

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

680 - 16 FORMA EN QUE LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD PUEDEN
AFECTAR LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN. (Conclusión)

(How Temperature and Moisture Changes May Affect the Durability of
Concrete)

S. L. Meyers

De: "ROCK PRODUCTS", nº 8, pag. 153, 1951.

Morteros de arena-cemento

Los morteros constan de pasta de cemento y arena o árido - fino. Son equivalentes a hormigones sin árido grueso. Suponiendo que son constantes todos los demás factores que afectan a la tensión de tipo térmico que se desarrolla entre la pasta y las partículas de arena, dicha tensión será proporcional a la superficie de contacto pasta-arena, y puesto que el tamaño máximo del árido es mucho menor en el mortero que en el hormigón, la tensión será también menor que en éste, disminuyendo la probabilidad de rotura. En la Tabla VI, las placas de mortero permanecieron sin alterar y resistentes después de ser sometidas a 18.000 ciclos de cambios de temperatura. La pasta de cemento tiene un coeficiente de dilatación térmica superior al de la mayor parte de los áridos para hormigón. Los morteros, que contienen más pasta que el hormigón, presentan corrientemente un coeficiente - intermedio entre el de la pasta y el del hormigón, pero el efecto del coeficiente del árido fino se refleja, en una escala considerable, - en el coeficiente del mortero: los morteros de arena caliza poseen - coeficientes bajos y los de arena silícea, elevados.

Callan pone de manifiesto el efecto sobre la durabilidad de las diferencias entre los coeficientes de dilatación del árido grueso y del mortero en el hormigón, según se encuentra en ensayos acelerados de congelación y deshielo. Cuando la diferencia entre los coeficientes del mortero y del árido grueso es pequeña, como sucede cuando tanto el árido fino como el grueso son de naturaleza caliza, la durabilidad es buena; cuando esta diferencia es grande - árido grueso calizo y árido fino silíceo - la durabilidad es pobre.

En este ensayo resulta algo difícil evaluar separadamente cada factor destructivo, hielo y deshielo, ó dilataciones térmicas de iguales, puesto que ambos tienen lugar durante el período de ensayo

Fluencia en los morteros

Se denomina fluencia la deformación producida en la pasta pura, mortero u hormigón, por una carga ó tensión prolongada. Cuando cesa la tensión, la deformación subsiste total ó parcialmente. Probablemente, la fluencia tiene lugar sólo en el gel de la pasta y no en los áridos, y hay quien cree que está relacionada con modificaciones del agua en el gel de cemento. La relación tensión/deformación disminuye con el tiempo.

La fluencia tiene el mismo efecto sobre la reducción de la tensión que una disminución del módulo de elasticidad. Con el tiempo, elimina parte de la tensión entre la pasta o mortero y el árido, provocada por una dilatación térmica desigual.

No se sabe de un modo definido hasta qué punto influye la fluencia en evitar fracasos en el hormigón, pero se demuestra que es una gran ayuda por medio del cálculo que indica con frecuencia la existencia de una tensión más que suficiente para causar la rotura del hormigón, sin que ésto ocurra.

Willis y De Reus han obtenido los siguientes resultados en ensayos de fluencia con morteros de cemento:

Tabla III. Fluencia del mortero bajo una presión de 1680 lb/pulg² durante una hora

Material		Fluencia del mortero. unidades x 10 ⁻⁶ por unidad		
Tipo	Módulo de elasticidad x 10 ⁻⁶	Mezcla (vol.abs.) 1:2,4 Relación ag./c. 0,7	1:3,6 0,7	1:3,6 0,85
Horsteno	14,4	24	30	40
Cuarcita	6,7	36	50	38
Horsteno	6,8	30	56	52
Caliza	11,2	40	35	56
Caliza	6,0	58	60	92

Algunos ensayos posteriores pusieron de manifiesto una de cidida tendencia de la fluencia a ser inversamente proporcional al módulo de elasticidad.

Extensibilidad

La fluencia, la elasticidad y la resistencia a la tracción son factores en la extensibilidad del hormigón. Se entiende por és ta la capacidad del hormigón, sometido a una tensión de tracción, de resistir la deformación sin agrietarse. Hatt y Mills informan so bre una dilatación de 0,00015 a 0,00018 por unidad antes de que comience un agrietamiento visible, pero puede empezar un agrietamiento microscópico para 0,00004 en ensayos de extensibilidad del hormi gón. Savage indica algunas deformaciones elásticas, plásticas y to- tales en la extensibilidad del hormigón, debidas a cargas de trac - ción constantes:

Tabla IV

Carga lb/pulg ²	Cemento Tipo I			Cemento Tipo II			
	Tiempo días	Deform. elástica	Deform. plástica	Deform. total	Deform. elástica	Deform. plástica	Deform. total
100	40	2,8	0,7	3,5	1,7	0,9	2,6
200	80	3,9	1,8	5,7	3,0	1,9	4,9
300	120	5,5	2,0	7,5	4,6	2,6	7,2
400	160	8,1	3,7	11,8	6,9	5,7	12,6

La ruptura de ambos hormigones se produjo en este ensayo de carga progresiva para 417 lb/pulg². Las deformaciones son acumulativas y vienen expresadas en pulgadas por pulgada x 10⁵.

Cohesión del hormigón

La magnitud de la cohesión en el hormigón es el resultado de la adhesión específica (atracción de naturaleza química y física entre los materiales en contacto), de la resistencia a la tracción del aglomerante, y de la trabazón mecánica. Esta última depende de la aspereza de las superficies y de la facilidad con que el medio plástico aglomerante penetra en los poros de la superficie sólida. La tabla siguiente indica el efecto de la rugosidad de la superficie y de la porosidad de los sólidos sobre la cohesión.

Tabla V - Adhesión de la pasta de cemento a algunos sólidos, después de 2 semanas de curado en atmósfera húmeda (ensayo directo)

Tipo de superficie sólida	Tanto por ciento de huecos en los sólidos, en volumen	Resistencia de adhesión o cohesión; lb/pulg ²
Vidrio pulido	prácticamente nulo	20
Vidrio áspero	prácticamente nulo	170
Teja medio cocida	12.5	330
Teja muy cocida	7.9	300
Cobre, rugoso	prácticamente nulo	160
Bronce rugoso	prácticamente nulo	150
Hierro, muy áspero	prácticamente nulo	200
Hierro pulido	prácticamente nulo	20
Arenisca, triturada	2,6	180
Arenisca, triturada	8,1	240
Arenisca, triturada	15,3	350

La tabla anterior no sirve para evaluar la cohesión específica, pero indica que la cohesión aumenta con la rugosidad de la superficie sólida y con la porosidad. Los áridos con cantidades relativamente grandes de poros inferiores a cinco micras presentan una durabilidad pobre. Posiblemente lo que sucede es que los morteros encuentran difícil penetración en estos poros finos, que actúan como un tamiz, dejando los sólidos del mortero sobre la superficie del árido, mientras que el agua penetra sola a través de los poros, y la resistencia de cohesión no alcanza un máximo.

Es posible que las condiciones atmosféricas adversas re -

duzcan seriamente la resistencia de cohesión, sin afectar la resistencia de la pasta ó del árido. Davis, Brown y Kelly comunican que la resistencia de cohesión se reduce mucho por el hielo y deshielo, o humedeciendo y secando a altas y bajas temperaturas alternativamente. En condiciones favorables, la resistencia de cohesión aumenta con el tiempo. Esto podría deberse a que el material aglomerante coloidal se extiende por los huecos, como sucede en el curado en autoclave. Posiblemente tiene lugar cierta traslación de los materiales en contacto unos respecto de otros, sin que se presente la rotura, como pone de manifiesto el deslizamiento de la armadura antes de la rotura, pero lo más probable es que no haya separación real de las dos superficies, sino únicamente deformación de los materiales en contacto.

Rigidez en el hormigón

El agrietamiento se produce cuando se aplica a un cuerpo rígido un esfuerzo suficiente para vencer su resistencia. En el caso de los hormigones, morteros y pastas, se trata casi siempre de la resistencia a la tracción pues ésta es mucho menor que la resistencia a la compresión o al esfuerzo cortante.

Alguno de los factores que contribuyen a evitar la ruptura y el agrietamiento del hormigón son la fluencia, un módulo de elasticidad bajo, el curado en autoclave, una elevada resistencia a la tracción y la extensibilidad. Algunos autores han sugerido también como factor favorable el trabajar en frío, o la aplicación repetida de tensiones, siendo cada una inferior al 50 % de la anterior.

Durabilidad del hormigón

En el ensayo de congelación y deshielo se originan tensiones debidas a cambios de temperatura y a la presión hidrostática.

En el "ensayo de Scholer" se desarrollan tensiones humedeciendo y secando, así como por cambios de temperatura; en ninguno de estos dos ensayos son debidos los resultados únicamente a tensiones-térmicas.

En el método experimental, cuyos resultados se describen - en las Tablas VI, VII y VIII, sólo intervienen cambios de temperatura, y el estado en que se encuentran las probetas al final de los ensayos se debe exclusivamente a tensiones térmicas, no estando enmascaradas éstas por tensiones de otro tipo, excepto, posiblemente, por pequeños cambios de humedad en algunos casos en que las probetas no estaban perfectamente aisladas.

En la Tabla VI, que incluye los resultados de ensayos con placas recubiertas con dos tipos de mortero y sometidas a ciclos de cambios de temperatura, el deficiente comportamiento de los vidrios Vycor y Pyrex parece ser debido a una débil resistencia de adhesión y unos coeficientes de dilatación bajos. Mientras que la adherencia era débil, tiene que haber sido lo suficientemente fuerte para transmitir desde el mortero al árido de vidrio una tensión térmica capaz de provocar el agrietamiento del mortero.

La pobre durabilidad del espato de Islandia (calcita) es - debida a una baja resistencia de adhesión, a la presencia de planos de exfoliación en la calcita y a coeficientes de dilatación desiguales a lo largo de los distintos ejes cristalográficos.

Grietas de separación entre el árido y el mortero sólo aparecieron en tres casos: árido de cuarzo y mortero de caliza, y con - áridos de caliza gris ó blanca y mortero de cuarzo.

En los tres casos existe una considerable diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica del árido y del mortero. Constituye una excepción la buena durabilidad exhibida por el mortero de cuarzo con vidrio Pyrex y espato de Islandia. La pasta de cemento so

la y los dos tipos de mortero solos mostraron una gran durabilidad en este ensayo.

La Tabla VII incluye los coeficientes de dilatación cambios de longitud, resistencia a la compresión y aspecto superficial de prismas de hormigón después de ser sometidos a muchos ciclos de cambios de temperatura. Cuando los áridos, grueso y fino, son del mismo tipo, los resultados son generalmente buenos; una excepción inexplicable es el agrietamiento superficial producido con áridos finos y gruesos de cuarzo. La elevada dilatación lineal y pobre resistencia a la compresión de los prismas de hormigón, con riolita fina y gruesa como árido, se debe probablemente a su composición mineralógica: grandes cristales térmicamente diferentes. El comportamiento excepcionalmente pobre del prisma con árido grueso de sílice fundida y arena de Ottawa (cuarzo) como árido fino, podría deberse a las grandes diferencias de dilatación térmica entre la sílice fundida y el cuarzo, o entre la sílice fundida y el mortero de cuarzo-cemento, y a la pobre cohesión que resulta de la superficie vítrea de la sílice fundida.

En la Tabla VIII, los prismas de hormigón eran semejantes a los de la Tabla VII, donde se emplearon áridos de cuarzo y caliza, pero se trató de mantener la pasta de cemento a humedades relativas distintas, pero controladas, a fin de evaluar el efecto del coeficiente variable de dilatación térmica de la pasta de cemento a diferentes humedades relativas. Esto no se pudo conseguir del todo. El margen de temperaturas en cada ciclo y el número de ciclos fueron menores que en los ensayos descritos en la Tabla VII. Todas las probetas se encontraban en buen estado al fin del ensayo.

Aunque el número de probetas sometidas a los ensayos de ciclos de temperatura fué pequeño, y la información obtenida no tan extensa como era de desear en un campo tan importante y amplio, sin

embargo, se indican algunas conclusiones a vía de ensayo: considerando lo riguroso de este ensayo térmico, los rápidos cambios de altas a bajas temperaturas desde 18.000 a 25.800 ciclos, y algunas de las combinaciones árido-pasta ideadas para obtener una incompatibilidad térmica máxima, la durabilidad del hormigón es sorprendentemente buena bajo estas adversas condiciones, e indica que la incompatibilidad térmica de los áridos y de los áridos-pasta de cemento, no puede sola contribuir mucho a la falta de durabilidad del hormigón. Sin embargo, combinado con cambios de humedad o con tensiones de tipo mecánico, el efecto de las tensiones térmicas sobre la durabilidad del hormigón podría ser más grave de lo que se ha puesto aquí de manifiesto.

- - - - -

TABLA VI

Ensayos de compatibilidad térmica entre morteros y áridos

(Revelada por el estado de la adherencia después de someter las probetas a 18.000 ciclos (225 días) de cambios de temperatura desde 75° F a 135° F; cada ciclo, 18 min.)

Tipo del árido en la placa.	Coeficiente de dilatación lineal $\times 10^{-7}$, - grado F.	Resistencia a la compresión de la unión pasta árido lb/pulg ² .	Estado de la unión y final del ensayo		Estado del árido al final del ensayo
			Mortero de caliza	Mortero de cuarzo	
Vidrio Pyrex	18	0 a 20	pobre	bueno	agrietado
Cuarzo	70	300	grietas de separación	bueno	bueno
Espato de Islandia	139	0 a 20	pobre	bueno	agrietado
Granito	35	310	bueno	bueno	bueno
Caliza blanca	27	220	bueno	grietas de separación	bueno
Riolita	40	400	bueno	pobre	bueno
Arenisca	57	410	bueno	bueno	bueno
Vidrio Yycor	4	0 a 20	pobre	pobre	muy agrietado
Caliza Gris	26	290	bueno	grietas de separación	bueno
Horsteno		120	bueno	bueno	bueno

T A B L A VII

Efecto de ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento sobre la durabilidad de prismas de hormigón hechos con áridos de amplio -
margen de dilatación térmica.

Tipo de árido	Coeficiente lineal de dilatación 10 ⁻⁷ grad., F.			Variación de longitud, %			Estado al final del ensayo, 28.500 ciclos, 545 días	
	áridos	Hormigón		1500 ciclos	7800 ciclos	25.800 ciclos	Resistencia a la comp. lb/ pulg. ²	aspecto superficial
		60 días	545 días	28 días	136 días	545 días		
Caliza gruesa y fina	27	29	28	0,00	0,05	0,08	5760	bueno
Caliza gruesa y arena de Ottawa		37	40	0,05	0,05	0,35	5980	cuarteado
Cuarzo grueso y caliza fina		40	43	0,02	0,21	0,22	5930	cuarteado
Cuarzo grueso y fino	57	60	62	0,04	0,05	0,26	4050	cuarteado
Andesita gruesa y fina	35	37	36	- 0,04	- 0,05	- 0,03	6670	bueno
Riolita gruesa y fina	40	37	43	- 0,01	0,11	0,36	3660	bueno (1)
Pórfido grueso y fino	49	46	42	- 0,02	- 0,01	- 0,02	6660	bueno
Pedernal grueso y caliza fina	37	40	38	0,04	0,02	- 0,01	5800	bueno
		sólo pedernal						
Caliza gruesa y pedernal fino		37	28 (húmedo)	0,02	0,00	0,03	8350	bueno
Sílice fundida gruesa y arena de Ottawa	3	29	40	0,34	0,55	0,58	2190	muy cuarteado (1)

(1) Sonido sordo al ser golpeados

T A B L A VIII

Efecto de diferentes humedades

(Se prepararon algunas probetas prismáticas de hormigón y se sometieron a ciclos de cambios de temperatura para determinar el efecto de las distintas humedades que acompañaban los cambios - térmico).

Tipo de árido	Estado de los prismas antes de los ciclos térmicos		Estado de los prismas después de 18.000 ciclos de cambio de temperatura de 60 grados F.		
	H. R. %	Coficiente x 10 ⁻⁷	H. R. %	Coficiente	Variación de la longitud %
Cuarzo grueso y caliza fina	40	58	15	55	- 0.01
El mismo	66	61	40	55	0.03
El mismo	100	48	32	51	0.06
Caliza gruesa y cuarzo fino	40	46	80	43	0.02
El mismo	56	47	96	45	0.03
El mismo	100	43	100	38	0.21

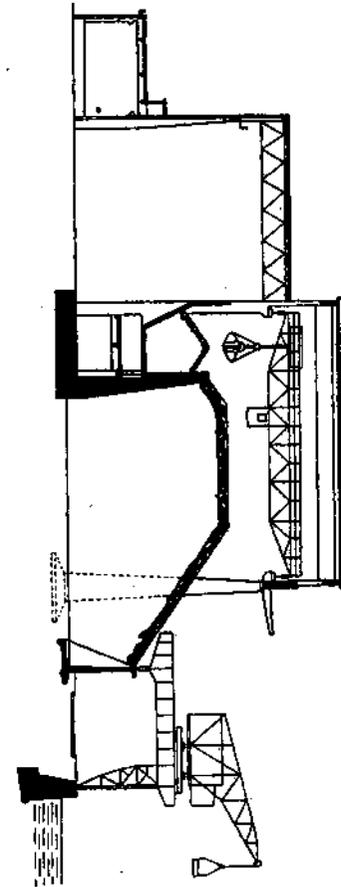


Fig. 1.

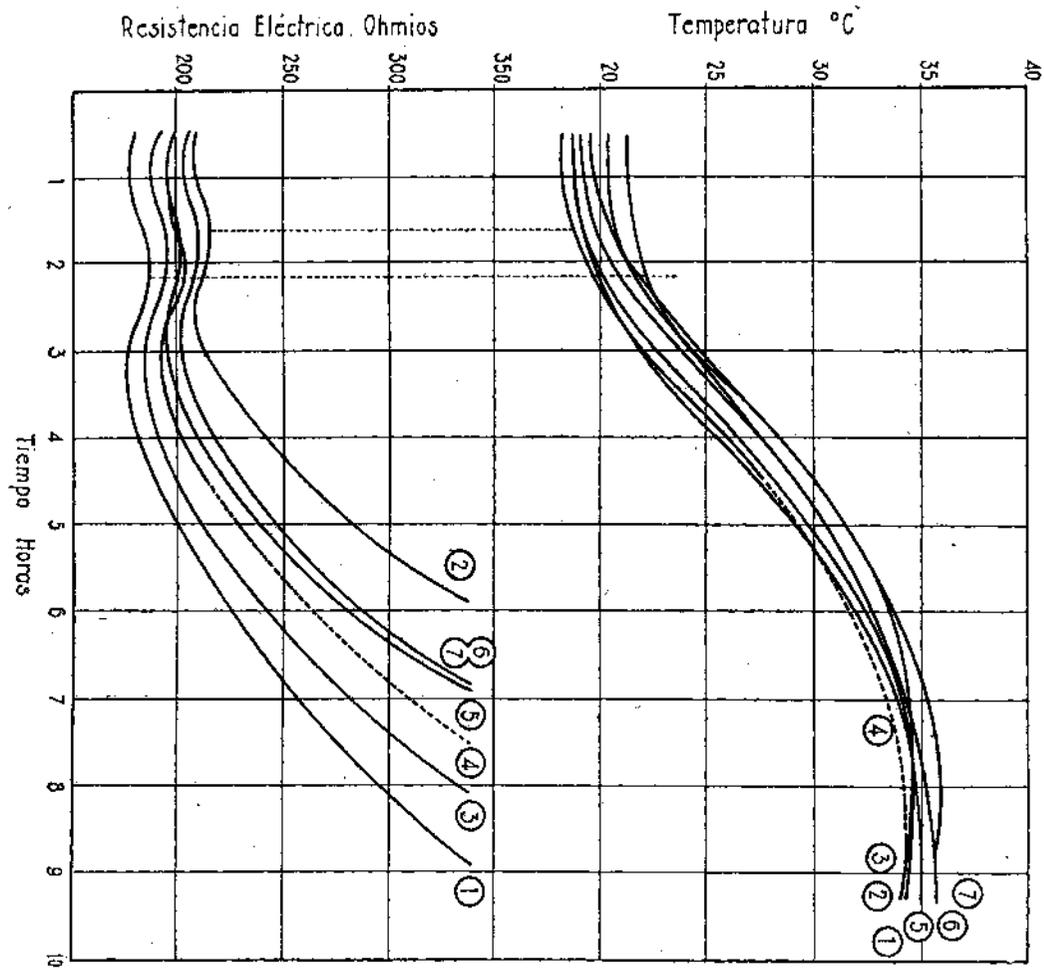


Fig. 3.

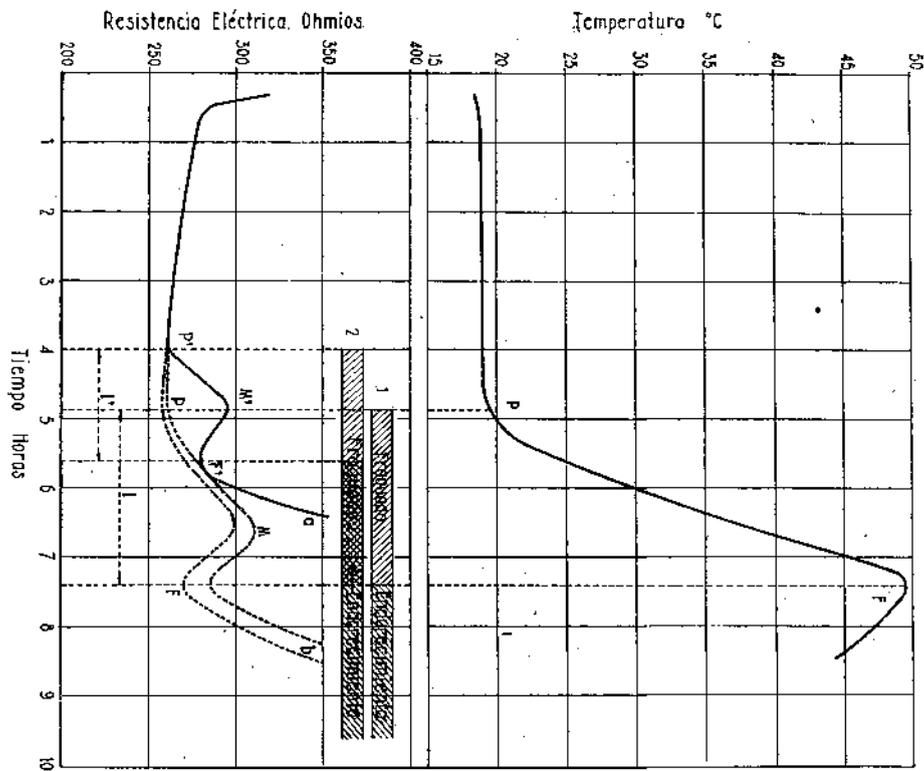


Fig. 4.

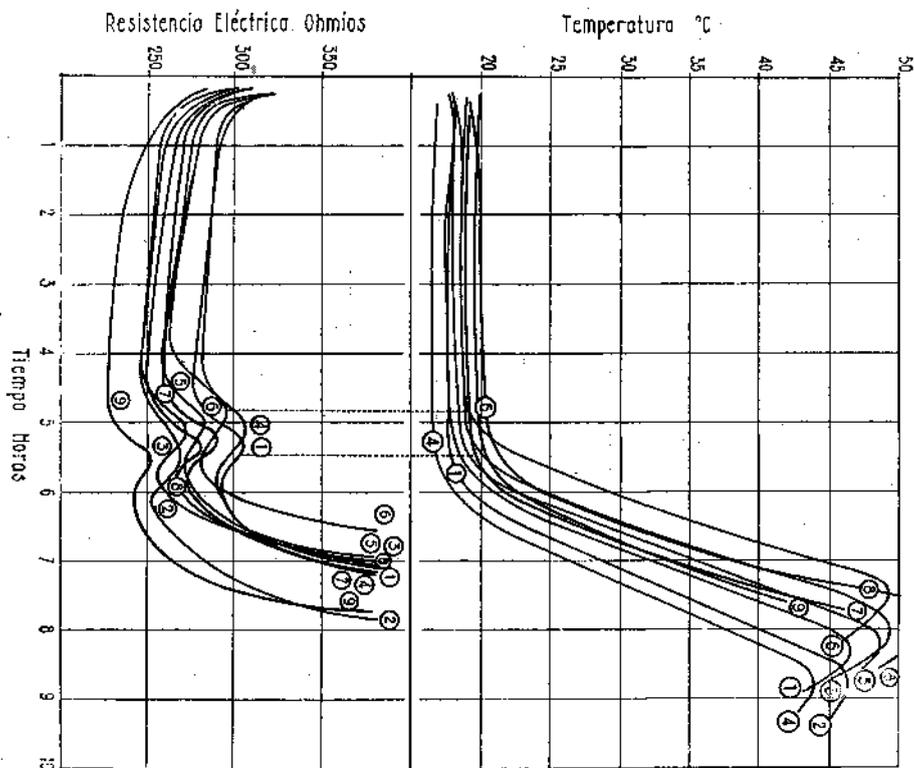


Fig. 2.