



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**DETERMINAR CURVA DE EXTRAPOLACION DE RESISTENCIA
CILINDRICA DE CONCRETO CON RESPECTO A LAS
VARIACIONES DE LA TEMPERATURA APLICANDO EL METODO
DE MADUREZ.**

Trabajo Especial de Grado I

Autores:

Flores C. Cesar A.

González R. Jean C.

VALENCIA, OCTUBRE DE 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**DETERMINAR CURVA DE EXTRAPOLACION DE RESISTENCIA
CILINDRICA DE CONCRETO CON RESPECTO A LAS
VARIACIONES DE LA TEMPERATURA APLICANDO EL METODO
DE MADUREZ.**

Trabajo Especial de Grado I

Tutor Académico:
Ing. Fernando Villalobos.

Autores:
Flores C. Cesar A.
González R. Jean C.

VALENCIA, OCTUBRE DE 2010

AGRADECIMIENTOS

Hemos de agradecer a las siguientes personas:

- Ing. Fernando Villalobos. Tutor y asesor de la investigación.
- Ing. Miguel Fraino. Por iniciar el trabajo de la investigación y por habernos aportado el tema a investigar.
- Ing. Randol Rivero. Por habernos facilitado el laboratorio de materiales de ensayos de SIKA S.A. de Venezuela, por sus comentarios y apoyo.
- Ing. Francisco Alloca. Por los comentarios, sugerencias, apoyo incondicional y aplicaciones suministradas.
- Ing. Alejandro Pocaterra. Por las indicaciones y consejos dados.
- Al personal que labora en las empresas de SIKA S.A. de Venezuela y ORMIGOTI C.A.

A todos aquellos por el apoyo y a su vez por facilitarnos herramientas necesarias, para el desarrollo de la presente investigación.

RESUMEN

El método de madurez es una alternativa de ensayo no destructivo que combina los efectos de temperatura y tiempo en el curado del concreto. Se han realizado numerosas investigaciones para explicar el efecto que se genera en la temperatura del concreto. Este efecto es determinado por la hidratación de las partículas de los granos del cemento, estableciendo así como son los cambios de temperatura o desprendimiento de calor correspondiente a cada una de las reacciones que componen la estructura del cemento Portland tipo I. Este permite explicar cómo se desarrolla la ganancia de resistencia del concreto a una determinada edad, lo que permite establecer como un estimador y evaluador de las propiedades mecánicas del mismo. Una vez precisado este concepto se puede construir una curva característica de resistencia respecto a un índice de madurez o una edad equivalente a una mezcla específica de concreto. Este procedimiento se lleva a cabo mediante el registro de temperaturas para determinar un índice de madurez y la edad equivalente. Posterior a esto se realizan ensayos a compresión a distintas edades, estableciendo un número como mínimo de 5 ensayos. Próximamente se dibuja sobre un gráfico la edad equivalente o índice de madurez respecto a el ensayo a compresión correspondiente a la edad. Y por último se desarrolla una relación funcional que permita describir el comportamiento del conjunto de datos, luego de esto, se puede tener una base en la toma de decisiones respecto a un proyecto constructivo a temprana edad.

INDICE GENERAL

	PÁG.
Certificado de Aprobación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	VI
Resumén.....	VII
Indice de Ilustraciones	XV
Indice de Tablas.....	XVII
Introducción	01
CAPITULO I. EL PROBLEMA	
Planteamiento del problema	03
Objetivos de la investigación	04
Objetivo general.....	04
Objetivos específicos.....	04
Justificación	05
Limitaciones.	06
Alcances.....	07
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	
Antecedentes de la Investigación.	08
Concreto.....	08
Componentes del Concreto	09
Agua para Concreto	09
<i>Agua de Mezclado</i>	10
<i>Aguas de Curado</i>	10

Agregados.....	11
Agregados Controlados.....	11
Granulometria.....	12
<i>Cemento</i>	12
Composicion del cemento.....	12
El Clinker.....	14
Finura.....	16
Resistencia Mecanica del concreto.....	16
Ley Fundamental.....	16
Condiciones del Ensayo a Compresion.....	19
Colocacion de Remates.....	20
Aplicación Axial de la Carga.....	21
Velocidad de Carga.....	21
Tamaño y Forma de las Probetas.....	21
Resistencia a la Traccion.....	23
Resistencia al Corte.....	23
Resistencia al Corte en el Concreto.....	24
Propiedades del Concreto Endurecido.....	28
Propiedades del Concreto Fresco.....	28
El Asentamiento como Indice del ontenido del Agua.....	29
Retraccion.....	30
Mecanismos de Lubricacion.....	31
Caracteristicas a Considerar Según el Mecanismo de Lubricacion.....	32
Tiempo de Fraguado.....	32
Relacion Agua Cemento.....	34
Proceso de Hidratacion del Cemento.....	35
Hidratacion del Cemento.....	36
Tiempo de fraguado en funcion de la hidratacion.....	37

Liberacion de calor.....	38
Calor de hidratacion.....	41
Reacciones de hidratacion.....	46
Ensayos no destructivos.....	46
Tipos de ensayos no destructivos.....	46
Madurez.....	47
Reseña historica de la madurez.....	48
Procesos de las funciones de madurez.....	49
Funcion de la ganancia de fuerza.....	60
Funciones de madurez debido a condiciones de curado isotermico.....	61
Efecto de la temperatura sobre la ganancia de fuerza.....	63
Tiempo de fraguado y madurez.....	68
Reacciones entre fuerza y madurez.....	70
Desarrollo de fuerza-madurez.....	73
Glosario de terminos.....	68

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Tipo de investigación.....	79
Tecnicas de recoleccion de informacion en la literatura especializada.....	80
Revisiones en literaturas especializadas.....	80
Web site.....	80
Entrevistas informales.....	81
Procedimientos para la ejecucion de las investigacion.....	81
Objetivos de experimento.....	83
Magnitud a medir.....	83
Precision requerida.....	84
Metodo empleado.....	85

Equipos a utilizar para el desarrollo de la investigacion	86
Determinacion del numero de muestras a ensayar.....	87
Deteccion y control de errores	88
Explicacion del proceso empleado para la obtencion de los puntos caracteristicos de resistencia	88
Elaboracion de las probetas a ensayar	88
Etapa de pre-curado.....	89
Etapa de curado	89
Etapa de post-curado	89
Ensayo de probeta	90
Registro de data y mediciones	90
CAPÍTULO IV. PRESENTACION DE LOS RESULTADOS	
presentacion de los resultados	100
analisis de resultados	106
criterio de analisis: indice de madurez.	106
Tendencias logaritmicas.....	106
Tendencias Potenciales	106
Tendencias Hiperbolicas	107
Criterio de Analisis: Edad Equivalente	107
Criterio de Analisis: Indice de Madurez Vs. Edad Equivalente.....	108
Criterio de Analisis: Indice de Madurez	109
Criterio de Analisis: Edad Equivalente	110
Criterio de Analisis: Indice de Madurez Vs. Edad Equivalente	110
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111

Conclusiones	111
Recomendaciones	114
Referencia Bibliografica.	116
Apendices.....	119

INDICE DE TABLAS

Nº 0. Composicion del Cemento	15
Nº 1. Factores de correccion por tipo de Probetas	22
Nº 2. Configuracion de las propiedades de Cemento .	37
Nº 3. La porosidad de la Pasta DE Cemento Modelo despues de 5 mil siglos de Hidratacion Verificacion	39
Nº 4. Calor Liberado por los Compuestos del Cemento para varias Edades	42
Nº 5. Contantes de Proporcion para Concreto y Mortero	65
Nº 3.1. Hoja de Calculo de Informacion General de los Ensayos de las Probetas Cilindricas.	91
Nº 3.2. Hoja de Calculo de cuadro de Resumen de Resultados Agrupados por Cilindros	93
Nº 3.3. Hoja de Calculo que representa el Tiempo y la Temperatura de las Mezclas a ensayar	94
Nº 3.4. Hoja de Calculo de Verificacion de Ajuste de Curva considerada	98
Nº 4.1- Casos de Estudio para el Analisis de los datos Experimentales	100
Nº 4.2. Ecuaciones Obtenidad mediante el metodo adoptado (indice de Madurez a 250)	101
Nº 4.3. Ecuaciones Obtenidad mediante el metodo adoptado (indice de Madurez a 210)	102
Nº 4.4. Ecuaciones obtenidas mediante el metodo adoptado edad equivalente)	103

Nº 4.5.a. Analisis de Ajustes	104
Nº 4.5.b. Analisis de Ajuste	105

INTRODUCCIÓN

La idea de la presente investigación es enfocar como se puede predecir la resistencia del concreto a través de un método simplificado, rápido y eficaz que permita servir como alternativa en la predicción de ciertas propiedades mecánicas del mismo.

El concreto u hormigón es un material que se puede considerar constituido por dos partes: una es un producto pastoso y moldeable, que tiene la propiedad de endurecer con el tiempo, y la otra son trozos pétreos que quedan englobados en la pasta. A su vez la pasta queda constituida por agua y un producto aglomerante o conglomerante, que es el cemento. El agua cumple la doble misión de dar fluidez a la mezcla y de reaccionar químicamente con el cemento dando lugar, con ello, a su endurecimiento. Ciertas formas para determinar la resistencia del concreto es mediante ensayos destructivos o ensayos no destructivos. Esto permiten dar una tendencia significativa así como también un comportamiento de como es el funcionamiento del concreto en un proyecto de construcción.

He aquí el enfoque en el estudio del método de madurez, que se considerará como un ensayo no destructivo en las tecnologías, y que es una alternativa para poder predecir y precisar cómo se comporta el desarrollo de la resistencia del concreto así como también el estudio de ciertas propiedades mecánicas.

El método de madurez no es revolucionario cuando se trata de la medición de la resistencia del concreto. Pues los orígenes pueden ser reseñados a trabajos realizados en Inglaterra, por Nurse y McIntosh en 1949 y Saúl en 1951. Sus esfuerzos e concentraron en explicar el principio básico de como los cambios de temperatura y

tiempo del concreto pueden ser relacionados con el desarrollo de su resistencia, es de aquí cuando surge el método de madurez.

Este concepto de madurez conocido como la Ley de Saúl, es válido siempre que la temperatura del concreto no exceda los 50 °C durante las primeras 2 horas, y además que dicha temperatura no excediera 100 °C desde el inicio del mezclado durante las primeras 6 horas.

Este trabajo se encuentra estructurado en (5) capítulos:

En el capítulo I, se refiere al planteamiento del problema, así como a la justificación de la investigación, objetivo general y específicos e indica los alcances de la investigación.

El capítulo II, contiene las bases teóricas, antecedentes y el marco teórico. En los antecedentes se mencionan un método de ensayo no destructivo que se relaciona con la presente investigación. En las bases teóricas se sustentó la metodología aplicada, se indicaron las ecuaciones correspondientes y se mostraron las características principales de los modelos (expresiones matemáticas) a utilizar en el estudio del método de madurez y en el desarrollo del mismo, los cuales permitieron la elaboración de la propuesta.

El capítulo III, se plantea la metodología donde se describe detalladamente el tipo y diseño de la investigación, además de todas las etapas desarrolladas para la obtención de resultados y en secuencia con los objetivos propiamente planteados.

El capítulo IV, se presentan el análisis de resultados de la presente investigación.

Finalmente en el capítulo V, se presentan las conclusiones en función a los objetivos desarrollados, denotando así una propuesta que representa una relación

funcional matemática para la relación entre la resistencia y el índice de madurez que refleja el comportamiento más próximo de como es el desarrollo de la resistencia en el tiempo durante su etapa de curado.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

Planteamiento del Problema

Actualmente, la determinación in situ de la resistencia del concreto es un avance importante que interviene en la garantía de calidad de un proyecto de construcción. Típicamente, los cilindros que son tomados de la misma muestra de concreto usados en proyectos de construcción, son ensayados a compresión para obtener una resistencia a 28 días, de esa muestra de concreto in situ. La hidratación del concreto que controla el desarrollo de la resistencia es afectada principalmente dos factores: tiempo de hidratación y temperatura.

Como existen diferencias en campo con respecto a las condiciones de colocación y la historia termal entre los especímenes de prueba y la estructura real, los cilindros de prueba, algunas veces pueden reflejar de manera inexacta la resistencia real del concreto dentro de la estructura en un tiempo dado. Como por ejemplo: en climas fríos, las estructuras pueden curar más lentamente, y a su vez pueden curar más rápidamente cuando la hidratación del cemento calienta el concreto en los moldes. Dado que no se conoce la resistencia en el lugar, es necesario esperar para asegurarse que el concreto haya alcanzado la resistencia antes de ser desencofrado.

Debe existir una manera confiable para determinar el desarrollo de la resistencia exacta del concreto de la estructura; es allí en donde entra la prueba de madurez, que puede indicar directamente la resistencia en el lugar mediante las variaciones de

temperatura que se presentan en la reacción química (desprendimiento de calor o reacción exotérmica) que ocurre cuando el cemento es hidratado, permitiendo así conocer el índice de madurez en tiempo continuo, el cual podrá determinar la resistencia en tiempo real, inclusive a una temprana edad. Debido a que el ensayo conocido para medir la resistencia cilíndrica deseada (ensayo a compresión) del concreto, es cuando las probetas alcanzan 28 días de edad, lo cual representa un lapso de tiempo amplio. Es por ello que se necesita determinar la resistencia del proyecto constructivo en campo de forma rápida e inmediata, con la finalidad de poder tomar decisiones concretas y precisas en el momento en que es vaciado, es decir, de parar el proceso o aprobar de forma segura la mezcla que se estaría usando en el proyecto constructivo.

Objetivos de la Investigación

Objetivo General

Evaluar el método de madurez para la estimación de la resistencia cilíndrica de varias mezclas de concreto de cemento Portland tipo I a distintas edades.

Objetivos Específicos

- Determinar la mezcla de concreto de cemento Portland tipo I a utilizar.
- Obtener la resistencia cilíndrica de cada diseño de mezcla a distintas edades de cemento Portland tipo I, mediante el ensayo a compresión bajo la NORMA ASTM C39 y la NORMA VENEZOLANA COVENIN 338-2002.

- Aplicar el método de madurez a los diseños de mezclas correspondientes bajo la NORMA ASTM C1074.
- Establecer las relaciones entre Resistencia-Madurez de las mezclas de concreto de cemento Portland tipo I.
- Comparar los resultados obtenidos de las expresiones matemáticas ajustadas de Resistencia-Madurez respecto a los ensayos a compresión bajo la NORMA ASTM C39 y la NORMA VENEZOLANA COVENIN 338-2002.

Justificación

Hoy en día, en la mayoría de los proyectos constructivos se emplea como material de diseño el concreto debido a las características mecánicas y físicas que ofrecen.

La finalidad que justifica esta investigación es obtener a temprana edad la resistencia del concreto y los resultados de algunas propiedades mecánicas en un tiempo justo y rápido antes de los 28 días de edad del concreto de cemento Portland tipo 1, para así evitar retrasos en el proceso constructivo como también economizar los costos del proyecto.

La sencillez, simplicidad y bajo costo del método de madurez hace de éste un procedimiento práctico y útil, capaz de ser empleado para la construcción. Para evitar consecuencias en el fraguado del concreto, se emplea el método de madurez, donde puede usarse como referencia para acelerar la construcción incrementando seguridad; la madurez del concreto hace referencia a la amplitud de la hidratación del cemento, midiéndose con la toma del diferencial de una curva tiempo-temperatura, estableciendo así un índice de madurez.

Una alternativa a la hora de tomar decisiones en una industria, haciendo referencia a todas aquellas que son productoras de concreto premezclado, es que pueden predecir de forma inmediata la resistencia de la mezcla, y si esta mezcla no cumple con la resistencia deseada, la empresa podrá tomar decisiones en función a esta. Además, si presenta otros proyectos constructivos simultáneos, existe la posibilidad de que la mezcla de concreto pueda ser trasladada a dichos proyectos, siempre y cuando las condiciones de la mezcla, y otras variables como: tiempos de traslados y distancias, satisfagan un rango comprendido de resistencia del proyecto en ejecución simultánea para que sea aproveche el uso de esta.

Limitaciones de la Investigación

Las limitaciones presentes en esta investigación son las siguientes:

- La elaboración de las mezclas se realizara en ausencia de aditivos.
- El diseño de mezcla no presenta cambio en los agregados, ni cambios de cemento.
- Las probetas cilíndricas estandarizadas a usar será de 10cm x 20cm. Y se tomará un número mínimo de probetas igual a 4.
- Para cemento Portland tipo 1 y diseños de mezcla sin aditivos, la temperatura de referencia recomendada por la ASTM C1074 es de 0° C para la ecuación de NURSE-SAUL, así como también esta recomienda que el valor de energía de activación para el cálculo de la ecuación de Arrhenius es de 5000K, manteniendo temperaturas específicas de edad equivalente de 25° C.

- Se usará 2 cilindros que serán los testigos registradores de la temperatura de los cilindros.

Alcances

El estudio de la presente investigación, se desarrollo en función a las siguientes delimitaciones:

- La aplicación del método de madurez está sujeto bajo la norma de la ASTM C1074.
- El diseño de mezcla presentará ciertas características granulométricas en cuanto a los tipos de agregados.
- Se realizará el ensayo a compresión de probetas cilíndricas 10cm x 20cm según la norma COVENIN 338, así como el empleo de la norma ASTM C39.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Antecedentes de la Investigación

Medina A. y Sánchez R. Universidad de Carabobo. En Venezuela a la fecha de 2004 realizaron un estudio titulado Pronóstico de la resistencia característica del concreto a partir del ensayo de probetas cilíndricas sometidas a un método de curado acelerado, tomando como base el método ASTM 684-73T. El Objetivo General era pronosticar la resistencia característica del concreto a partir de probetas cilíndricas sometidas a un método de curado acelerado. Como conclusión, la aplicación del método de curado acelerado para la determinación de la resistencia característica del concreto, se basa en el calor, lo que hace que las probetas adquieran una resistencia mayor a la obtenida a partir del proceso de curado convencional a una temprana edad a la cual la probeta cilíndrica ha sido confeccionada.

Bases Teóricas

Concreto

El concreto u hormigón es un material que se puede considerar constituido por dos partes: una es un producto pastoso y moldeable, que tiene la propiedad de endurecer con el tiempo, y la otra son trozos pétreos que quedan englobados en la pasta. A su vez la pasta queda constituida por agua y un producto aglomerante o conglomerante, que es el cemento. El agua cumple la doble misión de dar fluidez a la mezcla y de reaccionar químicamente con el cemento dando lugar, con ello, a su endurecimiento.

El concreto de uso común, o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una revoltura de concreto, se introduce de manera simultánea un quinto participante representado por el aire.

El comportamiento mecánico de este material y su durabilidad en servicio dependen de tres aspectos básicos:

1. Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento o matriz cementante, endurecida.
2. La calidad propia de los agregados, en el sentido más amplio.
3. La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el primer aspecto debe contemplarse la selección de un cementante apropiado, el empleo de una relación agua/cemento conveniente y el uso eventual de un aditivo necesario, con todo lo cual debe resultar potencialmente asegurada la calidad de la matriz cementante.

Componentes del Concreto

Agua para concreto.

El agua es imprescindible en varias etapas de la elaboración del concreto: mezclado, fraguado y curado. El agua de mezclado ocupa normalmente entre 15% y 20% del volumen de concreto fresco y, conjuntamente con el cemento, forman un producto coherente, pastoso y manejable, que lubrica y soporta los agregados, acomodable en los moldes. Simultáneamente esta agua reacciona químicamente con el cemento, hidratándolo y produciendo el fraguado en su acepción más amplia, desde el estado plástico inicial, pasando por lo que llamamos endurecimiento, hasta el desarrollo de resistencias a largo plazo. Por otra parte, el agua de curado es necesaria

para reponer la humedad que se pierde por evaporación luego que el concreto ha sido colocado, compactado y alisado en su superficie; de esta manera se garantiza el normal desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento.

Tanto el agua de mezclado como el agua de curado deben estar libres de contaminantes que puedan perjudicar el fraguado del concreto o que reaccionen negativamente, en estado fresco o endurecido, con alguno de sus componentes o con los elementos embutidos en el concreto, como tuberías metálicas o el acero de refuerzo.

En general, el agua potable es adecuada para elaborar y curar concreto aun cuando la cloración (cuya intensidad varía en cada localidad) puede alterar el comportamiento de los aditivos y la evolución de las resistencias.

Agua de mezclado.

El agua de mezclado cumple dos funciones: hidratar el cemento y proporcionar fluidez y lubricación al concreto. Se estima que en condición de ambiente saturado, el agua requerida para hidratación equivale al 25% en peso del cemento; el resto se evapora. La porción evaporada después que el concreto ha sido compactado y alisado, es la causante de la retracción de secado y de la formación de conductos capilares que interconectan poros; estos se llenan parcialmente de aire y producen concretos menos resistentes y menos durables, por lo que debe usarse el menor volumen de agua que sea posible para obtener la fluidez requerida.

Las impurezas pueden estar en forma de solución (azúcares, sales como carbonatos, cloruros y sulfatos, ácidos) o de suspensión (aceites, materia vegetal, limos, arcillas).

Agua de curado.

La hidratación del cemento comienza al contacto con el agua de mezclado, y desde la superficie de cada grano de cemento hacia el interior; es un proceso muy rápido en los primeros minutos y horas, que se prolonga por varios meses y años siempre que haya humedad suficiente. Durante las primeras horas hay reserva suficiente de agua en el concreto y, luego, se pierde progresivamente por evaporación; primero desaparece el agua de exudación, que es la capa superficial, brillante, que se observa al realizar la compactación del concreto y, ya semiendurecido el concreto, hay una migración y evaporación del agua interna necesaria para la reacción del cemento.

Agregados.

Generalmente se entiende por "agregado" a la mezcla de arena y piedra de granulometría variable. El concreto es un material compuesto básicamente por agregados y pasta cementicia, elementos de comportamientos bien diferenciados.

El agregado se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 4. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm.

Estos conforman el esqueleto granular del concreto y son el elemento mayoritario ya que representan el 80-90% del peso total de concreto, por lo que son responsables de gran parte de las características del mismo. Los agregados son generalmente inertes y estables en sus dimensiones.

La pasta cementicia (mezcla de cemento y agua) es el material activo dentro de la masa de concreto y como tal es en gran medida responsable de la resistencia,

variaciones volumétricas y durabilidad del concreto. Es la matriz que une los elementos del esqueleto granular entre sí.

Agregados Controlados.

Materiales que tienen garantizada su calidad en todos los aspectos. Son producidos en plantas de cierto nivel de tecnificación, donde se lleva un control adecuado mediante los necesarios ensayos rutinarios. Esta situación, que es la ideal para el empleo de agregados, no es la más frecuente en nuestro medio.

Granulometría.

Se entiende por granulometría la composición del material en cuanto a la distribución del tamaño de los granos que lo integran. Esta característica decide, de manera muy importante, la calidad del material para su uso como componente del concreto.

Cemento

Se denomina cemento a un conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava, más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece al reaccionar con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, denominado hormigón o concreto. Su uso está muy generalizado en construcción e ingeniería civil, su principal función la de aglutinante.

El cemento constituye solo aproximadamente de un 10 a un 20% del peso del concreto, siendo de un 89 a 90% de materiales restantes que condiciona la posibilidad de que se desarrollen las propiedades del concreto.

El cemento se obtiene a partir de materias primas abundantes en la naturaleza. Su elaboración se realiza en plantas industriales de gran capacidad, en donde debe ser

controlado estrictamente, lo que redonda en su calidad y en la confiabilidad que sobre el pueda tener el usuario.

Composición del Cemento

Cuando no referimos al cemento, implícitamente hablamos del cemento Pórtland, que es cemento sobre la base del Portland ya que son los productos aglomerantes que se usan casi exclusivamente con fines estructurales.

El cemento Portland es una especie de cal hidráulica perfeccionada. Se produce haciendo que se combinen químicamente unas materia de carácter ácido (sílice y aluminio principalmente). La fabricación del cemento de Portland se da en tres fases:

- Preparación de la mezcla de las materias primas,
- Producción del Clinker y
- Preparación del cemento.

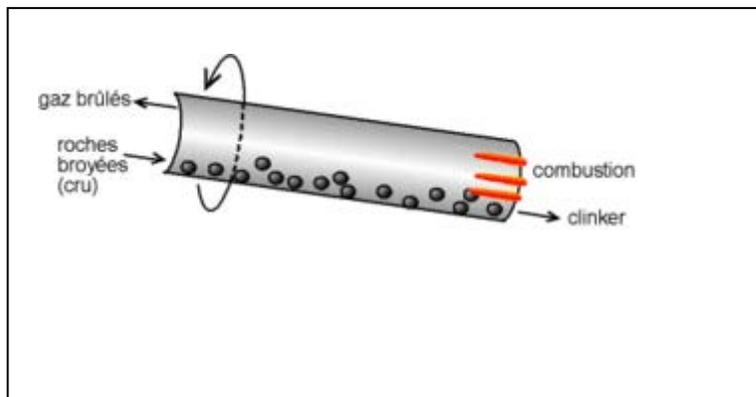


Figura 1. Esquema de un horno. Fuente: 11.

La mezcla es calentada en un horno especial, con forma de un gran cilindro (llamado *kiln*) dispuesto casi horizontalmente, con ligera inclinación, que rota lentamente. La temperatura aumenta a lo largo del cilindro hasta llegar a unos 1400°C, que hace que los minerales se combinen pero sin que se fundan o vitrifiquen.

En la zona de menor temperatura, el carbonato de calcio (calcáreo) se disocia en óxido de calcio y dióxido de carbono (CO_2). En la zona de alta temperatura el óxido de calcio reacciona con los silicatos y forma silicatos de calcio (Ca_2Si y Ca_3Si). Se forma también una pequeña cantidad de aluminato tricálcico (Ca_3Al) y ferroaluminato tetracálcico (Ca_4AlFe). El material resultante es denominado *Clinker*.

El Clinker

Puede ser conservado durante años antes de proceder a la producción del cemento, con la condición de que no entre en contacto con el agua.

La energía necesaria para producir el Clinker es de unos 1.700 joules por gramo, pero a causa de las pérdidas de calor el valor es considerablemente más elevado. Este comportamiento genera una gran demanda de energía para la producción del cemento y, por tanto, la liberación de gran cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, un gas de efecto invernadero.

Para mejorar las características del producto final al clinker se agrega aproximadamente el 2% de yeso y la mezcla es molida finamente. El polvo obtenido es el cemento preparado para su uso.

El cemento obtenido tiene una composición del tipo:

- 64% óxido de calcio.
- 21% óxido de silicio.
- 5,5% óxido de aluminio.
- 4,5% óxido de hierro.
- 2,4% óxido de magnesio.
- 1,6% sulfatos.
- 1% otros materiales, entre los cuales principalmente agua.

TABLA IVI COMPONENTES MINERALÓGICOS DEL CEMENTO PORTLAND		
COMPONENTE	FÓRMULA QUÍMICA	FÓRMULA ABREVIADA
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} - \text{SiO}_2$	C ₃ S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} - \text{SiO}_2$	C ₂ S
Alumina tricálcica	$3\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A
Ferroatluminato tetra-cálcico	$4\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	C ₄ FA
Yeso	$\text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$	Y
Alcalis	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	N + K
Magnesia	MgO	M
Cal libre	$\text{CaO} - \text{Ca}(\text{OH})_2$	C.L.
Residuo insoluble	$\text{SiO}_2 - \text{R}_2\text{O}_3$	R.I.

Tabla 0. Composición del Cemento. Fuente:

Cuando el cemento Portland es mezclado con agua, se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adherentes que solidifica en algunas horas después y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su *resistencia característica*. El endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua, yeso y aluminato tricálcico, formando una estructura cristalina de calcio-aluminio-hidrato, estringita y monosulfato.

El sucesivo endurecimiento y el desarrollo de fuerzas internas de tensión derivan de la reacción más lenta del agua con el silicato tricálcico formando una estructura amorfa llamada calcio-silicato-hidrato. En ambos casos, las estructuras que se forman envuelven y fijan los granos de los materiales presentes en la mezcla. Una última reacción produce el gel de silicio (SiO_2). Las tres reacciones generan calor.

Con el agregado de materiales particulares al cemento (calcáreo o cal) se obtiene el *cemento plástico*, que fragua más rápidamente y es más fácilmente trabajable. Este material es usado en particular para el revestimiento externo de edificios.

La calidad del cemento Portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150.

Finura

Cuando al concreto, las partículas muy finas de cemento se mezclan con el agua para poder formar la pasta que permiten la unión de los materiales pétreos. A medida que transcurre el tiempo, el agua con el cemento reaccionan ocasionando así el aumento de resistencia o la adquisición de la misma.

Dentro de las principales características del cemento respecto a su base mineralógica, la finura de este representa un dato decisivo para la interpretación, especialmente para las resistencias a temprana edad.

El cemento es un polvo demasiado fino para determinar el tamaño de sus partículas por un procedimiento granulométrico de tamices. En la práctica hay métodos para determinarla como lo es el turbidímetro de Wagner (Norma COVENIN 488, „*cemento Portland. Determinación de la finura por medio del turbidímetro*“ y ASTM C115) y el permeabilímetro de Blaine (Norma COVENIN 487, „*cemento Portland. Determinación de la finura por medio del aparato Blaine de permeabilidad*“ y ASTM C204), siendo este último el de más frecuente referencia.

Resistencia Mecánica del Concreto

Ley Fundamental.

En una estructura, el concreto se encuentra sometido a sollicitaciones muy variables (compresión, corte, flexión, tracción, flexotracción, agentes agresivos y otros). No es práctico llevar a cabo ensayos de control que analicen todos estos estados tensionales, por lo que se ha establecido la costumbre de realizar el ensayo destructivo a compresión simple, sobre probetas normalizadas, e inferir, a partir de los resultados, los valores de otras características mecánicas, tales como, la resistencia a la tracción o al corte.

La principal ley que relaciona la resistencia del concreto y la composición de su mezcla, es la conocida Ley De Abrams, expresada por ese investigador Norteamericano en 1918. Según esta ley, la resistencia del concreto depende

fundamentalmente de la proporción entre el peso del agua de mezclado y el peso del concreto presente, relación que se suele simbolizar con la variable “ α ”.

Para determinados componentes de la mezcla, manteniendo el tamaño máximo y las mismas condiciones de proporción de ensayo y de edad, se establece una relación algebraica, suficientemente exacta a los efectos prácticos, que vincula el valor de la resistencia con el valor “ α ” en la siguiente forma:

$$R = \frac{M}{N^\alpha} \dots\dots\dots (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

R = resistencia promedio;

M y N = constantes;

α = relación agua/cemento, en peso;

Tomando logaritmos, la ecuación anterior pasa a tener la forma:

$$\text{Log R} = \text{log M} - \alpha \text{log N} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2})$$

Que corresponde a la ecuación de la recta con variables logR y alfa. Llevando esas variables a un sistema de coordenadas cartesianas, se obtiene la figura 2.

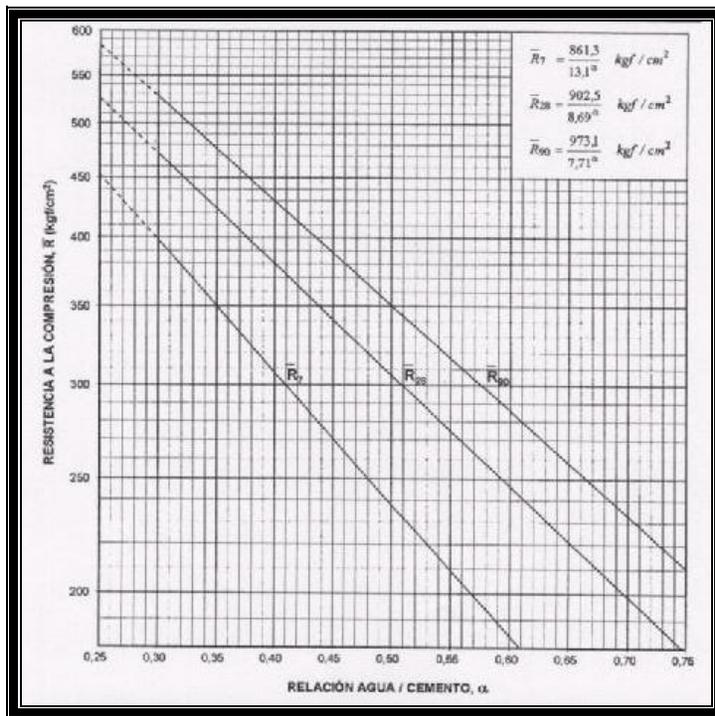


Figura 2. Representación Gráfica de la Ley de Abrams. Fuente: 1.

En general, los valores de M y N dependerán de todos los parámetros que condicionen esa relación fundamental principalmente de: i) la edad del concreto; ii) del tipo y calidad del concreto; iii) de las características de los agregados, y; iv) de los aditivos presentes.

Los cambios de granulometría de los agregados prácticamente no modifican, los valores de M y N; pero los cambios en sus características /rugosidad, forma del grano, etc.) O es su tamaño máximo, pueden producir cambios en las citadas constantes. Igualmente lo pueden producir las variaciones en la calidad del cemento. En contra de los que pudiera pensarse, la mayoría de los aditivos químicos no afectan esencialmente estas constantes.

Para poder aplicar la ley de Abrams se propone que el concreto ha sido debidamente compactado y curado, sin presencia de oquedades ni vacíos internos de

gran consideración. Esta condición limitó el empleo de concretos con valores α relativamente bajos, porque las mezclas producidas resultaban muy ásperas, poco trabajables y poco compactadas. Pero la incorporación de los aditivos químicos superplastificantes está permitiendo, hoy día, llegar a valores α tan bajos como 0,26.

Condiciones del Ensayo a Compresión

La resistencia de un concreto se determina al conocer el promedio de los resultados de ensayos válidos, sobre un conjunto de probetas normalizadas, en una fecha determinada y siguiendo un procedimiento establecido. Se hace referencia a ensayos válidos porque, eventualmente, el resultado de alguna o algunas probetas pueden ser desechadas en razón de ciertas anormalidades.

Se debe tratar siempre de un conjunto mínimo de probetas, para contar con una confiabilidad estadística. El mínimo acostumbrado suele suceder tres de cada edad y condición de ensayo, aunque bajo ciertas condiciones se aceptan hasta dos. El número de muestras es variable, dependiendo del grado de probabilidad aspirado, de la importancia de la obra y de la precisión con que se ha venido trabajando; tanto así que en los llamados „procesos bajo control“ se puede ser mas tolerante que al comienzo de las obras, o ante constructores noveles, o cuando ha habido alguna señal de riesgo.

Muchas investigaciones sobre concreto de distintas clases y en zonas de distintas geografías, han puesto en evidencia que, si en la obra se siguen estrictamente las buenas practicas de: transporte, colocación, compactación y curado, los resultados obtenidos en las probetas de laboratorio mantienen una correlación confiable con la calidad del concreto colocado en obra. No se trata de resultados idénticos, pero si es una proporción conocida que permite la toma de decisiones. Como ya sabemos, la resistencia inicial del concreto en la obra es mayor que el de las probetas en los primeros días de vida y que posteriormente se hace menor con el paso del tiempo.

Esto hace inútil la costumbre de algunas personas de tomar las probetas en obra y colocarlas a la intemperie para semejar las condiciones reales de curado.

La resistencia potencial del concreto se determina, siguiendo un procedimiento normalizado y su valor es tomado como referencia de calidad. En Venezuela las probetas normalizadas son de forma cilíndrica, con 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. El ensayo normalizado es a compresión y está detalladamente descrito en la norma COVENIN 338, *„Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión, de cilindros de concreto*’ equivalente a la ASTM C39.

Para el valor obtenido en el ensayo puede ser tomado como referencia base, se deben haber cumplido, meticulosamente, todas las prescripciones normativas descritas en el procedimiento de la norma. Conociendo las condiciones operativas de algunos laboratorios de ensayo de obra, resulta pertinente hacer los señalamientos que se anotan en las secciones siguientes:

Colocación de Remates:

Las dos caras del cilindro a ser ensayado deben ser absolutamente lisas y paralelas, sin exceder las tolerancias que exige la Norma. Ello se logra colocando capas de cierto grosor, moldeadas con una preparación basada en un compuesto de azufre que se conoce con el nombre de remate o „capping“. Hasta hace algunos años en la Norma COVENIN 338, *„método para la elaboración, curado y ensayo a compresión, de cilindros de concreto*“ permitía la aplicación de remates de mortero o yeso, pero la dispersión estadística de resultados obligo a desechar tales alternativas. La ausencia de esos remates, con la consiguiente aplicación de la carga sobre la cara desnuda del concreto, siempre con una plenitud irregular, hace que el resultado obtenido sea menor al normalizado, llegando a perder hasta un 30% de la resistencia para el caso de irregularidades no muy pronunciadas.

Aplicación Axial de la Carga:

Si el eje del cilindro no queda ortogonal a los planos de aplicación de la carga, situación que puede ocurrir cuando el cabezote móvil de la prensa no se ajuste con libertad a la cara lisa del remate o „capping“, el eje de la resultante de la carga aplicada, no coincide con la dirección del eje del cilindro. En esas condiciones el resultado del ensayo es menor que el normalizado, dependiendo su disminución del valor del ángulo entre ambos ejes; es sabido que desviaciones de pocos grados están asociadas a reducciones del 30% y hasta del 50% de la resistencia.

Velocidad de carga:

Algunos laboratorios emplean prensas de control manual, o no cuidan rigurosamente la velocidad de aplicación de la carga de la prensa hidráulica. En tales casos se debe recordar que, velocidades de carga mayores a la normalizada, producen resultados mayores de resistencias; por el contrario, los valores del ensayo son menores si la velocidad es más lenta. Igual comportamiento se observa en los ensayos de tracción.

Tamaño y Forma de las Probetas:

Aun cuando la probeta normalizada es cilíndrica y de dimensiones 15x 30 cm., otros se utilizan formas cúbicas o prismáticas, resultando conveniente disponer de factores de conversión.

Si hubiese que ensayar el concreto en probetas no cilíndricas, lo mejor sería acudir a estudios de correlación directos, pero si esto no pudiera ser hecho, se puede acudir al empleo de la siguiente expresión:

$$R_n = K.R \dots \dots \dots \text{(Ec. 3)}$$

Que relaciona el valor de la probeta cilíndrica normalizada (R_n), con el valor obtenido en otro tipo de probeta (R), por medio de un coeficiente de corrección (K),

cuyos valores se recaen en la tabla 1, la cual fue publicada en las Normas del Ministerio de Obras Publicas, en 1967.

Tipo de Probeta	Dimensiones (m)	Valor de K
Cilíndrica	15 x 30	1,00
Cubica	10 x 10 x 10	0,80
Cubica	15 x 15 x 15	0,80
Cubica	20 x 20 x 20	0,83
Cubica	30 x 30 x 30	0,90
Prismática	15 x 15 x 15	1,05
prismática	20 x 20 x 60	1,05

Tabla 1. Factores de Corrección Por Tipo de Probetas. Fuente 1.

El ensayo de las probetas cilíndricas esta muy generalizado, cuenta con amplia tradición y es aceptado extensamente como referencia para la obtención de un valor, con base al cual se han establecido criterios para la toma de decisiones de aceptación o rechazo. Si embargo si se profundiza en la esencia del ensayo y el análisis de la fractura, se entenderá que la carga uniaxial también produce, sobre la probeta, deformaciones ortogonales a la dirección de aplicación de la carga con lo cual, en el mecanismo de rotura, aparecen sollicitaciones de tracción.

La relación agua/cemento condiciona la resistencia del concreto por lo cual se constituye en uno de los parámetros fundamentales para el control del material. Cuanto mas estable se logre mantener esta (a lo largo de las mezclas preparadas para la obra) menores variaciones presentara el material.

El ensayo de resistencia propuesto por el ISO-RILEM, donde se rompe por flexión un prisma con carga en cada tercio de la luz, y luego se rompe por compresión cada una de las dos mitades obtenidas por la primera ruptura, ofrece, entre otras, la

ventaja de contar en un solo ensayo y sobre la misma probeta, con los valores de la resistencia a flexión y a la compresión. Ese ensayo ha sido adoptado por Venezuela como opcional y esta descrito en las normas COVENIN 342, *„Método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción por flexión del concreto, en vigas simplemente apoyadas, con cargas a los tercios del tramo’* y COVENIN 350 *„Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión del concreto, usando porciones de vigas rotas por flexión’*. Los criterios de aceptación y rechazo de las probetas de concreto, se establecen en la Norma COVENIN 1753, fundamentado en el ensayo de probetas cilíndricas.

Resistencia a la Tracción.

Estos resultados dan dispersiones sensiblemente mayores que las pruebas a la compresión. Porque estos ensayos cuentan con menor tradición y difusión que los de compresión, es muy frecuente calcular la magnitud de esa característica como una función de la resistencia a la compresión. Podemos clasificar este tipo de ensayo en los siguientes:

- Resistencia a la tracción por flexión.
- Resistencia a la tracción indirecta.
- Resistencia a la tracción directa.
- Relación con la resistencia a compresión.

Estos ensayos solo se mencionaron ya que no es objeto de estudio en la presente investigación.

Resistencia al Corte.

La resistencia al corte o cizallamiento tiene gran importancia en los aspectos estructurales pero, debido a que no suele actuar sola, en el cálculo se suelen utilizar diferentes formulas para estimarla de forma indirecta, según las sollicitaciones a que este sometido el elemento.

Los ensayos de corte no son sencillos ni habituales porque se puede dejar sentir la fluencia sobre el plano de ensayo de otros esfuerzos, de tracción o flexo-tracción. Entre algunas relaciones al corte tenemos:

- Relación con la resistencia a la Compresión.
- Resistencia al Corte de Miembros Estructurales.
- Resistencia al Corte por Fricción.

Desarrollo de la Resistencia en el Concreto

Tan importante como la magnitud de las resistencias que pueda alcanzar el concreto, lo es la velocidad con las que la adquiere.

Desde el momento en que los granos del cemento inician su proceso de hidratación comienzan las reacciones de endurecimiento, que se manifiestan primeramente con el atiesamiento del fraguado y continúan luego con una evidente ganancia de resistencia, al principio en forma rápida y, a medida que transcurre el tiempo, disminuyendo la velocidad.

En la mayoría de los países de la edad normativa a la que se evalúa la resistencia a compresión es la de 28 días, aunque hay una importante tendencia para llevar a esa fecha a la de 7 días. Es frecuente determinar esta resistencia en periodos de tiempo distintos a los 28 días, pero suele ser con un propósito meramente informativo. Las edades usuales, en tales casos, pueden ser: 1, 3, 7, 14, 90 y 360 días. En algunas ocasiones y de acuerdo a las características de la obra, esa determinación no es solo informativa, sino normativa, fijado así en las condiciones contractuales de la obra.

La edad de 28 días se eligió en los momentos en que se empezaban a estudiar a fondo la tecnología de concreto por razones técnicas y prácticas. Técnicas porque, para los 28 días, ya que el desarrollo de resistencia esta adelantado en gran proporción y para la tecnología de la construcción esperar ese tiempo no afectaba significativamente la marcha de las obras. Prácticas porque 28 es un múltiplo de los

días de la semana y evita tener que ensayar en días festivos, un concreto vaciado un día laborable. Pero las razones técnicas han cambiado sustancialmente porque con los métodos constructivos actuales, 28 días puede significar un decisivo adelanto de la obra por encima de los volúmenes del concreto cuya calidad todavía no se conoce.

La velocidad de desarrollo de la resistencia mecánica depende de numerosas variables y resultan muy diferentes entre uno y otros concretos. De estas variables, las más importantes pueden ser

- La relación agua/cemento, que cuanto mas baja es, favorece la velocidad.
- La composición y finura del cemento.
- La calidad intrínseca de los agregados.
- Las condiciones de temperatura ambiental.
- La eficiencia del curado. esto hace que los índices del crecimiento de la resistencia no puedan ser usados con carácter general para cualquier concreto, en forma segura o precisa.

Para un concreto de materiales y condiciones específicas, una precisión adecuada se puede conseguir, cuando sus características de desarrollo se determinan experimentalmente por medio de suficientes ensayos y en las edades que se precise. Con toda esa información se puede hasta dibujar la curva de tendencia del crecimiento de las resistencias. Es evidente que este procedimiento es solo aplicable cuando se trata de obras de gran importancia y cuando se trata del manejo de grandes volúmenes como puede ser el caso de empresas de premezclado con una elevada producción permanente.

Si no se han investigado con antelación los índices particulares del crecimiento de la resistencia de un concreto, resulta arriesgado y con frecuencia conduce a errores graves, el tratar de controlar un concreto con base en los resultados de ensayos a edades tempranas. Si hay preocupación por la calidad que puede llegar a alcanzar una mezcla cuando cumpla 28 días es preferible elaborar, manejar y curar el concreto de

acuerdo con todos los conocidos principios de la buena práctica, pues ello es suficiente garantía de calidad. El ensayo a los 28 días servirá como una comprobación del buen trabajo efectuado.

Numerosos trabajos de investigación, en obra y laboratorio, indican que el crecimiento de resistencia en los primeros 28 días se adapta a una ley logarítmica del tipo:

$$R_j = m \log j + b \dots \dots \dots (\text{Ec. 4})$$

Donde:

R_j = resistencia alcanzada a la edad j en días, siendo m y b constantes propias de la mezcla, el tipo de sollicitación o ensayo y las condiciones de conservación del concreto.

En la figura 3, se representan las rectas logarítmicas del crecimiento de la resistencia con la edad, entre 3 y 28 días, de mezclas preparadas con idénticos materiales, en diferentes niveles de resistencia. Aunque con menor grado de precisión, la fórmula anterior es aplicable a los concretos hasta los 4 años de edad lo cual le da carácter mucho mas general.

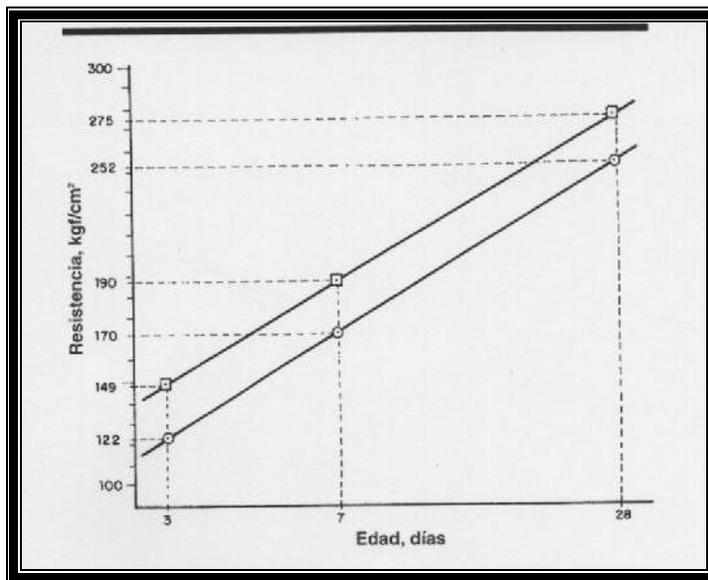


Figura 3. Crecimiento de Resistencias. Fuente: 1.

Expresando j en días y R_j en kgf/cm^2 , la pendiente m , que describe la velocidad de crecimiento de la resistencia, suele encontrarse entre valores de variación tan amplia como desde 30 hasta 90, según el concreto y sus condiciones. El valor b dependerá del nivel de resistencia en que se este trabajando.

La regresión anotada como ecuación 4 tiene la ventaja de que, si se efectúan ensayos con suficiente precisión a dos edades extremas (por ejemplo 1 día y 28 días), se pueden calcular las constantes m y b ; por lo tanto se puede determinar la resistencia del material a cualquier edad intermedia. La exploración a edades muy cortas o mayores que 28 días, debe ser confirmada mediante pruebas.

Estos abarcan concretos muy variados en cuanto a componentes y diseño, incluso con aditivos, así como variadas condiciones de curado. Por tanto, su variabilidad es muy amplia, razón por la cual esos factores deben ser manejados por personal conocedor de la tecnología del concreto.

Propiedades del Concreto Endurecido

La capacidad de la mezcla de endurecer hasta formar una verdadera roca artificial, se debe a la reacción entre el agua y el cemento. Esta es una reacción interna que se produce aunque el material este cerrado herméticamente bajo agua (de ahí viene el nombre de cemento hidráulico).

En una primera fase el agua de mezclado sirve como, lubricante entre los granos inertes, dando fluidez a la mezcla, que puede ser moldeada. Pero en el mismo momento en que entran en contacto el agua y el cemento se inician las reacciones de hidratación que conducirán al endurecimiento final del material.

Esta es una interpretación de cómo transcurre el fenómeno. Hay un primer tramo de la curva que corresponde al periodo durante el cual la mezcla esta fluida (estado

plástico). Luego hay una subida brusca de la curva, que corresponde al atiesamiento que conocemos como fraguado y luego, al finalizar este, un tercer tramo en crecimiento más moderado correspondiente al desarrollo de resistencias propiamente dicho (el eje de las ordenadas se supone graduado en forma logarítmica). Técnicamente, el fraguado y el desarrollo de resistencias son, por lo tanto, diferentes fenómenos.

No es frecuente medir en obras los tiempos de fraguado del concreto. En cambio, el atiesamiento y la resistencia, determinados mediante ensayos normalizados en muestras preparadas con concreto fresco, se miden o deberían medir prácticamente en todos los casos, ya que son los índices fundamentales de aceptación o rechazo del concreto.

Propiedades del Concreto Fresco

Se le denomina „concreto fresco“ al material mientras permanece en estado de fluido, es decir desde el momento cuando todos los componentes son mezclados hasta que se inicia el atiesamiento de la masa (periodo plástico). En ese lapso el concreto es transportado, colocado en moldes o encofrados y luego compactado manualmente o por vibración.

Ese estado de plasticidad tiene una duración diferente entre unas y otras localidades y entre una y otra época del año, ya que las condiciones del clima tienen gran influencia. En lugares cálidos y secos el estado fresco dura menos tiempo que en localidades húmedas y frías.

Son muchas las propiedades del concreto fresco que interesan y pueden llegar a ser críticas. No son por su relación con el manejo del concreto en ese estado, sino porque pueden servir como señal anticipada de las propiedades que pueda tener el material al endurecer posteriormente. Indicios de algún comportamiento atípico del

concreto en este estado inicial avisa, en muchos casos, que en estado endurecido también pueda ser impropia su calidad. En ese momento temprano, y antes de completarse los vaciados del material, es cuando se deben ejecutar las correcciones. El comportamiento del concreto fresco depende de: sus componentes, de las características del mezclado, de su diseño, del medio ambiente circundante y de las condiciones del trabajo.

El Asentamiento como índice del Contenido del Agua

Todos los ensayos referidos, y entre ellos el tan frecuente Cono de Abrams, además de dar información sobre aspectos de la reología del concreto, sirven como una medida indirecta del contenido de agua a la mezcla y de ciertas variaciones en algunas propiedades de los componentes. Ambos datos son importantes para quienes están diseñando las mezclas. Esto pone de manifiesto la atención y el cuidado con que deben ser realizados los ensayos, de los que se obtienen informaciones directrices.

Cuando se elaboran mezclas de concreto, se debe precisar la cantidad de agua que contienen, midiendo directamente la que se ha añadido y calculando la que pueden haber aportado agregados húmedos, o la que, al contrario, pueden absorber agregados secos. Con este dato preciso del contenido de agua se puede calcular la relación efectiva de agua/cemento de la pasta, obteniendo con ello una primera e importante indicación sobre la resistencia mecánica que alcanzara el material. Sin embargo en la práctica, no siempre se tiene seguridad sobre la cantidad de agua cedida o restada por los agregados, lo que resulta en una cierta imprecisión en la calidad de la mezcla.

Si se mantienen constantes todas las otras condiciones, la trabajabilidad, evaluada por medio del cono de Abrams, está ligada a la relación agua/cemento y resulta una medida adicional que nos brinda mayor seguridad en nuestras decisiones, ya que se relaciona con el contenido real de agua en la mezcla, independientemente de su procedencia.

El ensayo de trabajabilidad es sensible a cambios, por ejemplo en la calidad granulométrica de los agregados, por lo que su información no es, por si sola, una medida precisa del contenido de agua sino que refleja también otras variables. Para tener mayor seguridad en las decisiones tomadas en la obra, respecto al contenido de agua en las mezclas, se deben conjugar los datos de las mediciones directas con los resultados del ensayo de Abrams.

Retracción

Otra característica del concreto que se debe tomar en consideración es la retracción, fenómeno de encogimiento o disminución de volumen que sufre el material con el tiempo, debido principalmente a la pérdida parcial de agua en las primeras horas y que puede llegar a producir grietas del material. En las estructuras, la retracción se logra aminorar mediante una adecuada distribución de las armaduras de acero, que las restringen y la reparten de forma más conveniente.

La retracción depende de numerosos factores tales como la geometría de las piezas, las condiciones atmosféricas de velocidad de viento, humedad y temperatura, y la proporción de los componentes de la mezcla. Dentro de esos componentes son decisivos ultrafinos y el agua. Los granos ultrafinos están formados por el cemento y las partículas mas finas de la arena. Para mezclas que tengan arenas con cantidad de ultrafinos dentro de los límites normativos o recomendables, la retracción puede ser considerada como dependiente, fundamentalmente, de la dosis de agua y de cemento de la mezcla. Al aumentar el agua, o al aumentar conjuntamente la dosis de cemento y de agua, es decir, al aumentar la pasta, la retracción se hace mayor. El exceso de ultrafinos aumenta el requerimiento de agua para mantener la fluidez, con lo cual hay exceso de agua y, a su vez, mayor retracción por secado.

La retracción se puede producir en dos etapas diferentes de la vida del concreto: Una, *en los momentos iniciales del fraguado*, debida no a la perdida del agua libre,

sino a parte del agua de la mezcla; esa es conocida como „retracción de fraguado“ o „retracción plástica“. La otra, de menor escala, *cuando el concreto esta endurecido*, o generalmente al cabo de semanas o de meses y que es conocida como „retracción hidráulica“ (aunque hidráulicas son ambas). La retracción temprana, ligada a las condiciones ambientales de viento, humedad y temperatura, es un permanente riesgo potencial en los concretos ejecutados en clima tropical. Este riesgo se combate con buenas técnicas de curado aun cuando, en situaciones severas, es posible que deba defenderse la calidad del concreto con toldos protectores o pantallas corta-vientos.

Mecanismos de Lubricación

Una forma bastante efectiva para entender mejor las relaciones cuantitativas entre calidad y proporciones de componentes, así como algunas de las principales características del concreto, es considerar como modelo del material un conjunto de piezas que se deben mover, unas entre otras, lubricadas por la pasta de cemento. Dentro de los límites habituales de consistencia y composición de las mezclas, esto se aproxima bastante a la realidad. Sin embargo, en condiciones extremas, el modelo debe ser interpretado con reservas. La principal objeción es que no solamente el cemento lubrica, sino que también lo hacen las partículas mas finas de la arena. Esta circunstancia se puede incluir en el modelo, y de hecho es necesario hacerlo cuando los contenidos de finos en la arena (pasantes del cedazos #200) son importantes.

Otra forma de poder visualizar el mecanismo de lubricación consiste en modelar el concreto fresco como un sistema de engranajes lubricados con aceite.

La mayor o menor rugosidad de los agregados equivale a dientes mas grandes o pequeños en los engranajes; la granulometría mas gruesa o mas fina se equipara a mas o menos engranajes requeridos para cubrir una cierta distancia; la cantidad de cemento o pasta equivale a la cantidad de aceite y, la fluidez de la pasta, a la fluidez del aceite, respectivamente.

Características a considerar según el Mecanismo de Lubricación

Según el mecanismo ofrecido se puede estimar la tendencia para cada una de las características siguientes:

- Fluidez.
- Segregación (solo parcialmente).
- Retracción.
- Resistencia Mecánica.
- Precio (basado en la dosis de cemento, que es el componente de mayor precio unitario).

Tiempo de Fraguado

Cuando se mezcla el cemento con el agua de amasado se produce una pasta que mantiene, durante un tiempo, una plasticidad casi constante. Posteriormente se aprecia un cierto atiesamiento que luego se ira pronunciando. El lapso que transcurre desde el mezclado hasta el momento de aparición del atiesamiento se conoce como tiempo de fraguado. Hay varias maneras de detectar el momento en que se produce el cambio, pero en la práctica generalmente se recurre a medidas indirectas, empleando la información obtenida con penetrómetros. El atiesamiento, o pérdida de plasticidad de la pasta, es un proceso gradual aun cuando el fraguado debe ser definido en un tiempo preciso.

Figura 3*. Efecto de la temperatura en el tiempo de fraguado del Concreto.

Fuente 2.

Eso obliga a establecer parámetros empíricos especializados, que son de validez universal. El procedimiento más usual es la aplicación de la aguja de Vicat. Según ensayo establecido en la Norma COVENIN 493, *„Cemento Portland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de Vicat’* y ASTM C191.

El tiempo de fraguado puede ser medido también en morteros y en concretos, empleando un penetrómetro apropiado tal como se establece en la Norma COVENIN 352, *‘Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado de mezclas de concreto por resistencia a la penetración’* y ASTM C403. Aunque este proceso de fraguado también se debe a las reacciones de hidratación del cemento, no hay relación directa en las mediciones en pasta y las mediciones en concreto, donde se hacen sentir otras variables tales como: los distintos valores de relación agua/cemento de cada caso, las diferentes dosis de cemento y la posible presencia de ciertas sales que provengan del agua o de los agregados.

Relación agua cemento (a/c)

La relación agua/cemento conocida como a/c, es la proporción utilizada para obtener las diferentes mezclas tanto para la obtención de morteros como de hormigones.

El agua-cemento se trata de la relación peso del agua al peso del cemento utilizado en una mezcla de hormigón. Tiene una influencia importante en la calidad del hormigón producido. La menor proporción de agua-cemento conduce a la mayor resistencia y durabilidad, pero puede hacer la mezcla más difícil de manejar y vertir. Las dificultades de colocación se pueden resolver mediante el uso de plastificante. La relación agua-cemento es independiente del contenido total de cemento (y en el total contenido de agua) de una mezcla de hormigón.

El concepto de agua cemento fue y publicado por primera vez en 1918. El concreto endurece como resultado de la reacción química entre el cemento y el agua conocida como la hidratación. Por cada 2 kilos de cemento, $\frac{1}{2}$ de agua se necesita para completar la reacción. Esto resulta en una relación agua/cemento de 1:4 o 25%. En realidad, una mezcla formada con un 25% de agua es demasiado seca y no conviene lo suficientemente bien como para ser colocado, ya que la parte del agua es absorbida por la arena y la piedra, y no está disponible para participar en la reacción de hidratación. Por lo tanto, más agua se utiliza, entonces es técnicamente necesario para reaccionar con el cemento. Más típico de agua/cemento de los coeficientes de 35% a 40% de sus ingresos, junto con un plastificante.

El exceso de agua se traducirá en la solución y la segregación de la arena y piedra de los componentes (más de arena en la parte superior capas debido a que la piedra se asentarán en la parte inferior). Además, el agua que no es consumida por la reacción de hidratación que al final acabará abandonando el hormigón, ya que se endurece, lo que resulta en poros microscópicos agujeros o que reduzca la fuerza de la final del hormigón. (aunque para ciertos tipos de hormigones es deseable obtener estar burbujas).

Proceso de Hidratación del Cemento

Al contacto del agua con el polvo de cemento se inicia la reacción química (fraguado) desde la superficie hacia el centro de cada uno de los granos (de diferente tamaño) que constituyen el cemento (cuadro a). A los pocos minutos ya se ha formado un coloide (sol) alrededor de cada grano (cuadro b); las áreas coloidales crecen y se funden en una matriz dentro de la cual quedan partículas de cemento y agua libre (cuadro c); la matriz va endureciendo gradualmente, y en pocas horas, se convierte en un gel con inclusiones de cemento sin reaccionar, agua libre, poros y cristales (cuadro d). Siempre que haya humedad ambiental el proceso de fraguado

continúa varios años, y, como en toda reacción química, la temperatura ambiente condiciona la velocidad de reacción.

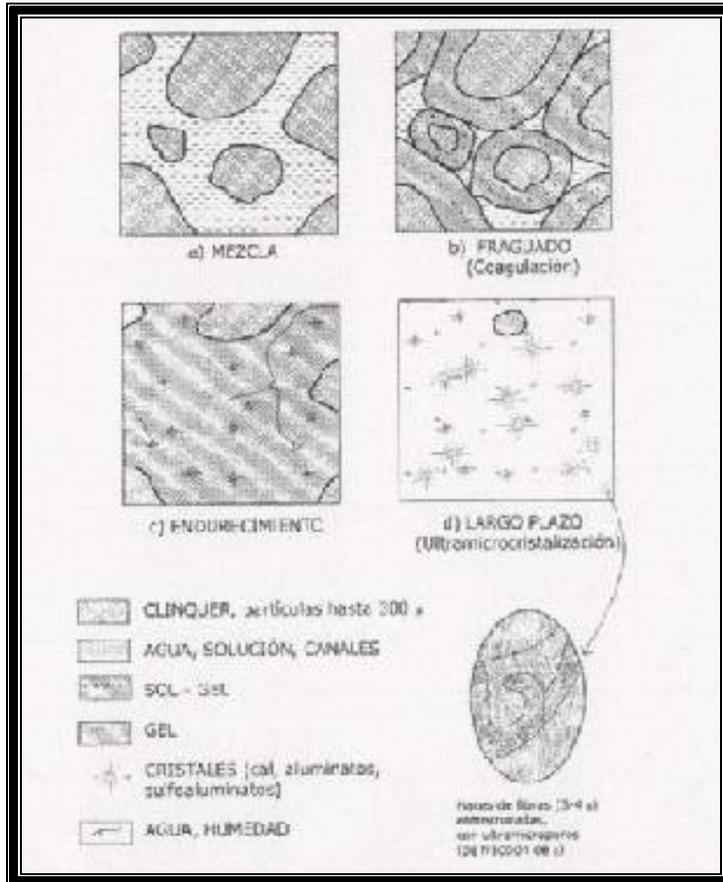


Figura 4. Ilustración Del Proceso De Hidratación Del Cemento. Fuente: 1.

Hidratación del cemento

Muchos estudios se han conducido examinar las relaciones entre la distribución de tamaño (PSD) de partícula de cemento portland y la cinética de hidratación y propiedades de fortaleza de pasta endurecidas. Para una relación de agua cemento dado (a / c), la finura de cemento Portland por lo general han aumentado a lo largo de los años. Sin embargo, Mehta en 1997 (fuente 11), ha señalado que, por motivos de durabilidad, los cementos más finos no siempre pueden ser preferiblemente a los más gruesos. Además, recientemente se ha argumentado que en concretos de alto

desempeño con relativamente bajas relaciones de a/ c, los cementos más grueso puede ofrecer un rendimiento equivalente al largo plazo en comparación a los cementos más finos, lo que resulta un ahorro de energía debido a una reducción de tiempo. Esta conclusión se basó en estudios de simulación del grado de hidratación vs comportamiento en el tiempo de un conjunto de suelo cemento a diferentes finuras.

Tiempo de fraguado en función de la hidratación

El fraguado del cemento se controla por la formación de una red de cemento parcialmente hidratado de partículas conectadas por productos de hidratación, que resisten una fuerza cortante. En el modelo, el sistema se determina como el momento o el grado de hidratación necesario para formar primero una vía de filtrado a través de la microestructura en tres dimensiones que consiste en un par de cemento conectados entre sí. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para las tres diferentes relaciones de a/c y los dos tipos de cemento. Así, a pesar de que el cemento fino requiere menos tiempo para lograr equilibrarse debido a su mayor velocidad de hidratación, lo que realmente necesita es más hidratación.

a/c	PSD (pm)	Tiempo establecido (h)	Grado de hidratación en conjunto
0.246	5	0.58	0.020
0.246	30	0.90	0.011
0.3	5	0.78	0.025
0.3	30	1.44	0-016
0.5	5	1.44	0.074
0.5	30	3.36	0.036
0.5 ^a	5	1.60	0.089
0.5a	30	4.76	0.055

Tabla 2. Configuración de las propiedades del cemento modelo de pastas.

Fuente 11.

Liberación de calor

Naturalmente, el cemento más fino hidrata con mayor rapidez, resultando en una mayor tasa inicial de liberación de calor, como se muestra en la figura 5. Para pastas de cemento con un $a/c = 0.3$, después de 5.000 ciclos de hidratación del modelo acumulativo de los grados de hidratación y el calor liberado son casi equivalentes (Tabla 3).

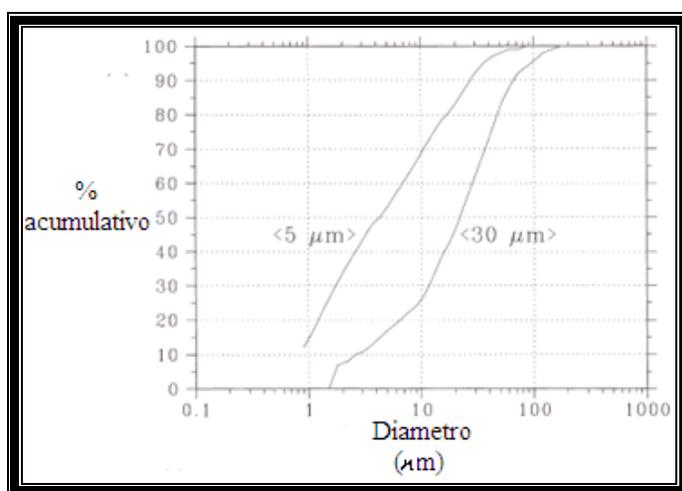


Fig. 5. Liberación de calor acumulado para la hidratación en condiciones isotérmicas para $w / c = 0.3$ pastas de cemento modelo.

Fuente 11.

Para muchas aplicaciones, la evitación de una liberación de calor inicial rápida se beneficia para limitar el desarrollo de las tensiones térmicas y reducir a edad temprana los problemas de agrietamiento. Por lo tanto, esta es una zona donde el uso de un cemento más grueso puede ofrecer un beneficio de rendimiento en relación con uno más fino. Para las pastas de cemento con una relación de $a/c = 0.5$, incluso después de 5.000 ciclos de hidratación, el grado de hidratación del cemento grueso (Cuadro 2) sigue estando muy por detrás de la más fina de cemento, 0,83 vs 0,95. Esto sugiere que en los concretos convencionales, los cementos más finos definitivamente ofrecen una ventaja de rendimiento en términos de un mayor grado de hidratación.

a/c	PSD (μm)	fracción vacía de la porosidad	Fracción llena de la porosidad de agua	Grado de hidratación
0.246	5	0.037	0.0003	0.60
0.246	30	0.029	0.003	0.58
0.3	5	0.036	0.009	0.72
0.3	30	0.028	0.022	0.69
0.3 ^a	30	0.075	0.013	0.62
0.5	5	0.013	0.166	0.95
0.5	30	0.000	0.228	0.83

Tabla 3. La porosidad de las pastas de cemento modelo después de 5.000 ciclos de hidratación. Fuente 11.

Como las partículas hidratadas del cemento, el volumen ocupado por los productos de hidratación es inferior a la de los reactantes. Por lo tanto, a menos que el agua se suministre desde una fuente externa, esta contracción química dará lugar a la formación de poros vacíos dentro de la microestructura de la pasta de cemento. Esta porosidad no sólo influye en la cinética de hidratación, sino también en una reducción de la humedad interna relativa (HR) y una disminución de la medida autógena del material. Sea por cualquier causa esta contracción se produce normalmente durante la vida temprana del concreto, que a menudo resulta en grietas y una pérdida de su capacidad (retracción).

Debido a la contracción química es directamente proporcional al grado de hidratación, la finura de cemento influirá en la evolución temporal de esta propiedad a través de su influencia sobre la cinética de hidratación. En un ambiente totalmente sellado de curado, la contracción química dará lugar a la creación de la porosidad de

vacíos de tiempo cero (o una vez establecidos se consiguen). A una hora fija, esta contracción química será mucho mayor en el sistema de cemento fino PSD, debido a su mayor velocidad de hidratación en los primeros tiempos. Sin embargo, desde un punto de vista microestructural, en igualdad de grados de hidratación y la contracción química de los dos sistemas serán idénticos.

La Tabla 3 resume la porosidad de vacíos presentes en los sistemas analizados en este estudio después de 5.000 ciclos de hidratación. Debido a que el cemento fino de percolación y los cambios de curado cerrado a una porosidad más alta (menos de hidratación), sus valores últimos de los vacíos de porosidad son mayores que las del cemento grueso, incluso cuando sus niveles de hidratación son similares.

Otro efecto de la contracción química es una reducción de la humedad relativa interior. Como la contracción química avanza más, más los pequeños poros se vacían. Al descuidar el efecto de sales disueltas en RH, el tamaño de los mayores poros llenos de agua seguirán siendo los que determinen la HR, de acuerdo con la ecuación de Kelvin-Laplace, como se ve en la ecuación (5):

$$\ln \frac{RH}{100} = \frac{2V_M * \gamma}{r * R * T} \dots\dots\dots (Ec. 5)$$

Donde:

V_M = volumen molar del agua.

RH= humedad relativa.

r = radio del poro con respecto al agua.

R = constante universal de los gases.

T = temperatura en °k.

γ = tensión superficial del agua.

De acuerdo a la ecuación (6), la presión capilar en una pasta de cemento producido con un cemento fino será mayor debido a su baja humedad relativa interior. Por ejemplo, la presión capilar en un sistema con una humedad relativa interna de 70% será siete veces mayor que en un sistema con una humedad relativa interna de 95%.

$$p_{resioncapilar} = -\frac{\ln\left(\frac{RH}{100}\right)R * T}{V_m} \dots\dots\dots (Ec. 6)$$

Por lo tanto, hay dos efectos contradictorios de la finura de cemento sobre la retracción autógena. Por un lado, un cemento más fino resulta en una mayor reducción de la humedad relativa, dando lugar a valores más altos de la presión capilar. Por otra parte, como se ilustra en Tabla 3, el importe de la porosidad llena de agua que puede ser menor en donde es el volumen molar del agua, R es la constante universal de los gases, T es la temperatura en grados Kelvin, es la tensión superficial del agua, y r es el radio de poro más grande todavía lleno de agua. Este análisis implica que en dos sistemas equivalentes con porosidades totales y cantidades equivalentes de la contracción química, los que tiene los poros más pequeños muestran una reducción mucho mayor en el interior de humedad relativa. Por lo tanto, uno esperaría observar una mayor reducción de la humedad cuando se utiliza un cemento más fino.

Calor de hidratación

Es un proceso exotérmico, lo cual hace que los concretos al fraguar y endurecer aumento de temperatura, este incremento es importante en concretos masivos, debido a que, cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso térmico, se origina contracción del material, que puedes conducir a graves agrietamientos.

El calor de hidratación es la cantidad de calor producido, en calorías por gramos de cemento deshidratado, después de una hidratación completa a una temperatura dada. De hecho el calor de hidratación depende la composición química del cemento, y el calor de hidratación es aproximadamente igual a la suma de los calores de hidratación de compuestos individuales, hidratados por separado.

compuesto	Calor Liberado en Cal/g			
	7 Días	28 Días	6 Meses	Hidratado Totalmente
C_3S	110	120	120	120
C_2S	20	45	60	62
C_3A	185	205	207	207
C_4AF	40	50	70	100

Tabla 4. Calor Liberado por los Compuestos del Cemento para Varias Edades. Fuente 2.

Para el promedio usual del cemento portland, aproximadamente del calor total se libera entre uno y tres días, alrededor de tres cuartas partes de siete días, y casi el 90% en seis meses. El calor de hidratación depende de la composición química del cemento, y es aproximadamente igual a la suma de los componentes individuales puros, cuando son proporciones respectivas en la masa, se hidratan por separado.

Así, al disminuir las proporciones de C_3A y C_3S el calor de hidratación del cemento (y su índice de incremento) se reducirá. La finura del cemento afecta el índice de incremento de calor, pero no la cantidad de calor liberado que puede ser controlada por la cantidad de cemento (riqueza) en la mezcla de concreto.

Analizando la figura 6, se observó un registro de velocidades a las que ocurren las reacciones de hidratación, las cuales liberan calor durante las primeras 24 horas. A

la izquierda se nota una rápida pero muy breve desprendimiento de calor, que ocurre en condiciones normales cuando el agua y el cemento entran en contacto.

Este pico representa el humedecimiento del cemento, seguido de una expeditiva dilución de aluminatos y lo mas preponderante, la formación de una película de sulfoaluminatos sobre el altamente reactivo C_3A (aluminato tricalcico), retardando así su rápida hidratación. Luego, continúa un periodo de poca actividad que presenta una duración de 3 horas, denominado periodo latente o de inducción. El segundo pico se manifiesta a un tiempo de 6 a 10 horas y representa la hidratación continuada de C_3A (aluminato tricalcico) y particularmente de la reaccione en aumento de la reacción C_3A .

Figura numero 2.2.8 (6). (copias)

Figura 6. Modelo de Liberación de Calor de un Cemento Portland.

Fuente 5.

Para cementos que se presentan con un moderado hasta un alto contenido de C_3A se presenta un tercer pico, la magnitud y tiempo de ocurrencia de este ultimo depende principalmente del contenido de C_3A (aluminato tricalcico), álcali y yeso en el cemento utilizado. Cuando el cemento se encuentra en presencia del agua, el C_3A

es el primer componente que se disuelve y es recristalizado en CA hidratado cuando el contenido de yeso aumenta, la reacción del aluminio por su parte es retardada, de lo contrario se produciría un fraguado rápido, y por lo tanto limita a la mezcla en su uso práctico para la industria de la construcción.

El efecto del incremento de la temperatura, se refleja en la reducción del periodo de inducción y en un incremento de la velocidad de la liberación del calor, esto puede observarse gráficamente en la figura 7.

Cuando se tienen temperaturas cuyos valores no sobre pasan los 40° C, se tiene que el calor total de hidratación producido en cualquier etapa de ella, es proporcional al grado de hidratación. Ahora se debe entender que la madurez del concreto representa la sumatoria de los productos de las edades por las temperaturas, expresado en forma matemática:

$$Madurez = \sum (tiempos * temperaturas) \dots\dots\dots (Ec. 7)$$

figura 2.2.9 (7) copias

Figura 7. Velocidad de Hidratación Vs. Edad a Diferentes Temperaturas.

Fuente 2.

El calor de hidratación se puede medir indirectamente como el calor de disolución (NORMA COVENIN 495, “cemento Portland. Determinación del calor de hidratación”, y la ASTM C186). En el grafico de la figura 8, se dan curvas típicas del desarrollo del calor de hidratación con respecto al tiempo, para los distintos tipos del cemento.

A partir de lo anterior, varios investigadores, después de estudiar un gran número de cementos, desarrollaron fórmulas para obtener el calor de hidratación de una manera aproximada. Por ejemplo, se tiene que Woods, Steinour y Starke en los EE.UU. desarrollaron la siguiente formula:

$$\begin{aligned} & \text{Calor de Hidratación de 1gr. De Cemento} \\ & = 1.36(\%C_3S) + 62(\%C_2S) + 200(\%C_3A) + 30(\%C_4AF) \end{aligned}$$

Donde los términos entre partículas entre paréntesis indican el porcentaje en peso de los compuestos individuales presentes en el cemento. En un cemento Portland normal, el calor de hidratación es el orden de 80 a 100 cal/gr.

Anexar figura 2.2.10 (8) copias

Figura 8. Evolución del Calor de Hidratación Según Tipo de Cemento.

Fuente 2.

Reacciones de Hidratación

Las reacciones de hidratación, que forman el *proceso de fraguado* son:

- $2(3\text{CaOSiO}_2) + (x+3)\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}2\text{SiO}_2x\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$
- $2(2\text{CaOSiO}_2) + (x+1)\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}2\text{SiO}_2x\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$
- $2(3\text{CaOAl}_2\text{O}_3) + (x+8)\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{CaOAl}_2\text{O}_3x\text{H}_2\text{O} + 2\text{CaOAl}_2\text{O}_38\text{H}_2\text{O}$
- $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 4\text{CaOAl}_2\text{O}_313\text{H}_2\text{O}$
- $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3 + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaOAl}_2\text{O}_36\text{H}_2\text{O} + \text{CaOFe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$

Estas reacciones son todas exotérmicas. La más exotérmica es la hidratación de $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$, seguida de la de 3CaOSiO_2 , y luego $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ y finalmente 2CaOSiO_2 .

Ensayos no destructivos.

Se denomina ensayo no destructivo a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada.

Tipos de ensayos no destructivos.

- Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico.
- Determinación del número de rebote o ensayo esclerométrico.
- ✓ Martillo de resorte.

- ✓ Martillo de péndulo.
- ✓ Confiabilidad del método.
- Ensayos de penetración.

Todos estos ensayos no destructivos que se utilizan para la determinación de propiedades del concreto distintas de la resistencia mecánica. Estos se aplican en cuatro grandes áreas:

- Control de calidad de nuevas construcciones;
- Identificación de anomalías en nuevas construcciones;
- Evaluación de condiciones de concreto de edad avanzada para propósitos de rehabilitación;
- Aseguramiento de calidad de reparaciones de concreto.

Algunos de estos métodos de ensayo no han sido normalizados, sin embargo, su utilización suministra información importante acerca de:

- Dimensiones de los elementos;
- Localización de grietas, laminación y pérdida de adherencias;
- Grado de consolidación, presencia de vacíos y cangrejeras;
- Corrosión del refuerzo metálico;
- Extensión de daños como consecuencia de fuego o resultado de exposición a ataques químicos.
- Método de madurez.

A continuación se desarrolla el método de madurez, siendo este de interés para la presente investigación.

Madurez.

La madurez de un concreto hace referencia a la amplitud de la hidratación del cemento. El concepto se basa en el principio en que la resistencia del concreto (y otras propiedades), esta directamente relacionada con la edad y el desarrollo de su

temperatura. Es una alternativa o ensayo no destructivo en la tecnología de las pruebas en sitio del concreto, ya que permite combinar los efectos de temperatura y tiempo, respecto al desarrollo de la resistencia de este. No es un método revolucionario para medir la resistencia.

Reseña histórica de la Madurez

Los orígenes del Método de Madurez se remontan a una serie de estudios realizados en Inglaterra sobre los métodos de curado acelerado por McInstosh (1949), Nurse (1949) y Saúl (1951) lo que llevó a la necesidad de crear un procedimiento que considerara los efectos combinados de tiempo y temperatura en el desarrollo de la resistencia, estas ideas llevaron a la famosa ecuación de madurez propuesta por Nurse-Saúl (1951).

El interés en el método de madurez ha sido reanimado debido en parte a los esfuerzos de transferencia de tecnología de la Administración de Carretera Federal (Carino y Lew 2001).

El 2 de marzo de 1973, partes de un edificio aparentemente de varios pisos, en construcción en el Condado de Fairfax, Virginia, sufrió un colapso progresivo. Catorce trabajadores murieron y 34 resultaron heridos en el accidente. La Oficina Nacional de Normas (NBS) fue solicitada por la Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) para ayudar a determinar la causa técnica del colapso. El informe del BNE concluyó que la causa más probable del fracaso fue la remoción prematura del encofrado que dio lugar a un cizallamiento por corte que superó la capacidad de un concreto relativamente joven [Carino et al. 1983a]. En el momento de la falla, el concreto en la losa de piso que fallo se cree que se inició a tan sólo cuatro días de edad. Durante ese período, la temperatura media registrada en un aeropuerto cercano era a un promedio de alrededor de 7 ° C. Los investigadores NBS tuvieron dificultades en el uso de los datos publicados relativos al desarrollo de la fuerza obtenida en condiciones de temperatura constante para obtener una estimación

confiable de la resistencia del concreto en sitio en el momento de la falla. Esto provocó un interés en un enfoque relativamente nuevo, conocido como el método de madurez, para estimar en sitio el desarrollo de resistencia en condiciones de temperatura variable.

El método proporciona un acercamiento relativamente simple para hacer estimaciones confiables de la fuerza en sitio durante la construcción.

El método de madurez, se basa, en que la resistencia de un concreto, con una dosificación determinada, esta en función de su temperatura y del tiempo en el que se encuentra a dicha temperatura.

Procesos de las funciones de Madurez.

La función de madurez está resumida a convertir la historia de la temperatura real del concreto a un factor que revela cuanta fuerza se ha desarrollado. Las raíces de la función de madurez más temprana, se encuentran en una serie de papeles tratados sobre el método de curado acelerado para el concreto. En 1949, McIntosh anunció unos experimentos para desarrollar procedimientos que estimarían el desarrollo de la fuerza del concreto durante curados eléctricos. Sugirió que el producto de tiempo y temperatura del concreto respecto a una temperatura de referencia pudieron usarse para resumir los efectos de la historia de curado. Una temperatura de referencia de -1.1°C (30°F) era sugerido, y el producto de temperatura y tiempo sobre la temperatura de referencia era llamada la edad “básica.” Sin embargo, se encontraba que cuando el desarrollo de la fuerza a temperaturas diferentes era trazado como una función de edad básica, no existía una relación única. McIntosh concluyó que el desarrollo de la fuerza del concreto estaba gobernado por factores más complejos que un simple producto de temperatura y tiempo.

Poco después la publicación del trabajo McIntosh, Nurse escribió los principios de curado de vapor a baja presión. Sugiere también que el producto de tiempo y

temperatura pudo resumirse a efectos en los ciclos de diferentes curados de vapor. Nurse no sugirió el uso de una temperatura de referencia, y sus cálculos arrojaron las temperaturas de la cámara de curado, y no las temperaturas reales del concreto. No obstante, mostró que cuando el desarrollo relativo de la fuerza era resumido como una función del producto de tiempo y temperatura, los diferentes datos para el concreto y los ciclos de curado cayeron razonablemente cerca de una curva no lineal sencilla. Esta fue la primera evidencia para mostrar que el producto de tiempo y temperatura pudo ser usado para aproximar los efectos combinados de estos dos factores en el desarrollo de la fuerza.

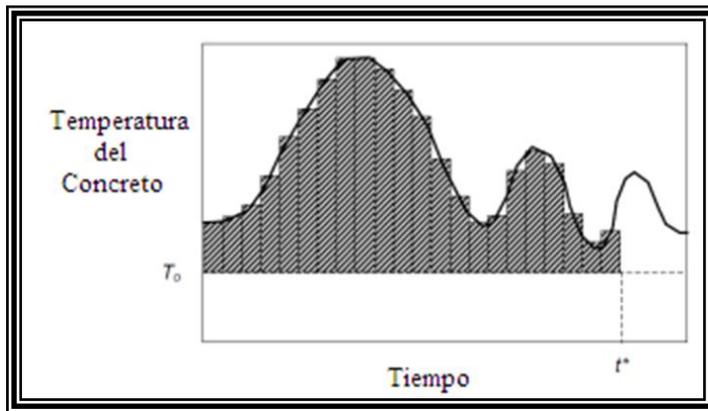


Figura 9. Función de Madurez de Nurse-Saul. Fuente 6.

En 1951, Saúl resumió las conclusiones de los gráficos de la investigación en los principios de curado de vapor ejecutados en cemento y asociación del concreto en Inglaterra. El término madurez fue la primera vez que se vinculó al producto de tiempo y temperatura. Saúl sugirió que la madurez debe calcularse con respecto a una temperatura de “datum”, que es la temperatura más baja en donde se observa la ganancia de fuerza. Así, la madurez es calculada de la historia de temperatura usando lo siguiente:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t \dots\dots\dots (\text{Ec. 7})$$

Donde:

$M(t)$ = factor de temperatura-tiempo a la edad t , grados-día o grados-hora. (Índice de Madurez)

Δt = un intervalo de tiempo, días u horas,

T_a = temperatura del concreto promedio durante el intervalo de tiempo,

T_o = temperatura de referencia, ° C.

Esta ecuación se convierte en la conocida función de madurez de Nurse-Saúl. Usa solamente intervalos en que la temperatura del concreto es mayor que t_0 son considerados como contribución a la ganancia de fuerza. Si la temperatura del concreto es delineado vs la edad, la ecuación (7) es simplemente igual al área entre la temperatura de referencia y la curva de temperatura. Este concepto es demostrado en la figura 9, que muestra la historia de temperatura a un punto particular en un miembro concreto; El área sombreada representa la madurez (temperatura - factor tiempo) a la edad t .

Saúl reconoció que una vez que el concreto ha sido colocado, continuara endureciendo (gana fuerza) a temperaturas debajo de 0°C (32°F). Así, él recomendó una temperatura de referencia de -10.5°C (13°F) para uso en esta ecuación (7).

En 1956, Plowman reportó los resultados de un estudio diseñado para determinar la temperatura a la que el concreto, previamente se establece, y cesa para ganar fuerzas con el tiempo. Basado en datos de prueba, Plowman sugirió un valor de -12°C (11°F) para la temperatura de referencia. Generalmente, un valor de -10°C (14°F) se ha usado en aplicaciones subsecuentes de la función de Nurse-Saúl.

Saúl en 1951 presento el siguiente principio el cual se convirtió como la conocida regla de madurez: Concretos de la misma mezcla y de la misma madurez (con el mismo registro en temperatura-tiempo) tienen aproximadamente la misma resistencia, cualquiera que sea la combinación de temperatura-tiempo, respecto a su madurez.

Al aplicar la regla para concreto curado de vapor, Saúl noto que este principio era válido proporcionando que la temperatura del concreto no alcance sobre 50°C dentro de las primeras 2 h o sobre 100°C dentro de las primeras 6 h después del inicio de mezclarse. Si el incremento de temperatura a temprana edad era excesivo, la función de madurez de Nurse–Saúl desestimaba la fuerza durante pocas horas de tratamiento y la fuerza a edades posteriores se afectaba adversamente. Así, Saúl reconoció las limitaciones importantes de la regla de madurez y la función de madurez de Nurse–Saúl. Estas limitaciones son discutidas además en la próxima sección.

La función de Nurse–Saúl puede ser resumida a convertir un historial de curado de temperatura-tiempo dado a una edad equivalente dentro de una temperatura de referencia de curado como sigue:

$$t_e = \frac{\sum (T - T_0)}{(T_r - T_0)} D_t \dots\dots\dots (\text{Ec. 8})$$

En este caso la edad equivalente representa la duración del período de curado a la temperatura de referencia que resultaría en la misma madurez como el período curado a otras temperaturas. El concepto de edad equivalente, originalmente introducido por Rastrup, es un método conveniente para usar otras funciones además de la ecuación (8) para explicar los efectos combinados de tiempo y temperatura en el desarrollo de la fuerza. La ecuación (8) pueda ser escrito como sigue:

$$t_e = \sum aD_t \dots\dots\dots (\text{Ec. 9})$$

Donde:

$$a = \frac{(T - T_0)}{(T_r - T_0)} \dots\dots\dots (\text{Ec. 10})$$

El valor a de relación, que se llama el “factor de conversión de edad” tenga una interpretación simple: esto convierte un intervalo de curado Dt al intervalo de curado equivalente a la temperatura de referencia estándar. Por ejemplo, si $t_0 = 10 \pm C$ ($14 \pm F$), un período curado de 2 h a $43 \pm C$ ($109 \pm F$) es equivalente a $1.6 \times 2 = 3.2$ h a $23 \pm C$ ($73 \pm F$).

La introducción de Saúl de la regla de madurez era una excrecencia de estudios a tratar sobre el curado acelerado. En 1953, Bergstrom demostró que el método de madurez era igualmente aplicable para curados a temperaturas normales. Él usó el método de madurez para analizar previamente los datos publicados en los efectos de la temperatura en el desarrollo de fuerza. Para calcular madurez, Bergstrom asumió que las temperaturas de los especímenes de concreto eran iguales que las temperaturas curadas en ambiente. Encontró que, para un concreto dado, existía una pequeña desviación en los datos de las fuerzas en común con las fuerzas de la curva de madurez.

En 1954, Rastrup propuso la siguiente función para edad equivalente, que era basada en un “bien conocido axioma de la fisicoquímica que los estados: la velocidad de reacción es doblada si la temperatura...es incrementada por $10^\circ C$.”

$$t_e = \sum 2^{(T-T_r)/10} D_t \dots\dots\dots (\text{Ec. 11})$$

Por ejemplo, un período curado a $43 \pm C$ ($109 \pm F$) es equivalente para cuatro veces el mismo período curado a $23 \pm C$ ($73 \pm F$). Wastlund anunció, sin embargo, que estudios subsecuentes al cemento sueco e instituto de investigación concreto mostraron que sobre un rango de temperaturas la función de Rastrup no era tan exacta como la función de Nurse–Saúl al representar los efectos de tiempo y temperatura.

En 1956, Plowman presentó un papel en Landmark del método de madurez. Él hizo la norma de concreto en los cubos que se curaran a temperaturas variantes entre -11.5 y $18\pm C$ (11 a $64\pm F$). Los cubos eran ensayados a intervalos regulares, y demostró que para cada mezcla existía una relación única entre la fuerza y madurez. Un detalle importante en el procedimiento de Plowman era que todos los especímenes eran inicialmente curados a una temperatura normal (16 a $19\pm C$, o 61 a $66\pm F$) para 24 h antes de ser expuesto a diferentes temperaturas de curado. Así, las historias de temperatura a temprana edad de todos los especímenes eran idénticas y sus fuerzas a largo plazo eran aproximadamente iguales. Como se hará más claro, esto es porque Plowman fue capaz de obtener relaciones de fuerza-madurez únicas para cada mezcla.

En 1956, los documentales tratados sobre el método de madurez se presentaron en el primer simposio de RILEM de concreto invernal. McIntosh anunció en los resultados de un estudio en que los especímenes eran expuestos a las temperaturas de edad temprana diferentes. Para madureces iguales (basados en la función de Nurse-Saúl), ello se mostraba que los especímenes expuestos a temperaturas bajas a temprana edad, eran débiles a madureces tempranas y más fuerte a madureces posteriores que los especímenes expuesto a temperaturas más altas a edad temprana. Ello se concluía que una función de madurez basada en el producto de temperatura-tiempo sobre un valor de referencia no puede explicar cómo se afecta “la calidad del curado” por la temperatura del curado inicial. Dos años después, Klieger también notó que la temperatura del curado inicial influía en la forma de la relación de fuerza-madurez.

En 1962, Alexander y Taplin relataron los resultados de un estudio para determinar si la ganancia de fuerza de concreto y la pasta de cemento obedecía la regla de madurez para diferentes curados de temperatura ($5,21$, y $42\pm C$, o $41,70$, y $108\pm F$). La madurez era calculada usando la función de Nurse-Saúl. En acuerdo con observaciones previas de McIntosh y Klieger, encontraron que la temperatura de curado tiene efectos sistemáticos en las relaciones de fuerza-madurez de las

pastas y concretos. La naturaleza de los efectos es resumida esquemáticamente en la figura (8). Para un mismo valor bajo de madurez, un resultado a una temperatura alta de curado será mayor la fuerza que una temperatura baja de curado. Viceversa a madureces posteriores, un a temperatura alta de curado da como resultados fuerzas inferiores. Si la regla de madurez de Saúl fue correcta, debe existir una curva de fuerza-madurez sencilla.

En 1968, Verbeck y Helmuth presentó una explicación cualitativa para el “crossover effect” ilustró en la figura (8). Ellos sugirieron que unos resultados iniciales de temperatura más altos es más de un aumento proporcional en la proporción inicial de la hidratación. Por lo tanto, durante la fase temprana de curado, cuando existe desarrollo de fuerza rápido, la fuerza de concreto curó a temperatura alta siendo mayor que a la que el concreto curó a una temperatura inferior a pesar de tener la misma madurez según la función de Nurse–Saúl. Con la hidratación rápida, sin embargo, los productos de la reacción no tienen tiempo para distribuirse uniformemente dentro de los poros de la pasta de endurecimiento. Además, “las cascaras” hechas como el producto de la hidratación a baja permeabilidad se intensifican alrededor de los granos de cemento. La distribución no uniforme de los productos de hidratación lleva a que los poros más grandes reduzcan fuerza, y la cáscara impide la hidratación de la porción de los granos que no han reaccionado a edades posteriores. Así, la fuerza baja a largo plazo puede ser un resultado de la incapacidad de los granos de cemento para continuar hidratándose debido a las “cáscaras” de productos de reacción de a baja permeabilidad.

A finales de 1960, se allano de nuevo el interés en el método de madurez. Swenson uso el método en una investigación de falla para estimar la fuerza del concreto en el momento del desplome. En los EE.UU., Hudson y Steele propusieron el método de madurez para estimar la fuerza a 28 días del concreto basado en pruebas a tempranas edades. Sus resultados se incorporaron más tarde en un ASTM Standard.21.

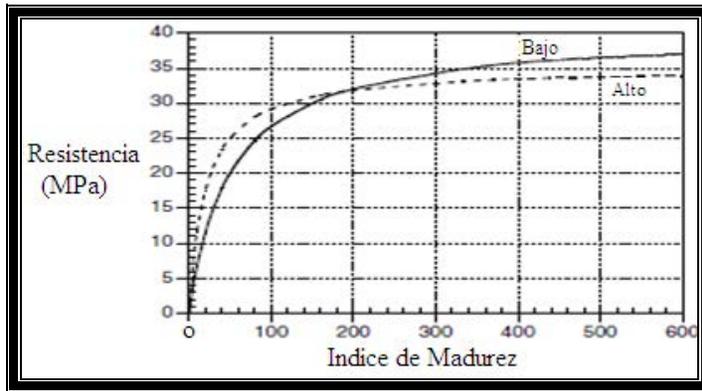


FIGURA 5.2 El efecto de temperatura curado edad temprana en la relación de fuerza-madurez. Fuente 5.

Tejedor y Sadgrove usaron el concepto de edad equivalente para desarrollar un manual para los tiempos de remoción de encofrados bajo varias condiciones de temperatura. Sugirieron la siguiente nueva expresión para calcular la edad equivalente a 20°C (68°F):

$$t_e = \frac{\sum (T + 16)^2}{1296} D_t \dots\dots\dots (\text{Ec. 12})$$

Esto fue reportado en la ecuación 12 da mejores estimaciones de fuerza a valores de madurez bajos que la función de Nurse–Saúl, la ecuación (8). En un reporte posterior Sadgrove noto que, a madureces posteriores, la función de Nurse–Saúl era más exacta que la ecuación (12).

En el medio 1970, varios reportes de Canadá aparecieron tratando sobre la aplicación del método de madurez bajo condiciones de campo. Bickley relato, que usándolo durante la formación de la torre de C.N. en Canadá; Mukherje relató su uso para estimar la fuerza en sitio de losas; y Nisbett y Maitland usaron el método para estimar la fuerza en sitio en un proyecto de desviación de canal.

En 1960, Copeland Sugirió que los efectos de la temperatura en la proporción

temprana de la hidratación del cemento puede describirse por la ecuación de Arrhenius. En 1977, Hansen de Freiesleben y Pedersen sugirió la expresión siguiente para edad equivalente basada en la ecuación de Arrhenius:

$$t_e = \sum e^{\frac{-E}{R} \left[\frac{1}{273+T} - \frac{1}{273+T_r} \right]} D_t \dots\dots\dots \text{(Ec. 13)}$$

En la ecuación (13), la función exponencial es el factor de conversión de edad y esta expresado en términos temperatura absoluta. La forma exacta de la curva que describe la variación del factor de conversión de edad con la temperatura depende del valor de la E, que según Hansen de Freiesleben y Pedersen tenga los valores siguientes:

Para $T > 20 \pm ^\circ\text{C}$

$$33,500 \text{ } j / \text{mol} \dots\dots\dots \text{(13.a)}$$

Para $T < 20 \pm ^\circ\text{C}$

$$E = 33.500 + 1470 (20 - T) \text{ en } j / \text{mol} \dots\dots\dots \text{(13.b)}$$

En este punto es útil comparar varias conversiones de factores de edad equivalentes que se hayan propuesto para calcular la edad equivalente. Figura 11 muestran la conversión de edad descomponen en factores dado por las ecuaciones (9-10) complementan la ecuación (13), para una temperatura de referencia de $20 \pm \text{C}$ ($68 \pm \text{F}$). Existen varias observaciones notables para temperaturas debajo de $20 \pm \text{C}$ ($68 \pm \text{F}$), las tres ecuaciones no lineales da a resultados similares y los factores de conversión de edad son inferiores a los que se obtuvieron en la función lineal de Nurse-Saúl. Para temperaturas sobre $20 \pm \text{C}$ ($68 \pm \text{F}$), la función lineal produce factores de conversión de edad más bajo, y la funcione no lineal diverge. Las Ecuaciones (12) y (13) dan resultados similares que son significativamente más bajos que la función de Rastrup, la ecuación (11). ¿Cuál de estas funciones es la más exacta? En estudios independientes de varias funciones de madurez, Byfors y Naik demostraron que, sobre un rango amplio de temperaturas, la función basada en la ecuación de Arrhenius, la ecuación

(13), era la mejor porque es capaz de explicar los efectos de la temperatura en ganancia de fuerza. La próxima sección de este capítulo discute la base para el método de madurez y explique porque la ecuación (13) se haya encontrado para ser superiores a otras funciones de madurez.

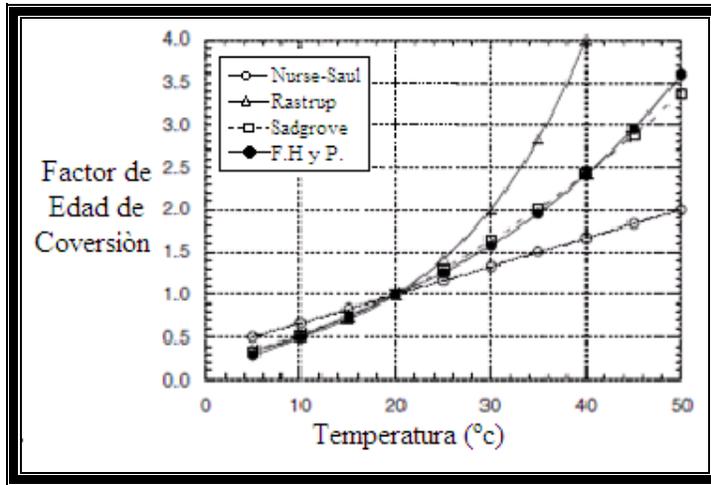


Figura 11. Varias funciones propuestas para representar la dependencia de temperatura del factor de conversión de edad para calcular la edad equivalente.

Fuente 5.

A causa de sus investigaciones en las construcciones fallidas relacionadas con el concreto, el consejo nacional de EEUU de normas (NBS), realizaron investigaciones en la aplicación del método de madurez como una herramienta para estimar la fuerza en sitio del concreto a temprana edad. ¿Estudios al NBS demostró que la función de Nurse–Saúl era aplicable bajo ciertas condiciones, pero ellos mostraron también que la función tuvo deficiencias. Lew y Reichard reportaron que la función de Nurse–Saúl pudo ser usada para estimar el desarrollo de otras propiedades mecánicas del concreto además de la fuerza a compresión. El desarrollo de resistencia a la tensión indirecta, módulo de elasticidad y tirador afianza de fuerza de las barras de acero bajo diferentes temperaturas de curado está relacionado con la madurez (factor temperatura-tiempo). La temperatura inicial del concreto era constante para todos los especímenes, y los especímenes eran movidos a cuartos de diferentes temperaturas

poco después de que el molde se haya completado.

En un estudio posterior a NBS, se investigó la aplicabilidad del método de madurez bajo condiciones de campo. Tres mezclas diferentes de concreto fueron fabricadas para losas y fueron extraídos moldes cilíndricos como se describe en la ASTM 873. Además, la extracción de moldes cilíndricos de concreto y almacenados en una habitación de curado húmedo. Las losas eran curadas afuera (durante la primavera). El objetivo fue determinar si las relaciones de fuerza-madurez curados en ambiente era igual que esos para los cilindros compañeros curados en laboratorio. Los resultados de este estudio estuvieron confusos: para una mezcla existía buena relación entre la fuerza-madurez curada fuera con las curadas en laboratorio a iguales factores de temperatura-tiempo. Para otras mezclas hubo diferencias significativas. El examen de las historias de temperatura de todos los especímenes reveló que, para esas dos mezclas, el curado-externo de los especímenes arrojó diferentes temperaturas a edades tempranas respecto a los especímenes curados en laboratorio. Los especímenes con altas temperaturas a edad temprana resultaron fuerzas inferiores a largo plazo. Por lo tanto, una relación de fuerza-madurez única no existió para una mezcla de concreto sencilla. Así, el efecto de “crossover” relatado en 1956 por McIntosh fue vuelto a abordar. Posteriormente las pruebas de la NBS reportaron la importancia de la temperatura a temprana edad en la relación resultante de fuerza-madurez, y ello apareció que “en temprana edad” pueda ser tan temprano como las primeras 6 horas.

NBS (centro nacional de normas) más tarde se embarcó en un estudio fundamental del método de madurez para ganar una comprensión básica de la causa del efecto “crossover” y para desarrollar procedimientos alternativos para eliminar el problema.

Función de la ganancia de fuerza

El desarrollo de una expresión matemática que permite describir el desarrollo de la fuerza a compresión de una mezcla de concreto, es presentada en 1956 por Bernhardt, como la proporción de la ganancia de fuerza dS/dt a cualquier edad puede ser asumida para ser una función entre la fuerza (S) y la temperatura (t).

$$dS/dt = f(S) * k(T) \dots\dots\dots (Ec. 14)$$

Donde:

F(s)= una función de la fuerza;

K(t)= una función de la temperatura.

Basado en una evidencia empírica, Bernhardt propuso que:

$$f(S) = S_u \left[1 - \left(\frac{S}{S_u} \right) \right]^2 \dots\dots\dots (Ec. 15)$$

Donde:

S_u = fuerza limitativa a una edad infinita.

Asumiendo que S_u es independiente a las temperaturas de curado y a las combinaciones en las ecuaciones (2) y (3), obtenemos lo siguiente:

$$\int_0^S dS / \left[1 - \left(\frac{S}{S_u} \right) \right]^2 = S_u \int_{t_0}^t k(T) dt \dots\dots\dots (Ec. 16)$$

La ecuación (16) es una salida de la derivación de Bernhardt, para introducir la condición que la ganancia de la fuerza no inicia hasta algún tiempo t_0 , después del mezclado. Esto se utiliza para aproximar el período de inducción entre la mezcla inicial y el comienzo de la ganancia de la fuerza regida por la ecuación (14). La integral del lado derecho de la ecuación (16), es la forma general de la función temperatura-tiempo, la cual es denotada así:

$$F(t, T) = \int_{t_0}^t k(T) dt \dots\dots\dots (\text{Ec. 17})$$

Después, integrando el lado izquierdo de la ecuación (16) y reordenando los términos, se obtiene la siguiente función general de la ganancia de fuerza:

$$S = S_u \{F(t, T)/[1 + F(t, T)]\} \dots\dots\dots (\text{Ec. 18})$$

Considerando la función natural de madurez especificada en la ecuación (17), esta es considerada como el desarrollo de la fuerza bajo una constante y variable temperatura de curado.

Funciones de madurez debido a condiciones de curado isotérmico.

Para casos especiales donde la temperatura del concreto es constante se presenta la función general de fuerza-edad reducida a una simple ecuación como se expresa en la siguiente ecuación:

$$S = S_u \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \dots\dots\dots (\text{Ec. 19})$$

Esto refleja que la función de madurez es representada como una función de temperatura que tiene un valor constante la cual es representada como la ecuación (20).

$$M(t, T) = k_t(t - t_0) \dots\dots\dots (\text{Ec. 20})$$

Donde K_t es el valor de la función de temperatura o una constante de proporción de una temperatura dada de concreto. La curva es una hipérbola con un incremento inicial a $t_0 = K_t S_u$, y la curva es asintótica a una fuerza limitativa denominada S_u .

Una expresión similar a la descrita anteriormente fue derivada elegantemente por Knudsen usando un acercamiento o una aproximación diferente. El trabajó con el grado de hidratación del cemento en vez de la fuerza del concreto. El considero que la reacción cinética individual de los granos de cemento y la distribución de tamaños de las partículas de los granos (PSD). Las suposiciones claves en las deducciones de Knudsen, son las siguientes:

- Todas las partículas de cemento son químicamente similares y necesariamente serán clasificadas solamente de acuerdo a su tamaño.
- Las partículas de cemento reaccionan independientemente.
- La distribución del tamaño de las partículas esta descrita por una ecuación exponencial.
- La ecuación cinética para la hidratación de cada partícula, es definida también por una ecuación exponencial.

Knudsen concluyó que la ecuación hiperbólica (19), no solo sostiene un desarrollo de la fuerza sino también para otras propiedades del concreto, que está directamente relacionada con la extensión de la hidratación del cemento. El también sostuvo que el comportamiento de la hidratación del cemento es de lo contrario intensivo a los detalles específicos de la ecuación cinética de una partícula sencilla, porque la amplia distribución del tamaño de las partículas del cemento portland confunde los detalles de la reacción cinética.

Los resultados de su derivación fueron denominados como modelo de dispersión, porque la distribución del tamaño de las partículas de los granos del cemento fueron encontrados que jugaban un papel dominante en el comportamiento total de la hidratación.

Según Knudsen en 1980 la ecuación (19) es válida cuando las partículas individuales de cemento obedecen la cinética lineal. Esto hace referencia que la

constante de proporción K_t , depende de la distribución del tamaño de las partículas del cemento y de la constante de proporción de cada partícula (esta es dependiente de la temperatura).

La suposición de Knudsen de que las partículas de cemento reaccionan independientemente es significativa. Como es bien sabido los productos de hidratación se forman entre las partículas de cemento y los espacios ocupados por agua. Como la relación a/c es baja, la distancia entre las partículas de cemento es reducida, por lo tanto la interferencia de la partícula crece y al crecer, la proporción de la hidratación se ve disminuida.

Así Knudsen noto que el asumir la independencia de la partícula podía esperar que se violara la relación entre el agua y el cemento. Copeland y Kantro en 1960 mostraron, sin embargo, que para relaciones bajas de a/c, los efectos de la interferencia en las partículas en la hidratación, no eran significativos a temprana edad. Knudsen concluyo que al asumir la independencia de la reacción de la partícula, no será seriamente violada a relaciones de a/c=0.4. Así, era de esperarse que la constante de proporción puede ser independiente de la relación a/c durante las primeras etapas de hidratación.

Efecto de la temperatura sobre la ganancia de fuerza

El parámetro clave en la ecuación de Arrhenius en 1888 es la "energía de activación" que describe el efecto de la temperatura sobre la tasa de desarrollo de la fuerza. En la década de 1980, el autor inició una serie de estudios para obtener una mejor comprensión del método de la madurez [Carino, 1984]. A partir de este trabajo, se desarrolló un procedimiento para obtener la "energía de activación" de una determinada mezcla de cemento. El procedimiento se basa en determinar el efecto de la temperatura de curado en la constante de proporción del desarrollo de la fuerza. La constante de proporción está relacionada con el tiempo de curado necesario para alcanzar una cierta fracción de la resistencia a largo plazo, y se puede obtener

mediante el ajuste de una ecuación adecuada a los datos de fuerza versus edad adquiridos en virtud de una temperatura de curado constante (isotérmica) [Carino, 1984].

Al utilizar el procedimiento en [Carino, 1984], la "energía de activación" se determinó para el concreto y probetas de mortero hecho con diferentes materiales cementicos [Tank y Carino, 1991; Carino y Cuba, 1992].

	a/c=0.45				a/c=0.60			
	T °C	Q °K	B C ⁻¹	E kj/mol	T °C	Q °K	B C ⁻¹	E kj/mol
Con	11	7640	0.0862	63.5	8	5540	0.0621 2	46
Mor	11	7360	0.0824	61.2	7	5350	0.0596	44

Temperatura, C	S ₁ psi	s ₁ psi	k ₁₁ day ⁻¹	q ₁ day ⁻¹	t ₁ day	r ₁ day
Concrete						
10.0	6530	175	0.20	0.01	0.80	0.11
21.5	6405	265	0.40	0.07	0.10	0.13
-0.5	4505	90	2.67	0.32	0.21	0.01
Mortar						
10.0	9413	193	0.19	0.01	0.97	0.09
21.0	8580	260	0.32	0.03	0.17	0.09
-2.5	6625	280	2.61	0.75	0.20	0.03

Tabla 5. Constantes de proporción para concreto y morteros. Fuente 4.

La importancia de la "energía de activación" se explica más adelante. En la ecuación de Arrhenius, el término exponencial en la suma convierte incrementos de tiempo de curado a la temperatura del concreto real a incrementos equivalentes en la temperatura de referencia. Así, el término exponencial se puede considerar como un factor de conversión de edad, γ :

$$\gamma = e^{\frac{-E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)} \dots\dots\dots (\text{Ec. 21})$$

La Figura 3 muestra como el factor de conversión edad varía con la temperatura de curado para diferentes valores de la "energía de activación". (Tenga en cuenta que en la ecuación. (21), la temperatura absoluta se utiliza). La temperatura de referencia se toma como 23 ° C (≈ 296 K). Se ve que para que una "energía de activación" de 30 kJ / mol, el factor de conversión de la edad es casi una función lineal de la temperatura. En este caso, la ecuación de la Nurse-Saúl sería una función de la madurez razonablemente precisa para dar cuenta de los efectos combinados de tiempo y temperatura, porque la función de la Nurse-Saúl se supone que la constante de proporción varía linealmente con la temperatura [Carino, 1984]. Para una "energía de activación" de 60 kJ / mol, el factor de conversión de edad es una función altamente no lineal de la temperatura de curado. En este caso, la función de la Nurse-Saúl sería una función de madurez incorrecta. En resumen, la figura 12 muestra la naturaleza del error en el factor de conversión de edad si el valor incorrecto de la energía de activación se utiliza para una mezcla de concreto en particular. La magnitud del error se incrementaría con el aumento de la diferencia de la temperatura de curado de 23 ° C.

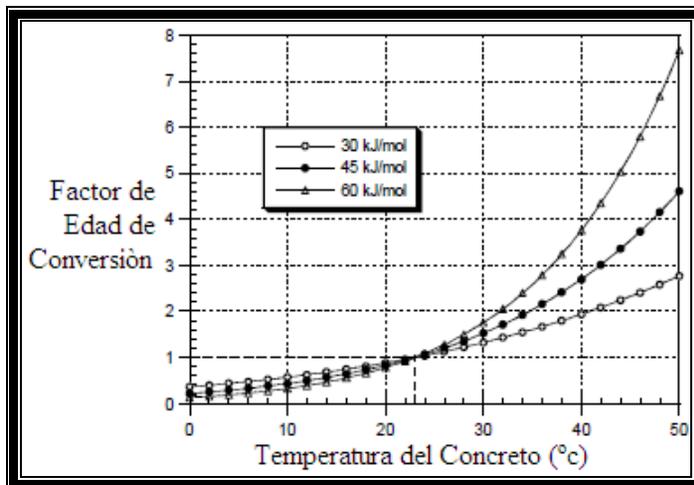


Figura 12. Factor de Edad de conversión de acuerdo a la ecuación. (3) para diferentes valores de energía de activación aparente ecuación. Fuente 5.

La siguiente discusión se proporciona para aquellos no familiarizados con el concepto de energía de activación o el origen de la ecuación de Arrhenius.

La idea de "energía de activación" fue propuesta por Svante Arrhenius en 1888 para explicar por qué las reacciones químicas no ocurren instantáneamente cuando los reactivos se unen, a pesar de que los productos de reacción se encuentran en un estado de menor energía [Brown y LeMay, 1988]. Arrhenius propuso que antes de que el estado de menor energía se complete, los reactivos deben tener suficiente energía para superar una barrera energética que separa los estados que no han reaccionado de los que sí lograron hacerlo. Una analogía física es colocar un ladrillo en posición vertical. El ladrillo está en un estado de menor energía cuando esté en posición horizontal, pero no estará instantáneamente al volcarse a este estado de menor energía. Debe ser empujado desde el más alto al estado de menor energía. La energía necesaria para empujar el ladrillo de la misma posición vertical hasta el punto de inestabilidad, hasta que este se caiga por sí solo, se denomina el proceso de la energía de activación.

Para los sistemas moleculares, las moléculas reactivas están en constante movimiento y la energía se transfiere entre ellos, ya que chocan [Brown y LeMay, 1988]. Un cierto número de moléculas adquieren suficiente energía para superar la barrera y la forma del producto de reacción de energía más baja. Como el sistema se calienta, la energía cinética de las moléculas se incrementa y más moléculas superan la barrera. Así, la tasa de reacción aumenta al aumentar la temperatura. Arrhenius observó que la constante de proporción k , de muchas reacciones, aumentan con la temperatura de acuerdo a lo que ha sido llamada la ecuación de Arrhenius, de la siguiente manera:

$$k = Ae^{\frac{-E}{RT}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 22})$$

El Término A que es llamado el factor de frecuencia se relaciona con la frecuencia de colisiones y la probabilidad de que las moléculas se orienten favorablemente por la reacción [Brown y LeMay, 1988]. Se puede observar que el factor de conversión de edad dada por la ecuación de Arrhenius es la relación entre las constantes de proporción a dos temperaturas diferentes.

La ecuación de Arrhenius se derivó de la observación empírica de los sistemas químicos homogéneos sometidos a una sola reacción. Roy y Idorn [1982] han señalado que los investigadores han advertido que, dado que el cemento es un material multifásico y también el proceso de hidratación del cemento no es una simple reacción, la reacción cinética homogénea no puede ser aplicada. Así, la energía de activación obtenidos a partir de los datos de aumento de la fuerza o el grado de datos de hidratación no es verdadera la energía de activación de una reacción única, como propuso inicialmente Arrhenius.

Tiempo de fraguado y Madurez.

Pinto y Hover (1999) investigaron si el método de madurez era aplicable al tiempo de fraguado del concreto, medida de conformidad con la norma ASTM C 403 / C 403. Los círculos negros en la figura 13.a muestra los tiempos de fraguado inicial en función de la temperatura media. Ellos encontraron que el tiempo de fraguado a diferentes temperaturas se podría utilizar para obtener una energía de activación aparente para representar a la dependencia de la temperatura del tiempo de fraguado. Los tiempos de fraguado invertidos se utilizaron como constantes de proporción, y los logaritmos naturales de las constantes de proporción se representan en función de la

inversa de la temperatura absoluta. Como se muestra en la figura 13.b, una línea recta que puede ajustarse a los datos transformados. La pendiente de la línea representa el negativo de la energía de activación aparente dividido por la constante de los gases (Ecuación de Arrhenius), y se conoce como Q en la norma ASTM C 1074. El valor de Q en este caso es 4978 1 / K, que es cercana al valor de 5000 1 / K se recomienda en la norma ASTM C 1074 para el concreto con cemento Tipo I. La medida de los tiempos de fraguado se puede convertir a los tiempos de fraguado de edad equivalentes a 23 ° C utilizando la ecuación de Edad Equivalente. Estos valores se muestran como los cuadrados abiertos en la figura 13.a. Se ve que los tiempos de fraguado equivalentes están muy cerca en el mismo valor. Así, mediante la medición de tiempos de fraguado a dos temperaturas extremas, es posible estimar los tiempos de fraguado para cualquier temperatura dentro de los extremos.

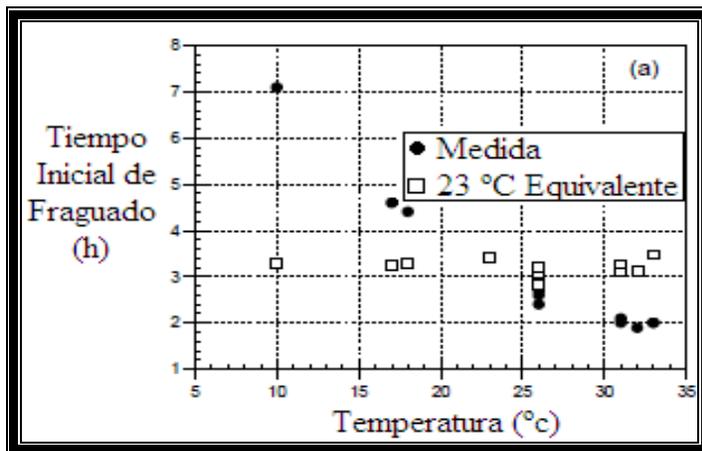


Figura 13.a. Tiempo Inicial de Fraguado Vs. Temperatura. Fuente 6.

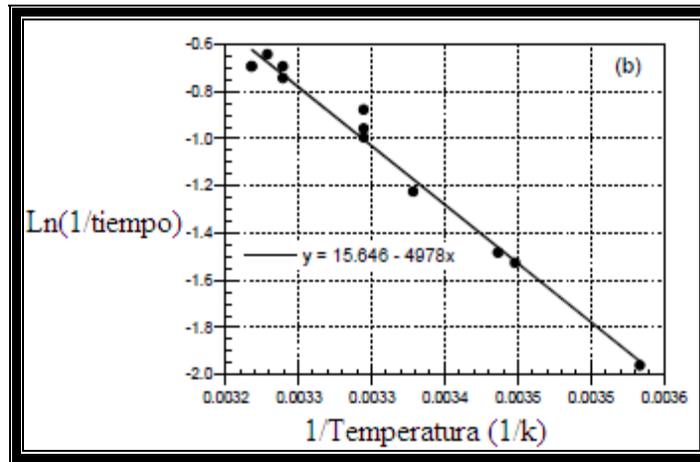


Figura 13.b. Trazado de logaritmo natural del inverso del tiempo de fraguado Vs. inverso de la temperatura absoluta. (Pinto y Hover 1999). Fuente 6.

Aparte de demostrar que los tiempos de fraguado a diferentes temperaturas, se puede estimar sobre la base del método de madurez, el trabajo de Pinto y Hover en 1999 los puede llevar a un método simplificado para determinar la energía de activación aparente asociada con el aumento de la fuerza. La Medición de tiempos de fraguado a diferentes temperaturas es más simple que el procedimiento recomendado en la norma ASTM C 1074, que consiste en medir el desarrollo de la fuerza de las mezclas de mortero.

Relaciones entre Fuerza y Madurez

En la suscepción revisada anteriormente se han propuesto funciones para calcular un índice de madurez (factor temperatura-tiempo o equivalente de la edad), basado en la historia de la temperatura del concreto. Funciones propuestas para relacionar resistencia del concreto con el índice de madurez se consideran a continuación. En esta discusión, el término de madurez referido al factor temperatura-tiempo ya sea calculado utilizando la función de Nurse-Saúl o la edad equivalente calculada, utilizan cualquiera de las funciones de madurez.

En 1956, Nykanen propuso una relación exponencial de fuerza-madurez como se expresa de la siguiente manera:

$$S = S \cdot (1 - e^{-kM}) \dots \dots \dots (\text{Ec. 23})$$

Donde

S = resistencia a la compresión

S· = fuerza limitativa a la compresión

M = índice de madurez

k = una constante

La fuerza que limita la compresión es una función de la relación agua-cemento. La constante k se relaciona con la tasa inicial de desarrollo de la fuerza. Según Nykanen en 1956, el valor de k se espera que dependa de la relación agua-cemento y el tipo de cemento.

Plowman observó que cuando la fuerza se representa gráficamente en función del logaritmo de la madurez (basada sobre la función de la Nurse-Saúl) los datos cayeron muy cerca de una línea recta. Por lo tanto, propuso que la siguiente relación de fuerza-madurez:

$$S = a + b \log(M) \dots \dots \dots (\text{Ec. 24})$$

Las constantes a y b están relacionadas con la relación agua-cemento del concreto y el tipo de cemento. La publicación de esta relación dio lugar a polémicas discusiones. Los siguientes puntos principales se plantearon, indicando las limitaciones de la propuesta de Plowman:

- La relación predice la fuerza cada vez mayor con el incremento de la madurez.
- La relación lineal no es válida para valores de madures a edades tempranas.

- Sólo los valores intermedios de madurez resulto en una relación aproximadamente lineal entre la fuerza y el logaritmo de la madurez.

En 1956, Bernhardt propuso una relación hiperbólica de fuerza-madurez. Una función similar independiente propuesto por Goral en 1956 para describir el desarrollo de la fuerza con la edad a una temperatura constante. Más tarde, el Comité 229 del Instituto de Concreto Americano (ACI) adoptó la misma función para estimar la resistencia del concreto en diferentes edades. En 1971, Chin propuso la misma función que se describe como un procedimiento para evaluar la función de los datos dado. La función hiperbólica fuerza-madurez puede ser expresada en la forma siguiente:

$$S = \frac{M}{\frac{1}{A} + \frac{M}{S_U}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 25})$$

Donde

M = índice de madurez

S_U = fuerza limitativa a la compresión

A = incremento inicial de la curva de fuerza-madurez

La forma de esta curva es controlada por el valor del incremento inicial. La figura 14 muestra dos curvas que obedecen a la ecuación (25), pero tienen diferentes incrementos iniciales. A medida que aumenta el incremento inicial, la fuerza se aproxima más rápidamente a la fuerza limitativa, así como la madurez aumenta.

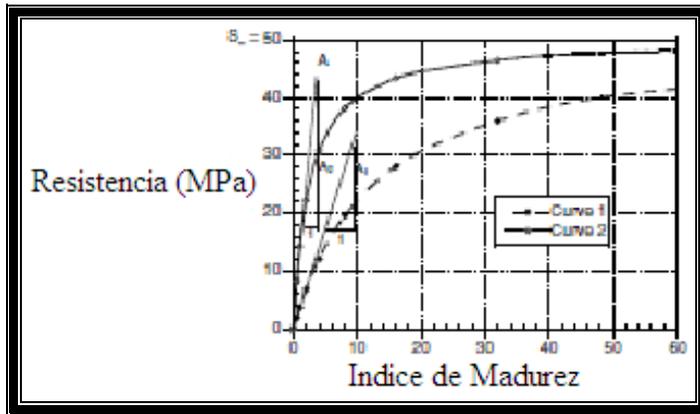


Figura 14. Relación hiperbólica fuerza-madurez teniendo diferentes incrementos iniciales pero a fuerzas limitativas similares. Fuente 5.

Desarrollo de fuerza-madurez

La clave para desarrollar la función de madurez más apropiada para una mezcla de concreto particular, es determinar la variación de la constante de proporción con la temperatura de curado. Como se mencionó, la constante de proporción está relacionada con la tasa de ganancia de resistencia a una temperatura constante, y puede obtenerse a partir de una ecuación adecuada de incrementar fuerza frente a la edad. Por lo tanto, es necesario tomar en cuenta, algunas de las relaciones que se han utilizado para representar el desarrollo de resistencia del concreto.

Los autores han utilizado con éxito la siguiente ecuación hiperbólica para ganar fuerza bajo un curado isotérmico a edades equivalentes de unos 28 días a 23 ° C:

$$S = S_u \frac{k(t-t_0)}{1+k(t-t_0)} \dots\dots\dots (\text{Ec. 19})$$

Donde

S = resistencia a la edad t,

S_u = resistencia limitativa,

k = constante de velocidad, 1 por día, y

t₀ = edad de inicio del desarrollo de la fuerza.

La base de esta ecuación se ha explicado en otro lugar [Carino, 1984; Knudsen, 1980]. La ecuación (19) asume que el desarrollo de la fuerza comienza a la edad de t_0 . Así, el período de gradual de desarrollo de la fuerza durante el fraguado no se considera. Los parámetros de S_u , k , y t_0 se obtienen por mínimos cuadrados de ajuste de la curva a los datos de la fuerza contra la edad. La fuerza limitativa, S_u , es el valor asintótico de la fuerza de la función hiperbólica que se ajusta a los datos. Como se discute más adelante, el valor de mejor ajuste para S_u no necesariamente representa la fuerza real a largo plazo del concreto, la constante de velocidad tiene la propiedad siguiente: cuando la edad más allá de t_0 es igual a $1/k$, la fuerza es igual a 50% de la fuerza limitante, S_u .

Una ecuación similar a la ecuación (19) también fue utilizado por Knudsen [1980] y Geiker [1983] para representar el grado de hidratación y el desarrollo de la contracción química en función de la edad.

Glosario de Términos Básicos.

Absorción: proceso mediante el cual un líquido penetra y trata de ocupar los espacios permeables existentes en un medio poroso.

Aditivos: son componentes de naturaleza orgánica (resinas) o inorgánica, cuya inclusión tiene como objeto modificar las propiedades de los materiales conglomerados en estado fresco. Se suelen presentar en forma de polvo o de líquido, como emulsiones.

Agregados: es la mezcla de arena y piedra de granulometría variable. El concreto es un material compuesto básicamente por agregados y pasta cementicia, elementos de comportamientos bien diferenciados.

Aire atrapado: aire que no llega a Escapar de la mezcla, predominantemente en forma de burbujas, aun con una adecuada compactación del concreto.

Asentamiento: medida de la consistencia del concreto fresco, evaluado mediante el ensayo del cono de Abrams.

Calor de Hidratación: calor desarrollado por las reacciones químicas con el agua, tales como las producidas durante el proceso de fraguado y el endurecimiento del concreto de cemento Portland tipo I.

Capilaridad: es el movimiento de un líquido en los intersticios del concreto, suelo o material poroso, debido a su superficie.

Cemento: Se denomina cemento a un conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava, más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece al reaccionar con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, denominado hormigón o concreto.

Cemento Portland: cemento hidráulico producido generalmente al pulverizar Clinker de Cemento Portland, con sulfato de calcio.

Concreto: mezcla de cemento Portland o de cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos, que mediante la hidratación del cemento adquiere consistencia.

Concreto fresco: estado fluido del concreto, que mantiene una capacidad de colocación y consolidación; esta denominación se entiende desde el momento de mezclado hasta que se inicia el atiesamiento de la masa por el fraguado.

Contenido de Aire: diferencia entre el volumen aparente de la mezcla y el que resulta de los volúmenes adecuados de los componentes.

Curado: el curado tiene por objeto evitar un secado prematuro, especialmente bajo la acción de los rayos del sol y del viento.

Curva Granulometría: representación gráfica de una granulometría.

Diseño de Mezclas: procedimiento mediante el cual se calculan las cantidades de todos los componentes de una mezcla de concreto, para alcanzar el comportamiento deseado.

Dosificación: proporción en peso o en volumen, según la cual se mezclan los componentes del concreto.

Finura del cemento: medida del grado de molienda dado por el número de cm^2 de superficie de partículas de cemento por grano de material.

Fraguado: proceso de hidratación de los distintos componentes de un aglomerante hidráulico, mediante el cual este adquiere mayor consistencia, lo cual se pone de manifiesto en los ensayos.

Granulometría: distribución de los tamaños (diámetros) de los granos que constituyen un agregado.

Ley de Abrams: ley que establece la correspondencia entre la resistencia del concreto y la relación agua/cemento.

Mezcla: es la cantidad de mezcla o mortero que se prepara de una sola vez.

Muestra: es la presentación representativa de un material.

Pasta de Cemento: aglomerante de concreto y mortero constituido fundamentalmente por cemento, agua, productos de hidratación y aditivos, conjuntamente con el material más fino provenientes de los agregados.

Rendimiento: cociente adimensional que mide el incremento de la resistencia del concreto Vs. el incremento en el contenido del cemento.

Resistencia: término genérico para designar la habilidad de un material para resistir deformaciones o roturas inducidas por fuerzas externas (resistencia a compresión, tensión, corte, fatiga).

Tamaño máximo del agregado: menor abertura del tamiz de malla cuadrada, que deja pasar al menos el 95% en peso de una muestra de agregados.

Tiempo de fraguado: lapso de tiempo desde el mezclado hasta el momento de aparición del asentamiento o pérdida de la plasticidad de la pasta.

Trabajabilidad: conjunto de propiedades del concreto fresco que permiten manejarlo, colocarlo en los moldes y compactarlo, aun que se produzca segregación. En forma no representativa de estas propiedades, se evalúa con el Asentamiento del cono de Abrams.

CAPITULO III

MARCO METODOLOGICO

Tipo de Investigación

Se define esta investigación en un ámbito o contexto experimental-documental.

Se presenta de tipo experimental mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por que causa se produce una situación o acontecimiento particular. El experimento es una situación provocada por el investigador para introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas. En el experimento, el investigador maneja de manera deliberada la variable experimental y luego observa lo que ocurre en condiciones controladas.

También es considerada documental, debido al hecho de recurrir a fuentes bibliográficas o literaturas especializadas para obtener información de las distintas experiencias desarrolladas en el campo de estudio, además de poder analizar las variables antes citadas que se pudiesen considerar de gran importancia en el trabajo de investigación, estableciendo para dichas variables el basamento teórico necesario para comprender como es su mecanismo de acción y de qué forma pueden aceptar los resultados que se derivan al aplicar el método de madurez estudiado.

3.2 Técnicas de Recolección de Información en la Literatura Especializada

Se inicia el desarrollo de esta investigación recopilando toda la información que compete al método de madurez del concreto, cuya variable es la temperatura, y que ha sido empleado en los procesos constructivos a partir de que fue posible registrar la primera incursión en el estudio de este método; garantizando obtener la información necesaria y precisa teórica y practica para la búsqueda de la solución del problema. Esta información se obtuvo aplicando métodos alternativos como: revisión de literaturas especializadas, en el web site y entrevistas informales.

3.2.1 Revisiones en Literaturas Especializadas

Con la obtención de todos los conocimientos teóricos importantes que se aplican en los procesos prácticos, deben ir respaldados de una información bibliográfica adecuada, la cual garantiza los pasos correspondientes para la resolución del problema. Es por ello que se consulto con lo siguiente:

- Magazines y folletos.
- Informes técnicos.
- Trabajos especiales de grado.
- Normas de especificaciones técnicas emanadas de organismos a nivel nacional e internacional.
- Literaturas y tratados.

3.2.2 Web Site

En las páginas electrónicas existentes en Internet, se baso para hacer las diferentes consultas, y tomar de forma precisa y exacta los temas relacionados a nuestra investigación.

Esta información es publicada por organismos nacionales, internacionales o de cualquier ente investigador.

3.2.3 Entrevistas Informales

Al igual que la observación, es de uso bastante común en la investigación, ya que en esta área buena parte de los datos obtenidos se logran por entrevistas. Es decir que la entrevista es la relación directa establecida entre el investigador y su objeto de estudio a través de individuos o grupos con el fin de obtener testimonios orales.

La entrevista puede ser individual o colectiva. Por la forma en que esta estructurada puede clasificarse entre libre o dirigida. Cuando ciertas condiciones externas a la investigación lo permiten, es conveniente repetir la entrevista para verificar la información obtenida. Se dice que la entrevista hábil es un arte. La experiencia del investigador, su trato adecuado, su autoridad y capacidad de adaptarse a cualesquiera circunstancias, serán cualidades indispensables para obtener el máximo provecho de los informantes.

En nuestro caso, estas entrevistas fueron realizadas a ingenieros, jefes, técnicos de laboratorios y gerentes de calidad que laboran en plantas de concreto premezclado y los laboratorios de materiales y ensayos.

3.3 Procedimientos Para la Ejecución de la Investigación

El desarrollo científico y tecnológico se ha hecho posible con facilidad, gracias a la aplicación de métodos específicos que hacen así la obtención de relaciones entre las distintas variables que caracterizan a un sistema físico, y a partir de esto ampliar los métodos y dispositivos nombrados de uso industrial o doméstico para que cada vez sean más eficaces y eficientes.

Para cualquier proceso de investigación pura y aplicada, el científico basándose en sus observaciones de un acontecimiento o fenómeno respecto al mismo formula hipótesis, realiza experimentos que tienen un estricto control y una vez obtenidos los resultados permite aceptar o descartar las hipótesis planteadas. Al momento de confirmarse la hipótesis, esta puede enunciarse como una nueva teoría.

En el ámbito estadístico, la muestra es un porcentaje de la población total, siendo como población la totalidad

Para la realización de un experimento se debe establecer inicialmente los objetivos, luego se plantean variables que permitan describir el sistema estudiado, procedimientos e instrumentos de acuerdo a la exactitud, costos y tiempo determinados. Cuando se desea analizar los resultados y llegar a conclusiones, es primordial como inicio la toma, planificación, organización y procesamiento de los datos y las medidas. Posteriormente, se sintetiza el modelo matemático que mejor se adapte a la explicación de dicho fenómeno al cual se ha mantenido bajo observación.

El procedimiento para medir una magnitud física comprende tres etapas básicas: planificación, ejecución y verificación.

- Planificación.
 - Fijar objetivos.
 - Seleccionar experimento.
- Ejecución (trabajo práctico y analítico).
 - Tomas de datos y medidas.
 - Procesamiento de datos.
 - Obtención de resultados.
- Verificación.
 - Evaluación de resultados.

La verificación es donde se elaboran las conclusiones, por ello es de suma importancia. Además, permite detectar y corregir los errores en el proceso, para lo cual es necesario efectuar modificaciones bien sea en la aplicación de los otros métodos o técnicas que permitan cambiar o mejorar la exactitud en los datos obtenidos. Estos cambios se verán reflejados en las etapas de planificación y ejecución.

3.3.1 Objetivos de Experimento

Este punto fue definido ya en el capítulo 1 de la presente investigación, donde se refiere en aplicar el método de madurez para la estimación de la resistencia cilíndrica de varias mezclas de concreto de cemento Pórtland tipo I a distintas edades, donde para lograrlo se necesita diseñar la mezcla de concreto de cemento Pórtland tipo I a utilizar, obtener la resistencia cilíndrica de cada diseño de mezcla a distintas edades, aplicar el método de madurez y comparar resultados obtenidos.

3.3.1.1 Magnitud a Medir

A partir del objetivo trazado, el trabajo se basa en el método de madurez, que correlaciona los valores de índice de madurez y resistencia, el índice de madurez se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

M (t) = factor de temperatura-tiempo a la edad t, grados-día o grados-hora. (Índice de Madurez)

Δt = un intervalo de tiempo, días u horas,

T_a = temperatura del concreto promedio durante el intervalo de tiempo,

T_0 = temperatura de referencia, ° C.

Y los valores de la resistencia, son arrojados directamente por el ensayo a compresión, que en el método se aplico, la ecuación utilizada es:

$$R = \frac{F}{A}$$

Donde:

R = Resistencia.

F = Carga de Fuerza aplicada.

A = Área del cilindro o probeta perpendicular a la carga aplicada.

3.3.1.2 Precisión Requerida

En un trabajo de ámbito experimental los datos que de allí se obtienen durante el proceso de medición, pueden ser descritos de la siguiente forma:

$$X_i = \bar{X} \pm \Delta x \text{ o a través de } X_i = \bar{X} \pm Er\% \dots\dots\dots (2)$$

La cual expresa el valor medio y el error cometido en el proceso de medición o en la lectura de la magnitud en estudio. Es de gran importancia plantear la precisión necesaria para que el método aplicado presente validez, los valores limites de precisión serán determinados según un nivel de control que se aplica en la NORMA ACI 214-77 , y la NORMA COVENIN 3549-1999, por medio de las cuales se podrán determinar tanto la desviación estándar como el coeficiente de variación que serán aceptado según el grado de control de la muestra en estudio, para así evitar ser un factor limitante, ya que se cuenta con un instrumento delicado y complejo y debe garantizarse la correcta aplicación del método.

3.3.2 Método Empleado

En el capítulo II, se mencionan los ensayos normalizados para la estimación de la resistencia del concreto a cualquier edad, los cuales han sido empleados en numerosas investigaciones a nivel global. De esto se hace

hincapié en el método de madurez, el cual es a base de relacionar la reacción química del concreto que genera cambios de temperatura a un tiempo determinado.

Luego de las diversas investigaciones se elaboró una norma tentativa para la implementación del método de madurez, esta norma se conoce como la NORMA ASTM C1074 (ver apéndice A), lo cual cita 2 alternativas:

- Ecuación de Nurse-Saúl, factor de tiempo temperatura (TTF).
- Función de edad equivalente a temperatura específica, conocida como la ecuación de Arrhenius.

Ambas funciones serán consideradas para la presente investigación. Siendo de mayor precisión la ecuación de Arrhenius, la cual refleja o proporciona resultados más precisos cuando la temperatura varía de forma importante.

El procedimiento que se realizará esta apegado a la norma con ciertas consideraciones:

- Los días de ejecución de ensayo a compresión son para las edades (1, 2, 7, 14 y 28). A diferencia a lo establecido en la norma que establece aplicar las pruebas a las edades (1, 3, 7, 14 y 28), donde varía en una edad.

3.2.2.1 Equipos a utilizar para el desarrollo de la investigación

- Molde metálico cilíndrico, de 102,5 mm. \pm 2,5 mm. de diámetro, por 205 mm. \pm 5 mm. de altura.
- Barra compactadota: barra recta de acero lisa de 10 mm. (3/8") de diámetro, de punta semiesférica y aproximadamente 50 cm. de longitud.

- Base del molde de material no absorbente, preferiblemente se usara una base metálica.

- Molde “CONO DE ABRAMS”, el molde estará construido de una chapa metálica con un espesor mínimo de 1,5 mm., y su forma será de un tronco de cono. Los dos círculos de las bases serán paralelos entre si: de 20 cm. de diámetro la base inferior y 10 cm. de diámetro la base superior, formando un ángulo recto con el eje del cono. La altura del molde será de 30 cm. dicho molde estará provisto de asas y aletas de pie.

- Cuchara de muestreo y cuchara de albañilería.

- Maquina de ensayo a Compresión Ton Technick, con su traductor digital Pacam Electronic y un traductor de baja resolucion de 3000 a 5000 psi.

- Piscina de curado: de metálica de láminas galvanizadas de 5 mm. de espesor. Es de base cuadrada de 0.80 m. por 0.80 m. y una altura 0,25 m.

- Trompo mezclador B-132 Gruy Noel Betoniers, de capacidad máxima 100 litros \pm 5%.

- Aparato registrador de temperatura Squirrel 100 series (made by grant instruments (cambridge)).

- Equipos y herramientas menores.

3.3.2.2 Determinación del número de muestras a ensayar

Tomando como referencia lo establecido en la NORMA ASTM C1074 que establece preparar al menos 15 cilindros de cada diseño de mezcla de acuerdo a la NORMA C192 / C192M.

Por medio de análisis estadísticos establecidos como media maestral, índices de series, desviaciones estándar, coeficientes de variación y así como

métodos de cálculos como diferencias finitas y mínimos cuadrados para la aproximación de regresiones de función no lineal, se llegó a la determinación del número de cilindros mínimos por cada edad.

- 4 probetas a la edad de 24 horas.
- 4 probetas a la edad de 2 días.
- 4 probetas a la edad de 7 días.
- 4 probetas a la edad de 14 días.
- 4 probetas a la edad de 28 días.

El valor promedio de las 4 probetas, nos arroja un punto característico para la resistencia de concreto a esa edad específica. De esto se tienen 20 probetas por cada diseño de mezclas, arrojando un total de 20 cilindros a ser ensayados a compresión.

También se plantean 4 cilindros registradores de temperatura, los cuales se clasifican en 2 para cada diseño de mezcla correspondiente, 2 probetas a 210 kgf/cm^2 y 2 probetas a 250 kgf/cm^2

3.3.2.3 Materiales empleados

Los materiales son los facilitados por la empresa Sika.S.A. de Venezuela, los cuales son utilizados y estudiados para la realización de sus ensayos. En el apéndice C se puede observar las características correspondientes a los agregados utilizados (agregado fino y agregado grueso), así como también los requisitos de calidad y característica del cemento Pórtland tipo I, cuyo informe es elaborado por la planta procesadora de dicho material, para la realización de las dosificaciones que fueron previstas en planta.

3.3.3 Detección y control de errores

En todo ensayo existe la presencia de errores, estos a su vez son afectados por causas o agentes externos que permiten modificar o alterar un resultado particular. Cuando se habla de concreto, hacemos referencia a el origen estadístico que este proporciona, debido a las evaluaciones bajo las mismas condiciones que sobre el se someten.

Dentro de este, se presentan gran cantidad de variables que arrojan o reflejan errores de cualquier índole, provocando así, la necesidad de identificar y eliminar cuando no es posible minimizar alguno de ellos. En el apéndice se refleja un cuadro de clasificación de errores cometidos con frecuencia en la determinación de las resistencias a las edades correspondientes.

3.3.4 Explicación del Procedimiento empleado para la obtención de los puntos característicos de resistencia

3.3.4.1 Elaboración de las probetas a ensayar

- Las probetas se moldearon de acuerdo a lo establecido en el Método CCCA en 338-2002(ver apéndice E).
- Se midió el asentamiento de las muestras de acuerdo al Método CCCA en 339-2002(ver apéndice E).
- Se determinó el porcentaje de aire atrapado de acuerdo al Método CCCA en 348-83 (ver apéndice E).

3.3.4.2 Etapa de PreCurado

- Los cilindros fueron colocados en un lugar libre de accidentes, golpes, entre otros, y dentro de las instalaciones del laboratorio, a temperatura ambiente. A demás se incluyen los cilindros que permiten ser testigos de los registros de temperatura constantes.

- Esta etapa finalizó después de 24 horas, a partir de la elaboración de los mismos.

3.3.4.3 Etapa de Curado

- Finalizadas las 24 horas de la elaboración de las probetas cilíndricas, estas fueron desmoldadas.
- Posteriormente fueron almacenadas en la piscina de curado prefabricada. La temperatura a la cual estuvo sometida esta etapa, es la temperatura ambiente y según la NORMA ASTM C1074 que establece un rango entre 0 °C y 40 °C. A demás se incluyen los cilindros que permiten ser testigos de los registros de temperatura constantes.

Los cilindros presentaron las mismas condiciones durante esta etapa, bajo las limitaciones del Método CCCA con 2-1965.

3.3.4.4 Etapa de PostCurado

- Luego de haberse finalizado el tiempo de inmersión en agua de las probetas, se extraen a la edad correspondiente, para así dejarlas reposar durante el tiempo establecido en la NORMA ASTM C39 y la NORMA COVENIN 338-2002. incluyendo los testigos que registran la temperatura.

3.3.4.5 Ensayo de Probeta

- Una vez finalizada la etapa de postcurado, se procedió a la ejecución del ensayo a la Compresión Simple de los testigos cilíndricos de acuerdo a las NORMAS ASTM C39 y COVENIN 338-2002. excluyendo a las probetas registradoras de temperatura.

En el ensayo a Compresión Simple lo que se obtiene es el valor máximo de la carga que soporta los cilindros, esta carga se representó en Kgf.

3.3.5 Registro de Data y Mediciones

Los registros de una medida pueden organizarse por medio de cuadros o tablas, que permiten sencillez en cuanto a la forma de su procesamiento y análisis. En toda experimentación donde es necesario el estudio de relaciones entre dos o mas magnitudes físicas, resulta práctico graficar los datos, favoreciendo así una mejor comprensión y al planteamiento de las conclusiones.

Para la presente investigación, se crearon tablas o cuadros para ubicar los resultados o la información correspondientes a los ensayos, estas se realizaron mediante una aplicación del Microsoft conocida como Excel, el cual es un programa computarizado que permite realizar cálculos y organizar los resultados.

El objetivo de la realización de estas tablas es de facilitar, mediante resultados iniciales obtener por medio de cálculos necesarios los resultados finales. Este mecanismo es de práctico entendimiento, cuando se describen las estructuras de las tablas utilizadas en el procesamiento de datos.

En primera estancia se observa el cuadro general de los resultados, el cual se expresa de la siguiente manera:

Numero de muestra	Fecha de toma	Hora de toma	Fecha de ensayo (edad)	Hora de ensayo
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Temperatura de ensayo (°C)	Resistencia de diseño (kgf/cm^2)	Asentamiento (pulgada)	Diámetro (cm.)	Área del cilindro (cm^2)
(6)	(7)	(8)	(9)	(10)

Peso (Kg.)	Carga (kgf)	Resistencia obtenida (kgf/cm^2)	Resistencia promedio (kgf/cm^2)	Observaciones
(11)	(12)	(13)	(14)	(15)

Tabla 3.1 hoja de calculo de cuadro de información general de los ensayos de las probetas cilíndricas. Fuente: Flores, C. y González, J.

- columna 1: Se tiene el número de los cilindros.
- columna 2: se tiene la fecha a la cual se elaboró la probeta.
- columna 3: Se tiene la hora de elaboración de los cilindros, a partir del primer registro de temperatura.
- columna 4: fecha a la cual se hace el ensayo a compresión.
- Columna 5: hora en la cual se ensaya el cilindro.

- Columna 6: es el promedio de temperatura de los cilindros conectados al equipo squirrel en °C.
- Columna 7: es la resistencia a la cual fue diseñada la mezcla, expresada en kgf/cm^2 .
- Columna 8: asentamiento tomado mediante el Cono de Abrams, en pulgadas.
- Columna 9: diámetro del cilindro en cm.
- Columna 10: es el área de la probeta (cm^2).
- Columna 11: es el peso del cilindro a la hora de ensayo (Kg.).
- Columna 12: momento en el cual se registra el valor de la carga al ejecutar el ensayo, se expresa en kgf.
- Columna 13: resistencia de cada probeta cilíndrica. La ecuación para el calculo de la resistencia es:

$$R = \frac{F}{A}$$

Esto esta expresado en kgf/cm^2 , también puede definirse como la columna 13 entre la columna 11.

- Columna 14: promedio de las resistencias de los 4 cilindros, en kgf/cm^2 .
- Columna 15: son las observaciones notadas en todo el proceso.

A partir del cuadro de información general se puede expresar el resumen de resultados agrupados por cilindros, el cual se presenta a continuación:

Grupos de cilindros	Edad (días)	Temperatura promedio (°C)	Resistencia promedio (kgf/cm^2)	Observaciones
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Tabla 3.2 hoja de calculo de cuadro de resumen de resultados agrupados por cilindros. Fuente: Flores, C. y González, J.

- Columna 1: grupo de cilindro en función a su edad de ensayo.
- Columna 2: edad en la cual se ensayan los cilindros.
- Columna 3: la temperatura promedio de los cilindros conectados al equipo squirrel en °C. a la edad de ensayo.
- Columna 4: promedio de las resistencias de los 4 cilindros, en kgf/cm^2 .
- Columna 5: son las observaciones notadas en todo el proceso.

A continuación obtenemos una tabla donde se expresara el registro de las temperaturas y tiempo con respecto al diseño de mezcla correspondiente, así como también la temperatura ambiental y la del agua de la piscina de curado.

Fecha / hora de registro	Intervalo de tiempo	Canal 1	Canal 2	Canal 3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Canal 4	Canal 5	Canal 6	Índice de madurez	Edad equivalente
(6)	(7)	(8)	(9)	(10)

Tabla 3.3 hoja de calculo que representa el tiempo y la temperatura de las mezclas a ensayar. Fuente: Flores, C. y González, J.

- Columna 1: es la fecha y hora cuando es introducido el cable que registra la temperatura (couple).
- Columna 2: intervalo de tiempo en el cual se registra la temperatura.
- Columna 3: corresponde al diseño de mezcla 1, para 250 kgf/cm^2 .
- Columna 4: corresponde al diseño de mezcla 1, para 250 kgf/cm^2 .
- Columna 5: corresponde al registro de la temperatura ambiental.
- Columna 6: corresponde al registro de la temperatura del agua de la piscina de curado.
- Columna 7: corresponde al diseño de mezcla2, para 210 para kgf/cm^2 .
- Columna 8: corresponde al diseño de mezcla2, para 210 para kgf/cm^2 .

- Columna 9: mediante la siguiente ecuación de Nurse-Saúl (NORMA ASTM C1074), expresamos el índice de madurez con temperaturas referenciales de 0 °C y 10 °C:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t$$

El cual puede ser expresado en °C-día o °C-horas.

En la misma columna 9, se expresara la edad equivalente, así como también el índice de madurez establecidos en la EXPRESIÓN DEL MANUAL DEL CONCRETO ESTRUCTURAL a una temperatura referencial de 10 °C.

$$M = \sum (T + 10) * t$$

- Columna 10: representa la edad equivalente a una temperatura específica, el cual se calcula mediante la ecuación de Arrhennius:

$$t_e = \sum e^{-Q(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s})} \Delta t$$

Donde es expresado en días u horas.

Mediante los procedimientos anteriores podemos obtener lo que se conoce como conjunto de datos, que posteriormente representaran puntos de gráficos característicos, bajo un sistema de coordenadas cartesianas.

A continuación presentamos los distintos sistemas de coordenadas que serán los gráficos esquemáticos de nuestra investigación:

- Gráfico 1: donde tendremos como variables independientes el tiempo y las temperaturas de registro de los especimenes o edad de los mismos. A partir de estos se determina el índice de madurez que representa la variable dependiente para la expresión que mejor se represente con el gráfico.

Es necesario destacar que para el cálculo del índice de madurez se tomara como referencia una temperatura de 0 °C, cuya recomendación se puede notar en la NORMA ASTM C1074-04.

- Gráfico 2: se basa en graficar como variable independiente el índice de madurez anteriormente obtenido en la gráfica 1, y como variable dependiente será la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas a las edades correspondientes.

En este gráfico será necesaria la determinación de una relación funcional entre las variables de estudio que mejor se adapta para este conjunto de puntos.

- Gráfico 3: representa como variable independiente la edad equivalente a una temperatura dada, obtenida en la función de Arrhenius, y como variable dependiente el valor de las resistencias cilíndricas con respecto a su edad correspondiente.

Al igual del grafico anterior se hará una relación funcional que mejor se adapte para las variables de este, lo cual se conoce como ajuste de curva.

Es necesario destacar que para el cálculo de la edad equivalente se tomará como energía de activación igual a 5000 °K. (Para un valor de la constante de gas de 8,31 J/(K·mol)), el cual es recomendado por la NORMA ASTM C1074-04.

Los métodos para la búsqueda de una ecuación empírica que mejor se comporta en un experimento, son muy variados y en algunos casos dicha búsqueda suele ser compleja. Uno de las formas más sencillas para encontrar el tipo de ecuación es mediante el análisis de la grafica, que es conocido como el método grafico. Otra de las alternativas de solución puede ser el empleo de métodos analíticos, entre los cuales podemos hacer referencia al método de las

diferencias finitas y al método de los mínimos cuadrados. En este estudio se usará la alternativa del método analítico de mínimos cuadrados, el cual es empleado en el programa Microsoft Excel, para establecer tendencia que permitan el ajuste de curvas. Los fundamentos teóricos sobre los cuales funciona este mecanismo se exponen en el apéndice F.

En esta fase se analizarán los distintos ajustes de curvas para verificar cual de estos pueden ser el que mejor representa al conjunto de puntos o nubes de revisión. Por medio del programa Excel, se establece un coeficiente de correlación o un índice de aceptación, el cual estará establecido en un rango de 0 y 1. Mientras más cercano a la unidad esté, mayor será la aproximación de la curva que mejor se adapta a la nube de puntos.

Una vez obtenidas las expresiones matemáticas se procede a tabularse los resultados obtenidos, de la siguiente manera:

	Resistencia a la Rotura para la Compresión					Difere ncias entre Edades <i>kgf / cm</i>	Err or Relativo	Var ianza (%)
	Ensayo			Prono stico				
Nº Muestra	Resist encia Diseño	Índi ce Madurez	Edad Equivalente	Resist encia	Resist encia según Ajuste			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)

Tabla 3.4: hoja de cálculo de Verificación de Ajuste de Curva Considerada. Fuente: Flores, C. y González, J.

- Columna 1: se denota el número de muestra.
- Columna 2: indica la resistencia de diseño.
- Columna 3: expresa el factor temperatura-tiempo, es la coordenada “X”, determinada con la ecuación 1.
- Columna 4: es la edad equivalente, es la coordenada “X”, determinada con la ecuación 2.
- Columna 5: es la resistencia de ensayo a una determinada edad, índice equivalente o factor temperatura-tiempo.
- Columna 6: indica el resultado de evaluar las abscisas de acuerdo a la expresión matemática obtenida del ajuste de la curva que se esta analizando.
- Columna 7: expresa la diferencia de la resistencia entre los ensayos a la misma edad, edad equivalente o factor temperatura-tiempo.
- Columna 8: es el valore relativo que se obtiene de las columnas 5 y 6.
- Columna 9: expresa el valor de la varianza.

Esta secuencia se establece de la siguiente manera, ya que se va calculando los ajustes de los valores de la desviación estándar y el coeficiente de variación, la desviación estándar corresponde al índice de dispersión o variabilidad de sus datos, y se calcula con la siguiente ecuación:

CAPITULO V

CONCLUSIONES

De los resultados arrojados se puede concluir que los diseños de mezcla fueron obtenidos de forma satisfactoria, para así poder llevar a cabo un análisis en función a sus resistencias características como fueron: diseño de mezcla 1 con resistencia cilíndrica de diseño de 210 kgf/cm^2 a 28 días de edad, así como el diseño de mezcla 2 con resistencia cilíndrica de diseño de 250 kgf/cm^2 a 28 días de edad.

Se cumplió a cabalidad la obtención de las resistencias de las probetas cilíndricas a distintas edades de las mezclas de concreto de cemento Portland tipo 1, bajo los requerimientos de las Normas ASTM C39 y COVENIN 338-2002, los cuales fueron puntos de referencia para posteriormente, presentar la propuesta planteada en el capítulo 4.

Una vez aplicado el método de madurez bajo la norma ASTM C1074, por medio de la presente investigación se explica la teoría básica del método, el cual tiene como base fundamental los efectos combinados de temperatura y tiempo que influyen en la ganancia de resistencias del concreto, el cual puede ser aplicado a probetas cilíndricas para simular dicha resistencia característica de la mezcla correspondiente. Si bien es cierto a lo largo de los años se han aplicado una gran variedad de estudios basados en este método, para tratar predecir la ganancia de resistencia del concreto bajo curados de temperaturas variables como también de temperaturas constantes. Los cambios de temperaturas que resultan en el proceso de mezclado, es la determinante de cómo se hidrata cada una de las partículas de cemento derivadas de

las reacciones cinéticas y que a su vez el tamaño de estas permiten precisar una mayor o menor ganancia de resistencia.

En este desarrollo teórico queda demostrado que bajo un curado isotérmico constante las condiciones para la ganancia de la resistencia de concreto puede ser descrita como ha sido asumido por muchos autores por medio de una curva hiperbólica, ya que en función a las tres tendencias propuestas (logarítmicas, potenciales e hiperbólicas), es la que mejor representa al conjunto de los datos suministrados. Esta se fundamenta en tres parámetros característicos: fuerza limitativa (S_u), constante de proporción (k) y la edad a la cual se asume la ganancia de la resistencia del concreto (t_0). Para efectos de estudio no fue evaluado el fraguado final, pues este parámetro (t_0), no se considera para la elaboración de dicha curva, sin embargo aun establece una buena representación respecto al conjunto de datos. Cabe destacar que la constante de proporción se toma como una función lineal en el curado, convirtiendo así el factor de temperatura-tiempo en la función tradicional de madurez. El parámetro de la constante de proporción (K), a una temperatura específica es el que gobierna el incremento inicial en la curva hiperbólica, y el factor sensitivo de la temperatura es usado para hallar la edad equivalente de las mediciones del historial de temperatura. La tendencia hiperbólica, determinada por la edad equivalente presenta la madurez obtenida por la expresión matemática de Nurse-Saúl, siendo igual a la constante de proporción por la edad equivalente. Esta constante difiere del valor de A (incremento inicial), el cual se convierte en el parámetro característico que define la forma de la curva.

Los resultados derivados de la investigación pueden catalogarse como satisfactorios, pudiéndose llegar a una relación funcional que permite describir el conjunto de los datos en estudio, lo que con lleva a una aproximación muy acertada para pronosticar la resistencia característica de la muestra de concreto y a su vez con el cumplimiento fidedigno del objetivo general. Estos resultados evidencian que es factible la aplicación del método de madurez en la planta de estudios, convirtiéndose como una herramienta alterna para la predicción a temprana edad de la resistencia del concreto a 28 días de edad, pudiendo compararse o complementarse con los resultados de los ensayos aplicados de forma rutinaria en dicha planta (ensayo a compresión de cilindros a 1, 2, 7,14 y 28 días).

RECOMENDACIONES

Ante la información planteada y los resultados obtenidos en esta investigación, pueden ser descritas las siguientes recomendaciones:

- Establecer dicha relación para diferentes tipos de agregados combinándolos entre sí, provenientes de distintas zonas paraa realizar un análisis de una expresión matemática general en una localidad específica. Esto con miras a efectuar que el método de madurez pueda presentar una aplicación mucho mas amplia, y no solo un instrumento de utilización para una zona en particular.
- Elaborar esta investigación bajo las mismas directrices pero considerando la aplicación de aditivos a la mezcla de concreto en estudio, así como también hacer variaciones entre distintas relaciones de agua-cemento (a/c), para poder establecer la inclusión de variantes que afecten de algún modo a la relación obtenida.
- Plantear esta alternativa de solución, elaborándola en condiciones de campo, para así establecer una relación directa de cómo puede variar las temperaturas del ambiente con respecto a las temperaturas de curado, y a su vez comparar que tanta dispersión existirá entre las relaciones funcionales obtenidas.
- Establecer la correspondencia entre la resistencia a la compresión, variando la forma de la probeta, es decir aplicadas a viguetas que son ensayas a flexión para el caso del pavimento del cemento Portland, a cilindros de concreto de 15cm x 30 cm y a cubos de morteros, para determinar si existe una relación funcional adecuada que permite describir la variable deseada.

- Aplicar el método de madurez establecido en la NORMA ASTM 1074, para determinar a estas mezclas de concreto estudiadas las temperaturas de referencias y las energías de activación correspondientes para así ser comparadas con las relaciones funcionales del presente estudio.

- Se comentó anteriormente que la investigación se realizó en una planta dedicada a la fabricación de aditivos para el concreto así como también para la industria de la construcción. Los diseños de mezclas empleados corresponden a concretos normales de resistencias comerciales, como lo son de $210 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ y $250 \text{ kgf} / \text{cm}^2$, lo cual hace que para cada tipo de diseño hace una tendencia única aceptada.

- En función a los análisis obtenidos, aplicar el método de madurez durante los primeros días de curado (aproximada los primeros 7 días de curado), para comparar si existe la factibilidad de construir una curva que permita representar al conjunto de datos mediante la tendencia hiperbólica.

- Aplicar las mediciones de los tiempos de fraguado iniciales y finales a los diseños de mezclas de concretos correspondientes, para establecer el ajuste adecuado a las relaciones funcionales obtenidas.

- Establecer el método de madurez para las mezclas ya anteriormente citadas, para expresar una relación con el ensayo del penetrometro y el tiempo de fraguado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Porrero, Joaquín; Ramos R, Carlos; Grases G; Velazco, Gilberto J. Manual del concreto estructural, conforme con la norma COVENIN 1753:03. Sidetur. Tercera edición. Venezuela, Caracas abril 2009.
2. Neville, A.M; Brooks, J.J. Tecnología del concreto. Editorial Trillas, México 1998.
3. Medina, Ángel J; Sánchez, Robert G. Pronóstico de la resistencia característica del concreto a partir del ensayo de probetas cilíndricas sometidas a un método de curado acelerado, tomando como base el método ASTM 684-73T. Trabajo Especial de Grado, Valencia 2004
4. Malhotra, V.M. Concepto de Madurez y la Estimación de la Fuerza del Concreto. Información circular IC 277, Departamento de investigaciones de Energía y Minas. Canadá, noviembre de 1971.
5. Carino, N.J. El método de Madurez. Capítulo 5 de Manual de ensayos No Destructivos del Concreto. 2da edición. ASTM Internacional. West Conshohocken, P.A, 2004.
6. Carino, N.J; Lew, H.S. El Método de Madurez: Teoría y Aplicación. Tomado de las Actas del Congreso Estructural y Exposición. Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, de Reston, Virginia, Peter C.Chang, Washington, DC mayo 21-23, 2001.
7. Carino, N.J. El Método de Madurez: Teoría y Aplicaciones. ASTM diario de Cemento, Concreto y Agregados, volumen 6, No 2. Verano de 1984.
8. Tank, R. C; Carino, N.J. Funciones de las Constantes de Proporción en el Desarrollo de la Fuerza del Concreto. Diario de materiales de ACI. Volumen 88, No 1. Enero-Febrero de 1991.
9. Freislesben Hansen, P; Pedersen, J. Equipo de Madurez para el Curado Controlado y Endurecimiento del Concreto. Nordisk, Betong en 1977.

10. Knudsen, T. Distribución del Tamaño de la Partícula en la Hidratación del Cemento. 7mo Congreso Internacional en la Química del Cemento. Séptima Edición. Volumen II. Paris 1980.
11. Bentza, Dale P; Garboczia, Edward J; Haeckerb, Claus J; Jensen, Ole M. Efectos de la distribución de tamaño de partículas de cemento en las propiedades de rendimiento basado en los materiales de cemento Portland. Investigaciones del Cemento y Concreto. Universidad técnica de Dinamarca. Dinamarca, Lyngby. Junio de 1999.
12. ASTM. Norma ASTM C 1074-04. Junio 2004.
15. Tam, C. T. and Li, W. Función Hiperbólica de Madurez para Estimar la Fuerza del Concreto. El IES. Diario Parte A. Ingeniería Civil y Estructural. 2009.
16. Font, J. Materiales y Ensayos: Guía de Laboratorio. Universidad de Carabobo. Venezuela, Valencia 2007.
17. www.nrmca.org
18. www.cptechcenter.org

Apéndices

Apéndice A
NORMA ASTM C1074

Apéndice A

Practica habitual para estimar la resistencia del concreto por el método de la madurez

ASTM C 1074 Método de Madurez

1. Ámbito de aplicación

1.1 Esta práctica establece un procedimiento para la estimación de la resistencia del concreto por medio del método de madurez. El plazo del índice de vencimiento se expresa, bien en función de la temperatura en factor tiempo o en cuanto a la edad equivalente a una temperatura específica.

1.2 Esta práctica requiere el establecimiento de la relación entre la resistencia-madurez de la mezcla de concreto en el laboratorio y registro de la historia de la temperatura del concreto para la resistencia a la cual será estimada.

1.3 Los valores indicados en unidades SI (sistema internacional) deben ser considerados como el estándar.

1.4 Esta norma no pretende abarcar todos los problemas de seguridad, si las hay, asociadas con su uso. Es la responsabilidad del usuario de esta norma para establecer las pertinentes prácticas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso. (Advertencia- para mezclas frescas de cemento hidráulico son cáusticas y pueden causar quemaduras químicas en la piel y exposición prolongada en el tejido).

2. Documentos de referencia

2.1 Normas ASTM:

- C 39-C 39M.
- C 78.

- C 109-C 109 M.
- C 192-C 192M.
- C 403-C 403 M.
- C 511.
- C 684.
- C 803-C 803M.
- C 873.
- C 900.
- C 918.

3. Resumen de la práctica.

3.1 Una relación de fuerza-madurez es desarrollado por las pruebas de laboratorio sobre la mezcla de concreto que se utilizará.

3.2 El registro de la temperatura del concreto en campo, para el cual la resistencia será estimada, se registra desde el momento de la colocación de concreto al mismo tiempo cuando la estimación de este es deseada.

3.3 El registro de la temperatura registrada se utiliza para calcular el índice de madurez del concreto sobre el terreno.

3.4 Utilizando el calculo de la madurez y la relación entre madurez-resistencia, la resistencia del concreto en campo es estimado.

4. Significado y Uso.

4.1 Esta práctica puede ser utilizada para estimar la resistencia del concreto en sitio para permitir las etapas criticas de la construcción, tales como: (1) remoción de encofrado, (2) de post-tensado de tendones, (3) las terminaciones de protección en clima frío, y (4) la apertura de las carreteras al tráfico.

4.2 Esta práctica puede ser utilizado para estimar la resistencia de muestras de laboratorio curados bajo condiciones de temperatura no estándar.

4.3 Las principales limitaciones del método de madurez son: (1) el concreto debe ser mantenido en una condición que permita la hidratación del cemento, (2) el método no toma en cuenta los efectos a temprana edad de la temperatura del concreto sobre la resistencia a largo plazo; y (3) el método debe complementarse con otras indicaciones de la resistencia potencial de la mezcla de concreto.

4.4 La precisión de la resistencia estimada depende, en parte, en la determinación de la función de madurez adecuado para la mezcla de concreto en particular.

5. Aparato.

5.1 se requiere un dispositivo para controlar y registrar la temperatura el concreto en función del tiempo. Los dispositivos aceptados incluyen termopares conectados a los registradores de gráfico, o dispositivos embebidos digitales que miden la temperatura que registran y almacenan los datos. La grabación de intervalo de tiempo es 1 / 2 hora o menos durante las primeras 48 h, y 1 hora o menos a partir de entonces. El dispositivo registrador de la temperatura tiene una tolerancia de $\pm 1^\circ$ C.

5.2 Los dispositivos alternativos que incluyen instrumentos de madurez comerciantes calculan automáticamente e imprimen el factor de temperatura-tiempo o la edad equivalente.

NOTA: Los instrumentos comerciales de madurez usan valores específicos de temperatura de referencia o la activación de la energía en la evaluación del índice de madurez; Así, el índice de madurez mostrada no puede ser indicativo del valor real para la mezcla de concreto utilizado.

6. Procedimiento para el desarrollo de la relación de resistencia-Madurez.

6.1 Preparar por lo menos 15 probetas cilíndricas de acuerdo a la Práctica C 192 / C 192M. Las proporciones de la mezcla y componentes del concreto deberán ser

similares. Cuya fuerza se calcula mediante esta práctica. Si dos de cada lote son necesarios para preparar el número de cilindros, emitidos por igual número de cilindros de cada lote, y probar un cilindro de cada lote en las edades de ensayo descritos en 8.4.

6.2 Insertar los sensores de temperatura con una precisión de 15 mm. del centro de al menos dos ejemplares. Inmediatamente conectar los sensores de instrumentos de madurez o los dispositivos registradores de la temperatura tales como los datos de almacenadores o registradores de banda.

NOTA: Un método para ayudar en la posición correcta del sensor, es insertar una pequeña varilla rígida de diámetro en el centro de los cilindros recién hechos. La varilla se hace a un lado para que las partículas no interfieran en el agregado. Se quita la varilla y el sensor se introduce en el cilindro.

6.3 Curar las muestras en un baño de agua con los requisitos de la especificación C 511.

6.4 A menos que se especifique lo contrario, lleve a cabo ensayos de compresión en las edades de 1, 3, 7, 14, y 28 días, de acuerdo con Test Método C 39 / C 39M. Prueba de dos muestras a cada edad y calcule la resistencia promedio. Si el rango de la resistencia de compresión de los dos ejemplares supera el 10% de su promedio, se hace la prueba de otro cilindro y se calcula el promedio de los tres cilindros. Si el resultado de la prueba es bajo se debe a un defecto evidente de la muestra y se debe descartar el resultado bajo de la prueba.

NOTA: Para las mezclas de concreto con un rápido desarrollo de la resistencia, o cuando las estimaciones de la resistencia han de hacerse a bajos valores de índice de madurez, las pruebas deben comenzar tan pronto como sea posible. Las pruebas siguientes deben ser programadas para dar lugar a incrementos de aproximadamente iguales ganancia de resistencia entre las edades de ensayo. Por lo menos cinco edades de prueba debe ser

utilizado.

6.5 En cada edad de ensayo, se registra el índice de madurez promedio de los especímenes instrumentados.

6.5.1 Si se utilizan instrumentos de madurez, se debe anotar el promedio de los valores mostrados.

6.5.2 Si se utilizan los registradores de temperatura, se evalúa el índice de madurez de acuerdo con la ecuación 1 o 2, Salvo que se indique lo contrario, se utiliza un intervalo de tiempo (TD) de 1 / 2 hora o menos durante las primeras 48 h del registro de temperatura. Son permitidos los intervalos de tiempo más largos para la porción relativamente constante del posterior registro de temperatura.

NOTA: La sentencia debe ser utilizado para seleccionar el tiempo inicial de intervalos para registrar la temperatura en las mezclas que producen cambios rápidos a temprana edad de la temperatura debido a la hidratación rápida.

6.6 Plotear el promedio de la resistencia a la compresión como una función del valor promedio del índice de madurez. Dibujar una curva de mejor ajuste por los datos. La curva resultante es la relación resistencia-madurez que se utiliza para la estimación de la resistencia de la mezcla de concreto bajo condiciones de otra temperatura.

NOTA: La relación resistencia-madurez también puede ser establecida por el análisis de regresión para determinar una mejor ecuación que se ajuste a los datos. Una ecuación común es la que expresa a la resistencia como una función lineal del logaritmo del índice de madurez.

NOTA: Las pruebas necesarias para determinar experimentalmente la temperatura de referencia o la energía de activación se puede realizar utilizando probetas de mortero. El enfoque básico es

establecer la resistencia a la compresión en comparación con las relaciones de edad para probetas de mortero en el mismo cuarto de curado que mantiene a tres diferentes temperaturas.

NOTA: La suposición de que la tasa de desarrollo de la resistencia es una función lineal de la temperatura conduce a la función de madurez dada en la ecuación 1, que se utiliza para calcular el factor temperatura-tiempo. Para calcular este factor, es necesario conocer el valor apropiado del dato de la temperatura de los materiales y condiciones específicas. La temperatura de referencia puede depender del tipo de cemento y la dosificación de aditivos u otros que afectan la tasa de hidratación, y en el rango de temperatura que experimentara el concreto. Para cemento Tipo I sin aditivos y un rango de temperatura de curado de 0 a 40 ° C, la temperatura de referencia recomendada es de 0 ° C.

NOTA: El cálculo de la edad también requiere una temperatura equivalente especificada, T_s . Tradicionalmente, un valor de 20 ° C. el cual ha sido utilizado (4), pero cualquier otra temperatura conveniente, como en 23 ° C, está permitido a condición de que se informa junto con el valor de la edad equivalente.

NOTA: Las ecuaciones antes nombradas están especificadas en el capítulo 2.

Apéndice B
Determinación Estadístico del Número de
Muestras a Ensayos

Apéndice B

Determinación del Numero de Muestras a Ensayar.

Normas de control para resistencias a compresión del concreto

Clase de Operación	Grado de control para el concreto				
	excelente	Muy bueno	bueno	regular	pobre
Variaciones totales. Desviación Estándar, en Kgf / cm^2					
Control de campo	Menor de 25	25-35	35-40	40-50	Mayor de 50
Control de Laboratorio	Menor de 15	15-17	17-20	20-25	Mayor de 25
Variaciones entre ensayos. Coeficiente de Variación, en porcentaje					
Control de campo	Menor de 3	3-4	4-5	5-6	Mayor de 6
Control de Laboratorio	Menor de 2	2-3	3-4	4-5	Mayor de 5

Tabla B.1. Normas de Control para la Resistencia a Compresión en el Concreto.

Para obtener una precisión aproximada requerida para el estimado, debe tenerse un valor señalado de antemano. Esto debe decidirse y fijarse la máxima diferencia que puede tolerarse entre el estimado a calcular de la muestra y el resultado que se obtendría ensayando a todos los elementos de la población tomada como muestra. Para un nivel dado de probabilidad, el máximo error existente entre el promedio de un numero dado de ensayos y el promedio real, puede calcularse por medio de la ecuación:

$$E = \frac{t * S}{\sqrt{n}}$$

O de la siguiente ecuación:

$$e = \frac{t * V}{\sqrt{n}}$$

Donde:

E: máximo error o diferencia entre el promedio estimado de la muestra y el promedio real, resultante de ensayar todos los elementos.

t: parámetro de la distribución, para un (n-1) grados de libertad, a nivel específico de probabilidad.

S: estimado previo de la desviación estándar del lote o proceso.

n: número de ensayos o elementos de la muestra, tamaño de la muestra.

V: estimado previo de coeficiente de variación del proceso, en porcentaje.

e: máximo error o diferencia entre el promedio muestral y el real, en porcentaje.

$$e = \frac{E}{X} * 100\%$$

Numero de Muestra menos 1 (n - 1) *	Porcentaje de ensayos en el rango $X \pm t * S\sigma$				
	60	80	90	95	98
	Probabilidad de caer bajo el límite inferior (FD)				
	20%	10%	5%	2,5%	1%
1	1,376	3,078	6,314	12,706	31,821
2	1,061	1,836	2,92	4,305	6,965
3	0,978	1,638	2,353	3,182	5,541
4	0,941	1,533	2,132	2,776	3,747
5	0,92	1,476	2,015	2,571	3,365
6	0,906	1,44	1,943	2,447	3,143
7	0,896	1,415	1,895	2,365	2,998
8	0,889	1,397	1,86	2,,306	2,896
9	0,883	1,383	1,833	2,262	2,821
10	0,879	1,372	1,812	2,228	2,764
15	0,866	1,341	1,753	2,131	2,602
20	0,86	1,325	1,725	2,086	2,528
25	0,856	1,316	1,708	2,06	2,485
30	0,834	1,31	1,697	2,042	2,457
·	0,842	1,282	1,645	1,96	2,,326
(*) grados de libertad (FD) fracción defectiva (·) Nivel de Probabilidad					

Ahora se procede a calcular el numero de elementos necesarios para mantener el error máximo de un valor de $17 \text{ Kgf} / \text{cm}^2$, con 5% de error de X, para un grado de control de muy Bueno a Bueno de las variaciones totales y entre ensayos, con niveles de probabilidad del 90%. Para este nivel corresponde un fracción defectuosa del 5%.

Variaciones entre ensayos

Se aplica la siguiente formula:

$$n = \left(\frac{t * V}{e} \right)$$

Considerando el valor del error en 5%, se tiene que para el control considerado el coeficiente de Variación es 5 con lo cual se tiene que el valor de $t=1.725$.

$$n = \left(\frac{t * V}{e} \right) = \left(\frac{1.725 * 5}{5} \right) = 1.725 \approx 2 \text{ cilindros}$$

Para $n - 1 = 2 - 1 = 1$, se toma el valor de 1 y $\alpha=90\%$, se tiene un $t=6,314$.

$$n = \left(\frac{t * V}{e} \right) = \left(\frac{6.314 * 5}{5} \right) = 6.314 \approx 7 \text{ cilindros}$$

Para $n - 1 = 7 - 1 = 6$, y con un $\alpha=90\%$, se tiene un $t=1.943$.

$$n = \left(\frac{t * V}{e} \right) = \left(\frac{1.943 * 5}{5} \right) = 1.943 \approx 2 \text{ cilindros}$$

Para $n - 1 = 2 - 1 = 1$, se toma el valor de 1 y $\alpha=90\%$, se tiene un $t=6.314$.

Con el valor que se obtuvo, se puede notar que va a comenzar el ciclo de nuevo, con el cual no se puede cerrar en un valor, para evitar esto se toma un valor arbitrario de cilindros y se calcula el valor del error obtenido.

Tomando 4 cilindros, tenemos que el valor del error calculado es:

Pana $n - 1 = 4 - 1 = 3$, y con el valor de $\alpha=90\%$ se tiene que $t=2.553$.

$$e = \left(\frac{t * V}{\sqrt{n}} \right) = \left(\frac{2.553 * 5}{\sqrt{5}} \right) = 5.71 \approx 6$$

Apéndice C
Ensayos de agregados

Apéndice C

Ensayo de agregados

1. Agregado Fino.

- Suspensión de partículas menores que 20 micras (sedimentación):

$$V_s = 25\text{cm}^3 \text{ (Volumen en suspensión)}$$

$$S = 3\% \text{ (Porcentaje de sedimentación)}$$

- Determinación cualitativa de impurezas orgánicas (Colorimetría):

Entre 0-1 o menor a 1 comparado con el vidrio patrón Gardner: no presenta materia orgánica por tratarse de una arena triturada.

- Presencia de cloruros y sulfatos:

No fue realizado ya que se trabaja con agua tratada.

- Determinación del peso unitario del agregado:

$$P_U = 1,67\text{gr} / \text{cm}^3$$

- Contenido de materiales más finos que el cedazo #200 (pasante 200):

$$\%P = 6\%$$

- Determinación de la humedad superficial del agregado:

$$H_s = 0,21\%$$

- Determinación de la absorción (A) y el peso específico (γ):

$$A = 1,83\%$$

$$\gamma = 2,58\text{kg} / \text{m}^3$$

- Módulo de finura de la Arena:

$$M_f = 4,71$$

- Granulometría.

Tamiz			%Ret	%Retenido Acumulado	%Pasante	%Pasante Acumulado
3/8"	0	0	0	0	100	100
#4	18,5+2,33	20,83	1,484	1,484	98,516	98,516
#8	520,1+2,33	522,43	37,234	38,718	62,766	61,282
#16	364,1+2,33	366,43	26,116	64,834	73,884	35,166
#30	233,2+2,33	235,53	16,786	81,62	83,214	18,38
#50	113+2,33	115,33	8,220	89,84	91,78	10,16
#100	82,5+2,33	84,83	6,046	95,886	93,954	4,114
#200	36,6+2,33	38,93	2,774	98,66	97,226	1,34
Fondo	16,4+2,39	18,79	1,339	100	98,661	0
		140,31				

2. Agregado grueso.

- Determinación del peso unitario del agregado:

$$P_U = 1439 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- Determinación del cociente entre la dimensión máxima y la dimensión mínima:

$$C = 4,96\%$$

- Determinación del peso específico del agregado.

$$\gamma = 2,63 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- Granulometría.

tamiz	Peso muestra	% Ret	% Ret Acum	% Pasant	% Pasant Acum
1"	0	0	0	100	100
¾"	310,288	18,526	18,536	81,464	81,464
½"	559,788	22,442	51,978	66,558	48,022
3/8"	337,288	20,150	72,128	79,850	27,872
¼"	306,588	18,316	90,444	81,684	9,736
#4	79,988	4,778	95,222	95,222	4,958
#8	66,588	3,978	99,2	96,022	0,98
#16	5,288	0,316	99,516	99,684	0,664
#30	2,688	0,161	99,677	99,839	0,503
fondo	5,389	0,323	100	99,677	0,18
	1673,9				

Apéndice D
Influencia de Variables en la Resistencia del
Concreto

Apéndice D

Resumen de variables que influyen en la resistencia del concreto por medio del Ensayo a Compresión.

Ítems	Causa básica	Causa de la variación	Probabilidad de ocurrencia	Efecto de la resistencia
Materiales				
1	Agua	Presencia de sales	Poco tratamiento	Generalmente pequeños
2		Relación agua/cemento	Departamento de control	Gran efecto
3	Cemento	Tipo y composición	Con diferentes marcos	Variación
4		Control en la fabricación	1 sola marca	Puede ser considerable
5		Edad y condición	Siempre es posible	Considerable
6	Agregado Fino	Reactividad química	Comúnmente no ocurre	Puede ser considerable
7		Partículas variables	Poco frecuente	No generalizado
8		Propiedad no uniforme	Poco frecuente	No generalizado
9		Limpieza	Siempre es posible	Puede ser considerable
10		Forma de partícula	Triturado natural	No dentro de un mismo tiempo
11		Gradación	Siempre se presenta	A través de la manejabilidad

12	Agregado Grueso	Reactividad química	Poco común	No apreciable
33		Partículas variables	Depende de la fuente	Generalmente pequeño
14		Propiedades no uniformes	Con material poroso	No generalizado
15		Limpieza	Siempre es posible	Puede ser considerable
16		Forma de partículas	Triturado y natural	Puede ser considerable
17		Gradación	Siempre se presenta	A través de la trabajabilidad
18		Tamaño máximo	Con diferentes mezclas	A través de la trabajabilidad
19		Mezcla	Cambios en la pasta Agregados	Variaciones deliberadas
20	Temperatura	Agua	Climas extremos	No generalizado
21		Cemento	Cemento caliente	No apreciable
22		Agregados	Climas extremos	No generalizado
Dosificaciones				
23	Agua	Con agregado grueso	Por periodos	Puede ser considerable
24		Arena abultada	No en planta central	Puede ser considerable
25		Adicionada directamente	Cuando es a criterio	No es medible

26		Contenida en la arena	Muy común	Considerable
27	Agregado Grueso	Cambios, operación	Con control limitado	Generalmente pequeño
28	Agregado Fino	Cambios, abultamiento	No en planta central	Errores \pm 20%
29	Cemento	Medido por volumen	No en planta central	Errores \pm 20%
30		Error en el pesaje	Infrecuente	No se puede considerar
Mezclado				
31	Mezclado	Primera mezclas	Solo ocasionalmente	Puede ser considerable
32		Orden de cargue	Depende del operador	Generalmente no importante

33	Mezclado	Sobrecarga do	Infrecuente	No generalizado
34		Mezclar rápido	Con diferentes plantas	No generalizado
35		Tiempo de mezclado	Frecuente	Variación puede exceder 30%
Ensayo				
36	Manejo y muestreo de los especímenes	Segregación	Transporte y manejo	Planos de falla
37		Muestreo	Diferentes sitios	Puede ser apreciable
38		Exudación	Mezclas con poco agua	Generalmente pequeño
39		Cambios en los componentes	Cundo hay replanteo	Imposible de estimar
40	Compactación de los especímenes	Compactación manual	Mezclas secas	Considerable, excede el 50%
41		Vibración	Sobre vibración	Segregación de los especímenes
42		Golpe	Manejo después del fraguado	Inducción de fisuras
43		Orientación de partículas	Planos de falla	Partículas planas de 40%
44	Tamaño y forma de los especímenes	Tamizado húmedo	Concreto masivo	Aumenta con el tamizado
45		Tamaño del espécimen	Moldes no normalizados	Decrece con el tamaño

46		Relación altura-diámetro	Moldes no normalizados	Decrece con incremento de la relación
47		Forma	Cubo o cilindro	Menor en dos cubos
48		Moldes irregulares	Moldes no normalizados	Carga no axial
49	Curado de los especímenes	Secado exterior	Primeras 24 horas	Pequeño
50		Humedad de curado	No hay curado	Decrece considerablemente
51		Temperatura inicial	Condiciones de congelamiento	Infrecuente
52		Temperatura	Curado en invierno	Variación considerable
53		Edad	Comparable a la misma edad	Incremento continuo
54		Contenido de humedad	Con especímenes secos	40% diferencia
55		Refrentado de especímenes	Tapas planas	Falla muy común
56	Ejes del espécimen		Problema técnico	Generalmente pequeño
57	Material de refrentado		No apropiado	Puede ser apreciable
58	Maquina de Ensayo	Velocidad de carga	Dependiente del laboratorio	Generalmente pequeño

59		Cojinete de carga	Dependient e del laboratorio	Puede ser considerable
60		Centrado	Dependient e del laboratorio	Puede ser apreciable

Apéndice E

*Método empleado en la Elaboración de las
probetas cilíndricas de concreto.*

*Método para la medición de asentamiento
mediante el cono de abrams.*

Apéndice E

Apéndice E.1

Método para la elaboración, curado y ensayo de los cilindros.

NORMA COVENIN 338-2002

1. Alcance

Esta Norma Venezolana contempla el método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de probetas cilíndricas de concreto.

2. Aparatos

2.1 Máquina de ensayo

Utilizada en los ensayos de compresión, siempre que su capacidad sea suficiente para producir la rotura de la probeta y se pueda regular la velocidad de carga, de modo que se alcance la velocidad requerida para el ensayo. Debe estar provista de dos platos de acero cuya dureza Rockwell C no sea inferior a 60 (HRC). Uno de estos platos, preferiblemente el que se apoya sobre la base superior de la probeta debe ir montado sobre una rótula esférica. Las superficies de los platos cuando éstos estén nuevos, no deben presentar desigualdades superiores a 0,025 mm sin que dichas desigualdades puedan exceder después, una vez usada la máquina, de 0,06 mm. El centro de la superficie esférica de la rótula, debe coincidir con el del plato correspondiente y tendrá su articulación proyectada de tal forma, que permita a éste girar ligeramente e inclinarse ángulos pequeños en cualquier dirección. El diámetro mínimo del plato debe ser 15% mayor que el diámetro del cilindro.

2.2 Moldes cilíndricos

Preferiblemente metálicos, rígidos, estancos de superficie interior lisa, no absorbente y que no reaccione con el concreto. Deben estar provistos de una base metálica maquinada, en el caso de moldes metálicos; en el caso de otros materiales, la base debe ser el mismo material que el de las paredes del molde o metálicas, con

planos lisos y con elementos para sujetarla firmemente al molde con el plano perpendicular al eje del cilindro. De tal manera que se consiga un cierre hermético.

2.2.1 Dimensiones

El molde normal debe tener 152,5 \pm 2,5 mm de diámetro y 305 \pm 6,0 mm de altura para el tamaño nominal de agregado grueso no mayor de 50 mm. Se pueden utilizar moldes de otras dimensiones (moldes cilíndricos de 102 \pm 2,5 mm de diámetro y 205 \pm 6,0 mm de altura), siempre que el diámetro sea como mínimo tres veces el tamaño nominal del agregado grueso. La relación altura a diámetro se debe mantener 2 a 1 y en ningún caso su diámetro debe ser menor de 50 mm.

2.3 Barra compactadora

De acero, cilíndrica y lisa, de 16 mm de diámetro por 600 mm de longitud, Aproximadamente, y punta semiesférica de 8 mm de radio. Para moldes que no contempla la norma pero que presente las condiciones establecidas en la sección anterior, las dimensiones son de 9,5 mm de diámetro por 400 mm de longitud, con punta semiesférica de 4,75 mm aproximadamente.

2.4 Herramientas

Tales como palas, baldes, llanas metálicas y de madera, cucharas, envasadores, cucharones, guantes de goma y recipientes metálicos de mezclado.

3. Muestreo

3.1 Se toma una muestra del concreto fresco según la Norma Venezolana COVENIN 344.

3.2 Por cada muestra combinada o de ensayo se debe elaborar dos cilindros por cada condición de ensayo.

NOTA: El número especificado de probeta por cada muestra es de dos en el caso de que se tome un número de probetas diferentes, ello influirá en la magnitud de

los parámetros estadísticos del material, lo cual debe tomarse en cuenta al calcularlos.

4 Procedimiento

4.1 Preparación del molde

4.1.1 El molde debe estar limpio, su superficie interior así como su base, deben estar aceitadas, a este fin sólo se permite el uso de aceites minerales u otros productos destinados a este uso.

4.1.2 Se deben evitar las pérdidas de agua. Las zonas de contacto entre molde y base se pueden sellar con una mezcla de parafina y cera virgen, trabajable a temperatura ambiente, o algún otro material que no afecta la resistencia del concreto.

4.2 Preparación del cilindro

4.2.1 Sitio del moldeo

Las probetas deben moldearse en el lugar donde se almacenarán durante las primeras 20 horas.

NOTA: En el caso que sea imprescindible el traslado de las probetas antes de 24 horas, éstas deben ser manejadas con cuidados especiales siempre en su molde. Evitando toda percusión, golpe e inclinación de las mismas, así como daños en su superficie al ser transportados al lugar de almacenamiento.

4.2.2 Vaciado

El concreto se vacía en los moldes, en dos capas, si se va a compactar por el método de vibrado y en tres si se va a compactar por el método de la barra, asegurándose al mínimo la segregación del material dentro del molde, utilizando la barra para tal fin.

Nota: Los moldes deben estar en la sombra y cuidarse de la evaporación.

4.2.3 Compactación

El método de compactación se debe seleccionar en base al asentamiento, a menos que el mismo se establezca especialmente en las especificaciones bajo las cuales se ejecuta el trabajo. Los métodos son: con barra y vibrado. Si el asentamiento es inferior a 25 mm (1 pulgada) debe usarse el método de vibrado, si el asentamiento está entre 25 mm (1 pulgada) a 75 mm (3 pulgadas) se puede usar cualquiera de los dos métodos, siendo preferible el método usado en la obra y si es mayor de 75 mm (3 pulgadas) debe usarse el método de la barra.

4.2.3.1 Compactación con barra

El concreto se coloca en el molde en tres capas de igual volumen aproximadamente. Cada capa debe compactarse con el número de golpes que se indica en la tabla 1, para lo cual se utiliza la barra compactadora. Los golpes deben distribuirse uniformemente en toda la sección transversal del molde. La capa del fondo debe compactarse en toda su profundidad.

Cuando se compacta la capa inmediata superior, la barra debe penetrar aproximadamente de 20 a 30 mm en la capa inmediatamente inferior. Si al retirar la barra quedan huecos en el cilindro, éstos se deben cerrar golpeando suavemente las paredes del molde.

Diámetro nominal del cilindro (mm)	Número de golpes
150	25
200	50
250	75

Tabla. Compactación

4.2.3.2 Enrase

Después de compactar el concreto, por el método de la barra o mediante el vibrador, debe enrasarse la probeta con la barra o con la cuchara de albañilería, de manera que la superficie quede perfectamente lisa y al ras con el borde del molde. Aún cuando las superficies vayan a ser posteriormente rematadas no deben hacerse marcas grabadas sobre ella.

4.2.4 Curado de los cilindros

4.2.4.1 Una vez elaboradas las probetas deben protegerse de la pérdida de agua por evaporación cubriéndolas adecuadamente con un material impermeable y a menos que se especifiquen otras condiciones debe almacenarse a una temperatura ambiente a la sombra (véase nota 4). Los moldes deben mantenerse en una superficie horizontal rígida libre de vibraciones y otras perturbaciones.

4.2.4.2 Las probetas deben retirarse de los moldes en un lapso de tiempo comprendido entre 20 y 48 horas, después de su elaboración y se almacenarán hasta el momento del ensayo en cualquiera de los siguientes ambientes:

- a) Directamente bajo agua saturada de cal (véase nota 5).
- b) Arena limpia y saturada constantemente de agua.
- c) Cámara húmeda, con una humedad relativa entre 90 y 100%.

NOTA: En el caso de que se desee reproducir las condiciones de curado en obra, las probetas deberán permanecer constantemente a la sombra, controlando periódicamente su temperatura, el ambiente y la temperatura de curado deben ser anotadas por ser datos indispensables para la interpretación de los resultados.

NOTA: El agua debe ser potable, limpia, exenta de materiales extraños y mantenerse en el rango de temperatura de (23 ± 3) °C. La renovación del agua depende del número de probetas que se están curando como promedio, se recomienda renovarla, cada 15 días.

4.3 Método de ensayo

4.3.1 Preparación de la muestra

4.3.1.1 Las caras de compresión deben ser rematadas de tal forma que se logre el paralelismo entre las caras del cilindro. Las superficies de compresión deben ser visiblemente planas, sin grumos, ralladuras o defectos visibles.

4.3.1.2 Para el momento del ensayo el remate debe tener una resistencia superior a la del concreto que se va a ensayar; pudiéndose emplear cualquier material capaz de proporcionar en el momento del ensayo, la resistencia y la adherencia necesaria. El espesor de la capa de remate debe estar entre 2 y 3% de la dimensión lateral (cara de la probeta).

NOTA: Uno de los materiales más usados para el remate de las caras de los cilindros, es el mortero de azufre, el cual debe tener una resistencia mínima de 350 kgf/cm² a las dos horas y ensayado en cubos de 50 x 50 mm.

4.3.1.3 Los cilindros se deben ensayar a la edad prevista, con una tolerancia de $\pm t/14$.

$$t = \text{EDAD PREVISTA PARA EL ENSAYO}$$

4.3.1.4 La sección del cilindro se determina en su zona central y el diámetro de cálculo es el promedio de los diámetros ortogonales aproximados hasta el milímetro entero más próximo.

4.3.1.5 La altura del cilindro se determina después de ser rematadas sus caras. La altura se aproxima al milímetro más cercano.

4.3.2 Procedimiento

4.3.2.1 Los cilindros se colocan en la máquina de ensayo, se centran cuidadosamente y se comprimen. Tanto las superficies rematadas de los cilindros y

los platos de la máquina deben estar exentos de polvo, grasa y de cualquier otro material extraño.

4.3.2.2 En el caso de las máquinas de tipo mecánico el desplazamiento del cabezal debe ser aproximadamente de 1,3 mm. por minuto; en las máquinas operadas hidráulicamente se aplicará una presión a una tasa constante dentro del rango de 1,4 kg/cm²/seg a 3,5 kg/cm²/seg. Durante la aplicación de la primera mitad de la presión, se permite incrementar dicha tasa.

4.3.3 Expresión de los resultados

4.3.3.1 La resistencia a compresión de cada cilindro se calcula por la siguiente fórmula:

$$R_c = P/A$$

Donde:

R_c = Resistencia a compresión kgf/cm²

P = Carga máxima aplicada, kgf

A = Área de la sección transversal del cilindro, cm²

La resistencia a compresión de cada cilindro es el cociente entre la carga máxima y el área de la sección media del cilindro. El resultado del ensayo es el promedio de las resistencias de los cilindros por cada condición de ensayo.

5. Informe

Se debe elaborar un informe que tenga los siguientes datos:

5.1 Identificación de los cilindros.

5.2 Condiciones de muestreo y de curado, incluyendo fecha y hora de la elaboración del cilindro, así como el asentamiento de la mezcla.

5.3 Fecha y hora del ensayo.

5.4 Edad del cilindro, con una aproximación de $\pm t/14$, pero no mayor de medio día.

5.5 Dimensiones del cilindro, de acuerdo a lo especificado en 5.3.1.4 y 5.3.1.5.

5.6 Esfuerzo máximo de cada cilindro en kg/cm^2 , redondeando al entero más cercano.

5.7 Resistencia promedio de los cilindros por cada condición de ensayo y pertenecientes a una misma muestra.

5.8 Desviación estándar del ensayo.

5.9 Información acerca de la muestra ensayada, indicando por escrito las condiciones de remate, tipo de falla y el aspecto de los agregados.

Apéndice E.2

Método para la medición del asentamiento con el Cono de Abrams.

CCCA 3-1965

1. Alcance

Este método aplica el ensayo para la determinación de un índice de consistencias de concretos frescos mediante el uso del cono de Abrams y es aplicable tanto en el laboratorio como en campo.

2. Aparatos

2.1 Molde “Cono de Abrams”. El molde estará constituido con una chapa metálica con un espesor mínimo de 1,5 mm. Y su forma será la de un tronco de cono. Los dos círculos de las bases serán paralelos entre si; de 20 cm. de diámetro de base superior, formando ángulo recto con el eje del cono. La altura del cono será de unos 30 cm; dicho molde estará previsto de asas y aletas de pie.

2.2 Barra Compactadora: es una barra recta de acero, lisa, de 16 mm. de diámetro, de aproximadamente 60 cm de longitud y punta semiesférica.

3. Muestras

3.1 Las muestras se tomaran de acuerdo con lo indicado en el método de muestreo de la NORMA COVENIN 344.

4. Procedimiento

4.1 Se humedece el interior del molde y se coloca sobre una superficie horizontal rígida, plana y no absorbente (se recomienda una lámina metálica que garantice las condiciones anteriores). El molde se sujeta firmemente por las aletas con los pies y se llena con la muestra de concreto, vaciando ésta en tres capas, cada una de ellas de un tercio del volumen del molde. Estos volúmenes corresponden respectivamente a las alturas de 6.5 cm y 15 cm a partir de la base.

4.2 Cada capa se compacta con 25 golpes de la barra compactadora, distribuidos uniformemente en toda la sección transversal. Para la capa inferior es necesario inclinar ligeramente la barra y dar aproximadamente la mitad de los golpes cerca del perímetro, acercándose progresivamente en espiral hacia el centro de la sección.

Esta capa debe compactarse en todo su espesor, las capas siguientes se compactan, en su espesor respectivo de modo que la barra penetre ligeramente en la capa inmediata inferior.

4.3 El molde se llena por exceso antes de compactar la última capa. Si después de compactar, el concreto se asienta por debajo del borde superior, se agrega concreto hasta lograr un exceso sobre el molde. Luego se enrasa mediante la barra compactadora o una cuchara de albañilería. Inmediatamente se retira el molde alzándolo cuidadosamente en dirección vertical. Deben evitarse los movimientos laterales o de torsión. Esta operación debe realizarse en un tiempo aproximado de 5 a 10 segundos.

4.4 La operación completa desde que se comienza a llenar el molde hasta que se retira, debe hacerse sin interrupción y en un tiempo máximo de 1 min 30 s.

4.5 El asentamiento se mide inmediatamente después de alzar el molde y se determina por la diferencia entre la altura del molde y la altura promedio de la base superior del cono deformado.

4.6 En caso de que se presente una falla o corte, donde se aprecie separación de una parte de la masa, debe rechazarse el ensayo, y se hace nuevamente la determinación con otra parte de la mezcla.

4.1.1 Si dos ensayos consecutivos sobre una misma mezcla de concreto arrojan el resultado de 5.6, el concreto probablemente carece de la plasticidad y cohesión necesaria para la validez del ensayo.

5. Informe

Se debe elaborar un informe que contenga los siguientes datos:

- 5.1 Identificación de la mezcla cuyo asentamiento se determina.
- 5.2 Asentamiento de la muestra en cm, medido con aproximación al medio centímetro más cercano.
- 5.3 Indicar cuándo y porqué se desecha un ensayo.
- 5.4 Fecha del ensayo.
- 5.5 Número y Título de la Norma Venezolana COVENIN consultada.
- 5.6 Nombre del técnico que realizó el ensayo.
- 5.7 Observaciones.

Apéndice F
Resultados a Compresión

N° DE MUESTRA

FECHA TOMA

HORA TOMA

FECHA ENSAYO (edad)

HORA ENSAYO

TEMPERATURA (°C)

RESISTENCIA DE DISEÑO

ASENTAMIENTO (")

DIAMETRO (cm)

1

25/08/2010

11:58:58 a.m.

26/08/2010 (24 horas)

11:58:58 a.m.

27,2

250

7 1/2

10

2

25/08/2010

11:58:58 a.m.

26/08/2010 (24 horas)

12:04 a.m.

27,2

250

7 1/2

10

3

25/08/2010

11:58:58 a.m.

26/08/2010 (24 horas)

12:09 a.m.

27,1

250

7 1/2

10

4

25/08/2010

11:58:58 a.m.

26/08/2010 (24 horas)

12:14 a.m.

27,1

250

7 1/2

10

5

25/08/2010

11:58:58 a.m.

27/08/2010 (2 dias)

11:58:58 a.m.

25,0

250

7 1/2

10

6

25/08/2010

11:58:58 a.m.

27/08/2010 (2 dias)

12:04 a.m.

25,0

250

7 1/2

10

7

25/08/2010

11:58:58 a.m.

27/08/2010 (2 dias)

12:09 a.m.

25,0

250

7 1/2

10

8

25/08/2010

11:58:58 a.m.

27/08/2010 (2 dias)

12:14 a.m.

25,0

250

7 1/2

10

9

25/08/2010

11:58:58 a.m.

01/09/2010 (7 dias)

11:58:58 a.m.

24,9

250

7 1/2

10

10

25/08/2010

11:58:58 a.m.

01/09/2010 (7 dias)

12:04 a.m.

24,9

250

7 1/2

10,1

11

25/08/2010

11:58:58 a.m.

01/09/2010 (7 dias)

12:09 a.m.

25,0

250

7 1/2

10

12

25/08/2010

11:58:58 a.m.

01/09/2010 (7 dias)

12:14 a.m.

25,0

250

7 1/2

10

13

25/08/2010

11:58:58 a.m.

08/09/2010 (14 dias)

11:58:58 a.m.

23,5

250

7 1/2

10

14

25/08/2010

11:58:58 a.m.

08/09/2010 (14 dias)

12:04 a.m.

23,5

250

7 1/2

10

15

25/08/2010

11:58:58 a.m.

08/09/2010 (14 dias)

12:09 a.m.

23,4

250

7 1/2

10

16

25/08/2010

11:58:58 a.m.

08/09/2010 (14 dias)

12:14 a.m.

23,4

250

7 1/2

10

17

25/08/2010

11:58:58 a.m.

22/09/2010 (28 dias)

11:58:58 a.m.

24,9

250

7 1/2

10,1

18

25/08/2010

11:58:58 a.m.

22/09/2010 (28 dias)

12:04 a.m.

24,9

250

7 1/2

10

19

25/08/2010

11:58:58 a.m.

22/09/2010 (28 dias)

12:09 a.m.

25,3

250

7 1/2

10

20

25/08/2010

11:58:58 a.m.

22/09/2010 (28 dias)

12:14 a.m.

25,3

250

7 1/2

10

N° DE MUESTRA

FECHA TOMA

HORA TOMA

FECHA ENSAYO (edad)

HORA ENSAYO

TEMPERATURA (°C)

RESISTENCIA DE DISEÑO

ASENTAMIENTO (")

DIAMETRO (cm)

21

30/08/2010

04:28:58 p.m.

31/08/2010 (24 horas)

04:28:58 p.m.

26,3

210

6 3/4

10,1

22

30/08/2010

04:28:58 p.m.

31/08/2010 (24 horas)

04:34 p.m.

26,3

210

6 3/4

10

23

30/08/2010

04:28:58 p.m.

31/08/2010 (24 horas)

04:39 p.m.

25,9

210

6 3/4

10

24

30/08/2010

04:28:58 p.m.

31/08/2010 (24 horas)

04:44 p.m.

25,9

210

6 3/4

10

25

30/08/2010

04:28:58 p.m.

01/09/2010 (2 dias)

04:28:58 p.m.

25,7

210

6 3/4

10

26

30/08/2010

04:28:58 p.m.

01/09/2010 (2 dias)

04:34 p.m.

25,7

210

6 3/4

10

27

30/08/2010

04:28:58 p.m.

01/09/2010 (2 dias)

04:39 p.m.

25,6

210

6 3/4

10

28

30/08/2010

04:28:58 p.m.

01/09/2010 (2 dias)

04:44 p.m.

25,6

210

6 3/4

10

29

30/08/2010

04:28:58 p.m.

06/09/2010 (7 dias)

04:28:58 p.m.

25,2

210

6 3/4

10

30

30/08/2010

04:28:58 p.m.

06/09/2010 (7 dias)

04:34 p.m.

25,2

210

6 3/4

10

31

30/08/2010

04:28:58 p.m.

06/09/2010 (7 dias)

04:39 p.m.

25,3

210

6 3/4

10

32

30/08/2010

04:28:58 p.m.

06/09/2010 (7 dias)

04:44 p.m.

25,3

210

6 3/4

10

33

30/08/2010

04:28:58 p.m.

13/09/2010 (14 dias)

04:28:58 p.m.

25,0

210

6 3/4

10

34

30/08/2010

04:28:58 p.m.

13/09/2010 (14 dias)

04:34 p.m.

25,0

210

6 3/4

10

35

30/08/2010

04:28:58 p.m.

13/09/2010 (14 dias)

04:39 p.m.

24,9

210

6 3/4

10,1

36

30/08/2010

04:28:58 p.m.

13/09/2010 (14 dias)

04:44 p.m.

24,9

210

6 3/4

10

37

30/08/2010

04:28:58 p.m.

27/09/2010 (28 dias)

04:28:58 p.m.

27,5

210

6 3/4

10

38

30/08/2010

04:28:58 p.m.

27/09/2010 (28 dias)

04:34 p.m.

27,5

210

6 3/4

10

39

30/08/2010

04:28:58 p.m.

27/09/2010 (28 dias)

04:39 p.m.

27,4

210

6 3/4

10

40

30/08/2010

04:28:58 p.m.

27/09/2010 (28 dias)

04:44 p.m.

27,4

210

6 3/4

10

N° DE MUESTRA

AREA (cm2)

PESO (kg)

CARGA (kgf)

RESISTENCIA ENSAYO

PROMEDIO

Observaciones

ISERIE

DESVIACION

VARIACION

1

78,54

3720

6184

79

79

se sacaron los cilindros a las
9:35 a.m. de la piscina de
curado y se registro una
humedad de 52%.

1

0,59

0,75

2

78,54

3720

6216

79

3

78,54

3700

6267

80

4

78,54

3720

6133

78

5

78,54

3720

10530

134

133

se sacaron los cilindros a las
07:40 a.m. de la piscina de
curado y se registro una
humedad de 54%.

2

1,18

0,89

6

78,54

3720

11248

143

7

78,54

3720

10506

134

8

78,54

370

10374

132

9

78,54

3720

17223

219

218

se sacaron los cilindros a las
07:05 a.m. de la piscina de
curado y se registro una
humedad de 55%.

4

2,36

1,08

10

80,12

3720

17596

220

11

78,54

3720

14250

181

12

78,54

3700

16903

215

13

78,54

3760

18909

241

241

se sacaron los cilindros a las
8:00 a.m. de la piscina de
curado y se registro una
humedad de 62%.

1

0,59

0,24

14

78,54

3700

21281

271

15

78,54

3720

18973

242

16

78,54

3700

19010

242

17

80,12

3740

20235

253

255

se sacaron los cilindros a las
07:43 a.m. de la piscina de
curado y se registro una
humedad de 68%.

7

4,13

1,62

18

78,54

3700

19851

253

19

78,54

3720

20365

259

20

78,54

3720

22757

290

N° DE MUESTRA

AREA (cm2)

PESO (kg)

CARGA (kgf)

RESISTENCIA ENSAYO

PROMEDIO

Observaciones

ISERIE

DESVIACION

VARIACION

21

80,12

3680

4561

57

58

se sacaron los cilindros a las

07:35 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 53%.

5

2,95

5,09

22

78,54

3720

4188

53

23

78,54

3640

4804

61

24

78,54

3680

4388

56

25

78,54

3700

8325

106

103

se sacaron los cilindros a las 07:35 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 49%.

4

2,36

2,30

26

78,54

3700

7898

101

27

78,54

3660

6998

89

28

78,54

3660

8028

102

29

78,54

3700

13679

174

173

se sacaron los cilindros a las
07:30 a.m. de la piscina de
curado y se registro una
humedad de 41%.

7

4,13

2,39

30

78,54

3720

13314

170

31

78,54

3720

10963

140

32

78,54

3640

13839

176

33

78,54

3720

15095

192

189

se sacaron los cilindros a las
11:35 a.m. de la piscina de
curado y se registro una
humedad de 40%.

6

3,54

1,87

34

78,54

3740

14890

190

35

80,12

3720

13362

167

36

78,54

3720

14620

186

37

78,54

3720

16367

208

203

se sacaron los cilindros a las
07:35 a.m. y se registro una
humedad de 41%.

4

2,36

1,16

38

78,54

3720

16684

212

39

78,54

3720

16578

211

40

78,54

3740

14253

181

N° DE MUESTRA	FECHA TOMA	HORA TOMA	FECHA ENSAYO (edad)	HORA ENSAYO	TEMPERATURA (°C)	RESISTENCIA DE DISEÑO	ASENTAMIENTO (")	DIAMETRO (cm)
1	25/08/2010	11:58:58 a.m.	26/08/2010 (24 horas)	11:58:58 a.m.	27,2	250	7 1/2	10
2	25/08/2010	11:58:58 a.m.	26/08/2010 (24 horas)	12:04 a.m.	27,2	250	7 1/2	10
3	25/08/2010	11:58:58 a.m.	26/08/2010 (24 horas)	12:09 a.m.	27,1	250	7 1/2	10
4	25/08/2010	11:58:58 a.m.	26/08/2010 (24 horas)	12:14 a.m.	27,1	250	7 1/2	10
5	25/08/2010	11:58:58 a.m.	27/08/2010 (2 dias)	11:58:58 a.m.	25,0	250	7 1/2	10
6	25/08/2010	11:58:58 a.m.	27/08/2010 (2 dias)	12:04 a.m.	25,0	250	7 1/2	10
7	25/08/2010	11:58:58 a.m.	27/08/2010 (2 dias)	12:09 a.m.	25,0	250	7 1/2	10
8	25/08/2010	11:58:58 a.m.	27/08/2010 (2 dias)	12:14 a.m.	25,0	250	7 1/2	10
9	25/08/2010	11:58:58 a.m.	01/09/2010 (7 dias)	11:58:58 a.m.	24,9	250	7 1/2	10
10	25/08/2010	11:58:58 a.m.	01/09/2010 (7 dias)	12:04 a.m.	24,9	250	7 1/2	10,1
11	25/08/2010	11:58:58 a.m.	01/09/2010 (7 dias)	12:09 a.m.	25,0	250	7 1/2	10
12	25/08/2010	11:58:58 a.m.	01/09/2010 (7 dias)	12:14 a.m.	25,0	250	7 1/2	10
13	25/08/2010	11:58:58 a.m.	08/09/2010 (14 dias)	11:58:58 a.m.	23,5	250	7 1/2	10
14	25/08/2010	11:58:58 a.m.	08/09/2010 (14 dias)	12:04 a.m.	23,5	250	7 1/2	10
15	25/08/2010	11:58:58 a.m.	08/09/2010 (14 dias)	12:09 a.m.	23,4	250	7 1/2	10
16	25/08/2010	11:58:58 a.m.	08/09/2010 (14 dias)	12:14 a.m.	23,4	250	7 1/2	10
17	25/08/2010	11:58:58 a.m.	22/09/2010 (28 dias)	11:58:58 a.m.	24,9	250	7 1/2	10,1
18	25/08/2010	11:58:58 a.m.	22/09/2010 (28 dias)	12:04 a.m.	24,9	250	7 1/2	10
19	25/08/2010	11:58:58 a.m.	22/09/2010 (28 dias)	12:09 a.m.	25,3	250	7 1/2	10
20	25/08/2010	11:58:58 a.m.	22/09/2010 (28 dias)	12:14 a.m.	25,3	250	7 1/2	10

N° DE MUESTRA	FECHA TOMA	HORA TOMA	FECHA ENSAYO (edad)	HORA ENSAYO	TEMPERATURA (°C)	RESISTENCIA DE DISEÑO	ASENTAMIENTO (")	DIAMETRO (cm)
21	30/08/2010	04:28:58 p.m.	31/08/2010 (24 horas)	04:28:58 p.m.	26,3	210	6 3/4	10,1
22	30/08/2010	04:28:58 p.m.	31/08/2010 (24 horas)	04:34 p.m.	26,3	210	6 3/4	10
23	30/08/2010	04:28:58 p.m.	31/08/2010 (24 horas)	04:39 p.m.	25,9	210	6 3/4	10
24	30/08/2010	04:28:58 p.m.	31/08/2010 (24 horas)	04:44 p.m.	25,9	210	6 3/4	10
25	30/08/2010	04:28:58 p.m.	01/09/2010 (2 dias)	04:28:58 p.m.	25,7	210	6 3/4	10
26	30/08/2010	04:28:58 p.m.	01/09/2010 (2 dias)	04:34 p.m.	25,7	210	6 3/4	10
27	30/08/2010	04:28:58 p.m.	01/09/2010 (2 dias)	04:39 p.m.	25,6	210	6 3/4	10
28	30/08/2010	04:28:58 p.m.	01/09/2010 (2 dias)	04:44 p.m.	25,6	210	6 3/4	10
29	30/08/2010	04:28:58 p.m.	06/09/2010 (7 dias)	04:28:58 p.m.	25,2	210	6 3/4	10
30	30/08/2010	04:28:58 p.m.	06/09/2010 (7 dias)	04:34 p.m.	25,2	210	6 3/4	10
31	30/08/2010	04:28:58 p.m.	06/09/2010 (7 dias)	04:39 p.m.	25,3	210	6 3/4	10
32	30/08/2010	04:28:58 p.m.	06/09/2010 (7 dias)	04:44 p.m.	25,3	210	6 3/4	10
33	30/08/2010	04:28:58 p.m.	13/09/2010 (14 dias)	04:28:58 p.m.	25,0	210	6 3/4	10
34	30/08/2010	04:28:58 p.m.	13/09/2010 (14 dias)	04:34 p.m.	25,0	210	6 3/4	10
35	30/08/2010	04:28:58 p.m.	13/09/2010 (14 dias)	04:39 p.m.	24,9	210	6 3/4	10,1
36	30/08/2010	04:28:58 p.m.	13/09/2010 (14 dias)	04:44 p.m.	24,9	210	6 3/4	10
37	30/08/2010	04:28:58 p.m.	27/09/2010 (28 dias)	04:28:58 p.m.	27,5	210	6 3/4	10
38	30/08/2010	04:28:58 p.m.	27/09/2010 (28 dias)	04:34 p.m.	27,5	210	6 3/4	10
39	30/08/2010	04:28:58 p.m.	27/09/2010 (28 dias)	04:39 p.m.	27,4	210	6 3/4	10
40	30/08/2010	04:28:58 p.m.	27/09/2010 (28 dias)	04:44 p.m.	27,4	210	6 3/4	10

N° DE MUESTRA	AREA (cm2)	PESO (kg)	CARGA (kgf)	RESISTENCIA ENSAYO	PROMEDIO	Observaciones	ISERIE	DESVIACION	VARIACION
1	78,54	3720	6184	79	79	se sacaron los cilindros a las 9:35 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 52%.	1	0,59	0,75
2	78,54	3720	6216	79					
3	78,54	3700	6267	80					
4	78,54	3720	6133	78					
5	78,54	3720	10530	134	133	se sacaron los cilindros a las 07:40 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 54%.	2	1,18	0,89
6	78,54	3720	11248	143					
7	78,54	3720	10506	134					
8	78,54	370	10374	132					
9	78,54	3720	17223	219	218	se sacaron los cilindros a las 07:05 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 55%.	4	2,36	1,08
10	80,12	3720	17596	220					
11	78,54	3720	14250	181					
12	78,54	3700	16903	215					
13	78,54	3760	18909	241	241	se sacaron los cilindros a las 8:00 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 62%.	1	0,59	0,24
14	78,54	3700	21281	271					
15	78,54	3720	18973	242					
16	78,54	3700	19010	242					
17	80,12	3740	20235	253	255	se sacaron los cilindros a las 07:43 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 68%.	7	4,13	1,62
18	78,54	3700	19851	253					
19	78,54	3720	20365	259					
20	78,54	3720	22757	290					

N° DE MUESTRA	AREA (cm2)	PESO (kg)	CARGA (kgf)	RESISTENCIA ENSAYO	PROMEDIO	Observaciones	ISERIE	DESVIACION	VARIACION
21	80,12	3680	4561	57	58	se sacaron los cilindros a las 07:35 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 53%.	5	2,95	5,09
22	78,54	3720	4188	53					
23	78,54	3640	4804	61					
24	78,54	3680	4388	56					
25	78,54	3700	8325	106					
26	78,54	3700	7898	101	103	se sacaron los cilindros a las 07:35 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 49%.	4	2,36	2,30
27	78,54	3660	6998	89					
28	78,54	3660	8028	102					
29	78,54	3700	13679	174					
30	78,54	3720	13314	170	173	se sacaron los cilindros a las 07:30 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 41%.	7	4,13	2,39
31	78,54	3720	10963	140					
32	78,54	3640	13839	176					
33	78,54	3720	15095	192					
34	78,54	3740	14890	190	189	se sacaron los cilindros a las 11:35 a.m. de la piscina de curado y se registro una humedad de 40%.	6	3,54	1,87
35	80,12	3720	13362	167					
36	78,54	3720	14620	186					
37	78,54	3720	16367	208					
38	78,54	3720	16684	212	203	se sacaron los cilindros a las 07:35 a.m. y se registro una humedad de 41%.	4	2,36	1,16
39	78,54	3720	16578	211					
40	78,54	3740	14253	181					

SERIE DE PROBETAS	EDAD	TEMPERATURA PROMEDIO (°C)	RESISTENCIA PROMEDIO Kgf/cm^2	RANGO	DESVIACION ESTANDAR (σ)	VARIACION (%)
(1,2,3,4)	26/08/2010 (24 horas)	27,3	79	1	0,59	0,75
(5,6,7,8)	27/08/2010 (2 días)	25,0	133	2	1,18	0,89
(9,10,11,12)	01/09/2010 (7 días)	24,8	218	4	2,36	1,08
(13,14,15,16)	08/09/2010 (14 días)	23,6	241	1	0,59	0,24
(17,18,19,20)	22/09/2010 (28 días)	24,9	255	7	4,13	1,62
(21,22,23,24)	31/08/2010 (24 horas)	26,5	58	5	2,95	5,09
(25,26,27,28)	01/09/2010 (2 días)	25,7	103	4	2,36	2,30
(29,30,31,32)	06/09/2010 (7 días)	25,0	173	7	4,13	2,39
(33,34,35,36)	13/09/2010 (14 días)	25,2	189	6	3,54	1,87
(39,40,41,42)	27/09/2010 (28 días)	27,5	211	4	2,36	1,16

TABLA 3.2. Hoja de calculo de cuadro de resumen de resultados agrupados por cilindros

Apéndice G

*Ajuste de curvas por el método de mínimos
cuadrados*

Apéndice G

Ajuste de curvas por el método de mínimos cuadrados.

Sea $((x_1, y_1), (x_1, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_m, y_m))$ un conjunto de puntos experimentales de dos magnitudes físicas “x” e “y”, que se han medido en un experimento, y se quiere determinar una relación funcional entre ellas.

Si se grafica este conjunto de datos sobre el papel con escalas lineales (por ejemplo, semilogarítmicas) y se traza la curva que mejor se aproxima a todos los puntos experimentales, en general se observa que para cada valor de x_i hay una diferencia entre el valor observado experimentalmente y_i y la ordenada y que se obtiene a partir de la curva.

La curva C que mejor se ajusta al conjunto de puntos experimentales por el Método de los Mínimos Cuadrados, será aquella que cumpla que la suma de todas las diferencias $\sum S_i^2$ sea mínima, es decir:

$$S = S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_i^2 + \dots + S_m^2 \cong 0$$

El método de los Mínimos Cuadrados asigna mayor peso a un punto que esta fuera de la tendencia de los datos, pero no permite que el punto domine completamente la aproximación ya que promedia la desviación absoluta de los puntos.

Si el conjunto de puntos experimentales se adjunta a un polinomio algebraico de la forma:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_ix^i + \dots + a_nx^n$$

Entonces las sumas de todas las diferencias viene expresada por:

$$S = \sum_{i=1}^m [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_nx_i^n)]$$

Donde y_i es el valor observado y el polinomio en la ordenada y_i de la curva para una x_i .

Para obtener la curva que mejor se ajusta al conjunto de puntos experimentales (S sea un mínimo). Hay que derivar S e igualar a cero, es decir:

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial a_i} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial a_n} = 0$$

Estas derivaciones conducen a un sistema de n ecuaciones, por lo que es necesario que el número m de puntos experimentales sea mayor que el grado n del polinomio ($m > n$). el sistema de ecuaciones resultante, a partir del cual se determinan los coeficientes del polinomio es.

$$ma_0 + \sum x_i a_1 + \sum x_i^2 a_2 + \dots + \sum x_i^n a_n = \sum y_i$$

$$\sum x_i a_0 + \sum x_i^2 a_1 + \sum x_i^3 a_2 + \dots + \sum x_i^{n+1} a_n = \sum x_i y_i$$

$$\sum x_i^2 a_0 + \sum x_i^3 a_1 + \sum x_i^4 a_2 + \dots + \sum x_i^{n+2} a_n = \sum x_i^2 y_i$$

$$\sum x_i^n a_0 + \sum x_i^{n+1} a_1 + \sum x_i^{n+2} a_2 + \dots + \sum x_i^{2n} a_n = \sum x_i^n y_i$$

La desviación estándar del polinomio de aproximación se obtiene por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum [y_i - (a_0 + a_1 x_i + \dots + a_n x_i^n)]^2}{m - (n + 1)}}$$

Línea recta de los mínimos cuadrados

En este caso el conjunto de puntos experimentales se ajusta al polinomio. El sistema de ecuaciones que definen los parámetros a_0 y a_1 es:

$$ma_0 + \sum x_i a_1 = \sum y_i$$

$$\sum x_i a_0 + \sum x_i^2 a_1 = \sum x_i y_i$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones resulta:

$$a_0 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$a_1 = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

El error estándar de los coeficientes se determina aproximadamente por:

$$\Delta a_0 = \sqrt{\left[\frac{1}{m} + \frac{\bar{x}^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right] \left[\frac{\sum (a_0 + a_1 x_i - y_i)^2}{m-2} \right]}$$

$$\Delta a_1 = \sqrt{\left[\frac{1}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right] \left[\frac{\sum (a_0 + a_1 x_i - y_i)^2}{m-2} \right]}$$

GRAFICO A 28 DIAS (210 Kgf/cm²)

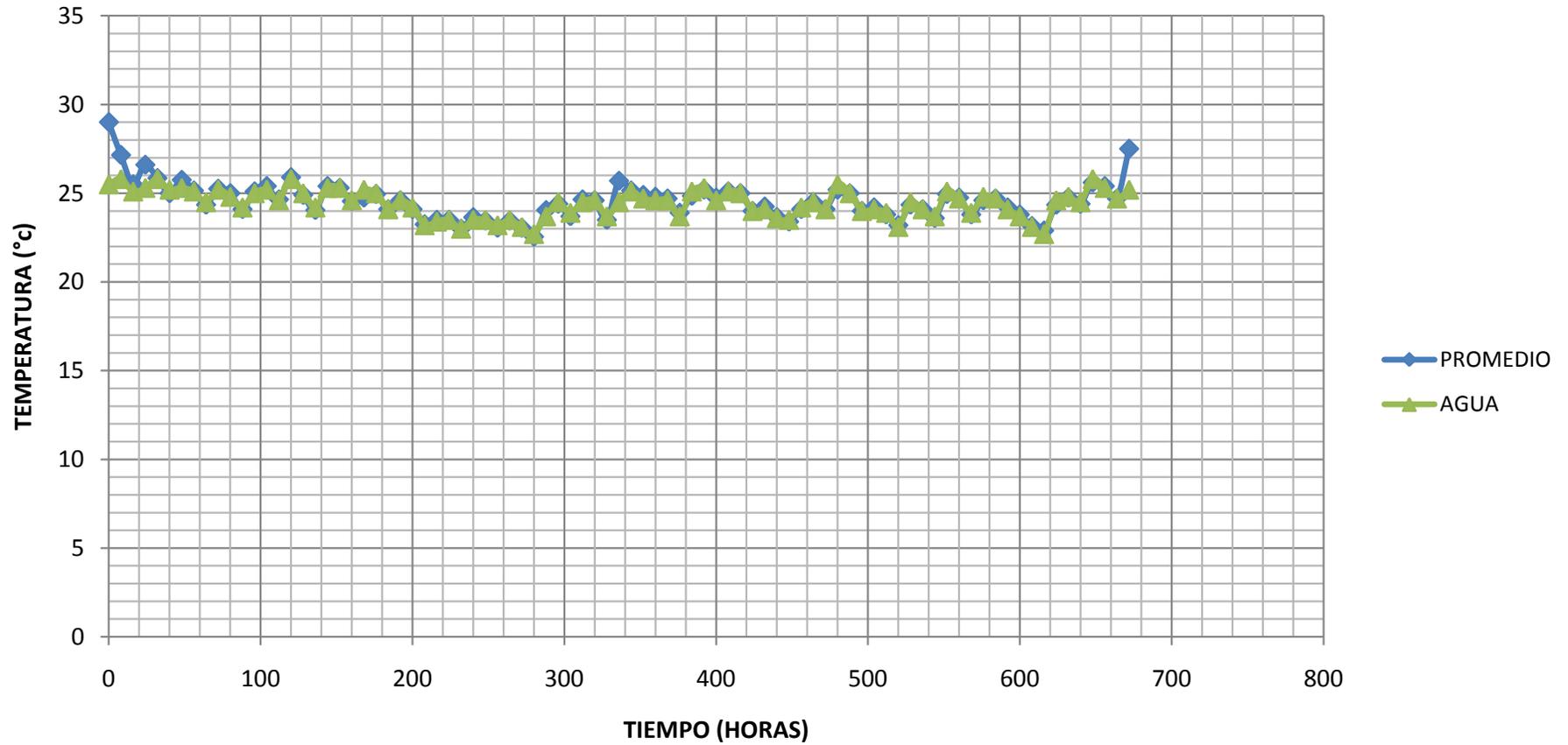
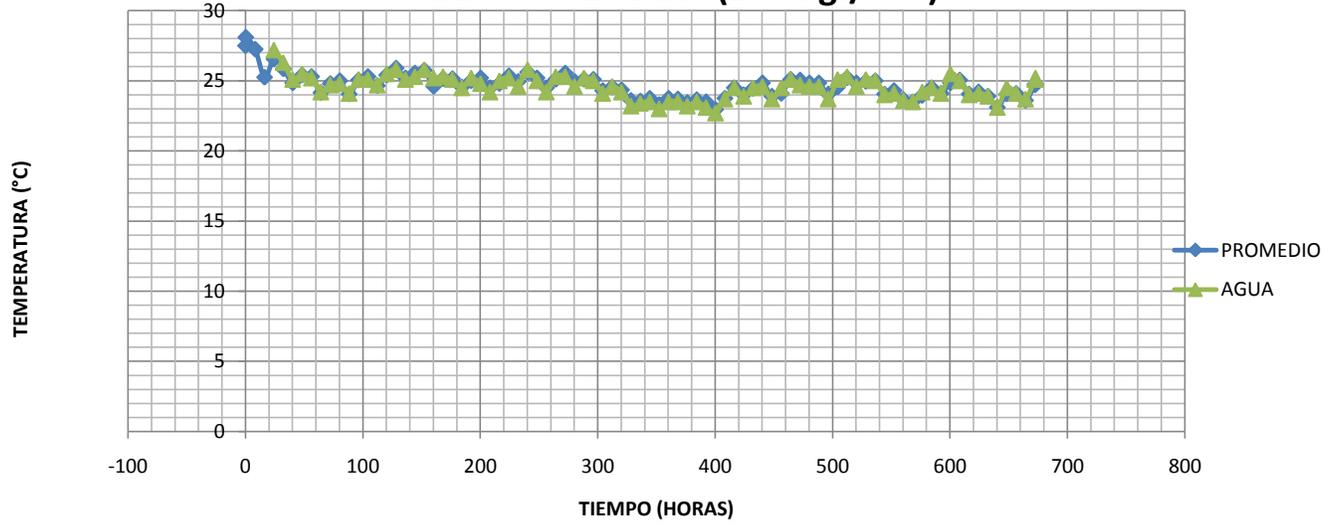


GRAFICO A 28 DIAS (250 Kg/cm²)



RESISTENCIA VS INDICE DE MADUREZ

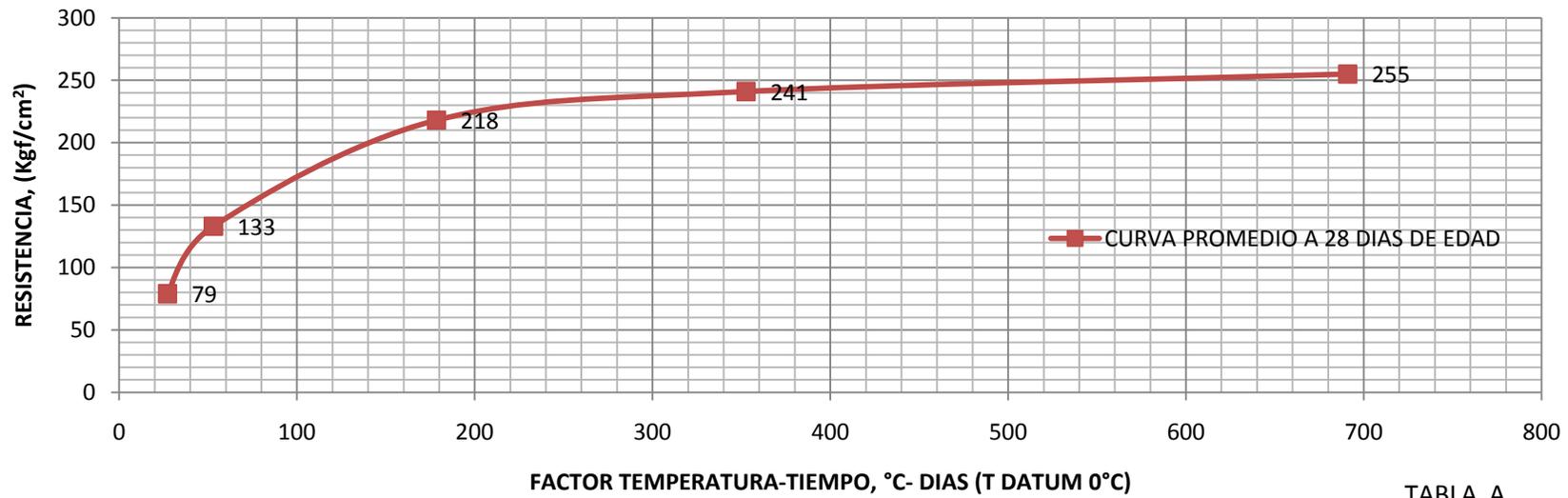


TABLA A

RESISTENCIAS VS INDICE DE MADUREZ

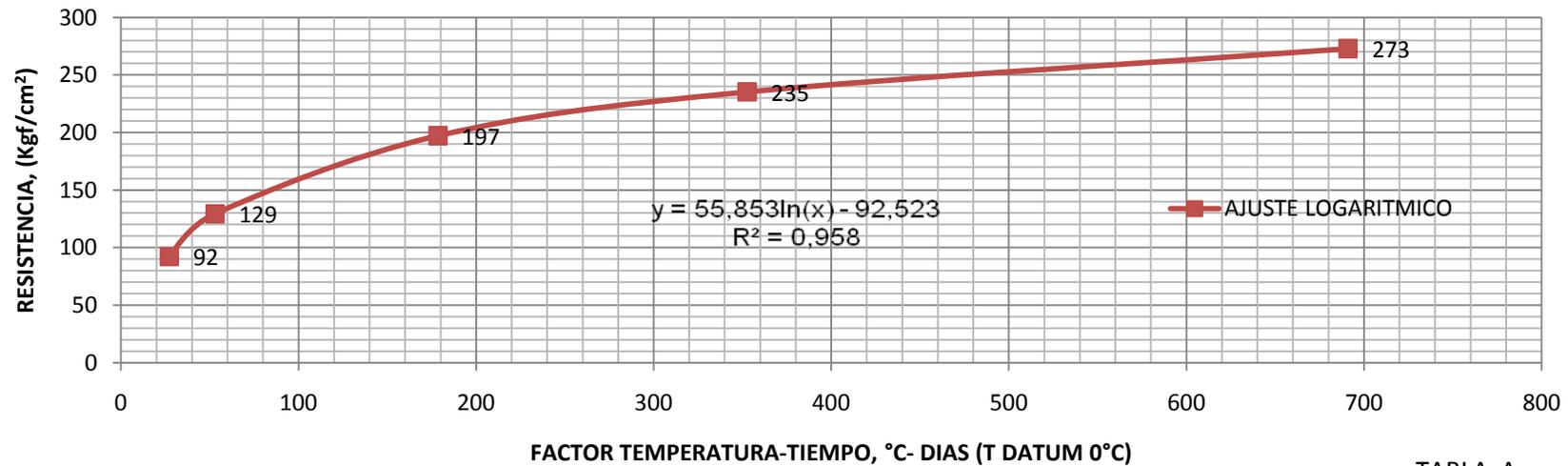


TABLA A

RESISTENCIAS VS INDICE DE MADUREZ

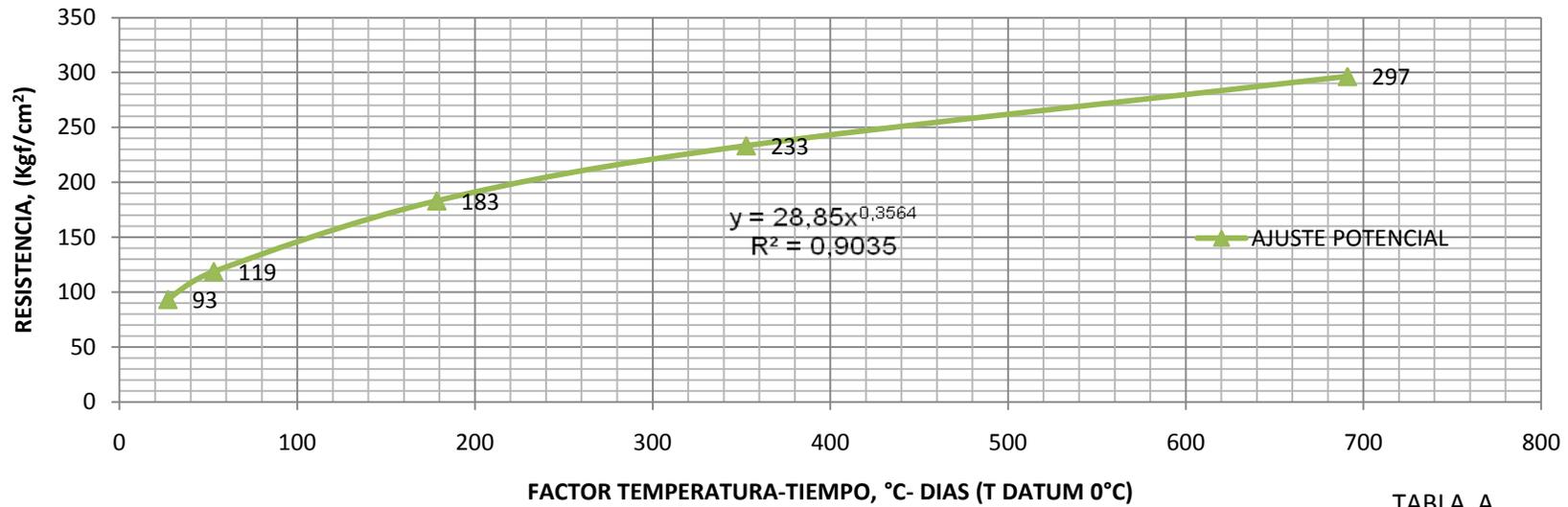


TABLA A

RESISTENCIAS VS INDICE DE MADUREZ

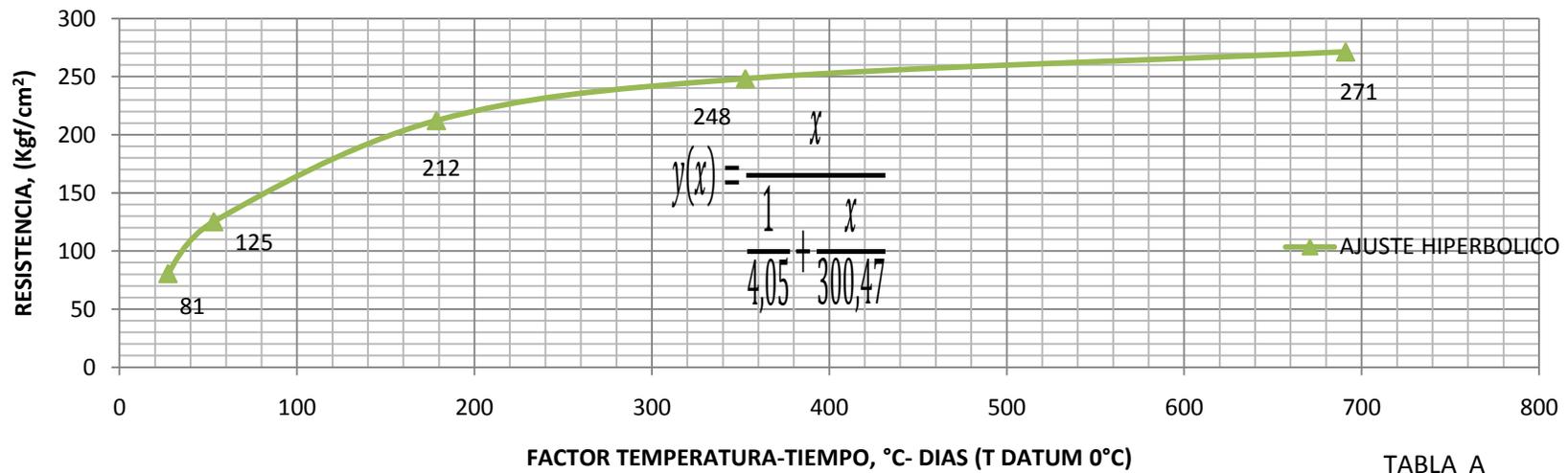


TABLA A

RESISTENCIAS VS INDICE DE MADUREZ

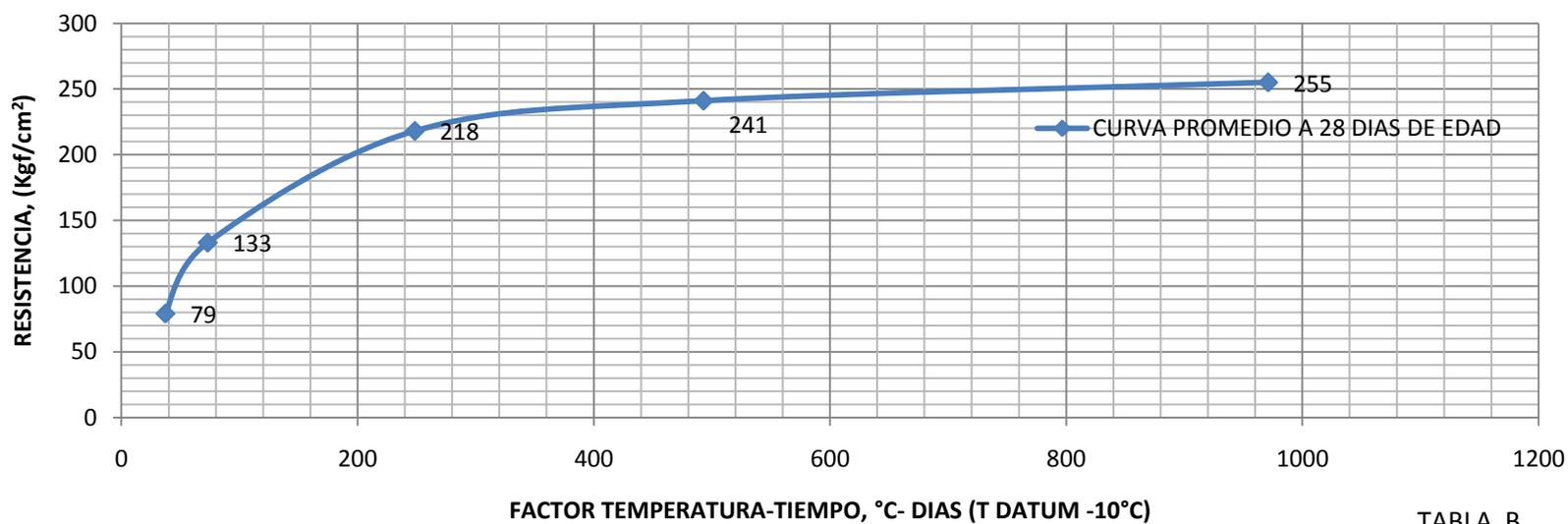


TABLA B

RESISTENCIAS VS INDICE DE MADUREZ

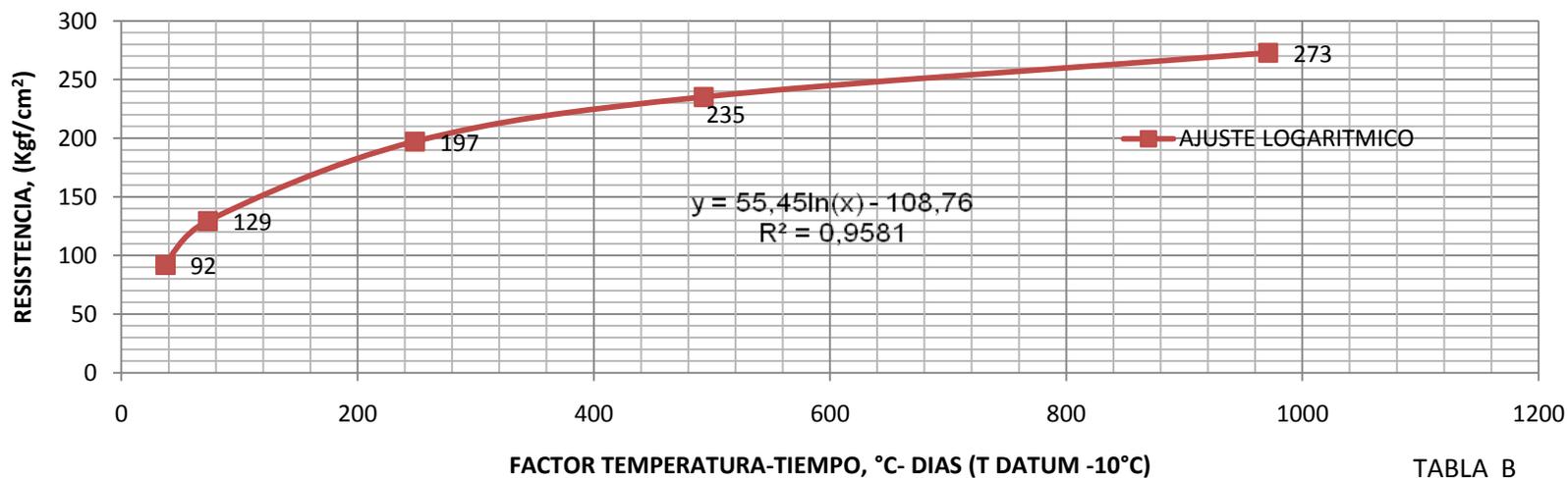
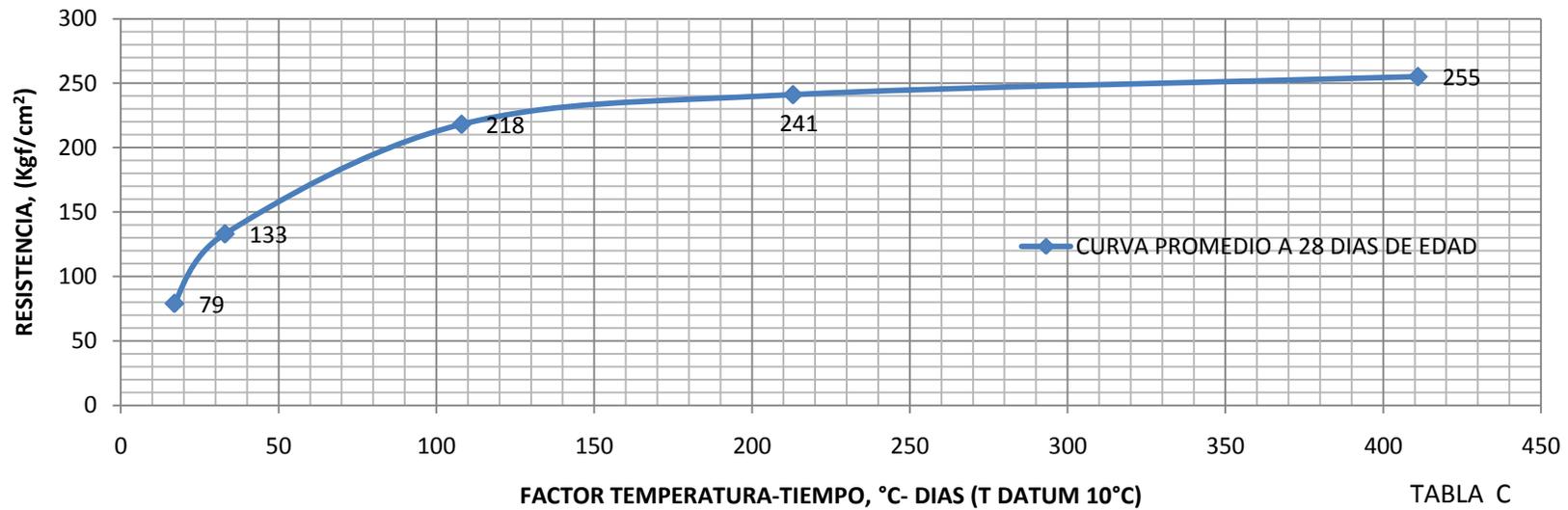
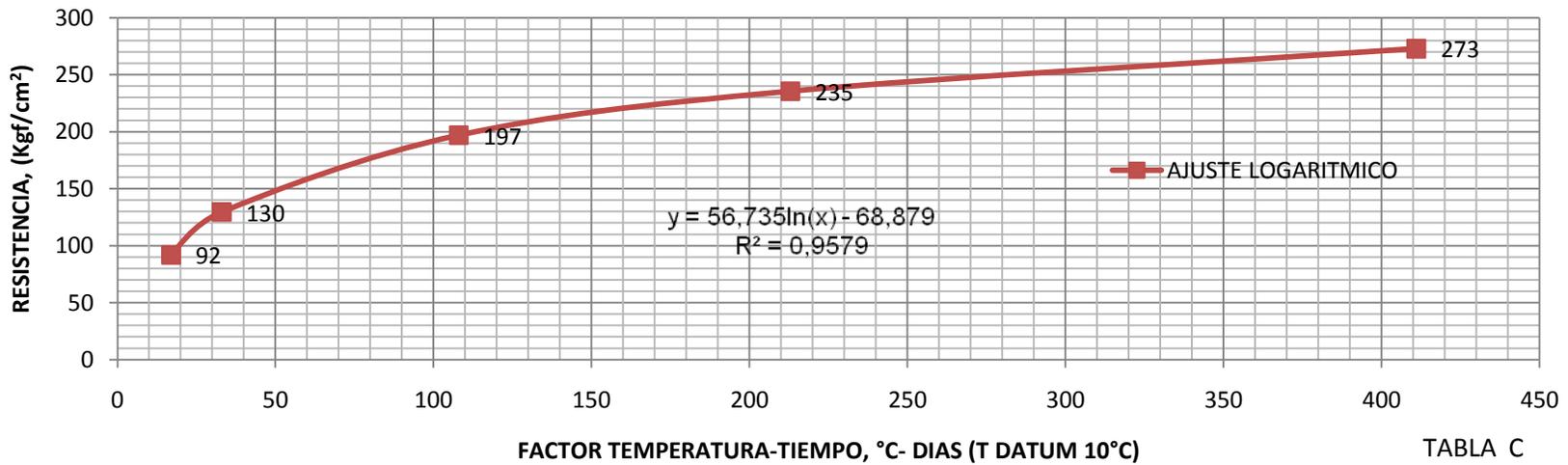


TABLA B

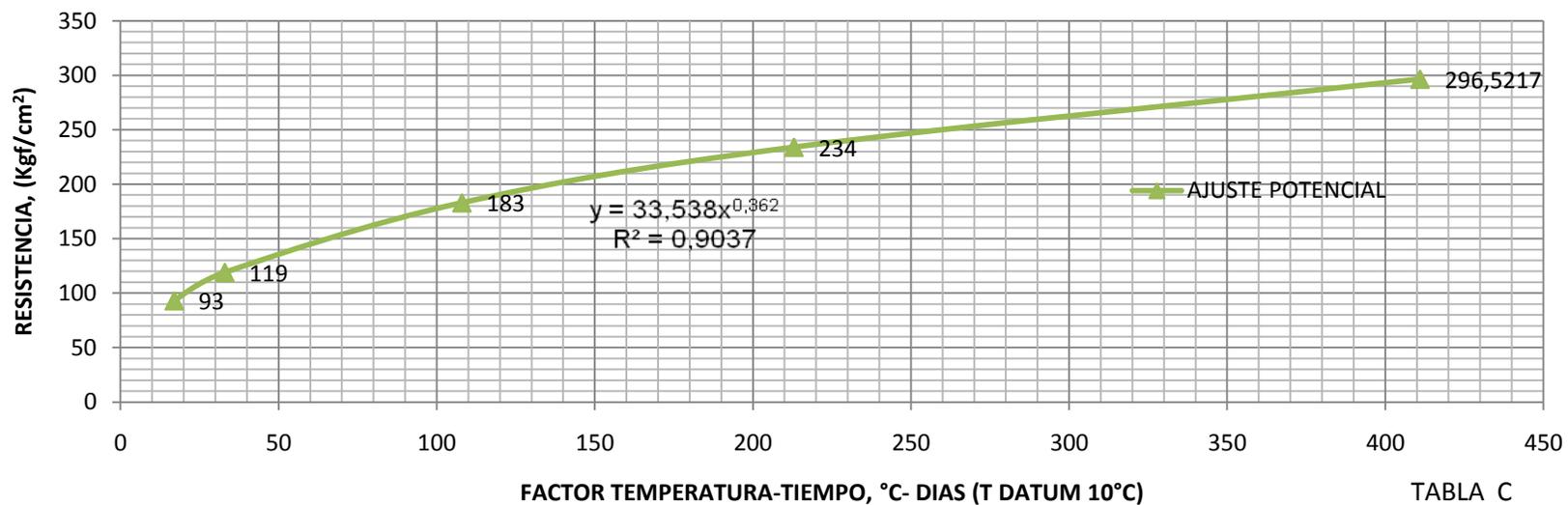
RESISTENCIAS vs INDICE DE MADUREZ



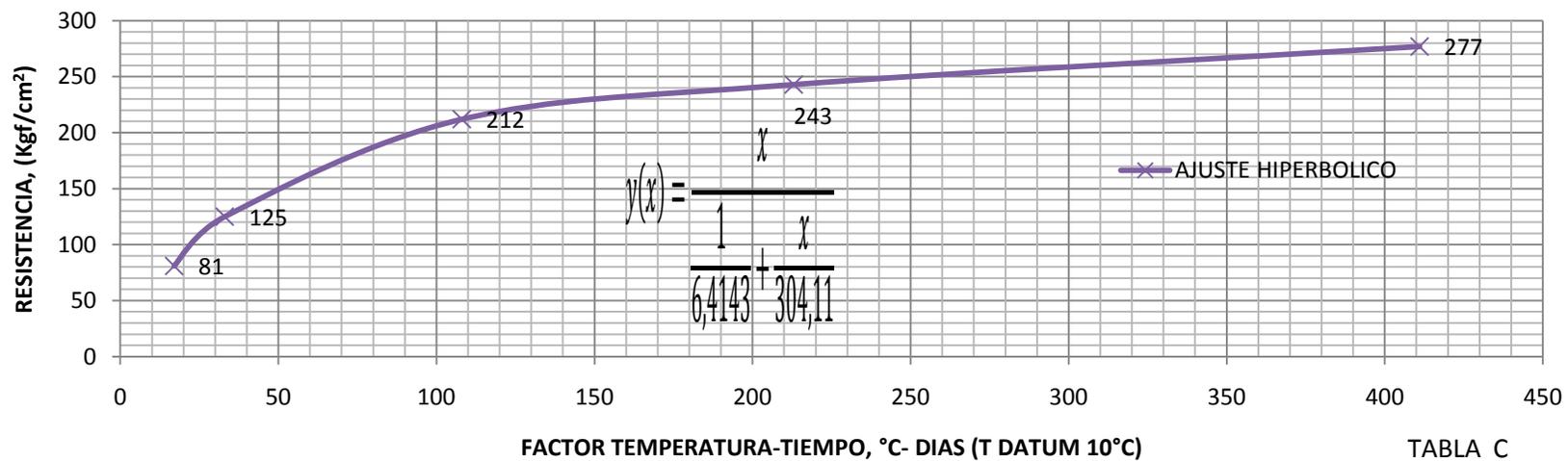
RESISTENCIAS VS INDICE DE MADUREZ



RESISTENCIAS VS INDICE DE MADUREZ



RESISTENCIAS VS INDICE DE MADUREZ



DETERMINACION DE LA FUERZA LIMITE

PARAMETROS DE AJUSTE DE LA FUNCION HIPERBOLICA

INDICE DE MADUREZ

INCREMENTOS INICIALES 250

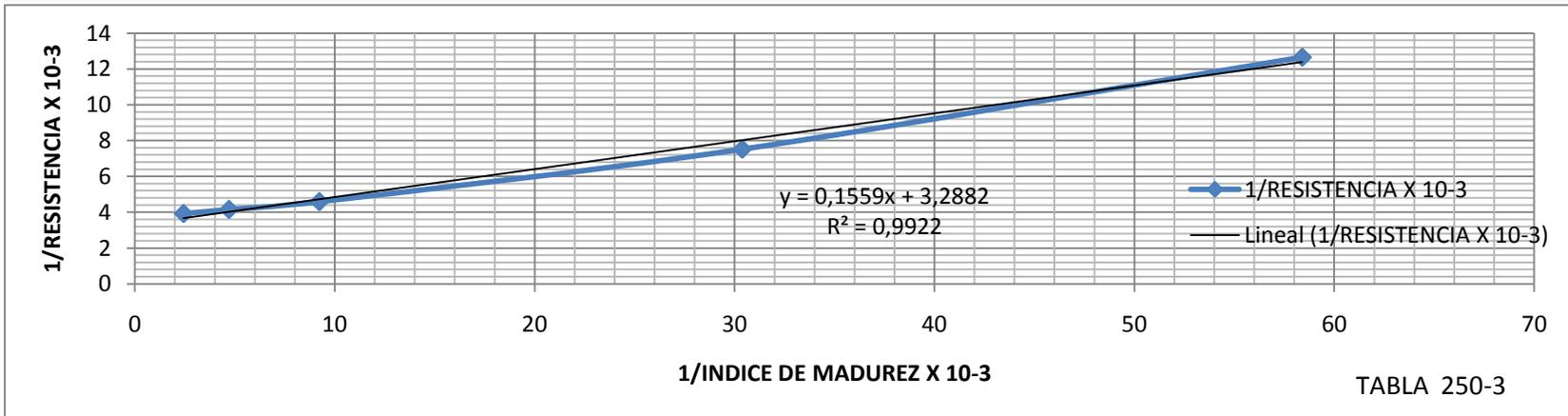
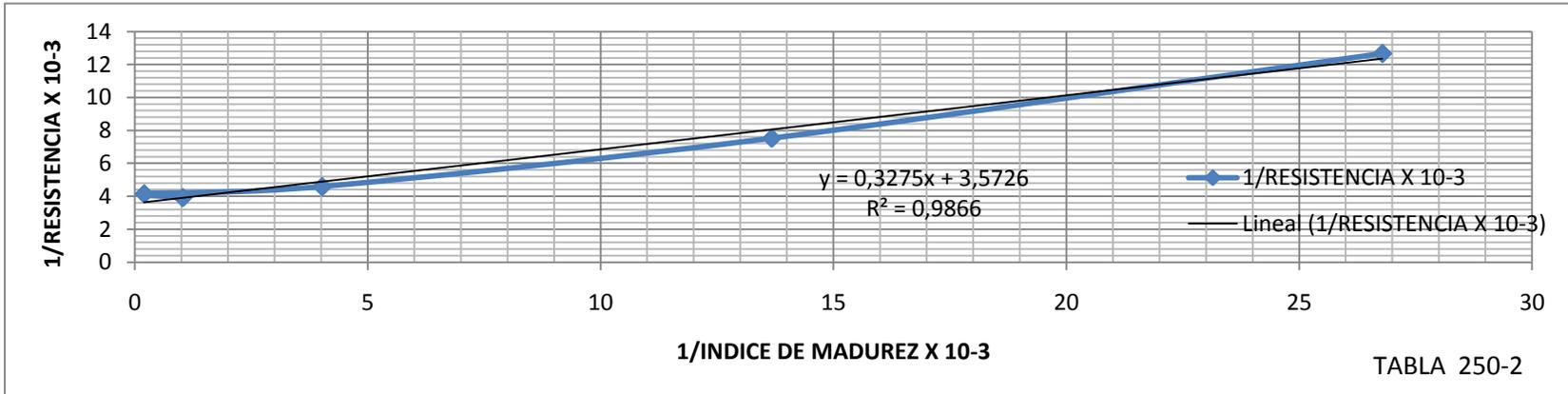
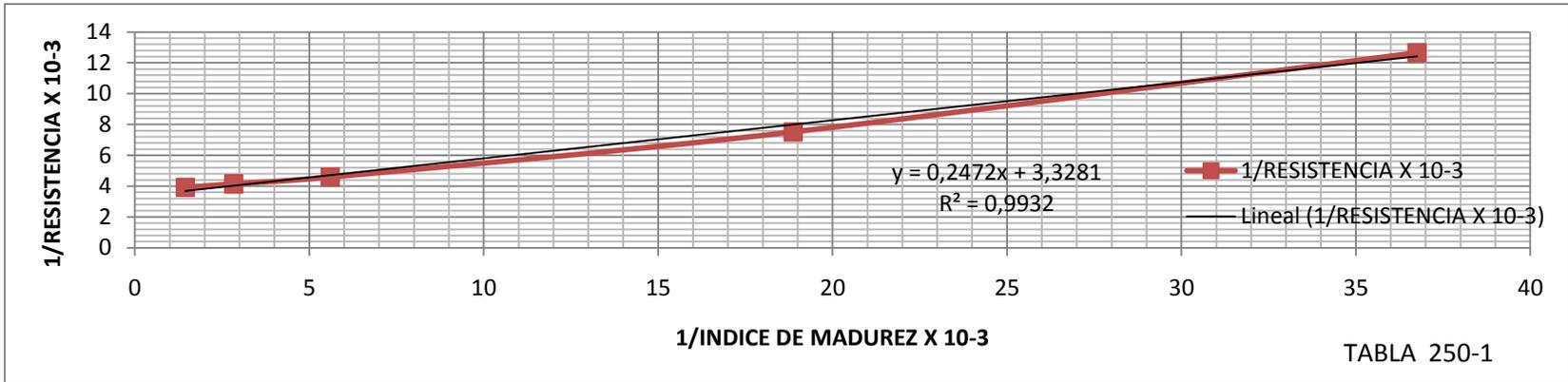
1/MADUREZ, DIAS X 10-3	1/MADUREZ, DIAS X 10-3	1/MADUREZ, DIAS X 10-3	1/RESISTENCIA X 10-3
36,75	26,786	58,394	12,66
18,87	13,675	30,380	7,52
5,60	4,023	9,227	4,59
2,84	0,202	4,705	4,15
1,45	1,030	2,433	3,92

TABLA 250-1

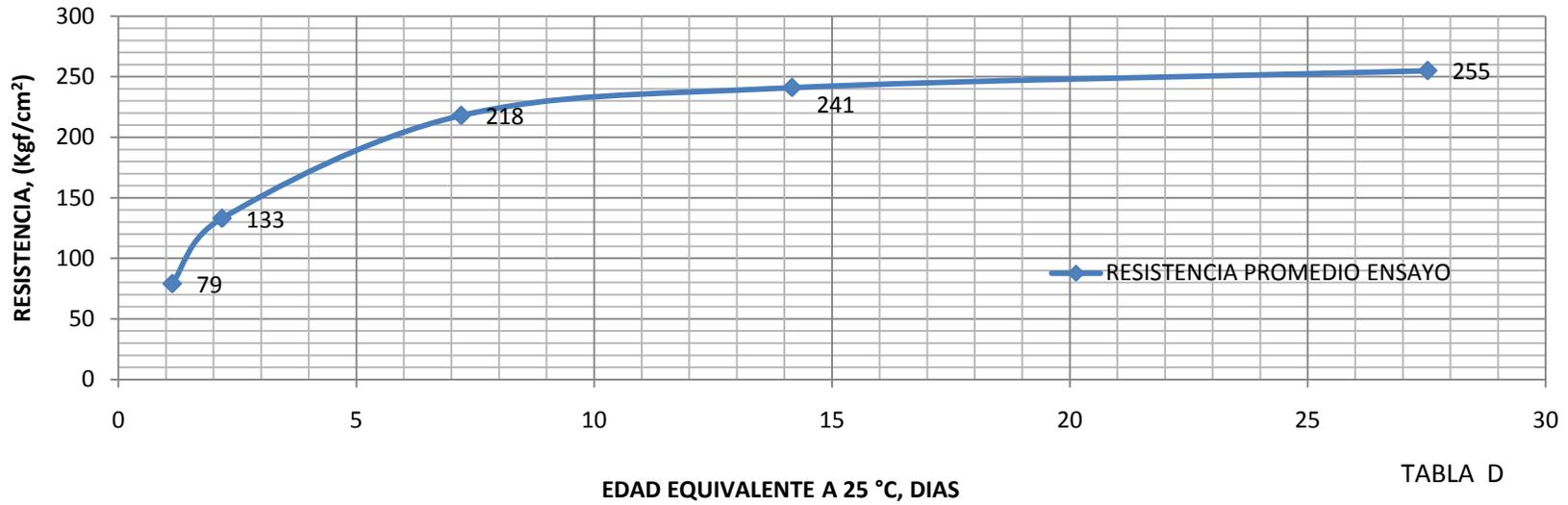
TABLA 250-2

TABLA 250-3

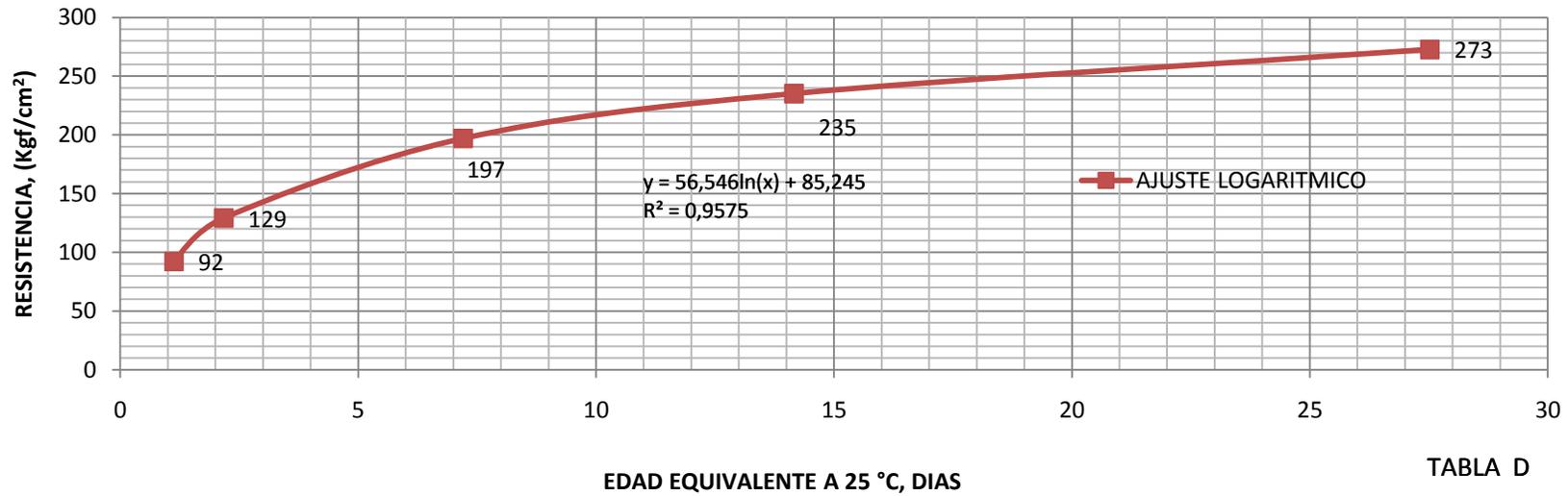
T °C DATUM	TABLA	Su	A
0	1	300,47	4,05
-10	2	279,91	3,05
10	3	304,11	6,44



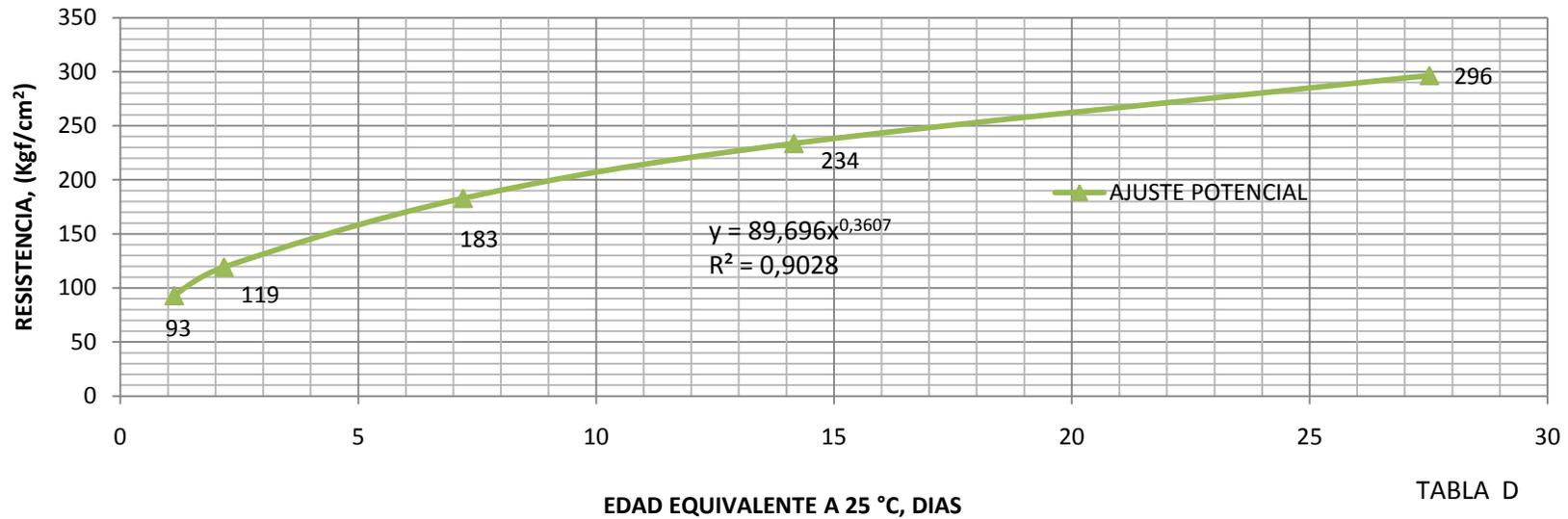
RESISTENCIAS vs EDAD EQUIVALENTE



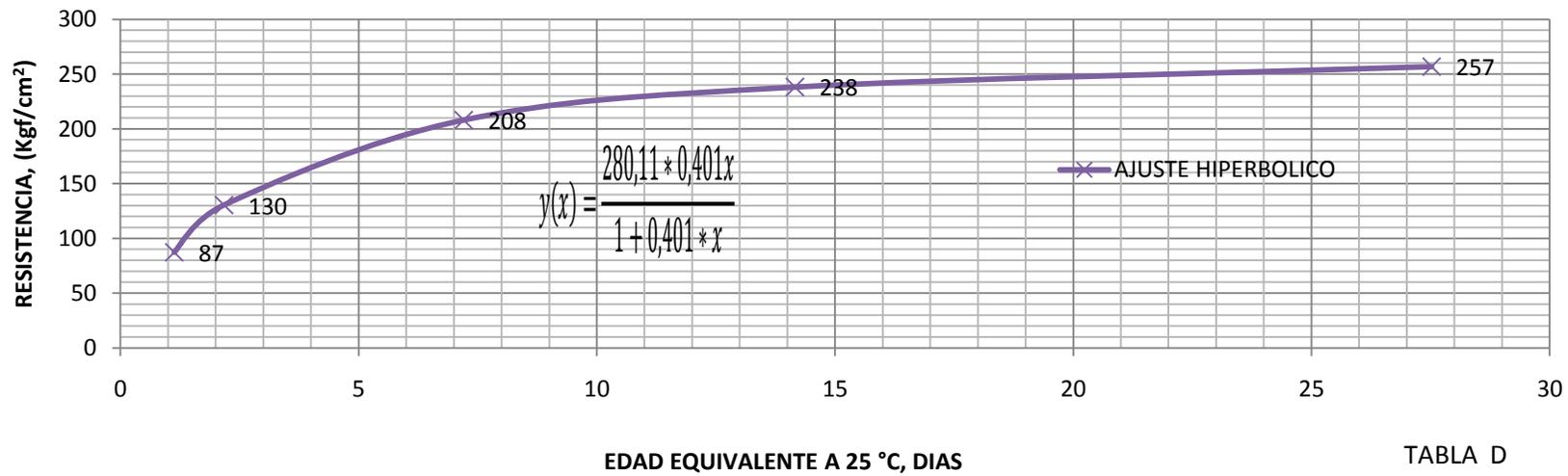
RESISTENCIAS vs EDAD EQUIVALENTE



RESISTENCIAS vs EDAD EQUIVALENTE



RESISTENCIAS vs EDAD EQUIVALENTE



DETERMINACION DE LA FUERZA LIMITE
 PARAMETROS DE AJUSTE DE LA FUNCION HIPERBOLICA
 EDAD EQUIVALENTE

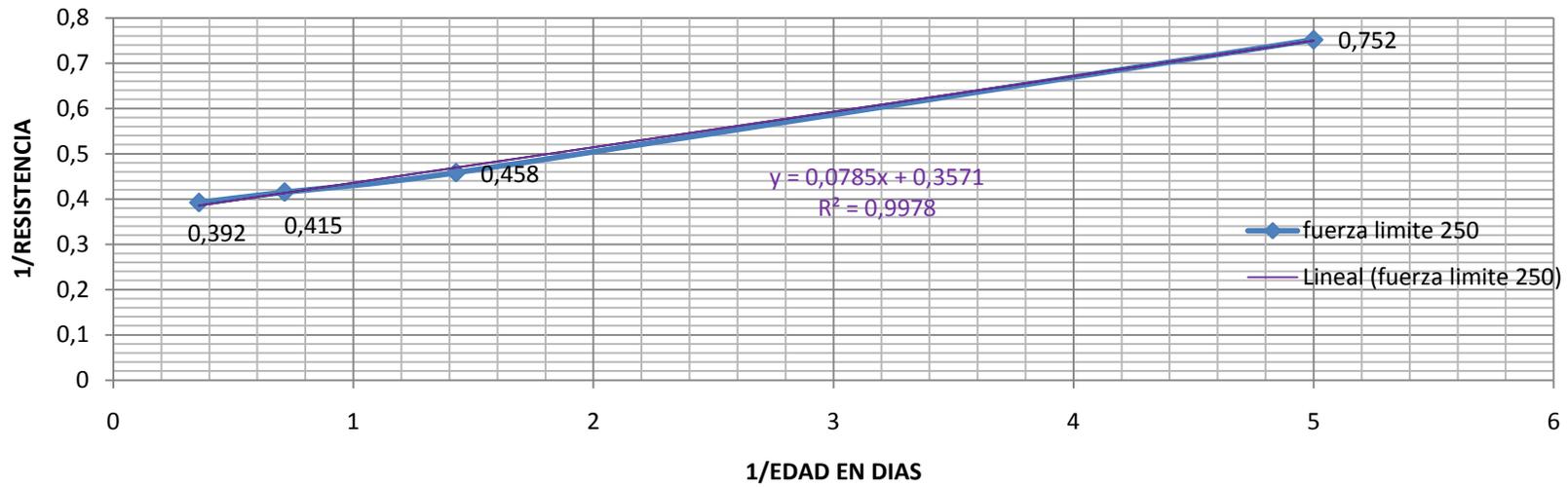
EDADES	(1/EDAD EN DIAS)x10-1	(1/RESISTENCIAS)x 10-2 <i>Kgf/cm²</i>	FUERZA LIMITATIVA <i>Kgf/cm²</i>	DESVIACION ESTANDAR  <i>Kgf/cm²</i>
28	0,357	0,392	280,11	3,51
14	0,714	0,415		
7	1,428	0,458		
2	5	0,752		

DETERMINACION DE INCREMENTO INICIALES Y CONSTANTE DE PROPORCION
 PARAMETROS DE AJUSTE DE LA FUNCION HIPERBOLICA
 EDAD EQUIVALENTE

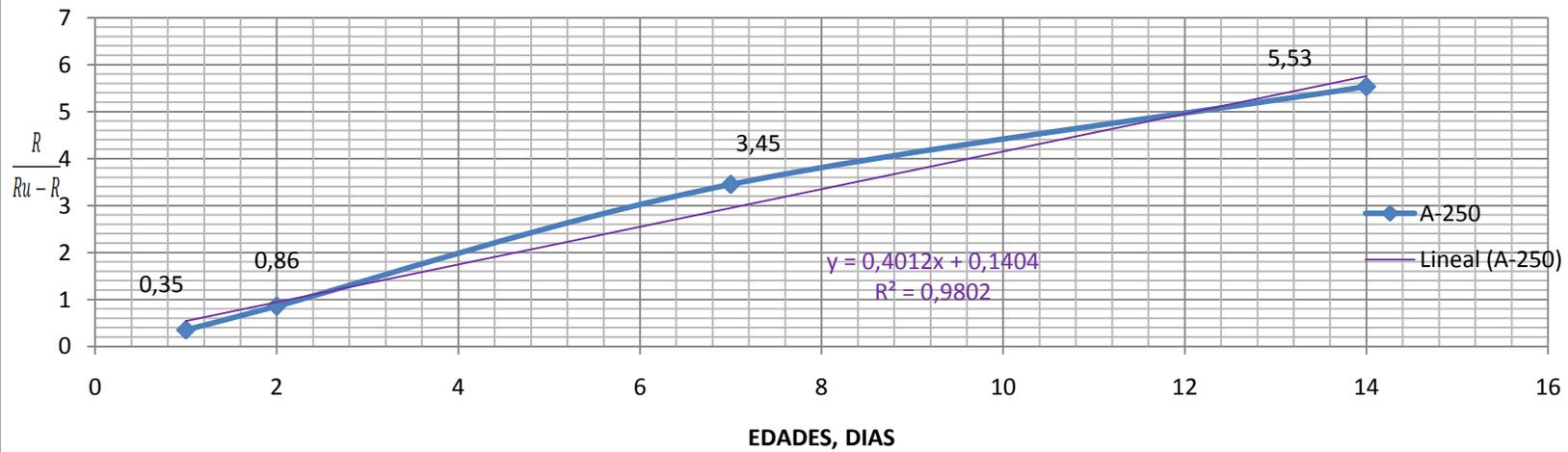
EDADES	RESISTENCIAS,250 <i>Kgf/cm²</i>	A-250
1	79	0,35
2	133	0,86
7	218	3,45
14	241	5,53

Su	k
280,11	0,401

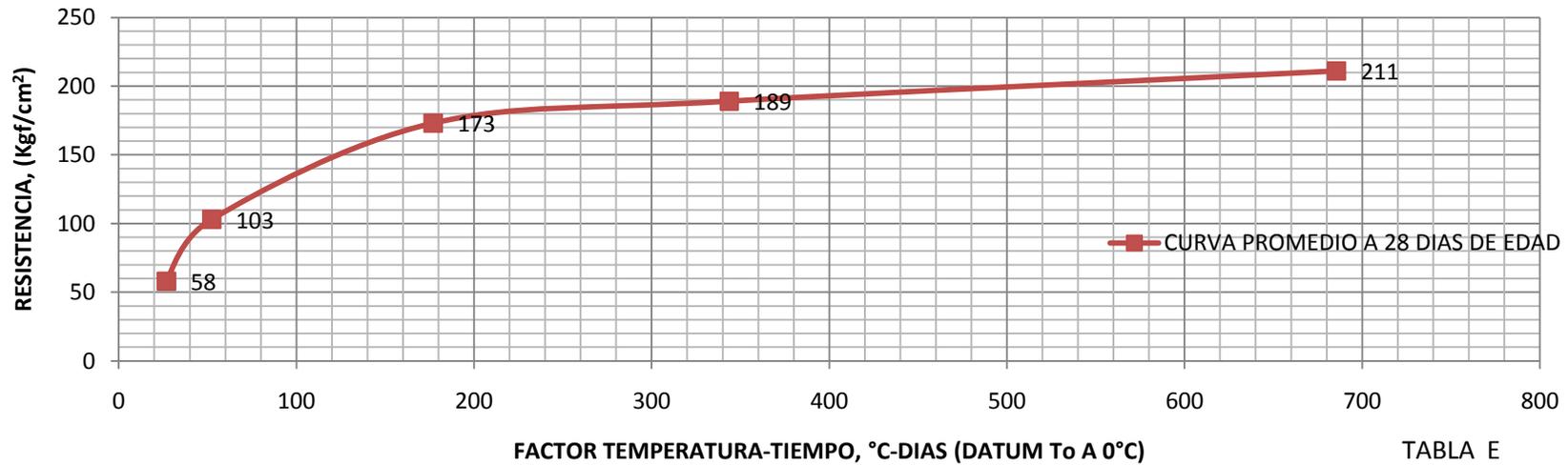
TRANSFORMACION LINEAL



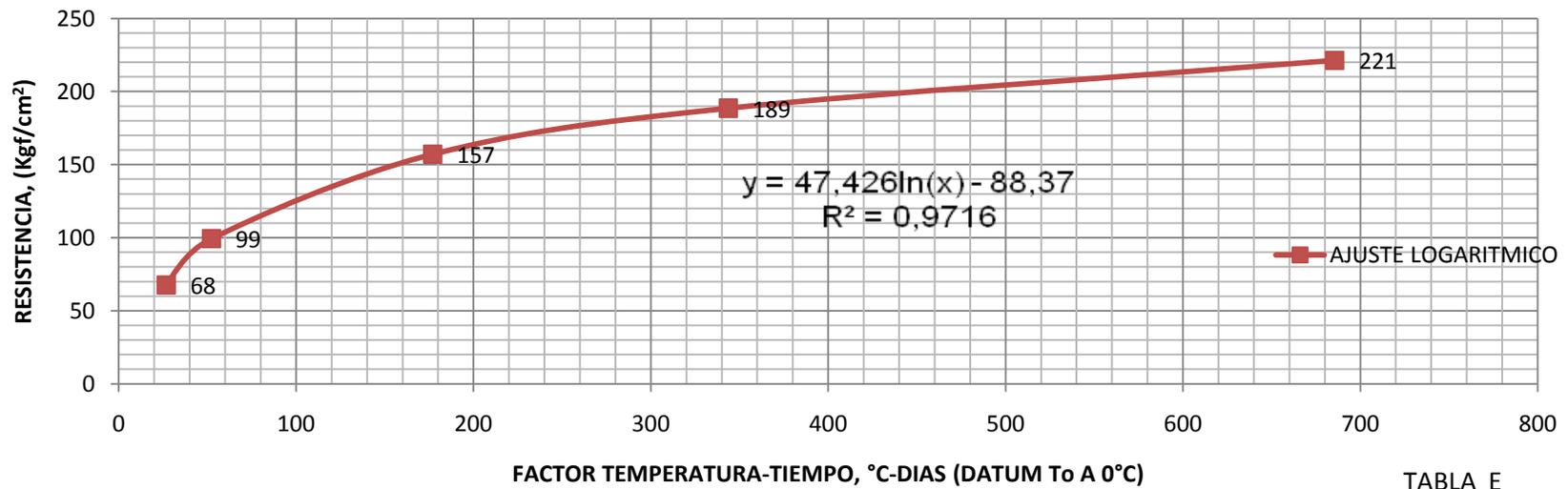
INCREMENTOS (250 Kg/cm²)



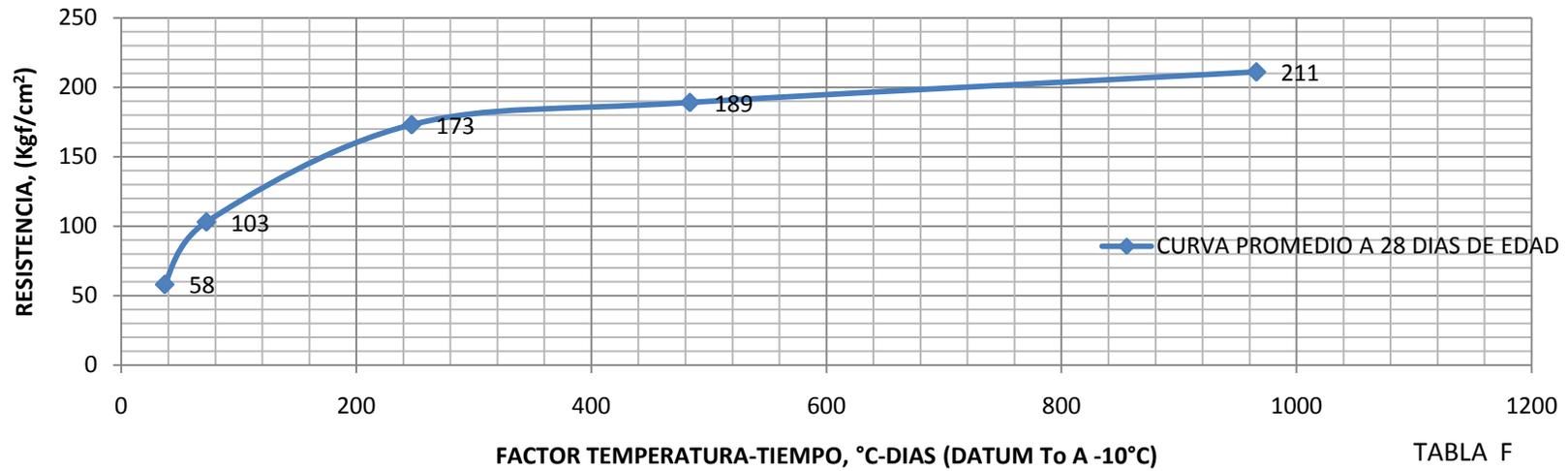
RESISTENCIA vs INDICE DE MADUREZ



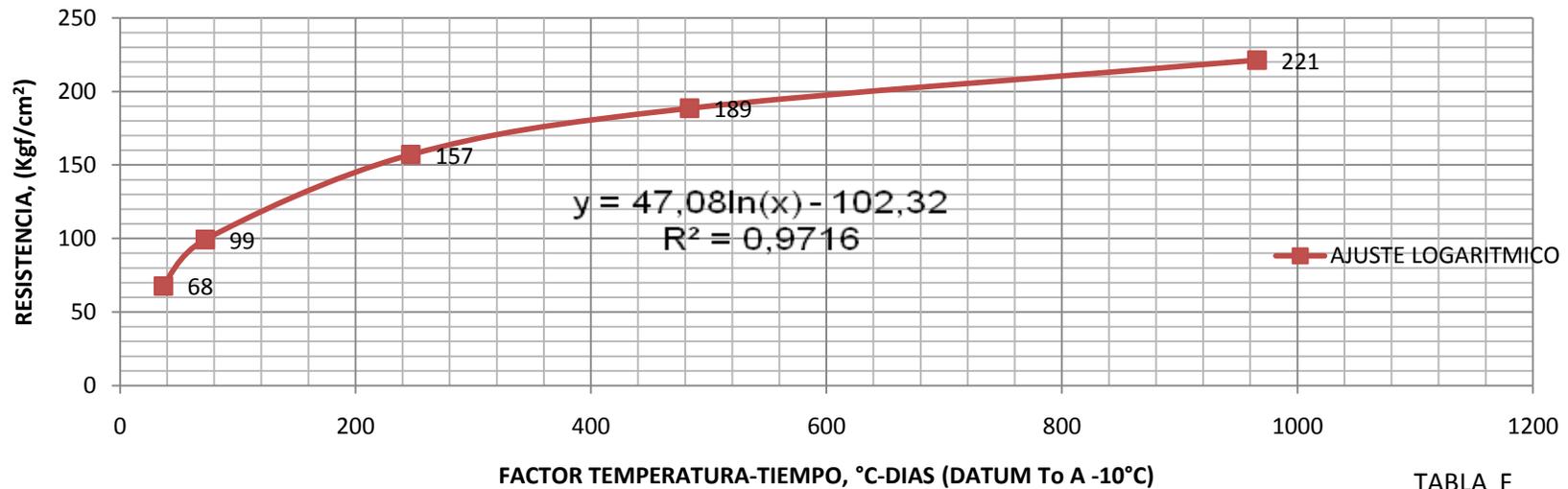
RESISTENCIA vs INDICE DE MADUREZ



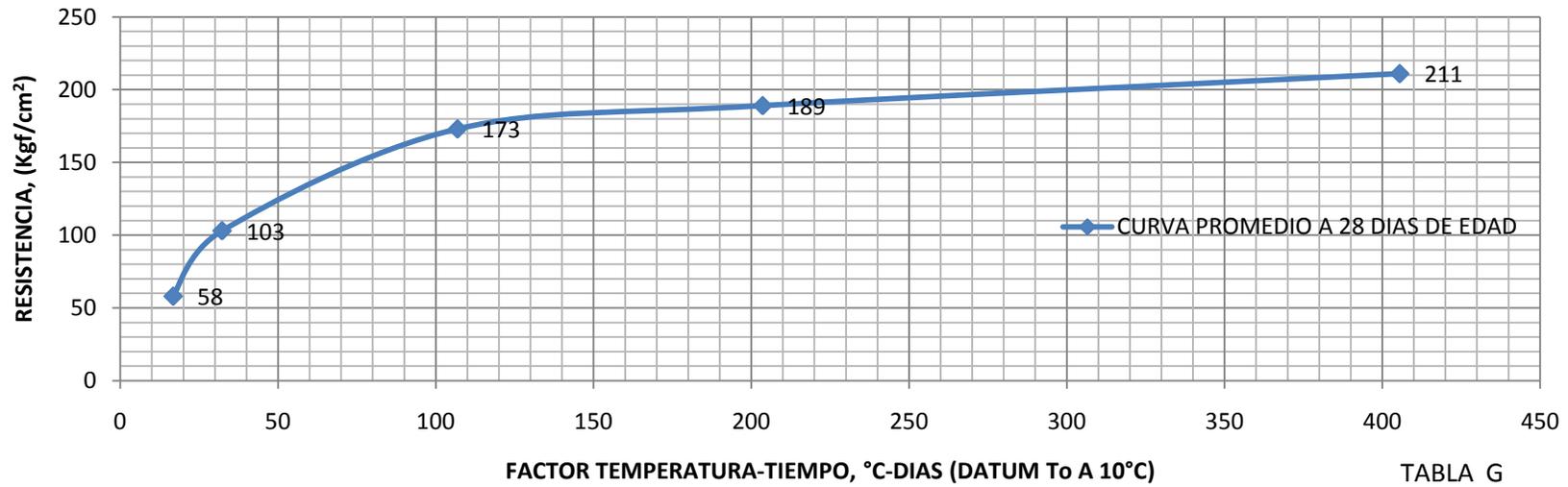
RESISTENCIAS VS INDICES DE MADUREZ



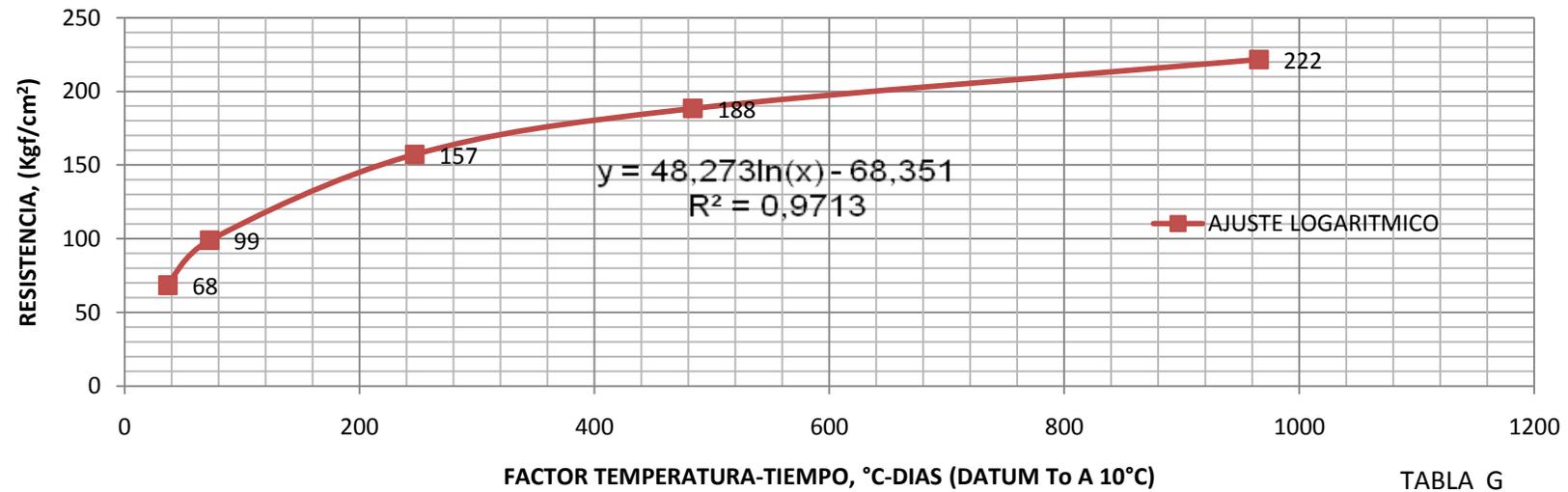
RESISTENCIAS VS INDICES DE MADUREZ



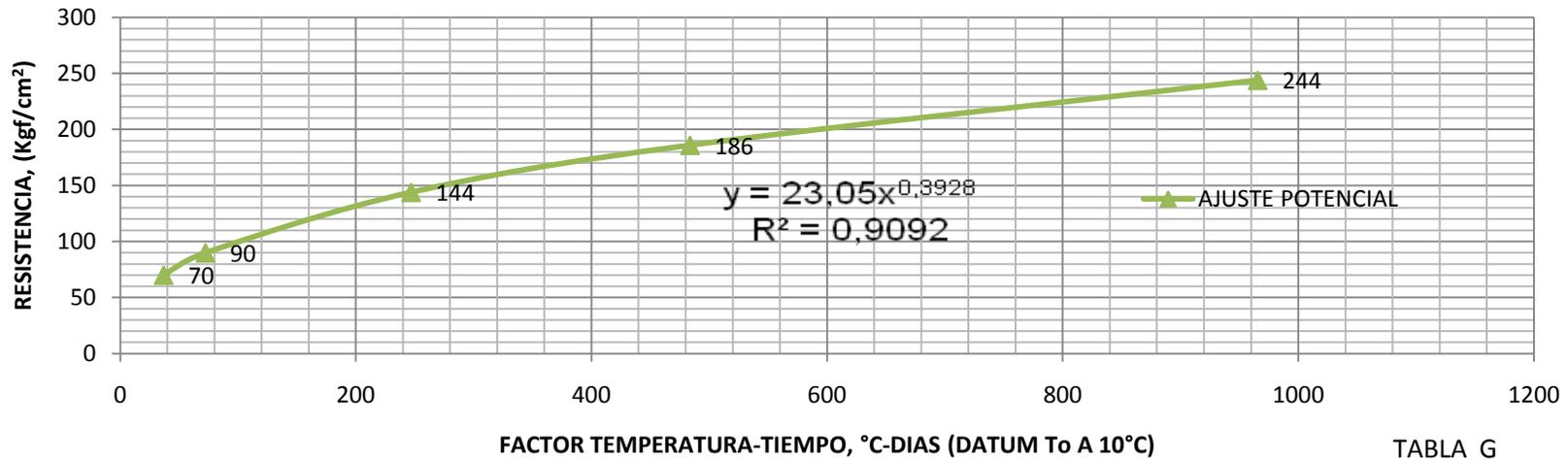
RESISTENCIA VS INDICE DE MADUREZ



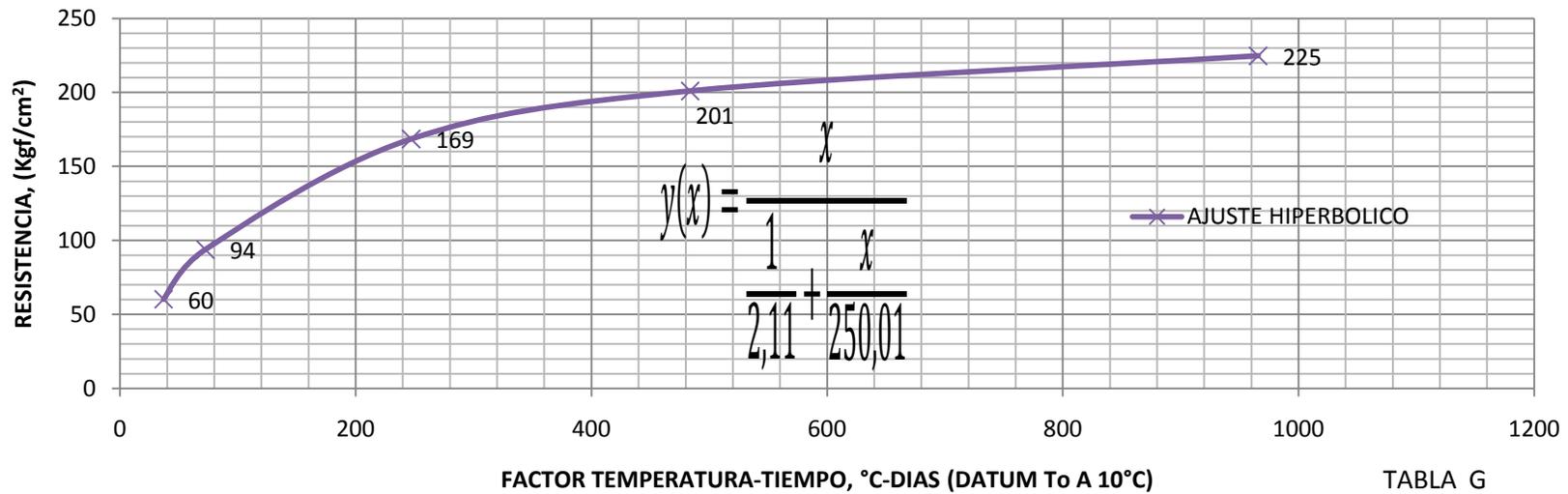
RESISTENCIA VS INDICE DE MADUREZ



RESISTENCIA VS INDICE DE MADUREZ



RESISTENCIA VS INDICE DE MADUREZ



DETERMINACION DE LA FUERZA LIMITE

PARAMETROS DE AJUSTE DE LA FUNCION HIPERBOLICA

INDICE DE MADUREZ

INCREMENTOS INICIALES 210

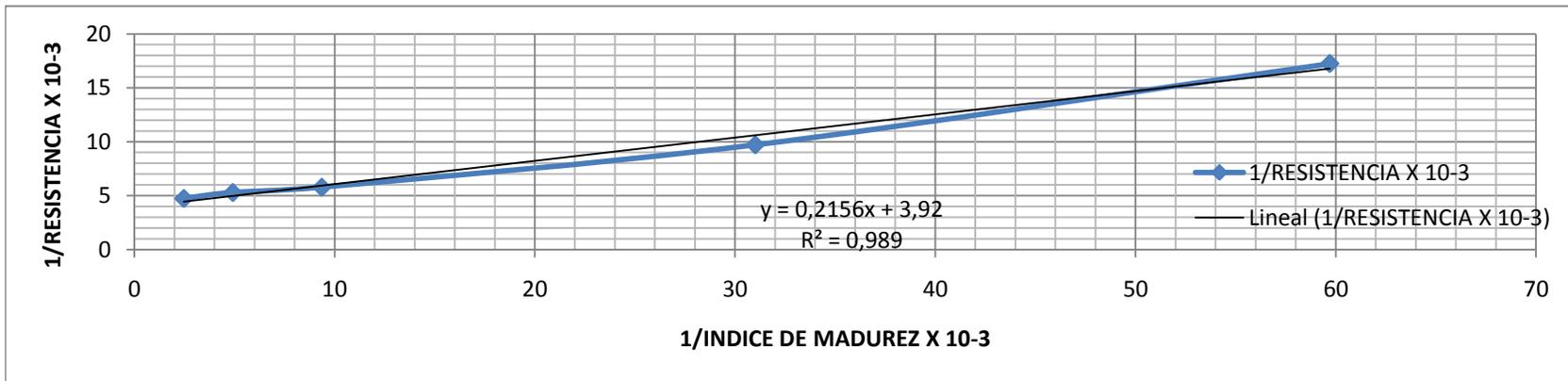
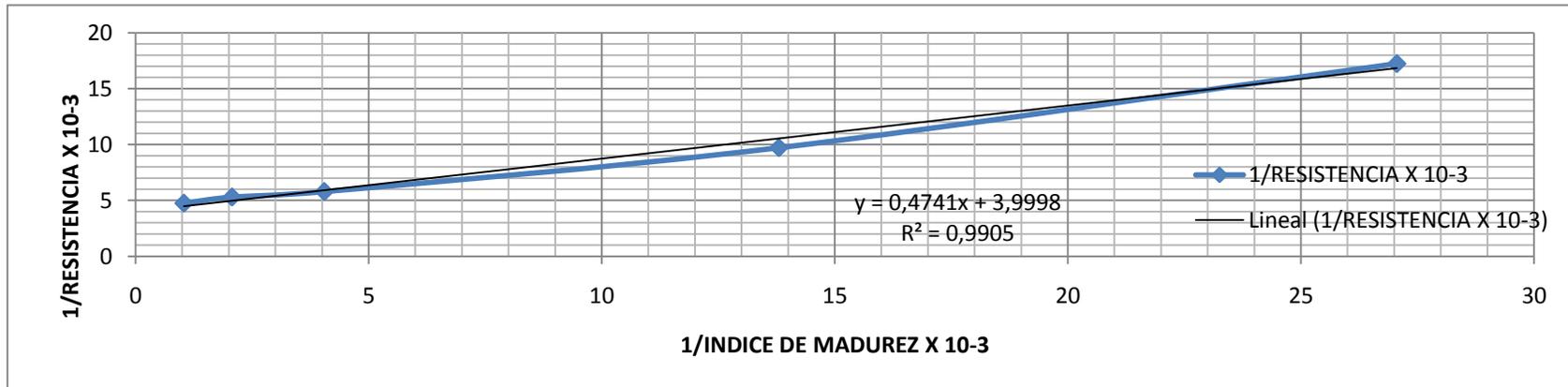
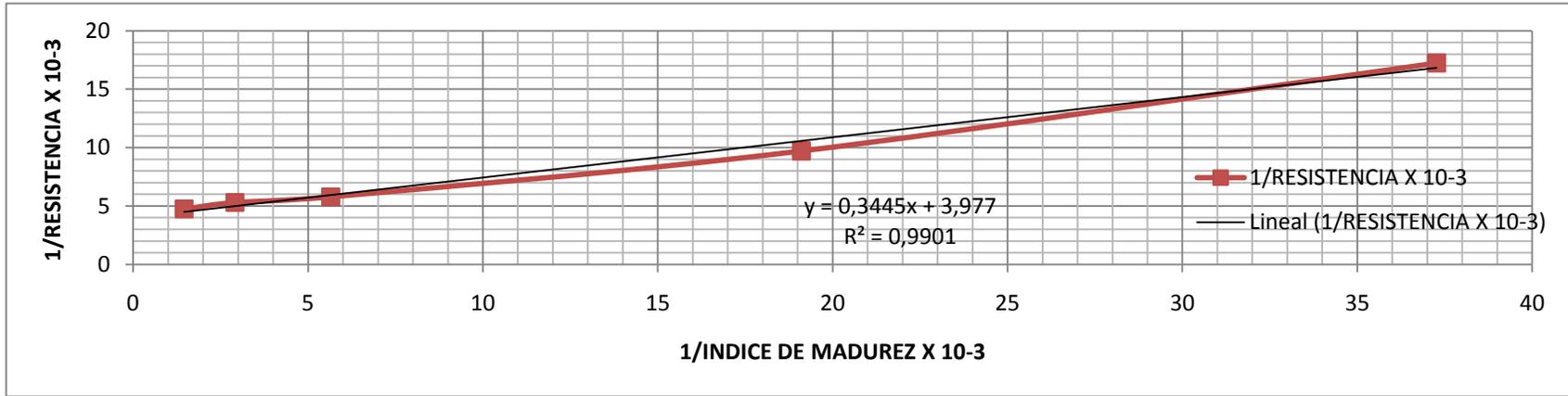
1/MADUREZ, DIAS X 10-3	1/MADUREZ, DIAS X 10-3	1/MADUREZ, DIAS X 10-3	1/RESISTENCIA X 10-3
37,27	27,06	59,701	17,24
19,11	13,80	31,008	9,71
5,65	4,05	9,357	5,78
2,91	2,07	4,912	5,29
1,46	1,04	2,466	4,74

TABLA 210-1

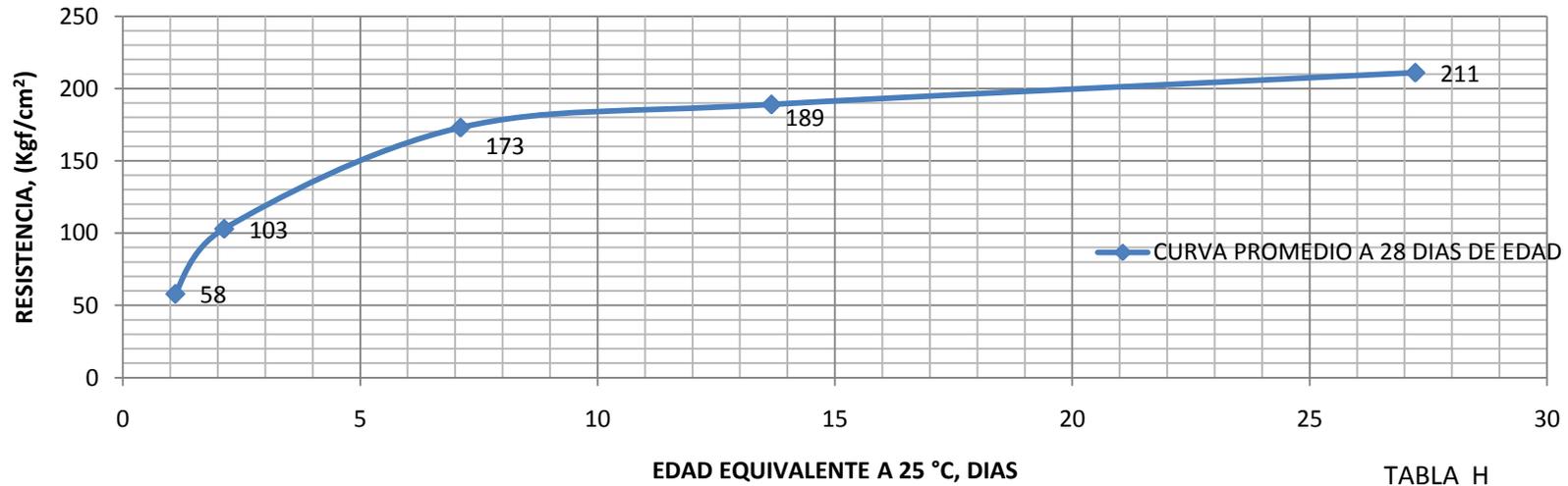
TABLA 210-2

TABLA 210-3

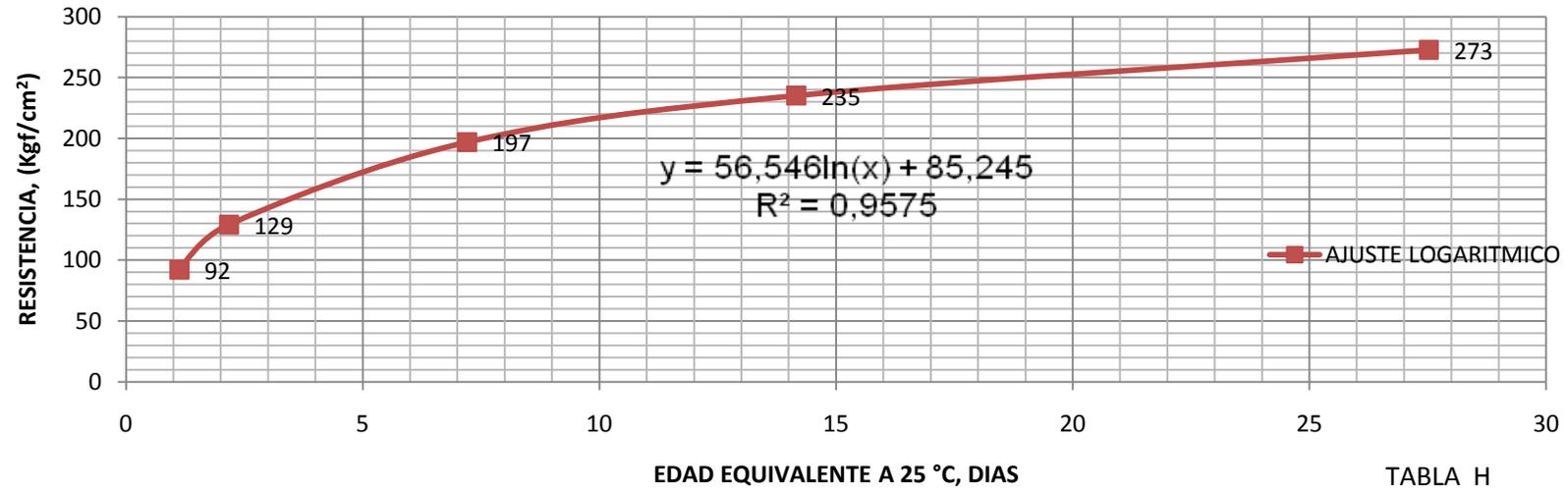
T °C DATUM	TABLA	Su	A
0	1	251,45	2,90
-10	2	250,01	2,11
10	3	255,1	4,64



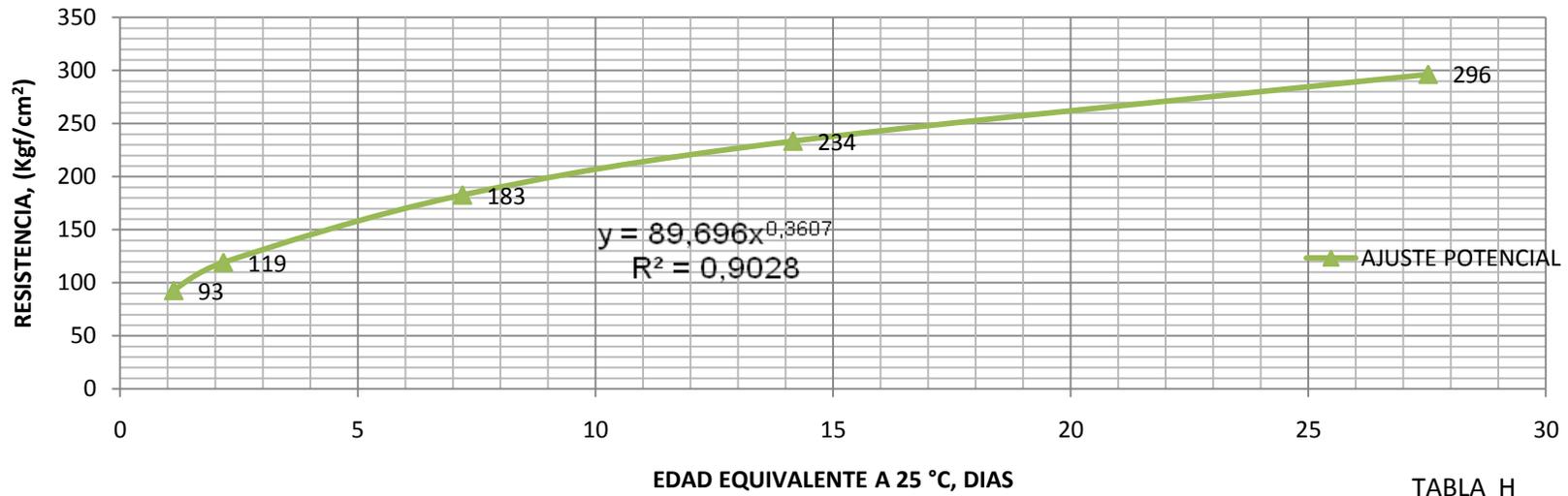
RESISTENCIA VS EDAD EQUIVALENTE



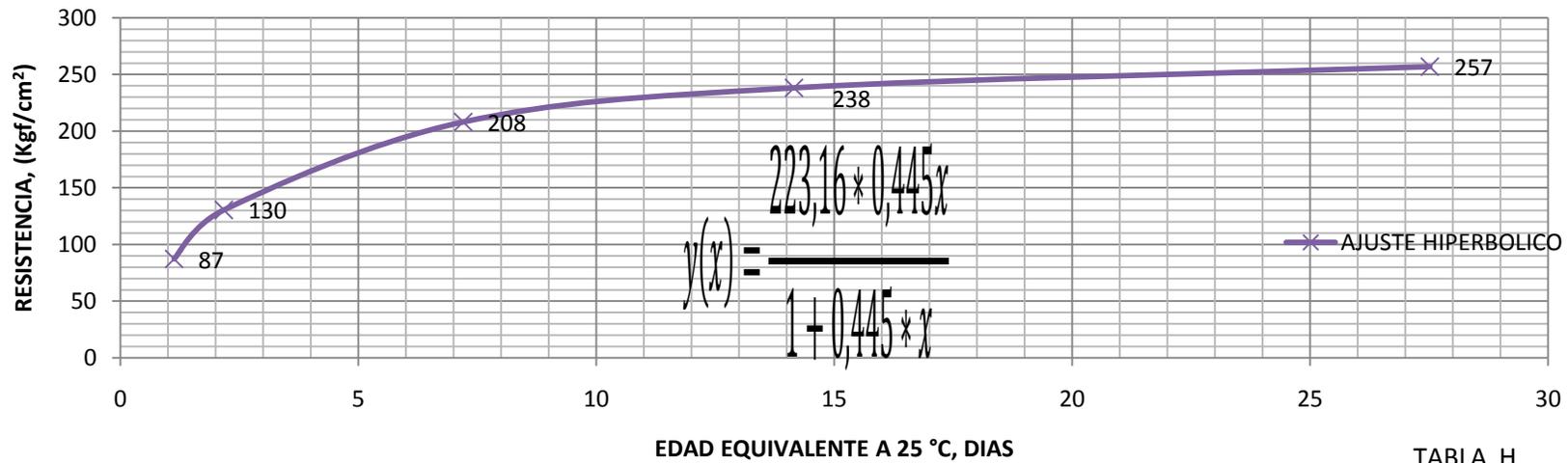
RESISTENCIA VS EDAD EQUIVALENTE



RESISTENCIA VS EDAD EQUIVALENTE



RESISTENCIA VS EDAD EQUIVALENTE



DETERMINACION DE LA FUERZA LIMITE
 PARAMETROS DE AJUSTE DE LA FUNCION HIPERBOLICA
 EDAD EQUIVALENTE

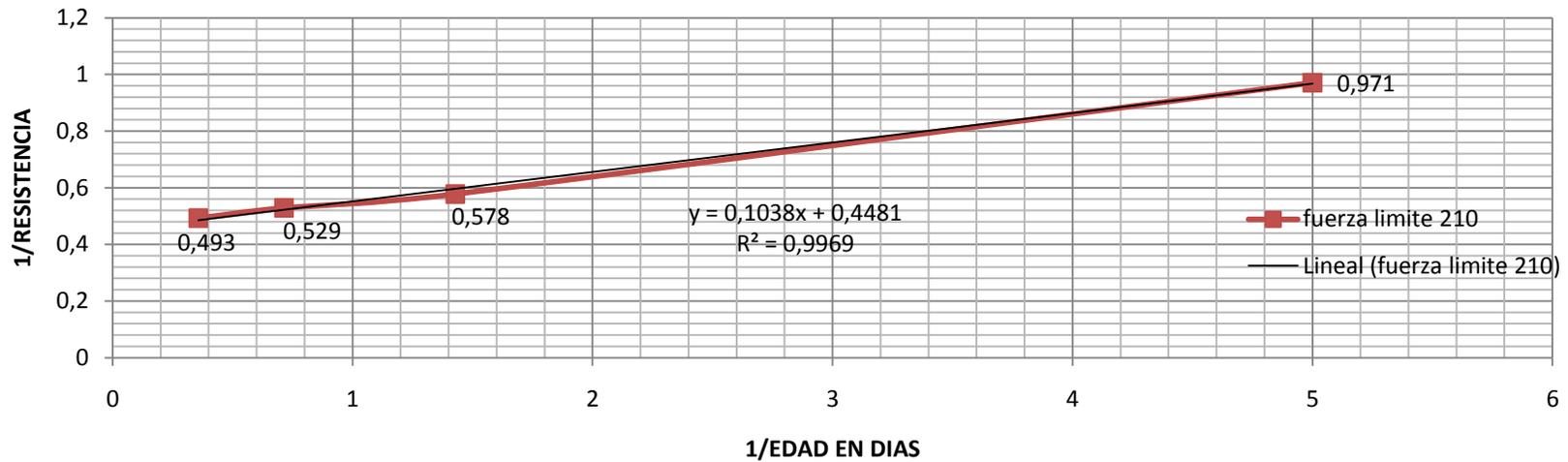
EDADES	(1/EDAD EN DIAS)x10-1	(1/RESISTENCIAS)x 10-2 <i>Kgf/cm²</i>	FUERZA LIMITATIVA <i>Kgf/cm²</i>	DESVIACION ESTANDAR  <i>Kgf/cm²</i>
28	0,357	0,493	223,16	3,36
14	0,714	0,529		
7	1,428	0,578		
2	5	0,971		

DETERMINACION DE INCREMENTO INICIALES Y CONSTANTE DE PROPORCION
 PARAMETROS DE AJUSTE DE LA FUNCION HIPERBOLICA
 EDAD EQUIVALENTE

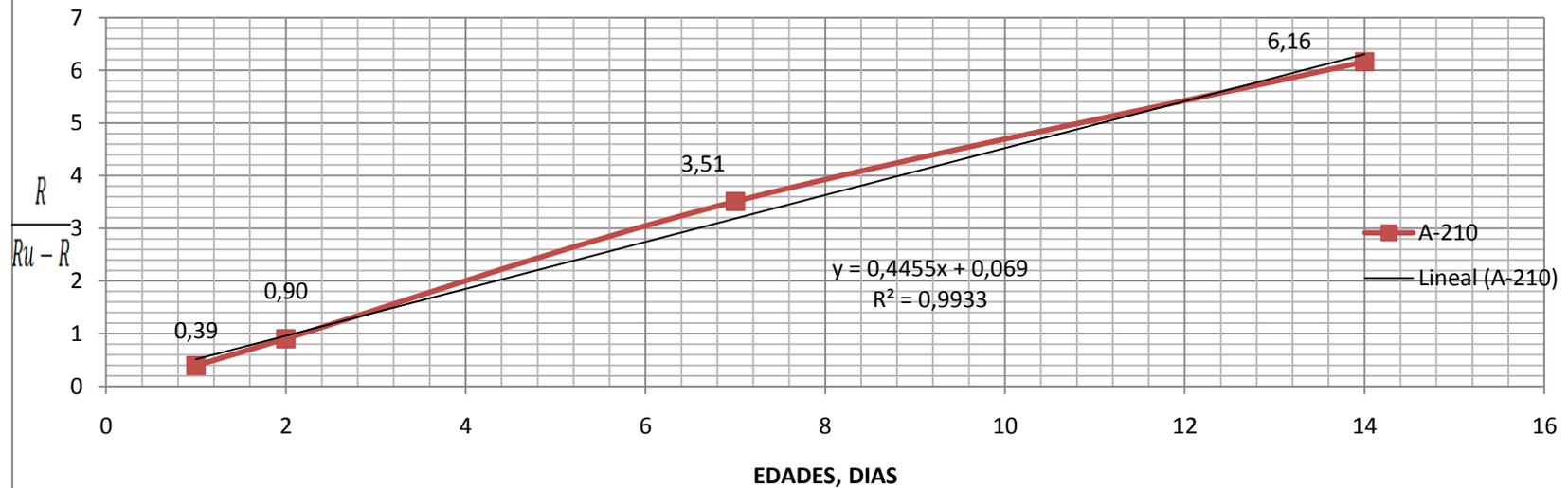
EDADES	RESISTENCIAS,210 <i>Kgf/cm²</i>	A-210
1	58	0,39
2	103	0,90
7	173	3,51
14	189	6,16

Su	k
223,16	0,445

TRANSFORMACION LINEAL



INCREMENTOS (210 Kg/cm²)



RESITENCIA A 250 *Kgf/cm²*

INDICE DE MADUREZ		
TENDENCIA DE AJUSTE	DESVIACION <i>Kgf/cm²</i>	VARIACION
LOGARITMICA A REFERENCIA 0°C	13,92	8,97
LOGARITMICA A REFERENCIA 10°C	13,90	8,96
LOGARITMICA, VENEZOLANA -10°C	13,90	8,96
POTENCIAL A REFERENCIA 0°C	26,09	16,82
POTENCIAL A REFERENCIA 10°C	26,04	16,79
POTENCIAL, VENEZOLANA -10°C	26,09	16,82
HIPERBOLICA A REFERENCIA 0°C	9,12	5,8
HIPERBOLICA A REFERENCIA 1 0°C	9,85	6,27
HIPERBOLICA, VENEZOLANA -10°C	7,65	5,06
EDAD EQUIVALENTE A TEMPERATURA ESPECIFICA		
TENDENCIA DE AJUSTE	DESVIACION <i>Kgf/cm²</i>	VARIACION
LOGARITMICA	13,99	9,02
POTENCIAL	26,05	16,01
HIPERBOLICA	6,08	3,94

INDICES DE MADUREZ

No MUESTRA	RESISTENCIA A LA ROTURA PARA LA COMPRESION				DIFERENCIAS ENTRE EDADES		DIFERENCIA AL CUADRADO	DESVIACION ESTANDAR	VARIACION
	ENSAYO				kgf/cm^2	ERROR RELATIVO			
	RESISTENCIA DE DISEÑO kgf/cm^2	INDICE DE MADUREZ (°C*DIAS)	RESISTENCIA kgf/cm^2	RESISTENCIA SEGÚN AJUSTE					
LOGARITMICAS									
TEMPERATURA DE REFERENCIA A 0°C SEGÚN CALCULO EN ASTM C1074									
1,2,3,4	250	27	79	92	12,99	14,12	168,71	13,92	8,97
5,6,7,8		53	133	129	3,77	2,92	14,22		
9,10,11,12		179	218	197	20,95	10,63	438,83		
13,14,15,16		353	241	235	5,92	2,52	35,08		
17,18,19,20		691	255	273	17,65	6,47	311,46		
TEMPERATURA DE REFERENCIA A 10°C SEGÚN CALCULO EN ASTM C1074									
1,2,3,4	250	17	79	92	12,96	14,10	168,03	13,90	8,96
5,6,7,8		33	133	129	3,76	2,91	14,13		
9,10,11,12		108	218	197	20,91	10,61	437,23		
13,14,15,16		213	241	235	5,94	2,53	35,30		
17,18,19,20		411	255	273	17,65	6,47	311,45		
TEMPERATURA DE REFERENCIA A -10°C SEGÚN NORMA VENEZOLANA 1753-2006									
1,2,3,4	250	37	79	92	12,96	14,10	168,03	13,90	8,96
5,6,7,8		73	133	129	3,76	2,91	14,13		
9,10,11,12		249	218	197	20,91	10,61	437,23		
13,14,15,16		493	241	235	5,94	2,53	35,30		
17,18,19,20		971	255	273	17,65	6,47	311,45		

No MUESTRA	RESISTENCIA A LA ROTURA PARA LA COMPRESION				DIFERENCIAS ENTRE EDADES		DIFERENCIA AL CUADRADO	DESVIACION ESTANDAR	VARIACION
	RESISTENCIA DE DISEÑO kgf / cm^2	INDICE DE MADUREZ (°C*DIAS)	RESISTENCIA kgf / cm^2	RESISTENCIA SEGÚN AJUSTE	kgf / cm^2	ERROR RELATIVO			
POTENCIALES									
TEMPERATURA DE REFERENCIA A 0°C SEGÚN CALCULO EN ASTM C1074									
1,2,3,4	250	27	79	93	14,39	15,41	206,97	26,09	16,82
5,6,7,8		53	133	119	14,24	11,99	202,72		
9,10,11,12		179	218	183	34,74	18,96	1207,02		
13,14,15,16		353	241	233	7,56	3,24	57,17		
17,18,19,20		691	255	297	41,58	14,02	1728,55		
TEMPERATURA DE REFERENCIA A 10°C SEGÚN CALCULO EN ASTM C1074									
1,2,3,4	250	17	79	93	14,00	15,05	196,00	26,04	16,79
5,6,7,8		33	133	119	14,00	11,76	196,00		
9,10,11,12		108	218	183	35,00	19,13	1225,00		
13,14,15,16		213	241	234	7,00	2,99	49,00		
17,18,19,20		411	255	297	41,52	14,00	1724,05		
TEMPERATURA DE REFERENCIA A -10°C SEGÚN NORMA VENEZOLANA 1753-2006									
1,2,3,4	250	37	79	93	14,32	15,34	205,03	26,09	16,83
5,6,7,8		73	133	119	14,32	12,06	205,01		
9,10,11,12		249	218	183	34,80	19,00	1211,33		
13,14,15,16		493	241	233	7,72	3,31	59,66		
17,18,19,20		971	255	296	41,50	14,00	1721,90		

No MUESTRA	RESISTENCIA A LA ROTURA PARA LA COMPRESION				DIFERENCIAS ENTRE EDADES		DIFERENCIA AL CUADRADO	DESVIACION ESTANDAR	VARIACION
	ENSAYO				kgf / cm^2	ERROR RELATIVO			
	RESISTENCIA DE DISEÑO kgf / cm^2	INDICE DE MADUREZ (°C*DIAS)	RESISTENCIA kgf / cm^2	RESISTENCIA SEGÚN AJUSTE					
HIPERBOLICAS									
TEMPERATURA DE REFERENCIA A 0°C SEGÚN CALCULO EN ASTM C1074									
1,2,3,4	250	27	79	81	1,63	2,02	2,64	9,12	5,80
5,6,7,8		53	133	125	7,79	6,23	60,75		
9,10,11,12		179	218	212	5,75	2,71	33,04		
13,14,15,16		353	241	248	7,24	2,92	52,44		
17,18,19,20		691	255	271	16,34	6,02	266,86		
TEMPERATURA DE REFERENCIA A 10°C SEGÚN CALCULO EN ASTM C1074									
1,2,3,4	250	17	79	80	1,26	1,57	1,60	9,85	6,27
5,6,7,8		33	133	125	8,20	6,57	67,18		
9,10,11,12		108	218	211	6,66	3,15	44,42		
13,14,15,16		213	241	249	7,74	3,11	59,95		
17,18,19,20		411	255	273	17,66	6,48	311,78		
TEMPERATURA DE REFERENCIA A -10°C SEGÚN NORMA VENEZOLANA 1753-2006									
1,2,3,4	250	37	79	81	1,94	2,40	3,76	7,65	5,06
5,6,7,8		73	133	124	8,87	7,15	78,73		
9,10,11,12		249	218	204	13,56	6,64	184,00		
13,14,15,16		493	241	236	5,02	2,13	25,19		
17,18,19,20		971	255	256	0,74	0,29	0,55		

No MUESTRA	RESISTENCIA A LA ROTURA PARA LA COMPRESION				DIFERENCIAS ENTRE EDADES		DIFERENCIA AL CUADRADO	DESVIACION ESTANDAR	VARIACION
	ENSAYO								
	RESISTENCIA DE DISEÑO kgf/cm^2	EDAD EQUIVALENTE A TEMPERATURA ESPECIFICA 25°C, (DIAS)	RESISTENCIA kgf/cm^2	RESISTENCIA SEGÚN AJUSTE	kgf/cm^2	ERROR RELATIVO			
LOGARITMICAS									
1,2,3,4	250	1,1	79	92	13,11	14,24	171,98	13,99	9,02
5,6,7,8		2,2	133	129	3,82	2,95	14,57		
9,10,11,12		7,2	218	197	21,10	10,71	445,04		
13,14,15,16		14,2	241	235	5,89	2,51	34,70		
17,18,19,20		27,5	255	273	17,69	6,49	313,00		
POTENCIALES									
1,2,3,4	250	1,1	79	93	13,83	14,90	191,35	26,05	16,81
5,6,7,8		2,2	133	119	13,80	11,57	190,37		
9,10,11,12		7,2	218	183	35,18	19,25	1237,96		
13,14,15,16		14,2	241	234	7,44	3,18	55,31		
17,18,19,20		27,5	255	296	41,44	13,98	1717,47		
HIPERBOLICAS									
1,2,3,4	250	1,1	79	87	8,30	9,51	68,93	6,08	3,94
5,6,7,8		2,2	133	130	2,51	1,92	6,29		
9,10,11,12		7,2	218	208	9,92	4,77	98,38		
13,14,15,16		14,2	241	238	2,84	1,19	8,06		
17,18,19,20		27,5	255	257	1,84	0,72	3,37		