

680-44

Nuevo procedimiento de dosificación de los morteros y hormigones fraguados con aplicación de computadores digitales (Comparación del método con el "Método Completo para el Análisis Químico del Hormigón Endurecido" del CEMBUREAU)

(continuación)

A. RUIZ DE GAUNA
Dr. en Ciencias Químicas

2. EJEMPLOS

Como ejemplo de utilización del método descrito en el apartado 1, se aplica éste a uno de los casos cuya resolución presenta mayor dificultad, cual es el de un conglomerado confeccionado con dos tipos de árido soluble:

- a) Arido fino que contiene sílice soluble.
- b) Arido grueso de naturaleza caliza.

Este conglomerado fue confeccionado en el Instituto Eduardo Torroja para ser ensayado por los laboratorios europeos participantes en los análisis cooperativos que el Comité de Trabajo del Cembureau para el Ensayo del Cemento y Hormigón ha venido realizando para establecer un Método Completo para el Análisis Químico del Hormigón Endurecido.

Junto a los resultados obtenidos mediante el método descrito en este trabajo, se darán los resultados deducidos de la aplicación del método establecido por el Cembureau y publicado en septiembre de 1970.

2.1. Datos del hormigón fresco. Dosificación "verdadera"

Se confeccionaron probetas de hormigón conteniendo cada una los siguientes materiales:

| | | |
|------------------------------------|---------|------------|
| Arido grueso (caliza de machaqueo) | 3.015 g | } 78,463 % |
| Arena | 3.215 g | |

Cemento portland P-350 1.070 g 13,476 %

Agua 640 g 8,061 %

$$\frac{\text{Arido}}{\text{Cemento}} = 5,822;$$

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = 0,598.$$

El análisis químico de los materiales empleados figura en el Cuadro V. El cemento fue analizado según el método prescrito por el Pliego español vigente para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos (PCCH — 64); los áridos, según el procedimiento que se describe en el apartado 1.2.2 de este trabajo.

C U A D R O V

| Componentes | Cemento | Arido fino | Arido grueso |
|---------------------------|---------|------------|--------------|
| Pérdida al fuego, (P) % | 1,7 | 9,2 | 42,9 |
| Residuo insoluble, (R) % | 0,9 | 80,0 | 2,0 |
| Anhídrido silícico, (S) % | 18,9 | 1,4 | 0,1 |
| Oxido aluminico, (A) % | 6,3 | 0,3 | 0,0 |
| Oxido férrico, (F) % | 1,8 | 0,7 | 0,1 |
| Oxido cálcico, (C) % | 63,7 | 6,3 | 54,0 |
| Oxido magnésico, (M) % | 1,9 | 1,7 | 0,6 |
| Trióxido de azufre, (N) % | 3,3 | 0,0 | 0,0 |
| Resto a 100, (T) % | 1,5 | 0,4 | 0,3 |
| Total | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

2.2. Resultados obtenidos según el nuevo método de dosificación con aplicación de computadores digitales

2.2.1. Análisis químicos

1.639,6 g de hormigón seco a 105°-110°C se sometieron a una cuidadosa disgregación mecánica, según se describe en el apartado 1.2.2.1, obteniéndose las siguientes fracciones:

Fracción 1: 537,9 g de árido grueso mayor de 6,680 mm (Tyler n.º 3). Totalmente exento de pasta de cemento.

Fracción 2: 1.100,1 g de "mortero enriquecido", menor de 6,680 mm, conteniendo toda la pasta de cemento hidratada.

Total: 1.638,0 g.

El análisis químico de la fracción 2 y del árido medio extraído de la fracción 2, realizados según el método descrito en 1.2.2.2, se da en el Cuadro VI.

C U A D R O VI

| | "Mortero enriquecido" | Arido medio contenido en el "mortero enriquecido" (IX) |
|---------------------------|-----------------------|--|
| Pérdida al fuego, (P) % | $P_h = 15,91$ | $P_a = 12,67$ |
| Residuo insoluble, (R) % | $R_h = 50,92$ | $R_a = 67,62$ |
| Anhídrido silícico, (S) % | $S_h = 4,60$ | $S_a = 2,43$ |
| Oxido aluminico, (A) % | $A_h = 1,43$ | $A_a = 0,57$ |
| Oxido férrico, (F) % | $F_h = 1,00$ | $F_a = 0,98$ |
| Oxido cálcico, (C) % | $C_h = 22,78$ | $C_a = 13,00$ |
| Oxido magnésico, (M) % | $M_h = 2,07$ | $M_a = 2,20$ |
| Trióxido de azufre, (N) % | $N_h = 0,71$ | $N_a = 0,20$ |
| Resto a 100, (T) % | $T_h = 0,58$ | $T_a = 0,33$ |
| Total | 100,00 | 100,00 |

(IX) Para asegurar una más perfecta eliminación de la pasta de cemento adherida al árido, se efectuó en una muestra de árido extraída y limpia, según 1.2.2.1, un tratamiento final con una mezcla de metanol y ácido salicílico con agitación lenta durante 4 horas en frío y en la proporción:

- 40 g árido limpio, según 1.2.2.1.
- 120 ml de metanol.
- 18 g ácido salicílico.

El análisis químico del árido así tratado dio un resultado prácticamente coincidente con el análisis del "árido fino" dado en el Cuadro V, demostrándose así que el tratamiento con ácido salicílico disolvió la fracción de árido contenida en el mortero enriquecido. La aplicación del método de dosificación empleando este "árido medio", confirmó la anterior conclusión.

2.2.2. Barrido previo al campo de soluciones

Siguiendo el procedimiento descrito en 1.3. se ha calculado la tabla de resultados dada en el Cuadro VII y que constituye el "barrido previo" al campo de soluciones. Los porcentajes de árido X, cemento anhidro Y, y pérdida al fuego surgida H, se refieren al "mortero enriquecido".

2.2.3. Determinación del tipo de conglomerante

La relación óxido cálcico anhídrido silícico (C'/S') en el cemento anhidro resulta ser, para todos los valores del Cuadro VII, prácticamente constante e igual a 4,70.

El standard de cal, según la fórmula de Kühl, es también prácticamente constante e igual a 139,40.

Ateniéndose a los resultados obtenidos y sin que en la deducción de las conclusiones se hagan intervenir otras consideraciones que las estrictamente analíticas y el criterio establecido en el Cuadro IV para determinar el tipo de cemento, se llega a la conclusión de que el cemento empleado es de Adición con adición caliza.

2.2.4. Determinación del intervalo de soluciones y de la solución final

Se determinará el intervalo de soluciones y la solución final en los dos casos siguientes:

- 1.º Se dispone de indicaciones extra-analíticas mediante las cuales se conoce que el cemento empleado es del tipo portland.

2.º) No se dispone más que de las indicaciones deducidas de los análisis y cálculos efectuados: el cemento es de Adición con adición caliza.

1.ºr Caso: **El cemento es del tipo portland**

El intervalo de soluciones, según el criterio establecido en 1.3, y los valores medios del intervalo se dan en el Cuadro VIII (X, Y, H se refieren al “mortero enriquecido” seco a 105º-110ºC).

Aunque del Cuadro VII puede deducirse el valor de todas las incógnitas, en el Cuadro VIII sólo se transcriben las que servirán para comparar los resultados con los obtenidos por el método del Cembureau.

C U A D R O VIII

| Resultados de dosificación referidos a “mortero enriquecido” seco a 105º-110ºC (Cemento portland) | | | | | | | |
|--|-----|------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Incógnitas | P' | R' | C' | S' | X | Y | H |
| Intervalo de soluciones | 1 | 0,7 | 69,664 | 14,852 | 75,110 | 18,684 | 6,207 |
| | 6 | 3,0 | 64,457 | 13,730 | 74,401 | 20,336 | 5,263 |
| Valor medio del intervalo | 3,5 | 1,85 | 67,060 | 14,291 | 74,760 | 19,510 | 5,730 |

A partir de los pesos de árido limpio de pasta de cemento y de “mortero enriquecido” contenidos en el hormigón original, dados en el apartado 2.2.1, pueden calcularse los porcentajes de cemento anhidro, Y_h , árido, X_h y pérdida al fuego surgida en la hidratación, H_h , en el hormigón endurecido original seco a 105º-110ºC, mediante las fórmulas:

$$X_h = \left(537,9 + \frac{1.100,1 X}{100} \right) \frac{100}{1.638} ;$$

$$Y_h = \frac{1.100,1 Y}{1.638} ;$$

$$H_h = \frac{1.100,1 H}{1.638} .$$

Los resultados se dan en el Cuadro IX.

C U A D R O IX

| Resultados de dosificación referidos a hormigón seco a 105º-110ºC (Cemento portland) | | | | | | | |
|---|-----|------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Incógnitas | P' | R' | C' | S' | X_h | Y_h | H_h |
| Valor medio del intervalo | 3,5 | 1,85 | 67,060 | 14,291 | 83,05 | 13,10 | 3,85 |

CUADRO VII

| P' | R' | S' | A' | F' | C' | M' | N' | T' | X | Y | H | P'' | P | P'' - P |
|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|---------|
| 0.150 | 0.700 | 14.980 | 5.409 | 1.425 | 70.267 | 2.254 | 3.022 | 1.793 | 75.111 | 18.523 | 6.366 | 25.688 | 0.112 | 25.576 |
| 0.150 | 1.500 | 14.853 | 5.359 | 1.422 | 69.688 | 2.257 | 2.993 | 1.778 | 74.888 | 18.718 | 6.394 | 25.572 | 0.112 | 25.460 |
| 0.150 | 2.000 | 14.773 | 5.328 | 1.420 | 69.327 | 2.259 | 2.975 | 1.769 | 74.746 | 18.843 | 6.411 | 25.500 | 0.112 | 25.388 |
| 0.150 | 3.000 | 14.614 | 5.266 | 1.416 | 68.604 | 2.262 | 2.938 | 1.751 | 74.456 | 19.096 | 6.448 | 25.354 | 0.112 | 25.242 |
| 0.150 | 6.000 | 14.136 | 5.080 | 1.404 | 66.434 | 2.272 | 2.829 | 1.695 | 73.537 | 19.900 | 6.563 | 24.914 | 0.113 | 24.801 |
| 0.150 | 10.000 | 13.499 | 4.831 | 1.388 | 63.542 | 2.286 | 2.683 | 1.621 | 72.185 | 21.082 | 6.732 | 24.319 | 0.114 | 24.205 |
| 0.300 | 0.700 | 14.958 | 5.401 | 1.423 | 70.161 | 2.251 | 3.017 | 1.790 | 75.111 | 18.551 | 6.338 | 25.688 | 0.224 | 25.464 |
| 0.300 | 1.500 | 14.830 | 5.351 | 1.419 | 69.582 | 2.254 | 2.988 | 1.776 | 74.887 | 18.747 | 6.366 | 25.572 | 0.224 | 25.348 |
| 0.300 | 2.000 | 14.751 | 5.320 | 1.417 | 69.220 | 2.255 | 2.970 | 1.766 | 74.745 | 18.872 | 6.383 | 25.499 | 0.224 | 25.275 |
| 0.300 | 3.000 | 14.591 | 5.258 | 1.413 | 68.497 | 2.259 | 2.934 | 1.748 | 74.455 | 19.126 | 6.419 | 25.353 | 0.225 | 25.129 |
| 0.300 | 6.000 | 14.113 | 5.071 | 1.402 | 66.328 | 2.269 | 2.824 | 1.692 | 73.535 | 19.932 | 6.533 | 24.912 | 0.226 | 24.686 |
| 0.300 | 10.000 | 13.476 | 4.823 | 1.386 | 63.435 | 2.283 | 2.678 | 1.619 | 72.180 | 21.119 | 6.701 | 24.316 | 0.228 | 24.089 |
| 1.000 | 0.700 | 14.852 | 5.362 | 1.413 | 69.664 | 2.235 | 2.966 | 1.778 | 75.110 | 18.683 | 6.207 | 25.687 | 0.751 | 24.937 |
| 1.000 | 1.500 | 14.724 | 5.313 | 1.409 | 69.086 | 2.238 | 2.967 | 1.763 | 74.884 | 18.882 | 6.233 | 25.570 | 0.752 | 24.818 |
| 1.000 | 2.000 | 14.645 | 5.282 | 1.407 | 68.724 | 2.239 | 2.949 | 1.754 | 74.741 | 19.009 | 6.250 | 25.497 | 0.753 | 24.745 |
| 1.000 | 3.000 | 14.485 | 5.220 | 1.403 | 68.001 | 2.243 | 2.912 | 1.735 | 74.448 | 19.267 | 6.285 | 25.350 | 0.754 | 24.596 |
| 1.000 | 6.000 | 14.008 | 5.033 | 1.392 | 65.832 | 2.253 | 2.803 | 1.680 | 73.521 | 20.085 | 6.394 | 24.906 | 0.759 | 24.148 |
| 1.000 | 10.000 | 13.371 | 4.785 | 1.376 | 62.939 | 2.267 | 2.657 | 1.606 | 72.155 | 21.290 | 6.555 | 24.306 | 0.765 | 23.541 |
| 2.000 | 0.700 | 14.701 | 5.308 | 1.398 | 68.956 | 2.212 | 2.966 | 1.760 | 75.108 | 18.876 | 6.016 | 25.686 | 1.517 | 24.169 |
| 2.000 | 1.500 | 14.573 | 5.258 | 1.395 | 68.377 | 2.215 | 2.936 | 1.745 | 74.880 | 19.079 | 6.041 | 25.568 | 1.519 | 24.049 |
| 2.000 | 2.000 | 14.494 | 5.227 | 1.393 | 68.015 | 2.217 | 2.918 | 1.736 | 74.735 | 19.208 | 6.057 | 25.494 | 1.521 | 23.974 |
| 2.000 | 3.000 | 14.334 | 5.165 | 1.389 | 67.292 | 2.220 | 2.882 | 1.717 | 74.439 | 19.472 | 6.089 | 25.346 | 1.524 | 23.822 |
| 2.000 | 6.000 | 13.857 | 4.979 | 1.377 | 65.123 | 2.231 | 2.772 | 1.662 | 73.501 | 20.308 | 6.191 | 24.897 | 1.533 | 23.364 |
| 2.000 | 10.000 | 13.219 | 4.730 | 1.361 | 62.230 | 2.244 | 2.627 | 1.588 | 72.118 | 21.540 | 6.342 | 24.290 | 1.545 | 22.745 |
| 3.000 | 0.700 | 14.550 | 5.253 | 1.384 | 68.247 | 2.190 | 2.935 | 1.742 | 75.106 | 19.072 | 5.822 | 25.685 | 2.298 | 23.387 |
| 3.000 | 1.500 | 14.422 | 5.203 | 1.381 | 67.668 | 2.193 | 2.906 | 1.727 | 74.875 | 19.280 | 5.845 | 25.566 | 2.302 | 23.264 |
| 3.000 | 2.000 | 14.342 | 5.172 | 1.379 | 67.307 | 2.194 | 2.888 | 1.718 | 74.729 | 19.411 | 5.859 | 25.491 | 2.304 | 23.187 |
| 3.000 | 3.000 | 14.183 | 5.110 | 1.375 | 66.584 | 2.198 | 2.851 | 1.699 | 74.430 | 19.681 | 5.889 | 25.341 | 2.309 | 23.032 |
| 3.000 | 6.000 | 13.705 | 4.924 | 1.363 | 64.414 | 2.208 | 2.742 | 1.644 | 73.481 | 20.535 | 5.984 | 24.888 | 2.323 | 22.565 |
| 3.000 | 10.000 | 13.068 | 4.676 | 1.347 | 61.522 | 2.222 | 2.596 | 1.570 | 72.080 | 21.797 | 6.124 | 24.274 | 2.342 | 21.930 |
| 4.000 | 0.700 | 14.398 | 5.199 | 1.370 | 67.538 | 2.167 | 2.905 | 1.723 | 75.104 | 19.273 | 5.623 | 25.684 | 3.097 | 22.587 |
| 4.000 | 1.500 | 14.271 | 5.149 | 1.367 | 66.959 | 2.170 | 2.875 | 1.709 | 74.871 | 19.485 | 5.644 | 25.563 | 3.102 | 22.462 |
| 4.000 | 2.000 | 14.191 | 5.118 | 1.365 | 66.598 | 2.172 | 2.857 | 1.699 | 74.723 | 19.619 | 5.658 | 25.488 | 3.105 | 22.383 |
| 4.000 | 3.000 | 14.032 | 5.056 | 1.361 | 65.875 | 2.175 | 2.821 | 1.681 | 74.421 | 19.894 | 5.685 | 25.336 | 3.111 | 22.225 |
| 4.000 | 6.000 | 13.554 | 4.869 | 1.349 | 63.705 | 2.185 | 2.711 | 1.626 | 73.460 | 20.768 | 5.772 | 24.878 | 3.130 | 21.748 |
| 4.000 | 10.000 | 12.917 | 4.621 | 1.333 | 60.813 | 2.199 | 2.565 | 1.552 | 72.041 | 22.059 | 5.900 | 24.258 | 3.156 | 21.102 |
| 6.000 | 0.700 | 14.096 | 5.089 | 1.341 | 66.120 | 2.122 | 2.844 | 1.687 | 75.099 | 19.687 | 5.214 | 25.682 | 4.744 | 20.938 |
| 6.000 | 1.500 | 13.969 | 5.040 | 1.338 | 65.542 | 2.125 | 2.814 | 1.672 | 74.862 | 19.908 | 5.231 | 25.569 | 4.752 | 20.807 |
| 6.000 | 2.000 | 13.889 | 5.009 | 1.336 | 65.180 | 2.127 | 2.796 | 1.663 | 74.710 | 20.049 | 5.241 | 25.481 | 4.757 | 20.725 |
| 6.000 | 3.000 | 13.730 | 4.947 | 1.332 | 64.457 | 2.130 | 2.760 | 1.645 | 74.401 | 20.336 | 5.263 | 25.327 | 4.766 | 20.560 |
| 6.000 | 6.000 | 13.252 | 4.760 | 1.320 | 62.288 | 2.140 | 2.650 | 1.589 | 73.418 | 21.249 | 5.333 | 24.859 | 4.796 | 20.062 |
| 6.000 | 10.000 | 12.615 | 4.512 | 1.304 | 59.395 | 2.154 | 2.504 | 1.515 | 71.961 | 22.603 | 5.436 | 24.225 | 4.837 | 19.388 |
| 9.000 | 0.700 | 13.643 | 4.926 | 1.298 | 63.994 | 2.055 | 2.752 | 1.633 | 75.093 | 20.342 | 4.565 | 25.678 | 7.351 | 18.328 |
| 9.000 | 1.500 | 13.515 | 4.876 | 1.295 | 63.415 | 2.057 | 2.723 | 1.618 | 74.847 | 20.578 | 4.575 | 25.551 | 7.363 | 18.188 |
| 9.000 | 2.000 | 13.436 | 4.845 | 1.293 | 63.054 | 2.059 | 2.705 | 1.609 | 74.690 | 20.729 | 4.581 | 25.471 | 7.371 | 18.100 |
| 9.000 | 3.000 | 13.276 | 4.783 | 1.289 | 62.331 | 2.062 | 2.668 | 1.591 | 74.370 | 21.036 | 4.594 | 25.311 | 7.387 | 17.925 |
| 9.000 | 6.000 | 12.799 | 4.596 | 1.277 | 60.161 | 2.073 | 2.559 | 1.535 | 73.350 | 22.015 | 4.635 | 24.827 | 7.435 | 17.393 |
| 9.000 | 10.000 | 12.161 | 4.348 | 1.261 | 57.269 | 2.086 | 2.413 | 1.461 | 71.832 | 23.471 | 4.696 | 24.172 | 7.499 | 16.673 |
| 12.000 | 0.700 | 13.189 | 4.762 | 1.255 | 61.868 | 1.987 | 2.660 | 1.579 | 75.085 | 21.043 | 3.872 | 25.674 | 10.135 | 15.539 |
| 12.000 | 1.500 | 13.062 | 4.712 | 1.252 | 61.289 | 1.990 | 2.631 | 1.564 | 74.831 | 21.296 | 3.873 | 25.543 | 10.153 | 15.390 |
| 12.000 | 2.000 | 12.982 | 4.681 | 1.250 | 60.928 | 1.991 | 2.613 | 1.555 | 74.669 | 21.457 | 3.875 | 25.460 | 10.164 | 15.296 |
| 12.000 | 3.000 | 12.823 | 4.619 | 1.246 | 60.204 | 1.995 | 2.577 | 1.536 | 74.337 | 21.786 | 3.877 | 25.295 | 10.187 | 15.108 |
| 12.000 | 6.000 | 12.345 | 4.433 | 1.234 | 58.035 | 2.005 | 2.467 | 1.481 | 73.277 | 22.838 | 3.885 | 24.794 | 10.255 | 14.539 |
| 12.000 | 10.000 | 11.708 | 4.184 | 1.218 | 55.142 | 2.019 | 2.321 | 1.407 | 71.693 | 24.409 | 3.897 | 24.116 | 10.348 | 13.768 |
| 15.000 | 0.700 | 12.736 | 4.598 | 1.212 | 59.741 | 1.919 | 2.569 | 1.524 | 75.078 | 21.794 | 3.129 | 25.670 | 13.117 | 12.553 |
| 15.000 | 1.500 | 12.608 | 4.548 | 1.209 | 59.163 | 1.922 | 2.540 | 1.510 | 74.814 | 22.065 | 3.121 | 25.534 | 13.141 | 12.393 |
| 15.000 | 2.000 | 12.529 | 4.517 | 1.207 | 58.801 | 1.924 | 2.521 | 1.500 | 74.645 | 22.238 | 3.117 | 25.449 | 13.156 | 12.293 |
| 15.000 | 3.000 | 12.369 | 4.455 | 1.203 | 58.078 | 1.927 | 2.485 | 1.482 | 74.301 | 22.592 | 3.107 | 25.277 | 13.186 | 12.091 |
| 15.000 | 6.000 | 11.892 | 4.269 | 1.191 | 55.909 | 1.937 | 2.376 | 1.427 | 73.198 | 23.725 | 3.077 | 24.759 | 13.278 | 11.481 |
| 15.000 | 10.000 | 11.255 | 4.020 | 1.176 | 53.016 | 1.951 | 2.230 | 1.353 | 71.543 | 25.425 | 3.032 | 24.056 | 13.402 | 10.654 |
| 18.000 | 0.700 | 12.282 | 4.434 | 1.170 | 57.615 | 1.852 | 2.477 | 1.470 | 75.069 | 22.600 | 2.331 | 25.666 | 16.317 | 9.349 |
| 18.000 | 1.500 | 12.155 | 4.384 | 1.166 | 57.036 | 1.854 | 2.448 | 1.455 | 74.795 | 22.892 | 2.313 | 25.525 | 16.348 | 9.177 |
| 18.000 | 2.000 | 12.075 | 4.353 | 1.164 | 56.675 | 1.856 | 2.430 | 1.446 | 74.621 | 23.078 | 2.302 | 25.436 | 16.368 | 9.069 |
| 18.000 | 3.000 | 11.916 | 4.291 | 1.160 | 55.952 | 1.860 | 2.393 | 1.428 | 74.262 | 23.459 | 2.278 | 25.259 | 16.407 | 8.862 |
| 18.000 | 6.000 | 11.438 | 4.105 | 1.149 | 53.782 | 1.870 | 2.284 | 1.372 | 73.113 | 24.683 | 2.204 | 24.720 | 16.525 | 8.196 |
| 18.000 | 10.000 | 10.801 | 3.857 | 1.133 | 50.890 | 1.883 | 2.138 | 1.298 | 71.380 | 26.529 | 2.091 | 23.991 | 16.685 | 7.306 |
| 20.000 | 0.700 | 11.980 | 4.325 | 1.141 | 56.197 | 1.807 | 2.416 | 1.434 | 75.063 | 23.172 | 1.765 | 25.663 | 18.584 | 7.079 |
| 20.000 | 1.500 | 11.853 | 4.275 | 1.138 | 55.619 | 1.809 | 2.387 | 1.419 | 74.782 | 23.478 | 1.739 | 25.518 | 18.620 | 6.898 |
| 20.000 | 2.000 | 11.773 | 4.244 | 1.136 | 55.257 | 1.811 | 2.369 | 1.410 | 74.603 | 23.674 | 1.723 | 25.427 | 18.643 | 6.784 |
| 20.000 | 3.000 | 11.614 | 4.182 | 1.132 | 54.534 | 1.814 | 2.332 | 1.392 | 74.235 | 24.076 | 1.689 | 25.245 | 18.689 | 6.557 |
| 20.000 | 6.000 | 11.136 | 3.996 | 1.120 | 52.365 | 1.825 | 2.223 | 1.336 | 73.052 | 25.367 | 1.581 | 24.693 | 18.827 | 5.867 |
| 20.000 | 10.000 | 10.499 | 3.747 | 1.104 | 49.472 | 1.838 | 2.077 | 1.262 | 71.263 | 27.320 | 1.417 | 23.945 | 19.014 | 4.931 |

Finalmente, para poder comparar los resultados obtenidos por análisis y cálculo con los datos del hormigón fresco o dosificación “verdadera”, es preciso referir los resultados a hormigón empapado en agua.

El equivalente en agua (W E) de la porosidad accesible total, determinado por el método del Cembureau, según se detalla en el apartado (2.3.1.1.1), resultó ser 6,46 %, porcentaje referido a hormigón seco a 105°-110°C.

Según esto, 106,46 g de hormigón empapado en agua contienen:

| | |
|-----------------------------------|-----------------|
| Arido | 83,05 g |
| Cemento anhidro | 13,10 " |
| Pérdida al fuego surgida | 3,85 " |
| Agua que rellena los poros | 6,46 " |
| Total | 106,46 g |

Refiriendo las anteriores cifras a 100 se obtienen los valores dados en el Cuadro X, que son directamente comparables a los datos “verdaderos” del hormigón fresco. Por H'_h se designa el porcentaje de agua de amasado. X'_h e Y'_h son, respectivamente, los porcentajes de árido y cemento anhidro en el hormigón empapado.

C U A D R O X

| Resultados de dosificación referidos a hormigón empapado en agua (Cemento portland) | | | | | | | |
|--|-----|------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| Incógnitas | P' | R' | C' | S' | X'_h | Y'_h | H'_h |
| Valor medio del intervalo | 3,5 | 1,85 | 67,060 | 14,291 | 78,011 | 12,305 | 9,684 (X) |

(X) Se efectuó un ensayo de comprobación destilando en un alambique metálico, calentado a 1.000°C, 453 g de hormigón empapado en agua durante tres días. Se recuperaron por destilación 42 ml de agua, lo que representa un porcentaje de agua de amasado de 9,272 %.

Relaciones:

$$\frac{\text{Arido}}{\text{Cemento}} = \frac{78,011}{12,305} = 6,34 ;$$

$$\frac{\text{Agua de amasado}}{\text{Cemento}} = \frac{9,684}{12,305} = 0,79 .$$

2.º Caso: El cemento es de Adición con adición caliza

Efectuando idénticas consideraciones y cálculos que en el 1.º Caso, pero aplicado al caso de ser el cemento de Adición con adición caliza, se llega, según el criterio dado en 1.3, a los resultados que se expresan en los Cuadros XI, XII y XIII.

C U A D R O X I

| Resultados de dosificación referidos a "mortero enriquecido" seco a 105°-110°C (Cemento de Adición con adición caliza) | | | | | | | |
|---|----|------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Incógnitas | P' | R' | C' | S' | X | Y | H |
| Intervalo de soluciones | 6 | 0,7 | 66,120 | 14,096 | 75,099 | 19,687 | 5,124 |
| | 20 | 3,0 | 54,534 | 11,614 | 74,235 | 24,076 | 1,689 |
| Valor medio del intervalo | 13 | 1,85 | 60,327 | 12,855 | 74,667 | 21,881 | 3,452 |

C U A D R O X I I

| Resultados de dosificación referidos a hormigón seco a 105°-110°C (Cemento de Adición con adición caliza) | | | | | | | |
|--|----|------|--------|--------|----------------|----------------|----------------|
| Incógnitas | P' | R' | C' | S' | X _h | Y _h | H _h |
| Valor medio del intervalo | 13 | 1,85 | 60,327 | 12,855 | 82,99 | 14,69 | 2,32 |

C U A D R O X I I I

| Resultados de dosificación referidos a hormigón empapado en agua (Cemento de Adición con adición caliza) | | | | | | | |
|---|----|------|--------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Incógnitas | P' | R' | C' | S' | X' _h | Y' _h | H' _h |
| Valor medio del intervalo | 13 | 1,85 | 60,327 | 12,855 | 77,95 | 13,80 | 8,25 |

Relaciones:

$$\frac{\text{Arido}}{\text{Cemento}} = 5,65 ;$$

$$\frac{\text{Agua de amasado}}{\text{Cemento}} = 0,598 .$$

2.3. Resultados obtenidos según el "Método Completo para el Análisis Químico del Hormigón Endurecido" del CEMBUREAU (Sep. 1970)

2.3.1. Descripción del método en sus partes esenciales

Siendo uno de los fines de este trabajo poner de relieve las diferencias de planteamiento entre los dos métodos que se estudian en esta descripción, se examinará únicamente el planteamiento del método del CEMBUREAU y aquellos puntos del procedimiento analítico que presentan interés para la correcta valoración de los resultados obtenidos.

2.3.1.1. *Determinación del agua de amasado (O W)*

Se calcula como suma de los porcentajes de agua combinada y de agua que rellena los poros accesibles, referidos ambos a hormigón seco a 105°-110°C.

2.3.1.1.1. *Equivalente en agua de la porosidad accesible total (W E)*

Se determina el peso de tetracloruro de carbono que rellena los poros accesibles, como diferencia de peso entre la muestra seca a 105°-110°C y la misma empapada en Cl_4C . A partir de ese peso y de las densidades del tetracloruro de carbono y del agua, se calcula el peso de agua que rellenaría los poros accesibles de 100 partes en peso de hormigón seco a 105°-110°C.

2.3.1.1.2. *Agua combinada (F W)*

Se calcula como diferencia entre la pérdida al fuego y el contenido de CO_2 del hormigón seco a 105°-110°C. Se supone que este agua corresponde a la combinada por el cemento anhidro en el proceso de hidratación.

Este método de cálculo lleva implícita la admisión de que el árido y el cemento anhidro no contienen agua combinada y de que en el proceso de hidratación no existió carbonatación de la cal liberada.

2.3.1.2. *Determinación de los porcentajes de árido, X_h , y de cemento anhidro, Y_h , en el hormigón total seco a 105°-110°C*

Los datos que se utilizan para los cálculos son: unos de determinación directa, otros de determinación indirecta y, finalmente, a otros se les asigna unos valores basados en hipótesis.

Datos de determinación directa:

Porcentajes de óxido cálcico, anhídrido silícico y residuo insoluble, C_h , S_h y R_h , respectivamente, del hormigón seco a 105°-110°C.

Porcentajes de los mismos componentes, C_a , S_a y R_a , en el árido medio extraído del hormigón.

Datos de determinación indirecta:

Porcentajes de óxido cálcico, C' , y anhídrido silícico, S' , en el cemento anhidro, calculados como se indica en 2.3.1.3.

Datos basados en hipótesis:

Se supone que el residuo insoluble del cemento anhidro, R' , la pérdida al fuego del árido medio, P_a , y la pérdida al fuego del cemento anhidro, P' , adoptan los siguientes valores:

$$\begin{aligned} R' &= 0 ; \\ P_a &= 0 ; \\ P' &= \frac{100}{101} . \end{aligned}$$

Además se admite que la pérdida al fuego surgida en la hidratación, H , coincide con el agua combinada del hormigón, $(F W)$.

2.3.1.2.1. Porcentaje de cemento anhidro Y_h en el hormigón seco a 105°-110°C

Se obtiene por 3 procedimientos en los cuales se utilizan implícitamente las tres ecuaciones fundamentales [1], [2] y [3] del apartado 1.1., estableciéndose las diversas hipótesis para salir de la indeterminación.

1.º Contenido en cemento según CaO

La fórmula [16] del método del Cembureau se obtiene mediante la resolución del sistema de ecuaciones:

$$C_h = X_h \frac{C_a}{100} + Y_h \frac{C'}{100} ;$$
$$R_h = X_h \frac{R_a}{100} + Y_h \frac{R'}{100} .$$

Hipótesis $R' = 0$.

2.º Contenido en cemento según SiO_2

La fórmula [17] del método del Cembureau se obtiene mediante la resolución del sistema de ecuaciones:

$$S_h = X_h \frac{S_a}{100} + Y_h \frac{S'}{100} ;$$
$$R_h = X_h \frac{R_a}{100} + Y_h \frac{R'}{100} .$$

Hipótesis $R' = 0$.

3.º Contenido en cemento según el residuo insoluble y la pérdida al fuego

La fórmula [20] del método del Cembureau se obtiene mediante la resolución del sistema de ecuaciones:

$$R_h = X_h \frac{R_a}{100} + Y_h \frac{R'}{100} ;$$
$$P_h = X_h \frac{P_a}{100} + Y_h \frac{P'}{100} + H ;$$
$$X_h + Y_h + H = 100 .$$

Estableciéndose las hipótesis: $R' = 0$, $P_a = 0$, $P' = \frac{100}{101}$.

2.3.1.2.2. Porcentaje de árido, X_h , en el hormigón seco a 105°-110°C

Se halla por 2 procedimientos.

1.º A partir del porcentaje de cemento anhidro, Y_h , obtenido

Sustituyendo en la ecuación

$$X_h + Y_h + H = 100$$

el valor más bajo de los dos de Y_h , obtenidos según CaO y según SiO_2 , se llega a la fórmula [21] del método del Cembureau.

Se establece la hipótesis: $H = F W$.

(H = pérdida al fuego surgida en la hidratación en el hormigón seco a 105°C; $F W$ = agua combinada en el hormigón seco a 105°C).

2.º A partir del residuo insoluble

La ecuación $R_h = X_h \frac{R_a}{100} + Y_h \frac{R'}{100}$, mediante la hipótesis de que $R' = 0$ da directamente la fórmula [18] del método del Cembureau.

2.3.1.3. Determinación de los porcentajes de óxido cálcico, C' , y de anhídrido silícico, S' , en el cemento anhidro

Los datos que se utilizan para el cálculo son: unos de determinación directa y otros son valores aproximados que se asignan a ciertos parámetros.

Datos de determinación directa:

Se extraen del hormigón los siguientes materiales:

- Una muestra de “mortero enriquecido” en cemento o fracción menor de 0,06 mm, procedente de la disgregación mecánica.
- Una muestra de árido comprendido entre 0,125 mm y 0,25 mm y al cual se considera representativo del árido contenido en el “mortero enriquecido”.

Se determinan por análisis:

Los porcentajes de óxido cálcico, anhídrido silícico, residuo insoluble y pérdida al fuego, C_{cf} , S_{cf} , R_{cf} , y P_{cf} , respectivamente, del “mortero enriquecido” o fracción cemento.

Los porcentajes de los mismos componentes (excepto pérdida al fuego), $C_{0,125}$, $S_{0,125}$ y $R_{0,125}$, del árido extraído del hormigón, y de tamaño comprendido entre 0,125 y 0,25 mm.

Datos basados en hipótesis:

Se supone, implícita o explícitamente, que el porcentaje de cemento anhidro en la “fracción cemento” ($< 0,06$), Y_{cf} , el residuo insoluble del cemento, R' , la pérdida al fuego del cemento anhidro, P' , y la pérdida al fuego del árido comprendido entre 0,125 mm y 0,25 mm, $P_{0,125}$, adoptan los siguientes valores:

$$Y_{cf} = 100, R' = 1, P' = 1, P_{0,125} = 0.$$

2.3.1.3.1. Cálculo del porcentaje de óxido cálcico C' en el cemento anhidro

Las fórmulas [11] y [12] del método del Cembureau, que sirven de base para el cálculo de C' , se deducen de la siguiente forma:

De la ecuación:

$$R_{cf} = X_{cf} \frac{R_{0,125}}{100} + Y_{cf} \frac{R'}{100};$$

con la hipótesis de que $Y_{cf} = 100$ y $R' = 1$, se deduce la fórmula [11].

La fórmula [12] se obtiene eliminando H_{cf} (pérdida al fuego surgida en hidratación) en el sistema:

$$X_{cf} + Y_{cf} + H_{cf} = 100 ;$$

$$P'_{cf} = X_{cf} \frac{P_{0,125}}{100} + Y_{cf} \frac{P'}{100} + H_{cf} ;$$

en la hipótesis de que $P_{0,125} = 0$; $Y_{cf} \frac{P'}{100} = 1$ (equivalente a $Y_{cf} = 100, P' = 1$).

En la ecuación resultante de esa eliminación se despeja $Y_{cf} = 100 - X_{cf} - P_{cf} + 1$, que se sustituye en la ecuación:

$$C_{cf} = X_{cf} \frac{C_{0,125}}{100} + Y_{cf} \frac{C'}{100} ;$$

y finalmente se despeja C' .

2.3.1.3.2. Cálculo del porcentaje de anhídrido silícico S' en el cemento anhidro

La fórmula [13] del método del Cembureau se obtiene en forma análoga a la [12], pero empleando la ecuación correspondiente al anhídrido silícico (S), en lugar de la del óxido cálcico (C).

2.3.2. Resultados

2.3.2.1. Agua de amasado ($O W$)

$$O W = W E + F W ; \quad W E = 6,46 \% ;$$

$$F W = 4,47 \% ;$$

$$O W = 6,46 + 4,47 = 10,93 \% .$$

$O W$ representa peso de agua capaz de empapar 100 partes en peso de hormigón seco a 105°C. Equivale a peso de agua libre en $100 + W E$ partes en peso de hormigón empapado.

2.3.2.2. Equivalente en agua de la porosidad accesible total ($W E$)

I) $m = 452,8$ g hormigón seco a 105°C; II) $m = 475,4$ g
 $a = 499,4$ g hormigón empapado en Cl_4C ; $a = 524,0$ g
 $\delta = 1,589$ g/cm³ (δ = densidad del Cl_4C).

$$W E = \frac{a - m}{\delta \cdot m} \cdot 100 \% .$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{I) } W E = 6,48 \% \\ \text{II) } W E = 6,44 \% \end{array} \right\} W E = 6,46 \% .$$

2.3.2.3. Agua combinada ($F W$)

$$P_h = L O I_{tot} = 24,55 \% ; \quad CO_{2 tot} = 20,08 ;$$

$$F W = L O I_{tot} - CO_{2 tot} = 24,55 - 20,08 = 4,47 \% .$$

$F W$ representa porcentaje de agua combinada contenido en el hormigón seco a 105°C. Equivale a peso de agua combinada en $100 + W E$ partes en peso de hormigón empapado (u hormigón fresco).

2.3.2.4. *Porcentajes de árido, X_h , y de cemento anhidro, Y_h , en el hormigón total seco a 105°-110°C.*

Los datos empleados para los cálculos se dan en el Cuadro XIV.

C U A D R O XIV

| Componentes | Datos de determinación directa | | Datos de determinación indirecta |
|--|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| | Hormigón total | Árido medio en el hormigón total (XI) | Cemento anhidro |
| Oxido cálcico | $C_h = 33,20$ | $C_a = 26,71$ | $C' = 67,77$ |
| Anhídrido silícico | $S_h = 2,89$ | $S_a = 0,06$ | $S' = 17,27$ |
| Insolubles | $R_h = 36,51$ | $R_a = 49,77$ | |
| PF o LOI | $P_h = 24,55$ | | |
| CO ₂ % | 20,08 | | |
| Agua combinada, % FW = $P_h - CO_2$ % | 4,47 | | |

(XI) Media proporcional entre las fracciones limpias, del árido mayor de 0,25 mm y del comprendido entre 0,25 mm y 0,125 mm.

2.3.2.4.1. *Porcentaje de cemento anhidro, Y_h*

Los 3 porcentajes de cemento anhidro, calculados según los componentes CaO, SiO₂ e INS—LOI, se dan en el Cuadro XV. Los porcentajes se calcularon mediante las fórmulas [16], [17] y [20] del método del Cembureau. Estas fórmulas pueden expresarse con la nomenclatura del Cuadro XIV, de la siguiente forma:

$$(Y_h)_{CaO} = \frac{C_h R_a - R_h C_a}{R_a C'}$$

equivalente a reunir en una sola fórmula las [14] y [16] del Cembureau.

$$(Y_h)_{SiO_2} = \frac{S_h R_a - R_h S_a}{R_a S'}$$

equivalente a reunir en una sola fórmula las [15] y [17] del Cembureau.

$$(Y_h)_{INS} = \frac{101}{100} \left(100 - \frac{R_h}{R_a} \times 100 - P_h \right)$$

equivalente a reunir en una sola fórmula las [18], [19] y [20] del Cembureau.

C U A D R O XV

| Componente "guía" | CaO | SiO ₂ | INS — LOI |
|--|-----------------------|-------------------------|----------------------|
| Porcentaje de cemento sobre hormigón seco a 105°C. | $(Y_h)_{CaO} = 20,08$ | $(Y_h)_{SiO_2} = 16,44$ | $(Y_h)_{INS} = 2,07$ |

2.3.2.4.2. Porcentaje de árido, X_h

Los dos porcentajes de árido, calculados según las fórmulas [21] y [18] del método del Cembureau son, respectivamente:

$$(X_h)_{SiO_2} = 100 - (Y_h)_{SiO_2} - F W = 79,09;$$

$$(X_h)_{INS} = \frac{R_h}{R_a} \times 100 = \frac{36,51}{49,77} \times 100 = 73,36.$$

2.3.2.5. Relaciones Arido/cemento y Agua/cemento

Arido/cemento:

$$\text{Según fórmula [22]: } \frac{A}{C} = \frac{(Arido)_{max}}{(Cemento)_{SiO_2}} = \frac{79,09}{16,44} = 4,81.$$

$$\text{Según fórmula [23]: } \frac{A}{C} = \frac{(Arido)_{INS}}{(Cemento)_{INS}} = \frac{73,36}{2,07} = 35,44.$$

Agua de amasado/cemento:

$$\text{Según fórmula [24]: } \frac{O W}{(Cemento)_{SiO_2}} = \frac{10,93}{16,44} = 0,66.$$

$$\text{Según fórmula [25]: } \frac{O W}{(Cemento)_{INS}} = \frac{10,93}{2,07} = 5,28.$$

2.3.2.6. Porcentajes de óxido cálcico, C' y de anhídrido silícico, S' , en el cemento anhidro

Los datos empleados para los cálculos se dan en el Cuadro XVI. Fueron obtenidos por análisis químico y son porcentajes referidos a muestras secas a 105°C.

C U A D R O XVI

| Componentes | "Mortero enriquecido" o fracción cemento (< 0,06 mm) | 0,125 mm < Arido extraído < 0,25 mm |
|--------------------|--|-------------------------------------|
| Oxido cálcico | $C_{cf} = 49,93$ | $C_{0,125} = 0,21$ |
| Anhídrido silícico | $S_{cf} = 12,73$ | $S_{0,125} = 0,06$ |
| Insolubles | $R_{cf} = 11,38$ | $R_{0,125} = 97,06$ |
| PF o LOI | $P_{cf} = 16,67$ | |

Los valores de C' y S' calculados mediante las fórmulas [12] y [13] del método del Cembureau son:

$$C' = 67,77 \quad ; \quad S' = 17,27.$$

Las fórmulas [12] y [13] pueden expresarse con la nomenclatura del Cuadro XVI, de la siguiente forma:

$$C' = \frac{100 [C_{cf} R_{0,125} - C_{0,125} R_{cf} + C_{0,125}]}{R_{0,125} (101 - P_{cf}) + 100 (1 - R_{cf})}$$

$$S' = \frac{100 [S_{cf} R_{0,125} - S_{0,125} R_{cf} + S_{0,125}]}{R_{0,125} (101 - P_{cf}) + 100 (1 - R_{cf})}$$

obtenidas reuniendo en una sola fórmula las [11] y [12] para C' y las [11] y [13] para S' .

2.3.2.7. Composición del hormigón, empapado en agua, en %

Como se indicó en el apartado 2.2.4, para poder comparar los resultados obtenidos por este método de análisis y cálculo, con los datos del hormigón fresco o dosificación "verdadera", es preciso referir los resultados a hormigón empapado en agua.

Si se eligen como soluciones finales, según se recomienda en el método, los correspondientes al porcentaje de árido máximo y al % (Cemento)_{SiO₂ ó CaO} mínimo, 100 partes en peso de hormigón seco a 105°C contendrán:

| | |
|--------------------------|--------|
| Arido, % | 79,09 |
| Cemento anhidro, % | 16,44 |
| Agua combinada $F W$, % | 4,47 |
| | 100,00 |

Como estas 100 partes de hormigón son capaces de ser empapadas por $W E = 6,46$ partes de agua, la composición del hormigón empapado (equivalente al hormigón fresco), será:

| | |
|----------------------------|----------|
| Arido | 79,09 g |
| Cemento anhidro | 16,44 " |
| Agua combinada | 4,47 " |
| Agua que rellena los poros | 6,46 " |
| | 106,46 g |

Refiriendo las anteriores cifras a 100 se obtienen los valores dados en el Cuadro XVII, que son directamente comparables a los datos "verdaderos" del hormigón fresco, dados en 2.1 y a los expresados en los Cuadros X y XIII. Por H'_h se designa el porcentaje de agua de

amasado. X'_h e Y'_h son, respectivamente, los porcentajes de árido y cemento anhidro en el hormigón empapado.

C U A D R O XVII

| Resultados de dosificación referidos a hormigón empapado en agua (Método del Cembureau) | | | | | |
|--|-------|-------|--------|--------|--------|
| Incógnitas | C' | S' | X'_h | Y'_h | H'_h |
| Valor medio del intervalo | 67,77 | 17,27 | 74,291 | 15,442 | 10,267 |

2.4. Comparación de los resultados obtenidos según el método de dosificación con aplicación de computadores digitales y los hallados por el método del Cembureau con los datos "verdaderos" del hormigón fresco

En el Cuadro XVIII se dan los resultados obtenidos mediante la aplicación del nuevo método y los resultados correspondientes al método del Cembureau frente a los valores "verdaderos", se establecen las diferencias y se calculan los errores relativos de cada incógnita.

De la observación del Cuadro XVIII se deduce que los errores relativos de la dosificación de cemento, de árido y de agua de amasado, determinados según el método del computador, se mantienen siempre inferiores a los obtenidos según el método del Cembureau.

Destacan, por su pequeña magnitud (errores relativos inferiores al 2,5 %), los errores de las dosificaciones de cemento, árido y agua de amasado, obtenidos según el método del computador, en el caso de no disponer de otras indicaciones, para determinar el tipo de conglomerante, que las deducidas de los análisis y cálculos.

En cuanto a la composición del cemento anhidro, si bien el porcentaje de óxido cálcico en el mismo, C' , se determinó por el nuevo método, con error inferior al del Cembureau (error del orden del 5 %), el error correspondiente al contenido de sílice en el cemento fue algo elevado y superior al hallado según el método del Cembureau.

La razón del mayor error relativo (por defecto) del porcentaje de sílice, S' , según el método del computador, fue el alto contenido de sílice soluble encontrado en el árido medio extraído, que a su vez se debió al suave lavado de este árido con ácido clorhídrico (1:10) en frío. Este lavado no eliminó totalmente la sílice del cemento depositada sobre el árido. Sin embargo, un lavado más enérgico hubiese disuelto una excesiva proporción del árido calizo contenido en el árido medio del "mortero enriquecido" (fracción menor de 6,68 mm).

Por el contrario, en el método del Cembureau, la fracción cemento o "mortero enriquecido" (fracción menor de 0,06 mm) por su menor tamaño de grano contiene una proporción escasa o nula de árido calizo, de forma que el árido considerado como representativo del contenido en la "fracción cemento" $\frac{(\text{árido} > 0,125 \text{ mm})}{< 0,25 \text{ mm}}$ pudo soportar un lavado con ácido clorhídrico (1:5) caliente, sin que se alterase sustancialmente su composición.

Finalmente, de la comparación de los resultados de sílice soluble encontrados por análisis, especialmente de los que se refieren al análisis de la arena original, realizado según el método del computador (Cuadro V), y el análisis del árido extraído de tamaño comprendido entre 0,25 y 0,125 mm, efectuado según el método del Cembureau (Cuadro XVI), parece deducirse que atacando la muestra según este último método se disuelve menos sílice que efectuando el ataque según el procedimiento del computador.

C U A D R O XVIII

| Método | Conceptos | Dosificación cemento Y _h | Dosificación árido X _h | Agua de amasado H _h | SiO ₂ en cemento C' | CaO en cemento, C' |
|---|----------------------|--|---|---|--|---|
| Computador (Cemento portland) | Valor encontrado | 12,305 | 78,011 | 9,684 | 14,291 | 67,060 |
| | Valor "verdadero" | 13,476 | 78,463 | 8,061 | 18,900 | 63,700 |
| | Diferencia | - 1,171 | - 0,452 | + 1,623 | - 4,609 | + 3,360 |
| | Error relativo % | $\frac{-1,171 \times 100}{13,476} = -8,689$ | $\frac{-0,452 \times 100}{78,463} = -0,576$ | $\frac{+1,623 \times 100}{8,061} = +20,134$ | $\frac{-4,609 \times 100}{18,900} = -24,386$ | $\frac{+3,360 \times 100}{63,700} = +5,27$ |
| Computador (Cemento de adición (con adición caliza) | Valor encontrado | 13,800 | 77,950 | 8,250 | 12,855 | 60,327 |
| | Valor "verdadero" | 13,476 | 78,463 | 8,061 | 18,900 | 63,700 |
| | Diferencia | + 0,324 | - 0,513 | + 0,189 | - 6,045 | - 3,373 |
| | Error relativo % | $\frac{+0,324 \times 100}{13,476} = +2,40$ | $\frac{-0,513 \times 100}{78,463} = -0,65$ | $\frac{+0,189 \times 100}{8,061} = +2,34$ | $\frac{-6,045 \times 100}{18,900} = -31,984$ | $\frac{-3,373 \times 100}{63,700} = -5,295$ |
| Cembureau | Valor encontrado | 15,442 | 74,291 | 10,267 | 17,270 | 67,770 |
| | Valor "verdadero" | 13,476 | 78,463 | 8,061 | 18,900 | 63,700 |
| | Diferencia | + 1,966 | - 4,172 | + 2,206 | - 1,630 | + 4,070 |
| | Error relativo % | $\frac{+1,966 \times 100}{13,476} = +14,589$ | $\frac{-4,172 \times 100}{78,463} = -5,317$ | $\frac{+2,206 \times 100}{8,061} = +27,366$ | $\frac{-1,630 \times 100}{18,900} = -8,624$ | $\frac{+4,070 \times 100}{63,700} = +6,389$ |

Sin embargo, es de destacar que el método de análisis empleado en el nuevo procedimiento de dosificación, lo fue por su sencillez y rapidez de aplicación, no siendo parte esencial del método ya que éste puede emplearse utilizando cualquiera de los métodos de análisis existentes para atacar la muestra disolviendo la sílice del cemento y dejando en el residuo insoluble la sílice procedente del árido. Lo esencial del nuevo método no es precisamente el procedimiento de análisis sino el planteamiento, libre de hipótesis a priori, y el efectuar la disgregación mecánica y separación del árido, sin tratamiento térmico previo que alteraría la composición, al variar la pérdida al fuego, del “mortero enriquecido” y del árido extraído.

3. CONCLUSIONES

Del estudio teórico del método propuesto así como de los resultados obtenidos con su aplicación a este caso y a otros casos presentados en el trabajo de Tesis original (I), pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- 1.º) El nuevo método de dosificación con aplicación de computadores digitales es un procedimiento libre de hipótesis a priori y con validez general que puede aplicarse directamente, sin cambios, a cualquier conglomerado, independientemente del tipo de cemento o la clase de áridos empleados.
- 2.º) Al mismo tiempo que la dosificación de cemento se obtiene la dosificación de árido, la composición química del cemento anhidro y el grado de hidratación alcanzado por el cemento. Las incógnitas no se consideran en forma aislada sino como un conjunto cuyas partes han de armonizar entre sí.
- 3.º) El método puede utilizarse aunque no se disponga de calculador electrónico. En efecto, se ha demostrado que las relaciones C'/S' , C'/A' , C'/F' y standard de cal de Kühl se mantienen prácticamente constantes en todo el ámbito de soluciones que cubre los diversos conglomerantes posibles, desde el cemento aluminoso al cemento de Adición con adición caliza. Se puede, en consecuencia, determinar el valor de las anteriores relaciones para una pareja cualquiera, P' , R' , dentro del ámbito de soluciones y a partir de esos valores fijar el tipo de cemento. Una vez establecido éste, se asignan los valores de P' y R' en los extremos del intervalo final de soluciones, y mediante las fórmulas [4], [5], [6], [7], [10], [11] y [12], del apartado 1.1, se calculan los valores de las incógnitas en los extremos del intervalo. Se toma como solución final para cada incógnita el valor medio del intervalo.
- 4.º) La aplicación del método exige, como condición primordial, el conocimiento de la composición media del árido contenido en el conglomerado mismo o bien en un “mortero enriquecido” extraído de él. La exactitud de los resultados obtenidos es tanto mayor cuanto más exacto sea este conocimiento.
- 5.º) La disgregación mecánica del conglomerado para la extracción del árido y del “mortero enriquecido” debe efectuarse sin tratamiento térmico previo que alteraría su composición original, por variar la pérdida al fuego al escapar la mayor parte del agua combinada.
- 6.º) En el caso con validez general afrontado existen dos grados de indeterminación, dos variables independientes. No es necesario, ni conveniente, asignar valores fijos a estas variables, por cuanto un aumento en la exactitud del valor asignado a las mis-

mas conduce a una acumulación de errores en las restantes incógnitas. El método muestra cuál es, elegida la pérdida al fuego del cemento anhidro, P' , como una de las variables independientes, la otra variable independiente más conveniente, por influir menos sus variaciones en la dosificación de cemento. El residuo insoluble del cemento, R' , resultó ser el componente más conveniente para conglomerados fabricados con áridos altos en residuo insoluble y aún con áridos conteniendo hasta un 50 % de caliza soluble.

- 7.º) De los estudios y análisis efectuados en el trabajo de Tesis original (I) ha podido establecerse que el grado de dificultad o posibilidades de error en la aplicación de este método aumenta, como era lógico esperar, con la solubilidad del árido. El ejemplo dado en este trabajo muestra que, aún en el caso más desfavorable, los resultados son buenos.
- 8.º) Cuando el árido contiene sílice soluble, según el método de disolución de la muestra utilizado (NEL 5.01-a), existe la posibilidad de mejorar los resultados, a costa de una mayor complicación y lentitud de los análisis, realizando la disolución de la muestra en frío, según el método de análisis propuesto por el Cembureau.