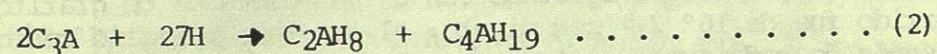
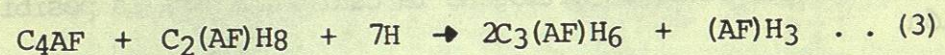


máxima concentración alrededor de 15 min. Tanto el C_3A como el C_4AF han reaccionado en forma considerable hasta este tiempo, pero el C_4AH_{19} no es detectable. Aparece, sin embargo, después de una hora, con muy baja cristalinidad. Las crestas de difracción de rayos "X" (DFR) del C_4AH_{19} se reducen gradualmente con el tiempo, indicando un aumento gradual en la cristalinidad. Es posible, entonces, que esté presente como una fase amorfa a una edad más temprana. Las reacciones iniciales de hidratación pueden ser por lo tanto:



Los hallazgos de muchos investigadores (31) de que el C_3A se hidrata inicialmente más rápidamente que el C_4AF se confirman en el presente estudio. La subsecuente reacción del C_2AH_8 parece ser principalmente con el C_4AF , siendo el producto $C_3(AF)H_6$. Esto puede ser:



El efecto de diluir los aluminatos mediante la incorporación del 30% material inerte (cuarzo molido) se muestra en la Fig. 2. La velocidad de la reacción es más baja en comparación con el material sin diluir. La Fig. 3 muestra que el 30% de la sustitución por CPP resulta en un retardo mucho más marcado de la reacción inicial. Mucho menos C_2AH_8 se produce y las crestas de difracción desaparecen significativamente más rápidamente. A diferencia de las dos hidrataciones previas, la etringita ($C_3A \cdot 3\bar{C}S \cdot 31H$) fue detectada después de poco menos de 2 minutos, alcanzando un máximo después de los 11 minutos. Después de 20 min. la etringita ya no fue detectable pero se identificó el monosulfato ($C_3A \cdot \bar{C}S \cdot 12H$). El espaciamiento básico del monosulfato (8.9 Å) se redujo subsecuentemente a 8.2 Å. La consideración de esto, y otras crestas en las trazas dejadas por el DRX conducen a la identificación de C_4AH_{13} . En vista de las precauciones tomadas para excluir el dióxido de carbono, es improbable que este compuesto contenga "carbonato esencial". Sin embargo, es posible que pueda contener "sulfato esencial", esto es muy parecido a una solución sólida, como la descrita por varios investigadores (31).

Es bien sabido que el yeso retarda la hidratación del C_3A y C_4AF mediante la formación de una capa de etringita (27, 32). Desde que algunos estudios de la liberación de iones de las soluciones de CPP tanto alcalinas como neutras (33, 34). Han mostrado que el sulfato y el calcio son liberados en una etapa muy temprana (dentro de uno a dos min.), en suficiente cantidad para formar una solución saturada con respecto al yeso; se pensó que el mecanismo de retardo de la hidratación de los aluminatos, podría ser similar a la manera en la cual el yeso controla el proceso de hidratación. Los experimentos llevados a cabo sustituyendo CPP por concentraciones de sulfatos equivalentes proporcionados por el yeso reportados en otros lugares (35), han mostrado que el retardo con yeso, no ocurre en la misma amplitud que con la adición de CPP-sólida, aun cuando se provea el yeso sólido suficiente para completar en solución el calcio

Y el sulfato. Esto muestra claramente que la CPP es un agente retardante más efectivo que el yeso. El por que de esto, será discutido mas tarde en conjunto con los hallazgos relacionados con las propiedades físicas del concreto de CPP.

RESISTENCIA A CORTO Y LARGO PLAZO DE CONCRETOS CON CPP

La resistencia temprana del concreto es una propiedad muy importante, especialmente desde el punto de vista económico y en la facilidad de los procedimientos de construcción. La resistencia a los 3 días, escogida como la resistencia temprana de las revolturas usadas en este estudio, se presentan en la Fig. 4. Por conveniencia las resistencias se expresan como un porcentaje de las de control de concreto con cemento portland, como una función del porcentaje del cemento substituído. Puede observarse que cada CPP resulta en una relación diferente de resistencia - sustitución. La cenizas de la tolva resultaron con resistencias tempranas mayores para distintos porcentajes de sustitución, mientras que la CPP-2 condicionada resultó con menores resistencias tempranas, aun para el 15% de sustitución.

Las resistencias a largo plazo se muestran en las Figs. 5 a), b), c) y d). Se puede observar que para substituciones de cenizas de la tolva hasta un 30% resultaron en aumentos considerables en la resistencia a 91 días. Las substituciones del orden del 45% dió como resultado en todos los casos menores resistencias a largo plazo. La CPP 2 mostró el comportamiento más pobre a la resistencia a corto y largo plazo.

Se han hecho intentos para relacionar el comportamiento a la resistencia con las propiedades intrínsecas de las CPP usadas pero no han resultado exitosos. Por ejemplo, los valores de la superficie específica muestran que la CPP-2 debería dar los mejores resultados en términos de los requisitos de las especificaciones (6), pero en la realidad la CPP con la menor superficie específica da los mejores resultados. En algunos países aceptan el uso de un porcentaje arbitrario de material retenido en la malla de 45 μ arriba del cual una CPP no sería aceptable, aquí de nuevo observando los resultados de la distribución de los tamaños de las partículas, se puede asegurar que no hay relación entre el tamaño y la resistencia.

MECANISMO POR MEDIO DEL CUAL LA CPP INFLUYE EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO

De los resultados de esta investigación y de los datos de otros investigadores, es aparente para los autores de este trabajo, que el mecanismo mediante el cual la CPP influye en las propiedades ingenieriles del concreto es un doble mecanismo empalmado:

- Un efecto predominantemente físico el cual consiste en una reducción de la demanda de agua sin disminución de la manejabilidad de la revoltura y permitiendo un mejor acomodo de los productos de hidratación y de las partículas no hidratadas.

Durante la producción de las revolturas para este estudio se observó que para la misma relación agua/cemento se incrementaban los valores del revenimiento al incrementarse las substituciones de cemento por CPP. Aun reconociendo que los ensayos de revenimiento son demasiado burdos para medir la manejabilidad, no obstante este ensayo da una indicación de los efectos de la CPP en la demanda de agua. Otros autores han reportado consistentemente muy bajos valores de permeabilidad para los concretos con CPP, esto tiende a confirmar la idea de un mejoramiento en las propiedades de acomodo de las revolturas de concreto con CPP.

La Figura 6 muestra esquemáticamente la probabilidad del comportamiento de las CPP. Considerando que hay un límite máximo práctico de substitución como lo indica la línea discontinua vertical, una CPP en particular probablemente mostrará una de las trazas indicadas, dependiendo si la superficie específica es relativamente baja, intermedia o alta y/o si la forma de las partículas es 100% redondeadas y tersas o si hay una cantidad significativa de partículas gruesas irregulares y si estas son porosas.

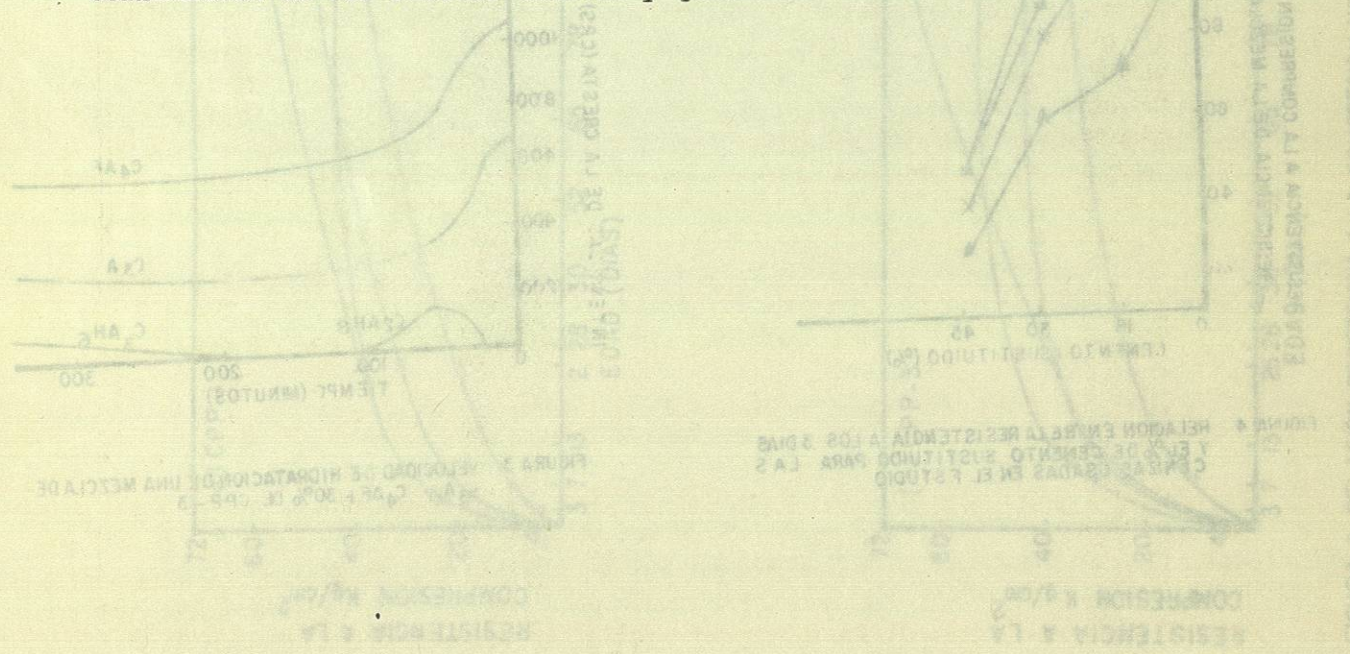
b) Un efecto químico doble el cual consiste de:

- 1) Un retardo en la hidratación del C₃A y del C₄AF. La consecuencia benéfica inmediata es una disminución en el calor de hidratación, pero más importante es el retardo en la hidratación de los aluminatos, produciendo como contra-efecto la posibilidad de incrementar el volumen de los silicatos de calcio, los cuales indubitablemente darán como resultado un aumento en la resistencia a largo plazo. Una evidencia para esta proposición ha sido presentada por Jelenic y otros (36). Ellos estudiaron el efecto del yeso en la hidratación y resistencia de varios cementos portland y mostraron que incrementando los porcentajes de SO₃ había una disminución en los hidratos de aluminato y un incremento correspondiente en los hidratos de silicato. Ellos mostraron, además, que existe un porcentaje óptimo de SO₃ para un incremento máximo de resistencia;
- 2) Una reacción puzolánica propia entre la sílica y la alúmina soluble de la CPP y el hidróxido de calcio producido por la hidratación del cemento. Como fue indicado en la revisión de los mecanismos de la reacción, los investigadores no están de acuerdo en el tiempo al cual la reacción puzolánica puede detectarse.

Durante esta investigación el uso limitado de un MEB (JEOL-35) permitió un estudio de la morfología de los productos de la reacción a corto y largo plazo. La Figura 7 muestra evidencia de la formación de los productos de la reacción en la interfase de los cementos con CPP y la Figura 8 muestra compuestos probablemente cristalinos. La edad del espécimen era de solamente 3 días, así, parece que los productos de la reacción puzolánica pueden formarse con anterioridad a lo reportado por otros investigadores. Hay alguna evidencia para una reacción puzolánica temprana de acuerdo a experimentos que se encuentran en proceso. Esto

demuestra una reducción a 3 días en la cantidad de Ca(OH)₂, presente en las pastas de cemento con la CPP, comparada con las de control que no la tienen. Las Figuras 9 y 10 corresponden a especímenes con hidratación a largo plazo. Se puede ver claramente que los productos de la reacción tienen una morfología similar a los silicatos de calcio del Tipo I (Figura 8) y a los silicatos de calcio del Tipo III (Figura 9) (39).

Se han hecho algunos intentos para relacionar el desarrollo de la resistencia con la estructura de los productos de la reacción del cemento portland. Por ejemplo, Feldman y Beaudoin (37) estudiaron la porosidad y el tipo de partícula en relación con el desarrollo de la resistencia. Ellos indicaron que para cualquier porosidad dada hay una mezcla óptima de tipos de partículas; por ejemplo, para una misma porosidad. La resistencia promedio de un material compuesto de partículas depende de la resistencia intrínseca de las partículas cristalinas densas y gruesas y las propiedades para mejorar la adherencia del material amorfo muy fino y de baja densidad. Sus resultados incluyen una pasta de cemento con CPP la cual al compararla con una pasta de cemento solo mostró una mayor resistencia a la misma porosidad. Ellos creyeron que la mezcla óptima de tipos de partículas fue probablemente aquella correspondiente a la pasta de cemento con CPP. Taylor (38), en una reciente revisión de los mecanismos y productos de hidratación del cemento, ha destacado el hecho de que el desarrollo de la resistencia de los cementos mezclados puede no explicarse a la reactividad química de la CPP solamente sino también al efecto que sobre la microestructura tienen las partículas que no han reaccionado. Esto tiende a apoyar la idea propuesta por los autores de este trabajo en relación al mecanismo del cual es una combinación de los efectos físicos y químicos.



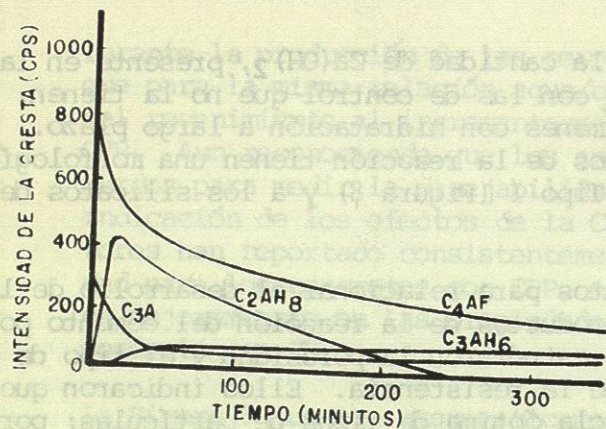


FIGURA 1 RELACION HIDRATACION-TIEMPO PARA $C_3A + C_4AF$

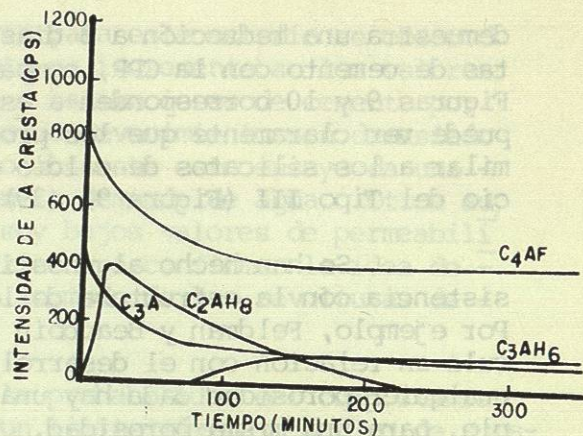


FIGURA 2 VELOCIDAD DE HIDRATACION DE LA MEZCLA DE $C_3A + C_4AF$ 30% DE CUARZO MOLIDO

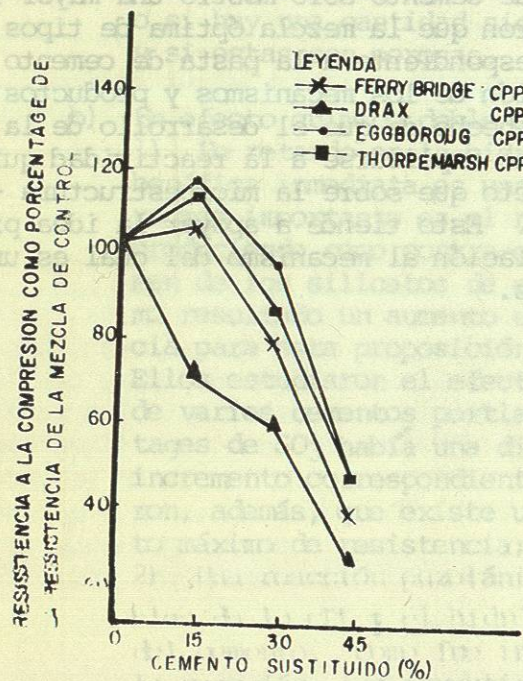


FIGURA 4 RELACION ENTRE LA RESISTENCIA A LOS 3 DIAS Y EL % DE CEMENTO SUSTITUIDO PARA LAS CENIZAS USADAS EN EL ESTUDIO

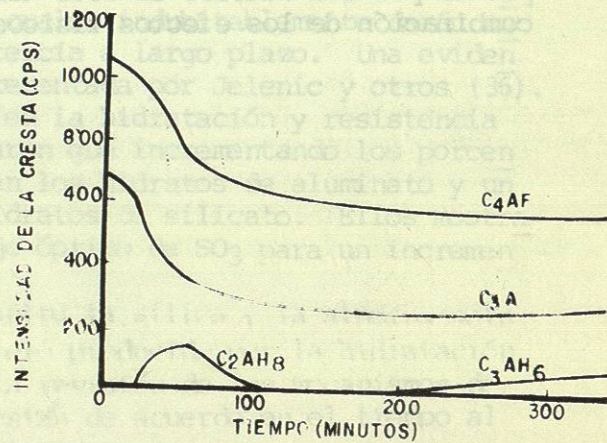


FIGURA 3 VELOCIDAD DE HIDRATACION DE UNA MEZCLA DE $C_3A + C_4AF$ 30% DE CPP-3

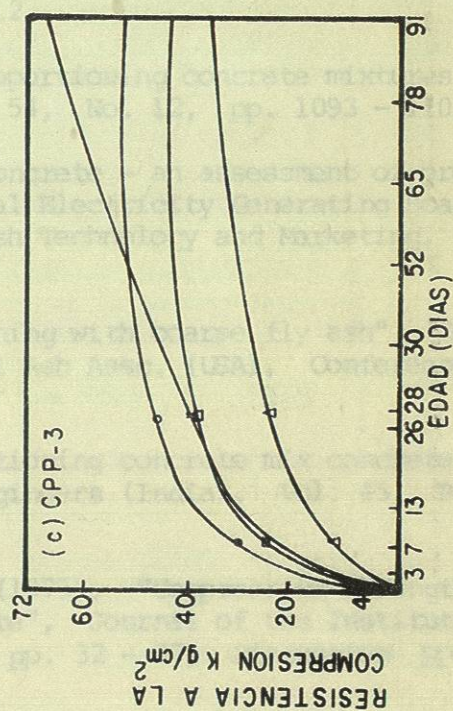
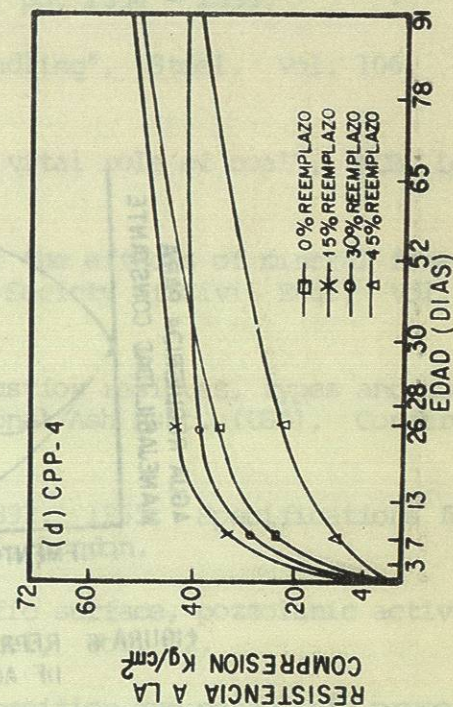
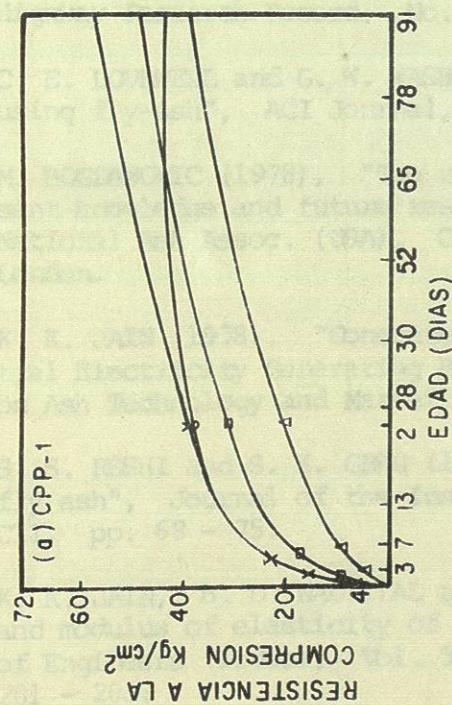
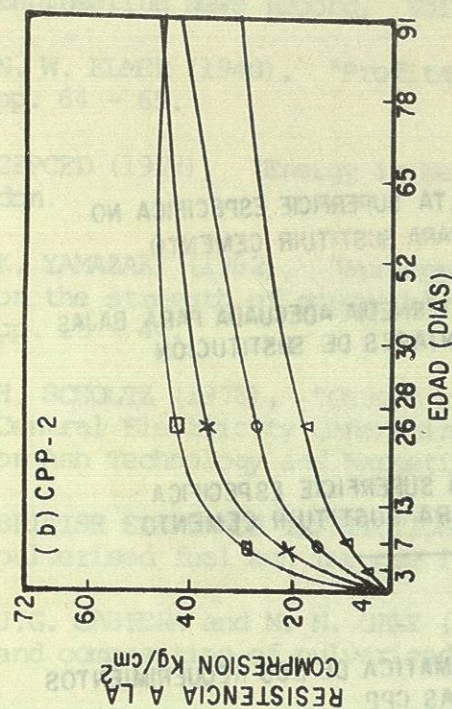


FIGURA 5 RELACION RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA CON LA EDAD PARA (a)CPP-1, (b)CPP-2, (c)CPP-3, (d)CPP-4

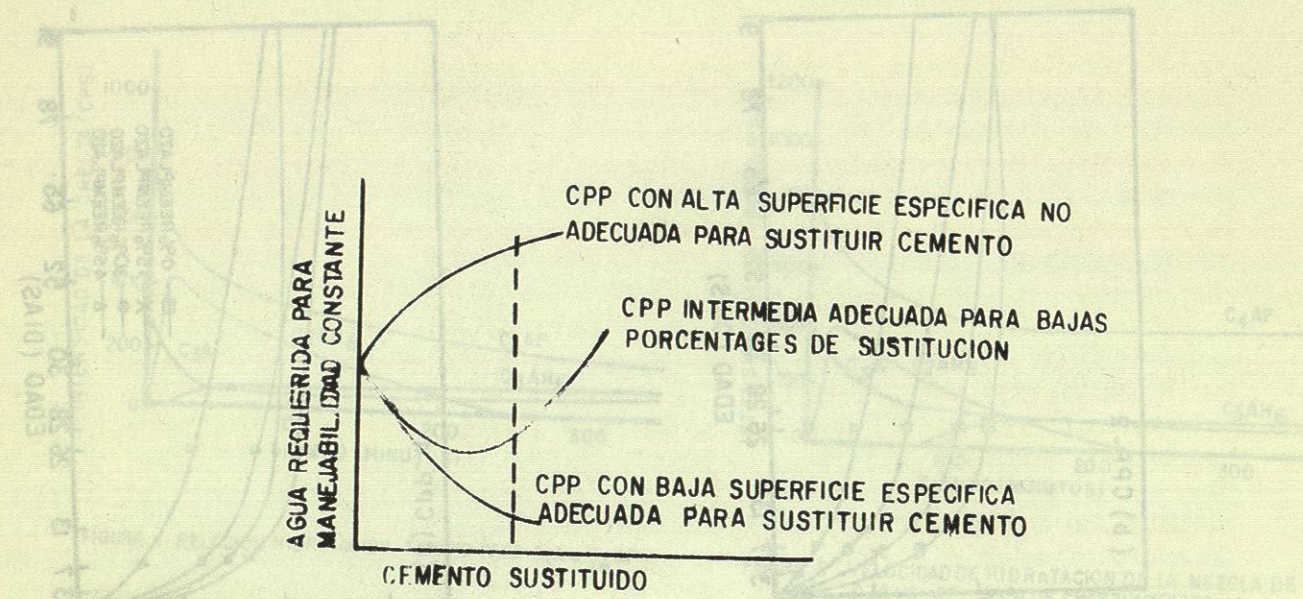
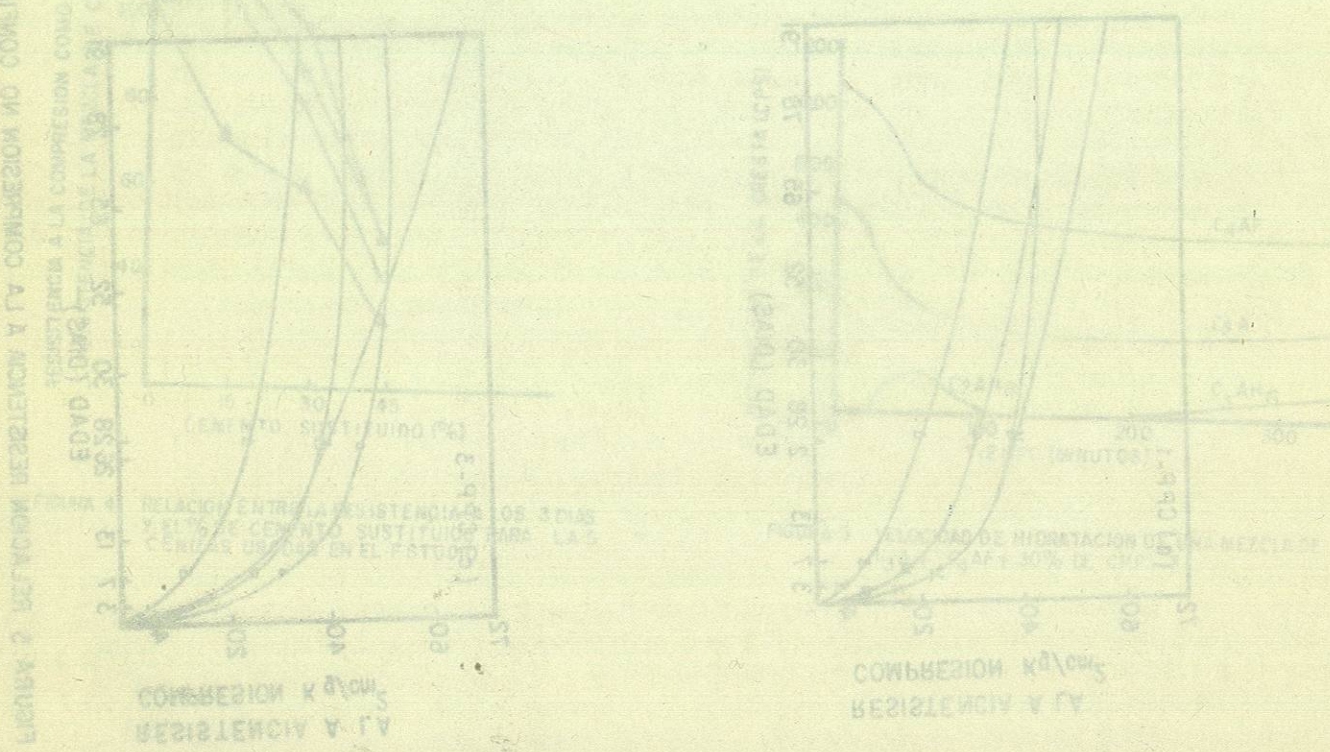


FIGURA 6 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA DISTINTAS CPP



REFERENCIAS

1. ANONYMOUS (1914), "An investigation of the pozzolanic nature in coal ash", Engineering News Record, Vol. 71, No. 24, pp. 1334 - 1335.
2. N. W. ELMER (1940), "Profitable fly-ash handling", Steel, Vol. 106, -- pp. 64 - 65.
3. CEPCED (1978), "Energy in Western Europe - vital role of coal", NCB, London.
4. K. YAMAZAKI (1962), "Fundamental studies of the effects of mineral fines on the strength of concrete", Trans. Japan Society of Civil Eng., Vol. 85, pp. 15 - 44.
5. H. SCHOLTZ (1978), "German black coal combustion residues, types and uses", Central Electricity Generating Board, National Ash Assc. (USA), Conference on Ash Technology and Marketing, London.
6. BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1965), BS 3892: 1965, Specifications for pulverised fuel ash for use in concrete, BSI, London.
7. J.G. CABRERA and M. N. GRAY (1973), "Specific surface, pozzolanic activity and composition of pulverised fuel ash", Fuel, Vol. 52.
8. J.D. WAIT and D.J. THORNE (1966), "The composition and pozzolanic properties of pulverised fuel ash", Journal of Applied Chemistry, Vol. 15, pp. 585 - 604 and Vol. 16, pp. 33 - 39.
9. F. E. LEGG (1965), "Experimental fly ash concrete pavement in Michigan", Highway Research Record, No. 73, pp. 1 - 12.
10. C. E. LOVEWELL and G. W. WASHA (1958), "Proportioning concrete mixtures -- using fly-ash", ACI Journal, Proc., Vol. 54, No. 12, pp. 1093 - 1102.
11. M. BOGDANOVIC (1978), "The use of PFA in concrete - an assessment of present knowledge and future research", Central Electricity Generating Board, National Ash Assc. (USA), Conference on Ash Technology and Marketing, -- London.
12. K. K. JAIN (1978), "Concrete mix proportioning with coarse fly ash", Central Electricity Generating Board, National Ash Assc. (USA), Conference on Ash Technology and Marketing, London.
13. S. S. RESHI and S. K. GRAG (1964), "Proportioning concrete mix concrete -- fly ash", Journal of the Institution of Engineers (India), Vol. 45, Part CII, pp. 68 - 75.
14. K. K. JAIN, B. D. NAUTIYAL and O. P. JAIN (1975), "Compressive strength - and modulus of elasticity of fly ash concrete", Journal of the Institution of Engineers (India), Vol. 56, Part CII, pp. 32 - 37, Discussion pp. 201 - 203.
15. W. RYAN (1976), "Fly ash utilization and research in Australia", Proc., - Fourth International Fly Ash Utilization Symposium.