

# Caracterización de un Cemento Puzolánico

Hugo Rincón, Ernesto Mora y Yolanda de Bravo\*  
Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia

## SUMARIO

Se caracterizaron las materias primas (caliza, yeso y material puzolánico) para la producción del cemento Portland y el clinker obtenido en este proceso, por medio del análisis químico elemental y espectroscopía infrarroja. Se estudió el comportamiento al IR y a la compresión de morteros elaborados a partir de cemento testigo y variaciones de material puzolánico (15, 35, 50 y 60%). El cálculo de la composición potencial de las fases presentes en el clinker, al igual que el análisis por IR muestran un predominio de la fase  $C_3S$  (56.09%), característica que concuerda con la naturaleza de las materias primas. El estudio por IR de los diferentes morteros de ensayo mostró el predominio de la forma amorfa en relación directa con el contenido de puzolana en éstos. La resistencia a la compresión presenta finalmente un descenso en relación con el aumento de material puzolánico.

## ABSTRACT

The materials used (lime, gypsum and puzzolanic material) in the production of Portland cement and clinker were characterized by elemental chemical analysis and infrared absorption spectroscopy. The mortar elaborated with standard cement and puzzolanic material (15, 25, 35, 50 y 60%) were studied by IR and compression resistance. The potential composition of the phases of the clinker were calculated and the IR spectra showed that the predominant phase was  $C_3S$  (56.09%) which agrees with the material used in the process. The IR study of each mortar showed that the predominant form was the amorphous one in a direct relation with the content of puzzolana. The compression resistance finally presents a decrease in relation with the increase of puzzolanic materials.

## INTRODUCCION

Las propiedades físicas y fisicoquímicas de los diferentes clinker dependen de la proporción de las fases silicato tricálcico ( $3CaO.SiO_2$ ), silicato dicálcico ( $2CaO.SiO_2$ ), aluminato tricálcico ( $3CaO.Al_2O_3$ ) y ferrito aluminato tetracálcico ( $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ), principalmente, que los caracterizan, y cuya nomenclatura es  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ , respectivamente.

Las propiedades hidráulicas de los cementos se incrementan cuando se agregan sustancias tales como material puzolánico al clinker. Además, con ciertas concentraciones de dichas sustancias, se logra establecer una determinada resistencia a la compresión de los cementos. Lo anterior trae como beneficio un ahorro en el consumo de energía para la producción de cemento.

El presente estudio tiene por objeto medir el efecto sobre la resistencia a la compresión de un clinker caracterizado mediante adiciones de material puzolánico.

## PARTE EXPERIMENTAL

Los espectros infrarrojos fueron registrados en un espectrofotómetro Perkin Elmer, modelo 521.

La resistencia a la compresión se determinó a probetas de morteros elaborados a partir de un cemento testigo (95% de clinker y 5% de yeso) y sucesivas adiciones de material puzolánico en porcentajes de 15,25,35,50 y 60%, utilizando como árido arena extraída de la región del Guamo-Tolima (arena Guamo). La resistencia se midió en kg/cubo y luego se convirtió en  $\text{kg/cm}^2$ .

El tiempo de curado fue de 1, 3, 7 y 28 días, con una temperatura de  $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$  y una humedad relativa no inferior al 90%.

El conglomerado utilizado fue elaborado en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Universidad Nacional, en donde también se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### ANALISIS QUIMICO ELEMENTAL.

Del análisis químico elemental de las materias primas y clinker (Tabla 1), se puede decir que la caliza presenta una riqueza del 80,72% de carbonato de calcio y que el contenido de magnesio de 0,92% la hace óptima en la fabricación de cemento, ya que a valores mayores del 5% de éste último, su cristalización haría que se comportara como un agente expansivo por la hidratación posterior en los morteros. En cuanto al material puzolánico se observa un alto contenido en  $\text{SiO}_2$  (57, 60%) que favorecerá la formación de la fase  $\text{C}_3\text{S}$  en los clinker, desarrollar en los cementos propiedades hidráulicas. (1) (Tabla 1). El cálculo de composición potencial del clinker confirmó el predominio de la fase  $\text{C}_3\text{S}$  de 56,09%. EL porcentaje de la fase  $\text{C}_4\text{AF}$  de 13,96% relativamente mayor a la de  $\text{C}_4\text{A}$  de 7,58% contribuye a una mayor velocidad de hidratación. Un clinker de estas especificaciones permitirá que al agregar un material natural o artificial puzolánico, se obtenga un cemento con una buena resistencia, debida a la fase  $\text{C}_3\text{S}$ , y que al liberar menos cal permitirá un mayor grado de resistencia a las agresiones químicas, ya que buena parte de ésta se combina con la puzolana para dar nuevos cementos. (Tabla II)

## ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

### Caliza

El componente principal de la caliza, carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se caracteriza por tres bandas activas debidas a la presencia de los carbonatos: (fig. 1)

## RESULTADOS

TABLA I

**ANALISIS QUIMICO ELEMENTAL DE LAS MATERIAS PRIMAS Y CLINKER  
(en base húmeda) (%)**

	Caliza	Material Puzolánico	Clinker
$\text{SiO}_2$ .....	4,62	57,60	18,40
$\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	1,38	26,08	5,79
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	3,56	0,79	4,59
$\text{TiO}_2$ .....	0,52	0,39	0,32
$\text{CaO}$ .....	45,24	0,92	59,46
$\text{MgO}$ .....	0,92	1,39	2,28
$\text{SO}_3$ .....	0,0	0,15	0,24
$\text{Mn}_2\text{O}_3$ .....	0,05	0,05	0,11
$\text{Na}_2\text{O}$ .....	0,06	6,07	1,69
$\text{K}_2\text{O}$ .....	0,32	1,55	0,39
Humedad a los 105°C.....	0,09	0,60	0,0
Pérdidas por calcinación.....	33,39	1,27	2,55
Residuo insoluble.....	14,95	-	16,18
$\text{R}_2\text{O}_3$ .....	4,94	26,88	10,38

TABLA II

**COMPOSICION POTENCIAL CALCULADA PARA EL CLINKER**

$\text{C}_3\text{S}$ .....	56,09
$\text{C}_2\text{S}$ .....	10,44
$\text{C}_3\text{A}$ .....	7,58
$\text{C}_4\text{AF}$ .....	13,96

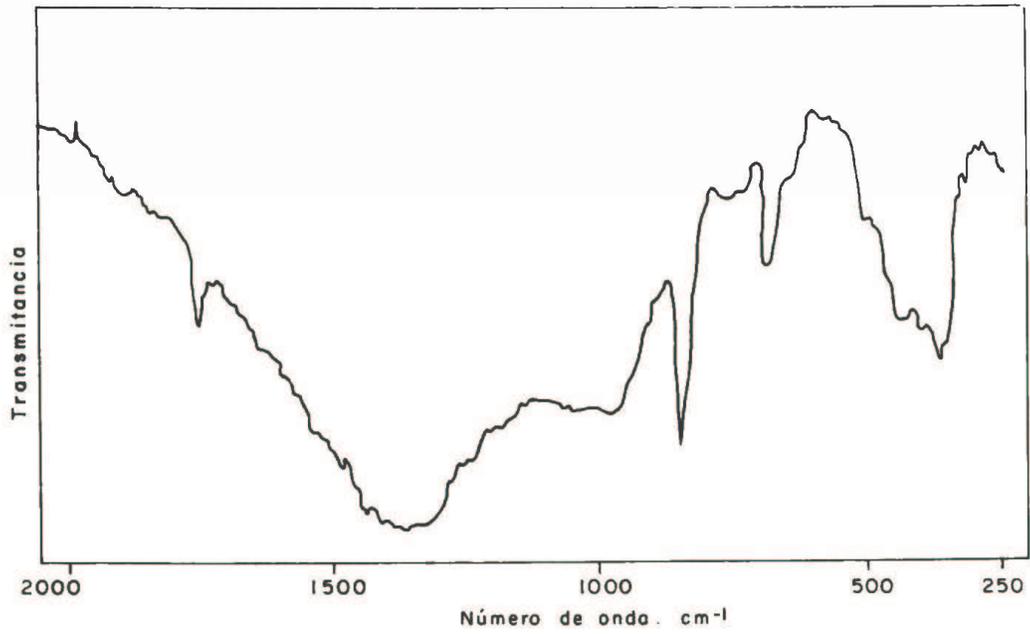


FIGURA 1. Espectro Infrarrojo de la Caliza.

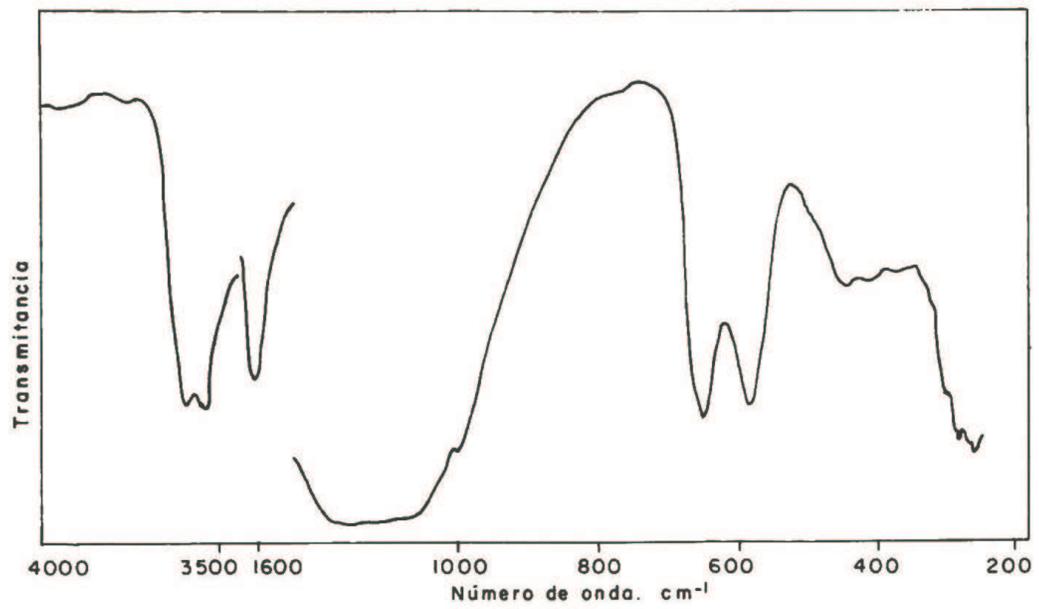


FIGURA 2. Espectro Infrarrojo del Yeso.

CO : Vibración asimétrica  $1.450-1.410 \text{ cm}^{-1}$   
CO<sub>2</sub>: Deformación fuera del plano  $880-850 \text{ cm}^{-1}$   
CO<sub>3</sub>: Deformación en el plano  $720-680 \text{ cm}^{-1}$ (2)

En el espectro infrarrojo corrido a la muestra de caliza en estudio se presentan las siguientes bandas de absorción:  $1.785$ ;  $1.475$ ;  $870$ ;  $710$ ;  $390$ ;  $365$  y  $340 \text{ cm}^{-1}$ . La correspondencia de las bandas obtenidas en el espectro IR de la muestra con los reportados en la bibliografía, permiten caracterizar la caliza.

### Yeso

Presenta en la región de  $1.115 - 1.141 \text{ cm}^{-1}$  una banda intensa y ancha; dos bandas de absorción de mediana intensidad en  $666$  y  $599 \text{ cm}^{-1}$ . Hay dos bandas que aparecen en el espectro del yeso, que disminuyen su intensidad y llegan a convertirse en una sola, dependiendo de las aguas de hidratación que posea el sulfato de calcio ( $1.622$  y  $1.687 \text{ cm}^{-1}$ ) (en estas dos bandas existe entre sus intensidades una relación de 1:3 aproximadamente. (2, 3) (fig. 2).

En la región de  $3.400 - 3.700 \text{ cm}^{-1}$  aparecen dos bandas de absorción. En el espectro IR corrido a una muestra de yeso empleado en este trabajo, encontramos las siguientes bandas de absorción:  $3.590$ ;  $3.540$ ;  $1.610$ ;  $1.180-1060$ ;  $1.000$ ;  $665-650$  y  $595-585 \text{ cm}^{-1}$ . La equivalencia de estas bandas de absorción con las reportadas por la bibliografía permiten caracterizar éste y además confrontar el hecho de que, debido al calentamiento de la muestra de yeso a  $105^\circ\text{C}$ , las bandas de absorción de  $1.622$  y  $1.687 \text{ cm}^{-1}$  se convirtieron en una sola en  $1.610 \text{ cm}^{-1}$ .

### Material Puzolánico

Es particularmente difícil hacer una asignación más o menos detallada de las bandas de absorción que presentan las puzolanas mediante la espectroscopia infrarroja, en primer lugar porque éstas están constituidas por compuestos inorgánicos cuya fórmula es compleja (y por lo general mal definida) en la cual se presentan con mucha frecuencia interacciones vibracionales, ya sea por tratarse de grupos unidos a un átomo de oxígeno común (grupos condesados) o bien por grupos diferentes caracterizados por frecuencias de vibración similares; en segundo lugar, se trata de sustancias con un gran predominio de masa vítrea y amorfa, lo cual supone un grado elevado de desorden, dando como resultado que en algunos casos no se puedan señalar dominios de absorción característicos de grupos determinados como ocurre en el caso de materiales cristalinos (4) (fig. 3)

Las principales bandas de absorción que las caracterizan son:  $3.440$ ;  $1620$ ;  $1.020$  y  $430 \text{ cm}^{-1}$ . Dependiendo del origen de la puzolána, algunas presentan una banda de absorción característica de éstas en la zona  $1.420 \text{ cm}^{-1}$ , a la cual no se le ha dado una asignación específica. Esta banda de absorción por tratamiento térmico desaparece. (3)

En el espectro IR tomado a la muestra en estudio, no se definieron las bandas de absorción asignadas al agua de hidratación y a los grupos OH, ( $3.440 \text{ cm}^{-1}$ ), pero la forma que presentan las correspondientes al agua de constitución ( $1.620$ ), Si-O ( $1.020$  y  $460 \text{ cm}^{-1}$ ) nos permiten caracterizarlo como un material puzolánico (5).

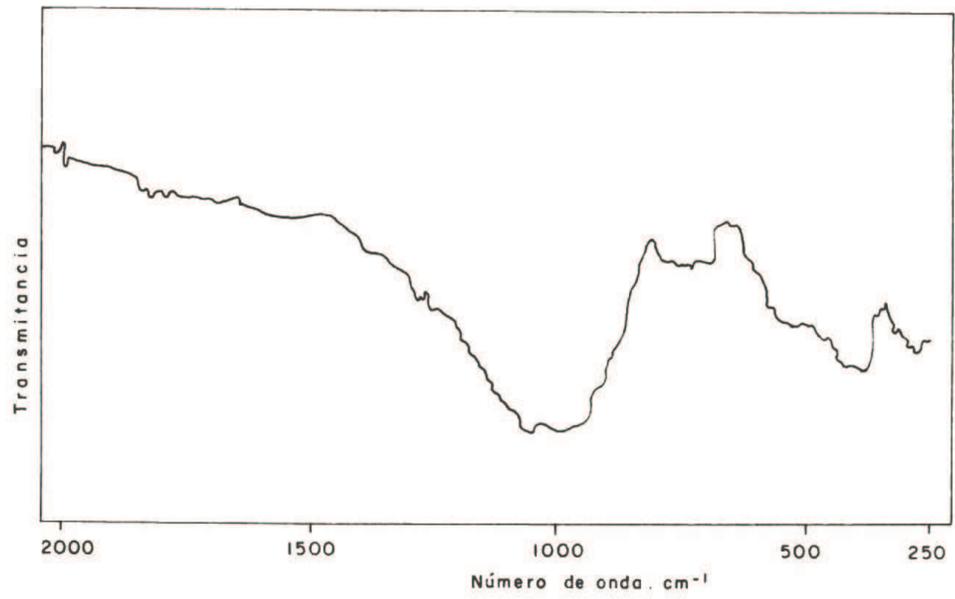


FIGURA 3. Espectro IR del Material Pozolánico.

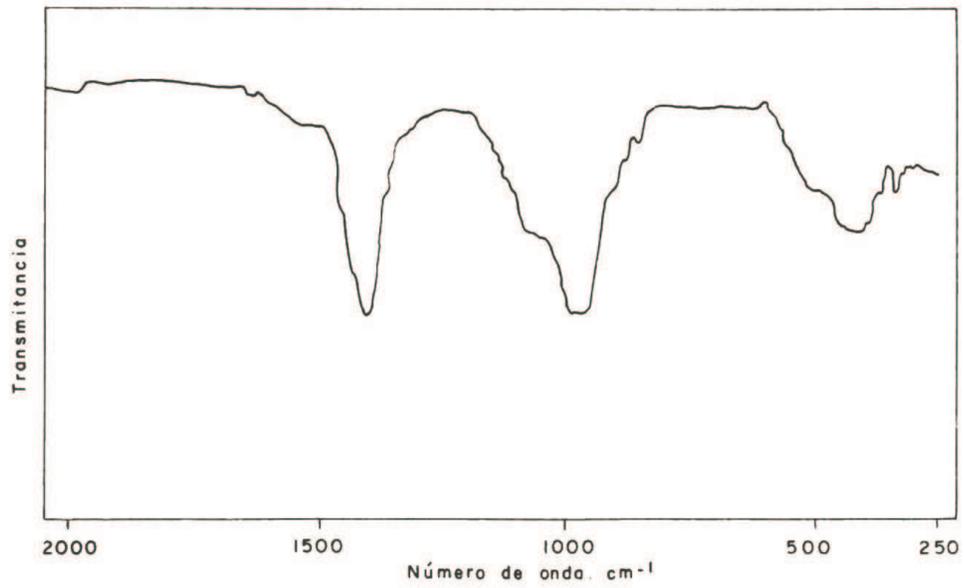


FIGURA 4. Espectro IR de la fracción Arcillosa del Material Pozolánico.

## **Fracción arcillosa del material puzolánico**

En la fracción arcillosa las bandas de absorción aparecen más estrechas y definidas como era de esperar, en razón de la eliminación de parte de la fracción amorfa, debida al tratamiento previo hecho al material puzolánico (6). (fig. 4)

Las bandas, 1.080; 1.420; 995; 915; 530-440 y  $360\text{ cm}^{-1}$ , se explican así: las vibraciones Al-OH corresponden a las bandas de absorción de 1.080, 915 (banda débil) y  $360\text{ cm}^{-1}$  (3,7)

En cuanto al SiO la banda de  $995\text{ cm}^{-1}$  muestra un paso del estado amorfo al cristalino del SiO<sub>2</sub>, desplazamiento de la zona de 1.110 a  $1.188\text{ cm}^{-1}$  (4), confirmándose con la presencia del doblete de  $800\text{-}700\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al cuarzo. (8)

La vibración de deformación del SiO-Si se registra por la banda de absorción de  $440\text{ cm}^{-1}$  (3).

La banda de  $1.420\text{ cm}^{-1}$  presente en el espectro correspondiente, es producida por el grupo CO, que caracteriza los carbonatos; ésta banda es registrada por la presencia de carbonatos en la fracción arcillosa; materiales que fueron introducidos en el tratamiento previo de dispersión y segregación de la muestra.

## **Clinker**

EL clinker está constituido principalmente por cuatro fases (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A y C<sub>4</sub>AF), las cuales presentan bandas de absorción características que las definen y cualitativamente relacionan la proporción de una respecto a las otras. (9) (fig. 5)

**FASE C<sub>3</sub>S.** La banda de absorción que caracteriza al C<sub>3</sub>S atribuida a la vibración de valencia  $\nu_3$  del grupo SiO<sub>4</sub>, aparece en la zona de  $992\text{ cm}^{-1}$  y es independiente del proceso de enfriamiento del clinker. El C<sub>3</sub>S que fundamentalmente es Alita, resuelve sus bandas de absorción de  $930\text{-}892\text{ cm}^{-1}$  producidas por los tetraedros no polimerizados. Las vibraciones de deformación del Si-O-si se observan hacia  $525\text{ cm}^{-1}$  (3,10). En el espectro IR corrido a la muestra de clinker en estudio, podemos observar las siguientes bandas de absorción con respecto a esta fase:  $930\text{-}860$  y  $530\text{ cm}^{-1}$ .

**FASE C<sub>2</sub>S.** En cuanto al C<sub>2</sub>S se presentan dos formas  $\gamma$  y  $\beta$  la forma  $\gamma$  presenta una banda intensa en  $922\text{ cm}^{-1}$ , mientras que  $\beta$ , un hombro hacia  $992\text{ cm}^{-1}$ . Lehman y Dutz (3) comparan los espectros IR de las dos formas  $\gamma$  y  $\beta$  y diferencian la una de la otra por las bandas de absorción presentadas en la región de  $600\text{-}450\text{ cm}^{-1}$ . La forma  $\gamma$  presenta dos máximos dentro de  $588$  y  $476\text{ cm}^{-1}$ , en tanto que la forma  $\beta$  presenta cuatro máximos de absorción entre  $555\text{-}500\text{ cm}^{-1}$ . (10)

En el espectro IR recorrido a la muestra de clinker se presentan las siguientes bandas:  $930\text{-}860$ ;  $570\text{-}380\text{ cm}^{-1}$ , sin poder observar los cuatro máximos, lo cual no permite concluir acerca de la forma  $\gamma$  o  $\beta$  del C<sub>2</sub>S presente en el clinker.

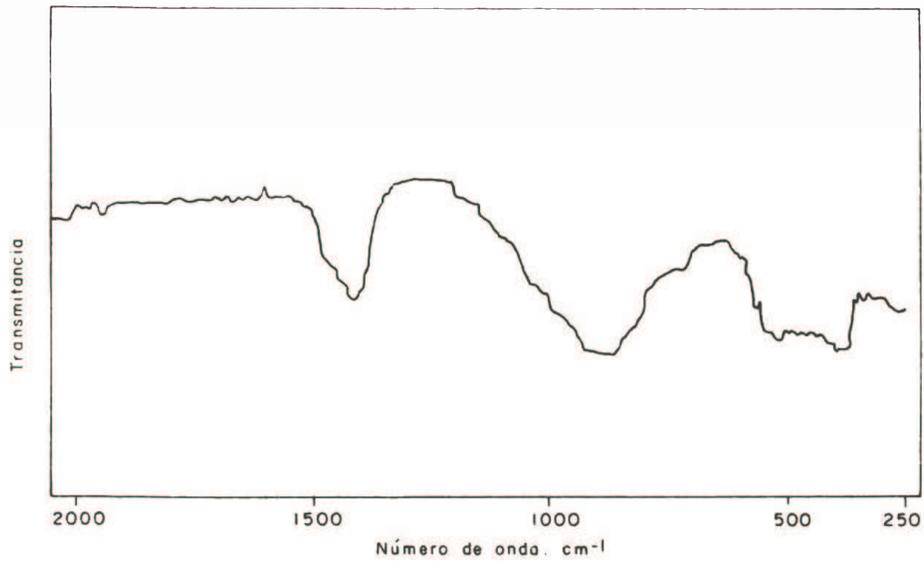


FIGURA 5. Espectro IR del Clinker .

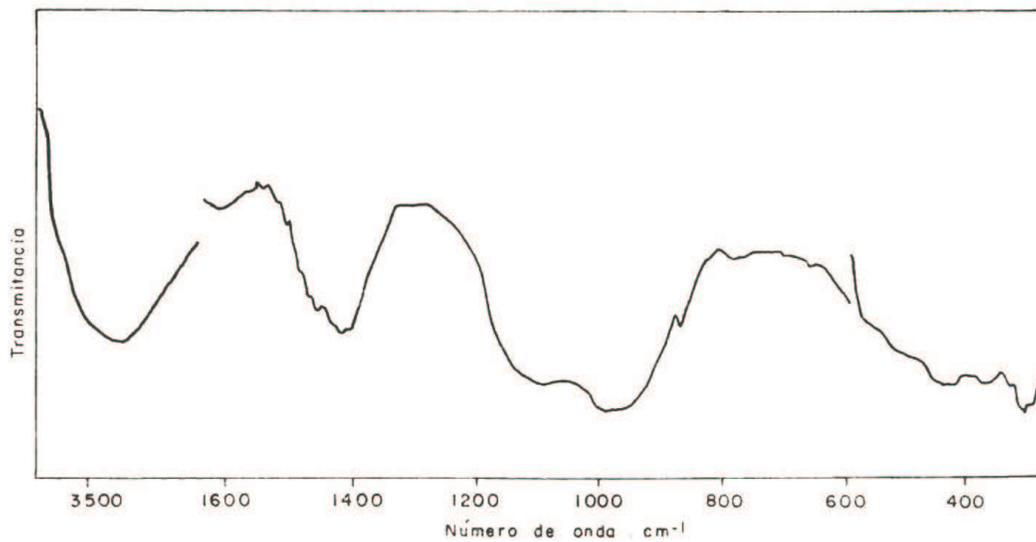


FIGURA 6. Espectro IR del Cemento Testigo .

**FASE C<sub>3</sub>A.** Presenta una banda que la caracteriza en 740 cm<sup>-1</sup> y su intensidad varía con respecto al enfriamiento del clinker; si el enfriamiento es brusco, esta fase será pobre y favorecerá la fase C<sub>4</sub>AF, pues todo el aluminio pasará a formarla. En los clinker enfriados lentamente se favorecerá la forma asimétrica. (11, 12)

Las bandas de la región de 700-900 cm<sup>-1</sup> se asignan a vibraciones Al-O, bien sea a las distancias cortas de los octaedros AlO<sub>6</sub> distorsionados o a tetraedros AlO<sub>4</sub>. En el espectro IR de la muestra de clinker se observa un hombro en la zona de 740 cm<sup>-1</sup> que puede ser parte de las bandas de absorción de la fase C<sub>3</sub>A que están solapados por la banda de absorción de la fase C<sub>3</sub>S (950-800 cm<sup>-1</sup>), debido a la alta concentración relativa de esta fase en el clinker.

**FASE C<sub>4</sub>AF.** Esta fase es uno de los compuestos que presenta mayor cantidad de Al y en su espectro aparece una banda poco definida en la región de 760 cm<sup>-1</sup>, la cual es atribuida a vibraciones del AlO<sub>4</sub>. Son de importancia las bandas de 718-700 cm<sup>-1</sup> y 818-800 cm<sup>-1</sup>, las cuales con el aumento de Al en posición tetraédrica, aumentan mucho en intensidad y se desplazan a mayores frecuencias. También se observa la aparición de un hombro a 570 cm<sup>-1</sup> debido a las vibraciones del AlO<sub>6</sub> (11).

En el espectro corrido a la muestra de clinker podemos ver dos grupos amplios de bandas de absorción de 860-930 cm<sup>-1</sup> y de 380-570 cm<sup>-1</sup> las cuales se emmascaran unas con otras sin permitir sobresalir una en especial.

### **Cemento testigo y morteros**

Como se puede observar en la secuencia de espectros IR corridos a las muestras de los morteros hechos a partir del cemento testigo, como a cada uno de los conformados por los diferentes porcentajes de agregados de puzolana (15, 25, 35, 50 y 60%), se presentan bandas de absorción características del clinker y del cemento, además de la banda de la región de 3.400 cm<sup>-1</sup> correspondientes a las vibraciones de valencia OH y de deformación H-O-H. (11, 13) (fig. 7)

La banda de absorción en 950 cm<sup>-1</sup> que se presenta en el IR del testigo va progresivamente desplazándose hacia frecuencias más bajas, a medida que el porcentaje de puzolana adicionada al mortero va aumentando, lo cual está de acuerdo con el amorfismo que se está presentando en dicho material. (figs. 6 y 7)

La forma de la banda de absorción de 950-1.150 cm<sup>-1</sup> va haciéndose cada vez más redondeada, hasta llegar a ser completamente plana, las fases que ya están definidas, van decreciendo proporcionalmente, hasta predominar la forma amorfa, presentando bandas de absorción que solapan por completo las bandas características de las cuatro fases.

Finalmente las bandas de 305 cm<sup>-1</sup> y 440 cm<sup>-1</sup> que en el cemento testigo se van definidas y estrechas, van perdiendo su forma hasta llegar a redondearse haciéndose difícil la identificación de ellas.

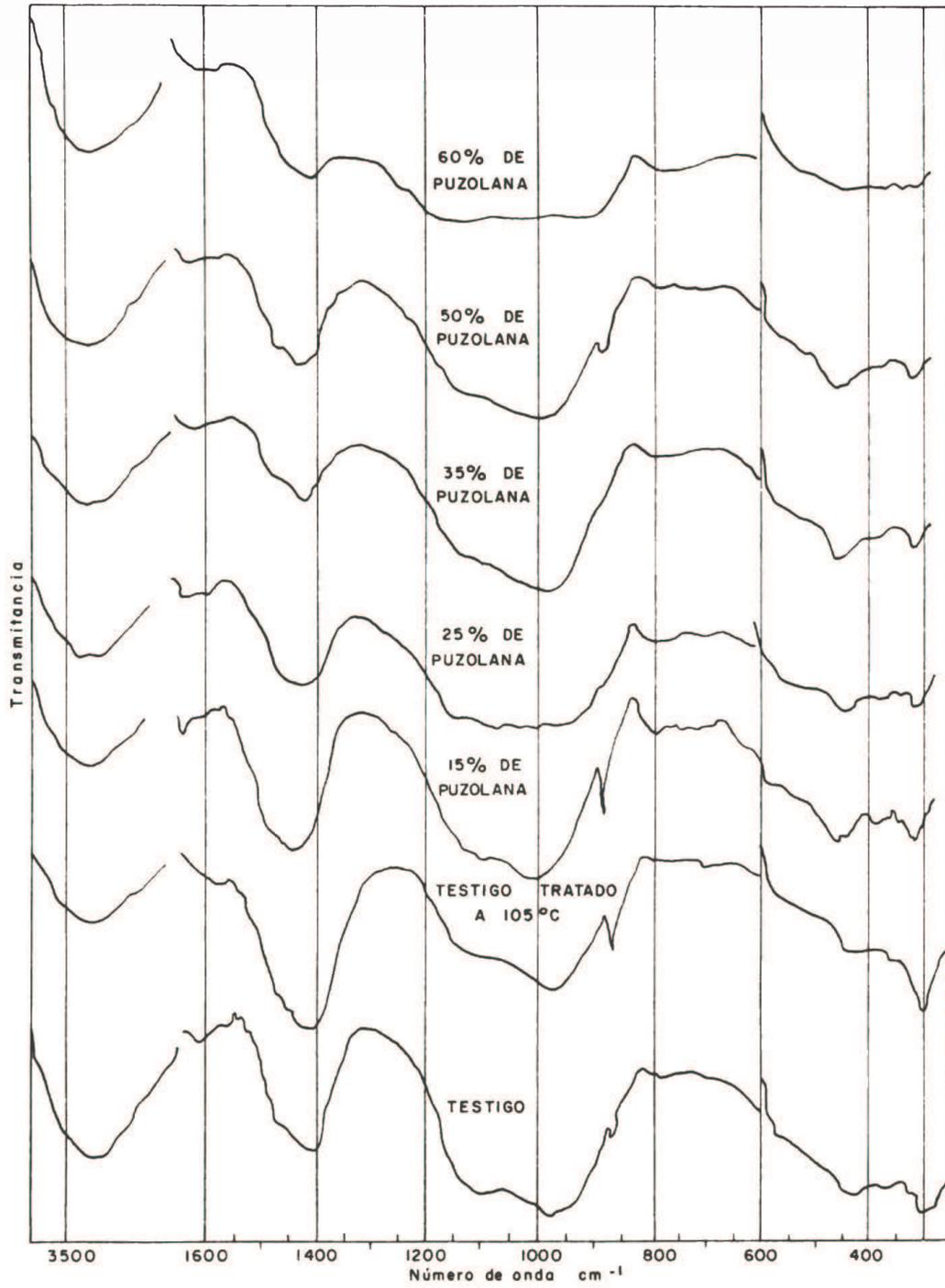


FIGURA 7. Espectros Infrarrojos de los Morteros.

## RESISTENCIA A LA COMPRESION

Al analizar las resistencias a la compresión mostradas por los diferentes morteros a las edades de 1,3,7 y 28 días, (fig. 8) se observan en las diferentes composiciones tres etapas definidas, en las que el ritmo de crecimiento varía. Para el testigo y las composiciones de 15, 25 y 35% el ritmo va siendo cada vez menos creciente en las 3 etapas.

En las composiciones de 50 y 60% en puzolana, en la primera etapa el crecimiento es muy grande respecto al de las anteriores; en la segunda etapa hay un cambio brusco en el ritmo de crecimiento que tiende a ser nulo en la tercera etapa. Lo que quiere decir que para las primeras composiciones (15, 25 y 35%) se trataría de mezclas de endurecimiento lento mientras que las composiciones de 50 y 60% serían de endurecimiento rápido, pero haciendo la anotación que éstas alcanzan resistencias muy bajas, como la que nos presenta la composición de 60% de puzolana y que solamente registra 70,3 Kgs/cm<sup>2</sup> al cabo de 28 días. El testigo cumple con las especificaciones del cemento tipo 1, 1M y 2, según la norma Icontec 30. EL cemento que posee un 15% de puzolana se acomoda al tipo de cemento 4 y 5. Igualmente sucede con las composiciones de 25 y 35% de puzolana. En cambio las composiciones de 50 y 60% no se acomodan a ningún tipo (14).

De acuerdo con la clasificación anterior, el testigo se adapta para ser utilizado en obras de hormigón, en general, y al que no se le exigen propiedades especiales, mientras que las muestras con composiciones de 15, 25 y 35% de puzolana serían utilizadas en obras que requieren bajo calor de hidratación y alta resistencia a la acción de los sulfatos.

---

## AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestros agradecimientos al Laboratorio Químico Nacional (Ingeominas), al Instituto de Ensayos de Materiales de la Universidad Nacional y a Cementos Diamante por sus valiosas colaboraciones.

---

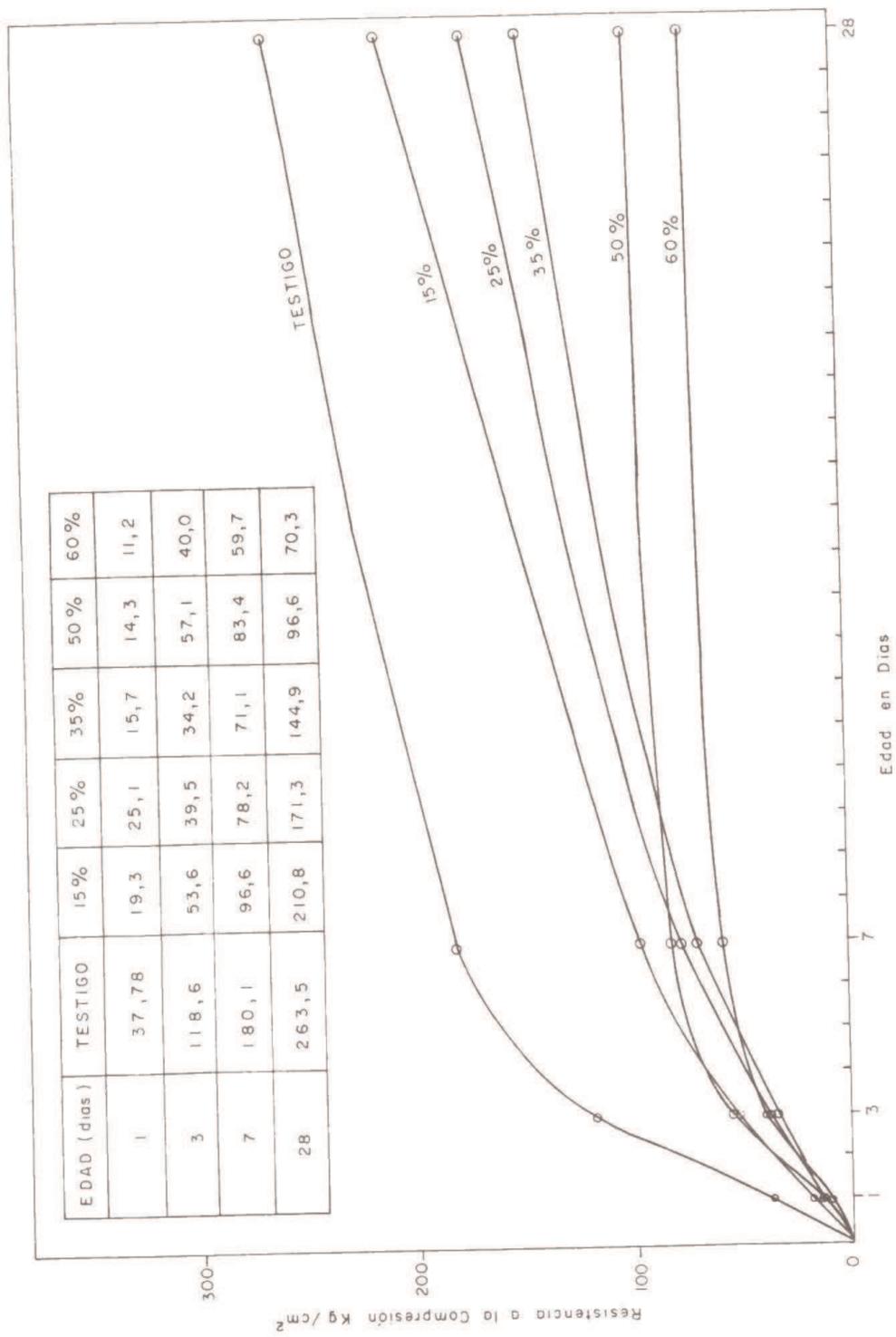


FIGURA 8. Resistencia a la Compresión Vs. Edad.

## BIBLIOGRAFIA

1. M.M. Barrios, Publicación del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid, 1976. p. 5-34.
2. K. Nakamoto, "Infrared Spectra of Inorganic Compounds", Ed. John Wiley and Sons, New York, 1963.
3. M.T. Vázquez, Publicación del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid, 1971, pp. 5-29.
4. M. del P. de Luxan, Publicación del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid, 1976, pp. 5-19.
5. M. del P. Vázquez de Luxan, Publicación del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid, 1974, pp. 91-95.
6. M.L. Jackson, "Soil Chemical Analysis Advanced Course", Wisconsin University College of Agriculture, Department of soil, Madison G. Wis, 1956.
7. M. del P. Vázquez de Luxan, Trabajo presentado en la XVIII Reunión Bienal de R.S.E.F.Q. (1975).
8. Y. de Bravo, C. Gómez e I. de Ramírez, Revista Colombiana de Química, **10**, 45 (1980).
9. M.T. Vázquez, Publicación del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid, 1976, pp. 29-37.
10. B. Kasner y O. Henning, "El análisis cuantitativo de las fases mineralógicas de los clinkers del cemento Portland", Sección técnica de procedimientos de material, Escuela Superior de Agricultura y Construcción de Weismar Silikattechnik, 1972.
11. M.T. Vázquez y T.D. Gaspar, Publicación del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid, 1977, pp. 37-44.
12. P. Tarte, Spectrochimia Acta, **234**, 2, 127-2. 143 (1967).
13. Rocchiccioli, Chimie Analytique, Vol. 46, No. 9, p. 452 (1964).
14. R. Jiménez, "Variables que puedan afectar el resultado de un ensayo de cilindro a la comprensión", Centro de Ingenieros del Estado Zulia, Venezuela, 1976, pp. 1-8.