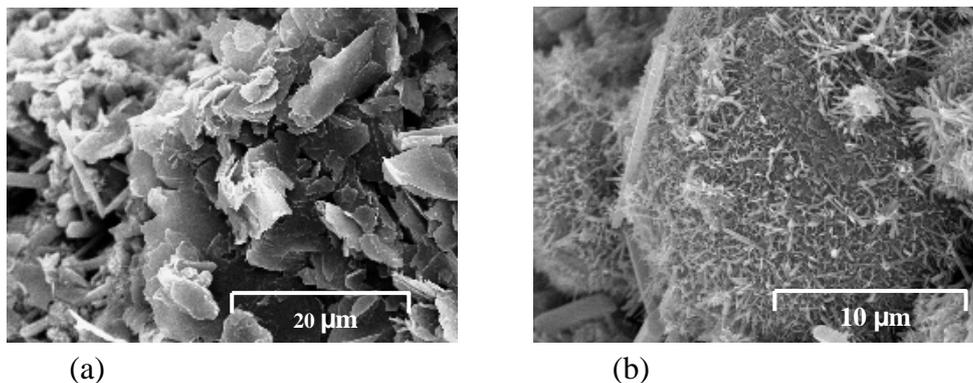
#### 6.4.3 Micrografías SEM. Pastas de "Cem BL 42,5R/Escayola/Pz = 30/40/30"

Se muestran a continuación micrografías con imágenes SEM de pastas "30/40/30" obtenidas a distintas edades.



(a) (b)  
**Fig. 6-31.** Imágenes SEM. Pasta “Cem BI/Esc/FC = 30/40/30”, a 33 días con curado (B)

En Fig. 6-31, la micrografía (a) muestra un estado general en que se encuentra el proceso de hidratación de la pasta con FC a 33 días de edad, con formación de CH y SCH. La micrografía (b) muestra cristales de yeso característicos y formación de etringita.



(a) (b)  
**Fig. 6-32.** Imágenes SEM. Pasta “Cem BI/Esc/CV = 30/40/30”, a 43 días, con curado (B)

En la Fig. 6-32, en las micrografías (a) y (b) se muestra un estado general de la pasta con CV apreciándose una formación de productos de hidratación tipo SCH y ASCH [86].

### 6.5 Análisis de vinculación resistencia a compresión ( $R_c$ ) y agua combinada en B.H.

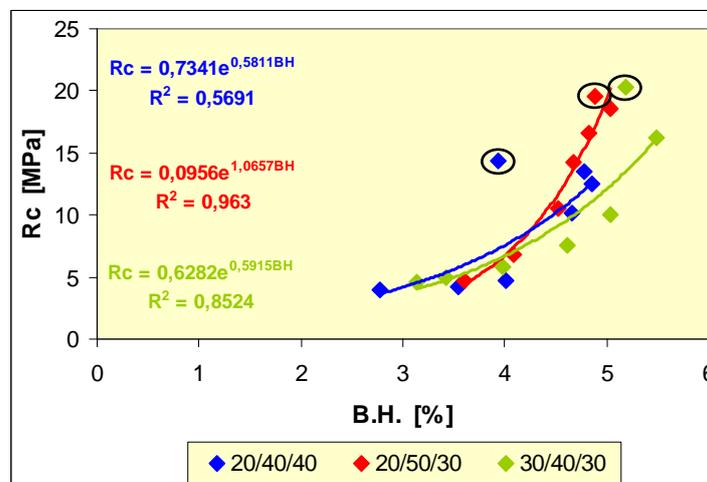
Dado que en muestras con CV, la fijación de cal se completa a corta edad, y por lo visto en los resultados de los ensayos de resistencia mecánica, hay un aumento sostenido con la edad de curado, esto deja en evidencia que la evolución de la resistencia mecánica de compresión no dependería tanto de la

fijación de cal como de la formación de otros productos de hidratación; fundamentalmente SCH, ACH y ASCH.

Por otra parte, según lo descrito en las observaciones de la **Fig. 6-11** del apartado **6.2.2**, la formación de productos consecuentes del proceso de hidratación va madurando con la edad, lo que se manifiesta con una pérdida gradual de agua combinada. En esta etapa, es posible la vinculación con la resistencia a compresión por cuanto ésta suele también tener un aumento sostenido con la edad de curado. Sin embargo a mayor edad, el proceso de hidratación sufre un cambio que se manifiesta en una disminución del agua combinada, mientras la resistencia a compresión aumenta, generándose una alteración en esta pretendida vinculación.

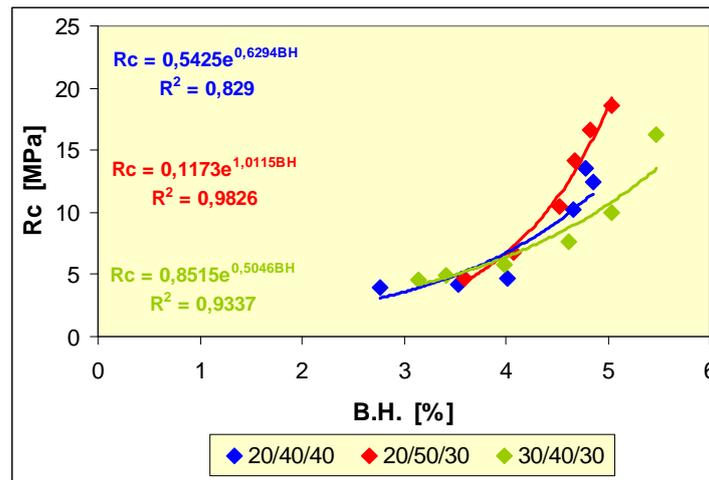
Tal como se demostró en el apartado **6.2.1** (para mortero “20/40/40”), apartado **6.3.1** (para mortero “20/50/30”) y apartado **6.4.1** (para mortero “30/40/30”), existe una buena correlación entre datos de pérdida de agua combinada en morteros, con pérdidas de agua combinada en pastas, para la misma combinación conglomerante y utilizando “B.H.”. Es esta condición la que permite plantear una correlación de vinculación directa para morteros, entre resultados experimentales de resistencia a compresión con la pérdida de agua combinada obtenida en “B.H.”.

En **Fig. 6-33** se muestra la mejor correlación estadística entre valores experimentales de resistencia a compresión “Rc” y agua combinada en “B.H.”, discriminado para morteros con CV en la condición de curado en Bolsa “(B)”. Los valores experimentales se encuentran disponibles en la **Tabla A-5**, **Tabla A-6** y **Tabla A-7**, del **Anexo A**, para el mortero “20/40/40”, mortero “20/50/30” y mortero “30/40/30”, respectivamente.



**Fig. 6-33.** Resistencia a compresión Rc vs Pérdida de Agua combinada en B.H. Morteros “Cem Bl 42,5R/escayola/CV”. Curado en “(B)”.

En la **Fig. 6-33** se muestran las tendencias de ajuste a los datos experimentales en formato exponencial, ya que es el que entrega un mejor coeficiente de ajuste estadístico “ $R^2$ ”. Como se ha comentado precedentemente, a mayor edad, el proceso de hidratación se manifiesta en una disminución del agua combinada, mientras la resistencia a compresión aumenta; esta situación genera una alteración en el ajuste y afecta al “ $R^2$ ”. Por ello, se plantea sustraer del ajuste los puntos que representan los valores experimentales a 360 días (marcados en círculo), ya que precisamente son los que muestran la mayor desviación a la tendencia de los otros valores temporales anteriores en cada serie; de este modo, el ajuste quedaría como se muestra en **Fig. 6-34** siguiente.



**Fig. 6-34.** Resistencia a compresión  $R_c$  vs Pérdida de Agua combinada en B.H. Morteros “Cem Bl 42,5R/escayola/CV”. Curado en “(B)”. Ajuste exponencial mejorado

En **Fig. 6-34**, puede apreciarse que el ajuste mejora, observándose una tendencia que acusa un comportamiento muy similar para mezclas con conglomerante “20-40-40” y “30-40-30”, con el ahorro sustancial de cemento.

Las mejoras significativas del ajuste ocurren para mortero “20/40/40” y ello tiene relación con el inicio de la reactividad puzolánica manifestada con el inicio de las mejoras en la resistencia a compresión. De acuerdo con la tendencia de “ $R_c$ ” con la edad de curado (**Fig. 6-9** del apartado 6.2.2), las mejoras de “ $R_c$ ” en este mortero se inician a partir de los 28 días, por lo que, aún es posible mejorar “ $R^2$ ” si se eliminan del ajuste los valores experimentales a los 7 días, quedando en dicho caso en el valor “0,94”. Al eliminar del ajuste los valores experimentales a los 7 días para los otros dos morteros, no se producen mejoras ya que la reactividad de ellos se inicia más tempranamente.

De este modo, la deshidratación obtenida en “B.H.” puede ser un referente de vinculación con la resistencia a compresión, sujeta a una desviación importante para períodos en que aún no se inicia la reactividad y aplicable a un período de

tiempo no mayor a 6 meses. Si bien no se puede ser concluyente, y de acuerdo a lo expuesto precedentemente, se requiere aplicar estos ajustes con criterio a fin de reducir con certeza la desviación propia de los resultados experimentales. También, habrá que prestar atención al fenómeno que se hace presente en las tres combinaciones “Conglomerantes”, con disminución del agua combinada a edad tardía y que no permite la vinculación con la “Rc” en todo instante.

### **6.6 Conclusiones generales del análisis Microestructural en Pastas y Morteros “Cemento Bl 42,5R/Escayola/Puzolana”**

Atendiendo lo expuesto en el presente Capítulo, es posible extraer las siguientes conclusiones de carácter general.

- Se demuestra que hay una buena correlación de resultados de “Pérdida de Humedad” para un mismo conglomerante, entre ensayos realizados en “B.H.” y ensayos realizados en “TG”; tanto entre “pastas” como, entre “pastas” y “mortero”.
- En probetas de mortero con CV, es posible vincular la resistencia a compresión con “Pérdidas de Humedad” registradas en “B.H.”, pero limitado a edades hasta 180 días de curado.
- Hay un aumento del contenido de agua combinada con la edad de curado en las probetas con CV, excepto a tiempos muy largo (mayor a 180 días).
- Los valores de “Rc” en morteros con CV son muy superiores a los con FC, demostrando la reactividad puzolánica de la CV.

---

**Capítulo 7. INFLUENCIA DE ALGUNOS PARÁMETROS DE  
DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE MORTERO “CEMENTO-  
YESO-PUZOLANA” EN LA RESISTENCIA MECÁNICA**

---



## 7. INFLUENCIA DE ALGUNOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE MORTERO “CEMENTO-YESO-PUZOLANA” EN LA RESISTENCIA MECÁNICA

La diversidad de variaciones en el conglomerante, efectuadas en el [Capítulo 5](#), orientó al uso de la combinación “20/40/40” para cemento BL 52,5R y la combinación “20/50/30” para cemento BL 42,5R. Con el propósito de establecer la incidencia que tienen en la resistencia mecánica algunos parámetros de diseño en las mezclas de mortero de combinación “cemento/yeso/puzolana”, arbitrariamente se fija la combinación “20/50/30” como base del estudio, en la cual se procederá a variar fundamentalmente el tipo de cemento, el tipo de yeso y el tipo de ceniza volante. También, en el presente estudio se define relación “Agua/Conglomerante = 0,6”, constante, a fin de no utilizar superplastificante como otro parámetro en el diseño de las mezclas. Por tanto, los parámetros a considerar serán:

- **Tipo de Cemento:**
  - \* Tipo B. Blanco Tipo CEM II/B-LL 42,5R (Cemex)
  - \* Tipo A. Blanco Tipo CEM I 52,5R (Cemex)
  - \* Tipo C. Gris Tipo CEM II/A-L 42,5R (Valderrivas)
  - \* Tipo E. Gris Tipo CEM I 52,5R (Asland-Lafarge)
  
- **Tipo de Yeso:**
  - \* Yeso Grueso (yeso rápido Iberplast, tipo YG)
  - \* Escayola (tipo E-35, Iberplaco S.A.)
  
- **Tipo de Ceniza Volante:**
  - \* Ceniza Volante sin moler (original de Andorra)
  - \* Ceniza Volante molida (cv molida en molino de bolas)
  
- **Tipo de Curado:**
  - \* Curado en Bolsa (B)
  - \* Curado en Bolsa y Agua (B + A)

\* Curado a Ambiente de Laboratorio (AL); para lo cual se escogerá una serie, para curarla sin protección y expuesta al medio ambiente.

- **Edad de Ensayo:** \* 28 y 90 días

Se utiliza agua desionizada tanto en la elaboración de las mezclas como en el agua de inmersión para el curado (cuando corresponda). Como árido fino, se utiliza arena “Tipo A” que es una combinación de tres arenas silíceas de distinta granulometría, con la finalidad de disponer de un “Módulo de Finura” lo más cercano al “Módulo de Finura” de la arena Normsand, que es normalizada pero de muy alto coste. La cantidad de arena se fija en tres veces el peso del conglomerante seco.

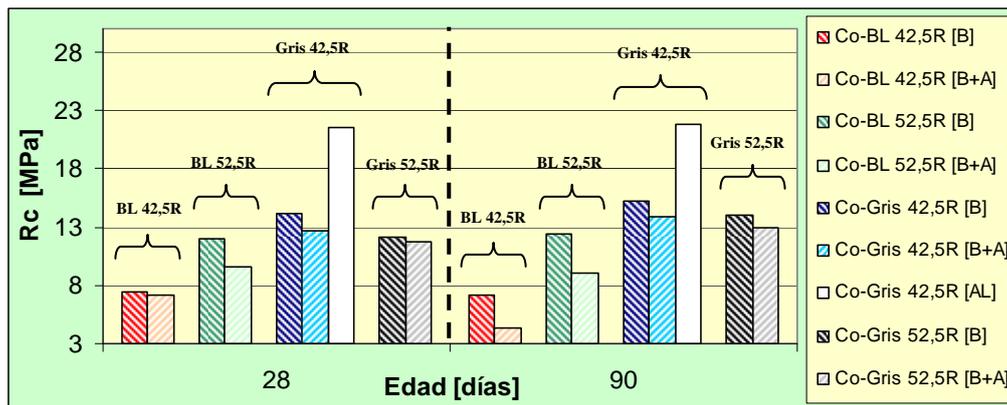
### 7.1. Morteros con Yeso Grueso

La **Tabla 7-1** muestra resultados experimentales de resistencia a compresión “Rc” y flexotracción “Rf” de morteros de cemento y yeso (control), sin ceniza volante y elaborados con distintos tipos de cemento. La proporción de cemento, complementa al yeso; de esta forma nos permitirá conocer la influencia de la puzolana cuando establezcamos las posteriores composiciones.

**Tabla 7-1. Mortero control “Cem/Yeso = 50/50”. Distintos cementos, distintos curados.**

Edad [días]	Tipo de Cemento	Tipo de curado	Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión
28	(B) BL 42,5 R	Bolsa	2,4	7,5
		Bolsa + Agua	1,2	7,1
28	(A) BL 52,5 R	Bolsa	1,5	12,0
		Bolsa + Agua	1,3	9,6
28	(C) Gris 42,5R	Bolsa	3,3	14,1
		Bolsa + Agua	2,5	12,6
		Ambiente Lab.	5,1	21,6
28	(E) Gris 52,5R	Bolsa	2,5	12,2
		Bolsa + Agua	2,2	11,7
90	(B) BL 42,5 R	Bolsa	0,7	7,1
		Bolsa + Agua	0,3	4,4
90	(A) BL 52,5 R	Bolsa	1,7	12,4
		Bolsa + Agua	1,1	9,0
90	(C) Gris 42,5R	Bolsa	3,4	15,2
		Bolsa + Agua	2,9	13,8
		Ambiente Lab.	4,5	21,9
90	(E) Gris 52,5R	Bolsa	2,8	14,0
		Bolsa + Agua	2,3	13,0

Los resultados de resistencia a compresión “Rc” se visualizan en **Fig. 7-1**, según indicación para mortero de control “Co”, para distintos cementos y distintos tipos de curado.



**Fig. 7-1. Rc vs Edad. Morteros Control “Cem/Yeso = 50/50”. Distintos Cem. y Curados. [B]: Bolsa; [B+A]: Bolsa y Agua; [AL]: Ambiente de laboratorio**

De **Fig. 7-1**, puede observarse que los cementos blancos a una misma edad, manifiestan diferencias de acuerdo a la clase resistente; es así que el cemento blanco 52,5R reporta mejor resistencia que el 42,5R, como era de esperar.

Las diferencias de comportamiento entre cementos blancos y grises, fundamentalmente a los 90 días de curado, es probablemente debido a la mayor presencia de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) en los cementos blancos frente a los cementos grises, lo que provocaría la mayor formación de compuestos expansivos.

Las probetas curadas al ambiente del laboratorio presentan a los 28 días de curado una pérdida de peso de un poco más de 7% (referido al peso de la probeta al desmoldar) y similar pérdida a los 90 días. Ello indicaría que la pérdida de peso está ocurriendo dentro de los primeros 28 días de edad y se debe a la evaporación de la humedad libre del mortero (ver control de peso en **Tabla B-1, Anexo B**).

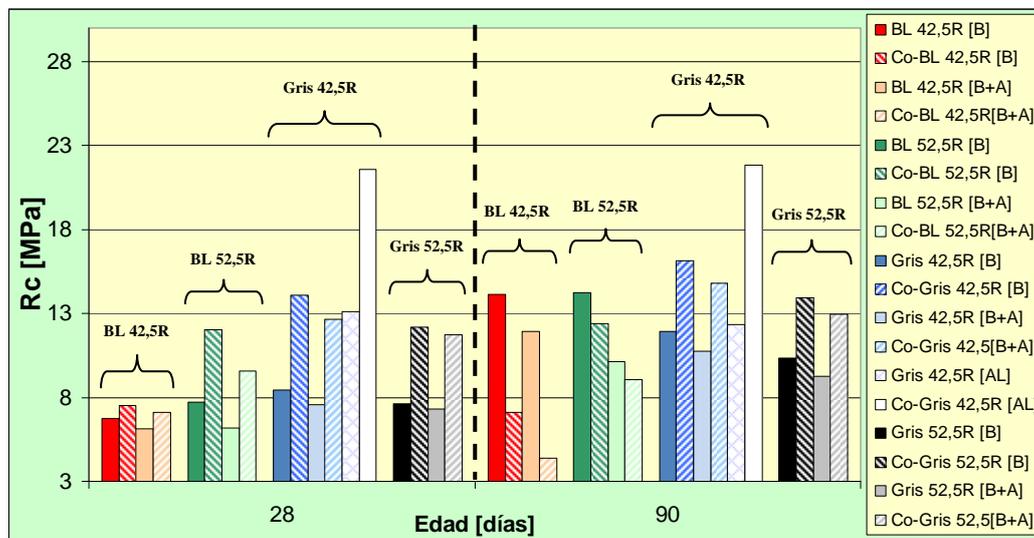
Como hecho curioso destacar, los elevados valores de “Rc” obtenidos en el caso de curado de las probetas al ambiente del laboratorio, que superan los 21 MPa, no observándose para este curado diferencia alguna entre los 28 y 90 días de edad. Este valor es significativamente mayor que las “Rc” obtenidas para las probetas del mismo tipo de cemento pero curadas en “Bolsa”. Esta gran diferencia de “Rc” pone de manifiesto que la humedad acentúa la incompatibilidad entre el yeso y el cemento y que para el caso, al perder rápidamente humedad se estaría reduciendo la formación de compuestos nocivos que reducen la resistencia mecánica.

A su vez, en **Tabla 7-2** se muestran resultados experimentales de resistencia a compresión y flexotracción de morteros con distintos tipos de cemento, con yeso y ceniza volante sin moler.

**Tabla 7-2.** Morteros “Cem/Yeso/CV = 20/50/30”. Distintos cementos, distintos curados.

Edad [días]	Tipo de Cemento	Tipo de curado	Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión
28	(B) BL 42,5 R	Bolsa	1,6	6,8
		Bolsa + Agua	1,3	6,1
28	(A) BL 52,5 R	Bolsa	1,8	7,7
		Bolsa + Agua	1,1	6,2
28	(C) Gris 42,5R	Bolsa	1,9	8,4
		Bolsa + Agua	1,6	7,6
		Ambiente Lab.	4,2	13,1
28	(E) Gris 52,5R	Bolsa	1,8	7,6
		Bolsa + Agua	1,5	7,3
90	(B) BL 42,5 R	Bolsa	3,4	14,1
		Bolsa + Agua	2,6	11,9
90	(A) BL 52,5 R	Bolsa	3,0	14,3
		Bolsa + Agua	1,7	10,2
90	(C) Gris 42,5R	Bolsa	3,0	12,0
		Bolsa + Agua	2,7	10,8
		Ambiente Lab.	4,3	12,3
90	(E) Gris 52,5R	Bolsa	2,2	10,3
		Bolsa + Agua	1,7	9,3

Los resultados de resistencia a compresión se visualizan en Fig. 7-2, en la cual se han superpuesto a los valores de **Tabla 7-2** anterior, los valores referenciales del mortero de control de **Tabla 7-1** (individualizados con el prefijo “Co”).



**Fig. 7-2.** Rc vs Edad. Morteros “Cem/Yeso/CV = 20/50/30”. Distintos Cementos y distintos curados.

[B]: Bolsa; [B+A]: Bolsa y Agua; [AL]: Ambiente de laboratorio

De **Fig. 7-2** se puede observar, que a los 28 días de curado, la “Rc” de la probeta de mortero de ésta combinación, utilizando cemento gris 42,5R y curada al ambiente del laboratorio (Gris 42,5R [AL]), supera en más del 50% a la “Rc” de su homóloga curada con protección de bolsa plástica (Gris 42,5R [B]); sin embargo a los 90 días de curado la probeta al ambiente del laboratorio no incrementa la “Rc” en mientras que la probeta curada en “Bolsa” se incrementa en mayor medida.

Las probetas de ésta combinación y curadas al ambiente del laboratorio, sufren una pérdida de peso durante los primeros 28 días de edad (ver control de peso en **Tabla B-2, Anexo B**), y ello se debe a la pérdida de humedad libre en el mortero, ocasionando que en probetas con este tipo de curado, los procesos de hidratación no se desarrollen completamente lo que justificaría que no hayan mejoras de resistencia o que estas disminuyan con la edad.

Estos hechos ponen de manifiesto, el papel crucial de la humedad frente a la evolución de la “Rc” debido a la reacción de hidratación y también a la reacción puzolánica que requeriría mayor tiempo para manifestarse.

Se observa que en general la “Rc” correspondiente a los morteros de control que contienen “cem/yeso = 50/50”, superan a los morteros de combinación “cem/yeso/cv = 20/50/30”. Esta diferencia es más acusada a los 28 días de curado. A los 90 días de curado, se observa un crecimiento significativo de la “Rc” más acusado en los morteros con CV, si bien la “Rc” de los morteros de control correspondientes fue superior a los morteros con CV en todos los casos salvo en los morteros que utilizan cemento BL 52,5R, en que los morteros con CV superan a los morteros de control.

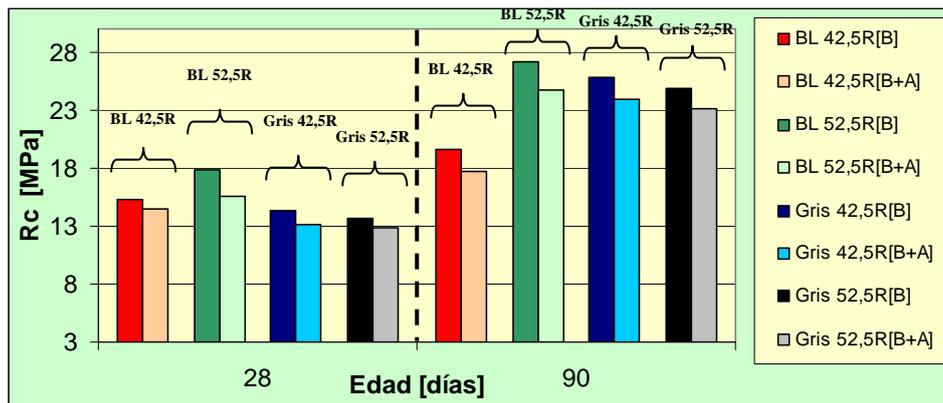
Este hecho fue probablemente debido a la mayor categoría resistente del cemento o a la mayor finura de molido.

También, en **Tabla 7-3** se muestran resultados experimentales de resistencia a compresión “Rc” y flexotracción “Rf” de morteros de cemento con yeso y ceniza volante molida.

**Tabla 7-3.** Morteros “Cem/Yeso/CV(m)=20/50/30”. Distintos cementos, diferentes curados.

Edad [días]	Tipo de Cemento	Tipo de curado	Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión
28	(B) BL 42,5 R	Bolsa	3,9	15,2
		Bolsa + Agua	3,2	14,5
28	(A) BL 52,5 R	Bolsa	4,1	17,9
		Bolsa + Agua	3,0	15,6
28	(C) Gris 42,5R	Bolsa	3,1	14,3
		Bolsa + Agua	2,2	13,2
28	(E) Gris 52,5R	Bolsa	3,2	13,7
		Bolsa + Agua	2,5	12,9
90	(B) BL 42,5 R	Bolsa	4,1	19,6
		Bolsa + Agua	3,6	17,7
90	(A) BL 52,5 R	Bolsa	5,4	27,2
		Bolsa + Agua	4,5	24,7
90	(C) Gris 42,5R	Bolsa	5,6	25,8
		Bolsa + Agua	4,8	24,0
90	(E) Gris 52,5R	Bolsa	5,0	24,9
		Bolsa + Agua	4,6	23,1

Los resultados de resistencia a compresión se visualizan en **Fig. 7-3**, para distintos cementos y distintos tipos de curado.



**Fig. 7-3.** Rc vs Edad. Morteros “Cem/Yeso/CV(m) = 20/50/30”. Distintos Cem. y diferentes curados

De **Fig. 7-3** puede observarse la evolución de la “Rc” con el tiempo de curado, destacando un crecimiento de la “Rc” con la edad de curado, para cada tipo de cemento utilizado. Comparando estos resultados con los anteriores (ceniza volante sin moler), puede destacarse lo siguiente.

En morteros con ceniza volante (sin moler o molida), la resistencia “Rc” crece con la edad de curado, para todos los casos en que el curado se efectúa bajo altas

condiciones de humedad. La excepción a esta regla la proporciona la serie curada en ambiente de laboratorio.

La resistencia “Rc” de los morteros con ceniza volante molida es superior a los morteros con ceniza volante sin moler, lo que demuestra que reactividad puzolánica aumenta conforme se reduce el tamaño de partículas.

A los 28 días de curado, para una misma puzolana (ya sea ceniza volante sin moler o molida), los morteros no presentan diferencias sustanciales de “Rc” entre distintos cementos utilizados. Cuando se utiliza ceniza volante sin moler, los cementos grises reportan una leve mejor resistencia que los blancos. Caso contrario ocurre cuando se utiliza ceniza volante molida, en donde los cementos blancos reportan una leve mejor resistencia que los grises.

A los 90 días de curado, las diferencias entre los cementos se manifiestan según la reactividad que van teniendo con la puzolana utilizada. De hecho, cuando la puzolana no es altamente reactiva (ceniza volante sin moler), no se aprecian diferencias notables entre ambos cementos blancos y entre ambos cementos grises, aunque en general los blancos, proporcionan mejores resistencias que los cementos grises. Pero cuando la puzolana es más reactiva, como la ceniza volante molida, el cemento blanco de 42,5R reporta una ganancia un poco mayor al 40% de la resistencia que tiene su homóloga a los 90 días confeccionada con ceniza volante sin moler. En cambio, los otros cementos reportan ganancias de más del 100% respecto a aquellas con ceniza volante sin moler. Es claro entonces, que la reactividad puzolánica depende del tipo de cemento utilizado.

En una comparación general, puede decirse lo siguiente.

- La resistencia de los morteros curados bajo agua es menor a los curados en bolsa, para todos los correspondientes casos estudiados, lo que indicaría, una disolución parcial de la matriz conglomerante.
- La alta resistencia que muestran los morteros control curados al ambiente del laboratorio respecto de los morteros con puzolana, de similar curado, al parecer, se debe al aporte que hace el contenido de cemento en el conglomerante, ya que la escasa humedad no afecta de manera significativa a la matriz conglomerante.
- En los morteros con ceniza volante, los cementos blancos reaccionan más tempranamente con la ceniza volante molida lo que se manifiesta en una ganancia notable de resistencia a los 28 días respecto al uso de ceniza volante sin moler. En cambio, el cemento gris reacciona más tardíamente y las mejoras notables en resistencia se manifiestan a los 90 días respecto al uso de ceniza sin moler.
- El uso de ceniza volante molida mejora de forma muy significativa la “Rc”, con respecto a la ceniza volante original, para ambos tipos de curado.

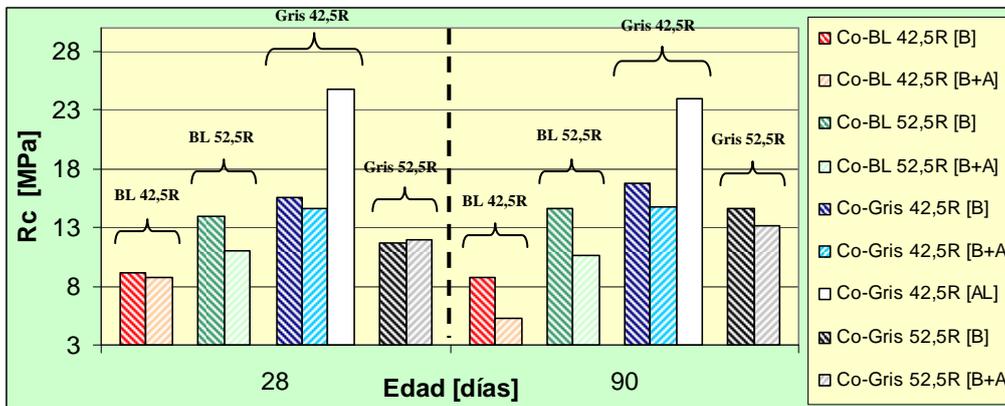
7.2. Morteros con Escayola

La **Tabla 7-4** muestra resultados experimentales de “Rc” y “Rf” de morteros control con escayola, sin ceniza volante y elaborados con distintos cementos. La proporción de cemento, complementa la proporción fija de escayola.

**Tabla 7-4. Morteros “Cem/Escayola = 50/50”. Distintos cementos, diferentes curados.**

Edad [días]	Tipo de Cemento	Tipo de curado	Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión
28	(B) BL 42,5 R	Bolsa	2,0	9,2
		Bolsa + Agua	1,5	8,7
28	(A) BL 52,5 R	Bolsa	2,7	14,0
		Bolsa + Agua	1,7	11,0
28	(C) Gris 42,5R	Bolsa	3,7	15,6
		Bolsa + Agua	2,9	14,6
		Ambiente Lab.	5,4	24,8
28	(E) Gris 52,5R	Bolsa	2,6	11,7
		Bolsa + Agua	2,3	11,9
90	(B) BL 42,5 R	Bolsa	1,8	8,7
		Bolsa + Agua	0,5	5,3
90	(A) BL 52,5 R	Bolsa	2,6	14,6
		Bolsa + Agua	1,3	10,6
90	(C) Gris 42,5R	Bolsa	3,4	16,7
		Bolsa + Agua	3,1	14,8
		Ambiente Lab.	6,4	24,0
90	(E) Gris 52,5R	Bolsa	3,0	14,6
		Bolsa + Agua	2,3	13,2

Los resultados de resistencia a compresión “Rc” se visualizan en **Fig. 7-4**, según indicación para mortero de control “Co”, para distintos cementos y distintos tipos de curado.



**Fig. 7-4. Rc vs Edad. Morteros Control “Cem/Escayola = 50/50”. Distintos Cem. y diferentes curados.**

[B]: Bolsa; [B+A]: Bolsa y Agua; [AL]: Ambiente de laboratorio

De **Fig. 7-4**, puede observarse que el comportamiento tanto de los cementos blancos como de los cementos grises, es similar a lo observado y descrito para el comportamiento del mortero control “cem/yeso”, del apartado **7-1**.

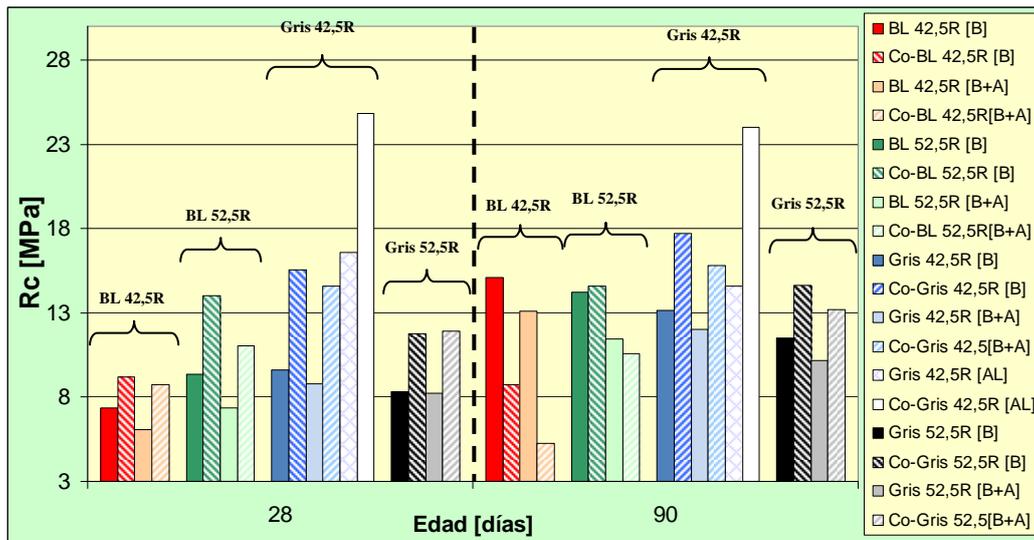
La serie curada en ambiente de laboratorio reporta a 28 días una mejora de casi el 60% de la resistencia de la serie homóloga curada bajo protección de bolsa plástica; sin embargo a los 90 días esta diferencia es solo del 43%, manteniéndose casi sin mejoras de resistencia respecto a la misma (curado ambiente de laboratorio) a los 28 días.

En **Tabla 7-5** se muestran resultados experimentales de resistencia a compresión y flexotracción de morteros de cemento con escayola y ceniza volante sin moler.

**Tabla 7-5. Morteros “Cem/Escayola/CV = 20/50/30”. Distintos cementos, diferentes curados.**

Edad [días]	Tipo de Cemento	Tipo de curado	Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión
28	(B) BL 42,5 R	Bolsa	1,8	7,4
		Bolsa + Agua	1,2	6,1
28	(A) BL 52,5 R	Bolsa	2,1	9,3
		Bolsa + Agua	1,1	7,4
28	(C) Gris 42,5R	Bolsa	2,0	9,6
		Bolsa + Agua	1,4	8,8
		Ambiente Lab.	5,3	16,6
28	(E) Gris 52,5R	Bolsa	1,8	8,3
		Bolsa + Agua	1,7	8,2
90	(B) BL 42,5 R	Bolsa	3,5	15,1
		Bolsa + Agua	2,5	13,1
90	(A) BL 52,5 R	Bolsa	3,1	14,2
		Bolsa + Agua	1,7	11,4
90	(C) Gris 42,5R	Bolsa	3,1	13,1
		Bolsa + Agua	2,4	12,0
		Ambiente Lab.	4,9	14,6
90	(E) Gris 52,5R	Bolsa	2,6	11,5
		Bolsa + Agua	1,9	10,2

Los resultados de resistencia a compresión se visualizan en **Fig. 7-5**, en la cual se han superpuesto a los valores de **Tabla 7-5** anterior (para distintos cementos y distintos curados), los valores referenciales del mortero de control de **Tabla 7-4** (individualizados con el prefijo “Co”).



**Fig. 7-5. Rc vs Edad. Morteros “Cem-Escayola-CV = 20-50-30”. Distintos Cem. y Curados**

De **Fig. 7-5** se puede observar, que a los 28 días de curado, la “Rc” de la probeta de mortero de ésta combinación, utilizando cemento gris 42,5R y curada al ambiente del laboratorio (Gris 42,5R [AL]), supera en más del 70% a la “Rc” de su homóloga curada con protección de bolsa plástica (Gris 42,5R [B]); sin embargo a los 90 días de curado la probeta al ambiente del laboratorio ha disminuido la “Rc” en mientras que la probeta curada en “Bolsa” se incrementa reduciendo la diferencia a poco más del 10%.

Observando los datos tabulados en **Tabla B-5 del Anexo B**, puede desprenderse que las probetas curadas al ambiente del laboratorio también sufren una pérdida de peso durante los primeros 28 días de edad, al igual que lo reportado para las probetas de mortero “cemento/yeso/CV” del apartado **7.1** anterior.

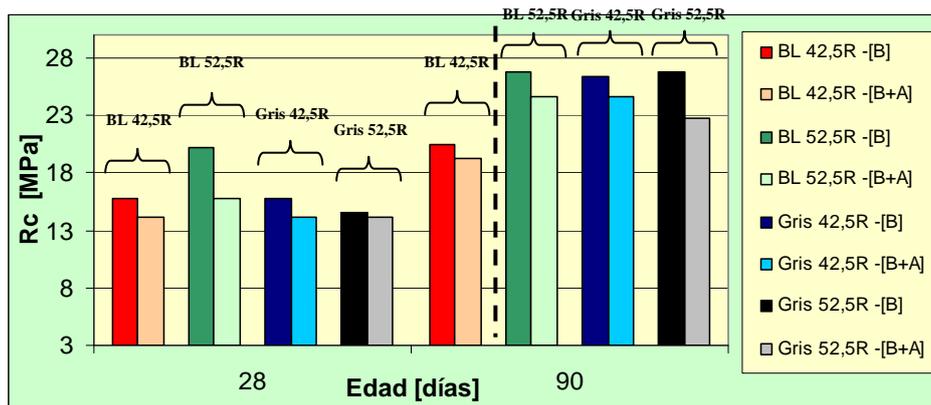
Si comparamos los resultados de “Rc” obtenidos con yeso en lugar de escayola, presentada en **Fig. 7-2** anterior, se puede concluir que los morteros con escayola presentan un comportamiento muy parecido a los morteros con yeso.

También, en **Tabla 7-6** se muestran resultados experimentales de resistencia a compresión y flexotracción de morteros de cemento con escayola y ceniza volante molida.

**Tabla 7-6.** Morteros “Cem/Escayola/CV(m) = 20/50/30”. Distintos cementos, diferentes curados.

Edad [días]	Tipo de Cemento	Tipo de curado	Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión
28	(B) BL 42,5 R	Bolsa	4,3	15,8
		Bolsa + Agua	3,3	14,2
28	(A) BL 52,5 R	Bolsa	4,4	20,2
		Bolsa + Agua	3,0	15,8
28	(C) Gris 42,5R	Bolsa	3,3	15,7
		Bolsa + Agua	2,4	14,2
28	(E) Gris 52,5R	Bolsa	3,4	14,5
		Bolsa + Agua	2,6	14,2
90	(B) BL 42,5 R	Bolsa	4,2	20,5
		Bolsa + Agua	4,0	19,3
90	(A) BL 52,5 R	Bolsa	5,7	26,7
		Bolsa + Agua	4,8	24,6
90	(C) Gris 42,5R	Bolsa	5,5	26,4
		Bolsa + Agua	4,5	24,6
90	(E) Gris 52,5R	Bolsa	5,4	26,7
		Bolsa + Agua	4,5	22,8

Los resultados de resistencia a compresión “Rc” se visualizan en **Fig. 7-6**.



**Fig. 7-6.** Rc vs Edad. Morteros “Cem/Escayola/CV(m) = 20/50/30”.Distintos Cementos y Curados.

De **Fig. 7-6** puede observarse la evolución de la “Rc” con el tiempo de curado, es similar a la observada para la mezcla de mortero “cemento/yeso/CV(m)” del apartado **7.1** anterior. Comparando estos resultados con los anteriores (con escayola y ceniza volante sin moler), también son válidas las consideraciones expuestas para la mezcla de mortero “cemento/yeso/CV(m)” del apartado **7.1** anterior.

En una comparación general, puede decirse lo siguiente.

- La resistencia de los morteros curados bajo agua es menor a los curados en bolsa, para todos los correspondientes casos estudiados, lo que indicaría, la disolución parcial de la matriz conglomerante.
- La alta resistencia que muestran los morteros control curados al ambiente del laboratorio respecto de los morteros con puzolana, de similar curado, al parecer, se debe al aporte que hace el contenido de cemento en el conglomerante, ya que la escasa humedad no afecta completamente la disolución del yeso en la matriz conglomerante. Sin embargo, esta escasa humedad también afecta la hidratación de los compuestos cementicios, razón por la cual, la “Rc” tiende a estabilizarse o disminuir con la edad.
- En los morteros con ceniza volante (sin moler o molida), los cementos blancos reaccionan más tempranamente con la ceniza volante molida lo que se manifiesta en una ganancia notable de resistencia a los 28 días respecto al uso de ceniza volante sin moler. En cambio, el cemento gris reacciona más tardíamente y las mejoras en resistencia, con uso de ceniza volante molida, se manifiestan notablemente a los 90 días respecto al uso de ceniza sin moler.
- En general, los morteros con yeso presentan un comportamiento muy parecido a los morteros con escayola, si bien los morteros con escayola presentan una “Rc” ligeramente superior.
- El uso de ceniza volante molida proporciona una “Rc” significativamente superior respecto a los morteros con ceniza volante original. La mayor finura de la ceniza volante molida disminuye las diferencias en la “Rc” entre los morteros con yeso y escayola haciéndolos similares.

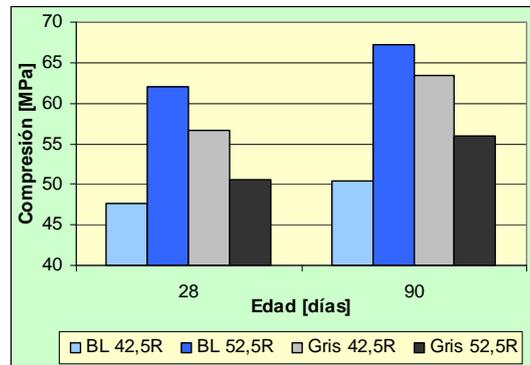
### 7.3. Mortero de Control del cemento.

En **Tabla 7-7** se muestran resultados experimentales de control cemento en morteros elaborados conforme a los procedimientos de la norma UNE-EN 196-1 [72].

**Tabla 7-7. Mortero de Control. “Cemento 100%”. “Agua/Conglomerante = 0,5”.**

Edad [días]	Tipo Cemento	Tipo de curado	Resistencia [MPa]	
			Flexotracc.	Compresión
28	(B) BL 42,5 R	bajo agua	6,8	47,6
28	(A) BL 52,5 R	bajo agua	8,3	62,0
28	(C) Gris 42,5R	bajo agua	7,7	56,7
28	(E) Gris 52,5R	bajo agua	7,4	50,5
90	(B) BL 42,5 R	bajo agua	7,3	50,5
90	(A) BL 52,5 R	bajo agua	9,4	67,2
90	(C) Gris 42,5R	bajo agua	8,4	63,3
90	(E) Gris 52,5R	bajo agua	7,4	56,0

Los resultados de resistencia a compresión “Rc” se visualizan en **Fig. 7-7**.



**Fig. 7-7. Rc vs Edad. Morteros “Control Cemento”. “Agua/Conglomerante = 0,5”. Curado bajo agua.**

Nótese el alto valor de resistencia a los 28 días de edad del cemento gris 42,5R, que incluso supera al cemento gris 52,5R. Ante consultas al fabricante, informa que corresponde a un cemento que se expende como CEM II/A-L 42,5R con un control de producción que arroja una media de 55,9 MPa a los 28 días y en muestras de contrastes se obtiene una media de 56,4 MPa, lo que es compatible con los 56,7 MPa obtenidos en las presentes experiencias.

Este alto resultado de resistencia puede ser la razón, que en los morteros anteriores, con cemento, yeso (escayola) y puzolana (ceniza volante sin moler y molida), que utilizaron “cemento gris 42,5R”, la “Rc” resultó similar o superior a la “Rc” de su homóloga con “cemento gris 52,5R”.



---

**Capítulo 8. BÚSQUEDA DE LA COMPOSICIÓN  
ÓPTIMA DEL CONGLOMERANTE EN MEZCLAS DE  
MORTERO “CEMENTO-YESO-PUZOLANA” PARA  
MEJORAR LA RESISTENCIA MECÁNICA**

---



## 8. BÚSQUEDA DE LA COMPOSICION ÓPTIMA DEL CONGLOMERANTE EN MEZCLAS DE MORTERO “CEMENTO-YESO-PUZOLANA” PARA MEJORAR LA RESISTENCIA MECÁNICA

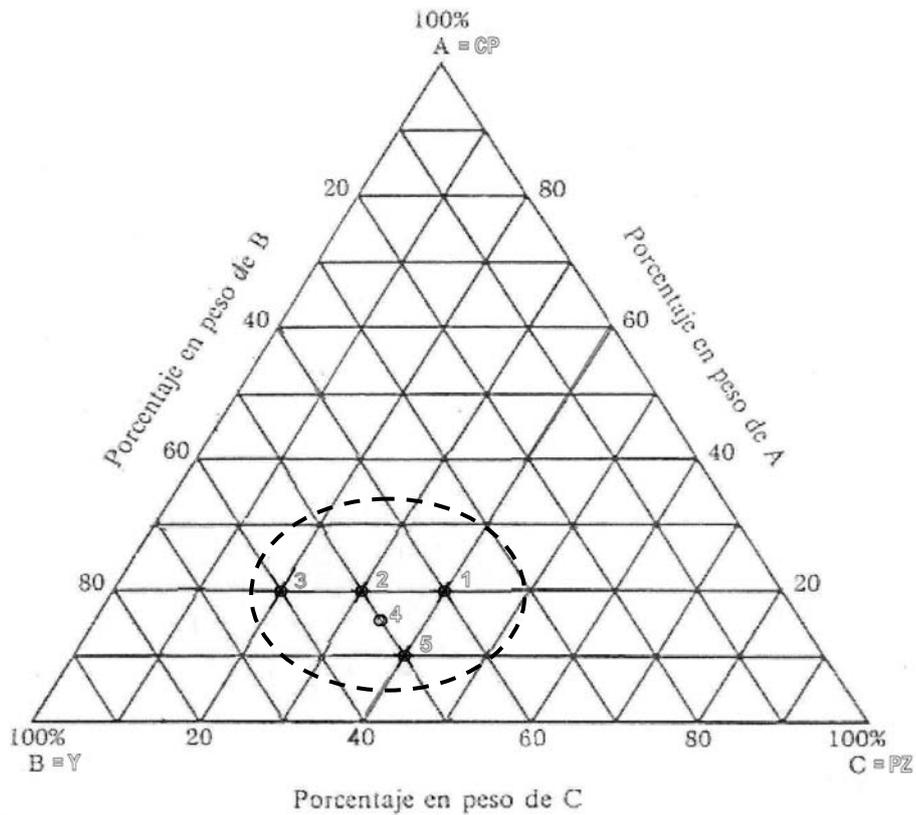
Hasta aquí se han variado las relaciones “Agua/Conglomerante” para distintas composiciones del “Conglomerante”, comparando el uso de una adición activa (CV) con otra inerte (FC) y el consecuente comportamiento en lo que a resistencia mecánica se refiere, para morteros elaborados con cemento blanco ([Capítulo 5](#)). También se ha visto la influencia en la resistencia mecánica de algunos parámetros como el uso de distintos tipos de cemento, distintos tipos de yeso, distintas cenizas volantes y distintas condiciones de curado ([Capítulo 7](#)) manteniendo fija la relación “Agua/Conglomerante” y la composición del “Conglomerante”; en esta oportunidad, se tratará de optimizar el “Conglomerante” variando la composición de sus componentes y manteniendo fijos los demás parámetros de diseño de la mezcla.

Se trabajará en una zona del diagrama de fases ternario y se escogerán algunos puntos específicos, procurando que la proporción de cemento esté comprendida entre 10-20%, el yeso entre 60-40% y la puzolana entre 20-40%, con el objeto de conseguir una mezcla de buena resistencia mecánica y también de mantener vigente la expectativa económica de bajo coste económico y ecológico, que se traduciría en una mezcla con poco cemento y mayores cantidades de yeso y puzolana.

De acuerdo con lo anterior y fijando las necesidades autoimpuestas, en el diagrama de fases ternario que se representa en [Fig. 8-1](#), es posible establecer a priori las siguientes proporciones para el “Conglomerante”.

- Composición 1:      cem/yeso/pz = 20/40/40
- Composición 2:      cem/yeso/pz = 20/50/30

- Composición 3:      cem/yeso/pz = 20/60/20
- Composición 4:      cem/yeso/pz = 15/50/35
- Composición 5:      cem/yeso/pz = 10/50/40



**Fig. 8-1. Diagrama de fase ternario. Puntos singulares de composición del Conglomerante**

Fijadas las proporciones, los morteros se diseñarán de acuerdo a las siguientes condiciones adicionales:

- **se utilizará un solo tipo de cemento:** Portland Gris CEM I 52,5R. ("Tipo G", apartado 3.1.1 del Capítulo 3)

- **se utilizará un solo tipo de yeso:** Yeso Grueso (Yeso Rápido Iberplast, apartado **3.1.3, Capítulo 3**)
- **Puzolana:** CV(sin moler) y CV(molida); suministrada por la Central termoeléctrica de Andorra-Teruel (apartado **3.1.4, Capítulo 3**)
- **Razón “Agua/Conglomerante”:** Fija (constante) en “0,6”
- **Aditivo:** 1% Melment L240 (apartado **3.1.7, Capítulo 3**)
- **Edad al ensayar:** 28, 90 y 180 días
- **Condiciones de Curado:** “Bolsa” y “Bolsa + Agua”

Adicionalmente, se especifica utilizar Arena Tipo A cómo árido fino, con un módulo de finura de 3,22. El agua utilizada en todos los casos (amasado y curado), fue agua desionizada.

Todos los morteros seguirán el procedimiento de preparación indicado en “apartado **3.3.1, del Capítulo 3**”. A las probetas se les registra el peso y la longitud (con pie de rey) en las siguientes ocasiones: al desmoldar y limpiar, al finalizar el curado en bolsa y al finalizar el curado bajo agua, según corresponda. Los registros de estos controles se encuentran tabulados en el Anexo C.

Luego de los ensayos de resistencia (flexotracción y compresión), un fragmento de aproximadamente 50 g de mortero de cada serie, se tritura de forma manual hasta al canzar un tamaño inferior a 2 mm para someterlo a secado en estufa a 60°C durante  $24 \pm 2$  horas y luego, se ensaya en la “Balanza de Halógenos” a 200°C para la medición del agua combinada.

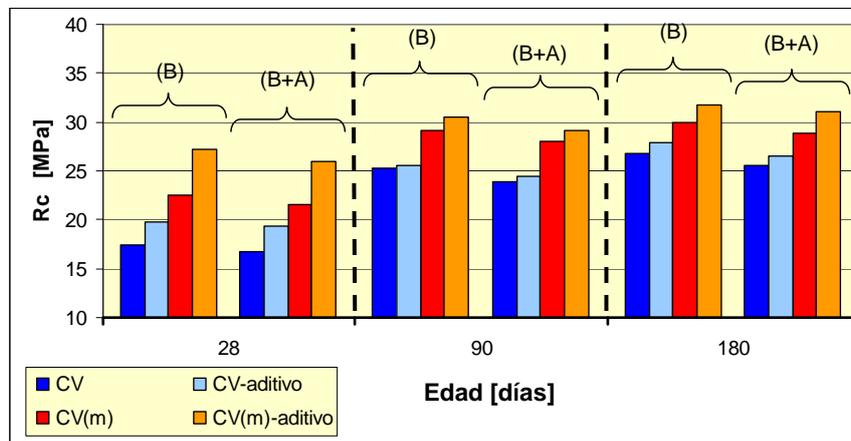
### 8.1 Morteros de Composición 1. “Cemento gris CEM I 52,5R/Yeso/Pz = 20/40/40”

En **Tabla 8-1** se muestran resultados experimentales de morteros para la composición 1, con distinto curado, utilizando ceniza volante sin moler “CV” y ceniza volante molida “CV(m)”, con y sin aditivo superplastificante, para tres edades de curado mencionadas (28, 90 y 180 días).

**Tabla 8-1.** Resistencia a flexotracción y compresión. Agua combinada en morteros medida en B.H. “Cem Gris 52,5R/Yeso/Pz = 20/40/40”. Con y sin aditivo.

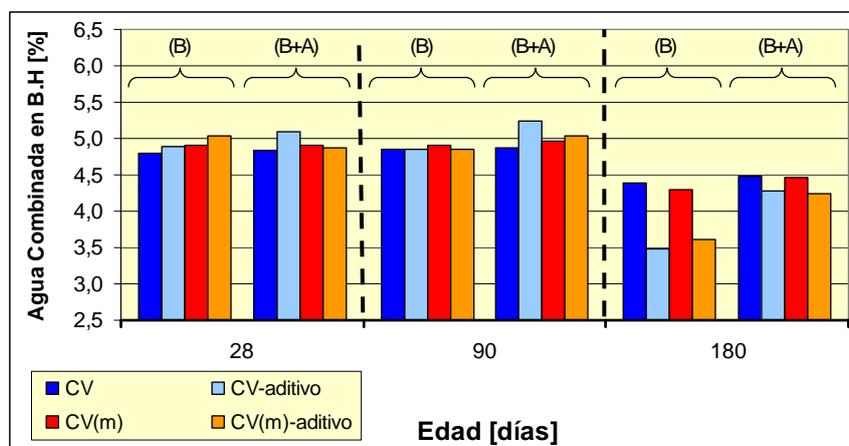
Pz	Adit.	Curado	Edad	Resistencia [MPa]		B.H.(200°C)
			[días]	Flexotracc.	Compresión	[%]
CV	no	B	28	4,3	17,4	4,79
			90	5,4	25,3	4,85
			180	6,1	26,8	4,38
CV	si	B	28	4,5	19,8	4,89
			90	5,8	25,5	4,85
			180	6,2	27,9	3,49
CV	no	B + A	28	3,4	16,7	4,84
			90	4,8	23,9	4,87
			180	5,5	25,5	4,49
CV	si	B + A	28	3,8	19,4	5,09
			90	5,2	24,5	5,24
			180	5,7	26,5	4,28
CV(m)	no	B	28	5,3	22,5	4,91
			90	5,7	29,1	4,90
			180	6,0	30,0	4,30
CV(m)	si	B	28	6,0	27,1	5,03
			90	6,3	30,5	4,86
			180	6,4	31,8	3,61
CV(m)	no	B + A	28	4,6	21,5	4,91
			90	5,2	28,0	4,96
			180	5,5	28,9	4,47
CV(m)	si	B + A	28	5,7	25,9	4,87
			90	5,8	29,1	5,03
			180	6,3	31,0	4,25

Los resultados de resistencia a compresión se visualizan en Fig. 8-2.



**Fig. 8-2.** Rc vs Edad. Morteros “Cem Gris 52,5R/yeso/Pz = 20/40/40”, con y sin aditivo. Distintos curados.

Los resultados de porcentaje de agua combinada en la mezcla de mortero medida en Balanza de Halógenos, se muestran en [Fig. 8-3](#).



**Fig. 8-3. Pérdida agua combinada vs Edad. Morteros “Cem Gris 52,5R/yeso/Pz =20/40/40”, con y sin aditivo. Distintos curados.**

En [Fig. 8-2](#) se representa la “Rc” frente al tiempo de curado para morteros con CV y CV(m) y también para morteros con y sin aditivo. En primer lugar se observa un aumento de la “Rc” conforme aumenta el tiempo de curado. Este aumento es mucho más acusado entre los 28 y 90 días de curado poniendo de manifiesto el carácter puzolánico de la CV. También se observa mayores “Rc” para las probetas que contienen CV(m) debido a la mayor reactividad como consecuencia del menor tamaño de partícula, dicho que se recoge de los investigadores Payá et al [87], quienes demuestran que la molienda de la CV es un tratamiento eficaz para mejorar la resistencia a la compresión de los morteros que contienen las cenizas volantes.

La comparación de las condiciones de curado ponen de manifiesto que el curado en “Bolsa” presenta valores ligeramente superiores al curado en “Bolsa + Agua”, si bien estas diferencias son muy pequeñas, lo que indica el buen comportamiento de la matriz “cemento/yeso/puzolana” en contacto con el agua. Este comportamiento se vería corroborado por los bajos valores de expansión medidos en principio con pie de rey a estas probetas, y que se estudian más exhaustivamente en los próximos capítulos.

Los datos obtenidos muestran en general la influencia benéfica del uso de aditivo, al mejorar la influencia de los resultados de resistencia a compresión.

Al sumergir las probetas, es de esperar que el agua penetre la masa del mortero y se deposite en los huecos o poros libres, por lo que el aumento de peso que muestran las probetas, de alguna forma es un indicador del “índice de poros”. Si bien este valor no ha sido medido en el presente estudio, el control de peso (ver [Tabla C-1](#) en el [AnexoC](#)) refleja que en general las probetas con CV(m)

presentan un incremento porcentual de peso menor que las probetas con CV. Al parecer, las probetas con CV(m), reportan mas estanqueidad (menos poros) que las homólogas con CV, hecho que está de acuerdo con el menor tamaño y el mayor carácter puzolánico de las CV(m).

Por lo general, la perdida de agua combinada en el mortero, que se muestra en la **Fig. 8-3**, aumenta levemente con la edad de curado hasta los 90 días, pero a 180 días, hay una disminución significativa de esta perdida, sobre todo cuando se utiliza aditivo superplastificante. Esta variación en la pérdida de agua combinada con la edad, es muy similar a los resultados experimentales obtenidos en el **Capítulo 6**, sobre todo en la disminución que se registra a tardía edad (180 días). De este modo, el análisis que justifica estas perdidas también es similar a lo expuesto pertinentemente en el apartado **6.2.1**.

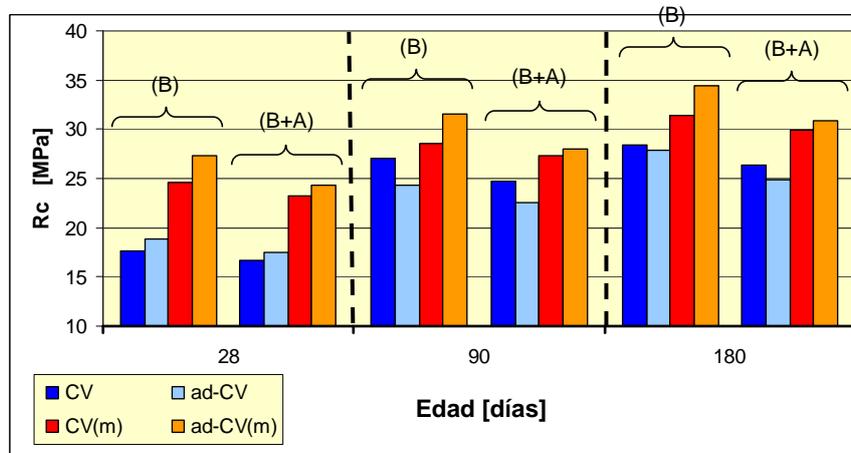
## 8.2 Morteros de Composición 2. “Cemento gris CEM I 52,5R/Yeso/Pz = 20/50/30”

En **Tabla 8-2** se muestran resultados experimentales para la composición 2, utilizando ceniza volante sin moler “CV” y ceniza volante molida “CV(m)”, con y sin aditivo superplastificante y ensayados a las edades de 28, 90 y 180 días.

**Tabla 8-2.** “Rf”, “Rc” y agua combinada en morteros medida en B.H. “Cem Gris CEM I 52,5R/Yeso/Pz = 20/50/30”. Con y sin aditivo.

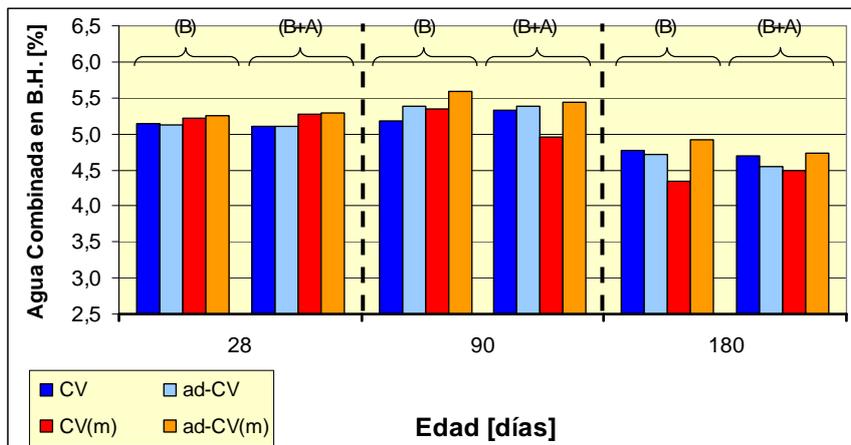
Pz	Adit.	Curado	Edad	Resistencia [MPa]		B.H.(200°C)
			[días]	Flexotracc.	Compresión	[%]
CV	no	B	28	4,1	17,7	5,14
			90	5,7	27,0	5,17
			180	6,1	28,4	4,77
CV	si	B	28	4,4	18,9	5,13
			90	5,7	24,4	5,38
			180	5,6	27,9	4,72
CV	no	B + A	28	3,3	16,7	5,11
			90	5,0	24,8	5,33
			180	5,8	26,4	4,70
CV	si	B + A	28	3,3	17,5	5,10
			90	5,0	22,5	5,38
			180	5,2	24,9	4,54
CV(m)	no	B	28	5,4	24,5	5,22
			90	5,5	28,5	5,35
			180	6,7	31,4	4,34
CV(m)	si	B	28	5,9	27,4	5,26
			90	7,2	31,5	5,58
			180	7,2	34,4	4,92
CV(m)	no	B + A	28	4,7	23,3	5,28
			90	4,9	27,3	4,96
			180	5,7	29,9	4,50
CV(m)	si	B + A	28	5,3	24,4	5,30
			90	6,0	28,0	5,44
			180	5,8	30,9	4,74

Los resultados de resistencia a compresión se visualizan en **Fig. 8-4**.



**Fig. 8-4.** Rc vs Edad. Morteros “Cem Gris 52,5R/yeso/Pz = 20/50/30”, con y sin aditivo. Distintos curados.

Los resultados de pérdida de peso, por pérdida de agua combinada en la mezcla de mortero medida en Balanza de Halógenos, se muestran en **Fig. 8-5**.



**Fig. 8-5.** Pérdida agua combinada vs Edad. Morteros “Cem Gris 52,5R/yeso/Pz = 20/50/30”, con y sin aditivo. Distintos curados.

De la observación de los resultados experimentales para la composición 2 (ver **Tabla 8-2**, **Tabla C-2 (Anexo C)**, **Fig. 8-4** y **Fig. 8-5**), es posible concluir que en general, no se observan diferencias significativas con la dosificación

20/40/40 (ver Fig. 8-2 y Fig. 8-3), aunque el uso de CV(m) representa una mejor reactividad puzolánica a edad tardía de curado en los mortero “20/50/30” que los “20/40/40”.

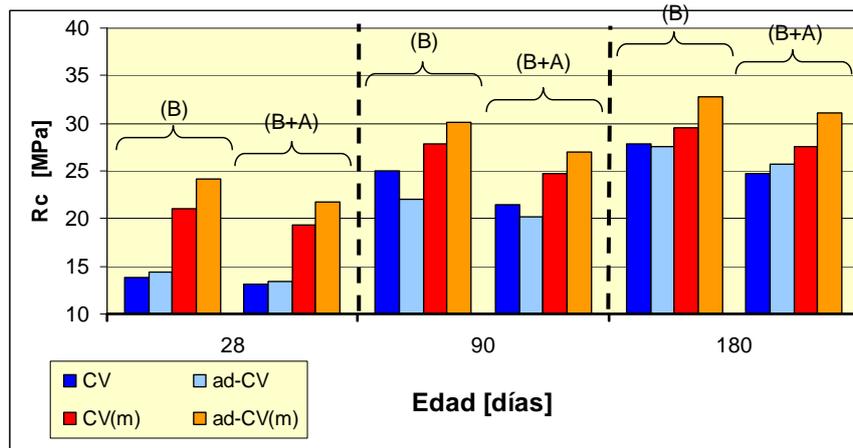
**8.3 Morteros de Composición 3. “Cemento gris CEM I 52,5R/Yeso/Pz = 20/60/20”**

En **Tabla 8-3** se muestran resultados experimentales de morteros para la combinación 3 del Conglomerante, con distinto curado, utilizando ceniza volante sin moler “CV” y ceniza volante molida “CV(m)”, con y sin aditivo superplastificante y ensayados a 28, 90 y 180 días.

**Tabla 8-3. Resistencia a flexotracción y compresión. Agua combinada en morteros medida en B.H. “Cem Gris 52,5R/Yeso/Pz = 20/60/20”. Con y sin aditivo.**

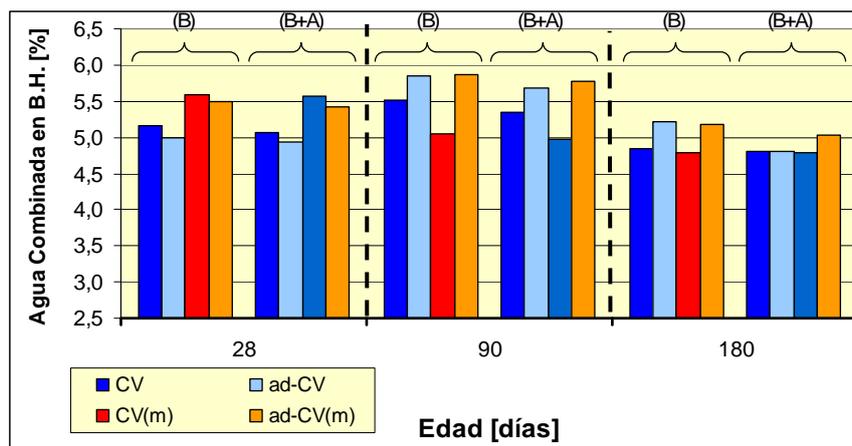
Pz	Adit.	Curado	Edad [días]	Resistencia [MPa]		B.H.(200°C) [%]
				Flexotracc.	Compresión	
CV	no	Bolsa	28	3,1	13,8	5,16
			90	6,1	25,0	5,51
			180	5,9	27,8	4,85
CV	si	B	28	3,3	14,4	5,00
			90	4,7	22,0	5,84
			180	4,7	27,5	5,22
CV	no	B + A	28	2,3	13,2	5,06
			90	3,7	21,5	5,34
			180	4,8	24,7	4,80
CV	si	B + A	28	2,8	13,4	4,93
			90	3,8	20,1	5,68
			180	4,6	25,7	4,80
CV(m)	no	B	28	4,6	21,0	5,59
			90	6,5	27,8	5,05
			180	6,3	29,5	4,78
CV(m)	si	B	28	4,4	24,2	5,49
			90	6,4	30,1	5,87
			180	6,8	32,8	5,18
CV(m)	no	B + A	28	3,5	19,3	5,57
			90	5,3	24,7	4,97
			180	5,3	27,6	4,79
CV(m)	si	B + A	28	4,0	21,7	5,42
			90	5,5	27,0	5,78
			180	6,2	31,1	5,03

Los resultados de resistencia a compresión “Rc” se visualizan en **Fig. 8-6**.



**Fig. 8-6.** Rc vs Edad. Morteros “Cem Gris 52,5R/yeso/Pz = 20/60/20”, con y sin aditivo. Distintos curados.

Los resultados de pérdida de peso, por pérdida de agua combinada en la mezcla medida en Balanza de Halógenos, se muestran en Fig. 8-7.



**Fig. 8-7.** Pérdida agua combinada vs Edad. Morteros “Cem Gris 52,5R/yeso/Pz = 20/60/20”, con y sin aditivo. Distintos curados.

De la observación de los resultados experimentales para la composición 3 (ver [Tabla 8-3](#), [Tabla C-3 \(Anexo C\)](#), [Fig. 8-6](#) y [Fig. 8-7](#)), se constata que, las tendencias generales observadas con similares a los morteros de composición 1 (apartado [8.1](#)) y composición 2 (apartado [8.2](#)). Sin embargo una excepción se

destaca para el mortero con CV(m), cuya pérdida de agua combinada se reduce a los 90 días respecto a los 28 días. Esto ocurre, muy probablemente, por la mayor reactividad puzolánica, que hace que se anticipe la formación de productos de hidratación y por ende, se esté anticipando la reducción de pérdida de agua combinada típica acusada a tardía edad.

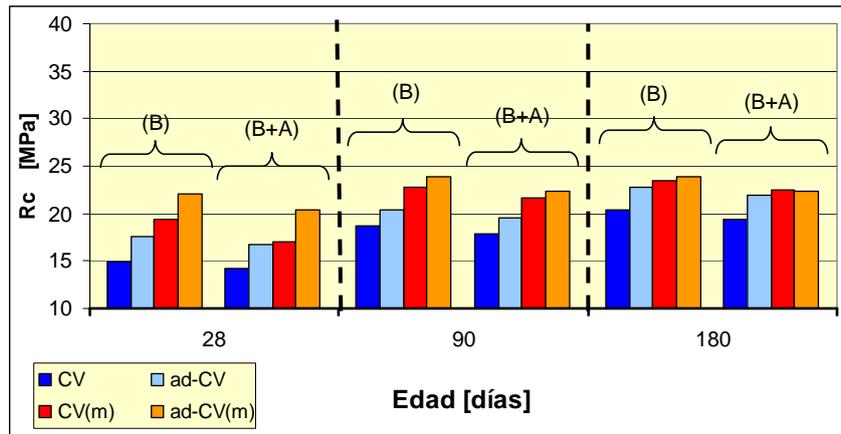
**8.4 Morteros de Composición 4. “Cemento gris CEM I 52,5R/Yeso/Pz = 15/50/35”**

En **Tabla 8-4** se muestran resultados experimentales de morteros para la composición 4 del conglomerante, con distinto curado, utilizando ceniza volante sin moler “CV” y ceniza volante molida “CV(m)”, con y sin aditivo superplastificante y ensayados a 28, 90 y 180 días.

**Tabla 8-4. Resistencia a flexotracción y compresión. Agua combinada en morteros medidos en B.H. “Cem Gris 52,5R/Yeso/Pz = 15/50/35”. Con y sin aditivo.**

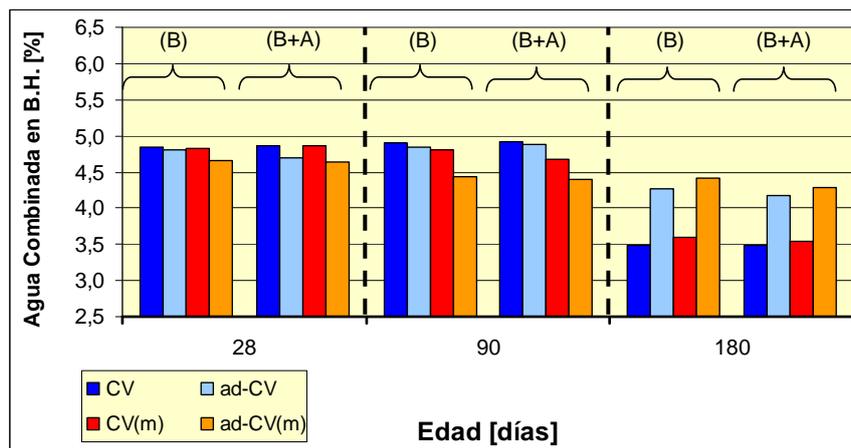
Pz	Adit.	Curado	Edad	Resistencia [MPa]		B.H.(200°C) [%]
			[días]	Flexotracc.	Compresión	
CV	no	B	28	4,1	14,9	4,85
			90	4,5	18,7	4,90
			180	4,5	20,4	3,49
CV	si	B	28	4,6	17,6	4,81
			90	5,2	20,3	4,84
			180	5,5	22,7	4,27
CV	no	B + A	28	3,3	14,2	4,87
			90	4,0	17,8	4,92
			180	4,0	19,4	3,49
CV	si	B + A	28	3,8	16,7	4,70
			90	4,2	19,5	4,88
			180	4,6	21,9	4,18
CV(m)	no	B	28	4,4	19,4	4,83
			90	4,5	22,8	4,80
			180	4,6	23,5	3,60
CV(m)	si	B	28	5,2	22,1	4,66
			90	5,4	23,9	4,43
			180	4,1	23,9	4,42
CV(m)	no	B + A	28	4,1	17,0	4,86
			90	4,3	21,6	4,67
			180	4,7	22,4	3,54
CV(m)	si	B + A	28	4,7	20,4	4,64
			90	5,1	22,3	4,40
			180	4,3	22,3	4,29

Los resultados de resistencia a compresión “Rc” se visualizan en **Fig. 8-8**.



**Fig. 8-8. Rc vs Edad. Morteros “Cem Gris 52,5R/yeso/Pz = 15/50/35”, con y sin aditivo. Distintos curados.**

Los resultados de pérdida de peso, por pérdida de agua combinada en la mezcla medida en Balanza de Halógenos, se muestran en Fig. 8-9.



**Fig. 8-9. Pérdida agua combinada vs Edad. Morteros “Cem Gris 52,5R/yeso/Pz = 15/50/35”, con y sin aditivo. Distintos curados.**

De la observación de los resultados experimentales para la composición 4 (ver Tabla 8-4, Tabla C-4 (Anexo C), Fig. 8-8 y Fig. 8-9), se constata una tendencia en general, similar a las composición 1 (apartado 8.1), composición 2 (apartado 8.2) y composición 3 (apartado 8.3), con una excepción similar a la destacada para la composición 3 (apartado 8.3); en que en este caso, los morteros con CV(m), manifiestan una menor pérdida de agua combinada a los 90 días respecto a los 28 días.

No obstante, al reducir el contenido de cemento de 20% a 15%, se observa una reducción significativa de la “Rc” a los 90 y 180 días de curado. Esta reducción es más acusada en los morteros que contienen CV(m). Este hecho podría explicarse teniendo en cuenta que la reducción de cemento significa una disminución de Portlandita disponible, que reacciona con la puzolana. La CV(m) es más reactiva y por tanto consumiría rápidamente la Portlandita presente.

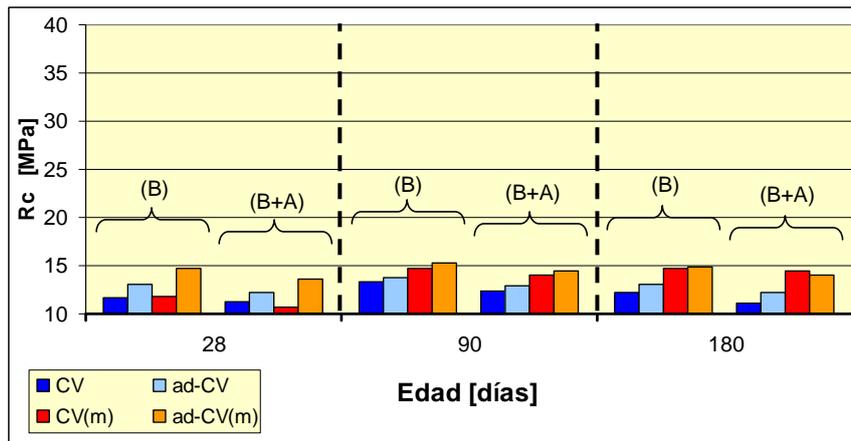
### 8.5 Morteros de Composición 5. “Cemento gris CEM I 52,5R/Yeso/Pz = 10/50/40”

En **Tabla 8-5** se muestran resultados experimentales de morteros para la combinación 5 del Conglomerante, con distinto curado, utilizando ceniza volante sin moler “CV” y ceniza volante molida “CV(m)”, con y sin aditivo superplastificante y ensayados a 28, 90 y 180 días.

**Tabla 8-5. Resistencia a flexotracción y compresión. Agua combinada en morteros medida en B.H. “Cem Gris 52,5R/Yeso/Pz = 10/50/40”. Con y sin aditivo.**

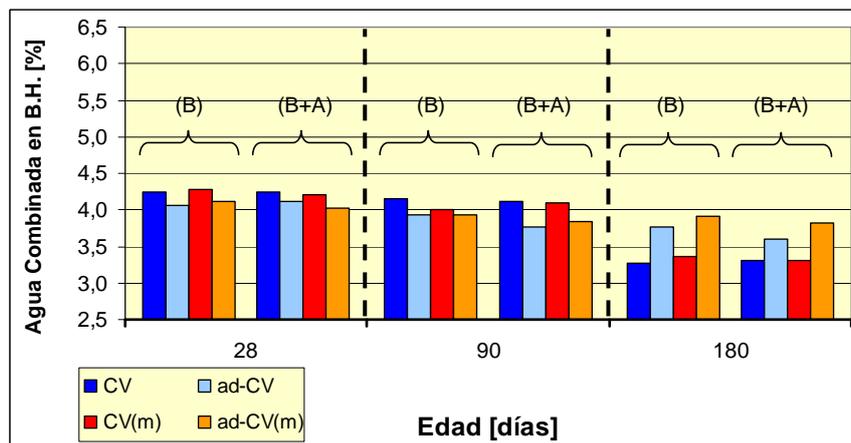
Pz	Adit.	Curado	Edad	Resistencia [MPa]		B.H.(200°C)
			[días]	Flexotracc.	Compresión	[%]
CV	no	B	28	2,7	11,6	4,25
			90	2,9	13,4	4,15
			180	3,4	12,2	3,27
CV	si	B	28	3,4	13,0	4,06
			90	2,9	13,8	3,94
			180	2,3	13,1	3,77
CV	no	B + A	28	2,5	11,3	4,25
			90	2,7	12,4	4,12
			180	2,7	11,1	3,31
CV	si	B + A	28	2,7	12,2	4,12
			90	3,0	12,9	3,76
			180	1,7	12,3	3,60
CV(m)	no	B	28	2,9	11,8	4,28
			90	3,1	14,7	4,01
			180	3,2	14,7	3,37
CV(m)	si	B	28	3,4	14,7	4,11
			90	3,6	15,3	3,93
			180	2,6	14,8	3,92
CV(m)	no	B + A	28	2,5	10,7	4,20
			90	2,8	14,1	4,10
			180	2,9	14,4	3,30
CV(m)	si	B + A	28	2,9	13,6	4,02
			90	3,1	14,5	3,84
			180	2,3	14,0	3,83

Los resultados de resistencia a compresión “Rc” se visualizan en **Fig. 8-10**.



**Fig. 8-10. Rc vs Edad. Morteros “Cem Gris 52,5R/yeso/Pz = 10/50/40”, con y sin aditivo. Distintos curados.**

Los resultados de pérdida de peso, por pérdida de agua combinada en la mezcla medida en Balanza de Halógenos, se muestran en Fig. 8-11.



**Fig. 8-11. Pérdida agua combinada vs Edad. Morteros “Cem Gris 52,5R/yeso/Pz = 10/50/40”, con y sin aditivo. Distintos curados.**

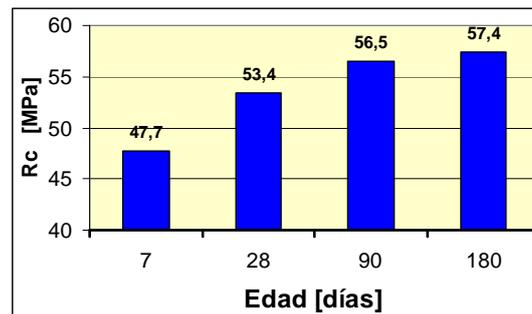
De la observación de datos en [Tabla 8-5](#) y [Fig. 8-10](#), se constata un incremento de la “Rc” solo hasta los 90 días, para posteriormente decaer o mantenerse constante. En la presente composición no se sobrepasan en ningún caso los 15 MPa, mientras que en las composiciones anteriores, la mayoría de los ensayos superan los 20 MPa; esto es lógico por la proporción de cemento y de CV presente en la muestra.

Adicionalmente, se observa una reducción significativa en lo que a diferencias de “Rc” se refiere, entre los morteros con CV y CV(m), lo cual es lógico

teniendo en cuenta el poco contenido de cemento (10%), por lo que, la cantidad de portlandita producida por la hidratación del mismo, será baja, lo que condicionará de forma significativa la reacción puzolánica. Por este motivo, también se aprecia una reducción significativa del agua combinada en los ensayos en B.H (ver Fig. 8-11).

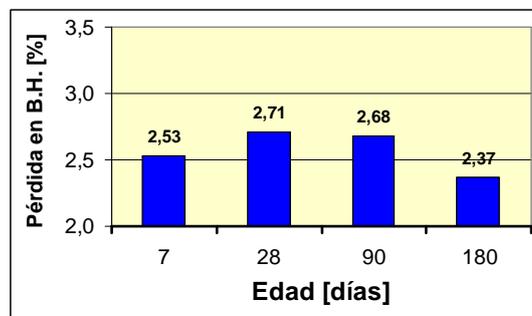
### 8.6 Mortero de Control del Cemento

En Fig 8-12 se muestran resultados de resistencia a compresión “Rc” de morteros control del cemento portland. Como era de esperar, los resultados obtenidos son muy superiores a los morteros mixtos “cemento/yeso/puzolana”.



**Fig. 8-12.** Rc vs Edad. Mortero de Control del Cemento. Curado en agua. Agua/cem=0,5

A su vez, en Fig 8-13, se muestra resultados de agua combinada obtenida en B.H. frente al tiempo de curado para de muestras del mismo mortero control.



**Fig. 8-13.** Pérdida de agua combinada en B.H. vs Edad. Mortero de Control del Cemento. Curado en agua. Agua/cem = 0,5.

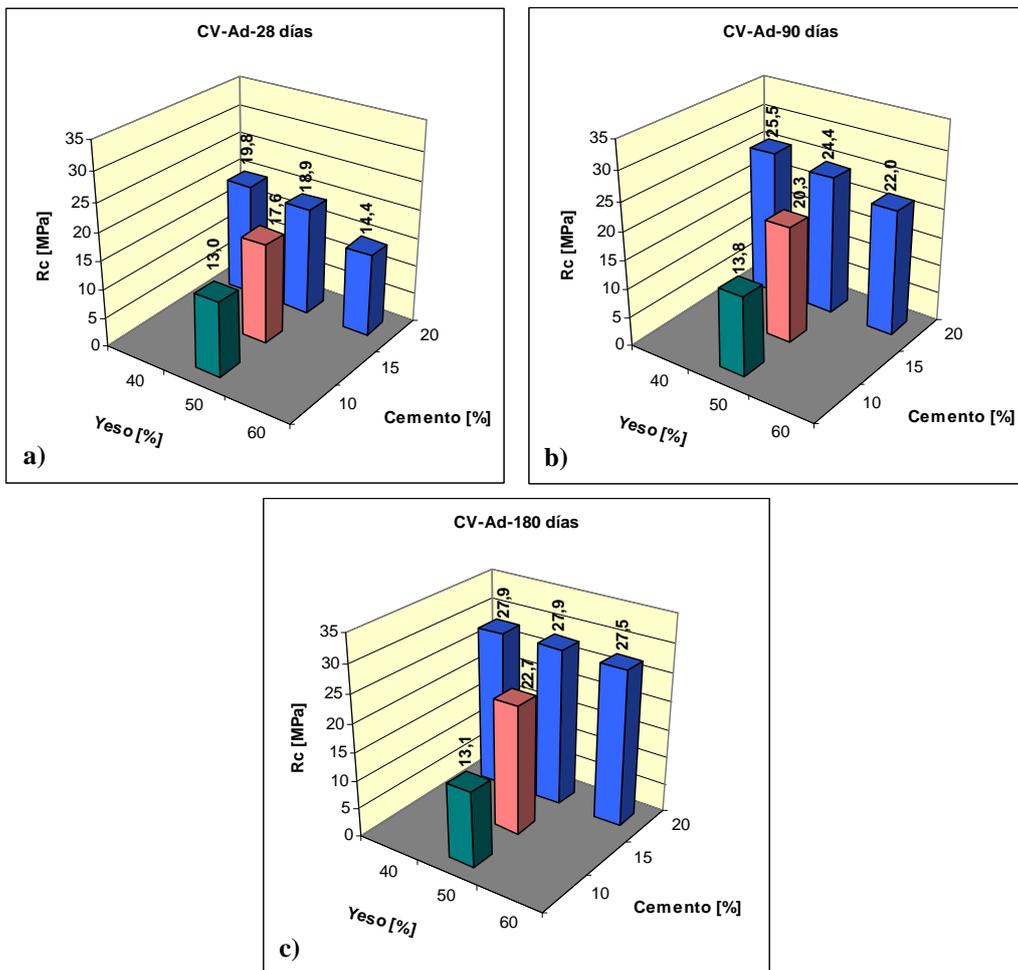
Como era de esperar, los resultados que se observan en Fig. 8-13, son inferiores a los morteros mixtos “cemento/yeso/puzolana”, ya que en este caso, al no existir yeso, no se registran las pérdidas de agua debido a la transformación de

dihidrato a anhidrita. En estos casos, al no haber puzolana, tampoco se registran los hidratos formados en la reacción puzolánica.

### 8.7 Determinación del “Conglomerante” óptimo

Para definir la mejor composición del “conglomerante” de estas mezclas de mortero, se priorizará sobre la base de la resistencia a compresión “Rc” y condicionantes económicas y ecológicas.

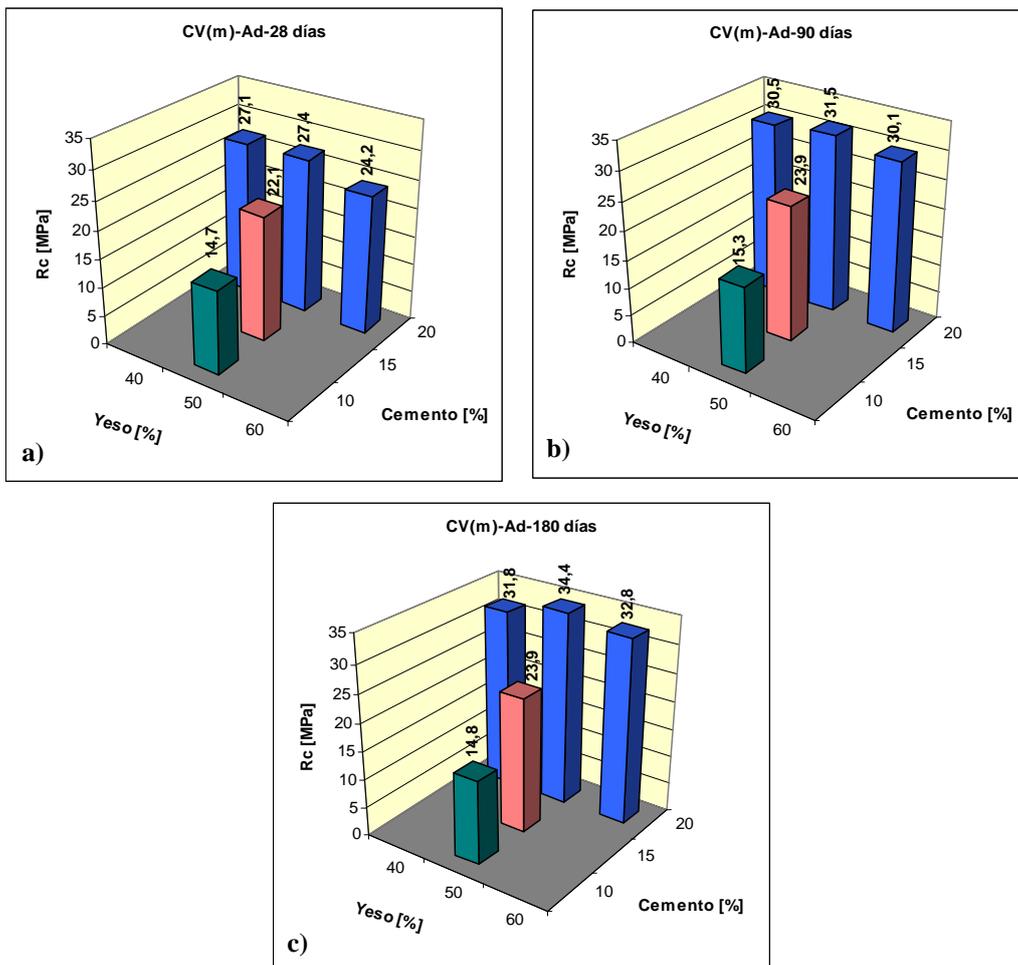
Estas últimas, imponen priorizar el uso de mezclas con un mínimo de cemento y en la medida de lo posible no utilizar CV(m) ya que a su vez su uso, impone una condicionante tecnológica y un incremento del coste económico.



**Fig. 8-14.** “Rc” vs contenido de cemento y yeso. Morteros con CV y aditivo. Edades: a) 28 días, b) 90 días y c) 180 días. Curado en “B”.

De todas las composiciones, los mejores resultados de “Rc” se obtienen para curado en “Bolsa (B)”, con uso de aditivo superplastificante, con el mayor porcentaje de cemento (20%) y uso de CV(m); no obstante, las diferencias de “Rc” con el resto, no son significativas. A efectos de aplicar esta compatibilización simultánea a las mezclas de mortero, se discrimina para morteros con aditivo y se efectúa una comparación de valores “Rc” conocidos, en consideración a la dosis de cemento y la dosis de yeso utilizada, lo que para morteros con “CV” se visualiza en Fig. 8-14 a), b) y c) para 28, 90 y 180 días de curado, respectivamente.

A su vez, para el caso de morteros con “CV(m)”, en Fig. 8-15 a), b) y c) para 28, 90 y 180 días de curado, se visualiza la “Rc” obtenida, respectivamente.



**Fig. 8-15.** “Rc” vs contenido de cemento y yeso. Morteros con CV(m) y aditivo. Edades: a) 28 días, b) 90 días y c) 180 días. Curado en “B”.

El color de las barras que describen la magnitud de “Rc”, tanto en **Fig. 8-14** como en **Fig. 8-15**, tienen el siguiente significado:

Color  representa a morteros con 10% de contenido de cemento, con representación solo de la combinación “10/50/40”.

Color  representa a morteros con 15% de contenido de cemento, con representación solo de la combinación “15/50/35”.

Color  representa a morteros con 20% de contenido de cemento, con representación de las combinaciones “20/40/40”, “20/50/30” y “20/60/20”.

En base a ambas figuras precedentes, es posible advertir que las mejores combinaciones, desde el punto de vista de “Rc”, efectivamente se obtienen para las composiciones con 20% de cemento. Si adicionalmente, los valores referenciales de los materiales utilizados en la elaboración de morteros, se pueden asumir en países en vías de desarrollo, como los siguientes:

- Valor del Cemento (saco 25 kg): 1,0 (valor referencial 100%)
- Valor del Yeso (saco 25 kg): 0,5
- Valor de la CV (saco 25 kg): 0,1
- Valor de la CV(m) (saco 25 kg): 0,125
- Valor del Aditivo (cantidad de 1%): 0,05

Entonces, es posible obtener el coste referencial de cada composición de mortero, lo que en consideración a la mejor “Rc” (obtenida a los 180 días), es posible obtener el cociente “Mc” entre “Resistencia mecánica de Compresión (Rc)” y “Coste”, que bien pueden visualizarse en **Tabla 8-6**.

**Tabla 8-6. Análisis referencial. Cociente “Mc = Rc/Coste”.**

Composición	Rc [MPa]		Coste [%]		Mc = Rc /Coste	
	CV-Ad	CV(m)-Ad	CV-Ad	CV(m)-Ad	CV-Ad	CV(m)-Ad
<b>20/40/40</b>	27,9	31,8	49,0	50,0	57,0	63,6
<b>20/50/30</b>	27,9	34,4	53,0	53,8	52,7	63,9
<b>20/60/20</b>	27,5	32,8	57,0	57,5	48,3	57,1

De **Tabla 8-6**, puede observarse que el mejor cociente “Rc/Coste” se obtiene de manera ambivalente tanto para el mortero con CV(m) y aditivo de composición

“20/40/40”, como para la composición “20/50/30”, siendo los más óptimos desde el punto de vista de la resistencia mecánica y del coste, con la ventaja ecológica de reducir a un 20% el consumo de cemento.

---

**Capítulo 9. EXPANSIÓN DE MORTEROS  
“CEMENTO BLANCO-YESO-PUZOLANA”**

---



## 9. EXPANSIÓN DE MORTEROS “CEMENTO BLANCO-YESO-PUZOLANA”

Anteriormente, en el **Capítulo 5** se aborda la determinación de resistencias mecánicas de morteros con cemento portland blanco, complementándose con estudios de resistencia mecánica efectuados en **Capítulo 7**; en esta oportunidad, para completar dichos estudios se procede a estudiar en una fase inicial el comportamiento expansivo de series de morteros “cemento blanco-yeso(escayola)-puzolana” con distintas composiciones, efectuando el curado de las probetas con plástico de protección. Para una misma composición, se prueba una puzolana activa como lo es la “ceniza volante sin moler (CV)” y simultáneamente, se prueba una adición inerte como el “filler calizo (FC)” a fin de comparar sus respuestas de expansión frente a la acción puzolánica.

La selección de las materias primas para fabricar cemento blanco es mucho más estricta que en la fabricación del cemento gris; como por ejemplo, con cantidades mínimas de óxido de hierro, que obligan a incrementar el contenido de  $C_3A$  lo que hace que sea menos resistente que el cemento gris a condiciones agresivas, como el contacto con el agua de mar o la presencia de sulfatos. Por esta razón, un estudio del comportamiento expansivo se puede conseguir utilizando primariamente un solo tipo de cemento blanco, para lo cual, el estudio se inicia arbitrariamente utilizando “Cemento Blanco BL II/B-LL 42,5R (Tipo B, **Capítulo 3**), con bajo contenido de  $C_3A$  (5,85%), respecto del otro cemento blanco (Tipo A) con un contenido de  $C_3A$  de 11,82%. Ello puede dar la pauta de la conveniencia o no de continuar la fase experimental con el otro cemento blanco.

En ese sentido, el estudio del comportamiento de la expansión, desde la perspectiva de la generación de productos expansivos, con la inclusión de adiciones puzolánicas activas (CV) y adiciones inertes como el filler calizo (FC), a mezclas de mortero con este tipo de cemento y con cantidades significativas de yeso (o escayola), permitirá cuantificar de mejor manera su

durabilidad. Los resultados de resistencia mecánica al utilizar cemento blanco con una puzolana activa son prometedores, por eso, el presente estudio complementa el comportamiento del mortero con este tipo de cemento. Si la adición de una puzolana activa, reporta resultados aceptables desde la perspectiva de durabilidad (expansión), es de esperar que en mayor medida lo sean utilizando cementos Portland grises.

Para medir la expansión (y en ciertas ocasiones, la retracción), se utiliza el instrumento denominado “Comparador de Longitudes”, que se describe en el “apartado 3.2.11”. La preparación de las mezclas y las probetas se hace según lo especificado en el “apartado 3.3.1”; el curado de las probetas se hace según lo indicado en el “apartado 3.3.3” y los procedimientos de medición de la “expansión-retracción” se efectúan según lo señalado en el “apartado 3.3.5”.

Los morteros se preparan en series de 4, 3 o 2 probetas (según se indica). El curado se efectúa bajo condiciones de alta humedad buscando una similitud con el curado de las probetas de resistencia en bolsa plástica, para lo cual, las probetas de mortero de expansión son envueltas en una protección de plástico (individualizándolas con un número de probeta según el orden y con indicación del agregado “(B)” que señala el sometimiento al curado tipo “bolsa”), cuidando dejar expuestos al exterior los vástagos sobre los cuales se efectuarán las mediciones de expansión. Las probetas con plástico de protección, son mantenidas en el interior de la cámara húmeda a fin de no variar condiciones de temperatura y humedad ambiental. El registro de masa, se hace previo a la medición de expansión sobre el total de la probeta en consideración al peso del mortero, del vástago y de la protección de plástico. Si hay pérdida (ganancia) de masa, ésta será producto de la pérdida (ganancia) de humedad interior de la probeta.

En algunos casos, las probetas luego de mantener un curado previo prolongado, se les quita el plástico de protección y se someten a curado bajo agua por 24 horas para luego continuar con el curado protegido pre-establecido (se les individualiza con el rotulado “(B+A)”). En cada caso, según corresponda, se individualizará la acción efectuada y el instante en que se efectúa.

Los morteros se confeccionan con árido fino caracterizado como “Arena Tipo A” y el agua que se utiliza en las mezclas, corresponde a agua desionizada. Todos los morteros se preparan con una relación “Agua/Conglomerante = 0,6” y una relación “Conglomerante/Arena = 1/3”.

La frecuencia con que se realizan las mediciones de expansión-retracción, será variable, dependiendo de los valores que se vayan registrando y visualizando de inmediato en la gráfica correspondiente. Para los primeros días, posterior al desmolde, las lecturas se realizan todos los días, para paulatinamente dilatarlas a dos días, tres días, una semana, dos semana, un mes y hasta dos meses. Las lecturas se realizarán durante el mayor tiempo que sea posible de modo de fijar claramente las tendencias de expansión volumétrica que muestran las distintas composiciones de “Conglomerante” ensayadas.

Por cada lectura y cada serie a medir, se registra aparte de la fecha y la hora, el peso individual de cada probeta de la serie, como así mismo, el peso del conjunto. Esto se hace a fin de controlar la eficiencia del sistema de protección con plástico mediante la pérdida de masa durante el proceso de curado.

Debido a la gran cantidad de datos que se han registrado, hacen casi imposible tabularlos todos y entregarlos en detalle, como para respaldar fehacientemente los registros experimentales realizados; por ello, solo se muestran resumidamente en el “Anexo D” algunos datos en Tablas y las gráficas correspondientes en el presente capítulo.

En los casos que se aporten datos de “expansión promedio”, esta expresa la variación porcentual promedio de longitud medida, respecto a la longitud original de cada probeta de su serie luego del desmolde, según lo indicado en **Ec. 3-31** en el apartado **3.3.5** del **Capítulo 3**. A su vez, la “variación de masa”, corresponde al promedio de la variación porcentual de masa, medido respecto a la masa original de las probetas luego del desmolde.

Los comportamientos de “expansión” y “variación de masa”, se muestran en las gráficas correspondientes a cada combinación de mortero. Fundamentalmente en estas gráficas los comportamientos según la edad de curado se individualizaran a través de 6 curvas distintas, según el siguiente detalle:

- Curva “Pz: [a, b, c y d] (B)”, representa el comportamiento promedio (expansión o variación de masa) según la edad, de la serie de probetas protegidas con plástico con indicación de la adición utilizada “Pz”, sea esta ceniza volante “CV” o filler calizo “FC”, identificadas con los numerales “a, b, c y d”, pudiendo ser estos “1, 2, 3 y/o 4”.
- Curva “Pz: [a y b] (B)”, representa el comportamiento promedio (expansión o variación de masa) de las probetas protegidas con plástico con indicación de la adición utilizada “Pz”, sea esta ceniza volante “CV” o filler calizo “FC”, identificadas con los numerales “a y b”, a partir de la fecha en que las otras probetas de la serie, identificadas como “c y d” se han sumergido en agua por 24 horas, sin plástico.
- Curva “Pz: [c y d] (B+A)”, representa el comportamiento promedio (expansión o variación de masa) que registran las probetas con indicación de la adición utilizada “Pz”, sea esta ceniza volante “CV” o filler calizo “FC” identificadas como “c y d” a partir de la fecha en que se han sumergido en agua por 24 horas y protegidas con plástico luego de ser retiradas del agua.

En cada “Figura” se muestran la gráfica con individualización de las curvas correspondientes según la nomenclatura descrita anteriormente.

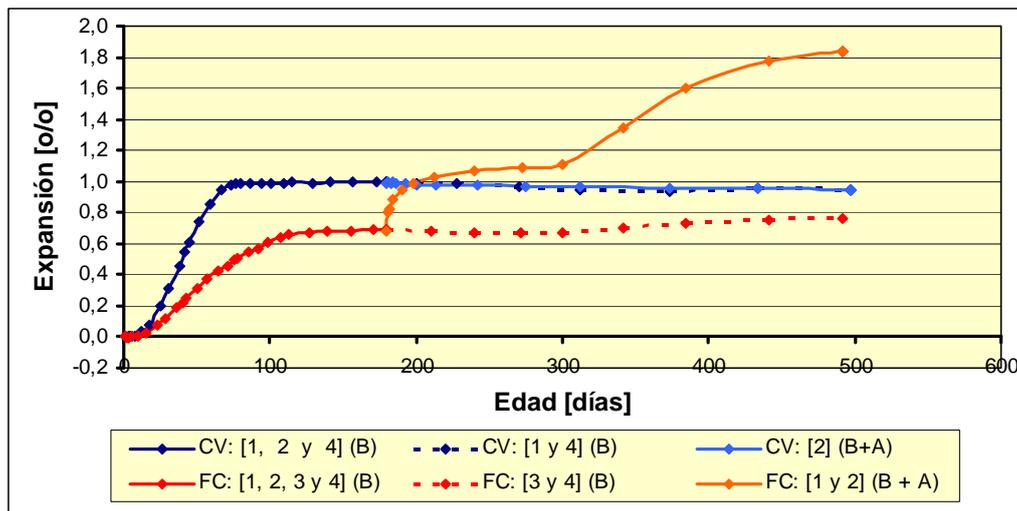
### 9.1 Morteros "cimento BL II 42.5R/Yeso/Puzolana = 20/50/30"

En **Tabla D-1(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con ceniza volante sin moler compuesta de tres

probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-1(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de peso de la probeta apartada de la serie anterior, que es sumergida en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenida en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección. Valores de "Rc" para serie similar se encuentran en **Tabla 7-2** del capítulo 7.

De igual modo, en **Tabla D-2(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con filler calizo compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-2(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de las dos probetas apartadas de la serie anterior, que son sumergidas en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla D-1(a)**, **Tabla D-1(b)**, **Tabla D-2(a)** y **Tabla D-2(b)**, es posible visualizar en **Fig. 9-1(a)** el comportamiento simultaneo de la variación de longitud (expansión) de las probetas con CV y FC, según la edad de curado.



**Fig. 9-1(a).** Expansión promedio vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/Pz = 20/50/30". Comportamiento de 3 probetas con CV y 4 Probetas con FC.

De la observación de la **Fig. 9-1(a)**, para las probetas de CV es posible concluir lo siguiente.

- Se alcanza una expansión máxima promedio del 1% de la longitud original de las probetas. Valor muy elevado para las pretensiones de uso de este mortero con fines constructivos.

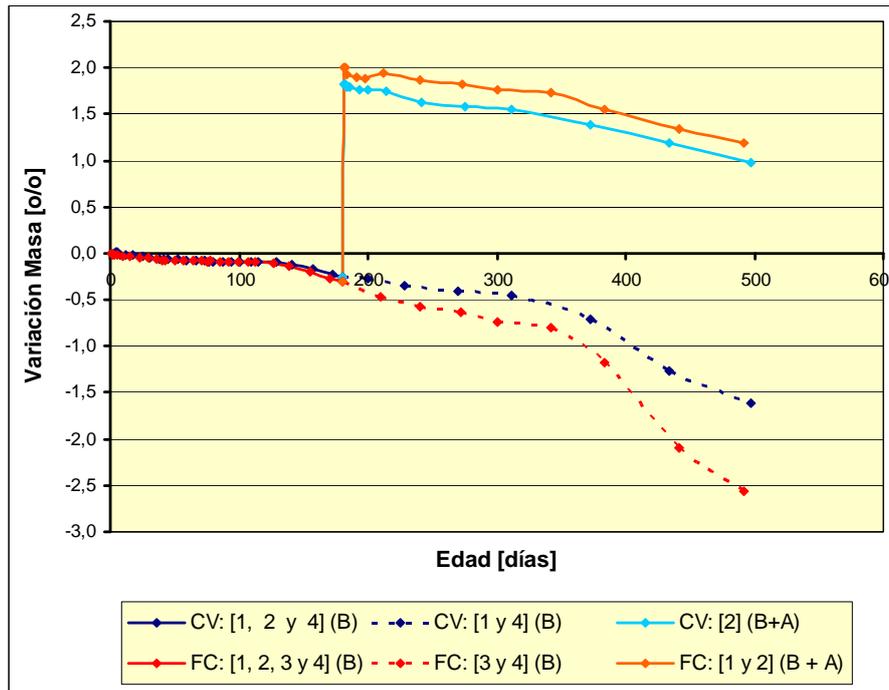
- La expansión crece a una velocidad de 0,051 mm/día y este crecimiento se detiene a los 80 días, aproximadamente.
- Que después de los 80 días, no se producen incrementos de la expansión aunque se produzcan cambios bruscos de humedad (inmersión de la probeta en agua durante 24 horas).
- A partir de los 180 días, la expansión de la probeta sumergida en agua por 24 horas, es similar a las otras probetas sin sumergir y mantenidas con plástico de protección.

Respecto de probetas de mortero con FC, también de **Fig. 9-1(a)**, es posible concluir lo siguiente.

- Se observa un incremento de la expansión con el tiempo de curado, sin embargo, el incremento de la expansión es más reducido que con CV. Este hecho podría ser debido a la presencia de  $Al_2O_3$  (alúmina) reactiva en la ceniza volante, que facilitaría la formación de una mayor cantidad de compuestos expansivos, como la etringita. En el caso del FC, los compuestos expansivos se formarían únicamente a partir de  $C_3A$  presente en el cemento. Este efecto es coincidente con lo descrito por Talero [88], quien demuestra que la formación de etringita a partir de la alúmina reactiva presente en una puzolana adicionada a una pasta de cemento Portland y atacada con una solución de yeso, es considerablemente mayor que la etringita formada cuando el ataque se hace a una pasta de cemento Portland puro, lo que a su vez reafirma las conclusiones de un estudio anterior del mismo autor [89].
- En esta experiencia la expansión crece a una velocidad neta de 0,023 mm/día, inferior a la obtenida para CV. Esta velocidad, tiene directa relación con la tasa de formación de etringita que determina Talero [88-89], cumpliéndose que la formación de etringita, a partir de la puzolana con alúmina reactiva (como es el caso con CV) es mayor que la formación de etringita cuando la mezcla no posee dicha alúmina (como es el caso con FC).
- Los cambios significativos entre las dos experiencias (CV y FC), se producen a partir de la rehidratación del mortero a los 180 días de curado (recordemos que a los 180 días las probetas se sumergen durante 24 horas en agua, luego se retiran y se envuelven de nuevo en plástico). Una vez producida la rehidratación, en las probetas con FC comienza de nuevo un proceso expansivo muy acusado que alcanza el 1,84% a los 492 días de curado (curva “FC: [1 y 2] (B+A)” de **Fig. 9-1(a)**), 312 días después de la rehidratación, mientras que las probetas que contienen CV alcanzan una expansión promedio máxima del 0,95% a los 497 días de curado (curva “CV: [2] (B+A)” de **Fig. 9-1(a)**), 317 días después de la rehidratación; aproximadamente la mitad que las que contienen FC.
- En esta experiencia se observaron diferencias significativas, en lo que a expansión se refiere, entre las probetas sumergidas 24 horas en agua y las que no se han sumergido. Las probetas que no han sido sumergidas en agua (línea discontinua correspondiente a la curva “FC: [3 y 4] (B)” de **Fig. 9-1(a)**), incrementan muy levemente su expansión, hasta un máximo de 0,76% a los 492 días de curado, menos de la mitad que las probetas que han sido sumergidas. Este hecho pone de manifiesto que la rehidratación favorece

muy acusadamente la formación de nuevos compuestos expansivos, debido a la ausencia del carácter puzolánico del FC, que evitaría la fijación de Portlandita y por tanto, quedaría disponible ésta para que el aluminato cálcico hidratado pueda formar nuevos compuestos expansivos como la etringita.

También, de datos aportados por **Tabla D-1(a)**, **Tabla D-1(b)**, **Tabla D-2(a)** y **Tabla D-2(b)** del Anexo D, es posible visualizar en **Fig. 9-1(b)** el comportamiento de la variación de masa, según la edad de curado.



**Fig. 9-1(b).** Variación de masa vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/Pz = 20/50/30". Comportamiento de 3 probetas con CV y 4 Probetas con FC.

Nótese que una variación negativa de masa, representa la pérdida de masa fundamentalmente por pérdida de humedad interior en la masa del mortero. A pesar de encontrarse las probetas protegidas con plástico, la pérdida de humedad ocurre porque la protección no es 100% hermética y si hay pérdida o ganancia de humedad, es altamente probable que este ocurriendo en la zona de los vástagos ya que estos quedan expuestos al exterior a través de una perforación provocada al plástico de protección.

De **Fig. 9-1(b)** es posible concluir lo siguiente.

- El sistema de protección plástica de las probetas, si bien no es 100% estanco, es lo suficientemente efectivo para mantener un ambiente de alta humedad a través del tiempo.
- A pesar de la protección de plástico, las probetas tienden a perder humedad con el tiempo. Este fenómeno se produce tanto antes de la inmersión durante 24 horas en agua a los 180 días, como después de la misma.
- Si estudiamos conjuntamente las gráficas de **Fig. 9-1(a)** y **Fig. 9-1(b)**, constataremos que para el mortero con CV, que si bien la inmersión durante 24 horas en agua supone una variación brusca de masa, esto no implica un incremento de la expansión, sino una leve disminución de la misma. Este hecho estaría corroborando que el mortero ha llegado a una expansión máxima y que una rehidratación del mismo no favorece nuevos episodios expansivos.
- En general, las variaciones de masa obtenidas para las probetas de mortero con FC son similares a la experiencia en morteros con CV y se pone de manifiesto con el aumento brusco de la masa de la probeta cuando se sumerge en agua, como cabía esperar. El incremento de masa observado en la experiencia con FC es superior al observado en la experiencia con CV, lo que podría explicarse tomando en cuenta este carácter puzolánico de la CV que produciría una mayor densificación de los morteros dificultando la penetración del agua.
- Podemos concluir que si bien el agua penetra en los dos morteros (CV y FC) la penetración del agua tan solo se traduce en expansión en el caso de los morteros que contienen FC por los motivos esgrimidos anteriormente (**Fig. 9-1(a)** y **Fig. 9-1(b)**).

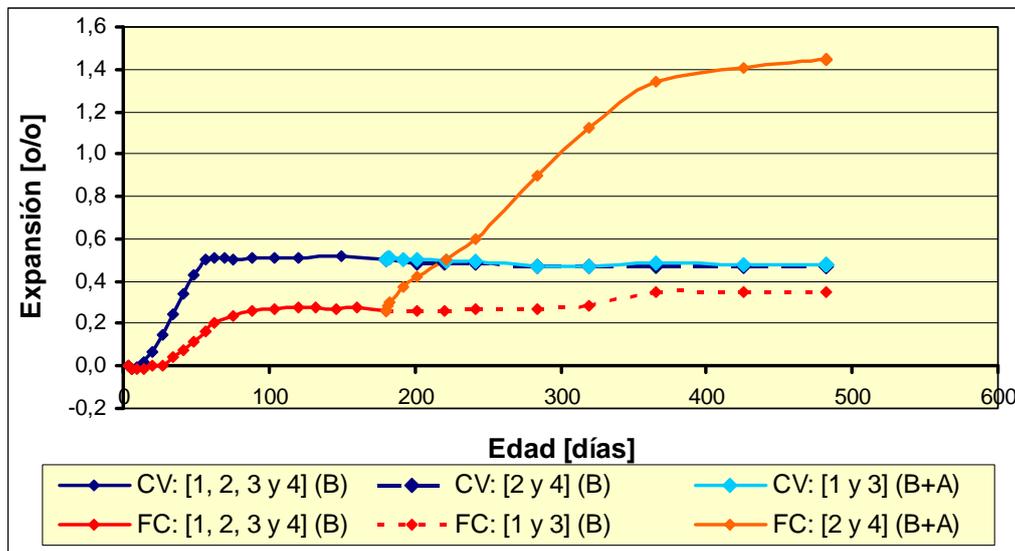
## 9.2 Morteros "cimento BL II 42.5R/Escayola/Puzolana = 20/50/30"

En **Tabla D-3(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con ceniza volante sin moler compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-3(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de dos probetas apartadas de la serie anterior, que fueron sumergidas en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De igual modo, en **Tabla D-4(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con filler calizo compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-4(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de dos probetas apartadas de la serie anterior, que fueron sumergidas en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla D-3(a)**, **Tabla D-3(b)**, **Tabla D-4(a)** y **Tabla D-4(b)**, es posible visualizar en **Fig. 9-2(a)** el comportamiento

simultaneo de la variación de longitud (expansión) de las probetas con CV y FC, según la edad de curado.



**Fig. 9-2(a).** Expansión promedio vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/escayola/Pz = 20/50/30". Comportamiento de 4 probetas con CV y 4 Probetas con FC.

De observar la **Fig. 9-2(a)**, para probetas de mortero con CV es posible concluir lo siguiente.

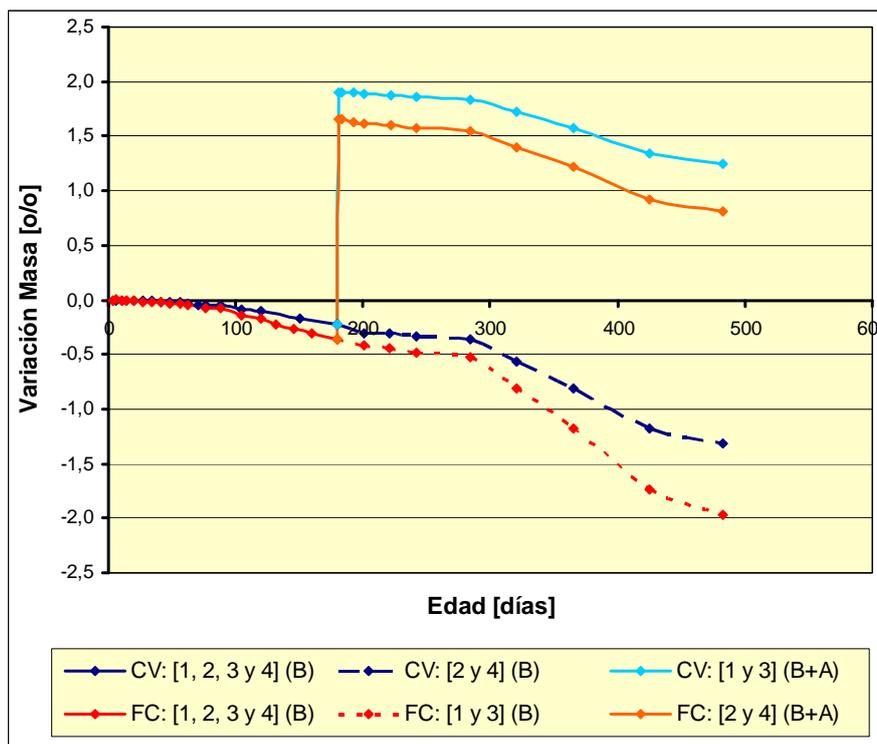
- Que la expansión máxima alcanza en promedio un poco más de 0,5% de la longitud original de las probetas. Este valor es la mitad del valor de expansión que se obtuvo para su homóloga con yeso; si bien la tendencia es análoga a la observada para el mortero con CV de **Fig. 9-1(a)**, este valor aún muy elevado para las pretensiones de uso de este mortero con fines constructivos. Esta diferencia sustancial de expansión máxima que se produce entre mezclas de escayola y yeso, se debe probablemente a que la escayola es un material mas fino (retención máxima en tamiz 200 micras del 1%) que el yeso (retención máxima en tamiz 200 micras del 50%) y por tanto, se favorece una mayor hidratación del cemento provocando un efecto acelerador en la fijación de la Portlandita (CH), conocido también como "efecto partícula" [4] y consecuentemente, se favorece la nucleación característica de la CV con formación de productos de hidratación tipo CSH y ASCH, reduciéndose así la expansión y mejorando la resistencia mecánica. Otro factor que también podría estar afectando, es la menor pureza del yeso (mayor al 75%) frente a la de escayola (mayor al 92%).
- Que la expansión crece a una velocidad de 0,034 mm/día, valor menor que el obtenido en su homóloga con yeso y, este crecimiento se detiene a los 60 días, aproximadamente; donde también, la expansión se detiene antes que su homóloga con yeso.

- Que después de los 60 días, no hay más expansión aún ante cambios bruscos de humedad.
- A partir de los 180 días, la expansión promedio de las 2 probetas sumergidas en agua por 24 horas, es similar al promedio de las otras 2 probetas sin sumergir y mantenidas con plástico de protección.

Respecto de probetas de mortero con FC, también de Fig. 9-2(a), es posible concluir lo siguiente.

- Los resultados ponen de manifiesto una expansión de tendencia similar a lo expuesto en Fig. 9-1(a), es decir, un incremento de expansión de los morteros con FC menor que los morteros con CV y también, con cambios significativos entre las dos experiencias (CV y FC), a partir de la rehidratación del mortero a los 180 días de curado; por tanto, la justificación de este comportamiento es similar al descrito en el apartado 9.1.

También, de datos aportados por Tabla D-3(a), Tabla D-3(b), Tabla D-4(a) y Tabla D-4(b) del Anexo D, es posible visualizar en Fig. 9-2(b) el comportamiento de la variación de masa, según la edad de curado.



**Fig. 9-2(b).** Variación de masa vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/escayola/Pz = 20/50/30". 4 probetas con CV y 4 Probetas con FC.

Aquí también es válido lo expuesto en el apartado **9.1** en cuanto a que una variación negativa de masa, representa la pérdida de masa fundamentalmente por pérdida de humedad interior en la masa del mortero.

De **Fig. 9-2(b)** es posible concluir lo siguiente.

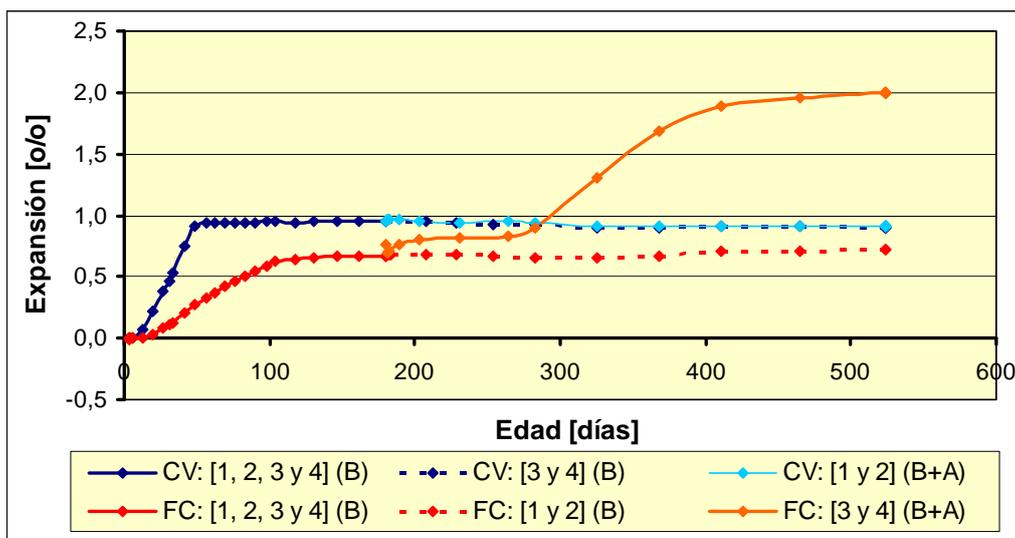
- En general, las variaciones de masa obtenidas para las probetas de mortero con FC muestran tendencia similar a la experiencia en morteros con CV, destacándose una mayor pérdida de masa en los morteros con FC.
- Los resultados recogidos ponen de manifiesto, como ya lo habíamos observado en **Fig. 9-1(b)**, un aumento brusco de masa debido a la rehidratación al sumergir las probetas en agua.
- No se observan diferencias significativas en la tendencia de la variación de masa con respecto a similar comportamiento en morteros con yeso (**Fig. 9-1(b)**).

### 9.3 Morteros "cimento BL II 42.5R/yeso/Puzolana = 20/40/40"

En **Tabla D-5(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con ceniza volante sin moler compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-5(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de dos probetas apartadas de la serie anterior, que fueron sumergidas en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De igual modo, en **Tabla D-6(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con filler calizo compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-6(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de dos probetas apartadas de la serie anterior, que fueron sumergidas en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla D-5(a)**, **Tabla D-5(b)**, **Tabla D-6(a)** y **Tabla D-6(b)**, es posible visualizar en **Fig. 9-3(a)** el comportamiento simultáneo de la variación de longitud (expansión) de las probetas con CV y FC, según la edad de curado.



**Fig. 9-3(a).** Expansión promedio vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/Pz = 20/40/40". Comportamiento de 4 probetas con CV y 4 Probetas con FC.

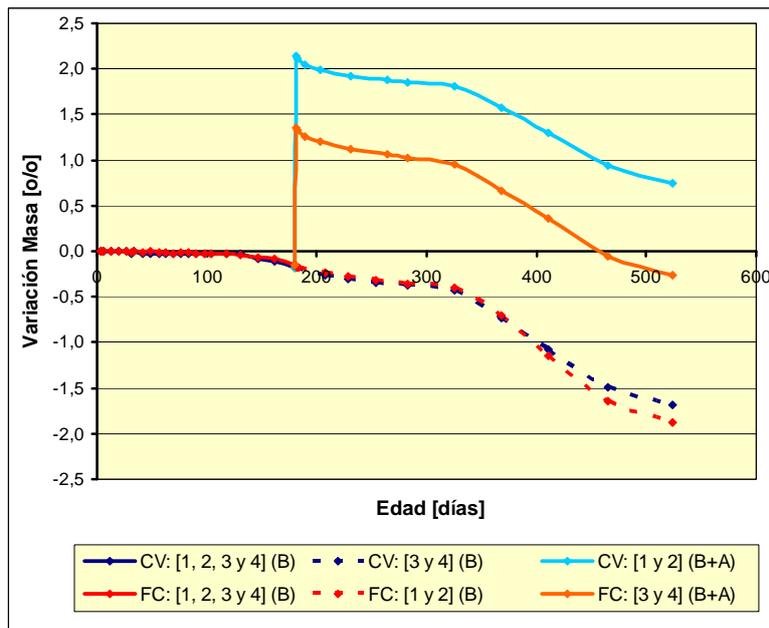
De observar [Fig. 9-3\(a\)](#), para probetas de mortero con CV es posible concluir lo siguiente.

- Que la expansión máxima alcanza en promedio 0,94% de la longitud original de las probetas.
- Que la expansión crece a una velocidad de 0,059 mm/día y, este crecimiento se detiene a los 50 días.
- Que después de los 50 días, no hay más expansión aún ante cambios bruscos de humedad.
- A partir de los 180 días, la expansión promedio de las 2 probetas sumergidas en agua por 24 horas, es similar al promedio de las otras 2 probetas sin sumergir y mantenidas con plástico de protección.

Respecto de probetas de mortero con FC, también de [Fig. 9-3\(a\)](#), es posible concluir lo siguiente.

- Los resultados ponen de manifiesto una expansión de tendencia similar a lo expuesto en [Fig. 9-1\(a\)](#) y [Fig. 9-2\(a\)](#), es decir, un incremento de expansión de los morteros con FC menor que los morteros con CV y también, con cambios significativos entre las dos experiencias (CV y FC), a partir de la rehidratación del mortero a los 180 días de curado.

También, de datos aportados por [Tabla D-5\(a\)](#), [Tabla D-5\(b\)](#), [Tabla D-6\(a\)](#) y [Tabla D-6\(b\)](#) del Anexo D, es posible visualizar en [Fig. 9-3\(b\)](#) el comportamiento de la variación de masa, según la edad de curado.



**Fig. 9-3(b).** Variación de masa vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/Pz = 20/40/40". Comportamiento de 4 probetas con CV y 4 Probetas con FC.

De la **Fig. 9-3(b)** es posible concluir lo siguiente.

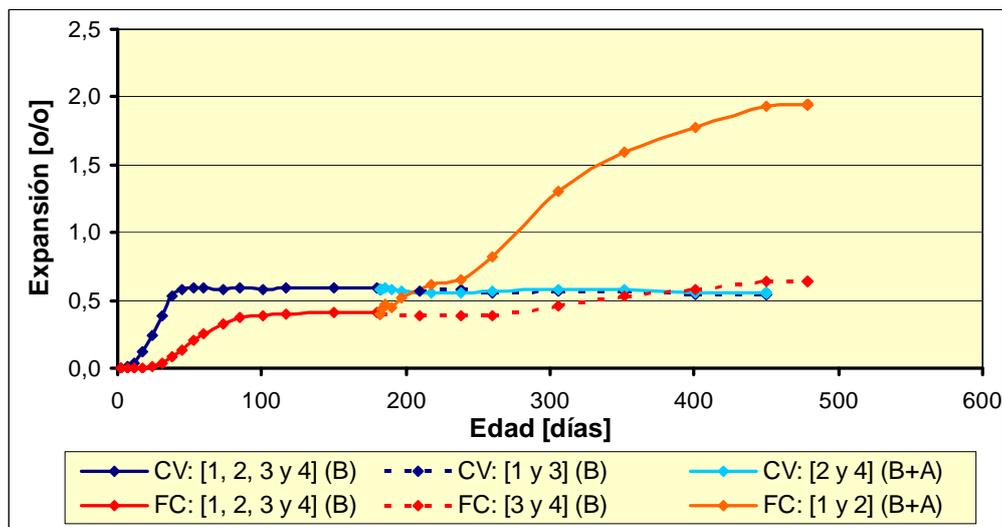
- En general, las variaciones de masa obtenidos para las probetas de mortero con FC muestran tendencia similar a la experiencia en morteros con CV.
- Los resultados recogidos ponen de manifiesto, al igual como lo habíamos observado anteriormente en **Fig. 9-1(b)** y **Fig. 9-2(b)**, un aumento brusco de masa debido a la rehidratación, al sumergir las probetas en agua a los 180 días. Nuevamente, el incremento de masa observado en la experiencia con CV es levemente superior al observado en la experiencia con FC, lo que podría explicarse en una mayor disminución de la porosidad de este último producto de la mayor formación de productos de expansión.

#### 9.4 Morteros "cemento BL II 42.5R/escayola/Puzolana = 20/40/40"

En **Tabla D-7(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con ceniza volante sin moler compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-7(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de dos probetas apartadas de la serie anterior, que fueron sumergidas en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De igual modo, en **Tabla D-8(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con FC compuesta de 4 probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-8(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de 2 probetas apartadas de la serie anterior, que fueron sumergidas en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla D-7(a)**, **Tabla D-7(b)**, **Tabla D-8(a)** y **Tabla D-8(b)**, es posible visualizar en **Fig. 9-4(a)** el comportamiento simultáneo de la variación de longitud (expansión) de las probetas con CV y FC, según la edad de curado.



**Fig. 9-4(a).** Expansión promedio vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/escayola/Pz = 20/40/40". 4 probetas con CV y 4 Probetas con FC.

De observar la **Fig. 9-4(a)**, para probetas de mortero con CV es posible concluir lo siguiente.

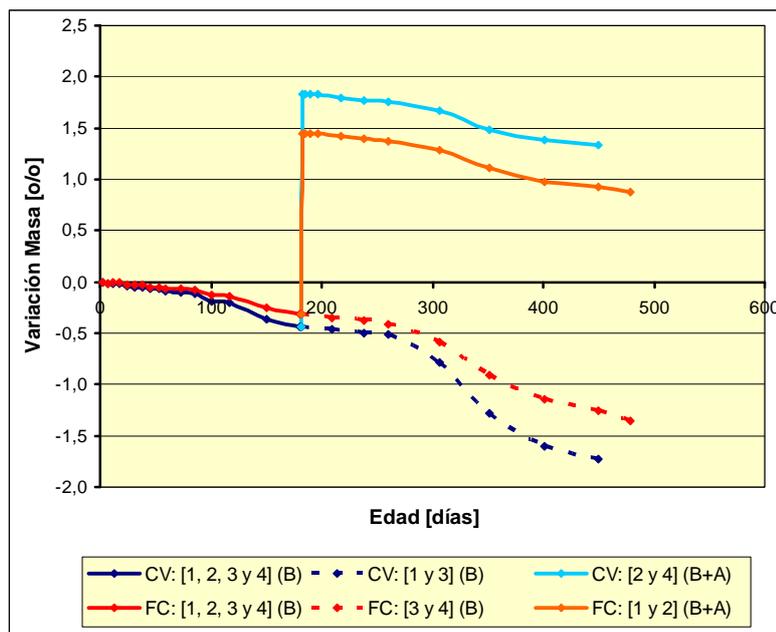
- Que la expansión máxima alcanza en promedio el valor aproximado de 0,59% de la longitud original de las probetas. Este valor es inferior al obtenido para su homóloga con yeso.
- La menor expansión que se observa para probetas de mortero con escayola, respecto a probetas de mortero con yeso, es análoga a lo ocurrido para la mezcla de mortero de combinación "20/50/30" y por tanto, la justificación a esta diferencia sustancial también es análoga a la expresada al respecto en el apartado **9.2**.
- Que la expansión crece a una velocidad de 0,054 mm/día, valor casi similar al obtenido en su homóloga con yeso y, este crecimiento se detiene a los 45

- días, aproximadamente; donde también, la expansión se detiene un poco antes que su homóloga con yeso.
- Que después de los 45 días, no hay más expansión aún ante cambios bruscos de humedad.
- Nuevamente, al sumergir 2 probetas en agua por 24 horas (a 180 días), la expansión promedio es similar al promedio de las otras 2 probetas sin sumergir y mantenidas con plástico de protección.
- En este caso, la expansión de las probetas con CV y con FC, llega a ser similar, superando al cabo del tiempo las de FC a las que contienen CV.

Respecto de probetas de mortero con FC, también de Fig. 9-4(a), es posible concluir lo siguiente.

- Los resultados ponen de manifiesto una expansión de tendencia similar a lo expuesto en Fig. 9-1(a), Fig. 9-2(a) y Fig. 9-3(a), es decir, un incremento de expansión de los morteros con FC menor que los morteros con CV y también, con cambios significativos entre las dos experiencias (CV y FC), a partir de la rehidratación del mortero a los 180 días de curado; por tanto, la justificación de este comportamiento es similar al descrito en el apartado 9.1.

También, de datos aportados por Tabla D-7(a), Tabla D-7(b), Tabla D-8(a) y Tabla D-8(b) del Anexo D, es posible visualizar en Fig. 9-4(b) el comportamiento de la variación de masa, según la edad de curado.



**Fig. 9-4(b).** Variación de masa vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/escayola/Pz = 20/40/40". 4 probetas con CV y 4 Probetas con FC.

De la **Fig. 9-4(b)** es posible concluir lo siguiente.

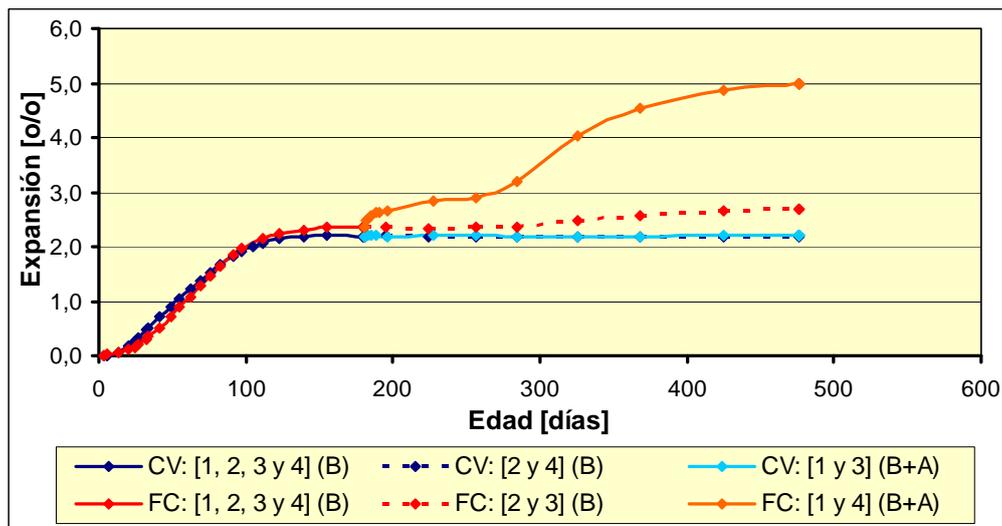
- En general, las variaciones de masa obtenidos para las probetas de mortero con FC muestran tendencia similar a la experiencia en morteros con CV. Sin embargo, a diferencia de lo expuesto en las **Fig. 9-1(b)**, **Fig. 9-2(b)** y **Fig. 9-3(b)**, las probetas de mortero con CV muestran una tendencia con la edad a un incremento en la disminución de masa en comparación con probetas con FC. Esta situación puede deberse a la presencia de  $Al_2O_3$  (alúmina) reactiva en la ceniza volante que facilita la formación de una mayor cantidad de compuestos expansivos, como la etringita, sin embargo, estos productos posteriormente derivan en la formación de monosulfoaluminato tal como se ha descrito en el apartado **2.9 a)**. Este efecto es más notorio en esta combinación, pues es la que contiene más CV y además, la pureza del sulfato cálcico aportado por la escayola, deja en evidencia que facilita la formación de este compuesto.
- Al igual como se observó anteriormente en **Fig. 9-1(b)**, **Fig. 9-2(b)** y **Fig. 9-3(b)**, hay un aumento brusco de masa debido a la rehidratación. El incremento de masa observado en la experiencia con CV es superior al observado en la experiencia con FC, lo que podría explicarse en una mayor disminución de la porosidad de este último producto de la mayor formación de productos de expansión.

### 9.5 Morteros "cimento BL II 42.5R/yeso/Puzolana = 30/40/30"

En **Tabla D-9(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con ceniza volante sin moler compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-9(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de dos probetas apartadas de la serie anterior, que fueron sumergidas en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De igual modo, en **Tabla D-10(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con filler calizo compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-10(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de dos probetas apartadas de la serie anterior, que fueron sumergidas en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla D-9(a)**, **Tabla D-9(b)**, **Tabla D-10(a)** y **Tabla D-10(b)**, es posible visualizar en **Fig. 9-5(a)** el comportamiento simultáneo de la variación de longitud (expansión) de las probetas con CV y FC, según la edad de curado.



**Fig. 9-5(a). Expansión promedio vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/Pz = 30/40/30". 4 probetas con CV y 4 Probetas con FC.**

De observar la **Fig. 9-5(a)**, para probetas de mortero con CV es posible concluir lo siguiente.

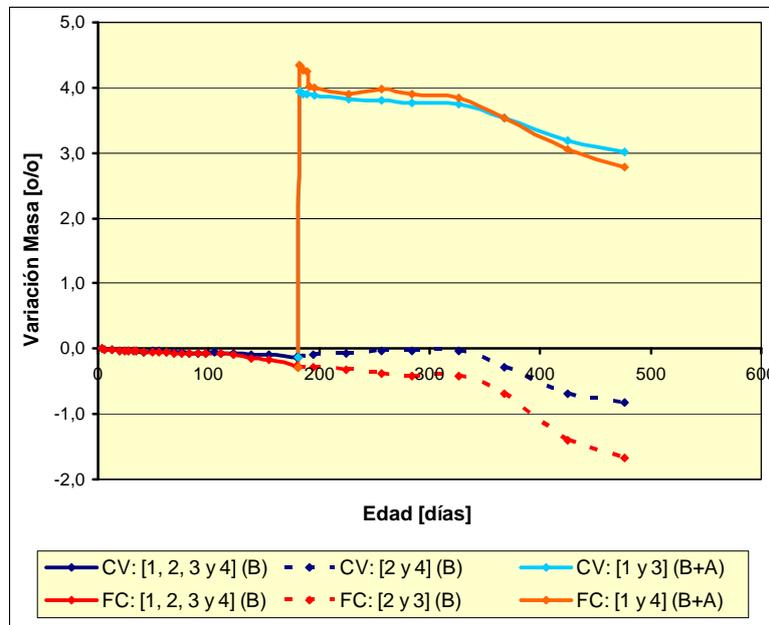
- Que la expansión máxima alcanza en promedio 2,15% de la longitud original de las probetas. En consideración a las combinaciones anteriores, corresponde a la mayor expansión hasta aquí registrada, coincidiendo con el mayor contenido de cemento (30%) de todas ellas.
- Que la expansión crece a una velocidad de 0,062 mm/día y, este crecimiento se detiene a los 120 días. Esta velocidad es similar al mortero con yeso de combinación 20% de cemento y 40% de CV y casi similar al mortero con yeso de combinación 20% de cemento y 30% de CV, lo que manifiesta la necesidad de reducir el contenido de cemento.
- Que después de los 120 días, no hay más expansión aún ante cambios bruscos de humedad.
- A partir de los 181 días, la expansión promedio de las 2 probetas sumergidas en agua por 24 horas, es similar al promedio de las otras 2 probetas sin sumergir y mantenidas con plástico de protección.

Respecto de probetas de mortero con FC, también de **Fig. 9-5(a)**, es posible concluir lo siguiente.

- Los resultados ponen de manifiesto una expansión de tendencia similar al mortero con CV y también, con cambios significativos entre las dos experiencias (CV y FC), a partir de la rehidratación del mortero a los 181 días de curado.
- Resulta evidente que la mayor dosis de cemento provee mayor cantidad de  $C_3A$  lo que genera una mayor producción de productos de expansión; desde este punto de vista, la reactividad puzolánica se manifiesta tardíamente, estabilizando la expansión aún ante cambios bruscos de humedad, lo que no

ocurre con el mortero con FC quien, recuperando humedad, recupera también su potencial expansivo disponible, sin límite superior aparente.

También, de datos aportados por **Tabla D-9(a)**, **Tabla D-9(b)**, **Tabla D-10(a)** y **Tabla D-106(b)** del Anexo D, es posible visualizar en **Fig. 9-5(b)** el comportamiento de la variación de masa, según la edad de curado.



**Fig. 9-5(b).** Variación de masa vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/Pz = 30/40/30". Comportamiento de 4 probetas con CV y 4 Probetas con FC.

De la **Fig. 9-5(b)** es posible concluir lo siguiente.

- En general, las variaciones de masa obtenidas para las probetas de mortero con FC muestran tendencia similar a la experiencia en morteros con CV.
- Los resultados recogidos ponen de manifiesto, al igual como lo habíamos observado anteriormente, un aumento brusco de masa debido a la rehidratación, al sumergir las probetas en agua a los 181 días.

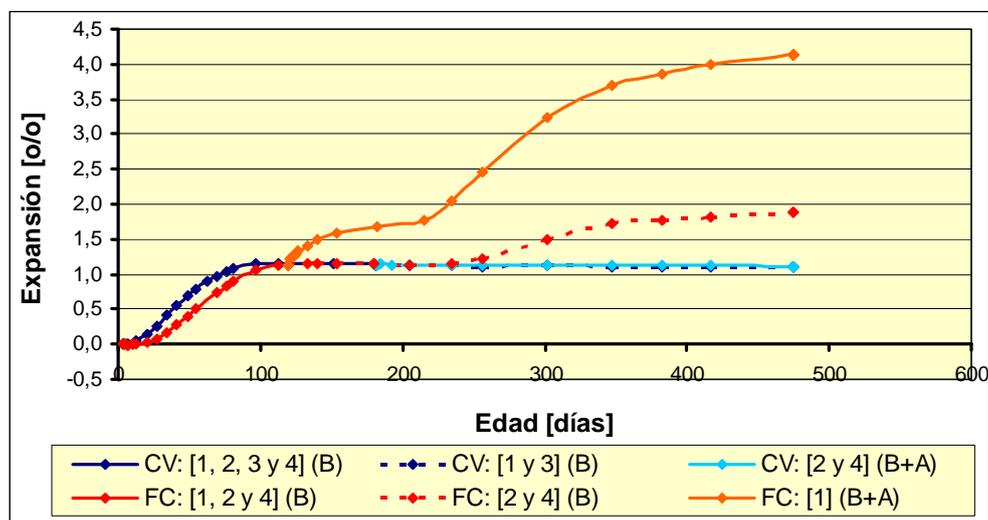
### 9.6 Morteros "cemento BL II 42.5R/escayola/Puzolana = 30/40/30"

En **Tabla D-11(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con ceniza volante sin moler compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-11(b)** del mismo anexo, se indican valores de expansión y variación de masa de dos probetas apartadas de la serie anterior, sumergidas en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De igual modo, en **Tabla D-12(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie con filler calizo compuesta de tres probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-12(b)** del mismo anexo, se indican valores de expansión y variación de masa de una probeta apartada de la serie anterior, sumergida en agua por 24 horas, sin plástico de protección y mantenida en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

A diferencia de las otras combinaciones de morteros, las probetas apartadas de cada serie y sumergidas en agua por 24 horas, se hacen a tiempos distintos. A 181 días para morteros con CV y a 120 días en morteros con FC.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla D-11(a)**, **Tabla D-11(b)**, **Tabla D-12(a)** y **Tabla D-12(b)**, es posible visualizar en **Fig. 9-6(a)** el comportamiento simultáneo de la variación de longitud (expansión) de las probetas con CV y FC, según la edad de curado.



**Fig. 9-6(a).** Expansión promedio vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/escayola/Pz = 30/40/30". 4 probetas con CV y 3 Probetas con FC.

De observar la **Fig. 9-6(a)**, para probetas de mortero con CV es posible concluir lo siguiente.

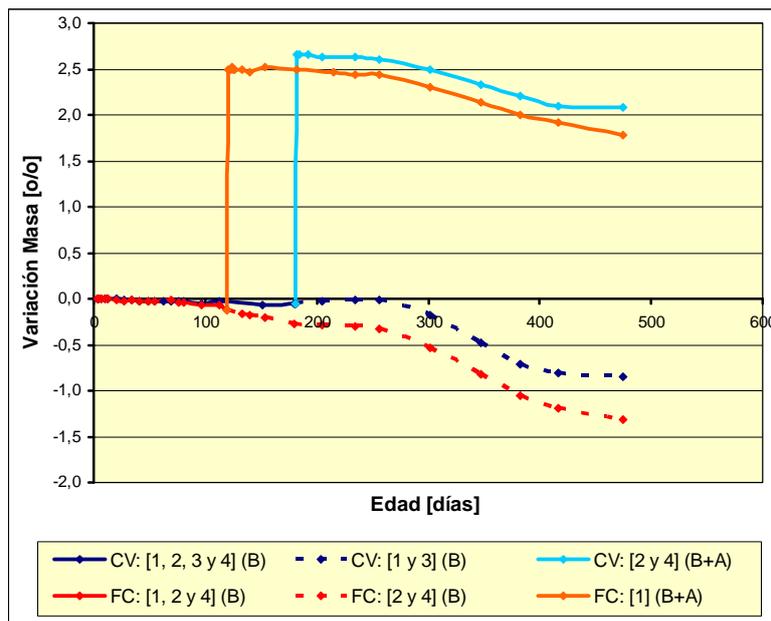
- Que la expansión máxima alcanza en promedio el valor aproximado de 1,14% de la longitud original de las probetas. Este valor es inferior al obtenido para su homóloga con yeso.
- La menor expansión que se observa para probetas de mortero con escayola, respecto a probetas de mortero con yeso, es análoga a lo ocurrido para la mezcla de mortero de combinación "20/50/30" y "20/40/40", y por tanto, la justificación a esta diferencia sustancial también es análoga a la expresada al respecto en el apartado **9.2**.

- Que la expansión crece a una velocidad de 0,031 mm/día, valor equivalente a la mitad del obtenido en su homóloga con yeso y, este crecimiento se detiene a los 90 días, aproximadamente; lo que también ocurre antes que su homóloga con yeso.
- Que después de los 90 días, no hay más expansión aún ante cambios bruscos de humedad.
- Nuevamente, al sumergir 2 probetas en agua por 24 horas (a 181 días), la expansión promedio es similar al promedio de las otras 2 probetas sin sumergir y mantenidas con plástico de protección.

Respecto de probetas de mortero con FC, también de Fig. 9-6(a), es posible concluir lo siguiente.

- Los resultados ponen de manifiesto una expansión de tendencia similar a lo expuesto en Fig. 9-1(a), Fig. 9-2(a), Fig. 9-3(a) y Fig. 9-4(a), es decir, un incremento de expansión de los morteros con FC menor que los morteros con CV y también, con cambios significativos entre las dos experiencias (CV y FC), a partir del instante de la rehidratación del mortero; por tanto, la justificación de este comportamiento es similar al descrito en el apartado 9.1.

También, de datos aportados por Tabla D-11(a), Tabla D-11(b), Tabla D-12(a) y Tabla D-12(b) del Anexo D, es posible visualizar en Fig. 9-6(b) el comportamiento de la variación de masa, según la edad de curado.



**Fig. 9-6(b).** Variación de masa vs Edad. Mortero "cem (BL 42.5R)/escayola/Pz = 30/40/30". 4 probetas con CV y 3 Probetas con FC.

De la **Fig. 9-6(b)** es posible concluir lo siguiente.

- En general, las variaciones de masa obtenidas para las probetas de mortero con FC muestran tendencia similar a la experiencia en morteros con CV, si bien en este caso, el incremento de masa de los morteros con FC es inferior al de los morteros con CV.
- Al igual como se observó anteriormente en **Fig. 9-1(b)**, **Fig. 9-2(b)**, **Fig. 9-3(b)**, **Fig. 9-4(b)** y **Fig. 9-5(b)**, hay un aumento brusco de masa debido a la rehidratación.

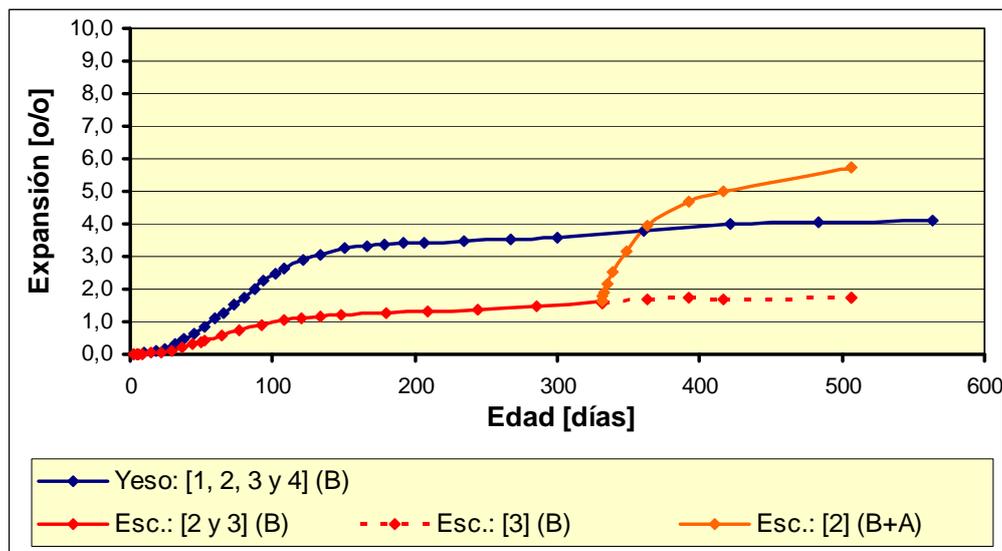
### 9.7 Morteros Control "cimento BL II 42.5R/yeso(escayola) = 50/50"

El mortero de control se realiza para una combinación donde se mantiene constante la proporción de yeso (ó escayola) y en donde el cemento, complementa el conglomerante sin utilizar puzolana. De este modo, el mortero control de combinación "50/50", representa la referencia de comportamiento para los morteros "20/50/30" del apartado **9.1** y **9.2**.

En **Tabla D-13(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie de control con yeso compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente.

De igual modo, en **Tabla D-14(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie de control con escayola compuesta de dos probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-14(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de una probeta apartada de la serie anterior, que se sumerge en agua por 24 horas, sin plástico de protección y es mantenida en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla D-13(a)**, **Tabla D-14(a)** y **Tabla D-14(b)**, es posible visualizar en **Fig. 9-7(a)** el comportamiento simultaneo de la variación de longitud (expansión) de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.

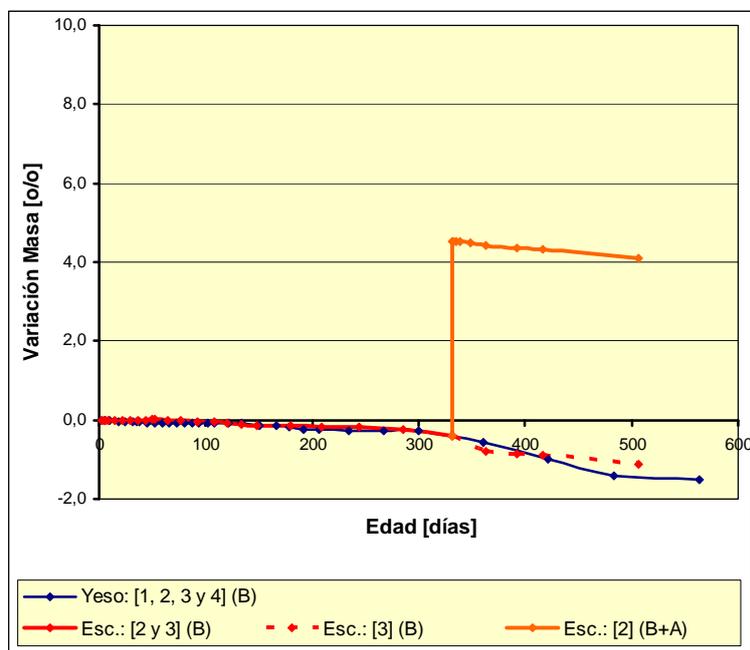


**Fig. 9-7(a).** Expansión promedio vs Edad. Mortero Control "cem (BL 42.5R)/yeso(escayola) = 50/50". 4 probetas con yeso y 2 probetas con escayola.

De observar la [Fig. 9-7\(a\)](#), es posible concluir lo siguiente.

- Que la velocidad de expansión de las probetas con yeso es muy superior a la velocidad de expansión de las probetas con escayola. Velocidad que varía según la gestación inicial de productos de expansión, como posteriormente, de acuerdo con la disponibilidad de humedad medioambiental que se requiere para la reacción química, la que queda de manifiesto una vez que es rehidratada una probeta de mortero con escayola a los 331 días de edad, en que la humedad es suficiente para desarrollar todo su potencial expansivo. Esta diferencia sustancial de velocidad de expansión que se produce entre mezclas de yeso y escayola, se debe probablemente a que la escayola es un material más fino (retención máxima en tamiz 200 micras del 1%) que el yeso (retención máxima en tamiz 200 micras del 50%) y por tanto, se favorece una mayor hidratación del cemento que se fija entre granos de escayola provocando a su vez un efecto acelerador en la fijación de la Portlandita (CH), conocido también como “efecto partícula” [4] y consecuentemente, se favorece la formación de productos de hidratación tipo CSH, reduciéndose la expansión y mejorando la resistencia mecánica. Otro factor que también podría estar afectando, es la menor pureza del yeso (mayor al 75%) frente a la de escayola (mayor al 92%).
- Se puede observar que la expansión en el “Control” es mayor que en probetas que contienen CV, a pesar de que éstas aportan  $Al_2O_3$  reactivas, para producir compuestos de expansión. En este caso, la expansión producida por la mezcla “cemento/yeso” es mucho mayor.

También, de datos aportados por [Tabla D-13\(a\)](#), [Tabla D-14\(a\)](#) y [Tabla D-14\(b\)](#) del Anexo D, en [Fig. 9-7\(b\)](#) se visualiza el comportamiento de la masa, según la edad de curado.



**Fig. 9-7(b). Variación de masa vs Edad. Mortero Control "cem (BL 42.5R)/yeso(escayola) = 50/50". 4 probetas con yeso y 2 Probetas con escayola.**

De la [Fig. 9-7\(b\)](#) es posible concluir lo siguiente.

- En general, las variaciones de masa obtenidos para las probetas de mortero con yeso muestran tendencia similar a la experiencia en morteros con escayola.
- Los resultados recogidos ponen de manifiesto, un aumento brusco de masa debido a la rehidratación al sumergir una probeta en agua a 331 días de edad.

### 9.8 Morteros Control "cemento BL II 42.5R/yeso(escayola) = 60/40"

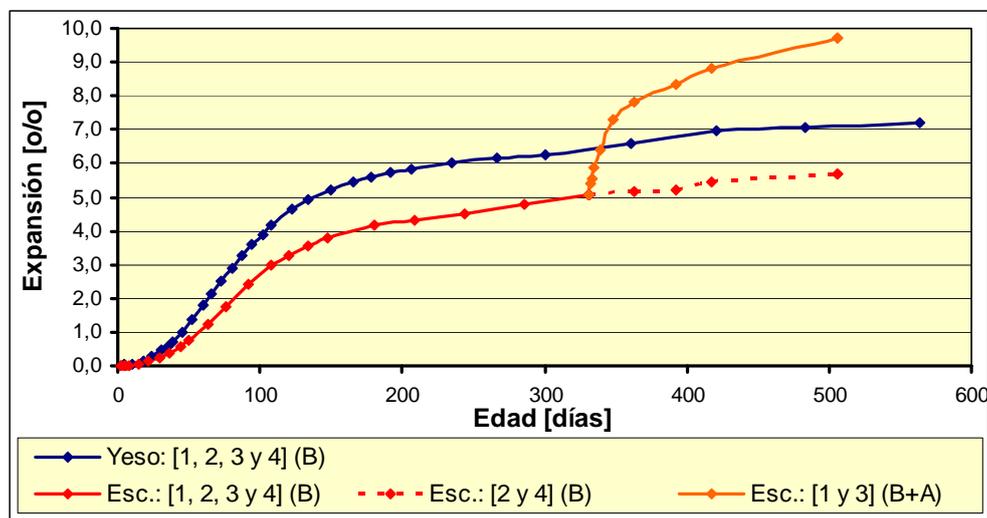
El mortero de control de combinación “60/40”, representa la referencia de comportamiento para los morteros de combinación “20/40/40” de los apartados [9.3](#) y [9.4](#) y a su vez, la referencia para la combinación “30/40/30” de los apartados [9.5](#) y [9.6](#).

En [Tabla D-15\(a\)](#) del [Anexo D](#), se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y

variación de masa, para la serie de control con yeso compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente.

De igual modo, en **Tabla D-16(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión y variación de masa, para la serie de control con escayola compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En **Tabla D-16(b)** del mismo anexo, se indican valores resumidos de expansión y variación de masa de dos probetas apartadas de la serie anterior, que se sumergen en agua por 24 horas, sin plástico de protección y luego mantenidas en cámara húmeda el resto del tiempo con plástico de protección.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla D-15(a)**, **Tabla D-16(a)** y **Tabla D-16(b)**, es posible visualizar en **Fig. 9-8(a)** el comportamiento simultaneo de la variación de longitud (expansión) de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.



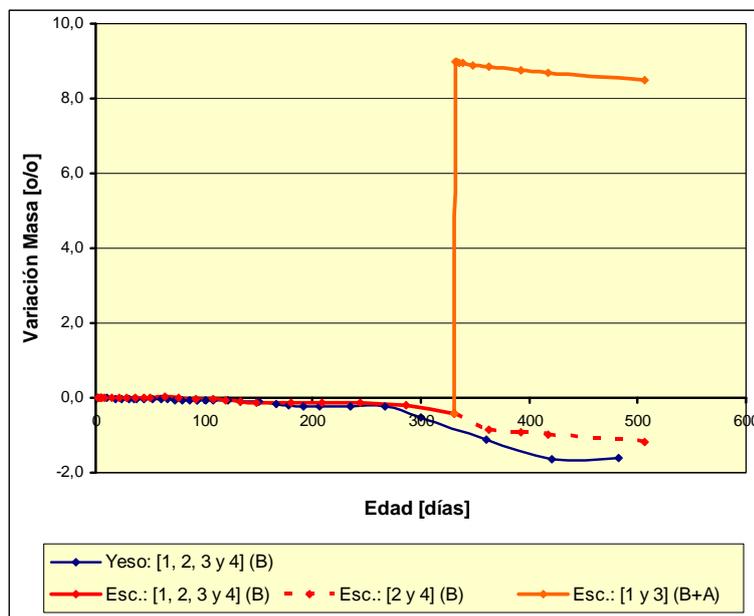
**Fig. 9-8(a).** Expansión promedio vs Edad. Mortero Control "cem (BL 42.5R)/yeso(escayola) = 60/40". Comportamiento de 4 probetas con yeso y 4 probetas con escayola.

De observar la **Fig. 9-8(a)**, es posible concluir lo siguiente.

- Nuevamente, la velocidad de expansión de las probetas con yeso es superior a la velocidad de expansión de las probetas con escayola. La variación de la velocidad observada, es muy similar a lo observado en **Fig. 9-7(a)**, así como también la expansión que se manifiesta una vez que probetas de mortero con escayola son rehidratadas a 331 días de edad, en que al proveer humedad

- suficiente, las probetas desarrollan todo su potencial expansivo, sin límite superior aparente.
- La expansión que desarrollan las probetas de yeso y escayola para esta combinación (60/40), es muy superior a la expansión que desarrollan las probetas homólogas para la combinación “50/50” que se visualizan en **Fig. 9-7(a)**. Este hecho pone de manifiesto que la mayor proporción de cemento, provee mayor contenido de  $C_3A$  y por ende, estas probetas tienden a desarrollar notoriamente mayor expansión que aquellas probetas de mortero de control con menor proporción de cemento.

También, de datos aportados por **Tabla D-15(a)**, **Tabla D-16(a)** y **Tabla D-16(b)** del Anexo D, es posible visualizar en **Fig. 9-8(b)** el comportamiento de la variación de masa, según la edad de curado.



**Fig. 9-8(b).** Variación de masa vs Edad. Mortero Control "cem (BL 42.5R)/yeso(escayola) = 60/40". 4 probetas con yeso y 4 Probetas con escayola.

De la **Fig. 9-8(b)** es posible concluir lo siguiente.

- En general, las variaciones de masa obtenidas para las probetas de mortero con yeso muestran tendencia similar a la experiencia en morteros con escayola.
- Los resultados recogidos ponen de manifiesto, un aumento brusco de masa debido a la rehidratación al sumergir las probetas en agua a 331 días de edad. Este aumento de masa es muy superior, casi el doble, del aumento de masa que sufre la probeta de combinación “50/50” que se visualiza en **Fig.**

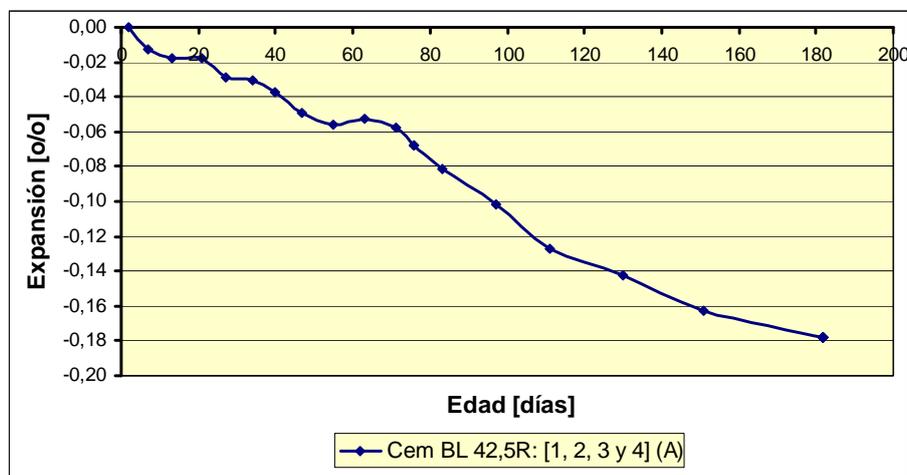
**9-7(b).** Este hecho deja en evidencia, que la generación de productos de expansión, que demanda ocupación de un determinado volumen al interior de la masa, posteriormente son diluidos por el incremento de humedad que provee la rehidratación, para continuar generando más productos de expansión sucesivamente. En ese sentido, la disposición de humedad resulta fundamental para continuar incesantemente la expansión.

### 9.9 Morteros Control "cimento BL II 42.5R = 100%"

Con la finalidad de conocer el comportamiento del mortero de cemento estándar, sin combinarlo con yeso o puzolana, se prepara una serie de mortero de control con conglomerante 100% cemento blanco (BL 42,5R). La serie corresponde a un mortero de relación "Agua/Conglomerante = 0,5", de relación "Conglomerante/Arena = 1/3" y su curado, se hace manteniendo las probetas sumergidas en agua, sin plástico de protección.

Para efectuar las mediciones, las probetas son retiradas del agua y se dejan secar al ambiente del laboratorio por 30 minutos. Transcurrido este tiempo, se efectúan las lecturas de control de masa y expansión a cada probeta en forma individual, finalizando con la devolución de las probetas al agua.

En **Tabla D-17(a)** del **Anexo D**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de retracción y variación de masa, para la serie de mortero de control 100% cemento compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. De acuerdo con los valores resumidos en dicha Tabla, es posible visualizar en **Fig. 9-9(a)** la variación de longitud promedio (retracción o expansión negativa) de estas 4 probetas, según la edad de curado.

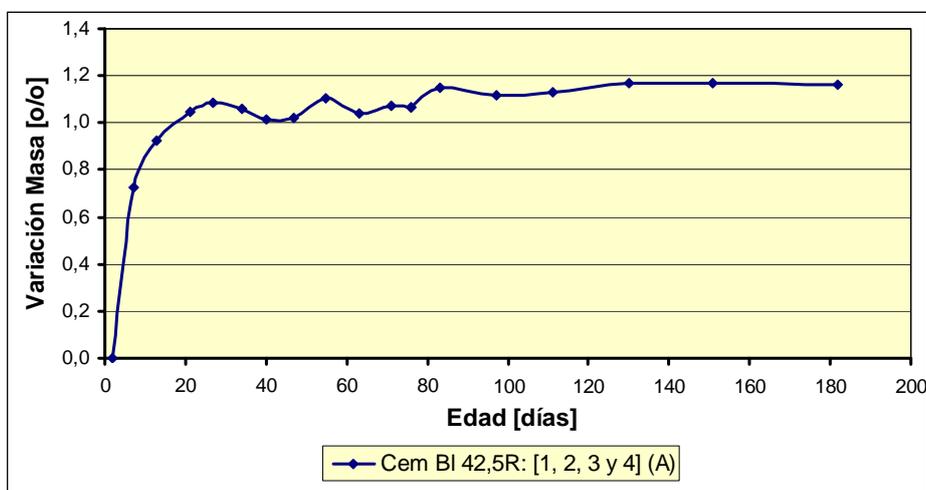


**Fig. 9-9(a).** Expansión vs Edad. Mortero de Control "cem (BL 42.5R) = 100%". Relación "Agua/Cemento = 0,5". 4 probetas curadas bajo agua.

De observar la **Fig. 9-9(a)**, es posible concluir lo siguiente.

- Que en todo instante, los valores de deformación registrados corresponden a retracción volumétrica (expansión negativa), siendo esta deformación de normal ocurrencia para este tipo de morteros, con este tipo de curado.
- Que la retracción inicial en estado de régimen crece a una velocidad promedio de 0,03 mm/día y presenta una tendencia de disminución paulatina con el tiempo.
- Con esto queda en evidencia que la incorporación de grandes cantidades de yeso(escayola) al conglomerante a base de cemento, es la causante de la expansión volumétrica que muestran todas las probetas anteriores.

También, de datos aportados por la misma **Tabla D-17(a)** del Anexo D, es posible visualizar en **Fig. 9-9(b)** la variación de masa promedio de estas 4 probetas, según la edad de curado.



**Fig. 9-9(b).** Variación de masa vs Edad. Mortero de Control "cem (BL 42.5R) = 100%". "Agua/Cemento = 0,5". Comportamiento promedio de 4 probetas curadas bajo agua.

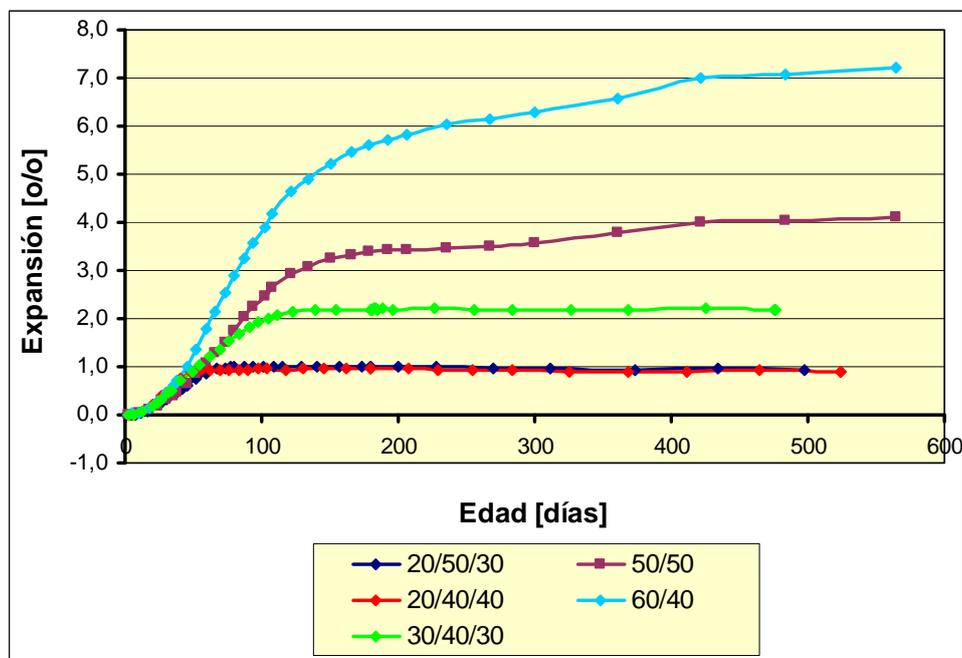
De la **Fig. 9-9(b)** es posible concluir lo siguiente.

- Estas probetas, al estar siempre sumergidas en agua, sufren un brusco cambio de masa producto de la humedad que absorben, tendiendo a estabilizarse en la medida que se van saturando los poros internos en la masa. En ese sentido, la estabilización se logra para variación positiva de masa con tendencia, conforme aumenta la edad de curado, al 1,2%, respecto del peso que tenía la probeta al instante del desmolde, antes de sumergir en agua.

### 9.10 Representación conjunta de Morteros "cimento BL II 42.5R/yeso(escayola)/CV". Comparación con morteros control

Habiéndose mostrado en detalle resultados experimentales de expansión volumétrica de series de morteros con diferentes combinaciones, con la finalidad de efectuar un análisis comparativo, se procede a establecer una representación conjunta para morteros con CV, tanto para yeso como para escayola, los que se comparan con sus respectivos "morteros control".

En una primera etapa, se representan los datos experimentales de morteros con yeso expuestos en **Tabla D-1(a)**, **Tabla D-5(a)** y **Tabla D-9(a)** del **Anexo D**, correspondientes a las combinaciones "20/50/30", "20/40/40" y "30/40/30" respectivamente, conjuntamente con los datos para "morteros control" con yeso, del tipo "50/50" y "60/40" en **Tabla D-13(a)** y **Tabla D-15(a)** respectivamente. De este modo, es posible visualizar en la **Fig. 9-10(a)** la variación de longitud promedio de las correspondientes probetas mantenidas con plástico de protección durante todo el proceso de curado. Se descartan en esta representación aquellas probetas aparatadas de su serie para sumergirlas en agua por 24 horas.



**Fig. 9-10(a).** Expansión promedio vs Edad. Morteros "cem BL 42.5R/yeso/CV", conjuntamente con morteros control "cem BL 42,5/yeso".

De **Fig. 9-10(a)** es posible concluir lo siguiente.

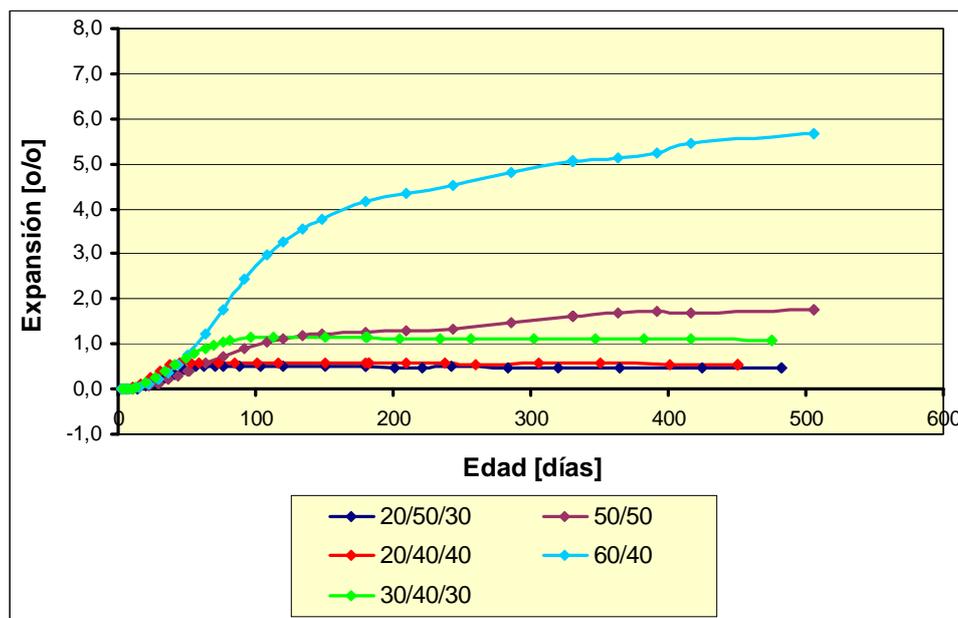
- No hay diferencias significativas en la velocidad de crecimiento de la expansión inicial entre los diferentes morteros, sin embargo, los morteros

con CV una vez que alcanzan la expansión máxima, se estabilizan, lo que no se observa en los morteros control que expanden sostenidamente sin límite aparente.

- Se observa una expansión similar en los morteros “20/50/30” y “20/40/40”, a lo largo del tiempo de curado, ambos morteros con un contenido de cemento del 20%. Sin embargo las probetas “30/40/30” alcanzan una expansión máxima superior a los morteros anteriores.
- La expansión de las probetas sin CV es mucho mayor que con CV, a pesar de que esta puzolana aporta  $Al_2O_3$  reactiva y a su vez genera productos expansivos.

También, en una segunda etapa, se representan los datos experimentales de morteros con escayola expuestos en **Tabla D-3(a)**, **Tabla D-7(a)** y **Tabla D-11(a)** del **Anexo D**, correspondientes a las combinaciones “20/50/30”, “20/40/40” y “30/40/30” respectivamente, conjuntamente con los datos para “morteros control” con escayola, del tipo “50/50” y “60/40” en **Tabla D-14(a)** y **Tabla D-16(a)** respectivamente.

En la **Fig. 9-10(b)** se visualiza la variación de longitud promedio de las correspondientes probetas mantenidas con plástico de protección durante todo el proceso de curado.



**Fig. 9-10(b).** Expansión promedio vs Edad. Morteros "cem BL 42.5R/escayola/CV", conjuntamente con morteros control “cem BL 42,5/escayola”.

De **Fig. 9-10(b)** es posible concluir lo siguiente.

- Similarmente a las probetas con yeso, en las probetas con escayola, no hay diferencias significativas en la velocidad de crecimiento de la expansión inicial entre los diferentes morteros. Los morteros con CV alcanzan una estabilización expansiva, lo que tampoco se observa en los morteros control que expanden sostenidamente sin límite aparente.
- Nuevamente se observa una expansión similar en las probetas de morteros “20/50/30” y “20/40/40”, y que las probetas “30/40/30” alcanzan una expansión máxima superior a los morteros anteriores. Queda en evidencia que la expansión depende del contenido de cemento en el conglomerante.
- La expansión de las probetas sin CV se observan mayores que con CV, a pesar de que esta puzolana aporta  $Al_2O_3$  reactiva y a su vez genera productos expansivos. Se debe recordar, que las probetas sin CV muestran una tendencia a la expansión más allá de la que se muestran en la figura, una vez que se sumergen en agua.
- Comparando las curvas con yeso de la **Fig. 9-10(a)**, con las curvas de la **Fig. 9-10(b)**, queda en evidencia que las probetas con yeso, alcanzan una expansión máxima considerablemente superior que su homóloga con escayola.

Como conclusión general:

- Queda en evidencia que la expansión máxima depende del contenido de cemento en el conglomerante y por tanto del contenido de  $C_3A$ , contribuyendo significativamente en la propagación de la expansión. Nótese que los contenidos de 30% de cemento en el conglomerante, son los que reportan mayores expansiones comparativamente para series con yeso y series con escayola, respectivamente. Por su parte, las dos series con 20% de cemento en el conglomerante logran expansiones máximas prácticamente similares tanto en yeso como en escayola, reafirmando la dependencia de la expansión máxima al contenido de cemento en el conglomerante y por ende, limitando su uso a un mínimo posible, pero compatibilizando las necesidades de proveer una buena resistencia mecánica al mortero, la que también depende del contenido de cemento.
- Todas las combinaciones efectuadas con cemento blanco BL II 42,5R (tipo B) muestran niveles de expansión máxima que exceden las indicaciones de la normativa existente a tener como referencia.
- El uso de cemento portland blanco se escogió para ponernos en una situación desfavorable al incorporarle al mortero elaborado con este tipo de cemento una cantidad significativa de sulfato cálcico y estudiar así los efectos que provoca en la resistencia mecánica y en la expansión. La incorporación de una puzolana activa en sustitución de una parte importante del cemento ha aportado conclusiones que servirán de base y

referente para continuar estudiando prioritariamente el comportamiento de estos morteros con otros tipos de cemento, para conocer también el comportamiento de la resistencia mecánica y la expansión en la búsqueda de condiciones óptimas de aplicación en la edificación de bajo coste económico y ecológico.

---

**Capítulo 10. EXPANSIÓN DE MORTEROS CON  
“CEMENTO GRIS-YESO-PUZOLANA”**

---



## 10. EXPANSIÓN DE MORTEROS CON “CEMENTO GRIS-YESO-PUZOLANA”

Cuando se trabaja con morteros y hormigones, es habitual referirse como parámetro de calidad a la resistencia mecánica y en especial, la resistencia a compresión. Casi todas las demandas de servicio se refieren a este parámetro fundamental que está asociado en calidad a la demanda de cemento; sin embargo esta demanda no se satisface por si mismo con una mezcla de buena resistencia mecánica inicial, sino con una mezcla que sea durable o soporte adecuadamente las inclemencias del medio ambiente en que se desenvolverá durante su vida útil (durabilidad). En este sentido serán los agentes agresivos del entorno a la matriz cementicia, que pueden estar presentes en el medio externo o interno (si están presentes en la misma masa del hormigón), los que dan la pauta para prever el comportamiento de la mezcla a través del tiempo; así como el deterioro que le causan al hormigón o mortero endurecido, que se pueden manifestar en una expansión volumétrica producto de la generación de compuestos de hidratación nocivos como la “Etringita” y/o “Taumasita” ([apartado 2.9](#)) y consecuentemente, en una reducción de las resistencias mecánicas necesarias y de la durabilidad.

Los morteros de cemento que contienen cantidades significativas de “yeso”, incorporan en su interior sulfato cálcico cuyas condiciones nocivas se activan en presencia de humedad, por ello, es interesante que los morteros “cemento-yeso-puzolana” puedan mantenerse en el tiempo bajo fuertes condiciones de humedad, que puedan emular condiciones de servicio al estar tratando de establecer la factibilidad de su uso en la edificación de viviendas. Estas condiciones nocivas, por lo pronto, pueden detectarse a través de la expansión volumétrica de probetas preparadas a ese fin en el laboratorio. Por las condiciones en que se desenvuelven estas experiencias, es difícil la generación de “Taumasita” que requieren condiciones de baja temperatura, la presencia de

sulfato de magnesio, carbonatos y la concentración de CO<sub>2</sub>; por ello asociamos la expansión volumétrica a la formación de etringita fundamentalmente.

A pesar de los buenos resultados experimentales de resistencia mecánica hasta aquí realizados, los resultados experimentales de expansión en morteros con cemento blanco, reportan valores excedidos que hacen que resulte conveniente, desarrollar prioritariamente ensayos de expansión a otro tipo de cemento como los tradicionales “cementos grises”. Es lo que motiva el desarrollo de los estudios del presente capítulo. Hay una necesidad evidente de compatibilizar buenos resultados de resistencia mecánica con bajas expansiones volumétricas, en este tipo de morteros, que utilizan un conglomerante de base cementicia, con inclusión de fuerte contenido de yeso o escayola, utilizando para contrarrestar los efectos nocivos de su combinación, la adición de una puzolana activa. Los resultados experimentales de expansión, finalmente serán los que validarán o contrariamente, invalidarán los buenos resultados de resistencia mecánica hasta aquí obtenidos. De ahí su importancia.

A diferencia de los resultados experimentales de expansión del **Capítulo 9**, en el capítulo presente se desarrolla un estudio experimental complementario a los de expansión, realizando paralelamente ensayos de resistencia mecánica y de análisis de porcentaje de agua combinada, en probetas de mortero preparadas para la ocasión.

Para los ensayos de expansión, se preparan series de 4 probetas de mortero de 25x25x287 mm siguiendo los procedimientos indicados en el “apartado **3.3.1**”, de composición conglomerante única expresada a través de la relación “Cemento Gris/Yeso(Éscayola)/Puzolana = 20/40/40”. Según el caso en estudio, se analizan comportamientos de mezclas de morteros con 3 diferentes cementos, lo que se indica en cada caso; con 2 diferentes tipos de “sulfato cálcico hemihidrato”, “yeso” o “escayola” (apartado **3.1.3**, **Capítulo 3**) y variando la puzolana, para lo cual se utiliza ceniza volante “CV” suministrada por la Central termoeléctrica de Andorra-Teruel (apartado **3.1.4**, **Capítulo 3**) y ceniza volante molida “CV(m)” del mismo origen. La relación en peso “Agua/Conglomerante” utilizada es constante e igual a “0,6”; la relación en peso “Conglomerante/Arena” se fija constante en el valor “1/3”, utilizando como árido fino la “Arena Tipo A” y “Arena Tipo B” de características indicadas en **Tabla 3-3** del “apartado **3.1.5**”, según se indica en cada caso en estudio. El curado de las probetas se efectúa según lo indicado en el “apartado **3.3.3**”, a excepción de las probetas que se sumergen en agua desionizada por 24 horas, las que previamente son desprovistas del plástico de protección, para posteriormente continuar su curado en cámara húmeda, nuevamente protegidas con plástico para no alterar en lo posible la alta humedad interior en la masa del mortero. En algunos casos, las probetas sin plástico de protección son curadas expuestas al ambiente del laboratorio; en otros, las probetas sin plástico de protección son curadas expuestas al ambiente de cámara húmeda. En cada caso, según corresponda, se individualizará la acción efectuada y el instante en que se efectúa.

Al igual como se hiciera previamente en el **Capítulo 9**, la medición de la expansión, se realiza utilizando el instrumento denominado “Comparador de Longitudes”, descrito en el “apartado **3.2.11**”, según procedimientos descritos en el “apartado **3.3.5**”.

Al igual a lo explicitado en **Capítulo 9**, la medición de expansión-retracción para una misma serie de mortero, se efectúan para una frecuencia de tiempo variable, dependiendo de los valores que se vayan registrando. Para los primeros días, posterior al desmolde, las lecturas se realizan todos los días, para paulatinamente dilatarlas a dos días, tres días, una semana, dos semana, un mes y hasta dos meses. Las lecturas se realizarán durante el mayor tiempo que sea posible de modo de establecer las tendencias que muestran los morteros ensayados.

Para los ensayos de resistencia mecánica, con mezclas de mortero de la misma dosificación utilizada en la elaboración de probetas de expansión, se elaboran tres series de tres probetas c/u de mortero de 40x40x160 mm siguiendo los mismos procedimientos indicados en el “apartado **3.3.1**”. Las series son ensayadas a los 28, 90 y 180 días, efectuándose el curado de las probetas según lo indicado en el “apartado **3.3.2**”, es decir con la indicación (B) para el curado en “Bolsa”, con la indicación (B+A) para el curado en “Bolsa y Agua” y adicionándose la indicación (AL) para designar al curado a la intemperie o en “Ambiente de Laboratorio” según se indica en algunos casos. De cada serie ensayada, se extrae una muestra de mortero de aproximadamente 50 g a fin de realizar medidas de porcentaje de agua combinada siguiendo las indicaciones del “apartado **3.2.8 b**”. A todas estas probetas se les efectúa un control de peso a fin de comprobar la eficiencia del sistema de curado aplicado.

Como excepción, una serie de morteros, es reservada para ser ensayada a los 365 días de curado, a fin de tener una idea del comportamiento de la resistencia mecánica a mayor edad, la cual es individualizada adecuadamente.

También se estudian los comportamientos de “morteros especiales” que en su caso, se individualizan convenientemente, con la finalidad de complementar el estudio efectuado en el **Capítulo 8**, en la búsqueda de una composición “Conglomerante” óptima a fin de mejorar la resistencia mecánica, agregándole ahora la expansión. En estos “morteros especiales”, se preparan idénticas combinaciones del “Conglomerante” que en el **Capítulo 8**, dándole importancia al uso de aditivo superplastificante y variando, condiciones de curado a fin de establecer comparativamente sus efectos. Estos morteros presentan cambios o singularidades especiales respecto a los otros morteros que se muestran en el presente Capítulo y es por tanto, lo especial de este mortero.

Debido a la gran cantidad de datos registrados, en el “**Anexo E**” se muestran simultáneamente y en forma resumida algunos datos tabulados de expansión de morteros. De acuerdo con la edad de curado, se indica resumidamente el peso promedio de las probetas, la expansión promedio como variación de longitud expresada en [mm] (**Ec. 3-30, Capítulo 3**) y también, la misma variación de longitud pero referida a la longitud que poseían las probetas a la edad inicial, que es la edad del desmolde, expresada como [%] (**Ec. 3-31, Capítulo 3**). La gráfica respectiva, relaciona la variación de esta última expansión con la edad de curado.

También en el “**Anexo E**” se muestran valores promedios tabulados de “resistencia mecánica” de flexotracción y compresión expresados en [MPa]; valores de medición de humedad expresado en [%] de pérdida de agua libre con respecto al estado seco (sin agua libre) de muestras de mortero sometida a secado en “estufa” (horno de secado) a temperatura constante de 60°C por 24 ± 2 horas y también se muestran valores de pérdida de agua combinada realizadas a muestras de mortero a través del ensayo en “B.H.” con aplicación de temperatura a 200°C, lo que se visualiza en las gráficas correspondientes. Simultáneamente, en la misma Tabla se indican valores promedios de variación de masa de estas mismas probetas.

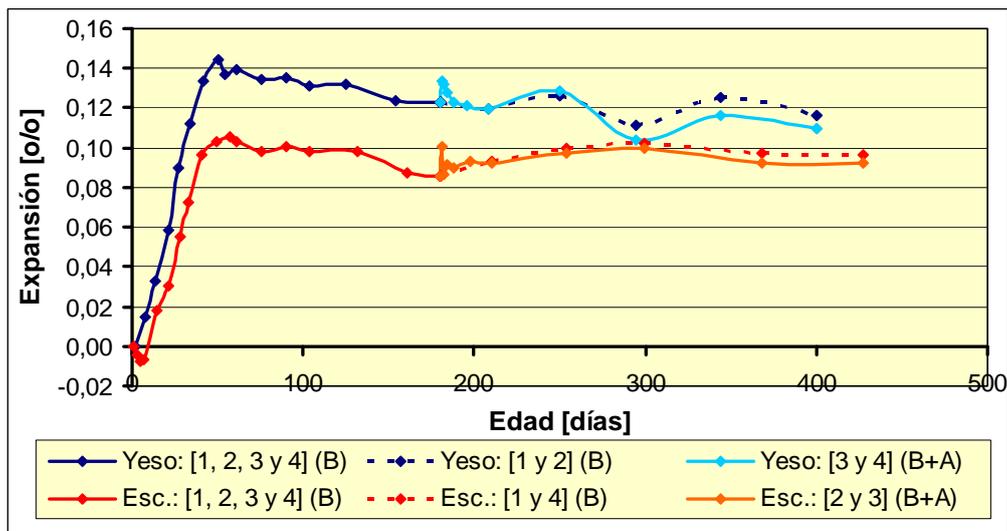
### **10.1 Morteros con cemento Portland gris CEM I 42,5 SR (sulfato resistente)**

De las singularidades en las combinaciones a utilizar, se individualiza el cemento Portland gris CEM I 42,5 SR (definido como Tipo I, en **Capítulo 3**) y el uso de Arena “Tipo A”.

#### **10.1.1 Morteros "Cemento Gris CEM I 42,5 SR/Yeso-Escayola/CV = 20/40/40"**

En **Tabla E-1(a)** del **Anexo E**, se indican con la edad de curado, valores promedios medidos y calculados de expansión, para la serie con yeso y ceniza volante compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. Se indican también valores promedios de expansión para dos probetas que a los 180 días son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico. En el mismo Anexo, en **Tabla E-2(a)** se indican con la edad de curado, valores promedios de expansión, para la serie con escayola y ceniza volante, también compuesta de cuatro probetas. Similarmente se indican valores promedios de expansión de dos probetas que a los 180 días son sumergidas en agua por 24 horas.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-1(a)** y **Tabla E-2(a)**, es posible visualizar en **Fig. 10-1(a)** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.



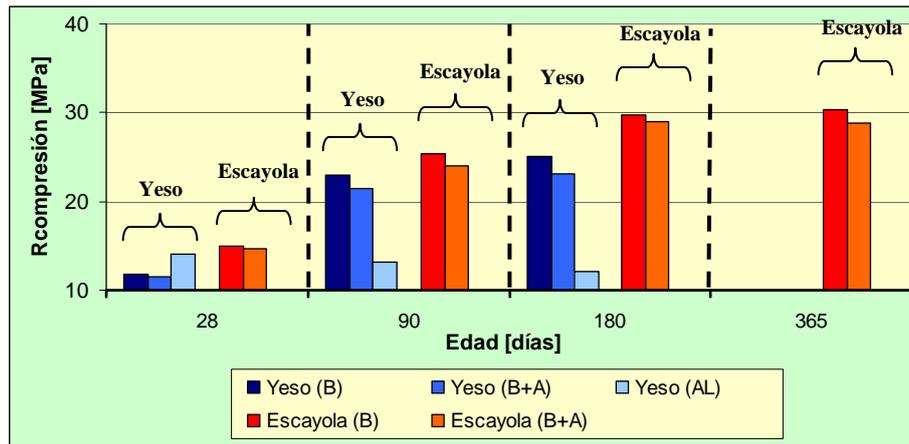
**Fig. 10-1(a).** Expansión promedio vs Edad. Comportamiento de 4 probetas de Mortero “cem gris 42.5SR/yeso/cv = 20/40/40” y 4 probetas de Mortero “cem gris 42.5SR/escayola/cv = 20/40/40”.

De observar la **Fig. 10-1(a)** es posible concluir lo siguiente.

- Al comparar velocidades de expansión inicial, no hay diferencias significativas entre morteros con yeso y morteros con escayola. Los primeros crecen a una velocidad promedio de 0,009 mm/día y los segundos, lo hacen a 0,008 mm/día. En ambos morteros, la expansión se detiene a los 50 días aproximadamente.
- Los morteros con yeso expanden más que los morteros con escayola, ya que los primeros alcanzan una máxima en promedio de 0,14% de la longitud original de las probetas, en cambio, los segundos, alcanzan una máxima de 0,11%. Esta condición fue detectada previamente al estudiar la expansión de morteros “cemento blanco-yeso-puzolana” del **Capítulo 9** y las razones que justifican esta diferencia son similares a las indicadas en el “apartado 9.2”, y que serían debido fundamentalmente a que la escayola es un material mas fino que el yeso y por tanto, la escayola favorece una mayor hidratación del cemento.
- Que después de los 50 días, en ninguno de los morteros se produce aumento de la expansión aún ante cambios bruscos de humedad, manteniendo un valor constante durante el resto de la experiencia.
- En ambos morteros, a partir de los 180 días, la expansión promedio de las dos probetas sumergidas en agua por 24 horas (B+A), es similar a las otras dos probetas sin sumergir y mantenidas con plástico de protección (B).

Respecto al control de peso, resistencia mecánica y porcentaje de agua combinada medida en Balanza de Halógenos (B.H.), en **Tabla E-1(b)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios en probetas con yeso. En el mismo Anexo, en **Tabla E-2(b)** se indica de acuerdo con la edad de curado, valores promedios en probetas con escayola.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-1(b)** y **Tabla E-2(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-1(b)** el comportamiento conjunto de la resistencia a compresión de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.



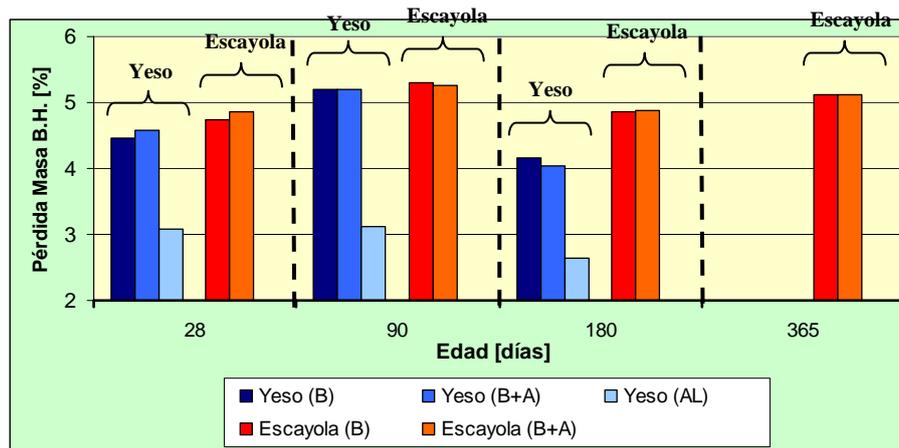
**Fig. 10-1(b).** Resistencia a Compresión vs Edad. Mortero “cem gris 42.5SR/yeso/cv = 20/40/40” y Mortero “cem gris 42.5SR/escayola/cv = 20/40/40”. Distintos curados.

De observar la **Fig. 10-1(b)** es posible concluir lo siguiente.

- Que la resistencia crece con la edad de curado, para todos los casos en que el curado se efectúa bajo altas condiciones de humedad, como es el caso del curado en “Bolsa (B)” y el curado en “Bolsa y Agua (B+A)”. No sucede lo mismo para el curado a la intemperie o curado al “Ambiente de Laboratorio (AL)”, donde la pérdida de humedad libre es notable a temprana edad, lo que ocasiona que la resistencia alcance su máximo anticipadamente y disminuya levemente con la edad. Este hecho es coincidente con los valores experimentales expuestos en **Tabla 7-2** y **Tabla 7-5** (**Capítulo 7**), para conglomerante con yeso y escayola respectivamente, en donde la resistencia no crece con la edad de curado, ya que al perder rápidamente humedad la resistencia mecánica, se mantiene o se reduce con la edad de curado, dejando de manifiesto que para desarrollar productos de hidratación se requieren disponer de condiciones ambientales de humedad.

- Que por lo general, la resistencia de los morteros curados bajo agua es menor que los curados en bolsa, como ya habíamos observado anteriormente, debido a la disolución parcial de la matriz conglomerante.
- La resistencia a compresión de los morteros con escayola es superior a los morteros con yeso. Esta diferencia de resistencia a compresión, se producen por causas similares a las diferencias de expansión producidas entre probetas de mortero con yeso y escayola, en donde la expansión con yeso es superior a la expansión con escayola (Capítulo 9); la escayola que es un material mas fino que el yeso, favorece una mayor hidratación del cemento provocando un efecto acelerador en la fijación de la Portlandita (CH), conocido también como “efecto partícula” [4] y consecuentemente, se favorece la nucleación característica de la CV con formación de productos de hidratación tipo SCH, ACH y ASCH, reduciéndose así la expansión y mejorando la resistencia mecánica.

Por otra parte, de acuerdo con los valores resumidos en las mismas **Tabla E-1(b)** y **Tabla E-2(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-1(c)** el porcentaje de agua combinada obtenida utilizando la Balanza de Halógenos (B.H.) en muestras de mortero con yeso y escayola, en función del tiempo de curado, obtenidas de probetas sometidas previamente a ensayos de resistencia mecánica.



**Fig. 10-1(c).** Pérdida de agua combinada en B.H. vs Edad. Mortero “cem gris 42.5SR/yeso/cv = 20/40/40” y Mortero “cem gris 42.5SR/escayola/cv = 20/40/40”. Distintos curados.

De observar la **Fig. 10-1(c)** es posible concluir lo siguiente.

- El valor de pérdida de agua combinada determinada para una muestra de mortero con yeso o escayola, curada en “Bolsa y Agua (B+A)” en general resulta muy similar a la pérdida de agua combinada del mismo mortero cuando es curado en ambiente de “Bolsa Plástica (B)”. Esta característica es similar a lo que permanentemente se observó en el **Capítulo 6**.

- Similarmente a lo detectado en el **Capítulo 6**, la pérdida de agua combinada en probetas curadas en ambientes de alta humedad como los es el curado en “Bolsa (B)” y el curado en “Bolsa y Agua (B+A)”, aumenta paulatinamente con la edad, lo que estaría de acuerdo con la tendencia observada en la “Rc” (ver la **Fig. 10-1(b)**). No obstante se observa una disminución de la pérdida de agua combinada entre los 90 y 180 días de curado, lo que probablemente sería por un cambio en la estequiometría de los hidratos formados.
- En el caso del mortero curado al “Ambiente de laboratorio (A.L.)”, si bien la pérdida de agua combinada sigue una tendencia similar a ambos tipos de curado descritos anteriormente, la magnitud inicial detectada resulta menor que para el curado tipo “B”, lo que indica que el curado “A.L.” induce una pérdida de humedad libre mucho mayor que el curado en “B” y por tanto al disminuir la humedad interior, no se logra la formación de productos de hidratación significativos.
- Este cambio de tendencia que presenta la pérdida de agua combinada con la edad, de un crecimiento inicial para disminuir a partir de 90 días, se explicita en el “apartado **6.2.2**” del **Capítulo 6** y tiene relación con la maduración del material cementicio que se va produciendo con la edad, con la formación significativa de productos consecuentes del proceso de hidratación, como la formación de hidratos SCH, ACH y ASCH.
- En general, los morteros con escayola presentan una mayor pérdida de agua combinada que los morteros con yeso. Esto se debe a que la escayola favorece la formación de productos de hidratación. Esta situación se refleja en una disminución de la expansión y en una mayor resistencia mecánica de los morteros de escayola frente a los morteros de yeso.

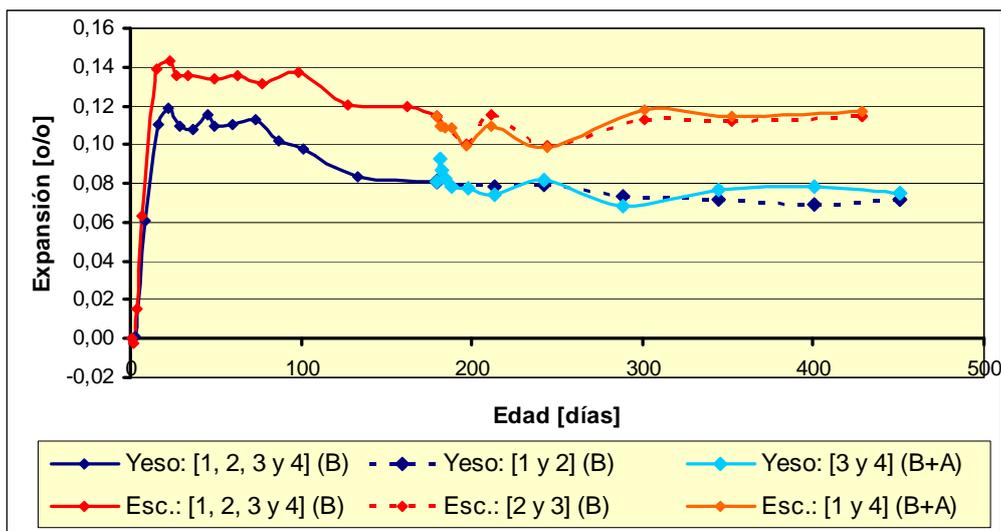
#### **10.1.2 Morteros "Cemento Gris CEM I 42,5 SR/Yeso-Escayola/CV(m) = 20/40/40"**

Se preparan series de mortero de combinación similar a las del “apartado **10.1.1**”, pero considerando una puzolana mucho más activa que la ceniza volante, como lo puede ser la ceniza volante molida “CV(m)”, con la finalidad de estudiar su impacto en la resistencia mecánica y condiciones de durabilidad.

A dichos efectos, en **Tabla E-3(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión, para la serie con yeso y ceniza volante molida compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En dicha Tabla se indican también valores promedios de expansión para dos probetas que a los 180 días son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y son sumergidas en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico.

En el mismo Anexo, en **Tabla E-4(a)** se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión, para la serie con escayola y ceniza volante molida, también compuesta de cuatro probetas individualizadas adecuadamente. Similarmente en dicha Tabla, se indican valores promedios de expansión de dos probetas que a los 180 días son sumergidas en agua por 24 horas.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-3(a)** y **Tabla E-4(a)**, es posible visualizar en **Fig. 10-2(a)** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.



**Fig. 10-2(a).** Expansión promedio vs Edad. Comportamiento de 4 probetas de Mortero “cem gris 42.5SR/yeso/cv(m) = 20/40/40” y 4 probetas de Mortero “cem gris 42.5SR/escayola/cv(m) = 20/40/40”.

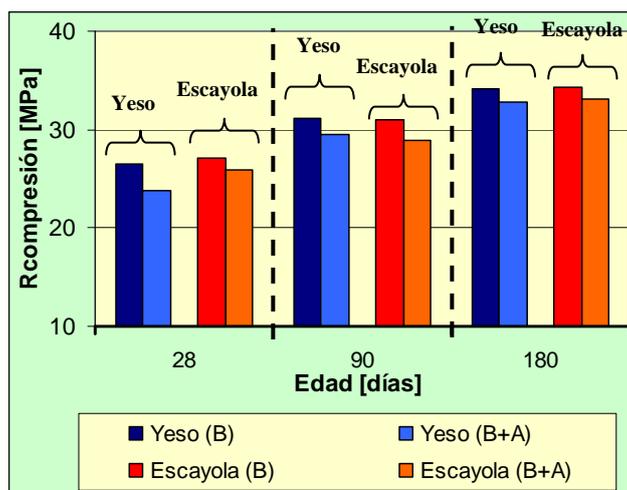
De observar **Fig. 10-2(a)** es posible concluir lo siguiente.

- En los morteros con CV(m), no hay diferencias significativas en la velocidad de crecimiento de la expansión entre morteros con yeso y morteros con escayola. Las probetas de mortero con yeso, crecen a una velocidad promedio de 0,023 mm/día, mientras que con escayola, lo hacen a 0,029 mm/día. Estas velocidades son muy superiores a las que se desarrollan en las probetas de mortero con ceniza volante sin moler (apartado 10.1.1), pero en este caso, la expansión máxima se logra en menos tiempo (16 días para el yeso y 15 días para la escayola) para posteriormente detenerse y no continuar expandiendo a mayor tiempo de curado, aún ante cambios bruscos de humedad como el que ocurre a los 180 días de edad de curado al sumergir 2 de las 4 probetas en agua por 24 horas.

- La mayor velocidad de crecimiento de la expansión en las probetas con CV(m) frente a las probetas con CV original (sin moler), se debería a una mayor reactividad del  $Al_2O_3$  presente en la CV, que reaccionaría con los sulfatos en presencia de humedad, para formar etringita. En las probetas con CV original (no molida) la velocidad de crecimiento de la expansión es menor, debido a la menor reactividad de esta CV, frente a la CV(m). Esta contribución a la expansión de las puzolanas que contienen  $Al_2O_3$  en presencia de sulfato ha sido descrita por Talero [88-89] y comentadas en apartado 9.1 (Capítulo 9).
- Cuando se utiliza CV(m) en el conglomerante, las probetas de mortero con escayola expanden más que las probetas con yeso, ya que los primeros alcanzan una expansión máxima promedio de 0,14% de la longitud original de las probetas, en cambio, los segundos, alcanzan una máxima de 0,12%. Comparando estos valores de expansión máxima con los obtenidos en probetas de mortero con ceniza volante sin moler del “apartado 10.1.1”, esto representa una disminución para el caso de los morteros con yeso y un aumento de la expansión máxima para el caso de los morteros con escayola. Este comportamiento tiene relación con la justificación indicada en el “apartado 9.1” (Capítulo 9) aunque en ese caso, la comparación se efectúa entre morteros con CV y morteros con FC, sosteniendo que la mayor reactividad de la CV facilitaría la formación de una mayor cantidad de compuestos expansivos, como la etringita. En este caso, la CV(m) está presente en cantidad igual tanto en el mortero con yeso como con escayola, sin embargo, al ser esta última más fina que el yeso, facilita la mayor reactividad y por ende esta mayor expansión que aquí se denota. Por otra parte, el yeso al ser más grueso que la escayola, tiene una menor reactividad, la que se mejora al incorporar CV(m) y por tanto mejora la formación de compuestos de hidratación que atenúan de mejor manera los efectos expansivos en comparación al uso de CV sin moler.
- A partir de los 180 días, la expansión promedio de las 2 probetas sumergidas en agua por 24 horas, es similar a las otras 2 probetas que han continuado su curado en cámara húmeda, mantenidas con plástico de protección.
- Son válidas las conclusiones del anterior “apartado 10.1.1” para explicar algunos altibajos que presentan en la curva de expansión después que han alcanzado la expansión máxima.

Respecto al control de peso, resistencia mecánica y porcentaje de agua combinada en Balanza de Halógenos (B.H.), en **Tabla E-3(b)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios en probetas con yeso de dichas mediciones experimentales. En el mismo Anexo, en **Tabla E-4(b)** se indica de acuerdo con la edad de curado, valores promedios probetas con escayola.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-3(b)** y **Tabla E-4(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-2(b)** el comportamiento conjunto de la resistencia a compresión de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.

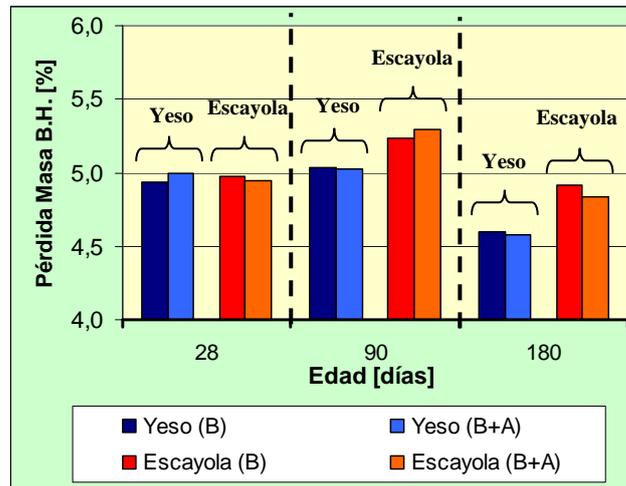


**Fig. 10-2(b).** Resistencia a Compresión vs Edad. Mortero “cem gris 42,5SR/yeso/cv(m) = 20/40/40” y mortero “cem gris 42,5SR/escayola/cv(m) = 20/40/40”. Distintos curados.

De observar [Fig. 10-2\(b\)](#) es posible concluir lo siguiente.

- Al igual que para probetas con CV sin moler del “apartado 10.1.1”, la resistencia crece con la edad de curado, para todos los casos en que el curado se efectúa en condiciones de humedad.
- La resistencia de los morteros curados bajo agua es menor que los curados en bolsa, como ya habíamos observado en experiencias anteriores. Dada la mayor reactividad de la CV(m), también se manifiesta esta diferencia a temprana edad (28 días), lo que evidencia que a esa edad están desarrollándose productos fruto de la reacción puzolánica.
- Cuando comparamos los resultados obtenidos, entre la CV original (sin moler) y la CV(m) ([Fig. 10-1\(b\)](#) con [Fig. 10-2\(b\)](#)), podemos concluir que la “Rc” de las probetas con CV(m) son netamente mejores a las probetas con CV original (sin moler). Estas diferencias son mucho más acusadas a 28 días de curado, ello es debido a la gran mejora de reactividad puzolánica que supone el proceso de molienda, y que, como observamos en los estudios de expansión ([Fig. 10-1\(a\)](#) y [Fig. 10-2\(a\)](#)), la molienda de la CV también implicaría un aumento en la velocidad de expansión, debido a la mejor reactividad del  $Al_2O_3$  presente en la CV, que favorecería la formación de etringita más rápidamente.
- La resistencia a compresión de los morteros con yeso es muy similar a los morteros con escayola. La mayor reactividad puzolánica de la CV(m) mejora notablemente el comportamiento mecánico de las mezclas de mortero con yeso frente a las mezclas con escayola.

Y también, de acuerdo con los valores resumidos en las mismas **Tabla E-3(b)** y **Tabla E-4(b)**, es posible visualizar en la **Fig. 10-2(c)** el porcentaje de agua combinada realizado en B.H. a muestras de mortero con yeso y escayola, obtenidas de probetas sometidas previamente a ensayos de resistencia mecánica, según la edad de curado.



**Fig. 10-2(c).** Pérdida de agua combinada en B.H. vs Edad. Mortero “cem gris 42.5SR/yeso/cv(m) = 20/40/40” y Mortero “cem gris 42.5SR/escayola/cv(m) = 20/40/40”. Distintos curados.

De observar **Fig. 10-2(c)** es posible concluir lo siguiente.

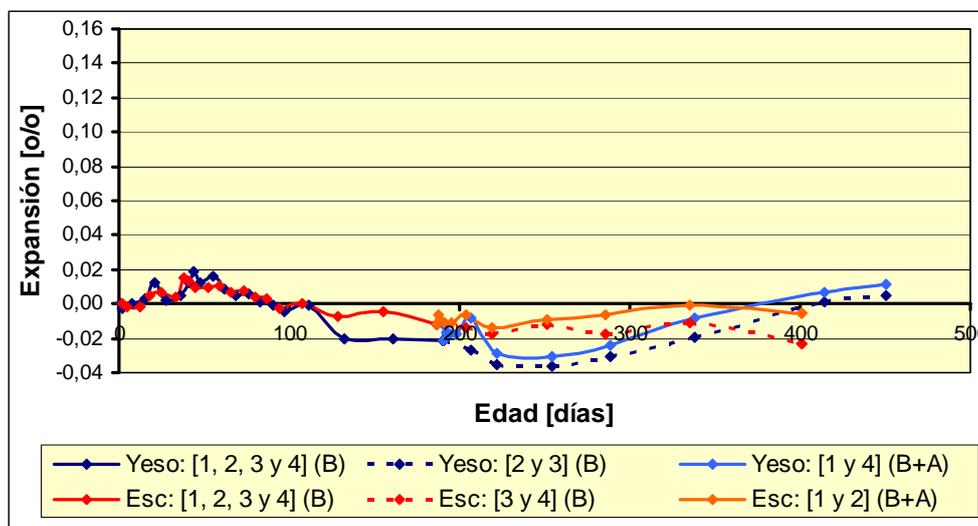
- Que hay comportamientos que son similares a los observados anteriormente y descritos en lo pertinente en el “apartado 10.1.1”, como los siguientes: no hay diferencias significativas en la pérdida de agua combinada entre morteros curados en “Bolsa y Agua (B+A)” y los curados en “Bolsa (B)” y que la pérdida de agua combinada aumenta con la edad de curado hasta los 90 días, para luego disminuir. Por ello, la justificación de estos comportamientos se dan en dicho apartado.
- En los morteros con CV(m) se manifiesta una reactividad puzolánica más temprana lo que se traduce en una mayor pérdida de agua combinada a los 28 días de edad, en comparación a los morteros homólogos con CV sin moler del “apartado 10.1.1”. A mayor edad, no hay diferencias significativas de pérdida de agua combinada entre los morteros con CV(m) y CV sin moler.

**10.1.3 Morteros Control "Cemento Gris CEM I 42,5 SR/Yeso-Escayola = 60/40"**

Este mortero control se realiza para una combinación en que se mantiene constante la proporción de yeso (ó escayola), y en donde el cemento, complementa el conglomerante sin utilizar puzolana. De este modo, el mortero control de combinación “60/40”, representa la referencia de comportamiento para los morteros de combinación “20/40/40” del apartado 10.1.1 y 10.1.2.

A dichos efectos, en **Tabla E-5(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores de expansión, para la serie con yeso compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En dicha Tabla se indican también valores promedios de expansión para dos probetas que a los 190 días son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y son sumergidas en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico. En el mismo Anexo, en **Tabla E-6(a)** se indican de acuerdo con la edad de curado, valores de expansión para la serie con escayola, también compuesta de 4 probetas individualizadas adecuadamente. Similarmente en dicha Tabla, se indican valores promedios de expansión de dos probetas que a los 187 días son sumergidas en agua por 24 horas.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-5(a)** y **Tabla E-6(a)**, es posible visualizar en la **Fig. 10-3(a)** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) según la edad de curado de las probetas de mortero control con yeso y escayola, en una escala de expansión similar a las expuestas para expansiones de probetas de mortero con CV y CV(m) de los apartados 10.1.1 y 10.1.2 respectivamente.



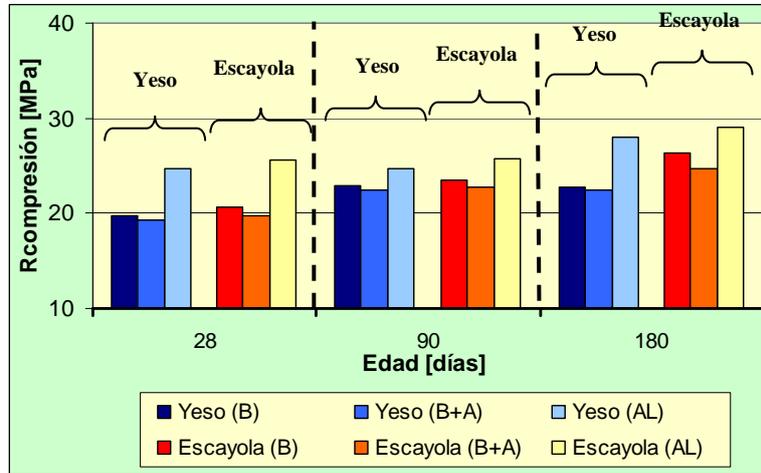
**Fig. 10-3(a).** Expansión promedio vs Edad. Comportamiento de 4 probetas Mortero Control “cem gris 42.5 SR/yeso = 60/40” y 4 probetas Mortero Control “cem gris 42.5 SR/escayola = 60/40”.

De observar la **Fig. 10-3(a)**, es posible concluir lo siguiente.

- Que las expansiones en las probetas de mortero control, independiente de utilizar yeso o escayola, son mucho menores que las expansiones en probetas de mortero con ceniza volante. Ello se debe al contenido de alúmina que tienen las cenizas volantes que producen compuestos expansivos en presencia de sulfatos, confirmando lo expuesto por Talero [88-89], ya que se realizan con un cemento resistente a sulfatos. La reacción expansiva se produce cuando se incluye una CV que contiene una cantidad significativa de  $Al_2O_3$ , como en el caso que nos ocupa. De esta forma serviría de poco utilizar un cemento con un bajo contenido de  $C_3A$  (2,38%), y por tanto resistente al ataque de sulfatos, si adicionamos una CV que va a aportar  $Al_2O_3$  para la formación de compuestos expansivos en presencia de sulfatos. La formación de compuestos expansivos, sería tanto más rápida cuanto mejor sea la reactividad de la CV, y esto ocurre cuando la CV se encuentra molida.
- Que el mortero control con yeso alcanza una expansión máxima promedio de 0,019% y 0,015% en el caso del mortero control con escayola. Estos valores muestran lo conveniente del uso de este tipo de cemento ante la presencia de sulfato cálcico hemihidrato; ya que en contraposición, cuando se utiliza cemento blanco 42,5 R para la misma composición conglomerante (apartado 9.8 del **Capítulo 9**), prácticamente no hay límite para valores de expansión máxima.
- Para la escala de representación elegida, el comportamiento expansivo de las probetas de mortero control con yeso es similar al mortero control con escayola, manteniéndose siempre un bajo nivel de expansión o retracción.
- Que la expansión inicial crece a una velocidad promedio de 0,002 mm/día en ambos tipos de morteros de control. Que el crecimiento se detiene a los 44 días aproximadamente para el yeso y a los 38 días para la escayola, para continuar con una paulatina reducción de la expansión, que incluso para transformarse en expansión negativa o retracción.
- Solo ante cambios bruscos de humedad, como puede observarse a partir de 190 días de edad para morteros de control con yeso y a 187 días de edad para morteros con escayola, la expansión tiende a crecer pero siempre a una velocidad extremadamente baja y a valores de expansión muy bajos, no superando en 0,02% la expansión promedio que muestran las probetas sin sumergir en agua, a una misma edad.

Respecto al control de peso, resistencia mecánica y porcentaje de agua combinada realizada en Balanza de Halógenos (B.H.), en **Tabla E-5(b)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios en probetas de mortero control con yeso de dichas mediciones experimentales. En el mismo Anexo, en **Tabla E-6(b)** se indica de acuerdo con la edad de curado, valores promedios probetas de mortero control con escayola.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-5(b)** y **Tabla E-6(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-3(b)** el comportamiento conjunto de la resistencia a compresión según la edad de curado, de las probetas de “Mortero Control” con yeso y escayola, para tres tipos distintos de curado utilizados.



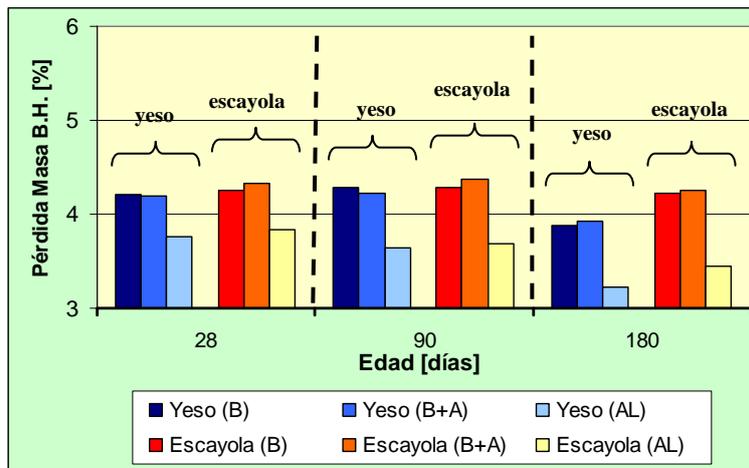
**Fig. 10-3(b).** Resistencia a Compresión vs Edad. Mortero “cem gris 42,5SR/yeso = 60/40” y mortero “cem gris 42,5SR/escayola = 60/40”. Distintos curados.

De observar **Fig. 10-3(b)** es posible concluir lo siguiente.

- Que en general, las probetas de “Mortero Control” con cemento Portland gris 42,5 SR en combinación con yeso, presentan menor resistencia a compresión que los “Morteros Control” en combinación con escayola (un 3,1% en el caso del curado en (B); un 4,7% en el caso del curado (B+A) y un 3,3% en el caso del curado (AL)).
- Que en los Morteros Control “cemento-escayola” con cemento Portland gris 42,5 SR, para esta composición y con curado de alta humedad (en “Bolsa (B) y en “Bolsa y Agua (B+A)”), a diferencia de los morteros con yeso, en los que no se observan incrementos de la “Rc” entre 90 y 180 días de curado, salvo en el caso del curado al ambiente del laboratorio, la resistencia a compresión aumenta con la edad. El bajo contenido de C<sub>3</sub>A del cemento provoca que la expansión sea moderada (**Fig. 10-3(a)**) y por tanto se impone la mayor finura y pureza de la escayola en comparación al yeso, lo que favorecería una mayor hidratación del cemento provocando un efecto acelerador en la fijación de la Portlandita (CH), facilitando la formación de productos de hidratación.
- Que la resistencia a compresión de este tipo de “Mortero Control” curados bajo agua es un poco menor que los curados en bolsa (98% en yeso y 95% en escayola, en promedio).
- Que la resistencia a compresión que fijan las probetas curadas en ambiente de laboratorio (AL) a los 28 días se mantienen sin aumentar hasta los 90

días; sin embargo a los 180 días la resistencia aumenta, a pesar de la escasa humedad libre que presentan. Este efecto se debe exclusivamente a la alta dosis de cemento que a pesar de la poca humedad presente, es suficiente para activar la hidratación. Queda en evidencia que la alta humedad provoca perjuicios en la mezcla que solo puede ser contrarrestado por una actividad puzolánica como cuando la mezcla la incorpora CV o CV(m).

Y también, de acuerdo con los valores resumidos en las mismas **Tabla E-5(b)** y **Tabla E-6(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-3(c)** el porcentaje de agua combinada realizado en B.H. según la edad de curado, en muestras de “Mortero Control” con yeso y escayola, obtenidas de probetas sometidas previamente a ensayos de resistencia mecánica, para los tres tipos distintos de curado.



**Fig. 10-3(c). Pérdida Humedad en B.H. vs Edad. Mortero “cem gris 42,5SR/yeso = 60/40” y mortero “cem gris 42,5SR/escayola = 60/40”. Distintos tipos de curado.**

De observar la **Fig. 10-3(c)** es posible concluir lo siguiente.

- El porcentaje de agua combinada determinada para una muestra de mortero con yeso o escayola, curada en “Bolsa y Agua (B+A)” en general resulta muy similar al porcentaje de agua combinada del mismo mortero cuando es curado en ambiente de “Bolsa Plástica (B)”. Nuevamente, esta característica es similar a lo que permanentemente se observó en el **Capítulo 6** en lo pertinente.
- El porcentaje de agua combinada para probetas de “Mortero Control” curadas a ambiente de laboratorio (AL) presenta siempre valores menores que las probetas de “Mortero Control” curadas con alta humedad (en (B) y en (B+A)), para los dos tipos de yeso utilizado, además, los valores de pérdida de agua combinada van disminuyendo con la edad de curado. Este

hecho nuevamente pone de manifiesto, que durante los primeros 28 días de edad se produce una significativa pérdida de humedad en la mezcla y por lo tanto se producen menos compuesto de hidratación que es la razón de esta disminución del agua combinada.

- En general, los “Morteros Control” con escayola presentan un porcentaje de agua combinada levemente superior que los “Morteros Control” con yeso. Esto se debe a que aún, en esta combinación “yeso(escayola)-cemento”, la escayola favorece la formación de productos de hidratación.
- En general, se observa un aumento muy poco significativo en el porcentaje de agua combinada hasta los 90 días de edad de curado, tanto en “Morteros Control” con yeso como con escayola. Similarmente a lo detectado en el **Capítulo 6**, el porcentaje de agua combinada en probetas curadas en ambientes de alta humedad como los es el curado en “Bolsa (B)” y el curado en “Bolsa y Agua (B+A)”, aumenta paulatinamente con la edad; pero en este caso, entre los 90 y 180 días este porcentaje de agua combinada disminuye principalmente debido a cambios en la estequiometría de los hidratos formados.
- Este cambio de tendencia que presenta el agua combinada con la edad, de un crecimiento inicial para disminuir a partir de 90 días, se explicita en el apartado **6.2.2** del **Capítulo 6**.
- Cuando se comparan el porcentaje de agua combinada del mortero control, con los morteros que contienen CV (**Fig. 10-3(c)** con **Fig. 10-2(c)** y **Fig. 10-1(c)**), se observa que en general los porcentajes de agua combinada son superiores en los morteros que contienen CV, ello es debido a los productos obtenidos en la reacción puzolánica.

## 10.2 Morteros con Cemento Portland Gris tipo CEM I 52,5 R

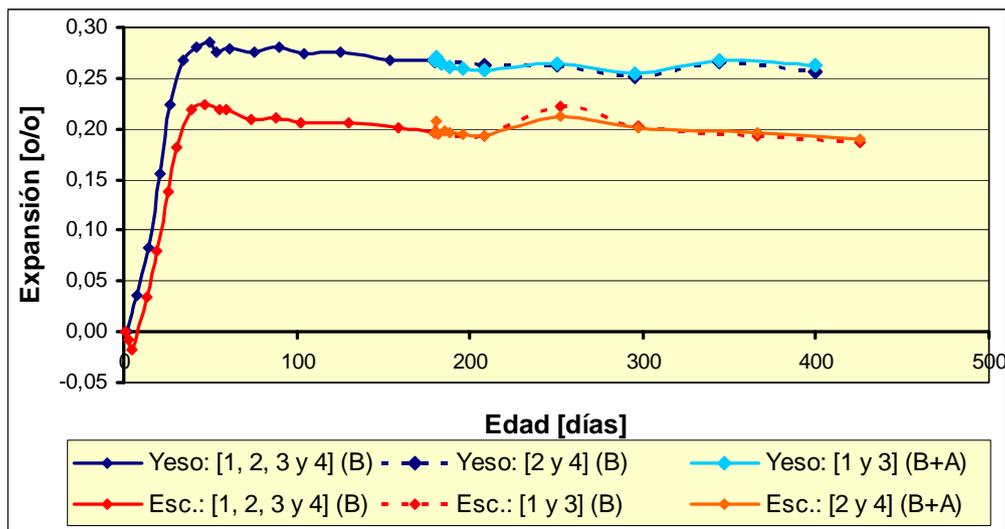
De las singularidades de las combinaciones conglomerante a utilizar, se individualizan el uso de cemento Portland gris CEM I 52,5 R (definido como Tipo H, en apartado **3.1.1** del **Capítulo 3**), que contiene un 7,75% de C<sub>3</sub>A y el uso de Arena “Tipo A” (apartado **3.1.5** del **Capítulo 3**).

### 10.2.1 Morteros “CEM I 52,5 R/Yeso-Escayola/CV = 20/40/40”

En **Tabla E-7(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión, para la serie con yeso y ceniza volante sin moler compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En dicha Tabla se indican también valores promedios de expansión para dos probetas que a los 180 días son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y son sumergidas en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico. En el mismo Anexo, en **Tabla E-8(a)** se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de

expansión, para la serie con escayola y ceniza volante sin moler, también compuesta de cuatro probetas individualizadas adecuadamente. Similarmente en dicha Tabla, se indican valores promedios de expansión de dos probetas que a los 180 días son sumergidas en agua por 24 horas.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-7(a)** y **Tabla E-8(a)**, es posible visualizar en **Fig. 10-4(a)** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.



**Fig. 10-4(a).** Expansión promedio vs Edad. Comportamiento de 4 probetas de Mortero “cem gris CEM I 52.5 R/yeso/cv = 20/40/40” y 4 probetas de Mortero “cem gris CEM I 52.5 R)/escayola/cv = 20/40/40”.

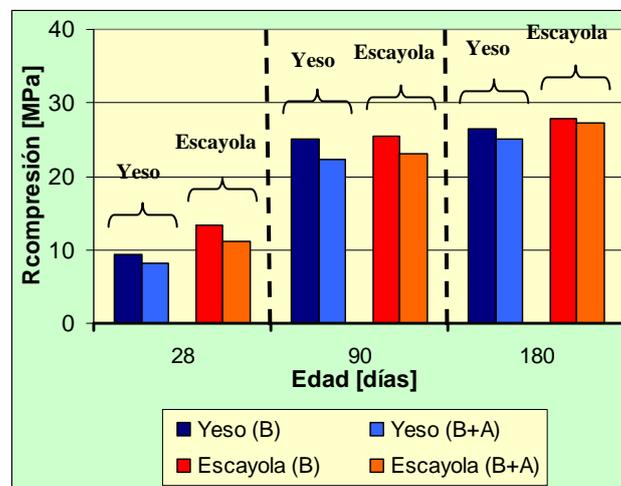
De observar la **Fig. 10-4(a)** es posible concluir lo siguiente.

- La velocidad de crecimiento inicial de la expansión no presentan diferencias significativas entre morteros con yeso y morteros con escayola. Los primeros crecen a una velocidad promedio de 0,022 mm/día y los segundos, lo hacen a 0,019 mm/día. En ambos morteros, la expansión se detiene a los 40 días de curado aproximadamente.
- Al igual que lo observado en el apartado **10.1.1**, los morteros con yeso expanden más que los morteros con escayola, ya que los primeros alcanzan una máxima en promedio de 0,28% de la longitud original de las probetas, en cambio, los segundos, alcanzan una máxima de 0,22%, lo que es el doble de la expansión máxima observada para morteros con uso de cemento “cem gris CEM I 42,5 SR” del apartado anteriormente señalado, siendo válida la justificación de estas diferencias que también se señalan en dicho apartado.

- En ambos morteros, a partir de los 180 días, la expansión promedio de las dos probetas sumergidas en agua por 24 horas, es similar a las otras dos probetas sin sumergir y mantenidas con plástico de protección.
- Que después de los 40 días de curado, en ninguno de los morteros se produce aumento de la expansión aún ante cambios bruscos de humedad, como lo que ocurre a los 180 días de curado. Una vez que el crecimiento se detiene, la expansión presenta una leve pero sostenida reducción cuya tendencia se mantiene aún ante los cambios bruscos de humedad, situación repetida en todos los morteros que contienen puzolana activa.
- Si comparamos con el estudio realizado con cemento CEM I 42,5 SR (ver [Fig. 10-1\(a\)](#)), observamos una tendencia similar si bien, en este caso tanto la velocidad de crecimiento de la expansión como la expansión máxima obtenida son superiores, lo cual es lógico teniendo en cuenta que el contenido de aluminato tricálcico es superior en este último con lo que favorecería la formación de una mayor cantidad de compuestos expansivos.

Respecto al control de peso, resistencia mecánica y porcentaje de agua combinada realizada en Balanza de Halógenos (B.H.), en [Tabla E-7\(b\)](#) del [Anexo E](#), se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios en probetas con yeso. En el mismo Anexo, en [Tabla E-8\(b\)](#) se indica de acuerdo con la edad de curado, valores promedios probetas con escayola.

De acuerdo con los valores resumidos en [Tabla E-7\(b\)](#) y [Tabla E-8\(b\)](#), es posible visualizar en [Fig. 10-4\(b\)](#) el comportamiento conjunto de la resistencia a compresión de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.

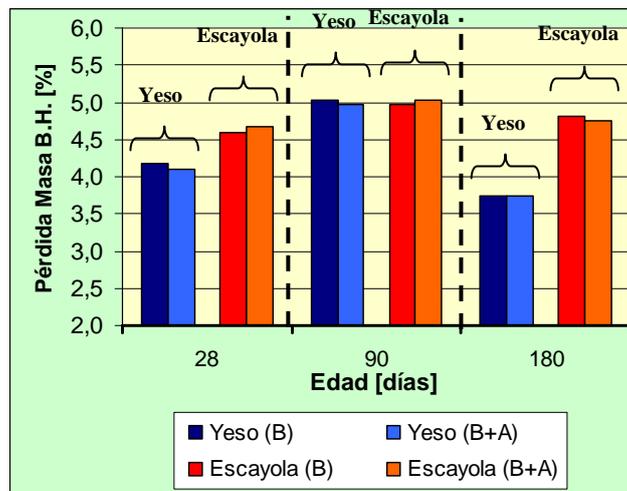


**Fig. 10-4(b).** Resistencia a Compresión vs Edad. Mortero “cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv = 20/40/40” y Mortero “cem gris CEM I 52.5R/escayola/cv = 20/40/40”. Distintos curados.

De observar la **Fig. 10-4(b)** es posible concluir lo siguiente.

- Que en los morteros “cemento/yeso(escayola)/cv” en la composición y tipos de curado aquí aplicados, la resistencia aumenta con la edad, al igual como lo observamos con cemento SR.
- Que los morteros con escayola reportan mejores resistencias que los morteros con yeso a los 28 días (46,6% superior) debido fundamentalmente a una actividad puzolánica aún incipiente donde prevalecen las diferencias de finura y pureza entre la escayola y el yeso. Sin embargo, a edades posteriores esta mayor resistencia se mantiene en promedio sólo en un 4,6% evidenciando que en ambos morteros hay actividad puzolánica que mejora notablemente la resistencia mecánica respecto a los 28 días de curado y que las diferencias entre uno y otro, se debe a estas diferencias de finura y pureza entre la escayola y el yeso.
- Que la resistencia mecánica a compresión de morteros curados bajo agua es menor que los curados en bolsa, como constatábamos en experiencias anteriores.

Y también, de acuerdo con los valores resumidos en las mismas **Tabla E-7(b)** y **Tabla E-8(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-4(c)** el comportamiento conjunto del porcentaje de agua combinada realizadas en B.H., en muestras de mortero con yeso y escayola, obtenidas de probetas sometidas previamente a ensayos de resistencia mecánica, según la edad de curado.



**Fig. 10-4(c).** Pérdida de agua combinada en B.H. vs Edad. Mortero “cem gris CEM I 52.5 R/yeso/cv = 20/40/40” y Mortero “cem gris CEM I 52.5 R/escayola/cv = 20/40/40”. Distintos curados.

De observar **Fig. 10-4(c)** es posible concluir lo siguiente.

- Similarmente a lo observado en los anteriores apartados **10.1.1** y **10.1.2**, aquí nuevamente resulta que la pérdida de agua combinada determinada para una muestra de mortero con yeso o escayola, curada en “Bolsa y Agua (B+A)” es muy similar a la pérdida de agua combinada del mismo mortero cuando es curado en ambiente de “Bolsa Plástica (B)”. También aquí, la pérdida de agua combinada aumenta con la edad de curado hasta los 90 días, para luego disminuir. Por ello, la justificación de estos comportamientos se dan en dichos apartados.
- En general, los morteros con escayola presentan una mayor pérdida de agua combinada que los morteros con yeso. Esto se debe a que la escayola favorece la formación de productos de hidratación. Esta situación se refleja en una disminución de la expansión y en una mayor resistencia mecánica de los morteros de escayola frente a los morteros de yeso. La excepción ocurre a los 90 días, en que las pérdidas de agua combinada son similares y por ende, las resistencias mecánicas de compresión resultan muy similares.

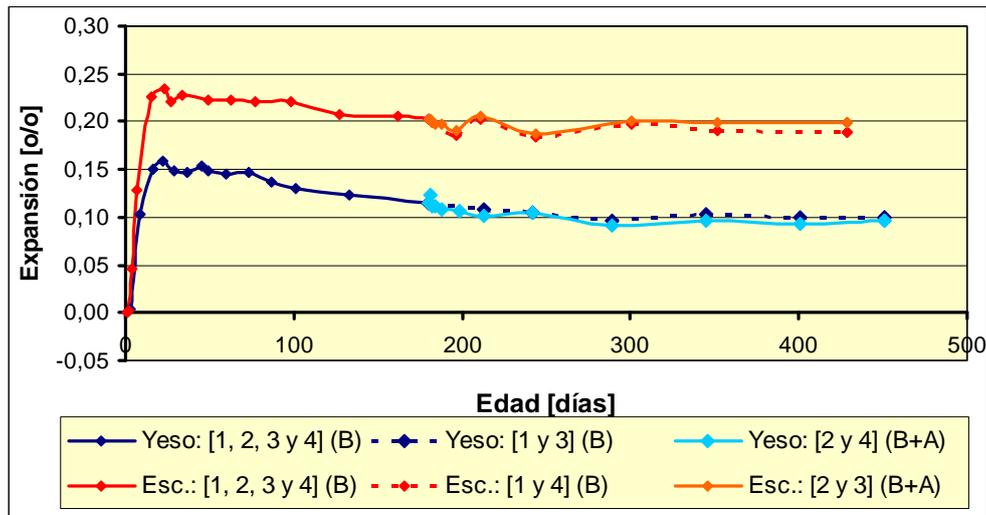
#### **10.2.2 Morteros "CEM I 52,5 R/Yeso-Escayola/CV(m) = 20/40/40"**

En el presente apartado, se preparan series de probetas de mortero de combinación similar a las del apartado **10.2.1**, pero incorporando una puzolana mucho más activa que la ceniza volante, como lo puede ser la ceniza volante molida “CV(m)”, con la finalidad de estudiar su impacto en la resistencia mecánica y condiciones de durabilidad.

A dichos efectos, en **Tabla E-9(a)** del **Anexo E**, se indican con la edad de curado, valores promedios de expansión, para la serie con yeso y ceniza volante molida compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. Se indican también valores promedios de expansión para dos probetas que a los 180 días son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y son sumergidas en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico.

En el mismo Anexo, en **Tabla E-10(a)** se indican con la edad de curado, valores promedios de expansión, para la serie con escayola y ceniza volante molida, también compuesta de cuatro probetas. Se indican también valores promedios de expansión de dos probetas que a los 180 días son sumergidas en agua por 24 horas.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-9(a)** y **Tabla E-10(a)**, es posible visualizar en **Fig. 10-5(a)** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.



**Fig. 10-5(a).** Expansión promedio vs Edad. Comportamiento de 4 probetas de Mortero “cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv(m) = 20/40/40” y 4 probetas de Mortero “cem gris CEM I 52.5R/escayola/cv(m) = 20/40/40”.

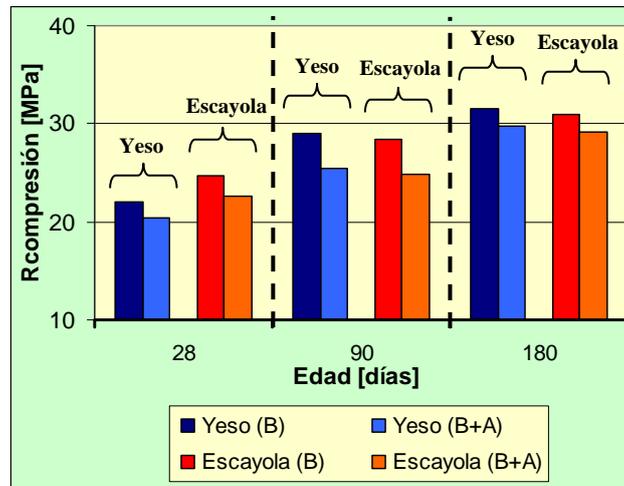
De observar la [Fig. 10-5\(a\)](#) es posible concluir lo siguiente.

- Al igual que lo ocurrido con los ensayos de expansión en las probetas del apartado [10.1.2](#), al cambiar en el conglomerante la ceniza volante sin moler (CV) por ceniza volante molida (CV(m)), no se generan diferencias significativas en la velocidad de crecimiento de la expansión entre morteros con yeso y morteros con escayola. Las probetas de mortero con yeso, inicialmente crecen a una velocidad promedio de 0,045 mm/día, mientras que con escayola, lo hacen a 0,058 mm/día. Sin embargo hay que destacar que estas velocidades son muy superiores a las que se desarrollan en las probetas de mortero con ceniza volante sin moler (apartado [10.2.1](#)), pero en este caso, la expansión máxima se logra en menos tiempo (16 días para el yeso y 15 días para la escayola) para posteriormente detenerse y no continuar expandiendo a mayor tiempo de curado, aún ante cambios bruscos de humedad como el que ocurre a los 180 días de edad de curado al sumergir 2 de las 4 probetas en agua por 24 horas. También, cuando se utiliza CV(m) en el conglomerante, las probetas de mortero con escayola expanden más que las probetas con yeso, ya que los primeros alcanzan una expansión máxima promedio de 0,23% de la longitud original de las probetas, en cambio, los segundos, alcanzan una máxima de 0,16%. Comparando estos valores de expansión máxima con los obtenidos en probetas de mortero con ceniza volante sin moler del apartado [10.2.1](#), esto representa una disminución significativa para el caso de los morteros con yeso y un muy leve aumento para el caso de los morteros con escayola. Para la explicación de estos comportamientos, es válido lo descrito en dicho apartado.

- A partir de los 180 días, la expansión promedio de las 2 probetas sumergidas en agua por 24 horas, es similar a las otras 2 probetas que han continuado su curado en cámara húmeda, mantenidas con plástico de protección.
- Cuando se comparan los resultados obtenidos con la experiencia equivalente utilizando cemento gris 42,5SR (Fig. 10-2(a)), se constata en este caso un aumento significativo de la velocidad de crecimiento de la expansión así como un aumento de la expansión, todo ello debido a la mayor cantidad de C<sub>3</sub>A presente en el CEM I 52,5R, lo que favorece la formación de compuestos expansivos.

Respecto al control de peso, resistencia mecánica y porcentaje de agua combinada realizada en Balanza de Halógenos (B.H.), en **Tabla E-9(b)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios en probetas de mortero con yeso de dichas mediciones experimentales. En el mismo Anexo, en **Tabla E-10(b)** se indica de acuerdo con la edad de curado, valores promedios probetas de mortero con escayola.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-9(b)** y **Tabla E-10(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-5(b)** el comportamiento conjunto de la resistencia a compresión de las probetas de mortero con yeso y escayola, según la edad de curado.

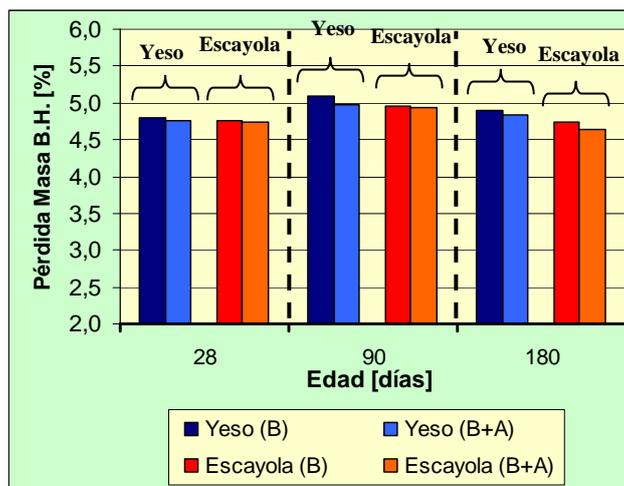


**Fig. 10-5(b).** Resistencia a Compresión vs Edad. Mortero “cem gris CEM I 52,5R/yeso/cv(m) = 20/40/40” y mortero “cem gris CEM I 52,5R/escayola/cv(m) = 20/40/40”. Distintos curados.

De observar la **Fig. 10-5(b)** es posible concluir lo siguiente.

- Al igual que para probetas con CV sin moler del apartado **10.2.1**, la resistencia mecánica de compresión crece con la edad de curado.
- La resistencia a compresión de los morteros curados bajo agua (B+A) es menor que los curados en bolsa (B).
- El uso de CV(m) en el conglomerante activa más tempranamente la formación de compuestos de hidratación que similares morteros con CV (apartado **10.2.1**), razón por la cual al comparar entre ambos morteros, las mejoras significativas de resistencia a compresión se manifiestan a 28 días de edad de curado (mejoras en promedio de 143% para yeso y 93% para escayola). A mayor edad de curado, la resistencia mecánica a compresión de los morteros con CV(m) en el conglomerante continúa siendo superior a morteros similares con CV, sin embargo, estas mejoras son menores que a 28 días de curado (en promedio 17% para yeso y 8% para escayola). La CV(m) al ser una puzolana más activa que la CV, acelera la formación de compuestos de hidratación y por ello, su acción se ve más intensa en los morteros que contienen yeso en el conglomerante ya que la mayor finura y pureza de la escayola, sin condiciones que mejoran la hidratación de los compuestos. Por esta razón, la acción de una puzolana más activa como lo es la CV(m), se ve más disminuida que en el caso del yeso.
- Al igual que en el apartado **10.2.1**, la resistencia a compresión de los morteros con escayola resulta superior a las de su similar con yeso, solo a los 28 días de edad de Curado. Dada la similitud, la justificación de este hecho que se da en dicho apartado, también es válida para esta situación.
- Cuando se comparan los resultados obtenidos con las experiencias en las que se utilizan cemento gris 42,5SR (ver **Fig. 10-2(b)**), se constata que las “Rc” obtenidas en este caso son inferiores a las que presentan las probetas con cemento gris 42,5SR, aún teniendo una categoría resistente inferior (52,5 frente a 42,5). Este hecho podría explicarse teniendo en cuenta la mayor formación de compuestos expansivos en el caso del CEM I 52,5R. debido a su mayor contenido de C<sub>3</sub>A, lo que produciría una caída de la “Rc”. La mayor producción de compuestos expansivos quedaría corroborada por las mayores expansiones producidas (ver **Fig. 10-2(a)** y **Fig. 10-5(a)**).

Y también, de acuerdo con los valores resumidos en las mismas **Tabla E-9(b)** y **Tabla E-10(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-5(c)** el comportamiento conjunto del porcentaje de agua combinada realizado en B.H. en muestras de mortero con yeso y escayola, obtenidas de probetas sometidas previamente a ensayos de resistencia mecánica, según la edad de curado.



**Fig. 10-5(c).** Pérdida de agua combinada en B.H. vs Edad. Mortero “cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv(m) = 20/40/40” y Mortero “cem gris CEM I 52.5R/escayola/cv(m) = 20/40/40”. Distintos curados.

De observar [Fig. 10-5\(c\)](#) es posible concluir lo siguiente.

- Que hay comportamientos que son similares a los observados anteriormente y descritos en lo pertinente en el apartado [10.2.1](#), como los siguientes: no hay diferencias significativas en la pérdida de agua combinada entre morteros curados en “Bolsa y Agua (B+A)” y los curados en “Bolsa (B)” y que la pérdida de agua combinada aumenta con la edad de curado hasta los 90 días, para luego disminuir. Por ello, la justificación de estos comportamientos se dan en dicho apartado.
- Es evidente una mejora de la reactividad puzolánica de los morteros con yeso en el conglomerante, por cuanto la pérdida de agua combinada aumenta notablemente respecto a similar mortero pero con CV sin moler (apartado [10.2.1](#)) a edad temprana de curado (28 días) en que se hace mas apreciable esta incipiente reactividad puzolánica que afecta notoriamente a la resistencia mecánica a compresión. Al incorporar CV(m), el mortero con yeso mejora la reactividad puzolánica a los 28 días, razón por la cual, la perdida de agua combinada es similar al mortero con escayola y la resistencia a compresión también mejora notablemente. A mayor edad, no hay diferencias significativas de perdida de agua combinada entre los morteros con CV(m) y CV sin moler, con la excepción del mortero con yeso y CV sin moler a los 180 días de curado, en que por la misma razón, la mejora de la reactividad que provoca la CV(m), lo que hace aumentar la perdida de agua combinada a valores similares al de la escayola.

### 10.2.3 Morteros con combinaciones de “Puzolanas Especiales”. “CEM I 52,5R/Yeso/CV-CV(m)/FCC(m) = 20/40/30/10”

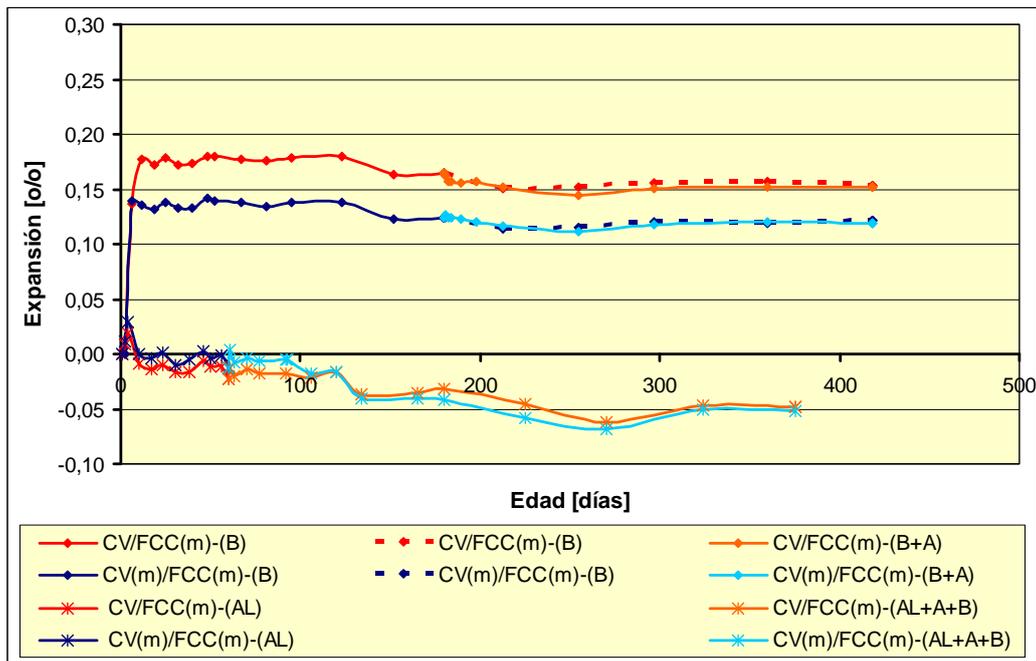
Habiendo probado morteros con ceniza volante sin moler (CV) y ceniza volante molida (CV(m)), tanto con yeso como con escayola en la composición “20/40/40”, resulta interesante conocer en esta composición el comportamiento de probetas de morteros con un solo tipo de “sulfato cálcico hemihidrato” como el “yeso”, pero con una puzolana aún más activa como lo puede ser el residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico molido “FCC(m)”. Para ello, se reemplaza parcialmente un 25% del contenido de ceniza volante, ya sea sin moler o molida, por una puzolana como el “FCC(m)” y además de su curado en cámara húmeda con plástico de protección, se estudia el comportamiento con probetas que se dejan expuestas al ambiente de laboratorio (A.L.) sin plástico de protección. Los resultados experimentales de estos morteros se agrupan en una descripción conjunta a fin de facilitar el desarrollo de una comparación de su comportamiento.

A dichos efectos, en **Tabla E-11(a)** y en **Tabla E-13(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores experimentales promedios medidos y calculados de expansión, para dos series similares con yeso, con CV y FCC(m), cada una compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente.

En la primera de ellas, las 4 probetas con plástico de protección son curadas en ambiente controlado de humedad ambiental como la cámara húmeda, indicándose también valores experimentales promedios de expansión de dos probetas que a los 180 días son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y son sumergidas en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico. En la segunda Tabla indicada, se muestran en forma resumida valores experimentales promedios medidos y calculados de expansión, para la serie similar a la anterior, pero en donde se varían las condiciones de curado; en este caso, la serie se cura inicialmente sin plástico de protección a ambiente de laboratorio, para luego, a los 60 días de curado, sumergir las 4 probetas en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico.

Similarmente, en **Tabla E-12(a)** y en **Tabla E-14(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores experimentales promedios medidos y calculados de expansión, para dos series homólogas con yeso, con CV(m) y FCC(m), cada una compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. El curado de las probetas y la inmersión de probetas en agua, sigue procedimientos iguales a los indicados para **Tabla E-11(a)** y **Tabla E-13(a)** explicitados en el párrafo anterior.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-11(a)**, **Tabla E-12(a)**, **Tabla E-13(a)** y **Tabla E-14(a)** es posible visualizar en **Fig. 10-6(a)** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) de probetas de composición “cemento-yeso-CV-FCC(m)” y “cemento-yeso-CV(m)-FCC(m)”, según la edad de curado, para distintos curados.



**Fig. 10-6(a).** Expansión promedio vs Edad. Comportamiento conjunto de 4 probetas de Mortero “cem gris CEM I 52.5R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10” y 4 probetas de Mortero “cem gris CEM I 52.5R/yeso/CV(m)/FCC(m) = 20/40/30/10”. Curadas en cámara húmeda protegidas con plástico ((B) y (B+A)) y curadas a ambiente de laboratorio, sin protección de plástico ((AL) y (AL+A+B)).

De observar **Fig. 10-6(a)**, respecto a las probetas curadas con plástico de protección en ambiente controlado como lo es el curado en cámara húmeda, es posible concluir lo siguiente.

- Que en este tipo de morteros la mayor reactividad puzolánica se manifiesta en una reducción de la expansión máxima. Comparativamente, para morteros con “CV-FCC(m)” alcanza una máxima de 0,18% y para “CV(m)-FCC(m)” alcanza 0,14%.
- Que en este tipo de morteros la expansión inicial crece a velocidades promedio muy similares (0,093 mm/día), con detención del crecimiento de la expansión a los 8 días para morteros con “CV-FCC(m)” y de 6 días para morteros con “CV(m)-FCC(m)”, aproximadamente. Es decir, al mantener constante los otros componentes del conglomerante (cemento y yeso), a mayor reactividad puzolánica, el desarrollo de la expansión dura menos tiempo y por tanto, expansión máxima es menor. En este caso, la mayor reactividad se obtiene para morteros con “CV(m)-FCC(m)” en el conglomerante.

- En estas probetas como en todas las otras estudiadas que incorporan puzolana activa, una vez que se alcanza la expansión máxima, continúa una paulatina y leve reducción de la expansión y que aún, ante cambios bruscos de humedad, la expansión no vuelve a crecer, continúa manteniendo la tendencia establecida.
- A partir de los 180 días, la expansión promedio de las probetas sumergidas en agua por 24 horas, es similar a sus homólogas sin sumergir y mantenidas con plástico de protección en cámara húmeda.

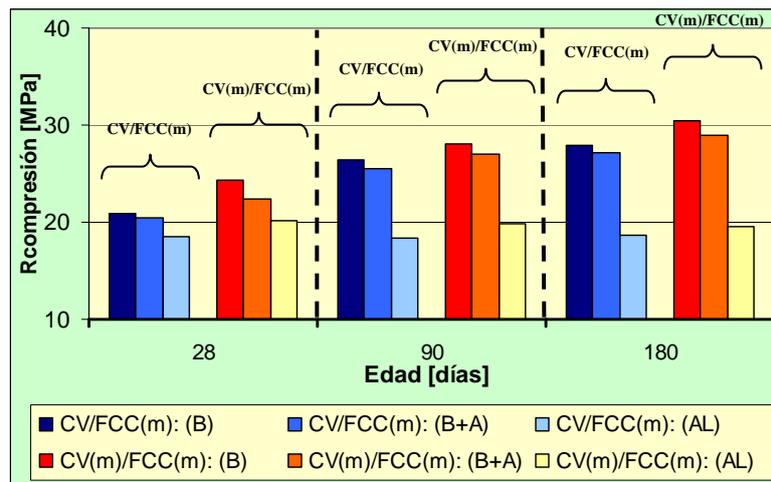
De igual modo, de observar **Fig. 10-6(a)**, respecto a las probetas curadas en ambiente no controlado como lo es el curado en ambiente de laboratorio, sin plástico de protección, es posible concluir lo siguiente.

- Que la exposición de las probetas, sin plástico de protección al “Ambiente del Laboratorio (AL)” reduce la expansión máxima notablemente; de 0,18 a 0,02% para “CV-FCC(m)” y de 0,14 a 0,03% para “CV(m)-FCC(m)”. Luego de alcanzar la expansión máxima, el proceso expansivo se revierte, iniciando una paulatina contracción o retracción dentro de valores muy moderados. Este es un resultado experimental muy interesante ya que, pondría de manifiesto que un curado en ambiente seco impediría cualquier proceso expansivo y como se indica en el apartado siguiente se trataría de un proceso irreversible.
- La exposición de las probetas al ambiente de laboratorio y sin protección de plástico, provoca una rápida pérdida de humedad desde el interior de la masa, detectándose a los 10 días de curado una pérdida promedio de masa por pérdida de humedad de un 7,6% (respecto a la masa inicial luego del desmolde de las probetas), lo que representa una pérdida equivalente el 89% del total de la pérdida que se registra hasta los 60 días (**Tabla E-13(a)** y **Tabla E-14(a)** del **Anexo E**). Esta rápida pérdida de humedad desde el interior de la masa del mortero es la causante de la reducción de la expansión máxima, ya que reduce la hidratación de los compuestos cementicios. Sin embargo, al intentar devolverle condiciones de alta humedad al mortero (para lo cual, las probetas a los 60 días de edad son sumergidas en agua por 24 horas y luego protegidas con plástico para evitar la rápida pérdida de humedad), se aprecia que la tendencia de la expansión no se altera, manteniéndose a valores negativos (retracción) muy bajos. Esta es una condición requiere de un estudio específico, más aplicado, a fin de conseguir condiciones mejoradas en la expansión, sin obtener una merma considerable en la resistencias a compresión, como lo hemos comprobado en apartados anteriores.

Los resultados experimentales de control de peso, resistencia mecánica y porcentaje de agua combinada en Balanza de Halógenos (B.H.), según edad de curado, en probetas de mortero de cemento con yeso e incorporación de “CV-FCC(m)” en el conglomerante, con curado en “Bolsa (B)”, similar a las

condiciones de curado controlado de las probetas de expansión, se muestran en **Tabla E-11(b)** del **Anexo E**. En el mismo Anexo, en **Tabla E-12(b)** se indica de acuerdo con la edad de curado, similares valores experimentales promedios de probetas de mortero de cemento con yeso e incorporación “CV(m)-FCC(m)”, también curadas en “Bolsa”, similar a las condiciones de curado controlado de las probetas de expansión.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-11(b)** y **Tabla E-12(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-6(b)** el comportamiento conjunto de la resistencia a compresión según la edad de curado de las probetas de mortero del tipo “cem gris 52,5R/yeso/CV/FCC(m)” y “cem gris 52,5R/yeso/CV(m)/FCC(m)”.



**Fig. 10-6(b).** Rc vs Edad. Morteros “cem gris 52,5R/Yeso/CV//FCC(m) = 20/40/30/10” y Morteros “cem gris 52,5R/Yeso/CV(m)//FCC(m) = 20/40/30/10”. Distintos curados.

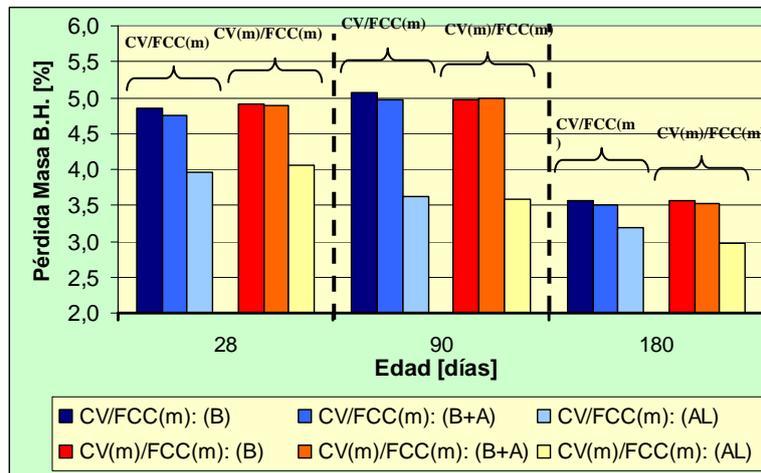
De observar **Fig. 10-6(b)** es posible concluir lo siguiente.

- Al igual que todos los casos anteriores en que se utiliza puzolana activa en el conglomerante cementicio (apartado 10.1.1, apartado 10.1.2, apartado 10.2.1 y apartado 10.2.2), en todos los casos que se aplica curado en condiciones de alta humedad, la resistencia a compresión crece con la edad de curado. Todas las probetas de mortero curadas al ambiente del laboratorio fijan tempranamente (28 días de curado) valores de resistencia a compresión, que prácticamente no varían a mayores edades de curado (90 y 180 días de curado).
- De igual manera, en todos los casos anteriores en que se utiliza puzolana activa, la resistencia a compresión de los morteros curados bajo agua (B+A) es menor que los curados en bolsa (B). En todos los casos en que las probetas de mortero son curadas expuestas al ambiente del laboratorio, la resistencia a compresión resulta incluso menor que los morteros curados

bajo agua, si bien como observábamos en la Fig. 10-6(a), no sufrían expansiones.

- Que en este tipo de mortero con yeso, con curado de alta humedad, la composición puzolánica “CV(m)/FCC(m)” reporta en promedio un 9% de mejores resistencias que la composición “CV/FCC(m)”. De acuerdo con la conclusión anterior, la acción del “FCC(m) mejora notablemente la resistencia mecánica a temprana edad (28 días de curado) y la acción de la CV(m) hace las diferencia, principalmente a mayores edades de curado.
- Que la resistencia de morteros de este tipo de composición puzolánica curados bajo agua (B+A) es un poco menor que los curados en bolsa (B); 97% para “CV/FCC(m)” y 94% en “CV(m)/FCC(m)”.

Y también, de acuerdo con los valores resumidos en las mismas Tabla E-11(b) y Tabla E-12(b), es posible visualizar en Fig. 10-6(c) el porcentaje de agua combinada en B.H. en muestras de mortero con yeso y “CV-FCC(m)” y “CV(m)-FCC(m)”, obtenidas de probetas sometidas previamente a ensayos de resistencia mecánica, según la edad de curado.



**Fig. 10-6(c).** Pérdida de agua combinada en B.H. vs Edad. Mortero “cem gris CEM I 52.5R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10” y Mortero “cem gris CEM I 52.5R/yeso/CV(m)/FCC(m) = 20/40/30/10”. Distintos curados.

De observar Fig. 10-6(c) es posible concluir lo siguiente.

- Que hay comportamientos que son similares a los observados anteriormente y descritos en lo pertinente en el apartado 10.2.1 y en el apartado 10.2.2, como los siguientes: no hay diferencias significativas en la pérdida de agua combinada entre morteros curados en “Bolsa y Agua (B+A)” y los curados en “Bolsa (B)” y que la pérdida de agua combinada

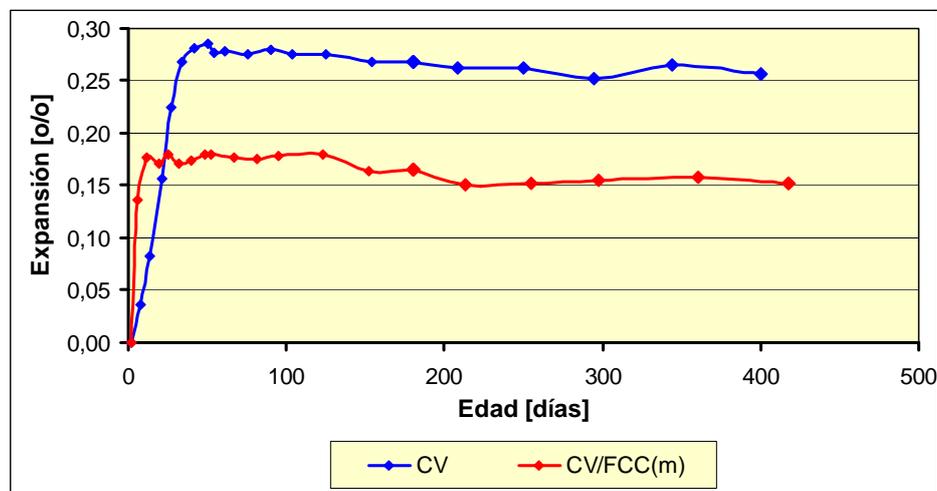
aumenta con la edad de curado hasta los 90 días, para luego disminuir. Por ello, la justificación de estos comportamientos se dan en dichos apartados.

- No hay diferencias significativas de pérdida de agua combinada entre morteros con “CV-FCC(m)” y morteros con “CV(m)-FCC(m)” (aunque las pérdidas de este último son levemente superiores al primero), por lo que también se puede decir que no hay diferencias significativas entre la reactividad puzolánica entre ellos. Al respecto, anteriormente se había concluido que las resistencias mecánica de compresión de los morteros con “CV(m)-FCC(m)” son en promedio un 9% superiores que los morteros con “CV-FCC(m)”.

#### 10.2.4 Análisis comparativo del efecto de la “CV” frente a la combinación “CV/FCC(m)”

A fin de estudiar la influencia de una puzolana más reactiva que la ceniza volante “CV”, como lo es el Catalizador Gastado de Craqueo Catalítico molido “FCC(m)”, se procede a comparar los resultados experimentales de morteros de combinación del tipo “CEM I 52,5R/yeso/CV = 20/40/40”, con morteros del tipo “CEM I 52,5R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10”, anteriormente expuestos en los apartados 10.2.1 y 10.2.3, respectivamente.

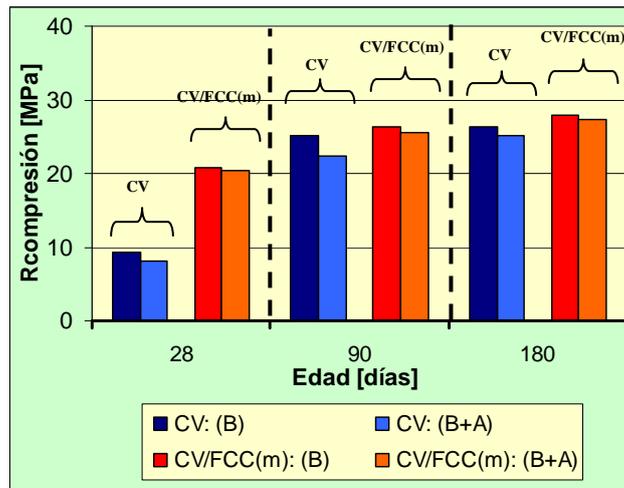
a) **Expansiones:** En la Fig 10-7(a), se visualizan las curvas representativas del comportamiento expansivo conjunto de morteros que contienen “CV” y “CV/FCC(m)” como puzolana.



**Fig. 10-7(a).** Expansión promedio vs edad. Comportamiento de probetas de Mortero “CEM I 52,5 R/yeso/CV = 20/40/40” y “CEM I 52,5 R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10”.

De la Fig. 10-7(a) puede observarse que la mayor reactividad puzolánica aportada por la inclusión de “FCC(m)” a la “CV” provoca un aumento significativo de la velocidad de la expansión inicial (de 0,022 a 0,093 mm/día), además de una reducción de expansión máxima (de 0,28% a 0,18%). Adicionalmente esto se traduce en que la máxima expansión se logra en un menor tiempo comparativamente que con “CV” (12 días frente a 40 días).

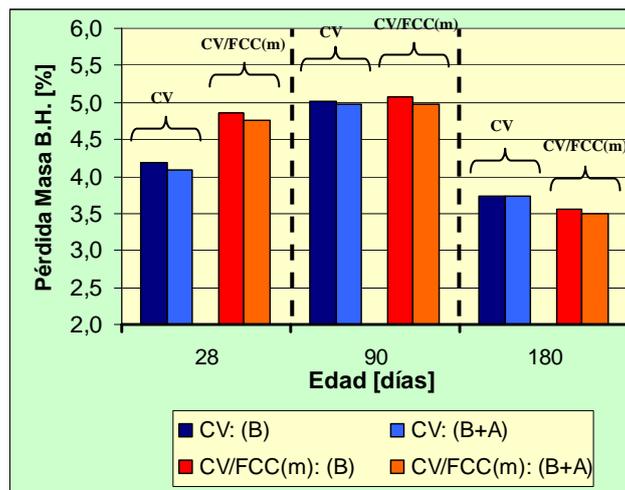
**b) Resistencia a compresión:** En la Fig 10-7(b), se visualiza la evolución conjunta de la resistencia a compresión con la edad de curado de morteros que contienen “CV” y “CV/FCC(m)” como puzolana.



**Fig. 10-7(b).** Resistencia a compresión vs edad. Mortero “CEM I 52,5 R/yeso/CV = 20/40/40” y Mortero “CEM I 52,5 R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10”.

De la Fig. 10-7(b) puede observarse que utilizar la composición puzolánica “CV/FCC(m)” en el conglomerante, reporta en general mejores resistencias a compresión que los morteros que utilizan solo “CV”; es posible destacar que a los 28 días de curado, la diferencia con los morteros que utilizan “CV” es de 125% superior debido a la gran actividad puzolánica temprana realizada. Sin embargo a edades posteriores, esta mayor resistencia se mantiene en promedio sólo en un 5% evidenciando una actividad puzolánica más tardía de la “CV” respecto a la “CV/FCC(m)”.

**c) Porcentaje de agua combinada:** En la Fig 10-7(c), se visualiza la evolución conjunta del agua combinada con la edad de curado de morteros que contienen “CV” y “CV/FCC(m)” como puzolana.



**Fig. 10-7(c).** Pérdida de agua combinada en B.H. vs edad. Mortero “CEM I 52,5 R/yeso/CV = 20/40/40” y Mortero “CEM I 52,5 R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10”.

De la **Fig. 10-7(c)** puede observarse la mayor pérdida de agua combinada de los morteros con “CV/FCC(m)” respecto a los morteros con “CV” a los 28 días, evidenciando que esta mayor reactividad puzolánica favorece la formación de productos de hidratación. Esta situación se refleja en una mayor resistencia mecánica y en que a esa edad, los morteros con “CV/FCC(m)” han alcanzado la expansión máxima y los morteros con “CV” ya han superado esa expansión y aún continúan expandiendo.

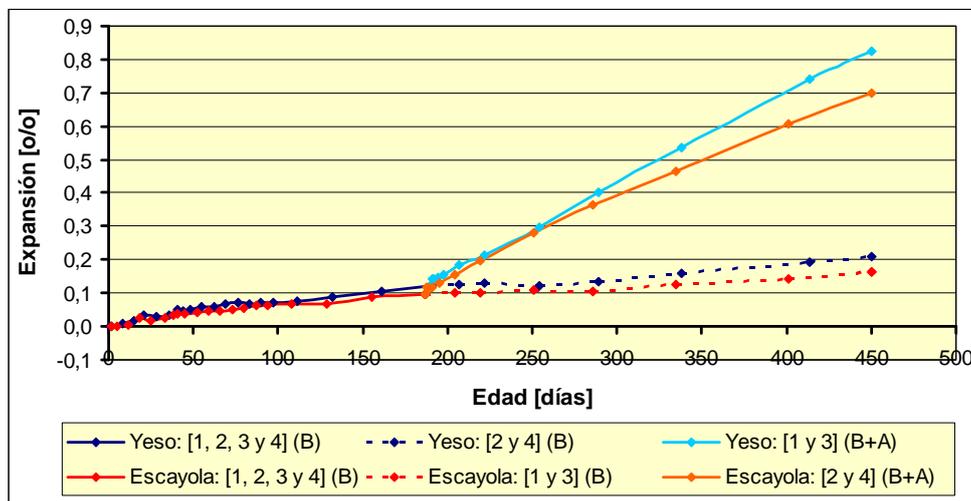
Finalmente puede concluirse, que la sustitución del 25% de contenido original de “CV” en el conglomerante por “FCC(m)” (10% del total), mejora significativamente en comportamiento del mortero tanto desde el punto de vista de la resistencia a compresión como desde el punto de vista de la durabilidad.

### 10.2.5 Morteros Control "CEM I 52,5 R/Yeso-Escayola = 60/40"

Nuevamente, con la finalidad de disponer de una referencia comparativa, estos morteros de control se realizan para una combinación en que se mantiene constante la proporción de yeso (ó escayola) y en donde el cemento, complementa el conglomerante sin uso de puzolana. Así, el mortero control “cem/yeso = 60/40”, representa la referencia de comportamiento para los morteros “cem Gris 52,5R/yeso/PZ” del apartado **10.2.1**, del apartado **10.2.2** y del apartado **10.2.3**, para “Puzolana (PZ)” como la “CV”, como la “CV(m)”, como combinación “CV/FCC(m)” y combinación “CV(m)/FCC(m)”, respectivamente. A su vez, el mortero control “cem/escayola = 60/40”, representa la referencia de comportamiento para los morteros “cem Gris 52,5R/escayola/PZ” del apartado **10.2.1** y del apartado **10.2.2**, para “Puzolana (PZ)” como la “CV” y la “CV(m)”, respectivamente.

A dichos efectos, en **Tabla E-15(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios de expansión, para la serie con yeso compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En dicha Tabla se indican también valores promedios de expansión para dos probetas que a los 190 días son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y son sumergidas en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico. En el mismo Anexo, en **Tabla E-16(a)** se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios de expansión, para la serie con escayola, también compuesta de cuatro probetas individualizadas adecuadamente. Similarmente en dicha Tabla, se indican valores promedios de expansión de dos probetas que a los 187 días son sumergidas en agua por 24 horas.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-15(a)** y **Tabla E-16(a)**, es posible visualizar en **Fig. 10-8(a)** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) según la edad de curado de las probetas de mortero control con yeso y escayola.



**Fig. 10-8(a). Expansión promedio vs Edad. Comportamiento de 4 probetas Mortero Control “cem gris CEM I 52.5 R/yeso = 60/40” y 4 probetas Mortero Control “cem gris CEM I 52.5 R/escayola = 60/40”.**

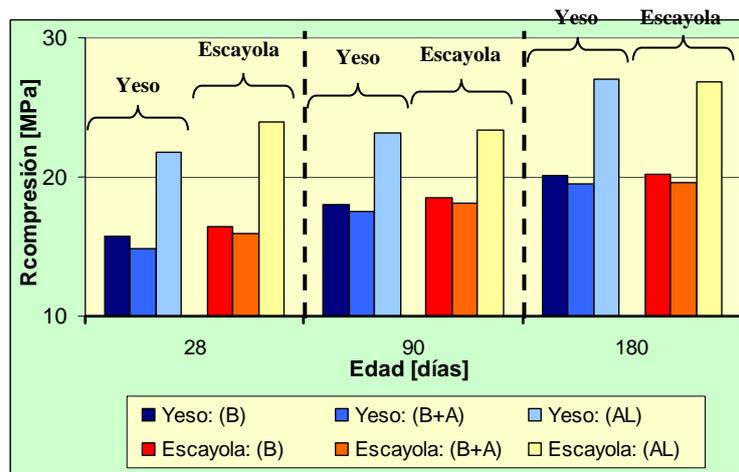
De observar la **Fig. 10-8(a)**, es posible concluir lo siguiente.

- Que la expansión de la serie mortero control con yeso es levemente superior en todo momento a la serie con escayola, para similares condiciones de curado o humedad.
- Que la expansión de ambas series de morteros control, con probetas curadas en cámara húmeda con plástico de protección, presenta un crecimiento

monótonamente creciente con la edad y no presenta tendencia hacia una disminución o detención. Sin embargo, ante un cambio importante de humedad, como el que se le hace a las probetas a los 190 días de edad de curado, en que se sumergen en agua por 24 horas, la expansión aumenta linealmente a una velocidad mucho más rápida en comparación a las probetas sin sumergir en agua y curadas en cámara húmeda. Esta expansión, hasta la última edad de ensayo, no presenta tendencia a disminuir, lo que evidencia que en este tipo de morteros, la expansión depende del contenido de humedad y que ella pasa a ser una limitante importante en su uso con fines constructivos cuando no se incorpora una puzolana activa en el conglomerante.

Respecto al control de peso, resistencia mecánica y porcentaje de agua combinada en Balanza de Halógenos (B.H.), en **Tabla E-15(b)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios en probetas de mortero control con yeso de dichas mediciones experimentales. En el mismo Anexo, en **Tabla E-16(b)** se indica de acuerdo con la edad de curado, valores promedios probetas de mortero control con escayola.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-15(b)** y **Tabla E-16(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-8(b)** el comportamiento conjunto de la resistencia a compresión según la edad de curado, de las probetas de “Mortero Control” con yeso y escayola, para tres tipos distintos de curado utilizados.

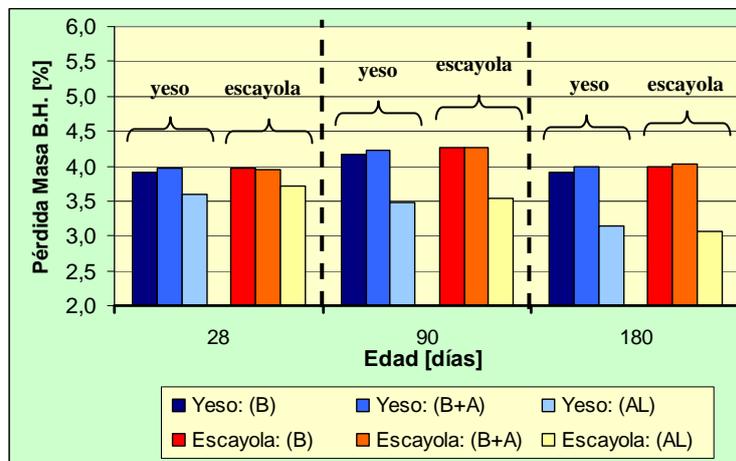


**Fig. 10-8(b).** Resistencia a Compresión vs Edad. Mortero “cem gris CEM I 52,5R/yeso = 60/40” y mortero “cem gris CEM I 52,5R/escayola = 60/40”. Distintos curados.

De observar la **Fig. 10-8(b)** es posible concluir lo siguiente.

- Que en general, las probetas de “Mortero Control” con cemento Portland gris tipo CEM I 52,5 R, para esta composición y con curado de alta humedad (en “Bolsa (B) y en “Bolsa y Agua (B+A)””, cuando se combinan con escayola, presentan mayor resistencia mecánica a compresión que los “Morteros Control” en combinación con yeso. Esta mayor resistencia va disminuyendo con la edad de curado hasta valores muy similares a 180 días.
- Que en estos “Morteros Control”, para esta composición y con curado de alta humedad, la resistencia a compresión aumenta con la edad.
- Que la resistencia a compresión de este tipo de “Mortero Control” curados bajo agua es un poco menor que los curados en bolsa.
- Que la resistencia que fijan las probetas curadas en ambiente de laboratorio muestran una tendencia a aumentar con la edad. Nuevamente, este efecto se debe exclusivamente a la alta dosis de cemento que a pesar de la poca humedad presente, es suficiente para activar la hidratación. Este hecho ratifica que la composición “cemento-yeso” presenta incompatibilidades frente a la humedad, y es la razón de que los morteros curados a ambiente de laboratorio, es decir con muy poca humedad interior, tengan mejor resistencia que los curados en ambiente muy húmedos.

Y también, de acuerdo con los valores resumidos en las mismas [Tabla E-15\(b\)](#) y [Tabla E-16\(b\)](#), es posible visualizar en [Fig. 10-8\(c\)](#) el porcentaje de agua combinada en B.H. según la edad de curado, en muestras de “Mortero Control” con yeso y escayola, obtenidas de probetas sometidas previamente a ensayos de resistencia mecánica, para los tres tipos distintos de curado.



**Fig. 10-8(c).** Pérdida Humedad en B.H. vs Edad. Mortero “cem gris CEM I 52,5R/yeso = 60/40” y mortero “cem gris CEM I 52,5R/escayola = 60/40”. Distintos tipos de curado.

De observar **Fig. 10-8(c)** es posible concluir lo siguiente.

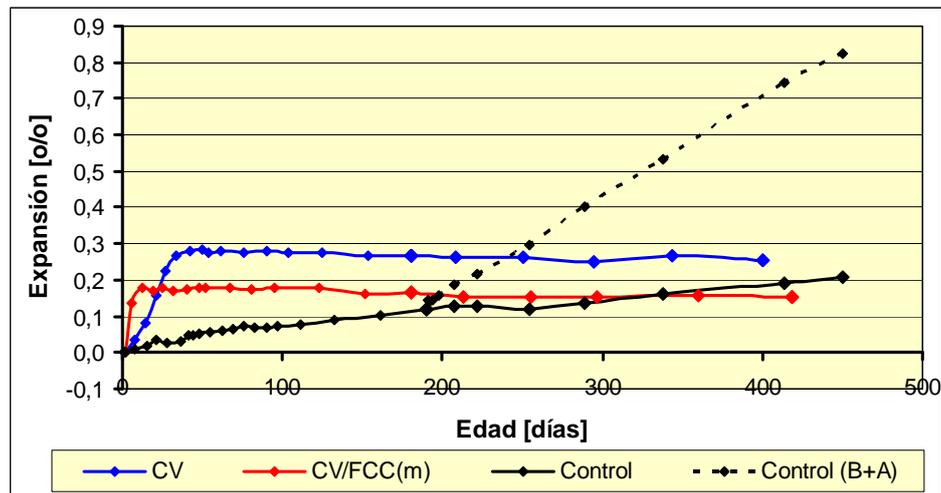
- El valor de pérdida de agua combinada determinada para una muestra de este tipo de mortero con yeso o escayola, curada en “Bolsa (B)” en general resulta muy similar a la pérdida de agua combinada del mismo mortero cuando es curado en “Bolsa y Agua (B+A)”. Nuevamente, esta característica es similar a lo que permanentemente se observó en lo pertinente en el **Capítulo 6** y en todos los apartados anteriores, en el presente Capítulo.
- La pérdida de agua combinada para probetas de “Mortero Control” curadas a ambiente de laboratorio (AL) presenta siempre valores menores que las probetas de “Mortero Control” curadas con alta humedad (en (B) y en (B+A)), para los dos tipos de yeso utilizado, además, los valores de pérdida de agua combinada van disminuyendo con la edad de curado. Este hecho nuevamente pone de manifiesto, que durante los primeros 28 días de edad se produce una significativa pérdida de humedad en la mezcla y por lo tanto se producen menos compuestos de hidratación que el mismo mortero cuando es curado en condiciones de alta humedad; es la razón de esta disminución del agua combinada que se aprecia durante todo el tiempo de este ensayo.
- En general, los “Morteros Control” con escayola presentan una pérdida de agua combinada levemente superior que los “Morteros Control” con yeso. Esto se debe a que aún, en esta combinación “yeso(escayola)-cemento”, la escayola favorece más que el yeso la formación de productos de hidratación y consecuentemente, se favorece el traspaso de agua libre a agua combinada.
- En general, se observa un aumento muy poco significativo en la pérdida de agua combinada hasta los 90 días de edad de curado, tanto en “Morteros Control” con yeso como con escayola. Similarmente a lo detectado en el **Capítulo 6**, la pérdida de agua combinada en probetas curadas en ambientes de alta humedad como los es el curado en “Bolsa (B)” y el curado en “Bolsa y Agua (B+A)”, aumenta paulatinamente con la edad; pero en este caso entre los 90 y 180 días esta pérdida de agua combinada disminuye principalmente debido a cambios en la microestructura de la pasta del mortero por cambios químicos que están ocurriendo en la estequiometría de los hidratos.
- Este cambio de tendencia que presenta la pérdida de agua combinada con la edad, de un crecimiento inicial para disminuir a partir de 90 días, se explicita en el apartado **6.7** del **Capítulo 6** y tiene relación con la maduración del material cementicio que se va produciendo con la edad.

#### ***10.2.6 Análisis comparativo de morteros con puzolana frente a morteros control, sin puzolana***

A fin de estudiar las condiciones que aporta la incorporación de puzolanas al conglomerante de un mortero de base cementicia del tipo “cemento/yeso = 60/40” (mortero control), en donde una parte del cemento se reemplaza por una puzolana activa, se procede a comparar los resultados obtenidos previamente en el apartado **10.2.5** (mortero control) con los resultados obtenidos en el apartado

**10.2.1** para morteros de combinación “cemento/yeso/CV = 20/40/40” y también con los resultados obtenidos en el apartado **10.2.3** para morteros de combinación “cemento/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10”.

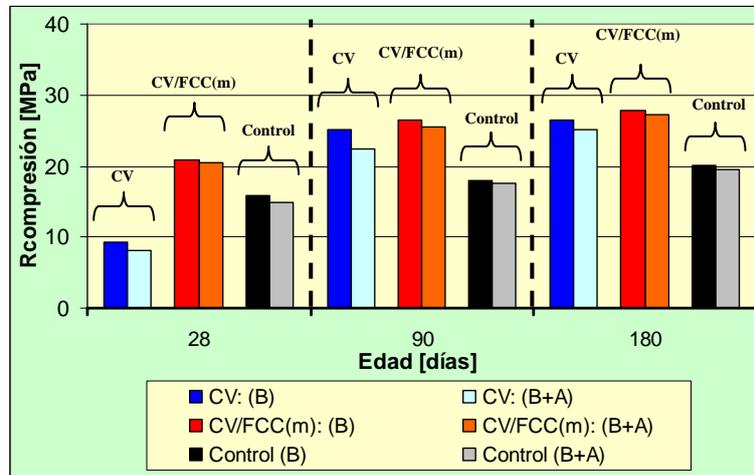
*a) Expansiones:* En la **Fig 10-9(a)**, se visualizan las curvas representativas del comportamiento expansivo conjunto de morteros control con morteros que contienen “CV” y “CV/FCC(m)” como puzolana.



**Fig. 10-9(a).** Expansión vs edad. Mortero Control “Cem 52,5R/yeso = 60/40”, Mortero “Cem 52,5R/yeso/CV=20/40/40” y Mortero “Cem 52,5R/yeso/CV/FCC(m)=20/40/30/10”.

De la **Fig. 10-9(a)** puede observarse que la expansión inicial en las probetas de mortero control, son mucho menores que las expansiones en probetas de mortero con “CV” y con “CV/FCC(m)”. Este hecho sería debido (como se indica en apartado **10.1.2** anterior), a la  $Al_2O_3$  presente en ambas puzolanas (CV y FCC) que facilitarían la formación de cantidades adicionales de etringita. La mayor velocidad de expansión del mortero con CV/FCC(m) frente al que únicamente contiene CV, sería debida a la mayor reactividad del FCC. Sin embargo, esta expansión es aparente ya que su magnitud depende de la humedad disponible, hecho que se corrobora al sumergir en agua por 24 horas probetas de mortero control, lo que sucede a los 190 días de edad de curado. A partir de ese instante, la expansión en las probetas de mortero control, inician un proceso de crecimiento lineal, sin límite aparente superando rápidamente las expansiones de los morteros con “CV” y con “CV/FCC(m)”. Recordemos que estas últimas, a los 180 días de edad de curado algunas probetas también fueron sumergidas por 24 horas en agua, sin afectar sus procesos expansivos, los que a esa edad se encontraban estabilizados en su valores de expansión máxima correspondiente. Este hecho demuestra que la puzolana transforma a la mezcla cemento/yeso en una mezcla con mejor comportamiento a la humedad, que sin la presencia de este material.

**b) Resistencia a compresión:** En la **Fig 10-9(b)**, se visualiza la evolución de la resistencia a compresión con la edad de curado del mortero control conjuntamente con morteros que contienen “CV” y “CV/FCC(m)” como puzolana.

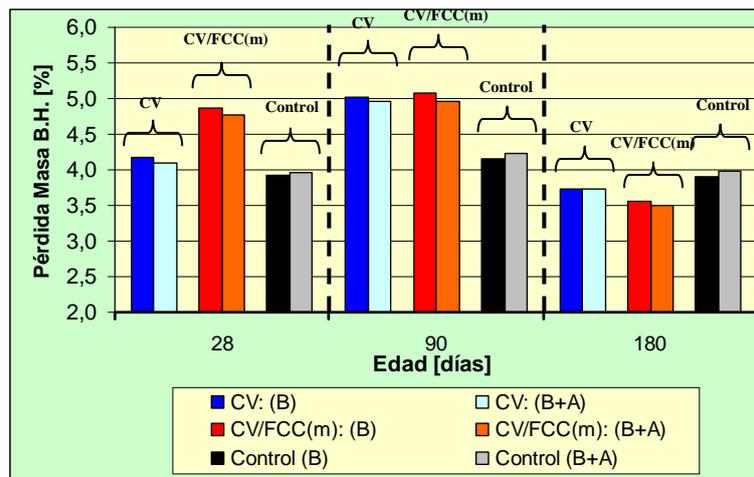


**Fig. 10-9(b).** Resistencia a compresión vs edad. Mortero Control “Cem 52,5R/yeso = 60/40”, Mortero “Cem 52,5R/yeso/CV = 20/40/40” y Mortero “Cem 52,5R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10”.

De la **Fig. 10-9(b)** puede observarse que solo a los 28 días de curado el mortero control supera en resistencia a compresión al mortero con “CV” y ello se debe a la incipiente reactividad puzolánica de la “CV”, demostrada también en que a esa edad aún se encuentra en proceso expansivo. No ocurre lo mismo con la “CV/FCC(m)” por cuanto a los 28 días de curado presenta una mayor reactividad puzolánica, ya que a esa edad el proceso expansivo se encuentra estabilizado y por tanto con una resistencia a compresión mayor que el mortero control.

Puede también observarse que a partir de los 90 días de curado la reactividad puzolánica de la “CV” ha mejorado notablemente, con un proceso expansivo estabilizado y por tanto con un aumento significativo de la resistencia a compresión logrando valores comparativamente similares al mortero con “CV/FCC(m)”, muy superior a los valores del mortero control.

**c) Porcentaje de agua combinada:** En la **Fig 10-9(c)**, se visualiza la evolución del agua combinada con la edad de curado del mortero control conjuntamente con morteros que contienen “CV” y “CV/FCC(m)” como puzolana.



**Fig. 10-9(c).** Pérdida de agua combinada en B.H. vs edad. Mortero Control “Cem 52,5R/yeso = 60/40”, Mortero “Cem 52,5R/yeso/CV = 20/40/40” y Mortero “Cem 52,5R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10”.

De la Fig. 10-9(c) puede observarse que hay una relación directa entre el mayor porcentaje de agua combinada en los morteros con una mayor reactividad en el conglomerante, asociada a su vez con valores de resistencia a compresión; en otras palabras, la formación de productos de hidratación favorece el traspaso de agua libre a agua combinada, lo que se refleja en una mayor resistencia mecánica. Como es el caso hasta los 90 días de edad de curado ya que a mayor edad, se producen cambios en la estequiometría de los hidratos formados y consecuentemente la reducción observada en los valores de pérdida de agua combinada.

Finalmente puede concluirse, que la sustitución de las 2/3 partes del contenido original de “cemento” en el conglomerante por una puzolana activa como lo es la “CV” y la “CV/FCC(m)” (40% del total), mejora significativamente en comportamiento del mortero frente a la humedad, tanto desde el punto de vista de la resistencia a compresión como desde el punto de vista de la durabilidad.

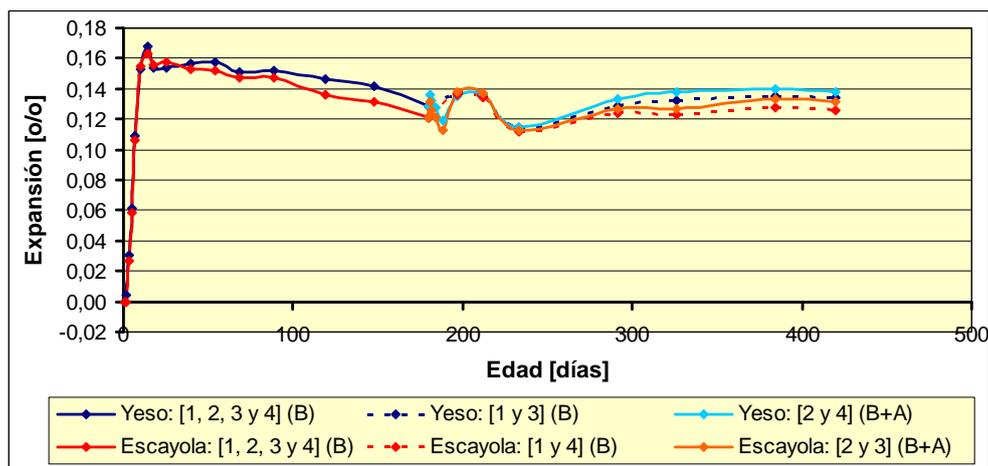
### 10.3 Morteros con Cemento Portland Gris tipo CEM I 52,5 R Cemex

De las singularidades de las combinaciones conglomerante a utilizar, se individualizan el uso de cemento Portland gris CEM I 52,5 R (definido como Tipo G, en Capítulo 3), que contiene 8,14% de C<sub>3</sub>A y cuyo proveedor es la empresa Cemex, manteniéndose esta indicación para diferenciarlo del cemento utilizado en el apartado 10.2 anterior. En los morteros se utiliza Arena “Tipo A” y a diferencia de los morteros estudiados en apartado 10.1 y apartado 10.2, en este caso se estudian morteros con CV(m) en el conglomerante.

10.3.1 Morteros "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso-Escayola/CV(m) = 20/40/40"

En **Tabla E-17(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión, para la serie con yeso y ceniza volante molida compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En dicha Tabla se indican también valores promedios de expansión para dos probetas que a los 180 días son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y son sumergidas en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico. En el mismo Anexo, en **Tabla E-18(a)** se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión, para la serie con escayola y ceniza volante molida, también compuesta de cuatro probetas individualizadas adecuadamente. Similarmente en dicha Tabla, se indican valores promedios de expansión de dos probetas que a los 180 días son sumergidas en agua por 24 horas.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-17(a)** y **Tabla E-18(a)**, es posible visualizar en **Fig. 10-10(a)** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.



**Fig. 10-10(a).** Expansión promedio vs Edad. Comportamiento de 4 probetas de Mortero “cem gris 52.5 R Cemex/yeso/CV(m) = 20/40/40” y 4 probetas de Mortero “cem gris 52.5 R Cemex/escayola/CV(m) = 20/40/40”.

De observar **Fig. 10-10(a)** es posible concluir lo siguiente.

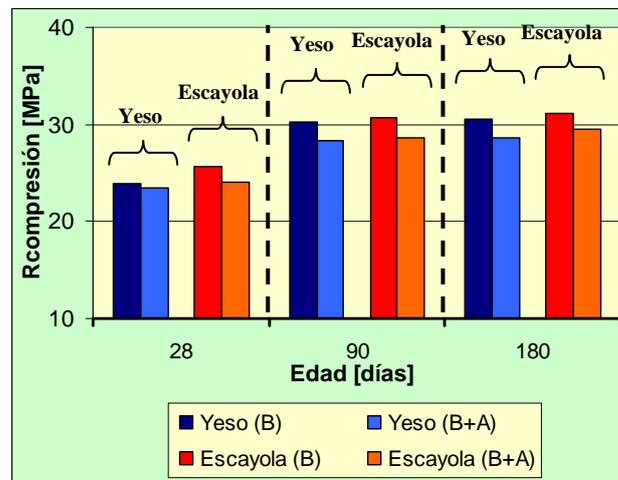
- En la fase inicial, el crecimiento de la expansión por unidad de tiempo es muy similar, observándose en los morteros con yeso una velocidad de

expansión de 0,051 mm/día y en los morteros con escayola, 0,053 mm/día. Comparando esta fase de crecimiento con lo observado previamente al utilizar cemento Portland gris del “tipo H” para morteros homólogos del apartado **10.2.2**, en donde la velocidad de expansión para el yeso fue de 0,045 mm/día y para escayola fue de 0,058 mm/día; es decir, no hay diferencias significativas por este concepto con los morteros homólogos con cemento “tipo H”.

- En las probetas de mortero con yeso y en las probetas de mortero con escayola, el crecimiento de la expansión se detiene a los 14 días de curado aproximadamente. En los primeros, la expansión máxima promedio llega a 0,17% y en los segundos, llega a 0,16%. Es decir, un comportamiento muy similar, el que continúa con dicha tendencia con el tiempo de curado, observándose que una vez que la expansión alcanza su valor máximo, inicia un proceso de leve decrecimiento, sin aumento de la expansión, incluso ante cambios bruscos de humedad, como lo observado en las probetas que a los 180 días de curado se sumergen en agua por 24 horas. Al comparar la expansión máxima de los morteros del presente estudio (con cemento tipo G) con los morteros homólogos del apartado **10.2.2** (con cemento tipo H), puede apreciarse que los morteros con yeso presentan una expansión máxima de 0,16%, es decir, muy similar al del presente estudio.; sin embargo diferencias significativas se aprecian para morteros con escayola, ya que los homólogos presentan un valor de 0,23%, lo que es significativamente mayor que 0,16% del presente estudio.
- La razón de esta similitud de comportamiento expansivo en fase de crecimiento inicial y la diferencia poco significativa que se obtiene en la velocidad de expansión, bien puede ser debida a a las características similares del cemento (CEM I para ambos) y que el cemento “tipo H” tiene un 7,75% de  $C_3A$ , mientras que el cemento “tipo G” tiene un 8,14% de  $C_3A$  (apartado **3.1.1, Capítulo 3**). Para las diferencias significativas encontradas en la expansión máxima de los morteros con escayola, ellas pueden ser por variaciones propias de los procedimientos experimentales y también debido a que el cemento tipo H frente a la escayola presenta una mayor reactividad y que se manifiesta en una mayor velocidad inicial de expansión (0,058 contra 0,053 mm/día).

Respecto al control de peso, resistencia mecánica y porcentaje de agua combinada en Balanza de Halógenos (B.H.), en **Tabla E-17(b)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios en probetas con yeso. En el mismo Anexo, en **Tabla E-18(b)** se indica de acuerdo con la edad de curado, valores promedios probetas con escayola.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-17(b)** y **Tabla E-18(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-10(b)** el comportamiento conjunto de la resistencia a compresión de las probetas con yeso y escayola, según la edad de curado.

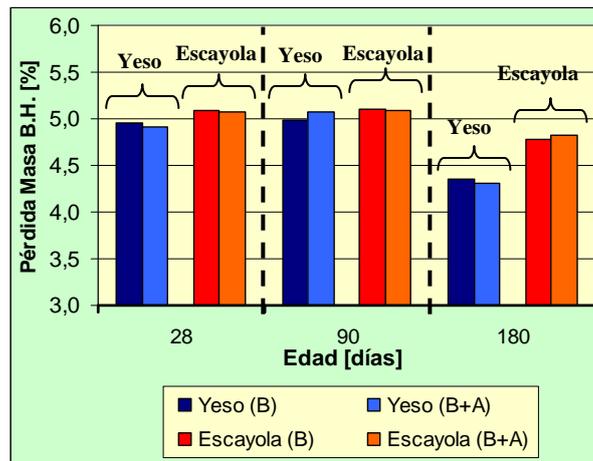


**Fig. 10-10(b).** Resistencia a Compresión vs Edad. Mortero “cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV(m) = 20/40/40” y Mortero “cem gris 52.5R Cemex/escayola/CV(m) = 20/40/40”. Distintos curados.

De observar [Fig. 10-10\(b\)](#) es posible concluir lo siguiente.

- Que en los morteros “cemento/yeso(escayola)/CV(m)” con los curados aquí aplicados, la resistencia aumenta con la edad, con tendencia a estabilizarse.
- Que la resistencia a compresión entre morteros con escayola y morteros con yeso tienden a igualarse ya que las diferencias entre ellos, a partir de los 90 días son poco significativas, como ocurría en experiencias anteriores.
- La resistencia a compresión de morteros con curado “B+A” es ligeramente menor que curado en “B”.
- Comparando la resistencia mecánica de estos morteros elaborados con cemento “tipo G”, con los morteros homólogos del apartado [10.2.2](#) que utilizan cemento “tipo H”, podemos ver que no hay diferencias significativas entre ellos, aunque los morteros con cemento “tipo G” presentan un leve mejor comportamiento hasta los 90 días de curado, a 180 días, esta diferencia es insignificante, como cabría esperar teniendo en cuenta que ambos cementos presentan prácticamente la misma cantidad de  $C_3A$ .

Y también, de acuerdo con los valores resumidos en las mismas [Tabla E-17\(b\)](#) y [Tabla E-18\(b\)](#), es posible visualizar en [Fig. 10-10\(c\)](#) el comportamiento conjunto del porcentaje de agua combinada en B.H. en muestras de mortero con yeso y escayola, obtenidas de probetas sometidas previamente a ensayos de resistencia mecánica, según la edad de curado.



**Fig. 10-10(c).** Pérdida de agua combinada en B.H. vs Edad. Mortero “cem gris 52.5 R Cemex/yeso/CV(m) = 20/40/40” y Mortero “cem gris 52.5 R Cemex/escayola/CV(m) = 20/40/40”. Distintos curados.

De observar **Fig. 10-10(c)** es posible concluir lo siguiente.

- Se observa un comportamiento del agua combinada con la edad de curado similar a lo observado anteriormente en el apartado **10.2.2**, como los siguientes: no hay diferencias significativas en la pérdida de agua combinada entre morteros curados en “Bolsa y Agua (B+A)” y los curados en “Bolsa (B)” y que la pérdida de agua combinada aumenta levemente con la edad de curado hasta los 90 días, para luego disminuir. Por ello, la justificación de estos comportamientos se dan en dicho apartado.
- La poca diferencia que se observa en las perdidas de agua combinada a los 28 días de curado, respecto de la obtenida a los 90 días de curado, se debe a la reactividad puzolánica temprana que provee la CV(m); también a 28 días se observa una reactividad puzolánica en el mortero con yeso casi similar a la obtenida para morteros con escayola, lo que también se observa a 90 días de curado, por lo que el uso de CV(m), por su alta reactividad puzolánica, hace ambivalente en uso de uno u otro sulfato cálcico hemihidrato para construcción, como lo es el yeso o la escayola.

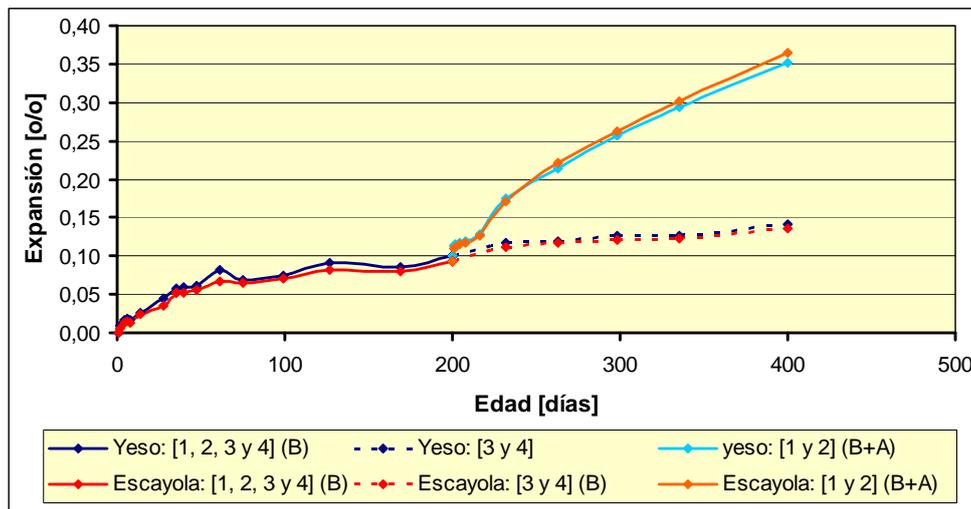
### 10.3.2 Morteros Control "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso(Escayola) = 60/40"

Como referencia comparativa, se elaboran morteros de control para una combinación en que se mantiene constante la proporción de yeso (ó escayola) y en donde el cemento, complementa el conglomerante sin uso de puzolana. De este modo, el mortero control “cem/yeso = 60/40”, representa la referencia de comportamiento para los morteros “cem gris 52,5R Cemex/yeso/CV(m)” y el mortero control “cem/escayola = 60/40”, representa la referencia de

comportamiento para los morteros “cem gris 52,5R Cemex/escayola/CV(m)”, ambos del anterior apartado 10.3.1.

A dichos efectos, en **Tabla E-19(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios de expansión, para la serie con yeso compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En dicha Tabla se indican también valores promedios de expansión para dos probetas que a los 200 días son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y son sumergidas en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico. En el mismo Anexo, en **Tabla E-20(a)** se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios de expansión, para la serie con escayola, también compuesta de cuatro probetas individualizadas adecuadamente. Similarmente en dicha Tabla, se indican valores promedios de expansión de dos probetas que a los 200 días son sumergidas en agua por 24 horas.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-19(a)** y **Tabla E-20(a)**, es posible visualizar en **Fig. 10-11(a)** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) según la edad de curado de las probetas de mortero control con yeso y escayola.



**Fig. 10-11(a).** Expansión promedio vs Edad. Comportamiento de 4 probetas Mortero Control “cem gris 52.5R Cemex/yeso = 60/40” y 4 probetas Mortero Control “cem gris 52.5R Cemex/escayola = 60/40”.

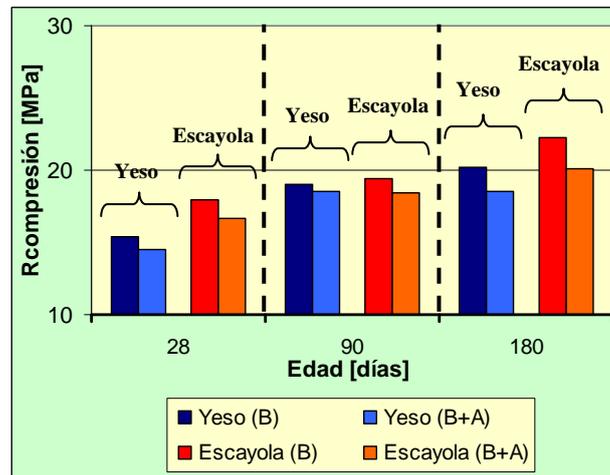
De observar **Fig. 10-11(a)**, es posible concluir lo siguiente.

- En general, el comportamiento expansivo de estos morteros de control, que utilizan cemento “tipo G”, son de tendencia similar a los vistos en el apartado 10.2.4 para cemento “tipo H”; por lo que las justificaciones de comportamiento que se dan en dicho apartado en lo pertinente, son válidas

para este caso en estudio. Sin embargo, diferencias significativas se producen en los casos que probetas se sumergen en agua por 24 horas, en que las expansiones que demuestran los morteros con cemento “tipo H”, son muy superiores (casi el doble) de las que se observan en este caso, con cemento “tipo G”. Este hecho podría explicarse en parte, teniendo en cuenta que el cemento de “tipo G” presenta un porcentaje ligeramente mayor de  $C_3A$ , si bien la diferencia en el contenido de  $C_3A$  es menor del 1%, no justificaría totalmente este aumento tan brusco de la expansión.

Respecto al control de peso, resistencia mecánica y porcentaje de agua combinada en Balanza de Halógenos (B.H.), en **Tabla E-19(b)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios en probetas de mortero control con yeso de dichas mediciones experimentales. En el mismo Anexo, en **Tabla E-20(b)** se indica de acuerdo con la edad de curado, valores promedios probetas de mortero control con escayola.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-19(b)** y **Tabla E-20(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-11(b)** el comportamiento conjunto de la resistencia a compresión según la edad de curado, de las probetas de “mortero control” con yeso y escayola, para los tres tipos diferentes de curado utilizados.



**Fig. 10-11(b).** Resistencia a Compresión vs Edad. Mortero “cem gris 52,5R Cemex/yeso = 60/40” y mortero “cem gris 52,5R Cemex/escayola = 60/40”. Diferentes curados.

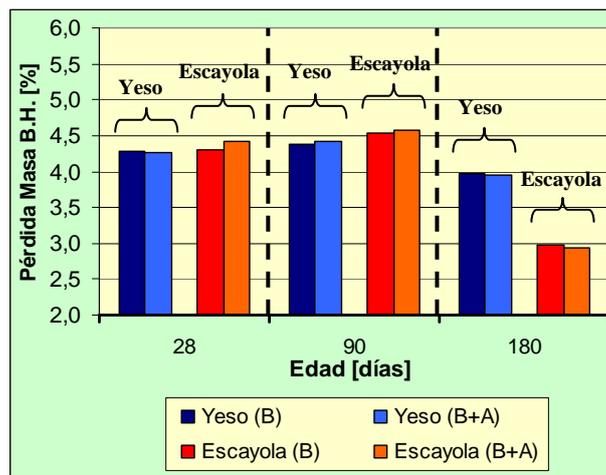
De observar **Fig. 10-11(b)** es posible concluir lo siguiente.

- Que en general, la resistencia a compresión que se observa para estas probetas de “mortero control” con cemento “tipo G” y con curado de alta humedad (en “Bolsa (B) y en “Bolsa y Agua (B+A)”), presenta una tendencia de comportamiento con la edad de curado, similar al observado, para “morteros control” elaborados con cemento “tipo H” del apartado

**10.2.4.** Entre estas similitudes, se pueden nombrar las siguientes: la resistencia a compresión crece con la edad de curado; que las probetas curadas en “Bolsa (B)”, presentan mejores resistencias a compresión que las probetas curadas en “Bolsa y Agua (B+A)” y que los morteros con escayola, presentan mayor resistencia mecánica que los morteros con yeso.

- Los “morteros control” con cemento “tipo G” y con curado de alta humedad, presentan mejor resistencia mecánica que los “morteros control” con cemento “tipo H”. En efecto, los curados en “B” y mezclados con escayola presentan un 7,9% superior; los curados en “B+A” y escayola, presentan un 4,1% superior. Los curados en “B” y mezclados con yeso solo presentan un 1,1% superior; los curados en “B+A” y escayola, presentan un 0,4% inferior. Esto demuestra que el cemento “tipo H” tiene mejor comportamiento frente a la alta humedad que el cemento “tipo G” y ello se debe probablemente a que el “tipo H” posee menos C3A que el “tipo G” (7,75% frente a 8,14%).

Y también, de acuerdo con los valores resumidos en las mismas **Tabla E-19(b)** y **Tabla E-20(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-11(c)** el comportamiento conjunto del agua combinada en B.H. según la edad de curado, en muestras de “Mortero Control” con yeso y escayola, obtenidas de probetas sometidas previamente a ensayos de resistencia mecánica, para los tres tipos distintos de curado.



**Fig. 10-11(c).** Pérdida Humedad en B.H. vs Edad. Mortero “cem gris 52,5R Cemex/yeso =60/40” y mortero “cem gris 52,5R Cemex/escayola = 60/40”. Diferentes tipos de curado.

De observar **Fig. 10-11(c)** es posible concluir lo siguiente.

- Que también, la pérdida de agua combinada que se observa para estas probetas de “Mortero Control” con cemento Portland gris “tipo G” y con

curado de alta humedad, presenta una tendencia de comportamiento con la edad de curado, similar a lo observado en lo pertinente, para “Morteros Control” elaborados con cemento Portland gris “tipo H” del apartado **10.2.4**. Entre estas similitudes, se pueden nombrar las siguientes: los morteros con escayola presentan una pérdida de agua combinada levemente superior que los morteros con yeso; que las pérdidas de agua combinada resultan muy similar entre probetas curadas en “B” y curadas en “B+A” y que la pérdida de agua combinada crece levemente con la edad hasta los 90 días de curado, para luego disminuir a los 180 días.

- Que a 28 y 90 días de curado, las pérdidas de agua combinada en este tipo de mortero, elaborados con cemento Portland gris “tipo G”, con yeso y escayola, y con curado de alta humedad, presentan una mayor pérdida de agua combinada que aquellos de la misma edad elaborados con cemento Portland gris “tipo H” del apartado **10.2.4**.
- Que a 180 días de curado, las pérdidas de agua combinada en este tipo de mortero, elaborados con cemento Portland gris “tipo G”, con escayola y con curado de alta humedad, presentan una menor pérdida de agua combinada que aquellos de la misma edad elaborados con cemento Portland gris “tipo H” del apartado **10.2.4**. No ocurre lo mismo para morteros elaborados con yeso, donde las pérdidas de agua combinada resultan similares.

#### **10.4 Morteros especiales con Cemento Portland Gris tipo CEM I 52,5 R Cemex**

Habiéndose desarrollado en el **Capítulo 8** la búsqueda de una composición “Conglomerante” óptima a fin de mejorar la resistencia mecánica, en esta oportunidad y trabajando con el mismo cemento, se preparan idénticas combinaciones del “Conglomerante” para estudiar su expansión, dándole importancia al uso de aditivo superplastificante y variando, en algunos casos, condiciones de curado a fin de establecer comparativamente sus efectos. Es lo especial de este mortero.

Las indicaciones de dosificación, materiales y elaboración, se dan en el respectivo **Capítulo 8**, con la diferencia que se ha utilizado como árido fino “Arena Tipo B” (apartado **3.1.5, Capítulo 3**), por cuanto a la fecha de elaboración de estas probetas, la “Arena Tipo A” se había agotado. El curado de las probetas se efectúa por lo general en cámara húmeda con plástico de protección, introduciéndose una variación en que una serie de similar mortero es curada en cámara húmeda, pero sin plástico de protección, lo que se indica adecuadamente.

Como se ha indicado previamente, la resistencia mecánica a distintas edades de curado asociadas a cada serie de expansión se ha realizado previamente y se encuentran tabuladas en el **Capítulo 8** para las condiciones de curado en “Bolsa (B)” y curado en “Bolsa y Agua (B+A)”;

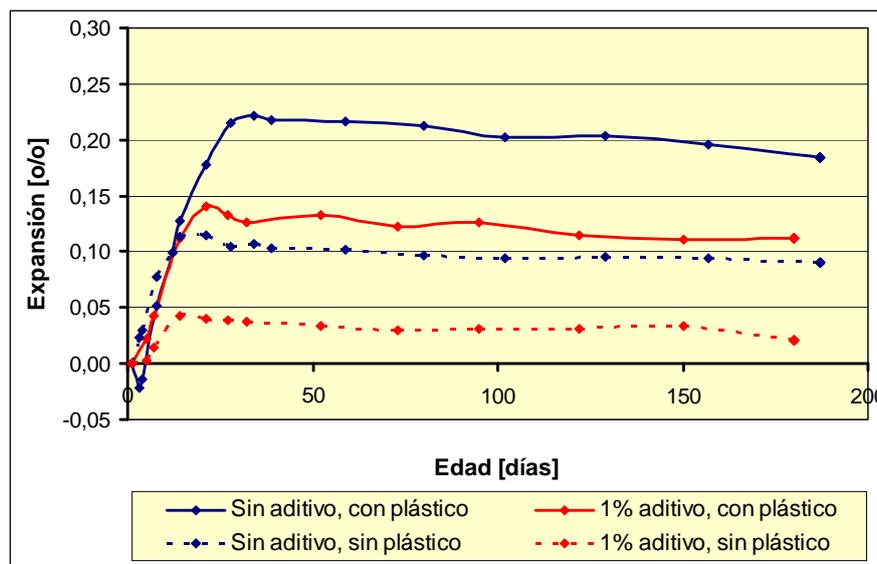
por esta razón, no se incorporan en los siguientes apartados..

#### 10.4.1 Morteros especiales "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso/CV = 20/40/40"

En **Tabla E-21(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores de expansión volumétrica para la serie de probetas de mortero con esta combinación, sin utilizar aditivo superplastificante, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. También en **Tabla E-21(b)** del mismo Anexo, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores experimentales promedios de expansión para la serie de probetas del mismo mortero anterior, curadas en cámara húmeda pero sin plástico de protección.

Similarmente, en **Tabla E-21(c)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores experimentales promedios de expansión volumétrica para la serie de probetas de mortero con esta combinación, con 1% de aditivo superplastificante, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. También en **Tabla E-21(d)** del mismo Anexo, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores promedios de expansión para la serie de probetas del mismo mortero anterior, curadas en cámara húmeda pero sin plástico de protección.

De acuerdo con los valores experimentales resumidos en **Tabla E-21(a)**, **Tabla E-21(b)**, **Tabla E-21(c)** y **Tabla E-21(d)**, es posible visualizar en **Fig. 10-12** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) según la edad de curado de las probetas individualizadas precedentemente.



**Fig. 10-12.** Expansión promedio vs Edad. Probetas especiales Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/40/40". Con y sin Aditivo Superplastificante (1%). Curados en cámara húmeda.

De observar **Fig. 10-12**, es posible concluir lo siguiente:

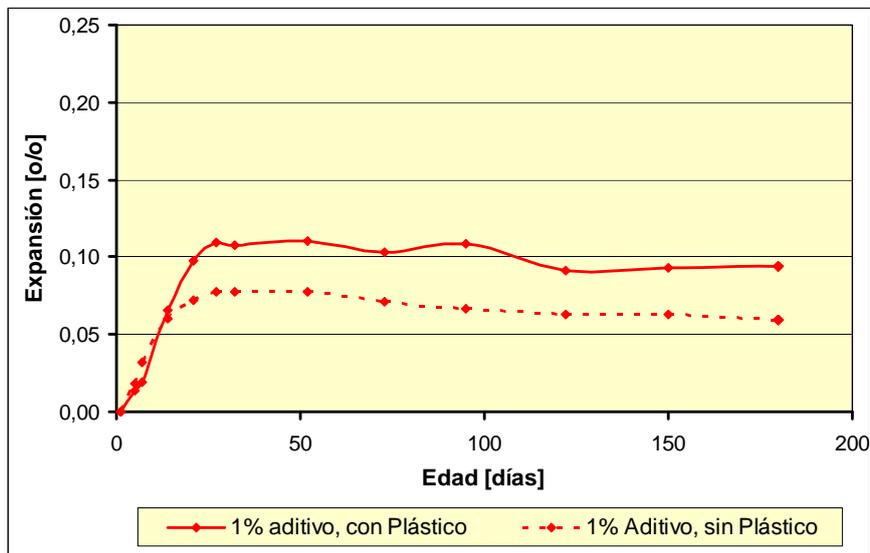
- Que las probetas de mortero curadas en cámara húmeda con plástico de protección presentan mayores expansiones que probetas de similar mortero, curadas también en cámara húmeda, pero sin plástico de protección. Este hecho podría ser manifiesto de nuevo la relación directa entre el contenido de agua en la probeta y la formación de compuestos expansivos, como se ha venido observando en las experiencias anteriores.
- Que el uso de 1% de aditivo superplastificante en el mortero, reduce significativamente la expansión máxima de las probetas. Así, la expansión máxima para mortero sin aditivo y con plástico de protección a los 28 días llega a 0,21%; la expansión máxima del mortero sin aditivo y sin plástico de protección a los 21 días llega 0,11%; la expansión máxima del mortero con aditivo y con plástico de protección a los 20 días llega 0,14% y finalmente, la expansión máxima del mortero con aditivo y sin plástico de protección a los 21 días llega 0,04%.
- Que la expansión máxima de este tipo de mortero depende de la humedad a que queda expuesto durante el curado y también depende del uso o no de aditivo superplastificante. Los morteros curados en cámara húmeda con plástico de protección quedan expuestos a más humedad interior que los morteros curados en cámara húmeda pero sin plástico de protección. De hecho, la **Tabla E-21(a)** muestra que las probetas de mortero sin aditivo y curadas en cámara húmeda con plástico de protección pierden a los 187 días de curado un 0,10% del peso inicial; en cambio las probetas del mismo mortero, curadas en cámara húmeda sin plástico de protección, pierden a los 187 días un 6,33% del peso inicial, lo que se indica en **Tabla E-21(b)**. Algo similar ocurre para las probetas de mortero con 1% de aditivo superplastificante, ya que las probetas con plástico de protección (**Tabla E-21(c)**) pierden a los 180 días de curado un 0,03% del peso inicial y cuando quedan expuestas al mismo ambiente de cámara húmeda, pero sin plástico de protección, pierden a esa misma edad un 6,84% del peso inicial (**Tabla E-21(d)**).
- El menor comportamiento expansivo de los morteros con aditivo superplastificante viene a reforzar otras conclusiones anteriores (**Capítulo 8**), relacionadas con mejoras en la resistencia mecánica, en cuanto a los beneficios que trae su uso.
- El menor comportamiento expansivo de los morteros curados al ambiente de cámara húmeda, sin plástico de protección respecto a su homólogo con plástico de protección, orienta la conveniencia de someter a los morteros a un curado con humedad controlada como el que provee la cámara húmeda o incluso reducirla, ya que como hemos observado en experiencias anteriores el curado al ambiente del laboratorio (baja humedad) produce una reducción drástica de las expansiones, aunque ello conlleva también una reducción significativa de las resistencias mecánicas.
- Cómo todo mortero con puzolana activa, una vez alcanzada la expansión máxima, no hay más expansión, ésta se estabiliza e inicia una leve disminución.

#### 10.4.2 Morteros especiales "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso/CV = 20/50/30"

En conocimiento que los mejores resultados de expansión obtenidos para morteros con 1% de aditivo superplastificante (apartado 10.4.1 anterior), en este apartado y en los siguientes, sólo se trabajará con probetas de mortero con 1% de aditivo, curadas en cámara húmeda con plástico de protección y otras similares, también curadas en cámara húmeda pero sin plástico de protección.

De esta forma, en **Tabla E-22(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores experimentales promedios de expansión volumétrica para la serie de probetas de mortero con esta combinación, con 1% de aditivo superplastificante, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. También en **Tabla E-22(b)** del mismo Anexo, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores experimentales promedios de expansión para la serie del mismo mortero anterior, curadas en cámara húmeda pero sin plástico de protección.

De acuerdo con los valores experimentales resumidos en **Tabla E-22(a)** y **Tabla E-22(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-13** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) según la edad de curado de las probetas con este tipo de mortero.



**Fig. 10-13.** Expansión promedio vs Edad. Probetas especiales Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/50/30". Con 1% de Aditivo Superplastificante. Curados en cámara húmeda.

De observar **Fig. 10-13** anterior es posible concluir lo siguiente:

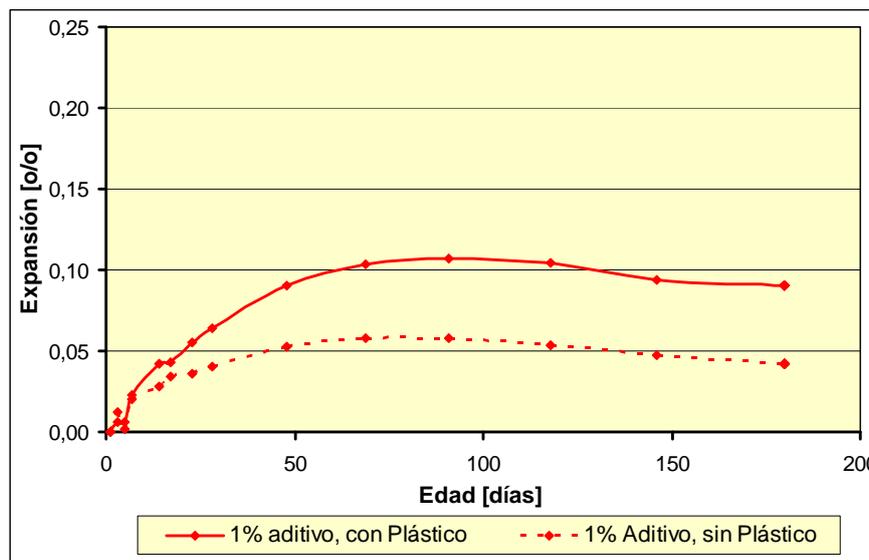
- La expansión máxima para mortero con aditivo y con plástico de protección a los 27 días llega a 0,11% y la expansión máxima del mortero con aditivo y sin plástico de protección a los 21 días llega 0,07%.

- Así, para esta composición, utilizar aditivo provee niveles de baja expansión con los beneficios consecuentes. Comparando con la anterior combinación, esta presenta una menor expansión máxima (0,11% contra 0,14%) cuando el curado se realiza con plástico de protección; pero cuando la humedad interior de la masa disminuye, como ocurre cuando quedan expuestas sin plástico de protección al ambiente de cámara húmeda, la combinación anterior presenta una menor expansión que ésta (0,04% contra 0,07%).
- Cómo todo mortero con puzolana activa, una vez alcanzada la expansión máxima, no hay más expansión, ésta se estabiliza e inicia una leve disminución.

#### 10.4.3 Morteros especiales "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso/CV = 20/60/20"

En **Tabla E-23(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores experimentales promedios de expansión volumétrica para la serie de probetas de mortero con esta combinación, con 1% de aditivo superplastificante, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. También en **Tabla E-23(b)** del mismo Anexo, se indican de acuerdo con la edad de curado, valores experimentales promedios de expansión para la serie de probetas del mismo mortero anterior, curadas en cámara húmeda pero sin plástico de protección.

De acuerdo con los valores experimentales resumidos en **Tabla E-23(a)** y **Tabla E-23(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-14** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) según la edad de curado de las probetas con este tipo de mortero.



**Fig. 10-14. Expansión promedio vs Edad. Probetas especiales Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/60/20". Con 1% de Aditivo Superplastificante. Curados en cámara húmeda.**

De observar **Fig. 10-14** anterior es posible concluir lo siguiente:

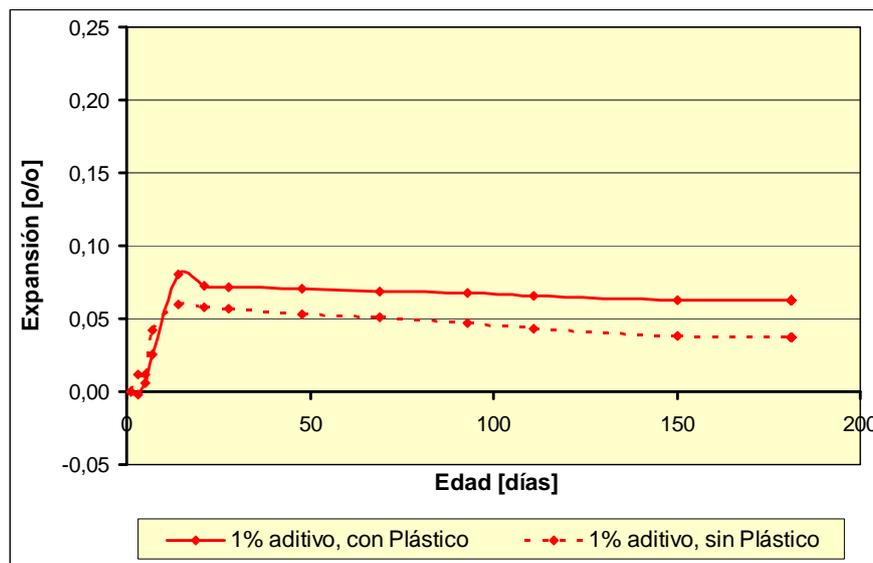
- Que para esta composición, utilizar aditivo también provee niveles de baja expansión con los beneficios consecuentes.
- Estas curvas se aprecian de crecimiento de tipo exponencial, probablemente por el alto contenido de yeso y el menor contenido de CV; sin embargo aún, los niveles de máxima expansión son bajos.
- Así, la expansión máxima para mortero con aditivo y con plástico de protección a los 90 días llega a 0,11% y la expansión máxima del mortero con aditivo y sin plástico de protección a los 69 días llega 0,06%. Comparando con la anterior combinación, los niveles de expansión máxima son muy similares, sin embargo en esta, el proceso expansivo se ralentiza ya que el tiempo que demora en llegar al máximo es considerablemente superior en este caso (90 y 69 días) que en la anterior combinación (27 y 21 días).
- Cómo todo mortero con puzolana activa, una vez alcanzada la expansión máxima, ésta se estabiliza e inicia una leve disminución.

#### **10.4.4 Morteros especiales "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso/CV = 15/50/35"**

En **Tabla E-24(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores experimentales promedios de expansión volumétrica para la serie de probetas de mortero con esta combinación, con 1% de aditivo superplastificante, curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

También en **Tabla E-24(b)** del mismo Anexo, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores experimentales promedios de expansión para la serie de probetas del mismo mortero anterior, curadas en cámara húmeda pero sin plástico de protección.

De acuerdo con los valores experimentales resumidos en **Tabla E-24(a)** y **Tabla E-24(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-15** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) según la edad de curado de las probetas con este tipo de mortero.



**Fig. 10-15. Expansión promedio vs Edad. Probetas especiales Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 15/50/35". Con 1% de Aditivo Superplastificante. Curados en cámara húmeda.**

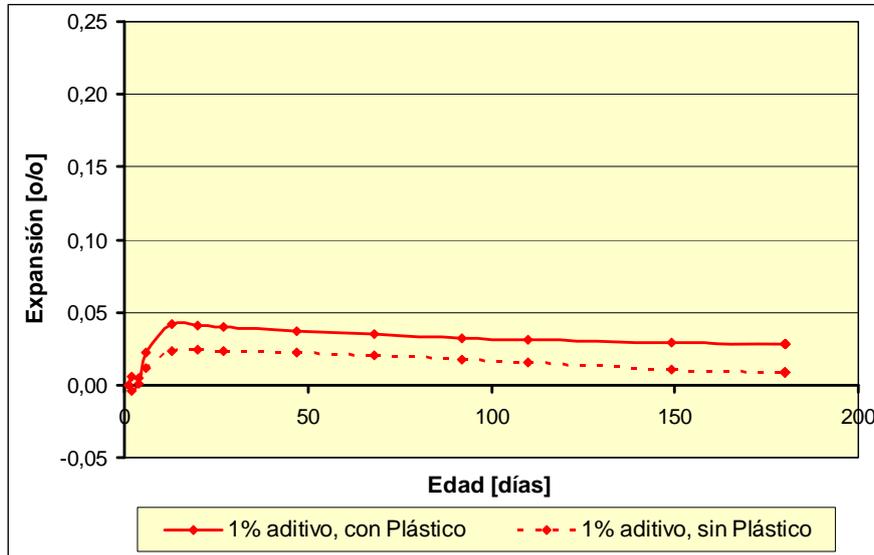
De observar **Fig. 10-15** anterior es posible concluir lo siguiente:

- Que para esta composición, utilizar aditivo también provee niveles de baja expansión con los beneficios consecuentes.
- Así, la expansión máxima para mortero con aditivo y con plástico de protección a los 14 días llega a 0,08% y la expansión máxima del mortero con aditivo y sin plástico de protección a los 10 días llega 0,06%.
- Cómo todo mortero con puzolana activa, una vez alcanzada la expansión máxima, ésta se estabiliza e inicia una leve disminución.

#### **10.4.5 Morteros especiales "CEM I 52,5 R Cemex/Yeso/CV = 10/50/40"**

En **Tabla E-25(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores experimentales promedios de expansión volumétrica para la serie de probetas de mortero con esta combinación, con 1% de aditivo superplastificante, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. También en **Tabla E-25(b)** del mismo Anexo, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores experimentales promedios de expansión para la serie de probetas del mismo mortero anterior, curadas en cámara húmeda pero sin plástico de protección.

De acuerdo con los valores experimentales resumidos en **Tabla E-25(a)** y **Tabla E-25(b)**, es posible visualizar en **Fig. 10-16** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) según la edad de curado de las probetas con este tipo de mortero.



**Fig. 10-16. Expansión promedio vs Edad. Probetas especiales Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 10/50/40". Con 1% de Aditivo Superplastificante. Curados en cámara húmeda con y sin plástico de protección.**

De observar **Fig. 10-16** anterior es posible concluir lo siguiente.

- Que para esta composición, utilizar aditivo también provee niveles de baja expansión con los beneficios consecuentes.
- Así, la expansión máxima para mortero con aditivo y con plástico de protección a los 10 días llega a 0,04% y la expansión máxima del mortero con aditivo y sin plástico de protección a los 10 días llega 0,02%.
- Si bien estos valores de expansión máxima son los menores valores alcanzados en todas estas series de morteros especiales con cemento Portland CEM I 52,5R Cemex, la compatibilización de este comportamiento con valores de resistencia mecánica se debe también considerar, en este sentido, y según los análisis efectuados en el apartado **8.7** del **Capítulo 8**, los conglomerantes con mejor resistencia mecánica, son los que poseen 20% de cemento. No obstante, se deberían realizar ensayos necesarios de este tipo de mortero con un porcentaje bajo de cemento Portland y valorar sus posibilidades de uso cuando las resistencias requeridas sean bajas, teniendo en cuenta que las expansiones obtenidas en este caso, son muy pequeñas.

- Cómo todo mortero con puzolana activa, una vez alcanzada la expansión máxima, ésta se estabiliza e inicia una leve disminución.

### 10.5 Morteros Especiales "CEM I 52,5 R/Yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10"

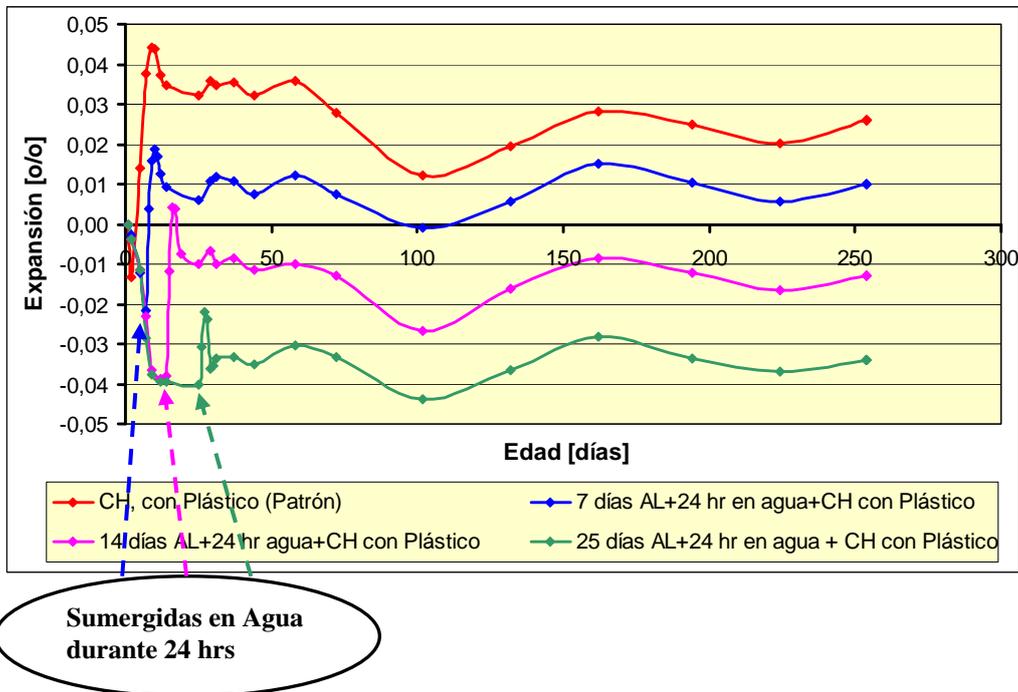
Las probetas de expansión, curadas durante 60 días expuestas sin plástico de protección en ambiente de laboratorio (AL) del apartado 10.2.3 anterior, muestran un comportamiento especial por cuanto reducen drásticamente la expansión máxima respecto a similares probetas curadas en cámara húmeda (CH) y protegidas con plástico, aunque este curado conlleva también una reducción significativa de la “Rc”. Con la pretensión de ahondar el estudio de este comportamiento, es que se repite la serie con “yeso” y “ceniza volante” sin moler de dicho apartado, manteniendo constante los demás parámetros del conglomerante. Lo que se pretende en este caso es variar el tiempo de exposición de las probetas sin protección plástica en ambiente de laboratorio. De este modo se preparan series que quedarán expuestas al “AL” durante 7, 14 y 25 días, al cabo del cual se sumergen en agua por 24 horas para posteriormente continuar el curado en cámara húmeda con plástico de protección. Las series de probetas de expansión así curadas, se comparan con una serie patrón, cuyo curado se hace en cámara húmeda con las probetas protegidas con plástico. Los resultados de expansión volumétrica de estas series se agrupan con la finalidad de facilitar la comparación de resultados.

En **Tabla E-26(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores experimentales promedios de expansión volumétrica para la serie de probetas de mortero especial de combinación "cem gris I 52,5 R/Yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10", sin aditivo superplastificante, curadas durante todo el tiempo que dura el ensayo en cámara húmeda con plástico de protección. También en **Tabla E-26(b)** del mismo Anexo, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores experimentales promedios de expansión para la serie de probetas del mismo mortero anterior, expuestas hasta los 7 días de edad al ambiente del laboratorio, sin plástico de protección, para luego continuar el curado en cámara húmeda con plástico de protección.

Continuando con la serie, en **Tabla E-26(c)** del mismo Anexo, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores experimentales promedios de expansión volumétrica para la serie de probetas del mismo mortero anterior, expuestas hasta los 14 días de edad al ambiente del laboratorio, sin plástico de protección, para luego continuar el curado en cámara húmeda con plástico de protección. También en **Tabla E-26(d)**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores experimentales promedios de expansión para la serie de probetas de mortero de las mismas dosificaciones anteriores, expuestas hasta los 25 días de edad al ambiente del laboratorio, sin plástico de protección, para luego continuar el curado en cámara húmeda con plástico de protección.

De acuerdo con los valores experimentales resumidos en **Tabla E-26(a)**, **Tabla E-26(b)**, **Tabla E-26(c)** y **Tabla E-26(d)**, es posible visualizar en **Fig. 10-17** el

comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) según la edad de curado de las probetas con este tipo de mortero y con estas variaciones en el curado.



**Fig. 10-17. Expansión promedio vs Edad. Probetas especiales Mortero "cem gris I 52.5R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10". Sin Aditivo Superplastificante. Con diferentes curados.**

De observar Fig. 10-17 anterior es posible concluir lo siguiente:

- Todas las probetas en su etapa inicial manifiestan una contracción o retracción, incluso la serie de probetas patrón, curadas en ambiente de cámara húmeda "CH", con plástico de protección.
- Que todas las probetas expuestas a ambiente del laboratorio "AL" al perder humedad, sufren una retracción que solo se altera ante un cambio brusco de humedad como cuando la probeta es sumergida en agua.
- Que las probetas curadas en "AL" al llevarlas nuevamente a un estado de alta humedad interior, la expansión máxima que logran se reduce en la misma cantidad en que se ha desarrollado previamente la retracción debido a la pérdida de humedad inicial. De este modo, se postula que es posible controlar la expansión máxima para llevarlas a niveles de expansión deseado, ajustando el tiempo de curado en ambiente seco (laboratorio en este caso). Este estudio, necesariamente debe complementarse con ensayos de

resistencia de similar curado a fin de conocer y compatibilizar este novedoso sistema de curado, que permitiría un control de la expansión.

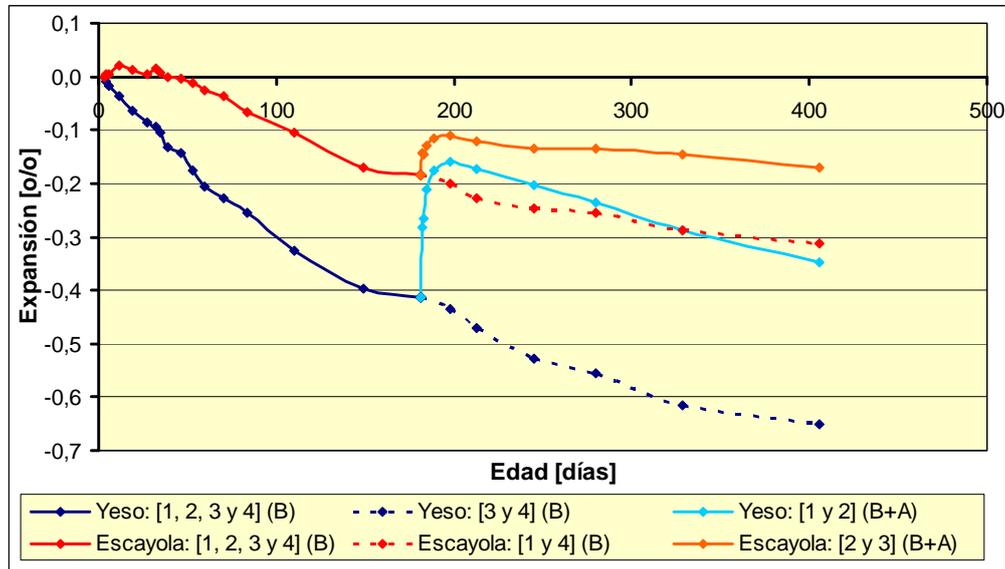
- Que la expansión máxima de la presente serie patrón (0,04%), curada en “CH” con plástico de protección, resulta menor que la expansión máxima de similar serie (0,18%) cuyos resultados experimentales se encuentran en **Tabla E-11(a)** del **Anexo E** y expuesta en **Fig. 10-6(a)** (apartado **10.2.3**). Esta diferencia, se debe más que nada al tipo de arena utilizado por cuanto la “Arena tipo B” es un poco más fina que la “Arena tipo A” (apartado **3.1.5** del **Capítulo 3**).
- La sinuosidad que muestran las curvas se debe a la sensibilidad del proceso experimental de medición, la cual se desarrolla bajo condiciones medioambientales cambiantes y también probablemente a alteraciones medioambientales dentro de la cámara húmeda. Al utilizar una escala de deformaciones amplificada, como en este caso, se resaltan estas imperfecciones.

### **10.6 Morteros de referencia. Yeso 100% y Escayola 100%**

A fin de tener una referencia del comportamiento expansivo de morteros confeccionados sin cemento y sin puzolana, se preparan series de morteros de composición “Conglomerante” única “Yeso = 100%” y “Escayola = 100%”. Como árido fino se utiliza la “Arena Tipo B”. Como yeso se utiliza “Yeso Rápido Iberplast” y como escayola, se utiliza “Yeso Iberyola (Escayola E-35)”. El curado de las probetas se efectúa por lo general en cámara húmeda con plástico de protección a excepción de las probetas que se sumergen en agua. Aquellas que se sumergen, son desprovistas del plástico de protección, se sumergen en agua desionizada por 24 horas para continuar posteriormente su curado en cámara húmeda, nuevamente protegidas con plástico para no alterar la alta humedad interior. También como referencia, resultados ensayos de resistencia mecánica a morteros de yeso, se describen en **Tabla 5-5** del apartado **5.2.1** del **Capítulo 5**.

En **Tabla E-27(a)** del **Anexo E**, se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión, para la serie de mortero con yeso 100% compuesta de cuatro probetas que se individualizan adecuadamente. En dicha Tabla se indican también valores promedios de expansión para dos probetas que a los 181 días son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y son sumergidas en agua por 24 horas, para luego, continuar el curado en cámara húmeda protegidas con plástico. En el mismo Anexo, en **Tabla E-28(a)** se indican de acuerdo con la edad de curado, en forma resumida valores promedios medidos y calculados de expansión, para la serie de mortero con escayola 100%, también compuesta de cuatro probetas individualizadas adecuadamente. Similarmente en dicha Tabla, se indican valores promedios de expansión de dos probetas que a los 181 días son sumergidas en agua por 24 horas.

De acuerdo con los valores resumidos en **Tabla E-27(a)** y **Tabla E-28(a)**, es posible visualizar en **Fig. 10-18** el comportamiento conjunto de la variación de longitud (expansión) de las probetas de mortero con yeso y escayola, según la edad de curado.



**Fig. 10-18. Expansión promedio vs Edad. Comportamiento de 4 probetas de Mortero "Yeso 100%" y 4 probetas de Mortero "Escayola 100%".**

De observar **Fig. 10-18** anterior es posible concluir lo siguiente:

- Que estas probetas, tanto de yeso como de escayola, sometidas a curado de alta humedad como las que provee el curado en cámara húmeda, con plástico de protección, generan una retracción. Aunque inicialmente, las probetas de mortero con escayola muestran una tendencia a la expansión, ésta rápidamente se revierte.
- Las probetas de mortero con escayola muestran menor retracción que las probetas de mortero con yeso.
- Esta tendencia a la “retracción” que muestran las probetas de mortero con yeso y escayola no cambia con la edad de curado y solo se altera cuando se les cambia bruscamente la humedad como ocurre cuando las probetas son sumergidas en agua por 24 horas. Estas probetas adquieren mayor humedad, lo que revierte la tendencia, generándose una fuerte expansión que también tiende a estabilizarse para continuar con un proceso similar a las probetas que no se han sumergido en agua.
- Ante cambios bruscos de humedad, las probetas de mortero con escayola tienen una expansión menor que las probetas de mortero con yeso.



---

## **Capítulo 11. CONCLUSIONES**

---



## 11. CONCLUSIONES

En este Capítulo se enumeran las conclusiones más relevantes del estudio realizado.

- En las pastas “cemento/escayola” y “cemento/escayola/CV”, dentro de las composiciones estudiadas, se pone de manifiesto que los tiempos de fraguado dependen de la relación “agua/conglomerante”. A menor relación “agua/conglomerante”, menor tiempo de fraguado.
- Se ha comprobado que la adición óptima de aditivo superplastificante es del 1% en peso del conglomerante seco, consiguiendo con ello, el mejor efecto retardador del fraguado.
- La transformación del hemihidrato original del yeso ( o escayola) en dihidrato a través del tiempo, proporciona información sobre el proceso químico que se va produciendo y su relación con el endurecimiento de la pasta en el proceso de fraguado.
- Se comprueba que la determinación de la pérdida de agua combinada, mediante el analizador de halógeno es válido para estudiar la transformación química del hemihidrato en dihidrato, durante el proceso de fraguado en una pasta de yeso (o escayola).
- Los morteros con adición inerte de filler calizo, presentan menores resistencias que sus homólogas con ceniza volante, observándose que para la misma proporción de cemento, la resistencia depende de manera importante de la proporción de yeso en la mezcla (a mayor cantidad de yeso, mayor resistencia).

- La presencia de filler calizo en el conglomerante, al tratarse de una adición inerte que no reacciona con la portlandita, facilita la formación de compuestos expansivos, por reacción de los sulfatos con el aluminato tricálcico y la portlandita, alterando la matriz conglomerante. Esta alteración de la matriz provoca una disminución de las resistencias mecánicas, por lo que se pone de manifiesto que el filler calizo no reduce la incompatibilidad de las mezclas “cemento-yeso”.
- En general en las probetas con ceniza volante se produce un aumento del porcentaje de agua combinada calculado por la balanza de halógenos, hasta los 90 días de curado. A tiempos mayores se produce una disminución del porcentaje de agua combinada, probablemente debido a un cambio en la estequiometría de los hidratos producidos y a la transformación de etringita en monosulfato.
- En general para las dosificaciones estudiadas se detecta una buena correlación lineal entre la resistencia a flexotracción y la resistencia a compresión en los morteros estudiados.
- El uso de ceniza volante molida mejora de forma muy significativa la “Rc”, con respecto a la ceniza volante original, debido a la mayor reactividad como consecuencia del menor tamaño de partícula.
- En los morteros con ceniza volante, los cementos blancos reaccionan más tempranamente con la ceniza volante molida que con la ceniza volante original lo que se manifiesta en una ganancia notable de resistencia a los 28 días de curado. En cambio, el cemento gris reacciona más tardíamente y las mejoras notables en resistencia se manifiestan a partir de los 90 días de curado respecto al uso de ceniza sin moler.
- La mayor resistencia a compresión que muestran los morteros control, respecto de los equivalentes morteros “cemento/yeso/puzolana”, ambos curados al ambiente del laboratorio, al parecer, se debe al aporte que hace el contenido de cemento en el conglomerante, ya que la escasa humedad no afecta completamente la disolución del yeso en la matriz conglomerante. Sin embargo, la escasa humedad afecta la hidratación de los compuestos cementicios, razón por la cual, la “Rc” tiende a estabilizarse o disminuir con la edad, llegando en dosificaciones determinadas a ser menores que para los morteros con el mismo contenido de yeso pero con ceniza volante.
- Los morteros “cemento/yeso/puzolana” curados al ambiente del laboratorio (por la misma razón anterior y el hecho de que la actividad puzolánica requiere mas tiempo para manifestarse), a los 28 días de curado presentan una resistencia a compresión significativamente superior a su homóloga curada en “Bolsa”. Sin embargo a mayor edad de curado, a medida que la actividad puzolánica se incrementa, los morteros curados en “Bolsa” aumentan su resistencia a compresión hasta igualar e

incluso superar a los morteros curados al ambiente del laboratorio, los que con el tiempo la disminuyen levemente.

- En general, la resistencia a compresión de los morteros con yeso presentan un comportamiento muy parecido a los morteros con escayola, aunque estos últimos presentan una “Rc” ligeramente superior.
- El uso de aditivo superplastificante muestran en general una influencia benéfica, que mejora los resultados de resistencia a compresión “Rc”.
- Al utilizar aditivo superplastificante, se retrasa el tiempo de endurecimiento y se mejora la trabajabilidad de la mezcla, de este modo se consigue que la masa de mortero quede más compacta, con menos porosidad y con mayor densidad.
- Se demuestra que la reacción puzolánica se manifiesta a medio plazo, por lo que, su incidencia en la resistencia a compresión en morteros que utilizan ceniza volante se manifiesta a partir de 90 días de curado, pero en morteros que utilizan ceniza volante molida se anticipa y se manifiesta a partir de los 28 días de curado.
- Los mejores resultados de resistencia a compresión se obtienen para mezclas con 20% de cemento y con contenido de yeso en el rango de 40-50%. Sin embargo, un mayor contenido de yeso, tiene una influencia negativa en el comportamiento mecánico y de durabilidad.
- También queda en evidencia que a mayor contenido de cemento en el conglomerante, mayor “Rc”, sin embargo, al considerar un mayor contenido de cemento, también resulta mayor el coste económico y ecológico. La optimización de la resistencia a compresión y el bajo coste económico, llevan a plantear el cociente “Rc/Coste”. Se comprueba que el mejor cociente se obtiene de manera ambivalente tanto para el mortero con CV(m) y aditivo de composición “20/40/40”, como para la composición “20/50/30”, con la ventaja ecológica de reducir a un 20% el consumo de cemento.
- En la medida de expansión de los morteros cemento/yeso/puzolana, en general, no hay diferencias significativas en la “velocidad de crecimiento” de la expansión inicial entre morteros con yeso y morteros con escayola; sin embargo, el tiempo que demoran los morteros con escayola en llegar a la expansión máxima es menor que en los morteros con yeso, lo que a su vez provoca, que la expansión máxima en los morteros con escayola sea menor que en los morteros con yeso.
- Los morteros con ceniza volante, una vez que alcanzan la “expansión máxima”, ésta se estabiliza, sin aumentar, con tendencia a una leve disminución a medida que transcurre la edad de curado.
- El uso de ceniza volante molida o el uso de una puzolana más activa que la ceniza volante (como el FCC(m)) en el conglomerante del mortero,

aumenta la reactividad puzolánica, la que se manifiesta en un aumento de la velocidad de crecimiento de la expansión inicial y en una reducción del tiempo en que se alcanza la expansión máxima.

- En general, el uso ceniza volante molida o el uso de una puzolana más activa que la ceniza volante (como el FCC(m)), disminuye la expansión máxima respecto del uso de ceniza volante original (sin moler).
- Se comprueba que el uso de aditivo superplastificante muestra una disminución en los valores de expansión y un aumento de los valores de resistencia a compresión.
- La expansión máxima también depende de manera clara del contenido de cemento en el conglomerante y por tanto, del contenido de  $C_3A$ , contribuyendo significativamente en la propagación de la expansión. Así, los morteros con cemento blanco en el conglomerante, expanden significativamente más que los morteros homólogos con cemento gris.
- En morteros con FC, se observa un incremento de la expansión con el tiempo de curado, sin embargo, el incremento de la expansión es más reducida que con CV. Este hecho podría ser debido a que la ceniza volante contiene  $Al_2O_3$  (alúmina) reactiva que facilitaría la formación de una mayor cantidad de compuestos expansivos, como la etringita, mientras en morteros con FC, los compuestos expansivos se formarían únicamente a partir de  $C_3A$  presente en el cemento.
- Los cambios significativos entre las dos experiencias (CV y FC), se producen a partir de la rehidratación del mortero. La rehidratación se produce al sumergir las probetas durante 24 horas en agua. Una vez producida la rehidratación, en las probetas con FC comienza de nuevo un proceso expansivo muy acusado que favorece la formación de nuevos compuestos expansivos. La ausencia de actividad puzolánica del FC, evitaría la fijación de Portlandita y por tanto, facilita la reacción con el aluminato tricálcico, formando compuestos expansivos como la etringita. Sin embargo los morteros con CV la rehidratación no produce un aumento de la expansión.
- La estabilización expansiva en los morteros con CV, no es afectada por la rehidratación. La diferencia con el mortero con FC se produce por la formación de productos de hidratación con los procesos de polimerización, evitando la degradación de la matriz conglomerante frente a la humedad.
- Las expansiones en morteros control del tipo “cemento/yeso”, resultan significativamente superiores a los morteros del tipo “cemento/yeso/ceniza volante”.
- Al mantener constante componentes del conglomerante como el cemento y yeso, a mayor reactividad puzolánica, el desarrollo de la expansión dura menos tiempo y por tanto, la expansión máxima es menor.

- La exposición de las probetas, sin plástico de protección al “Ambiente del Laboratorio (AL)” reduce la expansión máxima notablemente. Esto pone de manifiesto que un curado en ambiente seco reduciría notablemente el proceso expansivo, aún en una rehidratación posterior, por lo que se trataría de un proceso irreversible, en las condiciones estudiadas. Sin embargo, también se produce una disminución importante de los valores de resistencia a compresión que no aumenta con el tiempo de curado.

- **Conclusion general**

Los resultados que se derivan de esta tesis doctoral, generan expectativas viables en la utilización de cenizas volantes para favorecer la compatibilidad entre el yeso y el cemento, obteniendo ventajas ecológicas y económicas, estas últimas fundamentalmente en los países en vías de desarrollo. Se constata también una mejoría, a tiempos largos, de las resistencias mecánicas, de los valores de expansión y del comportamiento de estas mezclas en ambiente húmedo. El cociente “Rc/Coste”, permite recomendar el uso de las combinaciones conglomerantes “cemento portland/yeso/ceniza volante” “20/40/40” y “20/50/30”.



---

## **BIBLIOGRAFÍA**

---



**BIBLIOGRAFÍA**

1. Biczok, Imre (traducción de Emilio d'Ocon Asensi), "*Corrosión y Protección del Hormigón*". Ediciones Urmo, 1972.
2. Metha, Kumhar; Monteiro, Paulo. "*Concreto*". Ed. IMCYC. 1998.
3. Neville, Adam. "*Tecnología del Concreto*". Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1977.
4. Wirsching, Franz. "*Sulfato de Calcio*". Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Editorial Atedy. Vol. A4. 5ta Edición. 1985. Weinheim, Germany.
5. Soriano Martínez, Lourdes. "*Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico (FCC)*". Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. U. Politécnica de Valencia. España. 2007.
6. Shannang, M.J. "*High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume*". Cement and Concrete Composites, 22, 2000, 399-406.
7. Malhotra, V.M.; Metha, P.K. "*Pozzolanic and cementitious Materials*". Gordon and Breach Publishers, Ottawa, 1996.
8. Lawrence, P.; Cyr, M.; Ringot, E. "*Mineral admixtures in mortars Effect of inert materials on short-term hydration*". Cement and Concrete Research 33, 2003, 1939-1947.
9. Payá, J. "*Adiciones activas en el hormigón según la EHE. Exigencias y posibilidades. Hormigón verde*". I Curso sobre tecnología del hormigón, Universidad Politécnica de Valencia, ETSICCP, 2005.
10. MMA. "*Catálogo de residuos utilizables en la construcción*". Ministerio de medio ambiente, Centro de estudios y experimentación de obras públicas, Madrid 2002, 81-101.
11. UNE 450-1:2006+A1:2008. "*Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad*". 2008.
12. Amahjour, F. "*Estudio de la reactividad de las puzolanas artificiales: cenizas volantes y humo de sílice y su reutilización en ingeniería civil*". Tesis doctoral, 2000, Universidad Politécnica de Valencia.

13. Payá, J; Monzó, J.; Borrachero, MV.; Peris, E.; González, E. “*Modificación de las características de las cenizas volantes para mejorar las propiedades del hormigón*”. Congreso AEMAC, 1995, 565-570.
14. Atzeni, C.; Marcialis, A. "Effect of fine mineral admixtures on the properties of hardened cement pastes". 80º Congresso Intemational de Química do Cimento. Theme 3. Volumen IV. Septiembre 1986. Río de Janeiro. Brasil.
15. Barker, A.; Cory, H. “*The Early hydration of limestone-filled cements*". Blended Cements in Construction. R.N. Swarny. Ed. Elsevier. 1991.
16. Baron, J.; Douvre, Ch. "Technical and economical aspects of the use of limestone filler additions in cement". World Cement. Vol. 18, Nº3. Abril 1987.
17. Bertrand, R.; Pointevin, P. "Limestone filler for concrete: french research and practice". Blended Cements in Construction. R.N. Swarny. Ed. Elsevier, 1991.
18. Menendez, I; Triviño, F. “*Correlations among plasticity, mechanical strength, water/cement ratios and limestone filler content in cement mortars*”. Materiales de Construcción, Vol. 43, Nº232, pag. 39 – 51. 1993.
19. Wittbold, J.; Immordino, S.; Shake, M. “*Aditivos que mejoran la hidratación del yeso calcinado*”. Publicación Oficina Española de Patentes y Marcas. ES 2 231 278 T3. Mayo 2005. Madrid. España.
20. Ramachandran, V.S. “*Concrete Admixtures Handbook*”. Second Edition, Noyes, 1995, p. 670.
21. ANEJO 4º. “*Recomendaciones para la selección del tipo de cemento a emplear en hormigones estructurales*”. Suplemento del BOE núm. 203. España. Viernes 22 agosto 2008.
22. UNE 80303-1:2001. “*Cementos con características adicionales. Parte 1: Cementos resistentes a los sulfatos*”. 2001.
23. Zhao, SB; He, RC; Gao, RD; et al. “*Research on mechanism of sulfate attack on concrete by TG-DSC method*”. Advances in Concrete. Structural Durability. Proceedings of ICDCS2008, Vols 1 and 2, Pages: 549-555. 2008.
24. William, G.H.; Bryant, M. “*Sulfate attack, or is it?*” Cement and Concrete Research, 29: 789–791, 1999.
25. Zhou, Q; Ma, BG. “*Sulfate attack-Ettringite, Gypsum and Thaumasite*”. Advances in Concrete. Structural Durability. Proceedings of ICDCS2008, Vols 1 and 2, Pages 500-505. 2008.

26. Blanco, M.T et al. “*Formación de Taumasita en Morteros Hidráulicos mediante deposición de SO<sub>2</sub> atmosférico*”. *Materiales de Construcción*. 51(263-264), 2001. Pág. 109-126.
27. Martínez, S. and Blanco, MT. “*Ataque por sulfatos con formación de taumasita en sistemas cementantes: efecto del catión*”. Comunicación Oral en X Congreso Nacional de Materiales. San Sebastián, España. Junio 2008.
28. Schmidt, T. “*Sulphate attack and the Role of Internal Carbonate on the Formation of Thaumasite*”. Doctoral Thesis N°3853-2007. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. Switzerland.
29. Crammond, N. “*The occurrence of thaumasite in modern construction - a review*”. *Cement & Concrete Composites*. 24 (2002) 393–402.
30. Balen, K. V. et al. “*Environmental Deterioration of Ancient and Modern Hydraulic Mortars*”. European Commission - Protection and Conservation of European Cultural Heritage. Research Report XX. 216p. 1999.
31. Ramachandran, V. S. et al. “*Handbook of thermal analysis of construction materials*”. Institute for Research in Construction. National Research Council of Canada. Noyes Publications, New York, U.S.A. 2002.
32. Yan, P. and You, Y. “*Studies on the binder of fly ash-fluorogypsum-cement*”. *Cement and Concrete Research*. Vol. 28, No 1, 1998. pp: 135–140.
33. Yan, P.; Yang, W.; Qin, X.; You, Y. “*Microstructure and properties of the binder of fly ash-fluorogypsum-Portland cement*”. *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 349–354.
34. Yan, P. and Yang, W. “*The cementitious binder derived with fluorogypsum and low quality of fly ash*”. *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 275–280.
35. Martinez, O.; Castro, P.; Escalante, J. “*Hydraulic binders of Fluorogypsum–Portland cement and blast furnace slag, stability and mechanical properties*”. *Construction and Building Materials* 24 (2010) 631–639.
36. <http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphogypsum>
37. Mehta, P.K. and Brady, J.R. “*Utilization of phosphogypsum in Portland cement industry*”. *Cement and Concrete Research* 7 (5) (1997) 537–543.
38. Singh, M.; Garg, M.; Verma, CL.; Handa, SK.; Kumar, R. “*An improved process for the purification of phosphogypsum*”. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 8. 1996. Pp. 597-600.

39. Altun, A. and Sert, Y. “*Utilization of weathered phosphogypsum as set retarder in Portland cement*”. Cement and Concrete Research 34 (2004) 677–680.
40. Singh, M. and Garg, M. “*Relationship between mechanical properties and porosity of water-resistant gypsum binder*”. Cement and Concrete Research, 26: 449–456. 1996.
41. Singh, M.; Garg, M. and Rehsi, S. “*Durability of phosphogypsum based water-resistant anhydrite binder*”. Cement and Concrete Research, 20: 271–276. 1990.
42. Singh, M. and Garg, M. “*Investigation of a Durable Gypsum Binder for Building Materials*”. Construction and Building Materials. Vol. 6, No. 1 (March 1992), pp. 52–56.
43. Singh, M. and Garg, M. “*Phosphogypsum-Fly Ash cementitious Binder-Its hydration and strength development*”. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 4, pp. 752-758. 1995.
44. Garg, M.; Singh, M.; Kumar, R. “*Some aspects of the durability of a phosphogypsum-lime-fly ash binder*”. Construction and Building Materials. Vol. 10, No. 4, 1996. pp. 273-219.
45. Taneja, Ca. and Singh, M. “*Evaluation of suitable of phosphogypsum for use in preparation of different Building-Materials*”. Research and Industry. Vol. 21, N<sup>o</sup> 4, Pages 263-265. Published 1976. New Delhi, India.
46. Boncukcuoglu, R.; Yilmaz, M.; Kocakerim, M.; Tosunoglu, V. “*Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production*”. Cement Concrete Research 32 (2002) 471–475.
47. Elbeyli, I.; Derun, E.; Gülen, J.; Piskin, S. “*Thermal analysis of borogypsum and its effects on the physical properties of Portland cement*”. Cement Concrete Research 33 (2003) 1729–1735.
48. Kavas, T; Olgun, A. and Erdogan, Y. “*Setting and hardening of borogypsum–Portland cement clinker–fly ash blends. Studies on effects of molasses on properties of mortar containing borogypsum*”. Cement and Concrete Research 35 (2005) 711 –718.
49. Ozkul, H. “*Utilization of citro- and desulphogypsum as set retarders in Portland cement*”. Cement and Concrete Research 30 (2000) 1755-1758.
50. Taylor, H.F.W. “*La química de los cementos*”. Vol. II. Ediciones Urmo, C/Éspartero, 10, Bilbao – España, 1971.
51. Rahhal, V.; Donza, H.; Delgado, A.; Gutiérrez. JP.; Talero, R. “*Estudio calorimétrico del cemento Portland con puzolanas naturales españolas y*

- yeso". Actas II Jornadas de Investigación en Construcción. IETCC-CSIC. Madrid, España. 2008. Pag. 1439-1452.
52. Colak, A. "*Physical, mechanical, and durability properties of gypsum-Portland cement-natural pozzolan blends*". Journal Civil Eng. 28: 375-382. Canada. 2001.
53. Colak, A. "*The long-term durability performance of gypsum-Portland cement-natural pozzolan blends*". Cement and Concrete Research. Vol. 32, No 1, 2002. Pag.: 109-115.
54. Bentur, A.; Kovler, K. and Goldman, A. "*Gypsum of improved performance using blends with portland cements and silica fume*". Advances in Cement Research, 6: 109-116. 1994.
55. Kovler, K. and Bentur, A. "*Differential thermal analysis of hydration and hardening in gypsum-Portland cement systems*". Proceedings of Israel-Hungary Binat. Conference on Thermal Analysis and Calorimetry of Materials, Ein-Bokek, Israel, pp.15-16. 1996.
56. Kovler, K. "*Setting and hardening of Gypsum-Portland cement-Silica Fume Blends, Part 1: Temperature and Setting Expansion*". Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 3, 1998. pp. 423-437.
57. Kovler, K. "*Setting and hardening of Gypsum-Portland cement-Silica Fume Blends, Part 2: Early Strength, DTA, XRD, and SEM Observations*". Cement and Concrete Research. Vol. 28, No 4, 1998. Pag. 523-531.
58. De Milito, JA. "*Avaliação do Comportamento de Pastas de Gesso com Cimento Portland e Sílica Ativa para Revestimento*". Tesis Doctoral. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Sao Paulo, Brazil. 2001.
59. Tibaijuka, A. "*Ante el Día Mundial del Hábitat*". U.N. - HABITAT, Nairobi, 12.05.2007.
60. Naciones Unidas. "*World Population Prospects: The 2002 Revision*". Nairobi, 2003.
61. U.N. HABITAT 1996. "*Informe Mundial sobre los Asentamientos Humanos*". United Nations Centre for Human Settlements (Hábitat). ISBN 92-1-331015-3.
62. U.N. HABITAT 2003. "*Improving the lives of 100 million slum dwellers*". Global Observatory. UN-HABITAT, Nairobi (Kenya).

63. Millenium Project-2006. “*Mejorar las condiciones de vida de los chabolistas, Un hogar en la ciudad*”. Ministerio de Vivienda (España), Madrid. 2007.
64. ONUDI. “*First Consultation on Building Material*”. Atenas. Marzo 1985.
65. Salas, J. y Oteiza, I. “*La industria de materiales básicos de construcción ante las ingentes necesidades actuales de edificación*”. *Materiales de Construcción*. Vol. 58, Nº292 (2008). Pág. 129-148.
66. Campos, P.E. “*Industrialização da construção e argamassa armada; perspectivas de desenvolvimento*”. EPUSP. São Paulo, Brasil. 1989.
67. Houben, H.L. “*habitat économique dans les pays en developpemenr: materiaux, techniques de constructio*”. Plan Construcción. Paris (1993), Vol. 2. Págs. 53 a 56.
68. USGS. “*Mineral Yearbook*”. 2002.
69. Banco Mundial. “*World Development Report, 2000/2001. Attacking poverty*”. Published by Oxford University Press. New York. 2001.
70. Lalinde, F. “*Una aportación al estudio de GRC con materiales puzolánicos: adición de Ceniza Volante de Central Termoeléctrica de Carbón*”. Diploma de estudios avanzados. Dpto. Ing. De la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Valencia. 2005.
71. UNE-EN 13279-1:2009. *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. 2009.*
72. UNE-EN 196-1:2005. *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de la resistencia mecánica. 2005.*
73. Borrachero, MV.; Monzó, J.; Payá, J.; Peris, E.; Vunda, C.; Velázquez, S. y Soriano, L. “*El catalizador gastado de craqueo catalítico adicionado al cemento portland: Las primeras 48 horas de curado y la evolución de la resistencia mecánica*”. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas. U. Politécnica de Valencia. Gandía-España. 2002. Pág. 579-589.
74. Velázquez, S. “*Aplicaciones del catalizador de Craqueo Catalítico (FCC) usado en la preparación de conglomerantes hidráulicos. Estudio de sus propiedades puzolánicas*”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. U. Politécnica de Valencia. España. 2002.
75. Payá, J.; Borrachero, MV.; Monzó, J.; Bonilla, M. y Soriano, L. “*Termogravimetría de alta resolución aplicada a cementos hidratados*”. X Congreso Nacional de Materiales. Mondragon Unibertsitatea. San Sebastian-España. Junio 2008.

76. UNE-EN 80-112. *Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la retracción de secado y del hinchamiento en agua.* 1989.
77. UNE-EN 80-113. *Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos: Determinación de la expansión en autoclave.* 1986.
78. UNE-EN 13279-2. *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.* 2006.
79. Borrachero, M.V.; Payá, J.; Bonilla, M.; Monzó, J.; Peris, E. y Mellado, A. "*Prácticas de Química de los Materiales*". Dpto. Ing. De la Construcción y Proy. De Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Valencia. Edit. UPV. Ref. 2004.4087.
80. Roldán, W. "*Preparación de nuevos conglomerantes a partir de mezclas mixtas de cemento-yeso-puzolana*". Informe DEA. Dpto. Ing. de la Construcción y Proyectos de Ing. Civil. U. Politécnica de Valencia. Mayo 2008.
81. Monzó, J.; Payá, J.; Borrachero, M.V. y Roldán, W. "*Mortero a base de Cemento-Yeso-Puzolana, como aporte de material no convencional a la edificación de bajo coste*". Tenth International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies NOCMAT-2008. Universidad del Valle. Tema IMC-29. Noviembre 2008. Cali, Colombia.
82. Zornoza, E.; Garcéz, P.; Monzó, J.; Borrachero, M.V.; Payá, J. "*Compatibility of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) with various types of cement*". Advance in Cement Research. 19 (2007). 117-124.
83. Campbell, D. "*Microscopical examination and interpretation of Portland Cement and Clinker*". Portland Cement Association. USA. Second Edition. 1999.
84. Hewlett, P. "*LEA'S. Chemistry of Cement and Concrete*". Ed. Arnold, 4<sup>o</sup> Ed, 1998. London.
85. Piles, V. "*Estudio de los morteros de los revestimientos continuos de las arquitecturas del Centro Histórico de Valencia. Preparación de morteros de restauración mixtos cal-puzolana*". Tesis Doctoral. Departamento de Química. U. Politécnica de Valencia. España. 2006.
86. Arizzi, A; Cultrone, G y Sebastián, E. "Estudio de las Fases Minerales de Neoformación en Morteros de Cal Aérea tras la Adición de Metacaolín y Sulfoaluminato Cálcico". Revista de la Sociedad Española de Mineralogía. Macla N°11. Septiembre 2009. Pág. 29-30.
87. Payá, J.; Borrachero, M.V.; Monzó, J.; Peris-Mora, E.; Bonilla, M. "*Long term mechanical strength behaviour in fly ash/Portland cement mortars*

## BIBLIOGRAFÍA

---

- prepared using processed ashes*". Journal of Chemical Technology & Biotechnology. Volume 77, Issue 3, pages 336–344, March 2002.
88. Talero, R. "*Kinetochemical and morphological differentiation of ettringites by the Le Chatelier-Anstett test*". Cement and Concrete Research. 32 (2002). Pp. 707-717.
89. Talero, R. "*Comparative XRD analysis ettringite originating from pozzolan and from portland cement*". Cement Concrete Research. 26 (8) (1996). Pp. 1277-1283.

---

## **ANEXO A**

---



## Anexo A

**Tabla A-1. Pérdida de Agua Combinada. Pasta de Control 1  
“Cemento/Escayola = 60/40”**

Tipo Curado	Edad [días]	B.H.(200°C) [%]	TG (600°C) [%]	CH [%]
(B)	7	12,70	16,88	1,17
(B+A)	7	13,02	17,08	1,06
(B)	14	13,03	17,33	1,22
(B+A)	14	13,43	17,51	1,13
(B)	28	13,46	18,14	1,23
(B+A)	28	13,86	18,49	1,18
(B)	60	15,12	20,00	1,24
(B+A)	60	15,55	20,20	1,18
(B)	90	16,06	21,67	1,26
(B+A)	90	16,49	21,58	1,21
(B)	180	17,56	22,82	1,21
(B+A)	180	17,32	22,85	1,14
(B)	360	17,91	23,15	1,25
(B+A)	360	18,58	23,38	1,25

**Tabla A-2. Pérdidas de Agua Combinada. Pasta de Control 2  
“Cemento/Escayola = 50/50”**

Tipo Curado	Edad [días]	B.H.(200°C) [%]	TG (600°C) [%]	CH [%]
(B)	7	13,97	17,58	0,97
(B+A)	7	14,35	18,07	0,89
(B)	14	14,33	17,86	1,02
(B+A)	14	14,50	18,07	0,99
(B)	28	14,59	18,50	1,04
(B+A)	28	14,96	18,96	1,00
(B)	60	16,34	20,53	1,05
(B+A)	60	16,59	20,51	1,00
(B)	90	17,70	21,73	1,02
(B+A)	90	17,41	21,63	1,00
(B)	180	18,60	22,74	1,01
(B+A)	180	18,69	22,75	0,98
(B)	360	18,71	22,82	1,01
(B+A)	360	19,34	23,46	1,02

**Tabla A-3. Pérdidas de Agua Combinada. Pasta Control 3  
“Cemento/Escayola = 0/100” (escayola 100%)**

Tipo Curado	Edad [días]	B.H.(200°C) [%]	TG (600°C) [%]	CH [%]
(B)	7	19,19	19,85	0,00
(B+A)	7	19,15	19,78	0,00
(B)	14	18,86	19,26	0,00
(B+A)	14	18,92	19,09	0,00
(B)	28	19,21	19,72	0,00
(B+A)	28	19,20	19,73	0,00
(B)	60	19,37	19,85	0,00
(B+A)	60	19,40	19,62	0,00
(B)	90	19,45	20,01	0,00
(B+A)	90	19,37	19,85	0,00
(B)	180	19,52	20,06	0,00
(B+A)	180	19,52	19,91	0,00
(B)	360	19,51	20,09	0,00
(B+A)	360	19,50	19,93	0,00

**Tabla A-4. Pérdidas de Agua Combinada. Pasta Control 4  
“Cemento/Escayola = 100/0” (cemento 100%)**

Tipo Curado	Edad [días]	B.H.(200°C) [%]	TG (600°C) [%]	CH [%]
(B)	7	6,98	15,87	1,56
(B+A)	7	7,15	15,69	1,78
(B)	14	7,22	15,08	1,87
(B+A)	14	7,41	15,55	2,03
(B)	28	7,52	15,83	1,95
(B+A)	28	7,63	15,94	1,95
(B)	60	7,96	16,50	1,97
(B+A)	60	8,23	16,69	1,97
(B)	90	8,21	16,90	1,96
(B+A)	90	8,28	17,12	1,96
(B)	180	8,71	17,52	1,97
(B+A)	180	8,38	17,62	1,96
(B)	360	8,32	16,79	1,98
(B+A)	360	8,57	16,88	1,97

**Tabla A-5. Pérdida de Agua Combinada. Pastas y Morteros**  
**"cem BI 42.5R/Escayola/Pz = 20/40/40"**

Tipo Pz-(Curado)	Edad [días]	Pastas			Morteros	
		B.H.(200°C) [ % ]	TG (600°C) [ % ]	CH [%]	B.H.(200°C) [ % ]	Rc [MPa]
CV-(B)	7	10,17	11,51	0,31	2,77	4,0
CV-(B+A)	7	11,25	12,44	0,23	3,04	2,9
FC-(B)	7	9,64	11,46	0,38	2,51	2,5
FC-(B+A)	7	10,17	12,00	0,28	2,69	2,1
CV-(B)	14	12,18	13,79	0,22	3,54	4,2
CV-(B+A)	14	12,23	13,65	0,14	3,27	3,5
FC-(B)	14	10,80	12,63	0,40	2,79	2,6
FC-(B+A)	14	10,94	12,64	0,31	2,95	2,3
CV-(B)	28	14,06	15,57	0,03	4,01	4,7
CV-(B+A)	28	14,12	15,71	0,02	3,99	4,3
FC-(B)	28	11,92	13,80	0,42	3,15	2,5
FC-(B+A)	28	11,91	13,77	0,33	3,26	1,6
CV-(B)	60	16,39	18,60	0,00	4,66	10,2
CV-(B+A)	60	16,12	18,55	0,00	4,69	8,7
FC-(B)	60	13,39	15,69	0,43	3,74	2,6
FC-(B+A)	60	13,50	15,73	0,38	3,66	1,3
CV-(B)	90	17,98	20,23	0,00	4,85	12,5
CV-(B+A)	90	18,04	20,19	0,00	4,88	11,3
FC-(B)	90	14,27	16,94	0,39	4,06	2,8
FC-(B+A)	90	14,80	17,02	0,29	3,97	1,2
CV-(B)	180	18,29	20,66	0,00	4,78	13,5
CV-(B+A)	180	18,49	20,61	0,00	4,57	12,9
FC-(B)	180	15,09	17,88	0,41	4,39	2,8
FC-(B+A)	180	15,43	17,94	0,33	4,26	1,6
CV-(B)	360	14,27	16,50	0,00	3,93	14,3
CV-(B+A)	360	15,40	17,65	0,00	4,19	13,4
FC-(B)	360	14,39	16,51	0,40	4,49	2,9
FC-(B+A)	360	14,09	16,57	0,31	4,90	0,5

**Tabla A-6. Pérdida de Agua Combinada. Pastas y Morteros**  
**"cem BI 42.5R/Escayola/Pz = 20/50/30"**

Pastas					Morteros	
Tipo Pz-(Curado)	Edad [días]	B.H.(200°C) [ % ]	TG (600°C) [ % ]	CH [%]	B.H.(200°C) [ % ]	Rc [MPa]
CV-(B)	7	13,84	15,76	0,07	3,60	4,7
CV-(B+A)	7	13,87	15,59	0,06	3,64	4,2
FC-(B)	7	11,97	14,36	0,30	3,15	3,7
FC-(B+A)	7	12,18	13,92	0,23	3,21	3,3
CV-(B)	14	15,25	17,01	0,02	4,08	6,8
CV-(B+A)	14	15,09	17,03	0,03	4,10	4,7
FC-(B)	14	12,27	14,19	0,30	3,34	3,6
FC-(B+A)	14	12,27	14,05	0,22	3,39	3,1
CV-(B)	28	16,55	19,29	0,00	4,53	10,5
CV-(B+A)	28	16,95	19,07	0,00	4,52	7,8
FC-(B)	28	12,22	14,37	0,35	3,44	3,6
FC-(B+A)	28	12,27	14,27	0,23	3,44	3,6
CV-(B)	60	17,20	19,68	0,00	4,68	14,2
CV-(B+A)	60	17,45	19,73	0,00	4,73	12,5
FC-(B)	60	12,59	15,09	0,34	3,57	3,9
FC-(B+A)	60	12,70	14,62	0,23	3,51	2,8
CV-(B)	90	17,26	20,31	0,00	4,82	16,6
CV-(B+A)	90	17,52	20,15	0,00	4,83	15,1
FC-(B)	90	12,66	15,70	0,35	3,77	4,2
FC-(B+A)	90	12,96	15,00	0,27	3,75	2,4
CV-(B)	180	18,47	20,77	0,00	5,04	18,6
CV-(B+A)	180	18,24	20,47	0,00	4,89	16,5
FC-(B)	180	16,18	18,53	0,36	4,63	3,7
FC-(B+A)	180	16,43	18,67	0,33	4,66	1,7
CV-(B)	360	17,96	20,44	0,00	4,88	19,6
CV-(B+A)	360	18,41	20,97	0,00	4,82	17,5
FC-(B)	360	16,59	19,34	0,35	5,07	3,8
FC-(B+A)	360	16,86	19,35	0,33	5,07	1,2

**Tabla A-7. Pérdida de Agua Combinada. Pastas y Morteros**  
**"cem BI 42.5R/Escayola/Pz=30/40/30"**

Pastas					Morteros	
Tipo Pz-(Curado)	Edad [días]	B.H.(200°C) [ % ]	TG (600°C) [ % ]	CH [%]	B.H.(200°C) [ % ]	Rc [MPa]
CV-(B)	7	11,75	13,52	0,57	3,14	4,6
CV-(B+A)	7	11,56	13,42	0,41	3,16	4,0
FC-(B)	7	10,96	13,64	0,59	3,01	4,0
FC-(B+A)	7	11,09	13,29	0,50	2,90	3,6
CV-(B)	14	11,48	13,66	0,54	3,42	4,9
CV-(B+A)	14	11,18	13,55	0,42	3,10	4,2
FC-(B)	14	11,90	14,39	0,63	3,16	3,8
FC-(B+A)	14	11,80	14,32	0,54	3,15	3,3
CV-(B)	28	14,18	16,62	0,38	3,98	5,8
CV-(B+A)	28	14,22	16,57	0,27	3,91	4,8
FC-(B)	28	11,88	13,96	0,70	3,47	4,0
FC-(B+A)	28	12,06	14,24	0,56	3,49	2,8
CV-(B)	60	15,83	18,00	0,07	4,61	7,6
CV-(B+A)	60	15,72	18,29	0,04	4,61	5,8
FC-(B)	60	14,28	17,48	0,62	4,03	3,4
FC-(B+A)	60	14,79	17,56	0,48	3,92	1,5
CV-(B)	90	17,55	19,99	0,00	5,04	10,0
CV-(B+A)	90	18,15	20,57	0,00	5,15	7,8
FC-(B)	90	15,65	18,96	0,59	4,28	3,7
FC-(B+A)	90	16,06	18,98	0,45	4,41	1,5
CV-(B)	180	20,29	23,76	0,00	5,48	16,2
CV-(B+A)	180	20,90	24,33	0,00	5,65	14,5
FC-(B)	180	16,43	20,20	0,59	4,73	3,4
FC-(B+A)	180	16,89	20,20	0,47	4,74	1,7
CV-(B)	360	19,46	22,38	0,00	5,19	20,3
CV-(B+A)	360	19,82	22,76	0,00	4,84	16,8
FC-(B)	360	15,31	18,86	0,61	5,47	4,2
FC-(B+A)	360	15,50	18,97	0,47	5,11	0,9



---

**ANEXO B**

---



## Anexo B

**Tabla B-1. Control de Peso en probetas mortero control “cem/yeso = 50/50”. T° y Humedad Relativa.**

Edad [días]	Tipo Cemento	Tipo de curado	Peso (total 3 probetas) [g]			Condiciones mediambientales (promedio) en sala de curado	
			al desmoldar	fin curado en bolsa	fin curado en agua	T° [°C]	H.R. [%]
28	BL 42,5 R	Bolsa	1597,6	1596,9	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1610,2	1609,4	1622,8	(*)	(**)
28	BL 52,5 R	Bolsa	1633,4	1632,5	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1613,5	1612,8	1634,6	(*)	(**)
28	Gris 42,5R	Bolsa	1615,9	1615,2	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1611,4	1610,0	1622,8	(*)	(**)
		Ambiente Lab.	1613,3	1493,8	-	24	41
28	Gris 52,5R	Bolsa	1602,5	1601,7	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1602,3	1601,7	1610,6	(*)	(**)
90	BL 42,5 R	Bolsa	1612,6	1611,1	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1606,6	1605,4	1649,9	(*)	(**)
90	BL 52,5 R	Bolsa	1616,2	1615,0	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1608,1	1606,9	1643,1	(*)	(**)
90	Gris 42,5R	Bolsa	1620,2	1619,6	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1636,1	1634,9	1644,1	(*)	(**)
		Ambiente Lab.	1613,3	1498,3	-	22	41
90	Gris 52,5R	Bolsa	1609,1	1608,5	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1602,2	1601,5	1613,9	(*)	(**)

Color indica peso de probetas sin Bolsa de protección, libres al ambiente del laboratorio.

(\*): Condiciones estables de temperatura ambiental en cámara húmeda ( $20 \pm 2$ )°C

(\*\*): Condiciones estables de humedad relativa ambiental en cámara húmeda ( $95 \pm 5$ )%

**Tabla B-2. Control de Peso en probetas “cem/yeso/CV = 20/50/30”. T° y Humedad Relativa**

Edad [días]	Tipo Cemento	Tipo de curado	Peso (total 3 probetas) [g]			Condiciones mediambientales (promedio) en sala de curado	
			al desmoldar	fin curado en bolsa	fin curado en agua	T° [°C]	H.R. [%]
28	BL 42,5 R	Bolsa	1593,8	1592,9	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1595,3	1594,5	1601,1	(*)	(**)
28	BL 52,5 R	Bolsa	1600,0	1598,9	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1602,5	1601,8	1620,9	(*)	(**)
28	Gris 42,5R	Bolsa	1615,0	1614,2	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1639,5	1639,1	1650,4	(*)	(**)
		Ambiente Lab.	1630,7	1482,7	-	24	41
28	Gris 52,5R	Bolsa	1625,1	1624,0	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1619,5	1619,2	1619,7	(*)	(**)
90	BL 42,5 R	Bolsa	1599,0	1597,7	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1585,9	1584,9	1606,2	(*)	(**)
90	BL 52,5 R	Bolsa	1599,4	1598,5	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1598,9	1597,4	1625,7	(*)	(**)
90	Gris 42,5R	Bolsa	1621,9	1621,3	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1632,3	1630,9	1646,2	(*)	(**)
		Ambiente Lab.	1608,2	1465,4	-	22	41
90	Gris 52,5R	Bolsa	1615,8	1614,8	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1615,4	1614,5	1627,5	(*)	(**)

Color indica peso de probetas sin Bolsa de protección, libres al ambiente del laboratorio.

(\*): Condiciones estables de temperatura ambiental en cámara húmeda ( $20 \pm 2$ )°C

(\*\*): Condiciones estables de humedad relativa ambiental en cámara húmeda ( $95 \pm 5$ )%

**Tabla B-3. Control de Peso en probetas “cem/yeso/CV(m) = 20/50/30”. T° y Humedad Relativa.**

Edad [días]	Tipo Cemento	Tipo de curado	Peso (total 3 probetas) [g]			Condiciones mediambientales (promedio) en sala de curado	
			al desmoldar	fin curado en bolsa	fin curado en agua	T° [°C]	H.R. [%]
28	BL 42,5 R	Bolsa	1614,9	1613,6	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1608,9	1608,0	1624,2	(*)	(**)
28	BL 52,5 R	Bolsa	1622,3	1621,5	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1637,2	1636,4	1656,8	(*)	(**)
28	Gris 42,5R	Bolsa	1629,9	1629,2	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1626,6	1625,9	1644,0	(*)	(**)
28	Gris 52,5R	Bolsa	1640,6	1639,8	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1629,5	1628,9	1634,5	(*)	(**)
90	BL 42,5 R	Bolsa	1612,6	1611,5	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1605,1	1604,2	1621,7	(*)	(**)
90	BL 52,5 R	Bolsa	1620,4	1620,0	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1623,4	1623,1	1644,7	(*)	(**)
90	Gris 42,5R	Bolsa	1634,6	1634,4	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1636,0	1635,8	1651,3	(*)	(**)
90	Gris 52,5R	Bolsa	1624,1	1623,6	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1637,7	1637,1	1649,9	(*)	(**)

(\*): Condiciones estables de temperatura ambiental en cámara húmeda (20 ± 2)°C

(\*\*): Condiciones estables de humedad relativa ambiental en cámara húmeda (95 ± 5)%

**Tabla B-4. Control de Peso en probetas mortero control “cem/escayola = 50/50”. T° y Humedad Relativa.**

Edad [días]	Tipo Cemento	Tipo de curado	Peso (total 3 probetas) [g]			Condiciones mediambientales (promedio) en sala de curado	
			al desmoldar	fin curado en bolsa	fin curado en agua	T° [°C]	H.R. [%]
28	BL 42,5 R	Bolsa	1597,4	1595,8	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1603,3	1601,9	1616,3	(*)	(**)
28	BL 52,5 R	Bolsa	1602,4	1601,1	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1616,1	1614,8	1636,0	(*)	(**)
28	Gris 42,5R	Bolsa	1611,4	1610,1	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1616,9	1615,7	1623,9	(*)	(**)
		Ambiente Lab.	1610,1	1494,1	-	24	41
28	Gris 52,5R	Bolsa	1604,4	1603,7	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1607,0	1606,3	1616,1	(*)	(**)
90	BL 42,5 R	Bolsa	1603,6	1602,0	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1594,2	1592,8	1634,9	(*)	(**)
90	BL 52,5 R	Bolsa	1605,5	1603,9	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1604,9	1603,4	1638,0	(*)	(**)
90	Gris 42,5R	Bolsa	1619,2	1618,2	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1604,9	1603,7	1616,7	(*)	(**)
		Ambiente Lab.	1615,7	1498,5	-	22	41
90	Gris 52,5R	Bolsa	1612,6	1611,9	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1602,0	1601,5	1613,6	(*)	(**)

Color indica peso de probetas sin Bolsa de protección, libres al ambiente del laboratorio.

(\*): Condiciones estables de temperatura ambiental en cámara húmeda (20 ± 2)°C

(\*\*): Condiciones estables de humedad relativa ambiental en cámara húmeda (95 ± 5)%

**Tabla B-5. Control de Peso en probetas “cem/escayola/CV = 20/50/30”. T° y Humedad Relativa.**

Edad [días]	Tipo Cemento	Tipo de curado	Peso (total 3 probetas) [g]			Condiciones mediambientales (promedio) en sala de curado	
			al desmoldar	fin curado en bolsa	fin curado en agua	T° [°C]	H.R. [%]
28	BL 42,5 R	Bolsa	1587,5	1586,4	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1586,5	1585,7	1599,9	(*)	(**)
28	BL 52,5 R	Bolsa	1596,4	1595,8	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1598,5	1597,7	1617,7	(*)	(**)
28	Gris 42,5R	Bolsa	1615,7	1614,9	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1611,4	1610,8	1625,2	(*)	(**)
		Ambiente Lab.	1622,2	1483,1	-	24	41
28	Gris 52,5R	Bolsa	1614,8	1613,8	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1609,3	1608,5	1609,4	(*)	(**)
90	BL 42,5 R	Bolsa	1589,1	1587,8	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1587,6	1586,2	1607,0	(*)	(**)
90	BL 52,5 R	Bolsa	1596,2	1595,4	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1595,8	1595,0	1622,7	(*)	(**)
90	Gris 42,5R	Bolsa	1611,0	1610,7	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1617,7	1617,1	1631,1	(*)	(**)
		Ambiente Lab.	1606,3	1461,9	-	22	41
90	Gris 52,5R	Bolsa	1607,5	1606,5	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1622,0	1621,0	1634,4	(*)	(**)

Color indica peso de probetas sin Bolsa de protección, libres al ambiente del laboratorio.

(\*): Condiciones estables de temperatura ambiental en cámara húmeda (20 ± 2)°C

(\*\*): Condiciones estables de humedad relativa ambiental en cámara húmeda (95 ± 5)%

**Tabla B-6. Control de Peso en probetas “cem/escayola/CV(m) = 20/50/30”. T° y Humedad Relativa.**

Edad [días]	Tipo Cemento	Tipo de curado	Peso (total 3 probetas) [g]			Condiciones mediambientales (promedio) en sala de curado	
			al desmoldar	fin curado en bolsa	fin curado en agua	T° [°C]	H.R. [%]
28	BL 42,5 R	Bolsa	1616,6	1615,7	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1598,2	1597,5	1612,9	(*)	(**)
28	BL 52,5 R	Bolsa	1617,2	1616,2	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1609,9	1609,3	1626,6	(*)	(**)
28	Gris 42,5R	Bolsa	1634,3	1633,8	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1624,3	1623,7	1640,8	(*)	(**)
28	Gris 52,5R	Bolsa	1622,4	1621,8	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1631,0	1630,6	1634,6	(*)	(**)
90	BL 42,5 R	Bolsa	1610,5	1609,5	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1611,5	1610,4	1627,0	(*)	(**)
90	BL 52,5 R	Bolsa	1612,3	1611,8	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1610,5	1610,4	1623,3	(*)	(**)
90	Gris 42,5R	Bolsa	1611,9	1611,5	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1616,7	1616,1	1633,4	(*)	(**)
90	Gris 52,5R	Bolsa	1629,4	1628,6	-	(*)	(**)
		Bolsa + Agua	1623,8	1623,1	1640,5	(*)	(**)

(\*): Condiciones estables de temperatura ambiental en cámara húmeda (20 ± 2)°C

(\*\*): Condiciones estables de humedad relativa ambiental en cámara húmeda (95 ± 5)%



---

## **ANEXO C**

---



Anexo C

**Tabla C-1. Control de peso y variación de longitud en probetas mortero de composición 1. “cem gris 52,5R/yeso/Pz = 20/40/40”. Con y sin uso de aditivo.**

Pz	Adit.	Curado	Edad	Peso (total 3 probetas) [g]			Longitud Promedio [cm]		
			[días]	desmolde	fin Bolsa	fin Agua	desmolde	fin Bolsa	fin Agua
CV	no	B	28	1561,0	1560,5	-	15,993	16,023	-
			90	1610,0	1609,2	-	16,025	16,050	-
			180	1611,0	1609,3	-	16,017	16,050	-
CV	si	B	28	1626,9	1626,3	-	16,040	16,060	-
			90	1620,6	1620,0	-	16,040	16,060	-
			180	1613,7	1611,0	-	16,030	16,050	-
CV	no	B + A	28	1601,5	1600,9	1616,2	16,015	16,048	16,048
			90	1612,6	1612,1	1627,2	16,015	16,043	16,045
			180	1611,7	1610,1	1627,2	16,000	16,030	16,035
CV	si	B + A	28	1611,9	1611,3	1622,7	16,010	16,025	16,035
			90	1605,3	1605,0	1619,1	16,000	16,025	16,025
			180	1606,8	1605,9	1619,4	16,015	16,040	16,040
CV(m)	no	B	28	1637,0	1636,4	-	16,027	16,048	-
			90	1633,0	1632,2	-	16,027	16,057	-
			180	1626,0	1623,2	-	16,008	16,035	-
CV(m)	si	B	28	1651,8	1651,8	-	16,045	16,065	-
			90	1639,5	1638,6	-	16,050	16,065	-
			180	1648,2	1646,7	-	16,035	16,055	-
CV(m)	no	B + A	28	1626,2	1625,7	1636,8	16,042	16,067	16,062
			90	1630,9	1630,4	1642,1	16,048	16,072	16,073
			180	1621,6	1619,5	1633,0	16,037	16,060	16,063
CV(m)	si	B + A	28	1647,3	1646,1	1655,1	16,045	16,060	16,060
			90	1642,5	1641,6	1653,6	16,045	16,060	16,060
			180	1643,1	1641,0	1653,3	16,035	16,050	16,050

**Tabla C2. Control de peso y variación de longitud en probetas mortero de composición 2 “cem gris 52,5R/yeso/Pz = 20/50/30”. Con y sin uso de aditivo.**

Pz	Adit.	Curado	Edad	Peso (total 3 probetas) [g]			Longitud Promedio [cm]		
			[días]	desmolde	fin Bolsa	fin Agua	desmolde	fin Bolsa	fin Agua
CV	no	B	28	1592,8	1592,2	-	15,998	16,018	-
			90	1603,3	1603,0	-	16,007	16,030	-
			180	1621,7	1620,5	-	16,025	16,055	-
CV	si	B	28	1622,1	1621,8	-	16,010	16,035	-
			90	1614,0	1612,8	-	16,000	16,025	-
			180	1602,0	1600,8	-	16,015	16,040	-
CV	no	B + A	28	1611,5	1611,2	1622,3	16,007	16,033	16,037
			90	1612,7	1612,6	1628,4	16,043	16,075	16,068
			180	1620,6	1619,3	1636,4	16,040	16,060	16,070
CV	si	B + A	28	1622,1	1621,5	1631,1	16,035	16,045	16,050
			90	1619,1	1618,5	1632,3	16,020	16,035	16,035
			180	1605,9	1605,3	1618,5	16,045	16,055	16,060
CV(m)	no	B	28	1637,2	1636,9	-	16,032	16,053	-
			90	1626,2	1625,7	-	16,045	16,063	-
			180	1620,7	1620,1	-	16,005	16,023	-
CV(m)	si	B	28	1633,8	1633,5	-	16,055	16,070	-
			90	1628,7	1628,1	-	16,070	16,085	-
			180	1623,9	1622,4	-	16,050	16,065	-
CV(m)	no	B + A	28	1636,4	1636,3	1647,6	16,027	16,050	16,058
			90	1624,1	1624,0	1636,4	16,030	16,057	16,062
			180	1628,7	1628,4	1641,2	16,038	16,062	16,070
CV(m)	si	B + A	28	1619,7	1619,4	1627,2	16,045	16,055	16,057
			90	1620,0	1619,7	1631,7	16,020	16,030	16,032
			180	1621,8	1621,2	1632,6	16,030	16,040	16,042

**Tabla C-3. Control de peso y variación de longitud en probetas mortero de composición 3 “cem gris 52,5R/yeso/Pz = 20/60/20”. Con y sin uso de aditivo.**

Pz	Adit.	Curado	Edad	Peso (total 3 probetas) [g]			Longitud Promedio [cm]		
			[días]	desmolde	fin Bolsa	fin Agua	desmolde	fin Bolsa	fin Agua
CV	no	Bolsa	28	1613,9	1613,3	-	16,023	16,055	-
			90	1616,4	1615,9	-	16,025	16,052	-
			180	1619,8	1619,4	-	16,033	16,070	-
CV	si	B	28	1603,2	1602,9	-	15,990	16,005	-
			90	1599,0	1598,4	-	15,990	16,005	-
			180	1595,7	1594,5	-	16,005	16,020	-
CV	no	B + A	28	1626,1	1625,9	1637,0	16,052	16,065	16,080
			90	1611,3	1611,0	1623,6	16,025	16,052	16,053
			180	1611,1	1611,0	1623,3	16,020	16,035	16,045
CV	si	B + A	28	1612,2	1611,6	1621,2	16,040	16,055	16,055
			90	1613,1	1612,5	1623,6	16,025	16,040	16,040
			180	1611,0	1610,7	1619,7	16,030	16,045	16,045
CV(m)	no	B	28	1624,9	1624,4	-	16,042	16,063	-
			90	1618,2	1617,9	-	16,015	16,038	-
			180	1624,0	1623,6	-	16,047	16,065	-
CV(m)	si	B	28	1614,6	1613,4	-	16,000	16,015	-
			90	1616,1	1614,9	-	16,015	16,030	-
			180	1607,4	1605,9	-	16,020	16,035	-
CV(m)	no	B + A	28	1601,4	1601,2	1617,5	16,035	16,053	16,058
			90	1608,3	1608,2	1618,9	15,997	16,013	16,022
			180	1584,6	1584,3	1600,5	16,008	16,033	16,033
CV(m)	si	B + A	28	1634,4	1633,8	1640,7	16,045	16,060	16,060
			90	1628,1	1627,2	1636,8	16,040	16,055	16,055
			180	1628,7	1627,5	1637,4	16,045	16,060	16,060

**Tabla C-4. Control de peso y variación de longitud en probetas mortero de composición 4 “cem gris 52,5R/yeso/Pz = 15/50/35”. Con y sin uso de aditivo.**

Pz	Adit.	Curado	Edad	Peso (total 3 probetas) [g]			Longitud Promedio [cm]		
			[días]	desmolde	fin Bolsa	fin Agua	desmolde	fin Bolsa	fin Agua
CV	no	B	28	1598,3	1597,8	-	16,007	16,027	-
			90	1604,9	1604,3	-	16,037	16,057	-
			180	1598,0	1597,0	-	16,038	16,058	-
CV	si	B	28	1622,1	1622,1	-	16,045	16,060	-
			90	1622,1	1621,5	-	16,035	16,050	-
			180	1611,3	1609,8	-	16,040	16,055	-
CV	no	B + A	28	1595,5	1594,8	1605,7	16,034	16,052	16,053
			90	1601,1	1600,4	1612,3	16,040	16,058	16,060
			180	1593,6	1590,8	1604,0	16,000	16,015	16,020
CV	si	B + A	28	1617,0	1616,1	1624,2	16,025	16,035	16,035
			90	1615,5	1614,3	1625,7	16,025	16,035	16,035
			180	1608,9	1608,0	1617,9	16,020	16,030	16,030
CV(m)	no	B	28	1625,1	1624,6	-	16,045	16,062	-
			90	1620,7	1619,3	-	16,033	16,047	-
			180	1610,9	1606,9	-	16,012	16,025	-
CV(m)	si	B	28	1644,0	1644,0	-	16,045	16,059	-
			90	1649,1	1648,8	-	16,040	16,055	-
			180	1631,1	1629,3	-	16,040	16,055	-
CV(m)	no	B + A	28	1625,3	1625,2	1635,3	16,050	16,072	16,068
			90	1626,9	1626,6	1636,3	16,025	16,050	16,043
			180	1614,7	1613,9	1624,7	16,005	16,022	16,022
CV(m)	si	B + A	28	1636,8	1636,8	1645,8	16,045	16,055	16,055
			90	1639,8	1638,0	1646,4	16,050	16,060	16,060
			180	1629,0	1626,9	1634,1	16,030	16,040	16,045

**Tabla C-5. Control de peso y variación de longitud en probetas mortero de composición 5 “cem gris 52,5R/yeso/Pz = 10/50/40”. Con y sin uso de aditivo.**

Pz	Adit.	Curado	Edad	Peso (total 3 probetas) [g]			Longitud Promedio [cm]		
			[días]	desmolde	fin Bolsa	fin Agua	desmolde	fin Bolsa	fin Agua
CV	no	B	28	1603,3	1602,8	-	16,045	16,058	-
			90	1602,9	1602,1	-	16,035	16,050	-
			180	1599,8	1598,2	-	15,993	16,005	-
CV	si	B	28	1628,4	1628,1	-	16,035	16,048	-
			90	1622,7	1621,5	-	16,020	16,033	-
			180	1621,8	1619,7	-	16,035	16,048	-
CV	no	B + A	28	1611,4	1610,9	1620,7	16,038	16,050	16,052
			90	1599,9	1599,3	1608,5	15,998	16,008	16,012
			180	1603,5	1602,2	1613,0	16,035	16,048	16,048
CV	si	B + A	28	1609,5	1609,2	1617,9	15,990	16,000	16,001
			90	1608,9	1607,4	1614,0	15,995	16,005	16,006
			180	1605,9	1604,1	1609,5	16,005	16,015	16,017
CV(m)	no	B	28	1609,6	1609,3	-	16,038	16,048	-
			90	1610,6	1610,0	-	16,010	16,022	-
			180	1610,0	1608,6	-	15,997	16,007	-
CV(m)	si	B	28	1622,7	1622,4	-	15,995	16,005	-
			90	1616,1	1614,6	-	16,010	16,018	-
			180	1617,6	1615,5	-	16,005	16,015	-
CV(m)	no	B + A	28	1612,7	1612,3	1619,6	16,007	16,018	16,018
			90	1621,1	1620,5	1627,1	16,040	16,053	16,050
			180	1625,1	1624,1	1632,0	16,037	16,050	16,048
CV(m)	si	B + A	28	1635,9	1635,6	1642,8	16,035	16,045	16,045
			90	1622,7	1620,6	1627,2	16,035	16,045	16,045
			180	1635,3	1633,2	1638,3	16,035	16,045	16,045



---

**ANEXO D**

---



## Anexo D

**Tabla D-1(a).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/cv = 20/50/30". Promedio 3 probetas con yeso y CV.

Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
1	371,0	308,17	0,00	0,00	80	370,7	310,82	0,99	-0,09
3	371,0	308,17	0,00	0,00	87	370,7	310,81	0,98	-0,10
4	371,1	308,18	0,00	0,01	94	370,7	310,81	0,98	-0,10
5	371,1	308,17	0,00	0,01	101	370,7	310,82	0,99	-0,10
8	371,0	308,19	0,01	-0,01	109	370,7	310,83	0,99	-0,10
12	371,0	308,28	0,04	-0,02	115	370,7	310,84	0,99	-0,09
17	371,0	308,37	0,07	-0,02	129	370,7	310,82	0,99	-0,09
25	370,9	308,70	0,20	-0,04	141	370,6	310,84	0,99	-0,13
31	370,9	309,00	0,31	-0,05	157	370,4	310,84	0,99	-0,17
38	370,8	309,39	0,46	-0,05	173	370,2	310,84	0,99	-0,23
42	370,8	309,64	0,55	-0,06	180	370,1	310,84	0,99	-0,26
45	370,8	309,80	0,61	-0,06	200	370,8	309,35	0,99	-0,27
52	370,8	310,17	0,75	-0,06	228	370,5	309,35	0,98	-0,35
59	370,8	310,47	0,86	-0,07	270	370,3	309,31	0,96	-0,41
67	370,7	310,72	0,95	-0,08	312	370,1	309,30	0,95	-0,46
73	370,7	310,79	0,98	-0,08	373	369,1	310,72	0,93	-0,72
77	370,7	310,81	0,99	-0,09	434	367,1	310,75	0,95	-1,27
					497	365,8	310,71	0,94	-1,61

Color indica la edad en que una probeta es apartada de la serie, se le retira el plástico de protección y se sumerge en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-1(b).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/cv = 20/50/30". Probeta sin protección sumergida por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.

Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
180	370,1	310,84	0,99	-0,26	214	376,0	311,57	0,98	1,74
181	376,3	311,61	1,00	1,82	242	375,6	311,56	0,98	1,63
183	376,3	311,60	0,99	1,82	275	375,4	311,54	0,97	1,58
184	376,2	311,61	0,99	1,79	312	375,3	311,54	0,97	1,55
186	376,2	311,59	0,99	1,79	373	374,7	311,51	0,96	1,39
193	376,1	311,59	0,99	1,77	434	374,0	311,50	0,96	1,20
200	376,1	311,56	0,98	1,77	497	373,2	311,48	0,95	0,98

Color indica la edad en que la probeta es apartada de la serie, se le retira el plástico de protección y se sumerge en agua por 24 horas. Valores de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-2(a). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/fc = 20/50/30". Probetas con yeso y FC. Promedio 4 probetas.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
1	378,3	309,65	0,00	0,00	85	378,0	311,66	0,54	-0,09
2	378,3	309,65	0,00	-0,02	92	378,0	311,74	0,57	-0,09
3	378,3	309,65	0,00	-0,02	99	378,0	311,84	0,61	-0,10
6	378,3	309,66	0,00	-0,02	107	378,0	311,91	0,64	-0,10
10	378,2	309,68	0,01	-0,04	113	378,0	311,97	0,66	-0,09
15	378,2	309,71	0,02	-0,04	127	378,0	312,00	0,67	-0,11
23	378,2	309,85	0,07	-0,04	139	377,9	312,04	0,68	-0,13
29	378,2	309,97	0,12	-0,04	155	377,7	312,04	0,68	-0,20
36	378,1	310,16	0,19	-0,06	171	377,5	312,05	0,69	-0,27
40	378,1	310,25	0,22	-0,07	180	377,4	312,05	0,69	-0,30
43	378,1	310,34	0,25	-0,07	210	374,5	312,57	0,68	-0,47
50	378,1	310,49	0,31	-0,07	240	374,1	312,55	0,67	-0,57
57	378,1	310,66	0,37	-0,07	272	373,9	312,56	0,67	-0,64
65	378,1	310,79	0,42	-0,07	300	373,5	312,54	0,67	-0,73
71	378,1	310,89	0,46	-0,07	342	373,3	312,64	0,70	-0,80
75	378,0	311,52	0,49	-0,09	384	371,9	312,71	0,73	-1,17
78	378,1	311,57	0,51	-0,08	441	368,4	312,79	0,75	-2,10
					492	366,7	312,80	0,76	-2,56

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-2(b). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/fc = 20/50/30". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
180	379,6	311,50	0,69	-0,30	240	387,5	312,55	1,07	1,87
181	388,0	311,83	0,80	2,01	273	387,3	312,62	1,09	1,82
182	388,0	311,89	0,83	2,01	300	387,1	312,67	1,11	1,77
184	387,7	312,06	0,89	1,93	342	387,0	313,31	1,35	1,73
191	387,6	312,23	0,95	1,90	384	386,3	313,98	1,60	1,56
198	387,6	312,34	0,99	1,89	441	385,5	314,47	1,78	1,35
212	387,8	312,44	1,03	1,94	492	384,9	314,62	1,84	1,19

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-3(a). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/cv = 20/50/30". Probetas con Escayola y CV. Promedio 4 probetas.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]
3	371,0	307,99	0,00	0,00	88	370,8	309,36	0,51	-0,05
6	371,0	307,96	-0,01	0,00	104	370,7	309,36	0,51	-0,09
10	371,0	307,97	-0,01	-0,01	120	370,6	309,37	0,51	-0,10
14	371,0	308,05	0,02	0,00	150	370,4	309,38	0,51	-0,18
20	371,0	308,18	0,07	0,00	180	370,2	309,35	0,52	-0,22
27	371,0	308,39	0,15	-0,01	201	186,2	308,26	0,50	-0,31
34	371,0	308,64	0,24	-0,01	221	372,4	309,39	0,49	-0,31
41	370,9	308,91	0,34	-0,02	242	372,3	309,39	0,49	-0,34
48	370,9	309,15	0,43	-0,02	284	372,2	309,34	0,49	-0,36
56	370,9	309,35	0,50	-0,02	320	371,4	309,33	0,47	-0,56
62	370,9	309,37	0,51	-0,04	365	370,5	309,35	0,47	-0,81
70	370,8	309,37	0,51	-0,05	425	369,1	309,35	0,47	-1,18
76	370,8	309,35	0,51	-0,05	482	368,6	309,35	0,47	-1,32

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-3(b). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/cv = 20/50/30". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]
180	367,9	309,27	0,50	-0,22	242	375,4	309,23	0,49	1,87
181	375,5	309,27	0,51	1,91	284	375,3	309,18	0,47	1,84
183	375,5	309,27	0,51	1,91	320	374,9	309,16	0,47	1,73
192	375,5	309,25	0,50	1,91	365	374,3	309,20	0,48	1,58
201	375,5	309,26	0,50	1,89	425	373,5	309,19	0,48	1,35
222	375,4	309,24	0,49	1,88	482	373,1	309,18	0,48	1,25

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-4(a). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/fc = 20/50/30". Probetas con Escayola y FC. Promedio 4 probetas.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
3	370,0	308,62	0,00	0,00	104	369,4	309,35	0,27	-0,14
6	370,0	308,59	-0,01	0,01	120	369,3	309,36	0,27	-0,18
10	370,0	308,58	-0,02	0,00	132	369,1	309,36	0,28	-0,23
14	370,0	308,57	-0,02	0,00	146	369,0	309,35	0,27	-0,27
20	370,0	308,62	0,00	0,00	160	368,8	309,35	0,27	-0,31
27	369,9	308,62	0,00	-0,02	180	368,6	309,33	0,26	-0,37
34	369,9	308,73	0,04	-0,02	201	367,3	309,32	0,26	-0,41
41	369,9	308,81	0,07	-0,02	221	367,2	309,32	0,26	-0,44
48	369,8	308,92	0,11	-0,04	242	367,1	309,33	0,26	-0,48
56	369,8	309,05	0,16	-0,04	284	366,9	309,34	0,27	-0,52
62	369,8	309,16	0,20	-0,05	320	365,8	309,39	0,29	-0,82
76	369,7	309,25	0,23	-0,08	365	364,5	309,56	0,35	-1,19
88	369,7	309,32	0,26	-0,08	425	362,4	309,56	0,35	-1,74
					482	361,6	309,55	0,35	-1,98

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-4(b). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/fc = 20/50/30". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
180	369,8	309,30	0,26	-0,37	242	376,9	310,23	0,60	1,57
181	377,2	309,39	0,29	1,65	284	376,8	311,04	0,90	1,54
183	377,2	309,42	0,30	1,65	320	376,3	311,64	1,13	1,39
192	377,1	309,62	0,37	1,62	365	375,6	312,22	1,34	1,22
201	377,1	309,75	0,42	1,61	425	374,5	312,40	1,41	0,92
222	377,0	309,97	0,50	1,60	482	374,1	312,50	1,44	0,81

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-5(a). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/cv = 20/40/40". Promedio 4 probetas con yeso y CV.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]
3	381,3	307,98	0,00	0,00	98	381,2	310,52	0,95	-0,03
4	381,3	307,97	0,00	0,00	104	381,2	310,52	0,95	-0,03
6	381,3	307,97	0,00	0,00	118	381,2	310,51	0,94	-0,03
13	381,2	308,16	0,07	-0,01	130	381,1	310,53	0,95	-0,03
20	381,2	308,58	0,22	-0,01	146	381,0	310,52	0,95	-0,08
27	381,2	308,99	0,38	-0,01	162	380,9	310,53	0,95	-0,11
31	381,2	309,24	0,47	-0,03	180	380,6	310,54	0,95	-0,18
34	381,2	309,42	0,54	-0,01	208	380,8	310,57	0,95	-0,26
41	381,2	309,97	0,74	-0,03	229	380,7	310,55	0,94	-0,30
48	381,2	310,41	0,91	-0,03	254	380,5	310,50	0,92	-0,34
56	381,2	310,51	0,94	-0,03	283	380,4	310,49	0,92	-0,37
62	381,2	310,49	0,94	-0,03	325	380,2	310,45	0,90	-0,43
69	381,2	310,49	0,94	-0,03	368	379,0	310,44	0,90	-0,74
76	381,2	310,49	0,94	-0,03	411	377,7	310,46	0,91	-1,08
83	381,2	310,49	0,94	-0,03	465	376,1	310,47	0,91	-1,50
90	381,2	310,49	0,94	-0,03	524	375,4	310,45	0,90	-1,68

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de peso y expansión de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-5(b). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/cv = 20/40/40". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]
180	380,1	310,49	0,95	-0,18	264	387,8	310,47	0,95	1,87
181	388,8	310,53	0,97	2,14	283	387,7	310,44	0,94	1,85
182	388,7	310,51	0,96	2,11	325	387,6	310,39	0,92	1,81
189	388,5	310,50	0,96	2,04	368	386,7	310,37	0,91	1,57
203	388,3	310,49	0,95	1,99	411	385,7	310,39	0,92	1,30
231	388,0	310,45	0,94	1,92	465	384,3	310,39	0,92	0,94
					524	383,6	310,38	0,91	0,75

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-6(a). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/fc = 20/40/40". Promedio 4 probetas con yeso y FC.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
3	374,0	-	0,00	0,00	104	376,6	310,90	0,62	-0,03
4	376,7	309,21	-0,01	0,00	118	376,6	310,95	0,64	-0,03
6	376,7	309,21	0,00	0,00	130	376,6	311,00	0,66	-0,04
13	376,7	309,24	0,01	-0,01	146	376,4	311,03	0,67	-0,07
20	376,7	309,31	0,04	0,00	162	376,4	311,03	0,67	-0,09
27	376,7	309,45	0,08	-0,01	180	376,2	311,02	0,67	-0,15
31	376,7	309,51	0,11	-0,01	182	377,4	309,96	0,68	-0,17
34	376,7	309,57	0,13	0,00	183	378,6	310,27	0,68	-0,17
41	376,7	309,77	0,20	-0,01	208	378,4	310,28	0,68	-0,24
48	376,7	309,97	0,28	-0,01	229	378,2	310,26	0,68	-0,28
56	376,7	310,10	0,33	-0,01	254	378,1	310,24	0,67	-0,32
62	376,7	310,22	0,37	-0,01	283	377,9	310,23	0,66	-0,36
69	376,6	310,35	0,42	-0,03	325	377,8	310,21	0,65	-0,40
76	376,6	310,46	0,46	-0,02	368	376,7	310,27	0,67	-0,70
83	376,6	310,59	0,51	-0,02	411	375,0	310,38	0,71	-1,14
90	376,6	310,70	0,55	-0,03	465	373,2	310,38	0,71	-1,64
98	376,6	310,80	0,59	-0,03	524	372,3	310,39	0,72	-1,88

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de peso y expansión de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-6(b). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/fc = 20/40/40". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
180	377,6	310,30	0,67	-0,15	264	382,0	310,87	0,83	1,07
181	383,1	310,52	0,70	1,36	283	381,9	311,05	0,90	1,03
182	383,0	310,55	0,71	1,33	325	381,6	312,17	1,31	0,96
189	382,7	310,70	0,77	1,25	368	380,5	313,18	1,69	0,67
203	382,5	310,80	0,80	1,20	411	379,3	313,73	1,89	0,35
231	382,2	310,82	0,81	1,12	465	377,8	313,91	1,96	-0,05
					524	377,0	314,01	2,00	-0,27

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-7(a). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/cv = 20/40/40". Probetas con escayola y CV. Promedio 4 probetas.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
2	373,2	307,82	0,00	0,00	101	372,5	309,39	0,59	-0,19
7	373,1	307,85	0,01	-0,02	117	372,4	309,40	0,59	-0,21
11	373,1	307,93	0,04	-0,02	150	371,8	309,41	0,59	-0,36
17	373,1	308,13	0,12	-0,02	180	371,5	309,40	0,59	-0,44
24	373,0	308,46	0,24	-0,05	182	371,5	309,38	0,58	-0,44
31	373,0	308,86	0,39	-0,05	209	373,5	309,37	0,57	-0,47
38	373,0	309,25	0,53	-0,05	238	373,4	309,38	0,57	-0,49
45	372,9	309,38	0,58	-0,07	260	373,4	309,32	0,55	-0,51
53	372,9	309,39	0,59	-0,07	306	372,3	309,36	0,57	-0,79
59	372,8	309,40	0,59	-0,09	351	370,5	309,36	0,57	-1,28
73	372,8	309,39	0,58	-0,10	401	369,3	309,28	0,54	-1,60
85	372,7	309,39	0,59	-0,12	450	368,8	309,29	0,54	-1,72

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de peso y expansión de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-7(b). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/cv = 20/40/40". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
182	369,3	309,35	0,58	-0,44	238	377,6	309,30	0,56	1,77
183	377,8	309,36	0,58	1,83	260	377,6	309,31	0,57	1,76
185	377,8	309,38	0,59	1,83	306	377,2	309,34	0,57	1,66
190	377,8	309,35	0,58	1,83	351	376,6	309,34	0,57	1,49
197	377,8	309,32	0,57	1,83	401	376,2	309,29	0,56	1,38
217	377,7	309,30	0,56	1,80	450	376,0	309,28	0,55	1,34

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-8(a). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/fc = 20/40/40". Probetas con escayola y FC. Promedio 4 probetas.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
2	371,6	308,17	0,00	0,00	101	371,2	309,23	0,39	-0,13
7	371,6	308,18	0,00	-0,02	117	371,1	309,25	0,40	-0,14
11	371,6	308,18	0,00	-0,01	150	370,7	309,27	0,41	-0,25
17	371,6	308,18	0,00	-0,01	180	370,5	309,26	0,41	-0,31
24	371,5	308,22	0,02	-0,03	182	370,5	309,26	0,40	-0,31
31	371,5	308,28	0,04	-0,03	209	368,2	309,20	0,39	-0,35
38	371,5	308,39	0,08	-0,03	238	368,1	309,20	0,39	-0,38
45	371,4	308,54	0,14	-0,05	260	368,0	309,20	0,39	-0,41
53	371,4	308,72	0,20	-0,05	306	367,3	309,39	0,46	-0,58
59	371,4	308,85	0,25	-0,06	351	366,1	309,58	0,53	-0,91
73	371,4	309,04	0,32	-0,07	401	365,3	309,70	0,57	-1,14
85	371,3	309,17	0,37	-0,08	450	364,9	309,88	0,64	-1,25
					479	364,5	309,87	0,64	-1,36

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de peso y expansión de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-8(b). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/fc = 20/40/40". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
182	372,7	309,28	0,40	-0,31	238	379,0	309,95	0,65	1,40
183	379,2	309,37	0,44	1,45	260	378,9	310,42	0,83	1,37
185	379,2	309,47	0,47	1,45	306	378,6	311,70	1,31	1,29
190	379,2	309,41	0,45	1,45	351	378,0	312,46	1,59	1,11
197	379,2	309,60	0,52	1,45	401	377,5	312,96	1,77	0,98
217	379,1	309,85	0,62	1,42	450	377,3	313,39	1,94	0,93
					479	377,1	313,43	1,95	0,87

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-9(a).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/cv = 30/40/30". Promedio 4 probetas con yeso y CV.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
3	382,2	308,35	0,00	0,00	97	381,9	313,49	1,91	-0,07
6	382,1	308,38	0,01	-0,01	105	382,0	313,74	2,01	-0,06
13	382,1	308,55	0,07	-0,01	111	381,9	313,88	2,06	-0,07
20	382,1	308,86	0,19	-0,03	123	381,9	314,13	2,15	-0,07
24	382,1	309,07	0,27	-0,03	139	381,8	314,24	2,19	-0,10
27	382,1	309,26	0,34	-0,03	155	381,9	314,25	2,20	-0,09
32	382,0	309,60	0,46	-0,04	180	381,7	314,24	2,19	-0,12
34	382,0	309,74	0,52	-0,04	181	381,7	314,24	2,19	-0,12
41	382,0	310,25	0,71	-0,05	195	380,5	314,28	2,20	-0,09
49	382,0	310,79	0,91	-0,04	224	380,6	314,27	2,19	-0,07
55	382,0	311,18	1,05	-0,04	256	380,7	314,27	2,19	-0,04
62	382,0	311,60	1,21	-0,05	284	380,7	314,26	2,19	-0,04
69	382,0	312,01	1,36	-0,06	326	380,8	314,22	2,17	-0,03
76	382,0	312,45	1,52	-0,06	368	379,8	314,20	2,17	-0,28
83	381,9	312,83	1,67	-0,07	425	378,2	314,24	2,18	-0,70
91	381,9	313,23	1,82	-0,07	476	377,8	314,24	2,18	-0,82

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de peso y expansión de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-9(b).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/cv = 30/40/30". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
181	382,9	314,19	2,19	-0,12	227	398,2	314,22	2,20	3,83
182	398,6	314,24	2,20	3,94	256	398,1	314,22	2,20	3,81
183	398,6	314,24	2,20	3,94	284	397,9	314,20	2,19	3,77
185	398,5	314,22	2,20	3,91	326	397,8	314,16	2,17	3,74
189	398,5	314,24	2,21	3,91	368	397,0	314,18	2,18	3,53
196	398,4	314,21	2,19	3,88	425	395,7	314,23	2,20	3,19
					476	395,0	314,22	2,20	3,01

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-10(a). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/fc = 30/40/30". Probetas con yeso y FC. Promedio 4 probetas.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
3	377,9	308,69	0,00	0,00	91	377,6	313,68	1,85	-0,08
6	377,9	308,73	0,02	-0,01	97	377,6	314,00	1,97	-0,08
13	377,9	308,87	0,07	-0,01	111	377,6	314,46	2,14	-0,08
20	377,8	309,03	0,13	-0,04	123	377,6	314,73	2,24	-0,09
24	377,8	309,09	0,15	-0,04	139	377,3	314,90	2,31	-0,15
27	377,8	309,22	0,20	-0,04	155	377,3	315,00	2,35	-0,17
32	377,8	309,52	0,31	-0,04	180	376,9	315,05	2,36	-0,27
34	377,8	309,63	0,35	-0,04	181	376,9	315,05	2,36	-0,28
41	377,7	310,09	0,52	-0,05	195	378,4	314,57	2,35	-0,28
49	377,7	310,63	0,72	-0,05	224	378,2	314,52	2,34	-0,33
55	377,7	311,07	0,88	-0,05	256	378,0	314,57	2,35	-0,38
62	377,7	311,59	1,08	-0,06	284	377,9	314,58	2,36	-0,41
69	377,7	312,10	1,27	-0,07	326	377,9	314,90	2,47	-0,42
76	377,7	312,62	1,46	-0,07	368	376,9	315,19	2,58	-0,69
83	377,6	313,11	1,64	-0,08	425	374,2	315,43	2,67	-1,40
					476	380,2	315,58	2,70	-1,66

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de peso y expansión de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-10(b). Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso/fc = 30/40/30". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.**

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
181	375,2	315,49	2,36	-0,28	227	391,0	314,20	2,75	3,90
182	392,7	315,77	2,47	4,34	257	390,0	316,15	2,90	3,99
183	392,6	315,88	2,51	4,33	284	389,7	316,95	3,20	3,90
185	392,4	316,05	2,57	4,28	326	389,5	319,20	4,04	3,85
189	392,3	316,20	2,63	4,25	368	388,3	320,50	4,52	3,53
191	391,4	315,37	2,63	4,01	425	386,5	321,40	4,86	3,05
196	391,4	315,47	2,66	4,00	476	385,5	321,73	4,98	2,78

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-11(a).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/cv = 30/40/30". Promedio 4 probetas con escayola y CV.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
3	374,3	308,11	0,00	0,00	81	374,2	311,01	1,08	-0,03
4	374,3	308,10	0,00	-0,01	97	374,1	311,18	1,14	-0,05
7	374,3	308,10	0,00	0,00	113	374,2	311,20	1,15	-0,03
10	374,3	308,15	0,02	-0,01	151	374,1	311,18	1,14	-0,07
13	374,3	308,22	0,04	-0,01	180	374,1	311,17	1,14	-0,05
20	374,3	308,49	0,14	-0,01	181	374,1	311,16	1,14	-0,05
27	374,2	308,82	0,26	-0,02	205	375,0	311,13	1,12	-0,03
34	374,2	309,21	0,41	-0,02	234	375,0	311,14	1,12	-0,01
41	374,2	309,59	0,55	-0,03	256	375,0	311,12	1,12	-0,01
49	374,2	309,96	0,69	-0,03	302	374,4	311,14	1,12	-0,17
55	374,2	310,24	0,79	-0,03	347	373,3	311,13	1,12	-0,48
63	374,2	310,53	0,90	-0,03	382	372,4	311,08	1,10	-0,71
69	374,2	310,70	0,96	-0,03	417	372,1	311,09	1,10	-0,80
76	374,2	310,90	1,04	-0,03	475	378,3	311,11	1,10	-0,84

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de peso y expansión de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-11(b).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/cv = 30/40/30". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
181	373,4	311,14	1,14	-0,05	256	383,3	311,13	1,13	2,61
182	383,5	311,14	1,13	2,66	302	382,8	311,13	1,13	2,49
185	383,5	311,17	1,14	2,66	347	382,2	311,15	1,14	2,33
192	383,5	311,15	1,14	2,66	382	381,8	311,11	1,12	2,21
205	383,4	311,15	1,14	2,64	417	381,4	311,10	1,12	2,10
234	383,4	311,14	1,13	2,64	475	380,2	311,06	1,06	2,08

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-12(a).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/fc = 30/40/30". Promedio 3 probetas con escayola y FC.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
3	370,6	308,32	0,00	0,00	97	370,3	311,16	1,05	-0,07
4	370,6	308,33	0,00	0,00	113	370,3	311,34	1,12	-0,07
7	370,6	308,31	-0,01	0,00	120	370,1	311,37	1,13	-0,13
10	370,6	308,32	0,00	0,00	133	369,5	311,24	1,14	-0,16
13	370,6	308,33	0,00	0,00	140	369,5	311,27	1,16	-0,18
20	370,5	308,40	0,03	-0,02	154	369,4	311,26	1,15	-0,20
27	370,5	308,54	0,08	-0,03	180	369,1	311,27	1,16	-0,27
34	370,5	308,76	0,16	-0,02	205	369,1	311,22	1,14	-0,28
41	370,5	309,06	0,27	-0,03	234	369,0	311,25	1,15	-0,30
49	370,5	309,41	0,40	-0,03	256	368,9	311,43	1,21	-0,33
55	370,5	309,72	0,52	-0,03	302	368,2	312,18	1,49	-0,53
69	370,5	310,30	0,74	-0,02	347	367,1	312,79	1,72	-0,83
76	370,4	310,57	0,84	-0,05	382	366,2	312,92	1,77	-1,06
81	370,4	310,73	0,90	-0,05	417	365,7	313,06	1,82	-1,19
					475	365,3	313,20	1,88	-1,32

Color indica el instante cronológico en que una probeta es apartada de la serie, se le retira el plástico de protección y se sumerge en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de peso y expansión de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-12(b).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc/fc = 30/40/30". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
120	371,1	311,70	1,13	-0,13	182	380,8	313,13	1,67	2,49
121	380,8	311,90	1,21	2,49	215	380,7	313,40	1,77	2,46
123	380,8	312,03	1,26	2,49	234	380,6	314,13	2,04	2,43
124	380,9	312,06	1,27	2,51	256	380,6	315,27	2,46	2,43
125	380,8	312,10	1,29	2,49	302	380,1	317,35	3,24	2,30
126	380,8	312,23	1,33	2,49	347	379,5	318,58	3,70	2,14
133	380,8	312,42	1,40	2,49	382	379,0	319,03	3,86	2,00
140	380,7	312,64	1,49	2,46	417	378,7	319,41	4,00	1,92
154	380,9	312,88	1,58	2,51	475	378,2	319,77	4,14	1,78

Color indica la edad en que una probeta es apartada de la serie, se le retira el plástico de protección y se sumerge en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-13(a).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso = 50/50". Promedio 4 probetas de control con yeso.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]
2	375,0	307,96	0,00	0,00	102	373,4	314,59	2,47	-0,08
5	375,0	308,00	0,01	0,00	108	373,4	315,01	2,63	-0,08
10	375,0	308,06	0,04	-0,02	122	373,4	315,77	2,91	-0,08
18	374,9	308,24	0,10	-0,03	134	373,4	316,20	3,07	-0,08
24	374,9	308,45	0,18	-0,04	150	373,3	316,67	3,25	-0,13
31	374,9	308,80	0,31	-0,04	166	373,2	316,87	3,32	-0,14
35	374,8	309,01	0,39	-0,05	178	373,0	317,04	3,38	-0,19
38	374,9	309,17	0,45	-0,05	192	372,9	317,14	3,42	-0,23
45	374,8	309,68	0,64	-0,06	206	372,8	317,18	3,44	-0,25
52	374,8	310,22	0,84	-0,06	235	372,7	317,29	3,48	-0,28
60	374,8	310,87	1,09	-0,06	267	372,7	317,38	3,51	-0,28
66	374,8	311,39	1,28	-0,06	300	372,7	317,50	3,56	-0,28
73	374,8	312,02	1,51	-0,07	361	371,6	318,12	3,79	-0,56
80	374,8	312,64	1,74	-0,06	421	370,1	318,70	4,00	-0,98
87	374,8	313,39	2,02	-0,06	483	368,5	318,83	4,05	-1,41
94	374,7	313,99	2,25	-0,08	564	368,1	318,94	4,09	-1,52

**Tabla D-14(a).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc = 50/50". Promedio 2 probetas de control con escayola.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
2	368,4	308,10	0,00	0,00	92	368,3	310,55	0,91	-0,03
5	368,4	308,09	0,00	0,00	108	368,3	310,92	1,05	-0,03
6	368,4	308,07	-0,01	0,00	120	368,2	311,13	1,13	-0,07
8	368,4	308,12	0,00	0,00	134	368,0	311,26	1,18	-0,11
15	368,4	308,17	0,03	0,00	148	368,0	311,38	1,22	-0,13
22	368,4	308,29	0,07	-0,01	180	367,9	311,53	1,28	-0,16
29	368,4	308,43	0,13	0,00	209	367,8	311,60	1,30	-0,17
36	368,4	308,67	0,21	0,00	244	367,8	311,72	1,35	-0,17
44	368,4	308,90	0,30	0,00	286	367,6	312,03	1,46	-0,24
50	368,4	309,14	0,39	0,01	331	367,0	312,42	1,61	-0,41
52	368,4	309,20	0,42	0,01	363	366,2	312,66	1,69	-0,79
64	368,4	309,63	0,57	0,00	392	365,9	312,76	1,72	-0,87
76	368,4	310,07	0,73	0,00	417	365,8	313,02	1,70	-0,90
					506	365,1	313,17	1,76	-1,11

Color indica el instante cronológico en que una probeta es apartada de la serie, se le retira el plástico de protección y se sumerge en agua por 24 horas. La otra, continúa su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores medidos para esta probeta se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-14(b).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc = 50/50". Probeta sin protección sumergida por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
331	366,5	4,33	1,61	-0,41	348	384,3	8,48	3,16	4,48
332	384,4	4,79	1,78	4,51	363	384,1	10,62	3,96	4,43
333	384,4	5,03	1,87	4,51	392	383,9	12,61	4,70	4,37
335	384,4	5,84	2,18	4,51	417	383,7	13,40	5,00	4,32
339	384,4	6,74	2,51	4,51	506	382,9	15,34	5,72	4,10

Color indica la edad en que una probetas es apartada de la serie, se le retira el plástico de protección y se sumerge en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-15(a).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/yeso = 60/40". Probetas de control con yeso. Promedio 4 probetas.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]
2	379,6	307,97	0,00	0,00	94	378,0	318,45	3,91	-0,06
5	379,6	308,10	0,05	0,01	102	378,0	319,15	4,17	-0,06
10	379,5	308,09	0,05	-0,01	108	378,0	320,38	4,63	-0,06
18	379,5	308,39	0,16	-0,03	122	378,0	321,13	4,91	-0,07
24	379,4	308,73	0,28	-0,03	134	377,9	321,99	5,23	-0,10
31	379,4	309,24	0,48	-0,03	150	377,8	322,64	5,47	-0,11
35	379,4	309,55	0,59	-0,03	166	377,6	322,97	5,59	-0,17
38	379,4	309,86	0,70	-0,03	178	377,5	323,33	5,73	-0,20
45	379,4	310,66	1,00	-0,04	192	377,4	323,61	5,83	-0,22
52	379,4	311,62	1,36	-0,05	206	377,3	324,11	6,02	-0,24
60	379,4	312,76	1,79	-0,05	235	377,4	324,47	6,15	-0,24
66	379,4	313,74	2,15	-0,05	267	377,4	324,79	6,27	-0,22
73	379,4	314,75	2,53	-0,05	300	376,3	325,64	6,59	-0,53
80	379,4	315,70	2,88	-0,05	361	374,1	326,71	6,99	-1,10
87	379,4	316,68	3,25	-0,05	421	372,1	326,96	7,08	-1,64
94	379,3	317,59	3,59	-0,06	483	376,0	326,85	7,21	-1,60

**Tabla D-16(a).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc = 60/40". Promedio 4 probetas de control con escayola.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
2	377,2	308,15	0,00	0,00	108	377,2	316,15	2,97	-0,02
5	377,2	308,17	0,01	0,00	120	377,0	316,99	3,28	-0,06
6	377,3	308,16	0,00	0,01	134	376,9	317,74	3,56	-0,10
8	377,3	308,20	0,02	0,01	148	375,5	318,33	3,78	-0,12
15	377,2	308,31	0,06	0,00	180	375,4	319,32	4,15	-0,15
22	377,2	308,49	0,13	-0,01	209	375,4	319,82	4,33	-0,15
29	377,3	308,76	0,23	0,01	244	375,4	320,33	4,52	-0,15
36	377,2	309,14	0,37	0,00	286	375,2	321,08	4,80	-0,20
44	377,2	309,64	0,55	0,00	331	374,3	321,78	5,06	-0,43
50	377,3	310,14	0,74	0,01	363	391,0	325,81	5,15	-0,85
64	377,4	311,46	1,23	0,05	392	370,3	322,53	5,23	-0,93
76	377,3	312,95	1,78	0,01	417	370,1	323,10	5,44	-0,97
92	377,2	314,72	2,43	-0,02	506	369,4	323,71	5,67	-1,17

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de peso y expansión de estas dos probetas se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-16(b).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero "cem (BL 42.5R)/esc = 60/40". Probetas sin protección sumergidas por 24 horas en agua y luego, con curado controlado en cámara húmeda con plástico de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [%]	Var. Peso [%]
331	376,6	13,62	5,06	-0,43	348	411,6	19,56	7,29	8,90
332	411,9	14,43	5,38	8,98	363	411,4	20,92	7,80	8,85
333	411,9	14,90	5,55	8,98	392	411,1	22,33	8,32	8,75
335	411,9	15,81	5,89	8,97	417	410,8	23,60	8,80	8,67
339	411,8	17,19	6,41	8,94	506	410,1	26,06	9,71	8,50

Color indica la edad en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Valores promedios de peso y expansión se muestran para edades posteriores.

**Tabla D-17(a).** Expansión y variación de peso en probetas de Mortero de Control "cem (BL 42.5R) = 100%". Probetas "Agua/cemento = 0,5". Curado bajo agua. Promedio 4 probetas.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	H <sub>t</sub> Prom. [mm]	δ <sub>t</sub> Prom. [‰]	Var. Peso [‰]
2	405,3	307,63	0,00	0,00	71	408,4	307,47	-0,06	1,07
7	408,3	307,59	-0,01	0,73	76	408,4	307,45	-0,07	1,07
13	408,9	307,58	-0,02	0,88	76	407,7	306,16	-0,07	1,07
21	409,7	307,58	-0,02	1,07	83	408,0	306,12	-0,08	1,15
27	410,0	307,55	-0,03	1,16	97	407,9	306,07	-0,10	1,12
34	409,6	307,55	-0,03	1,06	111	407,9	306,00	-0,13	1,13
40	409,5	307,53	-0,04	1,02	130	408,1	305,96	-0,14	1,17
47	409,5	307,50	-0,05	1,02	151	408,1	305,91	-0,16	1,17
55	409,8	307,48	-0,06	1,10	182	408,1	305,87	-0,18	1,16
63	409,6	307,49	-0,05	1,04					



---

## **ANEXO E**

---



## Anexo E

**Tabla E-1(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 42.5SR/yeso/cv = 20/40/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
2	378,2	0,00	0,00	76	378,2	0,36	0,13	180	377,9	0,33	0,12
8	378,2	0,04	0,01	90	378,2	0,36	0,14	181	381,5	0,36	0,13
14	378,2	0,09	0,03	104	378,1	0,35	0,13	182	381,6	0,35	0,13
21	378,2	0,16	0,06	125	378,0	0,35	0,13	184	381,5	0,34	0,13
27	378,4	0,24	0,09	154	377,9	0,33	0,12	188	381,5	0,33	0,12
34	378,3	0,30	0,11	180	377,9	0,33	0,12	196	381,6	0,32	0,12
42	378,3	0,36	0,13	208	377,6	0,32	0,12	208	381,5	0,32	0,12
50	378,2	0,39	0,14	250	376,6	0,34	0,13	250	381,0	0,34	0,13
54	378,2	0,37	0,14	295	375,5	0,30	0,11	295	380,3	0,28	0,10
61	378,2	0,37	0,14	344	373,9	0,33	0,12	344	379,4	0,31	0,12
				400	373,1	0,31	0,12	400	378,9	0,29	0,11

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-1(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 42.5SR/yeso/cv = 20/40/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1616,3	1616,0	-	2,8	11,8	9,18	4,45
90		1624,7	1622,7	-	5,1	22,9	7,99	5,21
180		1620,3	1617,7	-	6,0	25,1	9,16	4,16
28	B+A	1624,9	1624,4	1635,5	2,5	11,6	10,81	4,59
90		1611,3	1609,8	1622,1	4,6	21,5	8,90	5,20
180		1617,3	1614,5	1627,1	5,6	23,1	9,91	4,05
28	A. L.	1615,2	1464,3	-	4,1	14,0	0,54	3,08
90		1615,9	1465,7	-	4,4	13,1	0,32	3,13
180		1612,5	1460,1	-	4,5	12,1	0,55	2,64

Color indica el peso final de las 3 probetas luego de finalizar el curado a la intemperie o al "Ambiente de Laboratorio (A.L.)", sin plástico de protección.

**Tabla E-2(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 42.5SR/escayola/cv = 20/40/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]
1	394,1	0,00	0,00	61	394,0	0,27	0,10	180	393,8	0,22	0,09
3	394,2	-0,01	0,00	76	394,0	0,26	0,10	181	397,8	0,25	0,10
5	394,1	-0,02	-0,01	90	394,0	0,26	0,10	182	397,8	0,22	0,09
7	394,2	-0,02	-0,01	104	394,0	0,26	0,10	184	397,7	0,23	0,09
15	394,2	0,05	0,02	132	393,8	0,26	0,10	188	397,6	0,22	0,09
21	394,2	0,08	0,03	161	393,7	0,23	0,09	198	397,5	0,23	0,09
28	394,1	0,14	0,06	180	393,8	0,22	0,09	210	397,5	0,23	0,09
33	394,1	0,19	0,07	210	393,7	0,25	0,09	254	396,9	0,25	0,10
41	394,1	0,25	0,10	254	392,7	0,26	0,10	299	396,0	0,26	0,10
49	394,1	0,27	0,10	299	391,1	0,27	0,10	368	394,6	0,24	0,09
57	394,1	0,28	0,11	368	388,5	0,26	0,10	427	394,0	0,24	0,09
				427	387,7	0,26	0,10				

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-2(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 42.5SR/escayola/cv = 20/40/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1615,4	1615,0	-	3,3	15,0	8,08	4,75
90		1609,3	1609,0	-	5,7	25,3	7,32	5,30
180		1619,0	1618,0	-	6,1	29,8	7,78	4,87
365		1613,5	1603,9	-	6,0	30,3	7,22	5,12
28	B+A	1613,5	1613,2	1636,1	2,7	14,6	9,23	4,86
90		1611,2	1610,9	1624,1	4,9	24,0	8,35	5,27
180		1618,9	1617,5	1631,1	5,3	29,0	8,81	4,89
365		1609,1	1601,9	1622,8	5,4	28,8	8,84	5,11

**Tabla E-3(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 42.5SR/yeso/cv(molida) = 20/40/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	378,5	0,00	0,00	73	378,6	0,30	0,11	180	378,6	0,22	0,08
3	378,5	0,00	0,00	87	378,7	0,27	0,10	181	382,4	0,23	0,09
9	378,5	0,16	0,06	101	378,7	0,26	0,10	182	382,4	0,22	0,09
16	378,5	0,30	0,11	133	378,7	0,22	0,08	184	382,4	0,21	0,08
22	378,5	0,32	0,12	180	378,6	0,22	0,08	188	382,4	0,20	0,08
29	378,6	0,29	0,11	213	378,3	0,22	0,08	198	382,4	0,20	0,08
37	378,6	0,29	0,11	242	378,2	0,23	0,08	213	382,4	0,19	0,07
45	378,6	0,31	0,12	289	378,0	0,21	0,07	242	382,2	0,21	0,08
49	378,5	0,29	0,11	345	377,2	0,21	0,07	289	381,9	0,17	0,07
60	378,6	0,30	0,11	401	376,4	0,20	0,07	345	381,1	0,20	0,08
				451	375,6	0,21	0,07	401	380,5	0,21	0,08
								451	379,8	0,20	0,08

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-3(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 42.5SR/yeso/cv(molida) = 20/40/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1631,2	1631,0	-	5,0	26,6	7,61	4,94
90		1623,8	1623,1	-	6,0	31,1	6,80	5,03
180		1624,3	1623,4	-	6,6	34,2	8,12	4,60
28	B+A	1641,0	1640,6	1652,2	4,8	23,9	8,47	5,00
90		1642,7	1641,6	1652,1	5,6	29,5	7,90	5,02
180		1613,3	1611,8	1626,5	5,4	32,8	9,21	4,58

**Tabla E-4(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 42.5SR/escayola/cv(molida) = 20/40/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t "	Peso Prom.	$\Delta_t$ Prom.	$\delta_t$ Prom.	Edad " t "	Peso Prom.	$\Delta_t$ Prom.	$\delta_t$ Prom.	Edad " t "	Peso Prom.	$\Delta_t$ Prom.	$\delta_t$ Prom.
[días]	[g]	[mm]	[ % ]	[días]	[g]	[mm]	[ % ]	[días]	[g]	[mm]	[ % ]
1	384,7	0,00	0,00	77	384,8	0,35	0,13	180	384,7	0,31	0,11
2	384,8	-0,01	0,00	98	384,8	0,37	0,14	181	387,5	0,29	0,11
4	384,7	0,04	0,02	127	384,6	0,32	0,12	182	387,6	0,29	0,11
7	384,7	0,17	0,06	162	384,7	0,32	0,12	184	387,6	0,29	0,11
15	384,9	0,37	0,14	180	384,7	0,31	0,11	188	387,6	0,29	0,11
23	384,8	0,38	0,14	197	384,6	0,27	0,10	197	387,5	0,27	0,10
27	384,7	0,36	0,14	211	384,5	0,31	0,12	211	387,4	0,29	0,11
34	384,8	0,36	0,14	244	384,1	0,27	0,10	244	387,0	0,26	0,10
49	384,7	0,36	0,13	301	383,2	0,30	0,11	301	386,0	0,32	0,12
63	384,8	0,36	0,14	352	382,6	0,30	0,11	352	394,0	0,26	0,10
				429	382,1	0,31	0,11	429	394,1	0,14	0,06

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-4(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 42.5SR/escayola/cv(molida) = 20/40/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1629,7	1629,4	-	5,5	27,1	7,42	4,98
90		1630,7	1630,2	-	6,0	31,0	7,35	5,23
180		1643,3	1642,8	-	6,2	34,4	7,88	4,92
28	B+A	1646,2	1645,8	1658,6	4,8	25,9	8,41	4,95
90		1649,0	1648,5	1662,4	5,4	28,8	8,70	5,29
180		1628,7	1628,0	1642,5	5,6	33,1	8,99	4,84

**Tabla E-5(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris 42.5SR/yeso = 60/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 190 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [%]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [%]
1	374,5	0,00	0,00	83	374,6	0,00	0,00	190	374,7	-0,06	-0,02
2	374,5	-0,01	0,00	90	374,6	0,00	0,00	191	377,7	-0,03	-0,01
8	374,5	0,00	0,00	97	374,6	-0,01	0,00	192	377,8	-0,04	-0,02
15	374,5	0,01	0,00	111	374,6	0,00	0,00	194	377,7	-0,05	-0,02
21	374,5	0,03	0,01	132	374,6	-0,05	-0,02	198	377,7	-0,05	-0,02
28	374,6	0,00	0,00	161	374,6	-0,05	-0,02	207	377,6	-0,02	-0,01
36	374,6	0,01	0,01	190	374,7	-0,06	-0,02	222	377,5	-0,08	-0,03
41	374,6	0,03	0,01	207	374,3	-0,07	-0,03	254	377,3	-0,08	-0,03
44	374,6	0,05	0,02	222	374,2	-0,10	-0,04	289	377,2	-0,06	-0,02
48	374,5	0,03	0,01	254	374,1	-0,10	-0,04	338	377,6	-0,02	-0,01
55	374,6	0,04	0,02	289	374,0	-0,08	-0,03	414	377,7	0,02	0,01
62	374,6	0,02	0,01	338	374,4	-0,05	-0,02	450	377,2	0,03	0,01
69	374,6	0,01	0,01	414	375,2	0,00	0,00				
76	374,6	0,02	0,01	450	374,7	0,01	0,00				

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 190 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-5(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris 42.5SR/yeso = 60/40".  
Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1633,8	1633,6	-	4,2	19,7	7,59	4,21
90		1626,2	1625,6	-	4,3	23,0	6,79	4,28
180		1634,7	1633,9	-	4,6	22,8	7,47	3,88
28	B+A	1622,3	1622,0	1631,4	3,6	19,4	8,52	4,20
90		1633,0	1632,0	1642,0	3,6	22,4	7,94	4,23
180		1618,7	1617,8	1628,4	3,9	22,5	8,32	3,92
28	A. L.	1614,8	1503,9	-	5,2	24,7	1,04	3,76
90		1623,8	1515,6	-	5,3	24,7	0,87	3,64
180		1624,9	1520,4	-	6,0	28,0	0,90	3,22

Color indica el peso final de las 3 probetas luego de finalizar el curado a la intemperie o al "Ambiente de Laboratorio (A.L.)", sin plástico de protección.

**Tabla E-6(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris 42.5SR/escayola = 60/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 187 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t "	Peso Prom.	$\Delta_t$ Prom.	$\delta_t$ Prom.	Edad " t "	Peso Prom.	$\Delta_t$ Prom.	$\delta_t$ Prom.	Edad " t "	Peso Prom.	$\Delta_t$ Prom.	$\delta_t$ Prom.
[días]	[g]	[mm]	[ % ]	[días]	[g]	[mm]	[ % ]	[días]	[g]	[mm]	[ % ]
2	379,2	0,00	0,00	80	378,9	0,01	0,00	187	378,6	-0,03	-0,01
5	379,2	-0,01	0,00	87	378,8	0,01	0,00	188	382,9	-0,04	-0,01
12	379,2	0,00	0,00	94	378,8	-0,01	0,00	189	382,9	-0,05	-0,01
18	379,2	0,01	0,01	108	378,7	0,00	0,00	191	382,9	-0,06	-0,01
25	379,2	0,02	0,01	129	378,6	-0,02	-0,01	195	382,9	-0,06	-0,01
33	379,1	0,01	0,00	155	378,6	-0,01	0,00	204	382,8	-0,03	-0,01
38	379,1	0,04	0,01	187	378,6	-0,03	-0,01	219	382,7	-0,08	-0,01
41	379,1	0,04	0,01	204	378,1	-0,01	-0,01	251	382,2	-0,05	-0,01
45	379,0	0,02	0,01	219	378,1	-0,06	-0,02	286	381,7	-0,03	-0,01
52	379,0	0,03	0,01	251	377,3	-0,04	-0,01	335	380,9	0,00	0,00
59	379,0	0,03	0,01	286	376,5	-0,06	-0,02	401	380,2	-0,03	0,00
66	379,0	0,02	0,01	335	375,2	-0,04	-0,01				
73	378,9	0,02	0,01	401	374,3	-0,08	-0,02				

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 187 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-6(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris 42.5SR/escayola = 60/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1629,9	1629,5	-	4,4	20,7	7,75	4,26
90		1633,9	1633,7	-	4,4	23,5	7,11	4,28
180		1625,2	1624,0	-	4,3	26,3	7,48	4,23
28	B+A	1638,5	1638,1	1644,8	3,8	19,7	8,35	4,33
90		1625,6	1624,6	1634,4	3,5	22,8	8,10	4,37
180		1650,2	1648,7	1659,8	3,9	24,7	8,37	4,25
28	A. L.	1634,4	1522,1	-	5,0	25,7	1,08	3,83
90		1633,8	1526,9	-	5,7	25,7	0,87	3,69
180		1629,8	1522,3	-	6,2	29,1	0,99	3,45

Color indica el peso final de las 3 probetas luego de finalizar el curado a la intemperie o al "Ambiente de Laboratorio (A.L.)", sin plástico de protección.

**Tabla E-7(a). Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv = 20/40/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.**

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
2	380,5	0,00	0,00	76	380,6	0,74	0,28	180	380,4	0,72	0,27
8	380,5	0,10	0,04	90	380,6	0,75	0,28	181	384,6	0,72	0,27
14	380,5	0,22	0,08	104	380,6	0,74	0,27	182	384,6	0,71	0,27
21	380,5	0,42	0,16	125	380,5	0,74	0,28	184	384,6	0,70	0,26
27	380,8	0,60	0,22	154	380,4	0,72	0,27	188	384,6	0,69	0,26
34	380,7	0,72	0,27	180	380,4	0,72	0,27	196	384,6	0,69	0,26
42	380,7	0,75	0,28	208	380,1	0,70	0,26	208	384,5	0,69	0,26
50	380,6	0,77	0,29	250	379,1	0,70	0,26	250	384,0	0,70	0,26
54	380,6	0,74	0,28	295	378,0	0,68	0,25	295	383,4	0,68	0,25
61	380,6	0,75	0,28	344	376,2	0,71	0,27	344	382,5	0,71	0,27
				400	375,4	0,69	0,26	400	381,9	0,70	0,26

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-7(b). Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv = 20/40/40". Distintos tipos de curado.**

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1621,1	1620,8	-	2,2	9,3	9,45	4,18
90		1612,3	1611,2	-	5,0	25,1	7,92	5,02
180		1610,7	1609,5	-	5,6	26,4	9,13	3,74
28	B+A	1618,9	1618,2	1628,3	1,9	8,2	10,22	4,09
90		1601,6	1600,7	1616,5	4,5	22,4	9,07	4,97
180		1608,3	1606,9	1618,2	5,3	25,1	10,07	3,74

**Tabla E-8(a). Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/escayola/cv = 20/40/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.**

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]
1	391,1	0,00	0,00	74	391,1	0,55	0,21	180	391,0	0,51	0,20
3	391,1	-0,02	-0,01	88	391,1	0,55	0,21	181	395,7	0,54	0,21
5	391,1	-0,05	-0,02	102	391,1	0,54	0,21	182	395,7	0,50	0,19
13	391,2	0,09	0,03	130	391,0	0,54	0,21	185	395,7	0,51	0,20
19	391,2	0,21	0,08	159	390,9	0,53	0,20	188	395,7	0,51	0,20
26	391,1	0,36	0,14	180	391,0	0,51	0,20	196	395,6	0,51	0,20
31	391,1	0,47	0,18	208	390,7	0,51	0,19	208	395,6	0,50	0,19
39	391,1	0,57	0,22	252	389,9	0,58	0,22	252	394,7	0,54	0,21
47	391,1	0,58	0,22	297	388,9	0,53	0,20	297	393,6	0,51	0,20
55	391,1	0,57	0,22	366	386,9	0,51	0,19	366	391,6	0,51	0,20
59	391,1	0,57	0,22	425	386,4	0,49	0,19	425	390,8	0,49	0,19

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-8(b). Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/escayola/cv = 20/40/40". Distintos tipos de curado.**

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1617,9	1617,5	-	3,0	13,4	8,45	4,60
90		1617,3	1617,1	-	5,7	25,5	7,47	4,98
180		1607,6	1607,2	-	5,7	27,9	7,68	4,81
28	B+A	1629,6	1629,3	1654,7	2,2	11,2	9,79	4,67
90		1612,6	1612,1	1626,5	4,7	23,1	8,55	5,03
180		1609,2	1608,6	1623,7	5,2	27,2	9,06	4,75

**Tabla E-9(a). Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv(molida) = 20/40/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.**

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]
1	379,2	0,00	0,00	73	379,3	0,39	0,15	180	379,3	0,31	0,12
3	379,2	0,01	0,00	87	379,4	0,37	0,14	181	383,6	0,33	0,12
9	379,2	0,28	0,10	101	379,4	0,35	0,13	182	383,6	0,30	0,11
16	379,2	0,40	0,15	133	379,4	0,33	0,12	184	383,6	0,30	0,11
22	379,2	0,43	0,16	180	379,3	0,31	0,12	188	383,6	0,29	0,11
29	379,3	0,40	0,15	213	378,6	0,29	0,11	198	383,6	0,29	0,11
37	379,3	0,39	0,15	242	378,5	0,28	0,10	213	383,5	0,28	0,10
45	379,3	0,41	0,15	289	378,2	0,26	0,10	242	383,4	0,29	0,10
49	379,3	0,40	0,15	345	377,4	0,28	0,10	289	383,2	0,25	0,09
60	379,3	0,39	0,15	401	376,7	0,27	0,10	345	382,5	0,26	0,10
				451	376,0	0,27	0,10	401	381,9	0,26	0,09
								451	381,2	0,26	0,10

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-9(b). Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv(molida) = 20/40/40". Distintos tipos de curado.**

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1632,0	1631,9	-	5,2	22,0	7,73	4,80
90		1622,1	1621,9	-	5,4	29,1	7,34	5,09
180		1614,5	1613,4	-	5,5	31,5	7,54	4,89
28	B+A	1630,9	1630,7	1643,1	4,3	20,4	8,75	4,75
90		1626,1	1625,8	1638,3	5,0	25,5	8,42	4,98
180		1632,3	1631,2	1644,9	5,3	29,8	8,76	4,83

**Tabla E-10(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/escayola/cv(molida) = 20/40/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	376,4	0,00	0,00	77	376,4	0,59	0,22	180	376,2	0,54	0,20
2	376,4	0,01	0,00	98	376,4	0,59	0,22	181	379,5	0,55	0,20
4	376,3	0,12	0,05	127	376,2	0,56	0,21	182	379,5	0,54	0,20
7	376,3	0,34	0,13	162	376,2	0,55	0,21	184	379,5	0,53	0,20
15	376,4	0,61	0,23	180	376,2	0,54	0,20	188	379,5	0,53	0,20
23	376,4	0,63	0,23	197	375,5	0,49	0,19	197	379,4	0,52	0,19
27	376,3	0,59	0,22	211	375,6	0,54	0,20	211	379,3	0,56	0,21
34	376,3	0,61	0,23	244	375,2	0,49	0,18	244	378,9	0,51	0,19
49	376,4	0,59	0,22	301	374,3	0,52	0,20	301	377,9	0,56	0,20
63	376,4	0,60	0,22	352	373,7	0,51	0,19	352	377,2	0,54	0,20
				429	373,4	0,51	0,19	429	376,4	0,55	0,20

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-10(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/escayola/cv(molida) = 20/40/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1636,5	1636,3	-	5,1	24,8	7,69	4,76
90		1642,2	1641,9	-	5,4	28,5	7,37	4,95
180		1627,4	1626,9	-	6,0	31,0	7,86	4,74
28	B+A	1628,3	1627,6	1641,7	4,4	22,6	8,69	4,74
90		1635,6	1635,0	1649,3	4,6	24,8	8,59	4,93
180		1628,8	1628,4	1642,5	5,4	29,1	9,16	4,55

**Tabla E-11(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv/FCC(molido) = 20/40/30/10". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
2	375,1	0,00	0,00	81	375,1	0,47	0,18	180	375,0	0,44	0,16
6	375,2	0,37	0,14	95	375,1	0,48	0,18	181	379,2	0,44	0,16
12	375,1	0,48	0,18	123	375,0	0,48	0,18	182	379,2	0,42	0,16
19	375,1	0,46	0,17	152	374,9	0,44	0,16	184	379,2	0,42	0,16
25	375,2	0,48	0,18	180	375,0	0,44	0,16	189	379,1	0,42	0,16
32	375,2	0,46	0,17	213	374,6	0,40	0,15	198	379,1	0,42	0,16
40	375,2	0,47	0,17	255	374,2	0,40	0,15	213	194,2	0,41	0,15
48	375,2	0,48	0,18	297	373,8	0,41	0,16	255	378,7	0,39	0,14
52	375,2	0,48	0,18	360	373,1	0,42	0,16	297	378,3	0,40	0,15
67	375,2	0,47	0,18	418	372,6	0,41	0,15	360	377,6	0,41	0,15
								418	377,2	0,41	0,15

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-11(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv/FCC(molido) = 20/40/30/10". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1600,7	1600,2	-	4,4	20,9	7,87	4,86
90		1604,0	1602,2	-	4,6	26,4	7,54	5,07
180		1602,7	1600,2	-	5,3	27,9	9,43	3,56
28	B+A	1598,2	1597,6	1611,0	4,0	20,4	9,09	4,76
90		1608,7	1606,9	1622,0	4,4	25,5	8,75	4,97
180		1606,7	1603,2	1618,6	4,7	27,2	10,55	3,50
28	A. L.	1618,3	1483,6	-	4,2	18,6	0,77	3,97
90		1619,3	1482,3	-	4,6	18,4	0,60	3,62
180		1620,8	1480,0	-	5,1	18,6	0,62	3,19

Color indica el peso final de las 3 probetas luego de finalizar el curado a la intemperie o al "Ambiente de Laboratorio (A.L.)", sin plástico de protección.

**Tabla E-12(a). Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv(molida)/FCC(molido) = 20/40/30/10". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.**

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
2	377,9	0,00	0,00	81	377,9	0,36	0,13	180	377,8	0,33	0,12
6	377,9	0,37	0,14	95	377,9	0,37	0,14	181	381,5	0,34	0,13
12	378,0	0,36	0,14	123	377,9	0,37	0,14	182	381,5	0,33	0,12
19	377,9	0,35	0,13	152	377,7	0,33	0,12	184	381,5	0,33	0,12
25	378,0	0,37	0,14	180	377,8	0,33	0,12	189	381,4	0,33	0,12
32	378,0	0,36	0,13	213	377,6	0,30	0,11	198	381,4	0,32	0,12
40	378,0	0,36	0,13	255	377,1	0,31	0,11	213	381,4	0,31	0,12
48	378,0	0,38	0,14	297	376,6	0,32	0,12	255	380,9	0,30	0,11
52	377,9	0,37	0,14	360	375,7	0,32	0,12	297	380,5	0,31	0,12
67	378,0	0,37	0,14	418	375,3	0,32	0,12	360	379,8	0,32	0,12
								418	379,4	0,32	0,12

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-12(b). Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris CEM I 52.5R/yeso/cv(molida)/FCC(molido) = 20/40/30/10". Distintos tipos de curado.**

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1614,2	1613,6	-	4,4	24,3	7,67	4,92
90		1625,6	1625,1	-	5,2	28,1	7,51	4,97
180		1618,9	1616,6	-	5,4	30,5	9,08	3,57
28	B+A	1625,1	1624,8	1637,3	4,2	22,4	8,92	4,90
90		1621,0	1620,4	1637,3	4,2	27,0	8,75	5,00
180		1625,5	1622,9	1638,6	4,6	28,9	10,20	3,53
28	A. L.	1614,7	1482,5	-	4,5	20,2	0,94	4,06
90		1616,2	1478,5	-	4,4	19,8	0,70	3,59
180		1616,2	1472,9	-	4,9	19,6	0,54	2,97

Color indica el peso final de las 3 probetas luego de finalizar el curado a la intemperie o al "Ambiente de Laboratorio (A.L.)", sin plástico de protección.





**Tabla E-15(a). Expansión y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris CEM I 52.5R/yeso = 60/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 190 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.**

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [%]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [%]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [%]
1	374,6	0,00	0,00	83	374,6	0,18	0,07	190	374,7	0,32	0,12
2	374,6	0,00	0,00	90	374,7	0,19	0,07	191	378,4	0,38	0,14
8	374,6	0,03	0,01	97	374,7	0,19	0,07	192	378,5	0,38	0,14
15	374,6	0,05	0,02	111	374,7	0,20	0,08	194	378,4	0,39	0,15
21	374,6	0,09	0,03	132	374,7	0,24	0,09	198	378,4	0,42	0,16
28	374,6	0,08	0,03	161	374,7	0,28	0,10	207	378,3	0,50	0,19
36	374,6	0,09	0,03	190	374,7	0,32	0,12	222	378,2	0,58	0,21
41	374,6	0,13	0,05	207	374,5	0,35	0,13	254	378,1	0,80	0,30
44	374,6	0,13	0,05	222	374,5	0,35	0,13	289	378,0	1,08	0,40
48	374,6	0,14	0,05	254	374,3	0,33	0,12	338	377,8	1,43	0,53
55	374,6	0,15	0,06	289	374,2	0,37	0,13	414	378,4	1,99	0,74
62	374,7	0,16	0,06	338	374,0	0,44	0,16	450	378,1	2,21	0,82
69	374,6	0,18	0,07	414	376,2	0,53	0,19				
76	374,7	0,19	0,07	450	375,8	0,57	0,21				

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 190 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-15(b). Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris CEM I 52.5R/yeso = 60/40". Distintos tipos de curado.**

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1619,0	1618,3	-	3,2	15,8	7,79	3,92
90		1624,2	1623,8	-	2,9	18,0	7,66	4,16
180		1612,1	1611,3	-	3,7	20,1	7,73	3,91
28	B+A	1617,5	1617,1	1624,8	2,5	14,8	8,60	3,97
90		1615,9	1615,4	1625,4	2,6	17,6	8,32	4,23
180		1621,0	1620,4	1631,2	3,1	19,5	8,80	3,99
28	A. L.	1626,0	1509,2	-	5,0	21,7	0,84	3,60
90		1614,8	1504,6	-	4,5	23,2	0,72	3,48
180		1614,1	1505,4	-	7,1	27,1	0,76	3,14

Color indica el peso final de las 3 probetas luego de finalizar el curado a la intemperie o al "Ambiente de Laboratorio (A.L.)", sin plástico de protección.

**Tabla E-16(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris CEM I 52.5R/escayola = 60/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 187 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]
2	378,5	0,00	0,00	80	378,2	0,15	0,06	187	378,0	0,26	0,10
5	378,5	0,00	0,00	87	378,2	0,17	0,06	188	380,3	0,31	0,12
12	378,5	0,01	0,00	94	378,1	0,17	0,06	189	380,3	0,30	0,12
18	378,5	0,07	0,02	108	378,0	0,18	0,07	191	380,3	0,30	0,12
25	378,5	0,05	0,02	129	378,0	0,18	0,07	195	380,2	0,33	0,13
33	378,4	0,06	0,02	155	378,0	0,24	0,09	204	380,2	0,41	0,16
38	378,4	0,09	0,03	187	378,0	0,26	0,10	219	380,1	0,51	0,20
41	378,4	0,11	0,04	204	379,9	0,27	0,10	251	379,7	0,73	0,28
45	378,3	0,10	0,04	219	379,9	0,27	0,10	286	379,3	0,95	0,37
52	378,3	0,11	0,04	251	379,1	0,30	0,11	335	378,6	1,21	0,47
59	378,4	0,12	0,05	286	378,3	0,28	0,10	401	378,0	1,58	0,61
66	378,3	0,12	0,05	335	376,8	0,34	0,13				
73	378,2	0,14	0,05	401	375,9	0,39	0,14				

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 187 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-16(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris CEM I 52.5R/escayola = 60/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1622,1	1621,8	-	3,4	16,4	7,56	3,97
90		1618,1	1617,6	-	3,5	18,5	7,31	4,27
180		1627,2	1626,8	-	4,0	20,2	7,46	3,99
28	B+A	1638,9	1638,5	1644,7	3,0	16,0	8,46	3,95
90		1626,3	1625,7	1635,0	2,8	18,1	8,11	4,27
180		1624,4	1624,0	1631,3	3,1	19,6	8,43	4,03
28	A. L.	1622,4	1504,7	-	5,1	24,0	1,02	3,71
90		1618,6	1506,0	-	5,4	23,3	0,75	3,53
180		1640,8	1529,8	-	7,5	26,9	0,67	3,06

Color indica el peso final de las 3 probetas luego de finalizar el curado a la intemperie o al "Ambiente de Laboratorio (A.L.)", sin plástico de protección.

**Tabla E-17(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/cv(molida) = 20/40/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]
1	377,9	0,00	0,00	68	378,1	0,40	0,15	180	378,0	0,34	0,13
2	377,9	0,01	0,00	89	378,1	0,41	0,15	181	381,9	0,36	0,14
3	377,9	0,08	0,03	119	378,2	0,39	0,15	182	382,0	0,36	0,13
5	378,0	0,16	0,06	148	378,1	0,38	0,14	184	381,9	0,34	0,13
7	378,0	0,29	0,11	180	378,0	0,34	0,13	188	381,9	0,32	0,12
10	378,0	0,41	0,15	197	377,5	0,37	0,14	197	381,8	0,36	0,14
14	378,0	0,45	0,17	212	377,3	0,36	0,14	212	381,5	0,36	0,14
18	378,0	0,41	0,15	233	377,2	0,31	0,11	233	381,4	0,31	0,11
25	378,0	0,41	0,15	291	376,7	0,35	0,13	291	380,7	0,36	0,13
40	378,0	0,42	0,16	326	376,4	0,35	0,13	326	380,3	0,38	0,14
54	378,1	0,42	0,16	384	376,1	0,36	0,13	384	379,7	0,39	0,14
				420	375,7	0,36	0,13	420	379,1	0,38	0,14

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-17(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/cv(molida) = 20/40/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1629,9	1629,6	-	5,6	23,9	7,61	4,95
90		1618,2	1617,7	-	5,9	30,3	7,10	4,99
180		1631,3	1630,8	-	6,2	30,5	8,70	4,36
28	B+A	1621,7	1621,4	1633,8	4,9	23,5	8,69	4,91
90		1630,2	1629,1	1638,0	5,3	28,3	8,08	5,08
180		1636,1	1635,5	1649,2	5,6	28,6	9,81	4,31

**Tabla E-18(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/escayola/cv(molida) = 20/40/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 180 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad "t" [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]
1	372,4	0,00	0,00	68	372,6	0,39	0,15	180	372,6	0,32	0,12
2	372,5	0,00	0,00	89	372,7	0,40	0,15	181	376,6	0,37	0,13
3	372,5	0,07	0,03	119	372,7	0,37	0,14	182	376,6	0,35	0,13
5	372,5	0,16	0,06	148	372,6	0,35	0,13	184	376,6	0,34	0,12
7	372,5	0,29	0,11	180	372,6	0,32	0,12	188	376,6	0,31	0,11
10	372,5	0,41	0,15	197	372,1	0,35	0,14	197	376,5	0,38	0,14
14	372,5	0,44	0,16	212	371,9	0,35	0,13	212	376,3	0,38	0,14
18	372,5	0,42	0,16	233	371,8	0,29	0,11	233	376,1	0,31	0,11
25	372,6	0,42	0,16	291	371,4	0,32	0,12	291	375,5	0,36	0,13
40	372,6	0,41	0,15	326	371,2	0,32	0,12	326	375,1	0,36	0,13
54	372,6	0,41	0,15	384	370,9	0,33	0,13	384	374,6	0,38	0,13
				420	370,5	0,33	0,13	420	374,0	0,37	0,13

continúa...

 Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 180 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-18(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/escayola/cv(molida) = 20/40/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1617,9	1617,6	-	5,7	25,6	7,88	5,09
90		1623,4	1621,9	-	5,7	30,7	7,46	5,11
180		1614,4	1614,2	-	6,1	31,1	8,27	4,78
28	B+A	1625,6	1625,0	1638,2	4,5	24,0	9,04	5,08
90		1620,9	1620,3	1628,8	5,6	28,6	8,52	5,09
180		1631,2	1630,6	1644,6	5,5	29,4	9,42	4,83

**Tabla E-19(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris 52.5R Cemex/yeso = 60/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 200 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]
1	373,3	0,00	0,00	47	372,9	0,17	0,06	200	372,5	0,27	0,10
2	373,3	0,03	0,01	61	373,1	0,22	0,08	201	376,8	0,31	0,11
4	373,3	0,05	0,02	75	373,1	0,18	0,07	202	376,8	0,31	0,11
6	373,4	0,05	0,02	99	373,0	0,20	0,08	204	376,8	0,31	0,12
8	373,4	0,04	0,02	127	373,0	0,25	0,09	208	376,8	0,32	0,12
14	373,4	0,07	0,03	169	372,9	0,23	0,09	216	376,8	0,35	0,13
28	373,4	0,12	0,04	200	372,5	0,27	0,10	232	376,7	0,47	0,17
35	380,7	0,15	0,06	232	372,1	0,31	0,12	263	376,2	0,58	0,21
35	372,9	0,15	0,06	263	371,4	0,31	0,12	298	375,8	0,70	0,26
40	372,9	0,16	0,06	298	370,8	0,34	0,13	335	375,6	0,80	0,29
47	372,9	0,17	0,06	335	370,6	0,34	0,13	400	375,2	0,95	0,35
				400	370,0	0,38	0,14				

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 200 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-19(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris 52.5R Cemex/yeso = 60/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1611,2	1611,2	-	3,6	15,4	7,43	4,28
90		1615,9	1616,4	-	4,2	19,0	7,19	4,38
180		1613,6	1614,6	-	4,2	20,2	7,75	3,97
28	B+A	1612,7	1612,8	1622,1	3,0	14,6	7,89	4,27
90		1610,6	1611,2	1622,2	3,0	18,5	8,49	4,42
180		1622,1	1622,9	1636,0	3,2	18,6	9,09	3,96

**Tabla E-20(a).** Expansión y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris 52.5R Cemex/escayola = 60/40". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 200 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	374,9	0,00	0,00	61	374,5	0,18	0,07	200	373,8	0,25	0,09
2	374,9	0,02	0,01	75	374,4	0,17	0,06	201	378,9	0,29	0,11
4	374,9	0,04	0,01	99	374,4	0,19	0,07	202	378,9	0,30	0,11
6	374,9	0,04	0,02	127	374,4	0,22	0,08	204	378,9	0,31	0,11
8	374,9	0,04	0,01	169	374,3	0,21	0,08	208	378,9	0,31	0,12
14	374,9	0,06	0,02	200	373,8	0,25	0,09	216	378,9	0,34	0,13
28	375,0	0,10	0,04	232	373,5	0,30	0,11	232	378,7	0,46	0,17
35	381,5	0,14	0,05	263	372,8	0,31	0,12	263	378,2	0,59	0,22
35	374,5	0,14	0,05	298	372,4	0,33	0,12	298	377,8	0,70	0,26
40	374,5	0,14	0,05	335	372,1	0,33	0,12	335	377,5	0,81	0,30
47	374,5	0,15	0,06	400	371,6	0,36	0,14	400	376,9	0,98	0,36

continúa...

Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 200 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-20(b).** Resistencia mecánica, pérdida de humedad y control de peso en probetas de Mortero de Control "cem gris 52.5R Cemex/escayola = 60/40". Distintos tipos de curado.

Edad [días]	Tipo Curado	Peso (Total 3 probetas) [g]			Resistencia [MPa]		Humedad (60°C) [%]	B.H.(200°C) [%]
		desmolde	fin Bolsa	fin Agua	Flexotracc.	Compresión		
28	B	1617,1	1616,8	-	3,9	17,9	7,52	4,31
90		1619,9	1619,2	-	4,3	19,4	7,43	4,54
180		1627,6	1626,7	-	4,3	22,3	8,87	2,98
28	B+A	1619,0	1618,7	1627,4	3,2	16,6	8,31	4,42
90		1622,5	1621,8	1632,6	3,4	18,4	8,32	4,57
180		1619,8	1619,3	1631,1	3,2	20,1	10,02	2,94

**Tabla E-21(a).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/40/40", sin aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "con plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	368,2	0,00	0,00	0,00
3	368,3	0,01	-0,06	-0,02
4	368,2	0,00	-0,04	-0,01
8	368,2	0,00	0,14	0,05
12	368,3	0,03	0,27	0,10
14	368,2	0,00	0,34	0,13
21	368,2	0,00	0,47	0,18
28	368,2	0,00	0,57	0,21
34	368,2	0,00	0,59	0,22
39	368,2	-0,01	0,58	0,22
59	368,2	0,00	0,58	0,22
80	368,3	0,01	0,57	0,21
102	368,3	0,01	0,54	0,20
129	368,2	-0,01	0,54	0,20
157	368,0	-0,07	0,52	0,20
187	367,9	-0,10	0,49	0,18

**Tabla E-21(b).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/40/40", sin aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "sin plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	361,9	0,00	0,00	0,00
3	360,6	-0,36	0,06	0,02
4	359,9	-0,57	0,08	0,03
8	358,5	-0,94	0,21	0,08
12	357,3	-1,29	0,26	0,10
14	356,3	-1,55	0,30	0,11
21	354,2	-2,14	0,31	0,11
28	353,0	-2,46	0,28	0,10
34	351,8	-2,79	0,29	0,11
39	351,7	-2,83	0,28	0,10
59	351,8	-2,79	0,27	0,10
80	350,8	-3,07	0,26	0,10
102	349,5	-3,44	0,25	0,09
129	346,2	-4,35	0,26	0,10
157	340,5	-5,91	0,25	0,09
187	339,0	-6,33	0,24	0,09

**Tabla E-21(c).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/40/40", con aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "con plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	372,8	0,00	0,00	0,00
5	372,9	0,01	0,06	0,02
7	372,9	0,03	0,11	0,04
14	372,8	0,00	0,30	0,11
21	372,8	0,00	0,38	0,14
27	372,8	0,00	0,36	0,13
32	372,8	0,00	0,34	0,13
52	372,9	0,01	0,35	0,13
73	372,9	0,03	0,33	0,12
95	372,9	0,03	0,34	0,13
122	372,9	0,03	0,31	0,12
150	372,8	0,00	0,30	0,11
180	372,7	-0,03	0,30	0,11

**Tabla E-21(d).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/40/40", con aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "sin plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	366,5	0,00	0,00	0,00
5	363,1	-0,91	0,01	0,00
7	360,7	-1,58	0,04	0,01
14	357,8	-2,36	0,11	0,04
21	355,9	-2,89	0,11	0,04
27	354,6	-3,23	0,10	0,04
32	354,5	-3,26	0,10	0,04
52	354,6	-3,23	0,09	0,03
73	353,5	-3,55	0,08	0,03
95	352,0	-3,96	0,08	0,03
122	349,0	-4,78	0,08	0,03
150	343,5	-6,26	0,09	0,03
180	341,4	-6,84	0,06	0,02

**Tabla E-22(a).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/50/30", con aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "con plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	368,6	0,00	0,00	0,00
5	368,6	0,00	0,04	0,01
7	368,6	0,00	0,05	0,02
14	368,6	0,00	0,18	0,07
21	368,7	0,01	0,26	0,10
27	368,6	0,00	0,29	0,11
32	368,6	0,00	0,29	0,11
52	368,7	0,01	0,30	0,11
73	368,8	0,04	0,28	0,10
95	368,8	0,04	0,29	0,11
122	368,8	0,04	0,24	0,09
150	368,5	-0,04	0,25	0,09
180	368,4	-0,05	0,25	0,09

**Tabla E-22(b).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/50/30", con aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "sin plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	364,9	0,00	0,00	0,00
5	361,5	-0,93	0,05	0,02
7	361,0	-1,07	0,09	0,03
14	360,4	-1,22	0,16	0,06
21	359,1	-1,59	0,19	0,07
27	357,8	-1,95	0,21	0,08
32	357,8	-1,95	0,21	0,08
52	358,1	-1,86	0,21	0,08
73	357,0	-2,15	0,19	0,07
95	354,8	-2,77	0,18	0,07
122	351,7	-3,60	0,17	0,06
150	343,3	-5,91	0,17	0,06
180	342,8	-6,06	0,16	0,06

**Tabla E-23(a).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/60/20", con aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "con plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	370,2	0,00	0,00	0,00
3	370,2	0,00	0,02	0,01
5	370,2	0,00	0,02	0,01
7	370,2	0,00	0,06	0,02
14	370,2	0,00	0,11	0,04
17	370,2	0,00	0,11	0,04
23	370,2	0,00	0,15	0,06
28	370,2	0,00	0,17	0,06
48	370,2	0,01	0,24	0,09
69	370,3	0,03	0,28	0,10
91	370,3	0,03	0,29	0,11
118	370,3	0,03	0,28	0,10
146	370,1	-0,01	0,25	0,09
180	370,1	-0,03	0,24	0,09

**Tabla E-23(b).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 20/60/20", con aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "sin plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	368,5	0,00	0,00	0,00
3	367,2	-0,35	0,03	0,01
5	366,6	-0,52	0,01	0,00
7	366,0	-0,69	0,05	0,02
14	364,2	-1,18	0,07	0,03
17	362,7	-1,57	0,09	0,03
23	360,1	-2,29	0,10	0,04
28	359,8	-2,37	0,11	0,04
48	360,1	-2,28	0,14	0,05
69	358,9	-2,62	0,15	0,06
91	361,9	-1,79	0,15	0,06
118	354,1	-3,91	0,14	0,05
146	346,4	-6,01	0,13	0,05
180	345,6	-6,21	0,11	0,04

**Tabla E-24(a).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 15/50/35", con aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "con plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	366,6	0,00	0,00	0,00
3	366,6	0,00	-0,01	0,00
5	366,6	0,00	0,02	0,01
7	366,6	0,00	0,07	0,03
14	366,7	0,01	0,21	0,08
21	366,6	0,00	0,19	0,07
28	366,6	0,00	0,19	0,07
48	366,6	0,00	0,19	0,07
69	366,6	0,00	0,18	0,07
93	366,5	-0,03	0,18	0,07
111	366,5	-0,03	0,18	0,07
150	366,0	-0,16	0,17	0,06
181	365,8	-0,22	0,17	0,06

**Tabla E-24(b).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 15/50/35", con aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "sin plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	364,3	0,00	0,00	0,00
3	362,8	-0,41	0,03	0,01
5	362,2	-0,58	0,04	0,01
7	361,3	-0,82	0,12	0,04
14	358,8	-1,51	0,17	0,06
21	356,8	-2,07	0,17	0,06
28	355,0	-2,55	0,17	0,06
48	353,7	-2,91	0,15	0,05
69	350,6	-3,76	0,15	0,05
93	347,4	-4,64	0,14	0,05
111	345,7	-5,12	0,13	0,04
150	337,2	-7,44	0,11	0,04
181	335,5	-7,92	0,11	0,04

**Tabla E-25(a).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 10/50/40", con aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "con plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	364,1	0,00	0,00	0,00
2	364,1	0,00	-0,01	0,00
4	364,1	0,00	0,00	0,00
6	364,1	0,00	0,06	0,02
13	364,1	0,00	0,11	0,04
20	364,1	0,00	0,11	0,04
27	364,1	0,00	0,11	0,04
47	364,1	0,00	0,10	0,04
68	364,1	0,00	0,09	0,03
92	364,0	-0,03	0,09	0,03
110	364,0	-0,03	0,08	0,03
149	363,7	-0,11	0,08	0,03
180	363,6	-0,15	0,08	0,03

**Tabla E-25(b).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris 52.5R Cemex/yeso/CV = 10/50/40", con aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "sin plástico" de protección.

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	364,6	0,00	0,00	0,00
2	362,8	-0,49	0,01	0,01
4	361,6	-0,82	0,01	0,00
6	360,0	-1,25	0,03	0,01
13	355,9	-2,37	0,06	0,02
20	351,8	-3,50	0,06	0,02
27	347,8	-4,59	0,06	0,02
47	344,2	-5,58	0,06	0,02
68	340,1	-6,71	0,05	0,02
92	338,1	-7,26	0,05	0,02
110	337,3	-7,48	0,04	0,02
149	333,3	-8,57	0,03	0,01
180	332,0	-8,94	0,02	0,01

**Tabla E-26(a).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris CEM I 52.5 R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10", sin aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas en cámara húmeda "con plástico" de protección.

...continuación

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	375,4	0,00	0,00	0,00	44	375,2	-0,05	0,09	0,03
2	375,4	0,00	-0,04	-0,01	58	375,2	-0,05	0,10	0,04
5	375,3	-0,03	0,04	0,01	72	375,2	-0,05	0,07	0,03
7	375,3	-0,03	0,10	0,04	102	375,1	-0,08	0,03	0,01
9	375,3	-0,03	0,12	0,04	132	374,6	-0,20	0,05	0,02
10	375,3	-0,03	0,12	0,04	162	374,5	-0,24	0,08	0,03
12	375,3	-0,03	0,10	0,04	194	373,8	-0,42	0,07	0,03
14	375,3	-0,03	0,09	0,03	224	373,4	-0,54	0,05	0,02
25	375,3	-0,03	0,09	0,03	254	373,1	-0,60	0,07	0,03
29	375,2	-0,05	0,10	0,04					
31	375,3	-0,03	0,09	0,03					
37	375,3	-0,03	0,10	0,04					

continúa...

**Tabla E-26(b).** Expansión y control de peso en probetas especiales de Mortero "cem gris CEM I 52.5 R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10", sin aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas por 7 días en ambiente de laboratorio (AL) "sin plástico" de protección, para luego sumergir en agua por 24 horas. Al retirar del agua, son protegidas con plástico y continúan curado en cámara húmeda.

...continuación

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	369,4	0,00	0,00	0,00	31	371,8	0,65	0,03	0,01
2	356,6	-3,46	-0,01	0,00	37	371,7	0,62	0,03	0,01
5	341,4	-7,58	-0,03	-0,01	44	371,7	0,62	0,02	0,01
7	340,9	-7,71	-0,06	-0,02	58	371,7	0,61	0,03	0,01
8	371,9	0,66	0,01	0,00	72	371,7	0,61	0,02	0,01
9	371,8	0,65	0,04	0,02	102	371,5	0,57	0,00	0,00
10	371,8	0,65	0,05	0,02	132	371,2	0,47	0,02	0,01
11	371,8	0,65	0,05	0,02	162	371,0	0,43	0,04	0,02
12	371,8	0,65	0,03	0,01	194	370,5	0,30	0,03	0,01
14	371,8	0,65	0,03	0,01	224	370,1	0,19	0,02	0,01
25	371,8	0,65	0,02	0,01	254	369,9	0,12	0,03	0,01
29	371,7	0,62	0,03	0,01					

continúa...

Color indica el instante cronológico en que las probetas se sumergen en agua por 24 horas, para continuar el curado en cámara húmeda con plástico de protección.

**Tabla E-26(c).** Expansión y control de peso en probetas especiales "cem gris CEM I 52.5 R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10", sin aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas por 14 días en ambiente de laboratorio (AL) "sin plástico" de protección, para luego sumergir en agua por 24 horas. Al retirar del agua, son protegidas con plástico y se continúan curando en cámara húmeda.

...continuación

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	370,1	0,00	0,00	0,00	29	372,6	0,68	-0,02	-0,01
2	362,0	-2,19	-0,01	0,00	31	372,7	0,70	-0,03	-0,01
5	344,8	-6,85	-0,03	-0,01	37	372,7	0,70	-0,02	-0,01
7	342,2	-7,55	-0,06	-0,02	44	372,6	0,68	-0,03	-0,01
9	340,9	-7,90	-0,10	-0,04	58	372,6	0,68	-0,03	-0,01
12	340,3	-8,07	-0,10	-0,04	72	372,6	0,68	-0,03	-0,01
14	340,3	-8,07	-0,10	-0,04	102	372,5	0,63	-0,07	-0,03
15	372,8	0,72	-0,03	-0,01	132	372,0	0,50	-0,04	-0,02
16	372,7	0,70	0,01	0,00	162	371,8	0,46	-0,02	-0,01
17	372,7	0,70	0,01	0,00	194	371,1	0,26	-0,03	-0,01
19	372,7	0,70	-0,02	-0,01	224	370,7	0,15	-0,04	-0,02
25	372,7	0,70	-0,03	-0,01	254	370,3	0,05	-0,03	-0,01

continúa...

 Color indica el instante cronológico en que las probetas se sumergen en agua por 24 horas, para continuar el curado en cámara húmeda con plástico de protección.

**Tabla E-26(d).** Expansión y control de peso en probetas especiales "cem gris CEM I 52.5 R/yeso/CV/FCC(m) = 20/40/30/10", sin aditivo superplastificante. Promedio 2 probetas, curadas por 25 días en ambiente de laboratorio (AL) "sin plástico" de protección, para luego sumergir en agua por 24 horas. Al retirar del agua, son protegidas con plástico y continúan curado en cámara húmeda.

...continuación

Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	Var. Peso [ % ]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
1	369,8	0,00	0,00	0,00	30	372,4	0,72	-0,10	-0,04
2	360,6	-2,48	-0,01	0,00	31	372,4	0,72	-0,09	-0,03
5	344,3	-6,90	-0,03	-0,01	37	372,4	0,70	-0,09	-0,03
7	341,6	-7,63	-0,08	-0,03	44	372,3	0,69	-0,09	-0,04
9	340,6	-7,88	-0,10	-0,04	58	372,3	0,68	-0,08	-0,03
12	340,1	-8,02	-0,11	-0,04	72	372,3	0,68	-0,09	-0,03
14	340,0	-8,06	-0,11	-0,04	102	372,2	0,65	-0,12	-0,04
25	339,8	-8,11	-0,11	-0,04	132	371,8	0,55	-0,10	-0,04
26	372,4	0,72	-0,08	-0,03	162	371,7	0,51	-0,07	-0,03
27	372,5	0,73	-0,06	-0,02	194	371,2	0,38	-0,09	-0,03
28	372,4	0,72	-0,06	-0,02	224	370,8	0,27	-0,10	-0,04
29	372,4	0,72	-0,10	-0,04	254	370,5	0,19	-0,09	-0,03

continúa...

 Color indica el instante cronológico en que las probetas se sumergen en agua por 24 horas, para continuar el curado en cámara húmeda con plástico de protección.

**Tabla E-27(a). Expansión y control de peso en probetas de Mortero de Control "yeso = 100%". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 181 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.**

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [‰]
3	367,6	0,00	0,00	70	367,1	-0,61	-0,23	181	366,5	-1,11	-0,41
4	367,6	-0,02	-0,01	84	367,0	-0,68	-0,26	182	369,6	-0,76	-0,28
6	367,6	-0,05	-0,02	110	366,7	-0,87	-0,33	183	369,7	-0,71	-0,27
12	367,6	-0,10	-0,04	149	366,6	-1,06	-0,40	185	369,7	-0,57	-0,21
19	367,5	-0,17	-0,06	181	366,5	-1,11	-0,41	189	369,7	-0,47	-0,18
27	367,5	-0,23	-0,09	198	366,3	-1,17	-0,44	198	369,6	-0,43	-0,16
32	367,4	-0,25	-0,09	213	366,2	-1,26	-0,47	213	369,5	-0,46	-0,17
35	367,4	-0,28	-0,10	245	365,8	-1,42	-0,53	245	369,3	-0,55	-0,20
39	367,4	-0,35	-0,13	280	365,5	-1,49	-0,55	280	369,1	-0,63	-0,24
46	367,3	-0,38	-0,14	329	365,1	-1,65	-0,62	329	368,9	-0,77	-0,29
53	367,3	-0,47	-0,18	406	364,1	-1,75	-0,65	406	368,3	-0,93	-0,35
60	367,2	-0,55	-0,21	441	363,3	-1,87	-0,69	441	367,7	-1,05	-0,39

continúa...

 Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 181 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.

**Tabla E-28(a). Expansión y control de peso en probetas de Mortero de Control "escayola = 100%". i) "Expansión (B)": Promedio 4 probetas, curadas en cámara húmeda con plástico de protección. ii) "Expansión (B+A)": Promedio 2 probetas, apartadas a los 181 días de la serie anterior, sumergidas sin plástico de protección por 24 horas en agua y posteriormente curadas en cámara húmeda con plástico de protección.**

i) Expansión (B):				...continuación				ii) Expansión (B+A):			
Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]	Edad " t " [días]	Peso Prom. [g]	$\Delta_t$ Prom. [mm]	$\delta_t$ Prom. [ % ]
3	371,7	0,00	0,00	70	371,1	-0,10	-0,04	181	370,4	-0,49	-0,18
4	371,7	0,01	0,00	84	370,9	-0,18	-0,07	182	373,8	-0,37	-0,14
6	371,6	0,01	0,00	110	370,7	-0,28	-0,11	183	373,8	-0,38	-0,15
12	371,6	0,05	0,02	149	370,5	-0,46	-0,17	185	373,8	-0,34	-0,13
19	371,6	0,03	0,01	181	370,4	-0,49	-0,18	189	373,8	-0,30	-0,12
27	371,5	0,01	0,00	198	370,0	-0,54	-0,20	198	373,7	-0,29	-0,11
32	371,4	0,04	0,01	213	369,9	-0,61	-0,23	213	373,6	-0,32	-0,12
35	371,5	0,02	0,01	245	369,6	-0,67	-0,25	245	373,4	-0,36	-0,14
39	371,4	0,00	0,00	280	369,2	-0,69	-0,25	280	373,3	-0,35	-0,13
46	371,3	-0,01	0,00	329	368,8	-0,78	-0,29	329	373,1	-0,38	-0,15
53	371,3	-0,03	-0,01	406	367,9	-0,84	-0,31	406	372,6	-0,45	-0,17
60	371,2	-0,07	-0,02	441	367,1	-0,96	-0,35	441	372,1	-0,53	-0,20

continúa...

 Color indica el instante cronológico en que dos probetas son apartadas de la serie, se les retira el plástico de protección y se sumergen en agua por 24 horas. Las otras dos, continúan su curado sin alteración; es decir, con plástico de protección y los valores promedios de estas dos probetas se muestran en "i)" a partir de 181 días y edades posteriores. En "ii)" se muestran valores promedios para las dos probetas a partir del instante en que son sumergidas en agua y su curado posterior.





Con esto llego a la conclusión del presente trabajo, sin embargo, pretender que ha terminado es una utopía. Esto recién comienza y como podéis detectar, aún hay mucho por investigar, por lo que, Dios mediante, con lo aprendido y su sustento, espero iniciar un extenso y vasto trabajo de investigación a fin de afianzar los avances logrados, de modo que se permita fruto de él, una aplicación practica traducida en soluciones útiles para la construcción, en especial en edificación de viviendas.

El ámbito de la búsqueda de nuevos materiales constructivos y su durabilidad, sustentada en la protección del medio ambiente, es tan amplia e interesante, que espero también incursionar en otros campos de la investigación relacionada a fin de contribuir a ampliar el horizonte del conocimiento. Quedo comprometido a desarrollar investigación, solo así es posible justificar la inversión de recursos y el tiempo que ha demandado este esfuerzo. Sólo así, se justifica ser académico. Dios me ayudará en su desarrollo.

