

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR

FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, Guatemala, C.A.



"RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN PROBETAS CILINDRICAS DE DIMENSIONES REDUCIDAS SOMETIDAS A CURADO AUTOGENO"

Informe de Tesis

presentado por

RIGOBERTO PACHECO TINOCO

para optar al título de

INGENIERO CIVIL ADMINISTRATIVO

Guatemala, octubre de 1990

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR

RECTOR..... Mons. Luis Manresa Formosa

**VICERRECTOR
GENERAL..... Licda. María Luisa Beltranena de Padilla**

**VICERRECTOR
ACADEMICO..... Lic. Luis Achaerandio Zuazo S.J.**

SECRETARIO..... Lic. Gabriel Medrano Valenzuela

**DIRECTOR
ADMINISTRATIVO..... Lic. Tomás Martínez Cáceres**

**DIRECTOR
FINANCIERO..... Lic. Jaime Enrique Reyes Barrios**

CONSEJO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

DECANO..... Ing. Carlos Vela Schippers

VICEDECANO..... Ing. Jorge Lavarreda Grotewold

SECRETARIO Ing. Eduardo Calderón Reyes

**DIRECTOR INGENIERIA
CIVIL ADMINISTRATIVA**..... Ing. Pierre Castillo Contoux

**DIRECTOR INGENIERIA
QUIMICA INDUSTRIAL**..... Ing. Fernando López Fernández

**DIRECTOR INGENIERIA
MECANICA INDUSTRIAL**..... Ing. Carlos García Bickford

**DIRECTOR INGENIERIA
INDUSTRIAL**..... Ing. Jorge Nadalini Lemus

**DIRECTOR DEL PROGRAMA
DE MAESTRIA EN ADMI-
TRACION INDUSTRIAL**..... Ing. Jorge Lavarreda Grotewold

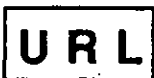
**COORDINADOR DE
CARRERAS CORTAS**..... Ing. Carlos Eugenio Alvarado Galindo

**REPRESENTANTES DE
CATEDRATICOS**..... Ing. Julio Aguilar Shafer
Ing. Juan Carlos Gramajo Monterroso

**REPRESENTANTES
ESTUDIANTILES**..... Cristian Rolz Sagastume
Guillermo Díaz Beneke

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN PRIVADO DE TESIS

Ing. Pierre Castillo Contoux
Ing. Emilio Beltranena Matheu
Ing. Julio Santolino Beltranena



UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR

VISTA HERRIQUEN 18, ZONA 18. APARTADO POSTAL 20 C.
TELE. 682131 AL 35 - 682321 AL 25 - 682781 AL 88
GUATEMALA, C.A. 91000 CABLE: UNILAND

FACULTAD DE INGENIERIA

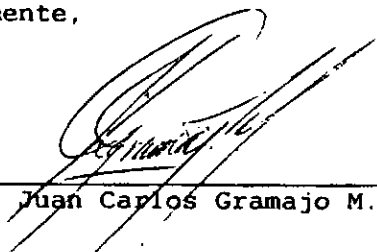
Guatemala, 1 de octubre de 1990

Señores:
Consejo de Facultad.
Facultad de Ingeniería.
U. R. L.

Honorable Consejo:

Por este medio informo a ustedes, que habiendo actuado como asesor de tesis del estudiante Rigoberto Pacheco Tinoco, que desarrollara el tema "RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL CONCRETO EN PROBETAS CILINDRICAS DE DIMENSIONES REDUCIDAS SOMETIDAS A CURADO AUTOGENO" y encontrando que el informe final de dicho trabajo, según me fuera presentado, es novedoso e interesante y que además cumple con los requisitos establecidos por las leyes de la Universidad, así como que se ajusta a las normas de los institutos internacionales especializados y aceptadas en el medio para este tipo de procedimientos, habiéndose conducido la investigación de manera absolutamente científica, doy mi aprobación al mismo.

Sin otro particular, atentamente,



Ing. Juan Carlos Gramajo M.



UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR

VISTA HERMOZA II, ZONA 16, APARTADO POSTAL 39 C.
TELE. 00821 AL 35 -- 00821 AL 35 -- 002731 AL 35
GUATEMALA, C.A. 00016 CABLE: UNILAND

FACULTAD DE INGENIERIA

Reg.No.I-130-90

5 de octubre de 1990

Señor
Rigoberto Pacheco Tinoco
Presente

Estimado señor Pacheco:

A continuación me permito informarle que después de haber llenado todos los requisitos, se ha dado la aprobación final a su tesis titulada "Resistencia a la Compresión del Concreto en Probetas Cilíndricas de Dimensiones Reducidas sometidas a Curado Autógeno" y se autoriza para que se proceda a la impresión de la misma.

Atentamente,

FACULTAD DE INGENIERIA

Ing. Eduardo A. Calderón Reyes
SECRETARIO
FACULTAD DE INGENIERIA

EACR/ocdes
cc. Arch. (1)



ACTO QUE DEDICO :

A: DIOS

A MI PADRE: Rodrigo Pacheco Musmanni

A MI MADRE: Ana Maria Tinoco de Pacheco

A MIS HERMANOS: Rodrigo Alejandro
Ricardo Enrique y Leonor
Carla Marina
Myriam Isabel
Luis Roberto y Luz
Rodolfo Eduardo y Katia
José Rafael

A MI ABUELA: Rosa Musmanni de Acosta

AL: CENTRO UNIVERSITARIO CIUDAD VIEJA

ESPECIALMENTE A: Ing. Pierre Castillo Contoux
Ing. Ricardo Acosta Nassar

AGRADECIMIENTO A:

Ing. Pierre Castillo Contoux
(por su gran colaboración y apoyo en mi formación profesional)

Ing. Juan Carlos Gramajo Monterroso
(asesor de tesis)

SERCO S.A. en especial al Ing. Julio Victor Guzmán
(por su valiosa ayuda para el desarrollo de este trabajo)

RECONOCIMIENTO A LOS CATEDRATICOS:

Ing. Juan José Hermosilla Montano
Ing. Raúl Eduardo León Seis
Ing. Daniel González Muñoz
Ing. Rodolfo González Morasso
Ing. Julio Santolino Beltranena

INDICE

	Título	Página
I.	INTRODUCCION.....	8
II.	ANTECEDENTES.....	12
III.	JUSTIFICACIONES.....	15
IV.	OBJETIVOS.....	17
V.	HIPOTESIS.....	18
VI.	ASPECTOS METODOLOGICOS.....	19
VII.	RESULTADOS.....	35
VIII.	DISCUSION DE RESULTADOS.....	46
IX.	CONCLUSIONES.....	50
X.	RECOMENDACIONES.....	52
XI.	ANEXOS.....	55
XII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	61

I. INTRODUCCION:

En la elaboración del concreto, la prueba a compresión a los 28 días se usa habitualmente para evaluar su resistencia; sin embargo, en la norma ACI 318 se permite ensayar cilindros de edades diferentes para evaluar este valor. Los resultados de estas pruebas determinan si los componentes utilizados en el proceso de la mezcla son los requeridos para satisfacer los parámetros de calidad.

Es posible aplicar métodos de curado acelerado para estimar, con precisión y confiabilidad, el esfuerzo a la compresión que tendrá un cilindro con un curado normal a los 28 días. Estos métodos están regulados por la norma ASTM C 684, en la que se establecen tres procedimientos. El presente trabajo desarrolla el método de curado autogenado.

En el método autogenado se utiliza un recipiente aislado térmicamente; las probetas de concreto son colocadas en el mismo por 48 horas, y el calor generado por la hidratación inicial del cemento acelera el proceso de curado.

Para estimar la resistencia del concreto a los 28 días por este método, es necesario establecer una ecuación que permita, a partir de los valores obtenidos al ensayar los cilindros curados autógenamente, calcular los resultados deseados, determinando la

calidad de la mezcla en un tiempo más corto. Esto hará que en el futuro se trabaje, como criterio aceptado, directamente con los resultados de las pruebas de curado acelerado.

La resistencia del concreto tiene varias etapas dependiendo de su edad. La primera es de una resistencia casi nula y es el momento cuando están reaccionando el agua con el cemento, produciéndose un fenómeno físico-químico, que se manifiesta por la liberación de calor y por la absorción de agua en el núcleo de cemento, formando una solución supersaturada de compuestos hidratados que coagula formando una masa amorfa llamada gel, que al secarse, produce un endurecimiento inicial que une los agregados en una masa heterogénea; esta etapa de endurecimiento inicial se conoce como fraguado, y el grado del mismo se determina mediante los ensayos de Vicat (ASTM C 191) y Gillmore (ASTM C 266). La segunda etapa es la de un endurecimiento progresivo, principalmente debido al silicato tricálcico y responsable de la resistencia a los 28 días, edad a la que se considera que el concreto llega a su resistencia de diseño; en esta etapa es indispensable un curado adecuado. La tercera etapa es la de mayor duración y en la cual el concreto sigue ganando resistencia con el transcurso del tiempo, debido a la estabilización del silicato dicálcico y a las reacciones de las puzolanas con la cal de hidrólisis y cal libre en el cemento; este aumento de resistencia es sin embargo mucho menor que el que ocurre en la etapa hasta 28 días. (cfr. Anexo 2).

El curado del concreto puede definirse como la combinación de diversos factores en condiciones favorables para su endurecimiento, que pueden reducirse a un control adecuado de temperatura y humedad. Las condiciones de temperatura influyen en el proceso de curado, ya que tanto una temperatura baja como una alta sin humedad, disminuyen la resistencia; sin embargo una temperatura alta con suficiente humedad acelera el fraguado aumentando la resistencia.

La madurez del concreto se define como el producto del tiempo por la temperatura de curado, siempre que ésta sea superior a los -14°F (-10°C), ya que se ha demostrado que a temperaturas inferiores el concreto deja de ganar resistencia porque el congelamiento afecta la hidratación del cemento; en resumen, la resistencia a la compresión de concreto es proporcional a su madurez, es decir, que si dos cilindros de concreto de una misma muestra, curados a distintas temperaturas y en diferentes tiempos, tienen el mismo valor de madurez, entonces la resistencia potencial de los dos será la misma. El concepto de madurez es de mucha importancia debido a que de estudios realizados sobre este tema es de donde han surgido los métodos de curado acelerado, en los cuales el concreto es expuesto a altas temperaturas y a condiciones de humedad adecuadas para desarrollar una parte significativa de su resistencia última en corto tiempo.

Los propósitos de las pruebas de resistencia del concreto

son para determinar el cumplimiento de una especificación de resistencia y medir su variabilidad. El concreto que es una masa endurecida de materiales heterogéneos, está sujeto a la influencia de numerosas variables; las características de cada uno de los ingredientes del concreto pueden ocasionar cambios en la resistencia de éste, las que además pueden ser el resultado de las prácticas seguidas durante la dosificación, mezclado, transportación, colocación y curado. Deben aceptarse estas variaciones en la resistencia, pero con toda confianza se puede producir concreto de la calidad deseada si se mantiene un control adecuado, si se interpretan correctamente los resultados de las pruebas y si se toman en consideración sus limitaciones.

Las muestras de prueba indican la resistencia potencial más que la resistencia real del concreto en una estructura. Para ser significativas las conclusiones sobre su resistencia deben derivarse de un patrón de pruebas del cual se pueden calcular, con razonable exactitud, las características del concreto.

Los procedimientos estadísticos proporcionan medios valiosos para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia, y la información que se deriva de dichos procedimientos también sirve para reafirmar los criterios y las especificaciones del diseño.

II. ANTECEDENTES

La ingeniería moderna, que exige una velocidad de construcción cada vez mayor y con un control de calidad más estricto, formuló la necesidad de métodos de pruebas aceleradas, que permitieran estimar la resistencia a la compresión del concreto, antes que éste alcanzara su resistencia especificada en el diseño de la mezcla. Desde 1927, se tiene bibliografía de métodos de curado acelerado y la investigación continúa hasta nuestros días.

En 1974, la American Society for Testing and Materials (ASTM) estandarizó tres métodos para el curado acelerado del concreto en su norma ASTM C 684: "Standard Method of MAKING, ACCELERATED, AND TESTING OF CONCRETE COMPRESSION TEST SPECIMENS", los cuales son: A- Método del Agua Tibia, B- Método del Agua Hirviente y C- Método de Curado Autógeno.

La aplicación del método del curado autógeno ha sido muy escasa; por esta razón, no se encuentran fácilmente datos comparativos que sirvan de referencia, ni experiencias de su uso en otros países; sin embargo, se sabe que el Departamento de Carreteras de Ontario, Canadá, es la institución que más ha utilizado este método. Si se logra implementar esta técnica, sin duda será el método de curado acelerado del futuro por su precisión y economía en el gasto de energía calorífica, pero su investigación está todavía en etapa primaria.

En Guatemala, el Ing. Víctor Gabriel Ortiz Murga ha sido el único que ha realizado ensayos de curado autógeno, cuyos resultados aparecen en su trabajo de tesis denominado " Estimación de la resistencia a la compresión a los 28 días con base a ensayos de probetas sometidas a curado acelerado " (USAC). realizado en 1972, y en la que recomienda que se continúe la investigación de los métodos de curado acelerado. Luego, en el año 1976, el Ing. Julio Víctor Guzmán De León en su tesis " El curado acelerado como método para control de calidad del Concreto" (UMG), describe el método autógeno pero no lo desarrolló prácticamente. En consecuencia, es muy poco lo que se ha desarrollado esta técnica, especialmente en Guatemala.

En cuanto al uso de probetas de concreto de dimensiones reducidas de 3"x 6" (76 x 152 mm) en ensayos de compresión, el Ing. Oscar Manuel Velásquez Coronado en su trabajo de tesis "Ensayo para determinar la calidad del concreto en base a la resistencia a compresión de probetas de concreto de dimensiones reducidas " (URL), desarrollado en 1990, comprobó que el parámetro experimental denominado resistencia cilíndrica a compresión obtenido al ensayar cilindros de dimensiones reducidas es equivalente con el obtenido al ensayar probetas de dimensiones estándar, cuando la única diferencia entre las mismas son las dimensiones de altura y diámetro, conservando la relación entre ellas inalterada, la cual acepta como válida con un nivel de significación del 99%.

También en 1990, la Ing. Adela Castañeda López utilizó probetas de 3"x 6" (76 x 152 mm) en su tesis "Determinación del tiempo óptimo de curado bajo calor para probetas cilíndricas de concreto de dimensiones reducidas" (URL), ensayando, por el procedimiento del agua hirviendo, un número mayor de probetas que el Ing. Velázquez Coronado y obtuvo resultados similares.

III. JUSTIFICACIONES

3.1 Es conveniente desarrollar e implementar en Guatemala, la técnica del curado acelerado autógeno, como un método para estimar con precisión y confiabilidad, la resistencia a la compresión a los 28 días de una muestra de concreto, en un tiempo relativamente corto (48 horas).

‡

3.2 Debido a que la investigación en este procedimiento ha sido muy limitada, es indudablemente un punto muy interesante para desarrollar en un trabajo de tesis. Considero que los resultados y conclusiones de este estudio serán de gran utilidad.

3.3 Puede tenerse con el presente trabajo, una guía práctica para el desarrollo de ensayos experimentales en el Laboratorio de Materiales de la U.R.L., que sirva a los estudiantes para aplicar pruebas de control de calidad del concreto con fines didácticos y de investigación.

3.4 El hecho de usar en los ensayos cilindros de dimensiones reducidas de 3" x 6" (76 x 152 mm), se debe principalmene a dos razones: por una parte existe una tendencia generalizada a reducir el tamaño de las probetas puesto que resulta mucho más

práctico y cómodo trabajar con cilindros más pequeños y, por otra, la máquina universal SATEC 60 HV, del Laboratorio de Materiales de la U.R.L., tiene una capacidad nominal de 60000 libras, la cual es insuficiente para producir la ruptura en probetas de concreto con dimensiones estándar de 6" x 12" (152 x 305 mm), como se requiere en las pruebas normalizadas por ASTM. Por estas razones, se harán algunos ensayos a compresión de probetas estándar como testigos, para verificar que no habrá ninguna diferencia significativa en los resultados de los ensayos de probetas de dimensiones reducidas; de hecho, se ha tratado de seguir cuidadosamente todas las especificaciones estipuladas por ASTM C 684 para el ensayo, excepto en las dimensiones de las probetas.

IV. OBJETIVOS

4.1 El objetivo del trabajo de tesis es comparar los resultados de resistencia a la compresión obtenidos en probetas de concreto de dimensiones reducidas sometidas a curado autógeno, siguiendo las especificaciones de ASTM C 684, con los resultados obtenidos mediante un procedimiento de curado normal en probetas también reducidas, con el fin de establecer una relación matemática para estimar, con suficiente precisión y confiabilidad, la resistencia del concreto a la compresión a los 28 días.

4.2 Implementar la técnica del curado acelerado autógeno del concreto como un medio de control de calidad del concreto.

4.3 Establecer una guía práctica de laboratorio para el desarrollo de este experimento, y conseguir que en el laboratorio de materiales de la U.R.L. se disponga de una cámara de curado autógeno, de manera que se sigan realizando estas pruebas, y sirva de estímulo a otros para seguir investigando y obteniendo más información sobre este procedimiento.

V. HIPOTESIS

A partir de los resultados obtenidos al ensayar a compresión probetas cilíndricas de concreto de dimensiones reducidas de 3" x 6" (76 x 152 mm), sometidas a curado acelerado autógeno, puede estimarse con suficiente precisión y confiabilidad, la resistencia que se tendrá a los 28 días de curado normal.

VI. ASPECTOS METODOLOGICOS

6.1 DESCRIPCION Y DESARROLLO DEL METODO

6.1.1 Generalidades:

Este método se basa en el principio de endurecer el concreto con el propio calor que genera la hidratación inicial del cemento como única fuente de energía. Las probetas de concreto se colocan, inmediatamente después de ser moldeadas, en un recipiente individual o en una cámara de curado autógeno durante 48 horas; dicha cámara mantiene las condiciones adecuadas de temperatura y humedad en la mezcla, que hacen posible que se desarrolle una parte significativa del esfuerzo último del concreto en corto tiempo.

6.1.2 Recipientes y/o cámara de curado autógeno:

Los recipientes y la cámara de curado autógeno deben tener un aislamiento térmico, rodeando lo más cerca posible las probetas, para evitar pérdidas de calor y humedad. Para el presente trabajo, se fabricó una cámara utilizando una caja de madera de 1/2" (13 mm) de espesor, que cierra en la parte superior, la caja tiene una base cuadrada de 26.50" (673 mm) de lado y 12.00" (305 mm) de alto; en el interior de la

caja se colocó poliuretano como un material aislante para impedir que se fugue el calor que se libera en la hidratación inicial del cemento (cfr. Anexo 4). La espuma rígida de poliuretano, además de poseer la conductividad térmica más baja entre los materiales aislantes investigados, ofrece una excelente resistencia al flujo de calor, tiene una estructura de celda cerrada que lo hace impermeable, lo cual permite que su capacidad de aislamiento permanezca virtualmente constante con el paso del tiempo. La estructura monolítica del poliuretano, su estabilidad dimensional, su alta resistencia a la transmisión del calor, su baja permeabilidad, su adherencia a cualquier superficie, etc., hacen de este material la solución técnica más adecuada para el aislamiento de recipientes. En el Anexo 1 se muestra una comparación de la eficiencia del poliuretano como aislante térmico en relación a otros materiales.

La cámara de curado autógeno fue diseñada para curar simultáneamente nueve probetas en sus respectivos moldes; dispone de nueve compartimientos cuadrados de 5.50" (140 mm) de lado y 6.50" (165 mm) de alto, colocados simétricamente dentro de la caja; entre los compartimientos y el exterior hay 2.50" (64 mm) de espesor de poliuretano, y entre compartimientos un espesor de 2.00" (51 mm). Al colocar las probetas dentro de los compartimientos, se enrollan en esponjas de 1" (25 mm) de espesor para llenar los espacios vacíos que puedan

quedar en los mismos. De esta forma se tiene el aislamiento térmico deseado.

6.1.3 Pruebas para determinar la eficiencia térmica de la cámara:

a) Retención de calor:

Se coloca un recipiente hermético, con las dimensiones del compartimiento de la cámara de curado autógeno, lleno con agua a 180 °F (82 °C) hasta 1/4" (6 mm) del borde superior; se mide la temperatura inicial con un potenciómetro eléctrico, luego se cierra el recipiente, se coloca dentro de una bolsa plástica y se introduce en la cámara de curado autógeno, la cual se cierra con cuidado. La cámara se deja en un ambiente a 70 ± 2 °F (21 ± 1 °C) donde no hayan corrientes de aire; pasado el tiempo la temperatura del agua debe ser por lo menos como se muestra en la tabla 6.1.

Tabla 6.1:

Tiempo transcurrido (h)	(°F) Temperatura	(°C)
12	152±5	67±3
24	136±6	58±3
48	114±7	45±4
72	100±8	38±4

b) Prueba de sello para el empaque:

Se realiza sumergiendo la cámara de curado autógeno en agua durante cinco minutos, de tal forma que no escape ninguna burbuja de aire de la caja. El nivel del agua debe estar 6" (152 mm) por encima del cierre de la caja.

c) Solidez de la cámara de curado autógeno:

Cuando se somete a una temperatura de - 20 °F (- 29 °C) durante 72 horas, no deberá mostrar señales de deformación, rajaduras o que se ponga quebradizo; cuando la temperatura sea de 140 °F (60 °C) durante el mismo tiempo, no deberá mostrar señales de ablandamiento o deformación. El empaque deberá recobrar su forma original después de someterlo a las temperaturas anteriores. Esta prueba se omitió en el experimento porque las especificaciones de fábrica del poliuretano indican que este material satisface cómodamente estas condiciones. Por tanto, se da por supuesto que la cámara de curado autógeno llena este requisito.

6.1.4 Procedimiento para preparación de las probetas:

a) **Mazclas:** se fabricaron, en el laboratorio, probetas con siete mezclas de concreto diseñadas para un f'c de 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 y 5000 psi (14, 17, 20, 24, 27,

31 y 34 MPa). Es importante aclarar que, para una mejor interpretación de los resultados, interesaba más obtener un rango amplio de diferentes resistencias, que lograr mucha exactitud en la resistencia especificada de las mezclas. En la tabla 6.2 se encuentran las proporciones en peso y volumen de las mezclas de concreto usadas en el experimento.

Tabla 6.2: Mezclas de concreto

MEZCLA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	w/c	PROPORCIONES (Cemento : arena : pedrín)		
A	5000 psi	0.42	Peso	1	1.05 : 1.35
			Volumen	1	1.10 : 1.40
B	4500 psi	0.47	Peso	1	1.25 : 1.65
			Volumen	1	1.30 : 1.60
C	4000 psi	0.51	Peso	1	1.30 : 1.75
			Volumen	1	1.35 : 1.70
D	3500 psi	0.58	Peso	1	1.55 : 1.95
			Volumen	1	1.60 : 2.00
E	3000 psi	0.64	Peso	1	1.75 : 2.25
			Volumen	1	1.80 : 2.30
F	2500 psi	0.71	Peso	1	1.90 : 2.50
			Volumen	1	1.95 : 2.55
G	2000 psi	0.77	Peso	1	2.20 : 2.80
			Volumen	1	2.25 : 2.85

b) Número de probetas: se repitió cada mezcla tres veces y se hicieron veintiún grupos de probetas; por cada grupo se moldearon tres probetas reducidas de 3" x 6" (76 x 152 mm) sometidas curado autógeno, tres probetas reducidas y dos

probetas estándar de 6" x 12" (152 x 305 mm) sometidas a curado normal. En total se hicieron ciento sesenta y ocho probetas: ciento veintiseis pequeñas y cuarenta y dos estándar. Además se hicieron diez probetas reducidas para la calibración de las dos máquinas universales que se usaron en el experimento.

c) Muestras (ASTM C 172): se toman muestras de un volumen mínimo de concreto de un pie cúbico; la obtención de la muestra debe hacerse en el menor tiempo posible, sin exceder los 15 minutos. La prueba del asentamiento (ASTM C 143) se hace lo antes posible, pero nunca cinco minutos después de haber completado la muestra. El moldeo de los cilindros debe hacerse lo más pronto posible sin exceder quince minutos. El cilindro debe protegerse del sol, viento y cualquier otra fuente de evaporación y contaminación.

d) Moldeo de los cilindros (ASTM C 31): el concreto usado en la prueba del asentamiento no debe usarse para moldear cilindros. El llenado de los moldes reducidos se hizo en dos capas de igual volumen; cuando se pone la última capa se debe dejar un poco de concreto sobre el molde para que cuando se apisona se llene completamente; el llenado se hace con una cuchara de albañil, que debe moverse alrededor del molde mientras se está descargando para asegurar una distribución simétrica del concreto; antes de iniciar la consoli-

dación del material se debe distribuir el concreto con la varilla. Los moldes estándar se llenan de la misma forma, solo que usando tres capas de igual volumen en vez de dos.

e) Consolidación: para consolidar el material se utiliza una varilla de 3/8" (10 mm) de punta redondeada; en los moldes reducidos se apisonó con veinte golpes de la varilla por capa, distribuidas en toda la sección del molde; cuando se apisona la segunda capa, la varilla debe penetrar la capa inferior por lo menos 1/2 " (13 mm); al finalizar el apisonado se golpean los lados del molde con un martillo para cerrar los espacios dejados por la varilla y para extraer el aire atrapado. Los moldes estándar se consolidaron de igual forma pero con una varilla de 5/8" (16 mm) y veinticinco golpes de apisonado por capa. Si el asentamiento es menor de 1" (25 mm) la consolidación debe hacerse por vibración.

f) Acabado final: después de consolidar el concreto en el molde se nivela y afina la superficie superior con respecto al extremo del mismo, tratando de evitar cualquier depresión o proyección mayor de 1/8" (3 mm). La superficie superior de los cilindros recién moldeados se puede cubrir con una capa delgada de pasta densa de cemento, lo que permite dar el acabado final con herramientas de albañilería o con una placa de vidrio plana untada con aceite mineral. Esta pasta

de cemento se cura y endurece junto con el cilindro.

g) **Desmoldeado:** las probetas, en el caso del curado normal, se retiran de sus moldes veinticuatro horas después de haberlas moldeado. Las probetas sometidas a curado autógeno se retiran de sus moldes al terminar el proceso de curado.

6.1.5 Curado de las probetas:

a) Curado normal:

Para evitar la evaporación del agua del concreto, previo a endurecer, se cubren los cilindros inmediatamente después del acabado final con un material no absorbente y no reactivo, lo cual se puede hacer con una cubierta de plástico gruesa. El curado inicial se presenta durante las primeras veinticuatro horas después de moldeados los cilindros, los cuales deben almacenarse en un ambiente dentro de un rango de temperatura entre 60 y 72 °F (15 y 22°C), condición que evita cualquier pérdida de humedad. Después de retirar las probetas de sus moldes, se colocan en un lugar que les brinde agua libre en toda su superficie, esto se consigue por inmersión en un baño de agua saturada de cal. Debe evitarse la exposición de las probetas a goteo y corriente de agua.

b) Curado acelerado autógeno:

Al terminar el moldeo se deben cubrir las probetas con una plancha de metal o con una tapadera bien ajustada. Las probetas se colocan en bolsas plásticas, con la resistencia suficiente para que no se rompan al introducir o extraer las probetas de la cámara de curado autógeno; antes de anudar las bolsas debe extraerse todo el aire posible. Para introducir las en la cámara de curado autógeno se enrollan con una esponja para asegurar que queden llenos todos los espacios dentro de los compartimientos de la cámara de curado. En las primeras doce horas después de haber moldeado las probetas, la cámara de curado no debe moverse, ni someterse a vibraciones o sacudidas, debe colocarse a la sombra y preferiblemente a una temperatura de 70 ± 10 °F (21 ± 6 °C). A la edad de $48 \text{ h} \pm 15 \text{ min.}$, las probetas deben extraerse de la cámara de curado autógeno, se quitan de los moldes y se dejan enfriar a temperatura ambiente por treinta minutos.

6.1.6 Ensayo a la ruptura de las probetas:

Las probetas sometidas a curado autógeno deben ensayarse a las $49 \text{ h} \pm 15 \text{ min.}$, mientras que las sometidas a curado normal se ensayan a los veintiocho días. Para ensayar las probetas a la ruptura se utilizaron las siguientes máquinas:

- probetas reducidas: máquina universal SATEC 60 HV, hidráulica, con capacidad nominal de treinta toneladas, lectura digital en pantalla, controlada automática o manualmente, del laboratorio de Materiales de la URL.

- probetas estándar: máquina para ensayo de probetas de concreto FORNEY HA 1400, hidráulica, con capacidad nominal de doscientos cincuenta toneladas, lectura en carátulas y operación manual, del laboratorio de Materiales de SERCO S.A.

Debe realizarse una calibración de ambas máquinas para tener congruencia con los resultados obtenidos y poderlos comparar. Esto se hizo rompiendo cinco probetas reducidas en cada máquina; el promedio de los resultados obtenidos en la URL dividido por el promedio de los resultados obtenidos en SERCO S.A. dará el factor por el que hay que afectar todos los resultados de los ensayos que se hagan en el laboratorio de Materiales de SERCO S.A.

Procedimiento:

a) El diámetro de la probeta se determinó con una precisión de 0.1" (3 mm) mediante el promedio de dos lecturas, medidas perpendicularmente en la parte media de la probeta; este valor se utilizó para determinar la sección transversal de la probeta.

b) En vez de cabecear las probetas, se colocaron en los extremos de las mismas, retenedores de metal del diámetro de la probeta, con una almohada de neopreno en su interior; esto garantiza que la distribución de la carga aplicada sea uniforme y facilita el procedimiento. Este sistema fue utilizado con excelentes resultados por Adela Castañeda López en su trabajo de tesis "Determinación del tiempo óptimo de curado bajo calor para probetas cilíndricas de concreto de dimensiones reducidas" (URL).

c) Las probetas deben mantenerse húmedas previo a la prueba y se ensayaron en esa condición.

d) El cilindro debe colocarse sobre la superficie limpia de la máquina de ensayo, tratando de que su eje esté alineado con el eje de aplicación de la carga, y que la placa de aplicación de carga este asentada uniformemente sobre la superficie superior del cilindro. Se utilizó un cabezal para pruebas de compresión con montaje esférico.

e) La carga debe ser aplicada en forma continua y sin impacto, con una velocidad entre 20 y 50 psi (0.14 y 0.34 MPa) por segundo. Se eligió un valor intermedio de 30 psi (0.21 MPa) por segundo.

f) La carga se aplica hasta la falla del cilindro y se debe

anotar tanto la carga máxima soportada durante el ensayo como el tipo de falla y la apariencia del concreto.

g) La resistencia máxima del concreto se calcula dividiendo la carga máxima soportada (expresada en libras con una aproximación de 10) entre el área de sección transversal del cilindro.

h) Para cada prueba efectuada conviene llevar un impreso con la siguiente información:

- fecha de la prueba
- número de identificación
- diámetro promedio de la probeta
- área de sección transversal
- carga máxima soportada
- resistencia a la compresión
- tipo de fractura (si es o no cónica)
- defectos de la probeta
- edad de la probeta
- régimen de curado

6.2 PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS

6.2.1 Generalidades:

Para obtener el máximo de información debe efectuarse una cantidad suficiente de pruebas, con lo cual se indica la variación en el concreto elaborado y permite la utilización de procedimientos estadísticos apropiados que serán empleados en la interpretación de los resultados de las pruebas. Los procedimientos estadísticos proporcionan la mejor herramienta para que, de tales resultados, se determine la resistencia y la calidad potencial del concreto y se expresen los resultados de la manera más útil; estos resultados permitirán establecer luego la relación matemática entre los datos de curado acelerado y los de curado normal

6.2.2 Agrupación de resultados:

Se trabajó con veintiún grupos, cada uno de ellos constaba de tres probetas reducidas sometidas a curado autógeno, tres reducidas y dos estándar sometidas a curado normal. Se repitió tres veces la misma mezcla para cada resistencia especificada entre 2000 y 5000 psi (14 y 34 MPa).

6.2.3 Cálculos y gráficas:

a) Para cada grupo se calcula el promedio (\bar{x}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (V) de los esfuerzos obtenidos al ensayar a compresión los tres cilindros de cada subgrupo, según su tamaño y régimen de curado; es decir, por cada grupo se tienen tres valores: el promedio de los tres ensayos de curado acelerado, el promedio de los tres ensayos de curado normal y el promedio de los dos cilindros estándar que sirve de referencia con lo establecido por ASTM. Además se calcula también el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los resultados de los tres grupos que tienen la misma resistencia especificada. (ACI 214-77).

Puede ocurrir que la resistencia de un cilindro de un mismo grupo se desvíe tanto del promedio que resulta altamente improbable, entonces se recomienda descartarlo si su desviación respecto de la media es superior a 3σ y debe considerarse sospechoso si su desviación es superior a 2σ ; si además, un cilindro de baja resistencia muestra evidencia de falla en el muestreo, moldeado, curado o ensayo, el resultado de su ensayo debe ser descartado; si se descarta un valor el promedio se calcula entonces a partir de los dos valores restantes.

b) Con los resultados de cada grupo se traza la gráfica de curado acelerado contra curado normal.

c) Se encuentra la ecuación matemática que relacione los valores de la gráfica. V.H. Malhotra ha encontrado, después de numerosos ensayos, que la mejor curva de ajuste corresponde a una hipérbola de la forma $Y = X / (AX + B)$, donde A y B son constantes.

6.3 MATERIAL Y EQUIPO:

- máquina universal para ensayar cilindros de concreto
- 18 moldes de dimensiones reducidas de 3" x 6" (76 x 152 mm)
- 6 moldes de dimensiones estándar de 6" x 12" (152 x 305 mm)
- cámara de curado autógeno para nueve cilindros
- 9 esponjas de 1" (25 mm) de espesor
- bolsas plásticas y hules gruesos resistentes
- tanque de curado normal
- 2 retenedores metálicos con neopreno para distribución uniforme de la carga aplicada a la hora del ensayo.
- cono para prueba del asentamiento
- herramienta menor de albañilería
- alicate, lima y desarmador
- varilla de apisonado de 3/8" (10 mm) de diámetro para probetas reducidas y de 5/8" (16 mm) para probetas estándar

- calibrador para medir el diámetro de los cilindros
- carretilla y pala
- cemento, arena, pedrín y agua para mezclas de concreto
- cal hidratada
- aceite
- balanza
- papel, marcador y lápiz.

VII. RESULTADOS

Se usó el sistema inglés como medida de las magnitudes puesto que los moldes de los cilindros fueron hechos con medidas exactas en pulgadas y las lecturas de las fuerzas en las máquinas de ensayo se tomaron en libras; sin embargo, al lado derecho de cada valor en sistema inglés -entre paréntesis- se encuentra también su equivalente en el sistema internacional. En el Anexo 3 aparece una tabla de conversiones, del sistema inglés al sistema internacional, de las dimensiones comúnmente usadas.

Los resultados generales del experimento están tabulados en la tabla 7.1, donde aparecen agrupados por mezcla, grupo, régimen de curado y tamaño de los cilindros. Las probetas se ensayaron hasta la ruptura, cuya fuerza máxima soportada (F) se expresa en libras; con este dato y conocida el área de sección transversal de los cilindros, se calcula el esfuerzo de compresión (f), el cual se expresa tanto en lb/pulg² (psi) como en kg/cm². De los ensayos realizados fue descartado un cilindro estándar, correspondiente al grupo 7, por mostrar serios defectos en su fabricación. En la tabla 7.2 se muestran el promedio (\bar{x}), desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (V) de los resultados obtenidos en cada grupo, mientras que en la tabla 7.3 se presenta la variación por mezclas. En la tabla 7.4 se relacionan los resultados obtenidos en el experimento, de donde se deducen algunas conclusiones, que se discuten en el siguiente capítulo.

Haciendo un análisis de regresión hiperbólica de la forma $Y = X/(AX+B)$ se encontró la siguiente ecuación para relacionar los valores de resistencia por curado acelerado autógeno (X) con los de resistencia a los 28 días de curado normal (Y):

$$Y = \frac{X}{0.0001269196 X + 0.2268969856}$$

En la figura 7.1 se muestra la gráfica de la ecuación anterior, donde se pueden observar también los puntos correspondientes a los resultados de cada grupo, lo que ayuda a hacerse una idea clara de la validez de dicha ecuación.

Los cilindros que sirvieron para calibrar las máquinas de ensayo dieron los siguientes resultados (se rompieron cinco cilindros reducidos en cada máquina):

URL: X = 2582 psi
σ = 206.31 psi
V = 7.99 %

SERCO: X = 2466 psi
σ = 250.09 psi
V = 10.14 %

El factor K por el que se afectaron los promedios de los valores de resistencia obtenidos en el laboratorio de SERCO es:

$$K = 2582 \text{ psi} / 2466 \text{ psi} = 1.047$$

FORMULAS UTILIZADAS EN EL PROCESAMIENTO DE DATOS:

1. Promedio $x = \Sigma x/n$

2. Desviación estándar $\sigma = \sqrt{(\Sigma x^2/n-1)}$

3. Coeficiente de variación $V = (\sigma/x) \cdot 100\%$

4. Ecuación de regresión $Y = X/(AX+B)$

5. Constantes de regresión $A = \frac{(\Sigma x^2)(\Sigma x^2 y) - (\Sigma x^3)(\Sigma xy)}{(\Sigma x^2 y)^2 - (\Sigma x^3 \cdot y)(\Sigma xy)}$

$$B = \frac{(\Sigma x^2 y)(\Sigma x^3) - (\Sigma x^3 \cdot y)(\Sigma x^2)}{(\Sigma x^2 y)^2 - (\Sigma x^3 \cdot y)(\Sigma xy)}$$

TABLA 7.1: RESULTADOS GENERALES DEL EXPERIMENTO

MEZCLA	GRUPO	CURADO ACELERADO (3" x 6")			CURADO NORMAL (3" x 6")			CURADO NORMAL (6" x 12")		
		F (lb)	f (psi)	f (kg/cm ²)	F (lb)	f (psi)	f (kg/cm ²)	F (lb)	f (psi)	f (kg/cm ²)
A	1	24030	3183	223.79	36830	4878	342.96	130000	4616	324.54
		23160	3068	215.70	36640	4853	341.20	129000	4554	320.18
		24400	3099	217.88	40190	5323	374.24			
	2	26160	3465	243.61	38070	5042	354.49	128500	4558	320.46
		25170	3334	234.40	39590	5244	368.69	131000	4663	327.84
		25040	3317	223.21	39460	5226	367.42			
		24370	3228	226.95	36930	4891	343.87	125500	4457	313.36
3	23750	3146	221.19	40880	5415	380.71	128000	4520	317.79	
	24100	3192	224.42	36860	4882	343.24				
	19850	2629	184.84	35860	4750	333.96	126500	4460	313.57	
	20940	2744	192.92	35800	4742	333.40	124500	4378	307.80	
	19130	2534	178.16	34930	4627	325.31				
B	17380	2302	161.85	33870	4486	315.40	119000	4189	294.52	
	17300	2291	161.07	32280	4275	300.56	115000	4048	284.60	
	18770	2486	174.78	35060	4643	326.44				
	19170	2539	178.51	33660	4458	313.43	114000	3996	280.95	
	20270	2685	188.77	36500	4834	339.86	118500	4167	292.97	
C	20510	2717	191.02	36080	4779	336.00				
	18650	2470	173.66	35120	4652	327.07	114500	4057	285.24	
	18410	2438	171.41	34060	4511	317.15	-----	----	-----	
	18120	2400	168.74	33410	4425	311.11				

TABLA 7.1.1 (CONTINUACION): RESULTADOS GENERALES DEL EXPERIMENTO

MEZCLA	GRUPO	CURADO ACELERADO (3" x 6")		CURADO NORMAL (3" x 6")		CURADO NORMAL (6" x 12")				
		F(lb)	f(psi)	f(kg/cm ²)	F(lb)	f(psi)	f(kg/cm ²)	F(lb)	f(psi)	f(kg/cm ²)
C	8	17310	2293	161.21	31480	4170	293.18	124000	4399	309.28
		17090	2264	159.17	34350	4549	319.83	122500	4326	304.15
		16610	2200	154.68	33170	4393	308.86			
		10290	1363	95.83	24960	3364	236.51	89000	3160	222.17
		9900	1311	92.17	24740	3277	230.40	88500	3124	219.64
D	10	10130	1341	94.28	26500	3510	246.78			
		14270	1890	132.88	30180	3997	281.02	108000	3793	266.67
		13870	1837	129.15	30940	4098	288.12	107000	3775	265.41
		14250	1887	132.67	29640	3926	276.03			
		11930	1580	111.08	27900	3695	259.78	102500	3614	254.09
E	12	12660	1677	117.90	27230	3607	253.60	88000	3133	220.27
		11350	1503	105.67	28250	3742	263.09			
		13740	1820	127.96	28950	3835	269.63	109500	3848	270.54
		13460	1783	125.36	31200	4133	290.58	113500	3978	279.68
		13870	1837	129.15	29070	3850	270.68			
E	13	13140	1506	105.88	28550	3782	265.90	96000	3382	237.78
		14110	1869	131.40	28180	3733	262.46	98000	3469	243.89
		12710	1683	118.33	29400	3894	273.78			
		11860	1571	110.45	27320	3618	254.37	90500	3183	223.79
		13870	1837	129.15	28340	3754	263.93	98500	3478	244.53
E	14	10370	1374	96.60	27970	3705	260.49			

TABLA 7.1 (CONTINUACION): RESULTADOS GENERALES DEL EXPERIMENTO

MEZCLA	GRUPO	CURADO ACELERADO (3" x 6")		CURADO NORMAL (3" x 6")		CURADO NORMAL (6" x 12")				
		F (lb)	f (psi)	f (kg/cm ²)	F (lb)	f (psi)	f (kg/cm ²)	F (lb)	f (psi)	f (kg/cm ²)
E	15	13370	1771	124.51	29620	3923	275.81	106500	3782	265.90
		14450	1914	134.57	29880	3957	278.20	102000	3602	253.25
		14130	1872	131.61	30740	4072	286.29			
	16	8220	1089	76.56	22020	2916	205.02	74500	2629	184.84
		8030	1064	74.81	23250	3079	216.48	82500	2909	204.52
		8670	1148	80.71	23140	3065	215.49			
F	17	9660	1279	89.92	24990	3310	232.72	84500	2979	209.44
		9720	1287	90.49	24820	3287	231.10	83000	2919	205.23
		10340	1369	96.25	25560	3385	237.99			
	18	7760	1028	72.28	22090	2926	205.72	73500	2676	188.14
		8700	1152	80.99	22760	3014	211.91	73000	2592	182.24
		8120	1075	75.58	23020	3049	214.37			
	19	4890	648	45.56	17450	2315	162.76	55500	1973	138.72
		4770	632	44.43	17120	2268	159.46	53000	1884	132.46
		4830	640	45.00	15770	2088	146.80			
G	20	5140	681	47.88	18250	2417	169.93	61000	2151	151.23
		5670	751	52.80	17380	2302	161.85	59000	2075	145.89
		5550	735	51.68	18100	2397	168.53			
	21	4140	548	38.53	13990	1853	130.28	48000	1701	119.59
		3960	525	36.91	15570	2062	144.97	50500	1794	126.13
		3800	503	35.36	15190	2012	141.46			

TABLA 7.2:

PROMEDIO, DESVIACION ESTANDAR Y COEFICIENTE DE VARIACION POR GRUPO
(entre paréntesis valores en kg/cm²)

GRUPO	CURADO ACELERADO	CURADO NORMAL	CURADO NORMAL
	3"x 6" psi	3"x 6" psi	6"x 12" psi
1	X = 3117 (219.15) σ = 59.5 (4.18) V = 1.91 %	X = 5018 (352.80) σ = 264.4 (18.59) V = 5.27 %	X = 4786 (337.19) σ = 50.2 (3.53) V = 1.10 %
2	X = 3372 (237.08) σ = 80.9 (5.69) V = 2.40 %	X = 5171 (363.56) σ = 111.8 (7.86) V = 2.16 %	X = 4828 (339.44) σ = 74.3 (3.13) V = 1.61 %
3	X = 3189 (224.21) σ = 41.1 (2.89) V = 1.29 %	X = 5063 (355.96) σ = 305.2 (21.45) V = 6.03 %	X = 4700 (330.44) σ = 44.5 (3.13) V = 1.00 %
4	X = 2646 (186.03) σ = 120.9 (8.50) V = 4.57 %	X = 4706 (330.86) σ = 68.8 (4.84) V = 1.46 %	X = 4627 (325.31) σ = 57.9 (4.08) V = 1.31 %
5	X = 2360 (165.92) σ = 109.6 (7.70) V = 4.64 %	X = 4468 (314.13) σ = 185.7 (13.05) V = 4.13 %	X = 4313 (303.23) σ = 99.7 (7.01) V = 2.42 %
6	X = 2647 (186.10) σ = 94.9 (6.67) V = 3.58 %	X = 4690 (329.74) σ = 203.1 (14.28) V = 4.33 %	X = 4274 (300.49) σ = 120.9 (8.50) V = 2.96 %
7	X = 2436 (171.27) σ = 35.0 (2.46) V = 1.44 %	X = 4529 (318.42) σ = 114.6 (8.06) V = 2.53 %	X = 4248 (298.66) σ = ----- V = -----
8	X = 2252 (158.33) σ = 47.6 (3.35) V = 2.11 %	X = 4371 (307.31) σ = 190.5 (13.39) V = 4.36 %	X = 4568 (321.16) σ = 51.6 (3.63) V = 1.18 %
9	X = 1338 (94.07) σ = 26.1 (1.84) V = 1.95 %	X = 3364 (236.51) σ = 127.0 (8.93) V = 3.77 %	X = 3289 (231.24) σ = 25.5 (1.79) V = 0.81 %
10	X = 1871 (131.54) σ = 29.8 (2.09) V = 1.59 %	X = 4007 (281.72) σ = 86.4 (6.08) V = 2.16 %	X = 3962 (278.56) σ = 12.7 (0.89) V = 0.34 %

TABLA 7.2 (CONTINUACION): (entre paréntesis valores en kg/cm²)

GRUPO	CURADO ACELERADO 3"x 6" psi	CURADO NORMAL 3"x 6" psi	CURADO NORMAL 6"x 12" psi
11	X = 1587 (111.58) σ = 87.2 (6.13) V = 5.49 %	X = 3681 (258.80) σ = 68.5 (4.82) V = 1.86 %	X = 3532 (248.32) σ = 340.1 (23.91) V = 10.08 %
12	X = 1813 (127.47) σ = 27.6 (1.94) V = 1.52 %	X = 3939 (276.94) σ = 167.9 (11.80) V = 4.26 %	X = 4097 (288.05) σ = 91.9 (6.46) V = 2.35 %
13	X = 1686 (118.54) σ = 181.5 (12.76) V = 10.77 %	X = 3803 (267.38) σ = 82.5 (5.80) V = 2.17 %	X = 3586 (252.12) σ = 61.5 (4.33) V = 1.80 %
14	X = 1594 (112.07) σ = 232.4 (16.34) V = 14.58 %	X = 3692 (259.57) σ = 68.9 (4.84) V = 1.87 %	X = 3487 (245.16) σ = 208.6 (14.67) V = 6.26 %
15	X = 1852 (130.21) σ = 73.5 (5.17) V = 3.97 %	X = 3984 (280.10) σ = 78.1 (5.49) V = 1.96 %	X = 3865 (271.74) σ = 127.3 (8.95) V = 3.45 %
16	X = 1100 (77.34) σ = 43.1 (3.03) V = 3.92 %	X = 3020 (212.33) σ = 90.3 (6.35) V = 2.99 %	X = 2899 (203.82) σ = 198.0 (13.92) V = 7.15 %
17	X = 1312 (92.24) σ = 49.8 (3.50) V = 3.80 %	X = 3328 (233.98) σ = 51.3 (3.60) V = 1.54 %	X = 3088 (217.11) σ = 42.4 (2.98) V = 1.44 %
18	X = 1085 (76.28) σ = 62.6 (4.40) V = 5.77 %	X = 2996 (210.64) σ = 63.4 (4.46) V = 2.11 %	X = 2758 (193.91) σ = 59.4 (4.18) V = 2.26 %
19	X = 640 (45.00) σ = 8.0 (0.56) V = 1.25 %	X = 2224 (156.36) σ = 119.8 (8.42) V = 5.38 %	X = 2019 (141.95) σ = 62.9 (4.42) V = 3.26 %
20	X = 722 (50.76) σ = 36.7 (2.58) V = 5.08 %	X = 2372 (166.77) σ = 61.4 (4.32) V = 2.59 %	X = 2212 (155.52) σ = 53.7 (3.78) V = 2.54 %
21	X = 525 (36.91) σ = 22.5 (1.58) V = 4.29 %	X = 1976 (138.93) σ = 109.1 (7.67) V = 5.52 %	X = 1830 (128.66) σ = 65.8 (4.62) V = 3.76 %

TABLA 7.3:

PROMEDIO, DESVIACION ESTANDAR Y COEFICIENTE
DE VARIACION POR MEZCLA
(entre paréntesis valores en kg/cm²)

MEZCLA	CURADO ACELERADO	CURADO NORMAL	CURADO NORMAL
	3"x 6" psi	3"x 6" psi	6"x 12" psi
A	X = 3226 (226.81) σ = 131.5 (9.24) V = 4.08 %	X = 5084 (357.44) σ = 78.6 (5.52) V = 1.55 %	X = 4775 (335.69) σ = 66.6 (4.68) V = 1.40 %
B	X = 2251 (179.35) σ = 165.4 (11.63) V = 7.35 %	X = 4621 (324.91) σ = 133.0 (9.35) V = 2.88 %	X = 4405 (309.68) σ = 193.5 (13.61) V = 4.39 %
C	X = 2009 (141.22) σ = 588.1 (41.34) V = 29.27 %	X = 4008 (281.8) σ = 632.0 (44.43) V = 15.77 %	X = 4035 (283.69) σ = 665.6 (46.79) V = 16.49 %
D	X = 1757 (123.53) σ = 150.1 (10.55) V = 8.54 %	X = 3876 (272.47) σ = 172.0 (12.09) V = 4.44 %	X = 3864 (271.64) σ = 295.1 (20.74) V = 7.64 %
E	X = 1711 (120.27) σ = 130.8 (9.19) V = 7.64 %	X = 3826 (269.02) σ = 147.4 (10.36) V = 3.85 %	X = 3646 (256.34) σ = 196.0 (13.78) V = 5.38 %
F	X = 1166 (81.95) σ = 127.0 (8.93) V = 10.89 %	X = 3115 (218.98) σ = 185.1 (13.02) V = 5.94 %	X = 2915 (204.94) σ = 165.6 (11.64) V = 5.68 %
G	X = 629 (44.22) σ = 99.0 (6.96) V = 15.73 %	X = 2191 (154.02) σ = 200.1 (14.07) V = 9.13 %	X = 2020 (142.04) σ = 191.0 (13.43) V = 9.46 %

MEZCLA A: Grupos 1, 2 y 3
MEZCLA B: Grupos 4, 5 y 6
MEZCLA C: Grupos 7, 8 y 9
MEZCLA D: Grupos 10, 11 y 12

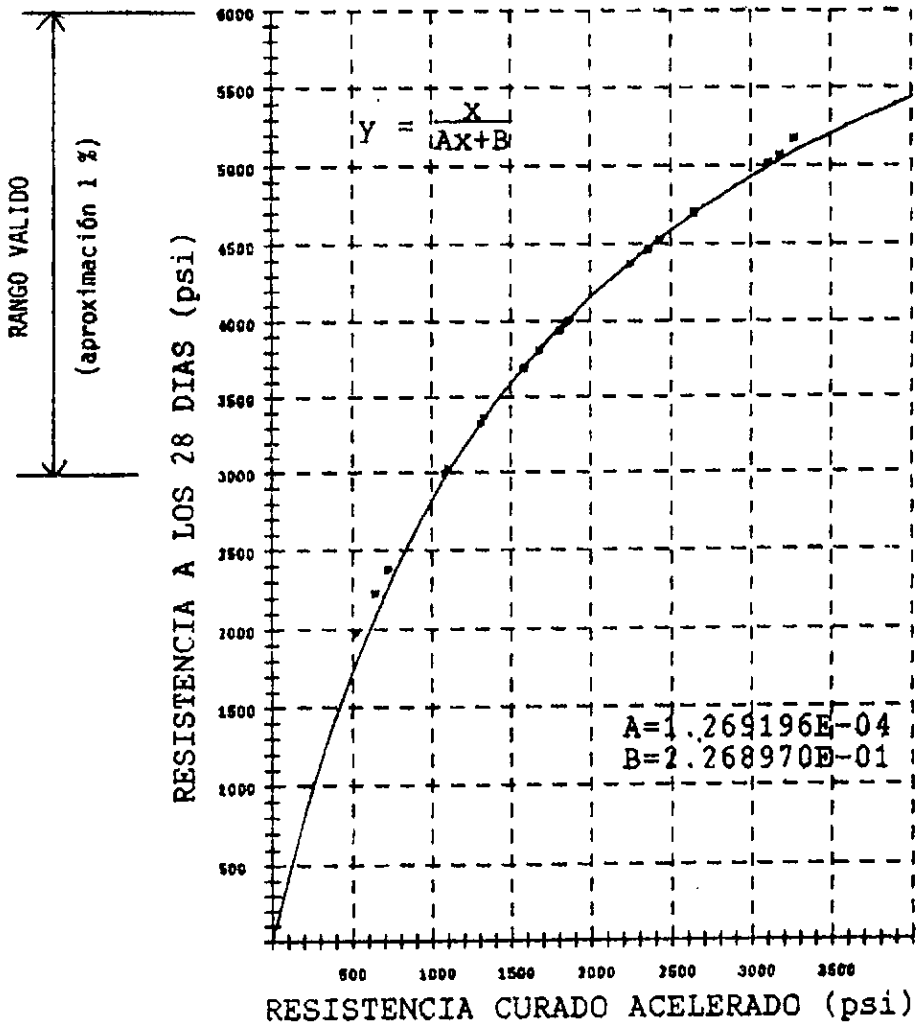
MEZCLA E: Grupos 13, 14 y 15
MEZCLA F: Grupos 16, 17 y 18
MEZCLA G: Grupos 19, 20 y 21

TABLA 7.4: RESUMEN Y COMPARACION DE RESULTADOS

X = promedio resistencia curado acelerado (psi)
 Y = promedio resistencia curado normal a los 28 días (psi)
 Y1 = valor de la ecuación de regresión hiperbólica para X (psi)
 X/Y = proporción del esfuerzo desarrollado en curado acelerado
 Y1/Y = comparación de los valores de resistencia encontrados por medio de la ecuación hiperbólica y experimentalmente.

GRUPO	X	Y	Y1	X/Y	Y1/Y
1	3117	5018	5007.19	0.621163	0.997844
2	3272	5171	5149.11	0.652098	0.995767
3	3189	5063	5048.73	0.629863	0.997182
4	2646	4706	4702.11	0.562260	0.999173
5	2360	4468	4483.05	0.528200	1.003346
6	2647	4690	4702.82	0.564392	1.002734
7	2436	4529	4544.16	0.537867	1.003347
8	2252	4371	4392.26	0.515213	1.004864
9	1338	3364	3372.69	0.397740	1.002584
10	1871	4007	4029.17	0.466932	1.005532
11	1587	3681	3705.19	0.431132	1.006570
12	1813	3939	3967.16	0.460269	1.007148
13	1686	3803	3824.14	0.443334	1.005580
14	1594	3692	3713.83	0.431744	1.005912
15	1852	3984	4009.07	0.464859	1.006293
16	1100	3020	3001.29	0.364238	0.993806
17	1312	3328	3334.90	0.394230	1.002072
18	1085	2996	2975.83	0.362149	0.993266
19	640	2224	2077.07	0.287769	0.933936
20	722	2372	2266.64	0.304384	0.955582
21	525	1976	1788.57	0.265688	0.905149

FIGURA 7.1: GRAFICA CURADO ACELERADO CONTRA CURADO NORMAL
(Coeficiente de correlación $r = 0.99$)



VIII. DISCUSION DE RESULTADOS

La ecuación de regresión de tipo hiperbólica, que relaciona los valores de curado acelerado con los de curado normal se calculó en base a los resultados de los valores promediados de cada grupo, y no de los promedios de los tres grupos para una misma resistencia especificada, pues como puede verse en la tabla 7.3 los coeficientes de variación de mezcla a mezcla son sumamente altos y de utilizar estos valores se induciría un error considerable. Por el contrario, los coeficientes de variación en cada grupo son bastante aceptables y están conforme a lo establecido en ACI 214-77, lo que significa que es más congruente encontrar dicha relación a partir de una regresión con estos valores.

El hecho de que los coeficientes de variación en cada uno de los tres grupos para una misma resistencia de diseño sean altos, tiene una razón lógica porque, a pesar de que se trató de repetir cada mezcla de igual forma, la relación agua-cemento (w/c) no fue la misma, ya sea por influencia de humedad en los agregados -especialmente en la arena- o bien porque se añadió más o menos cemento, lo cual es razonable cuando no se tiene suficiente experiencia en la elaboración de mezclas de concreto; esto se nota especialmente en la mezcla C, para los grupos 7, 8 y 9, donde la variación en los resultados es mayor. Sin embargo, para fines prácticos y para la validez de la ecuación, el procedimiento es correcto.

Se consiguió, sin embargo, un rango amplio en las resistencias de las mezclas, lo cual era muy importante para que los puntos obtenidos quedaran lo suficientemente separados y así poder apreciar el comportamiento de la gráfica a lo largo del intervalo.

En la tabla 7.4 se muestra como varía la resistencia desarrollada en 48 horas (X), a través del método de curado acelerado autógeno, con la resistencia alcanzada a los 28 días de curado normal (Y); también se relacionan estos últimos (Y) con los calculados por la ecuación encontrada (Y1). Como era de esperarse, el porcentaje de la resistencia potencial del concreto alcanzada en ensayos de curado acelerado autógeno en 48 horas, varía con la resistencia de la mezcla; es decir, a mayor resistencia el porcentaje del esfuerzo desarrollado es mayor y se alcanzan valores hasta del 65% en las mezclas más ricas; esto es lógico porque para tener resistencias mayores en una mezcla, debe haber más cemento en la misma, por tanto el calor liberado en la hidratación del cemento es mayor y esto acelera más el proceso.

Como puede comprobarse en la misma tabla, para resistencias mayores a 3000 psi (20 MPa) los valores se acercan a la ecuación encontrada con una aproximación de 11%; sin embargo, para resistencias menores hay una tendencia de desviación cada vez mayor. Cuando se diseña una estructura de concreto, ordinariamente se hace con mezclas de concreto con resistencias especificadas supe-

riores a las 3000 psi (20 MPa); esto significa que la ecuación encontrada es perfectamente aplicable, para predecir con confiabilidad la resistencia a los 28 días de una muestra de concreto que esté especificada por encima de las 3000 psi (20 MPa), siempre y cuando se utilice una cámara de curado autógeno aislada térmicamente de la misma forma y el cemento sea del mismo tipo.

Actualmente, el cemento que se produce en Guatemala contiene puzolanas, lo que hace que el calor liberado en la hidratación del cemento sea menor; si se utiliza otro tipo de cemento es razonable que la ecuación encontrada varíe considerablemente.

En relación al uso de probetas de dimensiones reducidas, los resultados obtenidos son similares a los encontrados por el Ing. Oscar Manuel Velázquez Coronado y la Ing. Adela Castañeda López. Puede afirmarse nuevamente que no existe una diferencia significativa, en ensayos de compresión del concreto, si se usan probetas cilíndricas de 3"x 6" (76 x 152 mm) en vez de las tradicionales probetas estándar de 6"x 12" (152 x 305 mm).

Los retenedores con neopreno, en el ensayo a compresión de las probetas de concreto, funcionaron bien y simplificaron el procedimiento de ensayo porque se evita el cabeceo de los cilindros; con ellos se asegura que la fuerza se aplica uniformemente sobre la superficie del cilindro y se evita la concentración de esfuerzos; cuando se ensaya con retenedores la falla en el con-

creto es astillosa vertical por efecto de tensión secundaria y no cónica, y el error al que puede inducirse con su uso es mínimo, lo que pudo comprobarse al ensayar algunos especímenes de prueba de una misma mezcla con y sin retenedores.

IX. CONCLUSIONES

1. Se comprobó la hipótesis de que puede estimarse con suficiente precisión y confiabilidad, la resistencia a los 28 días de una muestra de concreto, con de ensayos de curado acelerado autógeno, a través de la relación de tipo hiperbólica:

$$Y = \frac{X}{0.0001269196 X + 0.2268969856}$$

donde, X : esfuerzo a compresión del concreto en ensayos de curado acelerado autógeno en psi.

Y : estimación del esfuerzo a compresión del concreto a los 28 días de curado normal en psi.

la cual es válida con una aproximación de $\pm 1\%$ para valores de X mayores a 3000 psi, siempre y cuando se utilice la misma cámara de curado autógeno -u otra con las mismas características- y el mismo tipo de cemento (portland con puzolanas).

2. El curado acelerado autógeno es un excelente método para control de calidad del concreto, que en 48 horas desarrolla una parte bastante significativa de la resistencia alcanzada en 28 días de curado normal (se obtienen valores hasta del 65% en las mezclas más ricas y del 27% para las más pobres), lo que permite que los resultados obtenidos por este procedimiento sean precisos y confiables. Tiene la ventaja, sobre otros métodos de

curado acelerado, de ser un procedimiento muy económico, ya que no necesita de ninguna fuente de energía externa. Comparado con otros métodos tiene la desventaja de que es el procedimiento más lento, pues en los demás se pueden obtener los resultados a las 24 horas.

X. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda implementar el método de curado acelerado autógeno, como un método para control de calidad del concreto, seguro, confiable y económico. Es conveniente seguir investigando, con el fin de obtener más información, ya que este método se ha utilizado muy poco, especialmente en Guatemala.

2. Se recomienda el uso de probetas de dimensiones reducidas en los ensayos a compresión del concreto, ya que la diferencia con las probetas estándar no es significativa. Esto permite poder hacer más pruebas a un menor costo; además el procedimiento de moldeado de los cilindros reducidos es más sencillo y práctico.

3. Una de las desventajas del método autógeno, es que los resultados se tienen hasta las 48 horas después de moldeados los cilindros, sin embargo hay que tener en cuenta que el ensayo propuesto por la norma ASTM C 684 requiere que las probetas sean del tamaño estándar; ahora, si se trabaja con probetas reducidas y teniendo en cuenta que el volumen de concreto en el cilindro es mucho menor, es posible que el tiempo requerido para tener resultados confiables sea también menor. Será interesante por tanto hacer una nueva investigación, recomendable para un futuro trabajo de tesis, para calcular el tiempo óptimo de curado acelerado autógeno haciendo pruebas a las 24 y 48 horas.

4. Es conveniente disponer, en el laboratorio de materiales de la U.R.L., de un tanque de curado normal, que puede consistir en una pila de 36"x 180" (460 x 92 cm), o mayor si es posible, con una altura de 25" (64 cm), que tenga un chorro de agua y su respectivo desagüe; esto facilitará mucho el procedimiento de las prácticas de curado del concreto

5. Los recipientes individuales aislados térmicamente son más recomendables para ensayos de curado acelerado autógeno, porque simplifican mucho el procedimiento para cumplir con los tiempos que se indican en el ensayo; además, con recipientes individuales se pueden tomar las muestras directamente en las obras de construcción, y luego pueden transportarse con facilidad al laboratorio para ensayar los cilindros. Con la cámara de curado autógeno, diseñada para nueve cilindros, se tuvo problema al colocar los cilindros en sus compartimientos, pues se necesitaba hacer tres mezclas simultáneamente y trabajar con mucha prisa, y no siempre se logró cerrar la cámara en el tiempo establecido. Los recipientes individuales pueden hacerse utilizando tarros de lata de pintura aislados en su interior con poliuretano.

6. Puede aplicarse el principio de curado acelerado autógeno en la fabricación de ladrillos, bloques, adoquines, etc. En los lugares donde se fabriquen estos materiales puede disponerse de un cuarto aislado térmicamente con poliuretano donde puedan almacenarse, durante 48 horas, después de ser

fabricados; en este tiempo desarrollarán una parte significativa de su resistencia, para evitar que se rompan fácilmente a la hora de almacenar y transportar el producto; incluso podría acelerarse el proceso de fabricación e incrementar la producción a un costo relativamente bajo.

7. Se recomienda el uso de retenedores de neopreno en el ensayo a compresión de probetas cilíndricas de concreto, pues se obtienen buenos resultados y facilita mucho el procedimiento; sin embargo es conveniente continuar la investigación sobre el efecto que producen en estas pruebas, para así poder determinar el diseño más adecuado e incluso estudiar si existe un material distinto del neopreno, que sea más efectivo; esto da pie a otro nuevo punto de tesis que será de mucho interés.

XI. ANEXOS

- ANEXO 1: CARACTERISTICAS DE LA ESPUMA RIGIDA DE POLIURETANO.
- ANEXO 2: COMPOSICION QUIMICA DEL CEMENTO
- ANEXO 3: TABLA DE CONVERSIONES
- ANEXO 4: ESQUEMA DE LA CAMARA DE CURADO AUTOGENO.

ANEXO 1: CARACTERISTICAS DE LA ESPUMA RIGIDA DE POLIURETANO

a) Comparación de la eficiencia de aislamiento:

MATERIAL	FACTOR K*	R PARA 1" DE ESPESOR	VALOR EQUIVALENTE DEL ESPESOR DE AISLAMIENTO
Poliuretano	0.11	9.09	1.00" 2.54 cm
Fibra de vidrio	0.22	4.54	2.00" 5.08 cm
Duopor	0.24	4.16	2.18" 5.54 cm
Corcho	0.27	3.70	2.50" 6.35 cm
Lana mineral	0.30	3.33	2.73" 6.93 cm
Espuma de vidrio	0.38	2.63	3.50" 8.89 cm
Vermiculita	0.48	2.08	4.30" 10.92 cm

* El valor más bajo de K y el más alto de R, determinan al material más efectivo para aislamiento.

b) Propiedades físicas:

1. Densidad 2 lb/pie³ (35 kg/m³)
2. Resistencia a la compresión 27 psi (0.19 MPa)
3. Resistencia a la tensión 45 psi (0.31 MPa)
4. Estabilidad dimensional (% vol):
 - a) temperatura ambiente..... 0 %
 - b) 68 °F (20 °C), seco, 1 semana..... 1.0 %
 - c) 158 °F (70 °C), 100% H.R., 1 semana..... 4.9 %
5. Rango de temperaturas de servicio:
 - a) mínima -300 °F (-185 °C)
 - b) máxima 257 °F (125 °C)
6. Temperatura de distorsión 320 °F (160 °C)
7. Porcentaje de celdas cerradas 95 %
8. Absorción de agua..... 0.0033 lb/pie²-pulg (0.0063 kg/m²-cm)
9. Conducitividad térmica..... 0.12 BTU/h-pie² °F/pulg (0.0016 W/m-°K).

ANEXO 2: COMPOSICION QUIMICA DEL CEMENTO

(cfr. Referencia bibliográfica número 9, páginas 20-21).

Se puede considerar que los cementos portland están formados por cuatro compuestos principales, que a continuación se dan con sus fórmulas químicas y abreviaturas:

1. Silicato tricálcico	$3\text{Ca}\cdot\text{SiO}_2$	= C_3S
2. Silicato dicálcico	$2\text{Ca}\cdot\text{SiO}_2$	= C_2S
3. Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	= C_3A
4. Aluminoferrita tetracálcica	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	= C_4AF

Según los conocimientos actuales de la química del cemento, se sabe que estos compuestos tienen las siguientes características:

a. El silicato tricálcico endurece rápidamente y es el principal factor de fraguado inicial, del endurecimiento y resistencia del concreto hasta los 28 días. En general, la resistencia temprana del cemento es mayor al aumentar los porcentajes de C_3S .

b. El silicato dicálcico endurece lentamente y contribuye al aumento de resistencia a edades mayores de una semana hasta un año.

c. El aluminato tricálcico libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de endurecimiento. También contribuye ligeramente a la resistencia temprana, principalmente hasta un día. Los cementos con bajo contenido de este compuesto aumentan su resistencia a sulfatos.

d. La formación de aluminoferrita tetracálcica reduce la temperatura de clínquerización, actuando como fundente y ayudando, por tanto, a la fabricación del cemento. Se hidrata con relativa rapidez pero contribuye muy poco a la resistencia.

ANEXO 3: TABLA DE CONVERSIONES

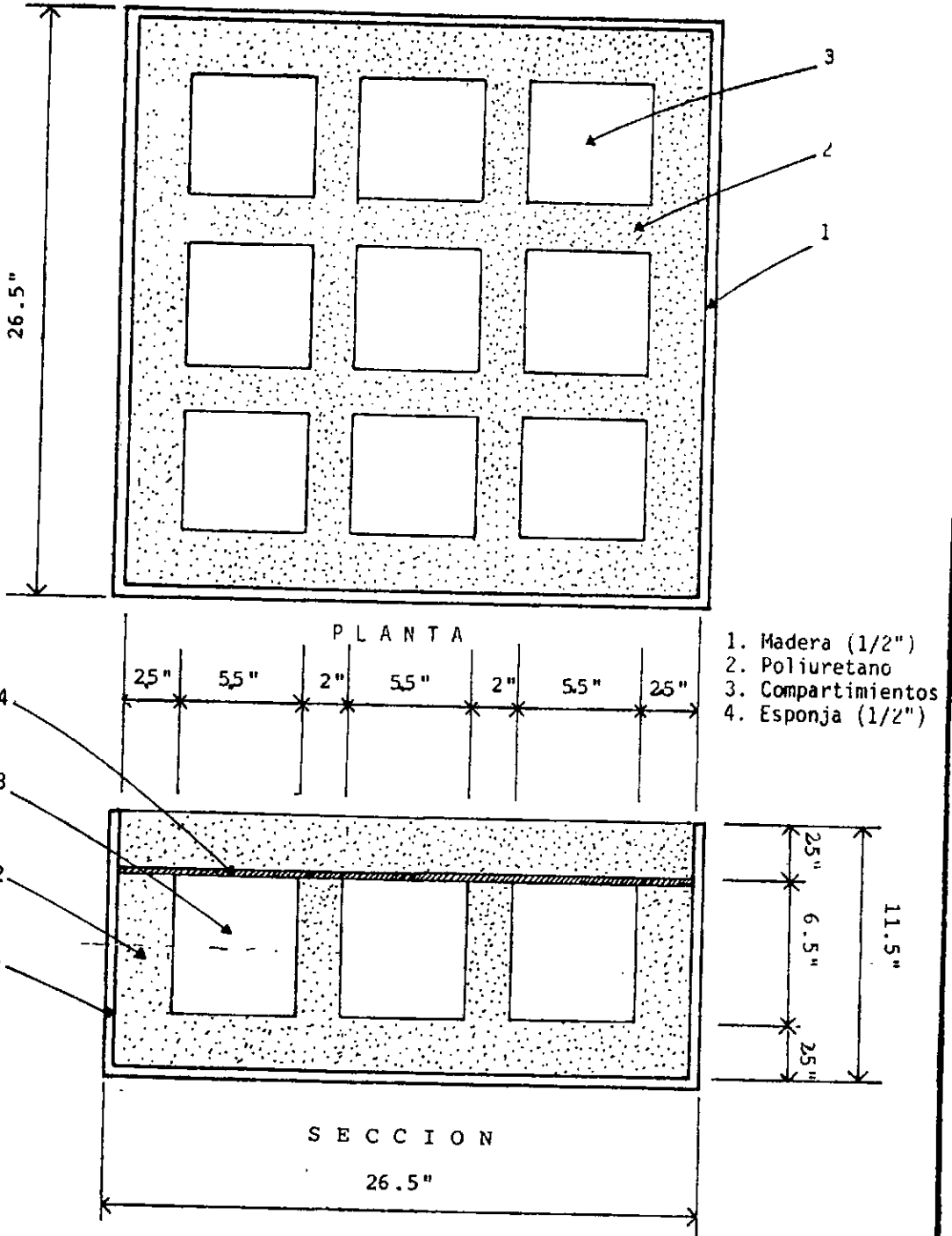
Multiplique	para convertir	en	
2.5400	pulgadas	centímetros	0.3937
0.3048	pies	metros	3.2808
6.4516	pulgadas ²	centímetros ²	0.1550
16.3871	pulgadas ³	centímetros ³	0.0610
0.0283	pie ³	metro ³	35.3147
0.4536	libras	kilogramos	2.2046
14.2233	lb/pulg ²	kg/cm ²	0.0703
0.0069	lb/pulg ²	MPa	144.9275
16.0185	lb/pie ³	kg/m ³	0.0624
1.3570	lb-pie	joules	0.7370
	Para obtener	de	multiplique

Fórmula para conversión de temperaturas:

$$^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32$$

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) / 1.8$$

ANEXO 4: ESQUEMA DE LA CAMARA DE CURADO AUTOGENO



XII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Ortiz Murga, Víctor Gabriel
ESTIMACION DE LA RESISTENCIA A COMPRESION DEL CONCRETO A LOS
28 DIAS CON BASE A ENSAYOS DE PROBETAS SOMETIDAS A CURADO A-
CELERADO
Tesis. Facultad de Ingeniería USAC. 1972
2. Guzmán De León, Julio Víctor
EL CURADO ACELERADO COMO METODO PARA CONTROL DE CALIDAD DEL
CONCRETO
Tesis. Facultad de Ingeniería UMG. 1976
3. Velásquez Coronado, Oscar Manuel
ENSAYO PARA DETERMINAR LA CALIDAD DEL CONCRETO EN BASE A LA
RESISTENCIA A COMPRESION DE PROBETAS DE CONCRETO DE
DIMENSIONES REDUCIDAS
Tesis. Facultad de Ingeniería URL. 1990
4. ASTM C 684-74
STANDARD METHOD OF MAKING, ACCELERATED CURING, AND TESTING OF
CONCRETE COMPRESSION TEST SPECIMENS
5. ACI 214-77
PRACTICA RECOMENDABLE PARA LA EVALUACION DE LOS RESULTADOS DE
LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA DEL CONCRETO
Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. 1989

6. ACI Committee 214
USE OF ACCELERATED STRENGTH TESTING
Concrete International. March 1981

7. ASTM
ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS
Volumen 14. 1986.

8. Castañeda López, Adela
DETERMINACION DEL TIEMPO OPTIMO DE CURADO BAJO CALOR PARA
PROBETAS CILINDRICAS DE CONCRETO DE DIMENSIONES REDUCIDAS
Tesis. Facultad de Ingeniería URL. 1990

9. Portland Cement Association
PROYECTO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO
Editorial LIMUSA. México, 1981.