



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
Eléctrica – Instrumentación

Detección con Microondas de Características en Mezclas que Contienen Cemento

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
Venancio Gerardo Calva Olmos

TUTOR PRINCIPAL  
Dr. José Jesús Acosta Flores. Facultad de Ingeniería.  
COMITÉ TUTOR  
Dr. Kussul Ernst Mikhailovich. ccadet  
Dr. Francisco Cervantes Pérez. ccadet

MÉXICO, D. F. Septiembre 2014

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Escalante Ramirez Boris

Secretario: Dr. Cervantes Pérez Francisco

Vocal: Dr. Acosta Flores José Jesús

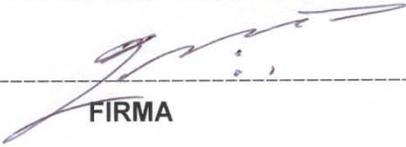
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Kussul Ernst Mikhailovich

2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Lara Rosano Felipe de Jesús

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería. Ciudad Universitaria.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Acosta Flores José Jesús

  
-----  
**FIRMA**

**Mi agradecimiento...**

Gracias a Dios por estar viviendo estos intensos y a veces complicados, pero agradables momentos del doctorado...es increíble la labor desarrollada durante estos semestres, la búsqueda incesante de información y la selección de la misma. Recuerdo en esos días la pregunta que siempre surgía "...es posible que sirva esto, o simplemente no va a ser de ayuda...", esto siempre crea un poco de incertidumbre y genera la otra pregunta obvia, no lo necesitare después?

Es necesario, casi un rito, y para mi un verdadero placer, agradecer la ayuda, el apoyo recibido durante todos estos días,...días que iniciaron en las ventanillas de servicios escolares donde se veía, muy pero muy lejano llegar a la conclusión de la investigación, sobre todo después de escuchar los relatos y anécdotas de los amigos, que nos hacían pensar en todos los escollos que había que eludir, o darle la vuelta si no es que seguir de frente y derribar todo obstáculo...llegan a mi memoria todos esos momentos en los que lo más aconsejable era dar por terminado todo y quedarnos sólo con el intento...

Gran apoyo en todo momento recibí principalmente de mi familia, mi querida familia; gracias a Dios crecí dentro de una familia tradicional mexicana, en donde lo importante es precisamente cada uno de sus integrantes, sin mayores privilegios para uno en especial, con el cumplimiento de las normas por igual para todos sin excepción; a cada uno, gracias!!!. Ustedes saben que los amo desde lo mas profundo de mi corazón, y que siempre estarán conmigo acompañándome, no importa donde esté, gracias a ustedes por apoyarme en todo momento; gracias nuevamente, por ser mi familia.

Agradezco todos los consejos el apoyo las correcciones y sugerencias que recibí de mis estimados doctores integrantes de mi jurado. Dr José Jesús Acosta Flores, inteligente siempre amable y gentil. Dr. Francisco Cervantes Pérez, mi professor, gracias por tus consejos paciencia y por tu contagiante entusiasmo. Dr. Ernst Kussul, Sabios consejos recibí de usted. Dr. Felipe Lara, gracias por su apoyo por sus consejos y por su ejemplo. Dr. Boris Escalante, gracias boris por todos los aportes a mi investigación.

Mi agradecimiento para mis compañeros de laboratorio los distinguidos maestros en ingeniería, rafael prieto alejandro padron, alberto herrera, siempre dispuestos a ayudar con toda su inteligencia y sinceridad...y claro, siempre dispuestos a jugar una buena broma.

Es cierto que es bueno pasar el tiempo con los amigos, deja mucho para la posteridad...y por ello aquí quiero tomar "prestado", parte de un correo que afortunadamente recibí, y que cito a la letra.

*"Mas vale perder el tiempo con los amigos....Que perder amigos con el tiempo....Por éste dulce motivo, pierdo el tiempo contigo....Porque NO quiero perderte con el tiempo"*

Sabias palabras que espero tener siempre presentes...

Y estoy seguro que hubo muchas amables personas que me apoyaron para lograr este tan anhelado objetivo, a todos ellos gracias, muchas gracias por todo.

Gracias a mi querida, mi muy querida Facultad de Ingeniería de mí amada Universidad Nacional Autónoma de México. Gracias por darme la oportunidad de desarrollarme académicamente de ser un, Orgulloso Universitario.

Es complicado, y a la vez me pareció muy fácil llevar el curso de todos los acontecimientos asociados con la investigación doctoral, y los problemas ajenos a ella. Ahora es diferente ver los problemas, las situaciones académicas y no académicas que van dándose desde el comienzo, los años nos enseñan a afrontar los problemas de modo diferente, intentando ver las torvas, mezquinas intenciones de quienes tercamente no ceden el paso, o de quienes por frustración egocentrismo envidia, denigran cualquier intento por salir adelante, así como les digo gracias, a quienes abiertamente me apoyaron, no quiero dejar pasar la oportunidad de decirles a todos estos, que se opusieron sin razón, a todo intento por lograr mi desarrollo, obstaculizándome en todo, negándome todo apoyo, inclusive, los apoyos institucionales que por derecho todos podemos disfrutar...a todos ellos sólo les puedo decir que a pesar de ustedes, de sus cobardes intentos por bloquear mi investigación de doctorado

*" LO LOGRE!..."*

# DetECCIÓN CON MICROONDAS DE CARACTERÍSTICAS EN MEZCLAS QUE CONTIENEN CEMENTO.

## *Resumen*

Teniendo conocimiento del problema que representa un mal fraguado en el concreto premezclado es que se dio a la tarea de plantear como proyecto doctoral una solución al problema de la calidad del concreto empezando con una vista hacia lo que se considera sólo una mezcla que contiene cemento, para de ahí partir hacia las pruebas que se tienen actualmente en el concreto para conocer de la calidad de este producto, soluciones aportadas hasta el momento y nuevas propuestas; dentro de las propuestas están las tecnologías no destructivas, pero había que solucionar los diversos problemas asociados, como lo son: ¿Qué tipo de tecnología usar? ¿Métodos de aplicación? ¿Existen sistemas de simulación del comportamiento del concreto? ¿Cómo estimar o conocer la calidad de un concreto premezclado entregado en obra? ¿Con que instrumentación se cuenta actualmente? Con base en todas estas interrogantes es que se buscaron soluciones reales posibles, que dieran un grado de certeza previo a las pruebas definitivas de los laboratorios especializados, quienes son los que tienen la última palabra.

A partir de que se realizaran pruebas de concepto con señales de microondas para la detección de humedad en algunos materiales, es que se propuso asociar esta tecnología con la estimación de humedad en mezclas que contienen cemento, para de ahí partir hacia la determinación de las características más buscadas en el concreto mediante la asociación con las lecturas de humedad; para ello se prepararon varias mezclas como el concreto y el mortero además de algunas variantes propias de la rama de la construcción para ser utilizadas en las primeras pruebas de concepto.

Básicamente se utiliza una señal de microondas arrojada sobre una mezcla de concreto (la cual fue preparada con sus componentes principales), para conocer en primera instancia los niveles de voltaje que se logran captar, y de ahí asociar dichos niveles con las condiciones de humedad que mostraron algunas muestras en pruebas previas; las mezclas tienen relaciones conocidas de agua cemento (W/c) de: 0.4; 0.7 y 1.4. La aplicación de la energía sobre la mezcla cumple con los conceptos de no destructividad, es una señal en la banda X, (8.2-12.4 GHz) con una potencia que no supera los 50 mW.

Aunado a las pruebas de laboratorio utilizando las señales de microondas en mezclas reales preparadas en el lugar, se realiza un protocolo de verificación de niveles de humedad de la mezcla mediante el proceso de pesado-secado-pesado.

Las investigaciones realizadas permitieron también el desarrollo de un modelo matemático con el que se estima los niveles de humedad que tendrá una mezcla, con base en las proporciones (aportación por peso) de los componentes que la integran; el modelo matemático propuesto es para una mezcla de cuatro componentes básicos.

En cuanto a la estadística que puede hacerse con los datos recopilados en las diferentes pruebas realizadas, al modelo matemático, a las pruebas físicas de aplicación de energía de microondas, y a las pruebas de laboratorio con las mezclas, siguiendo un proceso de pesado-secado-pesado, se tiene que: se estimaron las medias de los datos, las desviaciones estándar, y la varianza, así como la correlación entre dichos datos; entiéndase a la correlación, como a la relación que indica la fuerza, y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias.

Por definición la correlación entre variables no implica por sí misma, ninguna relación de causalidad.

Para el modelo matemático, la variable es el % de humedad que estima tendrá una muestra preparada siguiendo los pasos previamente especificados.

Para las pruebas con microondas la variable a considerar son los mV detectados, como resultantes de la aplicación de la señal.

Para las pruebas físicas con mezclas de concreto, siguiendo una cierta relación agua/cemento, es el peso que se va obteniendo, después secar y pesar la muestra, según protocolo del método de pesado-secado-pesado.

Correlación de datos.-En cuanto a los valores de las correlaciones obtenidas durante las pruebas de laboratorio de microondas, de comprobación (pesado-secado-pesado) y de simulación. Se obtuvieron valores del factor de correlación, entre: 0.87 - 0.98; las condiciones atmosféricas del medio ambiente donde se realizaron las pruebas, tuvieron un nivel de  $22^{\circ}\text{C} \pm 2$ ; con humedad de  $37\% \pm$ .

# Contenido

## CAPÍTULO

### UNO

- Introducción...**13**
- 1.1 Planteamiento...**13**
- 1.2 Instrumentación...**14**
- 1.3 Modelo matemático...**16**
- 1.4 Breve descripción de los capítulos siguientes...**21**

## CAPÍTULO

### DOS

- 2.0 Influencia de la temperatura del medio ambiente en la mezcla...**25**
- 2.1 Relación entre la resistencia a compresión del concreto y la relación agua/cemento...**27**
  - 2.1.1 Aditivos en el concreto...**30**
- 2.2 Protocolo seguido en la fabricación de pisos...**31**
- 2.3 Correlación de variables...**32**
- 2.4 Correlación entre humedad y Permitividad...**35**
- 2.5 Correlación de los niveles de humedad con los voltajes obtenidos de la señal de microondas...**37**
- 2.6 Pruebas destructivas aplicadas a muestras de concreto...**40**
  - a) Técnica del revenimiento...**40**
  - b) Muestreo del producto vaciado en el lugar de construcción.

- Resistencia a compresión...**41**
- c) Pulso ultrasónico...**41**
- d) Medidores de Humedad comerciales disponibles...**46**
- 2.7 Medidores de humedad / Aplican una corriente al concreto maduro...**47**
- 2.8 Uso del infrarrojo en la determinación del nivel de humedad de una muestra...**49**
- 2.9 Mecanismo de funcionamiento entre la señal de microondas aplicada, y la humedad asociada a la mezcla de concreto fresco...**50**

## CAPÍTULO

### TRES

- 3.0 Microondas...**57**
- 3.1 Aplicación de las microondas...**57**
- 3.2 Tecnología no destructiva...**58**
- 3.3 Radiación...**59**
- 3.4 Coeficiente de transmisión...**60**
- 3.5 Modelo de pérdida de energía de microondas por agua...**62**
- 3.6 Antenas/sensores...**66**

## CAPÍTULO

### CUATRO

- 4.0 Tecnicas para obtener un estimado de la resistencia a compresión del concreto...**69**
- 4.1 Determinación de la resistencia a compresión del concreto mediante rompimiento de la muestra...**70**
- 4.2 Utilización de un Pulso ultrasónico para estimar la calidad del

- concreto...**76**
- 4.3 Aplicación de señales de microondas con fines no destructivos en la determinación del nivel de humedad en concreto fresco...**80**
- 4.4 Solución Propuesta y Desarrollada...**84**
- 4.4.1 Selección de la frecuencia de funcionamiento del equipo de microondas...**85**
- 4.4.2 Modo de aplicación de la señal de microondas al concreto fresco...**86**
- 4.5 Método propuesto para la aplicación de las señales de microondas sobre el concreto fresco...**90**
- 4.5.1 Preparación / Proporciones de las mezclas para obtener concreto...**92**
- 4.5.2 Condiciones ambientales durante las pruebas...**94**
- 4.5.3 Primeras pruebas sobre materiales...**94**
- 4.5.4 Prueba a la arena utilizada en mezclas de concreto...**96**
- 4.5.5 Primeras pruebas a mezclas conteniendo cemento...**97**
- 4.6 Desarrollo de un modelo matemático para estimar el comportamiento de una mezcla de concreto respecto a sus niveles de humedad...**100**
- 4.6.1 Antecedentes / Método de maduración...**102**
- 4.6.2 Modelo matemático para el fraguado natural del concreto premezclado...**106**
- 4.6.3 Primer modelo propuesto para la determinación de la humedad...**109**
- 4.6.4 Simulación del modelo matemático...**112**
- 4.6.5 Comprobación de los resultados generados por el modelo sugerido...**114**
- 4.6.6 Relación entre la resistencia a compresión y el nivel de humedad inicial de la mezcla...**118**

- 4.6.7 Pruebas de Laboratorio realizadas con instrumentación de microondas en simultaneidad, con las Pruebas de laboratorio siguiendo el proceso de Pesado-Secado-Pesado para realizar una correlación de datos...**119**
- 4.6.7.1 Metodología del proceso...**119**
- 4.6.7.2 Protocolo seguido para las pruebas utilizando microondas...**122**
- 4.6.7.3 Determinación de la humedad de las muestras siguiendo el proceso de pesado secado pesado...**123**
- 4.6.7.4 Mediciones obtenidas con el sistema de microondas...**124**
- 4.7 Correlación de los Datos Generados Durante los Procesos...**125**
- 4.7.1 Correlación de datos. Microondas / Proceso de Pesado Secado Pesado...**127**
- 4.7.2 Correlación de datos. Modelo Matemático / Proceso de Pesado Secado Pesado...**134**
- 4.7.3 Escala de humedad para concreto fresco...**138**
- 4.7.4 Ventajas del método aquí propuesto...**139**

## CAPÍTULO

## CINCO

Conclusiones y recomendaciones...**140**

Referencias...**142**

Bibliografía...**149**

## **Anexos**

### Anexo 1

Método de maduración/modelo matemático...**151**

### Anexo 2

Desarrollo tecnológico/instrumentación para la detección de humedad...**153**

### Anexo 3

Método de pesado-secado-pesado...**157**

### Anexo 4

Concreto...**158**

Introducción / breve historia del concreto.

### Anexo 5

Aplicación de los sistemas de microondas para el desarrollo de tecnología No destructiva...**168**

---

# CAPÍTULO UNO

## **Presentación General del Proyecto**

El problema que desencadenó la investigación y que llevó al desarrollo de un modelo matemático de una instrumentación y de una técnica de aplicación, fueron los diversos cuestionamientos que se plantearon en torno a la calidad del concreto premezclado, preguntas que llevan a buscar las respuestas que puedan asegurar o al menos dar indicios de la calidad de un producto en éste caso del concreto; buscar respuestas que lleguen a resultados concisos viables y que no queden sólo en el plano imaginario.

Es cierto que actualmente se cuenta con pruebas de laboratorio para comprobar la calidad del concreto, pruebas que nos dan un buen indicador de la resistencia a compresión del concreto, aunque los resultados que de ellas se obtienen se pueden conocer pasado un periodo no menor a los usuales 28 días; según el protocolo que tengan. Estas son las pruebas tradicionales de resistencia a compresión, las que se realizan sobre muestras del concreto después de pasar por un protocolo de fraguado.

Existen también algunas pruebas que se pueden catalogar de campo y dependerá del muestreo que se haga del mismo concreto el resultado que arrojen, por ello es conveniente aumentar el número de herramientas de apoyo, que alerten acerca de la calidad de un concreto, esto es en beneficio de quienes construyen y habitamos edificios que utilizan concreto.

## Introducción

El objetivo principal del desarrollo de esta investigación es el de estimar con cierta aproximación el nivel de humedad que tiene una mezcla de concreto al momento de ser vertida en el lugar de trabajo, mediante la detección de un nivel de voltaje (Poe, 1971) más específicamente, aplicando y recuperando energía de microondas al concreto fresco, y a partir de este dato, derivar las demás características del concreto; se estaría considerando que la mezcla cuenta con sólo los elementos básicos para su formación, no se está incluyendo la aportación de ningún tipo de aditivo (Calva, 2007).

Se plantea estimar el nivel de humedad de una mezcla de concreto fresco, porque se requiere tener un nivel de calidad en el concreto que se entrega, y un modo de buscar la calidad en el concreto es controlando que el nivel de agua agregado a la mezcla, sea el propuesto en el diseño de la mezcla; a lo largo de esta obra se mencionara constantemente que la humedad que presenta la mezcla de concreto fresco está relacionada con la resistencia a compresión que finalmente desarrolla el concreto (Abrams Duff. 1918) además, de las otras características que tienen que ver con la trabajabilidad de la mezcla y que, manteniendo un control sobre la humedad de la mezcla se puede mantener una calidad sobre el producto entregado en la obra.

### 1.1 Planteamiento.

De manera específica en esta investigación:

- a) Se plantea conocer el nivel de humedad en el concreto fresco, porque se relaciona con al menos la resistencia a compresión que tendrá finalmente el concreto.
- b) El nivel de humedad que tiene el concreto influye en la llamada trabajabilidad del concreto fresco esto es, que tan manejable le resulta al operario de la mezcla trabajar con ella.
- c) Además, la humedad de la mezcla tiene que ver con el revenimiento que presentan las muestras tomadas del concreto en el lugar del vaciado.
- d) La estimación de la humedad en el concreto fresco, se hace directamente sobre la mezcla recién vertida con energía de microondas, en el lugar de la obra siguiendo un determinado protocolo de supervisión, lo importante es que, para la estimación de la humedad no se muestrea la mezcla.

e) Con el control de la calidad (con base en la humedad) de la mezcla de concreto fresco con microondas no se contamina, ni se mutila la mezcla, esta tecnología es completamente no destructiva además, la aplicación de las microondas sobre la mezcla de concreto no altera las características inherentes de la mezcla.

## 1.2 Instrumentación.

Estimar la calidad del concreto mediante su resistencia a compresión es un tema que siempre ha llamado la atención; se ha tratado de atender y/o predecir mediante diferentes técnicas entre las que se cuenta por supuesto la aplicación de energía de microondas (como aquí se plantea) sin embargo se aclara, que lo que se ha hecho hasta ahora, han sido aplicaciones de energía de microondas en barrido de frecuencia y, a través de la losa de concreto (concreto maduro, mas de 28 días) y en ocasiones a través de muestras de concreto tomadas directamente de la obra con lo que, se contradice la declaración de no destructividad que se ha venido utilizando (porque se estaría muestreando la mezcla); se hace énfasis en el hecho de que tradicionalmente lo que se analiza es concreto ya maduro, con al menos 28 días de fraguado y que se está analizando en un laboratorio dedicado a tal fin; el fraguado en el laboratorio se da bajo condiciones muy detalladas siguiendo un protocolo bien definido para tales pruebas.

Algunas de la pruebas hechas sobre concreto se hacen siguiendo un protocolo que implica concreto ya maduro (fraguado completo) y que en todo caso es una prueba que se incluye junto con las pruebas de revenimiento en las que se tiene forzosamente que muestrear.

Ahora bien, es posible citar los trabajos de expertos en el tema, que han realizado pruebas que los sitúan en el estado del arte como pueden ser personas de la talla de *Ganchev* (Ganchev, 1992) de *Zoughi* (Zoughi R, 1999) o el mismo *Carino* (Carino, 2001), sólo por mencionar algunos de los que se enlistan en las referencias de esta obra, lo que motiva a sugerir una consulta del vasto trabajo que han desarrollado en el área; ellos desarrollan sus investigaciones en varias bandas de frecuencia en las que incluyen por supuesto la banda X, sin embargo, son pruebas en las que (como ya se mencionó) realizan un barrido en frecuencia<sup>1</sup> de toda la banda ya sea por partes o sólo alguna sección de la banda según se lo permita su equipo de fabrica, generalmente utilizan un VNA (*vector network analyzer*) de marca reconocida.

Estos aparatos dan directamente la amplitud y ángulo de fase (mediciones complejas) pudiendo con ello obtener los parámetros *S*.

---

<sup>1</sup> En telecomunicaciones se le conoce como barrido en frecuencia, al proceso de iniciar con la frecuencia de un extremo de la banda en cuestión hasta llegar al otro extremo, con incrementos en frecuencia perfectamente bien definidos.

Los parámetros S se definen en función de las ondas incidente y reflejada en vez de voltaje y corriente. Se pueden deducir del circuito de la red, si se le conoce o medirse directamente con el Analizador Vectorial de Redes, o por cualquier método que permita separar la onda incidente de la reflejada y medir a cada una, y obtener una primera expresión que da la relación entre ambas ondas

$$S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+} \quad (1.1)$$

$V_i^-$  Onda Reflejada

$V_j^+$  Onda Incidente

Con los parametros S, también se puede determinar la permitividad relativa compleja, la cual es fácilmente asociada con las características físicas de cualquier elemento o compuesto y de este modo estimar si no conocer, las condiciones físicas en las que se encuentra el material, en el momento de ser analizado.

Estos equipos son capaces de desempeñarse en frecuencias que van de los 45 MHz hasta los 110GHz. (P-N design. 2009) Son equipos caros, grandes, muy sensibles pero muy versátiles. Son capaces de utilizarse para medir impedancia, VSWR<sup>2</sup>, pérdidas, ganancia, aislamiento ya sea en redes de dos puertos o en las multipuerto.

Ahora bien, aquí se plantea también el uso de señales de microondas aplicadas a concreto, pero con la diferencia de que se plantea, aplicándose sobre concreto fresco; concreto recién vertido y en el lugar de la obra, sin llevar a cabo un muestreo, sin tener que esperar el tiempo de fraguado y sin tener que seguir un protocolo establecido para el proceso de fraguado; esta es una aplicación en la que se sigue sólo la técnica de reflexión de la energía de microondas. De esta forma no hay que esperar los acostumbrados 28 días, como lo es para las pruebas de rompimiento a compresión.

Lo aquí planteado y desarrollado se hace sólo con la reflexión de las señales a una única frecuencia y en una sola banda, la banda X, no se está llevando a cabo ningún barrido en frecuencia, es una sola y única frecuencia de operación del equipo propuesto y desarrollado. Además, su tecnología de operación se basa sólo en el manejo de la amplitud de la señal recabada, (todo se realiza en modo escalar) para asociarla después con las pruebas de rompimiento a compresión conocidas y realizadas previamente, en las que se tiene una cierta relación agua cemento (W/c; conocida de antemano), perfectamente definida por pruebas realizadas en laboratorios especializados.

<sup>2</sup> Relación de voltaje de onda estacionaria

(Lo anterior se hace de esta forma, debido a que es caro y problemático, generar toda una gama de frecuencias, aún segmentado las bandas para generar partes de frecuencia de las microondas. Además, resulta innecesario ya que se encontró en esta investigación, que es posible asociar la deshidratación de una mezcla de concreto, con la amplitud de la onda reflejada en el concreto fresco siendo esta, una señal a una única frecuencia.

El hacer uso sólo de la amplitud de la señal reflejada se simplifica también la instrumentación asociada con la captura y almacenamiento del nivel de amplitud de la señal reflejada.)

Todos estos conceptos se volverán a tratar a lo largo de esta obra.

Se realiza un análisis escalar del comportamiento de la mezcla, y con ella es posible obtener valores fácilmente asociables con los valores de las gráficas de las pruebas a rompimiento.

Por estar manejando sólo la amplitud de las señales de microondas el equipo reduce su costo, su peso sus dimensiones y su grado de complejidad y de sensibilidad, esto debido a que es un equipo dedicado para una única aplicación.

### **1.3 Modelo matemático.**

En cuanto al modelo matemático se refiere, se hizo una exhaustiva búsqueda para tratar de hallar un modelo matemático que nos guiara y orientara hacia el tipo de respuesta que se debería esperar, acerca del comportamiento del concreto en su estado fresco; para empezar sólo se encontró un modelo matemático propuesto entre los años cuarentas y cincuentas (Carino 2001) (Affection 2001) pero no se popularizó, sino hasta que en los Estados Unidos, se suscitó un colapso en una losa y a consecuencia de ese hecho, es que se pidió a la entonces NBS (*National Bureau of Standards*) que propusiese un método para estimar el nivel de madurez, del concreto de una losa. Fue entonces cuando ésta sugirió utilizar un método que terminó conociéndose como el *método de maduración* (Anexo 1).

El método de maduración expresa gráficamente, el comportamiento que va presentando una losa de concreto premezclado, en términos de grado de resistencia a compresión contra tiempo y temperatura.

En un principio se pensó en tomar dicho modelo, para tratar de integrarlo a las condiciones de operación de la tecnología de microondas propuesta; lo anterior se dió debido a que en un trabajo de investigación doctoral, específicamente en el trabajo desarrollado por Mejía Dorantes Lucia (Mejía 2009), se toma precisamente el modelo,

método de maduración, como modelo matemático de apoyo para desarrollar su investigación, referente a la resistencia temprana del concreto (hormigón); sin embargo, se pensó que llevar a cabo la misma acción de tomar un modelo desarrollado, y probado, con base en tiempo-temperaturas, para aplicarlo a ésta investigación, no era precisamente lo más adecuado. Sobre todo debido a que en el modelo matemático del método de maduración, se tiene mucha influencia de las lecturas que hayan sido tomadas con anterioridad, lo que implica una base de datos acorde con el lugar y el modelo mismo, y dicha base deberá estar disponible para cada región, y por época del año en la que se hace la aplicación del modelo lo cual resulta un poco complicado de lograr.

Tomando en cuenta dichas consideraciones, es que se pensó en la relación que tiene la cantidad de agua agregada en una mezcla de concreto (relación agua/cemento), y la resistencia a compresión que va desarrollando el concreto en su proceso de fraguado, hasta llegar a un concreto maduro; por ello, mejor se decidió por un modelo que tomara en consideración la masa de los elementos implicados en una mezcla de concreto, razón por la cual se partió de una expresión de relación de pesos. En ella se determina la cantidad de humedad en términos de una relación de peso del agua agregada, al peso total exhibido por la mezcla obtenida, y que puede ser expresada en por ciento.

Resultó además que en la industria y en algunos procesos de laboratorio, la mejor manera de conocer la humedad contenida en un compuesto es determinando su peso inicial y final; se encontró también que en ciertos compuestos su comportamiento dieléctrico al aplicarles una señal de microondas, por arriba de los 8 GHz, muestra que la calibración es independiente de su densidad por lo que esta, puede realizarse experimentalmente, lo que posibilita obtener un estimado de humedad utilizando microondas, a una sola frecuencia y probando una señal en vacío (sin interferencia de ninguna especie obteniendo con ello un máximo de la señal que se puede transmitir), y con una muestra de material, para obtener un posible mínimo de señal recabada (o bloqueo máximo hasta obtener un cero, o casi cero de señal recibida) (Meyer. 1980).

De aquí que lo más sensato para obtener un modelo matemático que relaciona la cantidad de agua en un compuesto, sea a partir de una expresión que relaciona precisamente la masa de agua contenida en una mezcla, y la masa total del compuesto; para saber que proporción guardan.

Dicha relación se expresa como:

$$h = m_{H_2O} / (m_a + m_{H_2O}) \quad (1.2)$$

m---masa del agua.

m<sub>a</sub>--- masa del material sin agua

Ahora, lo restante consistió en adaptar y dar movimiento a dicha expresión. Ec 1.2. (Law 2005), para que fuera acorde con el comportamiento del fraguado de una mezcla. La cual dependerá de sus compuestos, y de la relación que guardan estos entre sí.

Inicialmente se probó con los datos que poco a poco se iban obteniendo, hasta ajustar el modelo al comportamiento conocido de una mezcla; posteriormente se realizó la simulación del modelo, agregando datos nuevos (variando sus proporciones y sus relaciones), y se observó el tipo de respuesta y su forma, obteniéndose como resultado una grafica muy cercana a la de los datos de comprobación, que previamente se obtuvieron al ir pesando secando y volviendo a pesar, las pequeñas porciones de mezcla que se secaron a intervalos fijos.

Ahora bien, la intención es tener una instrumentación que permita aplicar, y recuperar energías de microondas a una mezcla de concreto fresco, para que con ello, nos de un indicio de las condiciones en las que se encuentra en ese momento; para ello se inició precisamente con la selección de una banda de frecuencia, que permitiera ser utilizada en un medio como el agua, el cemento y agregados (arena y grava), lo cual centró la idea sobre las frecuencias de la banda X. Lo anterior en parte por las experiencias y sugerencias establecidas en algunas de las referencias, que se presentan en esta obra (Meyer 1980).

Una de las limitantes era precisamente el no tener un equipo de las dimensiones del costo y peso de un VNA<sup>3</sup>, que es lo que comúnmente se utiliza, según el estado del arte; de aquí que, tomando en consideración los datos establecidos por los colegas que están a la vanguardia en el estado del arte, es que se optó por un primer recorrido (un barrido, limitado) en frecuencia, que abarcara la banda de un extremo al otro, encontrando que una de las frecuencias (Cercana a los 10 GHz), tenía una respuesta adecuada al interés de ésta investigación; por lo que se decidió enfocar los esfuerzos en frecuencias alrededor de los 10GHz.

Habiendo obtenido éxito en las primeras pruebas de concepto, con algunos de los elementos que integran la mezcla, se dio inicio a las pruebas, sólo con los agregados, y posteriormente se fue pasando a algunas versiones que utilizan cemento (Mortero, Lechada). Lo que siguió fue una serie de pruebas, en las que intencionalmente se modificaba principalmente la relación agua cemento, para ver físicamente los resultados; posteriormente se fueron obteniendo los resultados de las simulaciones del modelo matemático, utilizando los datos de proporción de las mezclas, para compararlos entre sí; al mismo tiempo con el método de pesado-secado-pesado, se pudo comprobar lo cercano que es el modelo matemático aquí propuesto.

---

<sup>3</sup> Por sus siglas en ingles analizador de redes vectorial

El método de pesado-secado-pesado, fue el medio de comprobación, o certificación de los resultados que se iban obteniendo.

Al no tener acceso a un VNA que proporcionara el ángulo de las mediciones, fue que finalmente se decidió por un proceso puramente escalar, de aquí que, se procedió a verificar las condiciones en las que se recuperaba la amplitud de la señal, y de aquí surgió la expresión que a lo largo de esta obra se comenta: **“...se busca estimar que le hace el material a las señales de microondas y no, que le hacen las microondas al material...”**

Teniendo una frecuencia de operación, restaba sólo mantener la potencia del generador en un margen que no superara los 50mW, lo cual se logró con facilidad. Procediendo entonces al diseño de todas las redes de electrónica que rodean al oscilador principal, así como a los sensores de señal, y a los modos de captura, recolección, proceso y almacenamiento de datos.

El diseño del equipo electrónico (la Instrumentación Electrónica) asociado al sistema de detección, comprendió también a los prototipos (modelos) de prueba, como se le puede considerar a un reflectómetro, que se utilizó principalmente para conocer los niveles de voltaje que alcanzó la señal recabada por el sensor; además se hizo el diseño y armado de bases y carcasas que contienen a los dispositivos.

El diseño de los equipos se puede apreciar en el anexo 2.

A lo largo de ésta obra se hace énfasis en las razones por las cuales, se estudia la relación agua/cemento (W/c) en una mezcla de concreto fresco (Ghedira 1981); en específico, la relación de resistencia a compresión con la relación agua cemento. Se propuso para lograr tener una herramienta que brindara un modo de estimar, con antelación la resistencia a compresión; la resistencia que finalmente adquiere, una vez completado el proceso conocido de, fraguado.

De aquí que el objetivo principal de obtener un método de estimación, se vea enriquecido ahora con una técnica, y un sistema, que permite estimar la relación agua/cemento de una mezcla de concreto fresco (al momento de ser vertida la mezcla). Tener la posibilidad de estimar desde un principio, la resistencia a compresión que va a tener la estructura (losa piso columna), después de haber pasado los días de fraguado del concreto (Sasan, 1990), es una herramienta muy valiosa, con la cual se posibilita el control de la calidad del concreto entregado en una obra.

En cuanto a la participación de los agregados en la mezcla, se puede eliminar cualquier injerencia mayor que pudieran tener los agregados duros y suaves, cuando se tamizan, para eliminar la basura que pudieran tener. Además de realizar una eliminación de agregados duros que a simple vista, resulten de dimensiones muy superiores al común. En este rubro se puede decir que sólo faltó conocer de la fuente de extracción de los agregados (suaves y duros), para completar la información de los elementos que integran el concreto.

En cuanto al cemento, se pueden observar ciertas reglas de control de calidad, las que se refieren a no exponer demasiado tiempo al medio ambiente al cemento en su calidad de polvo, ni dejarlo absorber humedad, utilizar lo necesario y cerrar el bulto de cemento (esto claro cuando se utiliza para obras menores).

Se anota también que el hecho de proponer la utilización de señales generadas en las frecuencias de las microondas, para determinar el nivel de humedad que tiene una mezcla de concreto, y luego relacionarlas con la resistencia a compresión, no implica que se hará una descripción detallada de los principios de funcionamiento y comportamiento físico de tales señales de microondas, simplemente se estará haciendo uso de alguna de las características físicas que presentan las señales de microondas, cuando son puestas a interactuar con ciertos medios, medios de los cuales, queremos saber sus características; saber en qué condiciones físicas se encuentran, esto a través de conocer el resultado de hacer interactuar a la señal de microondas, con ese medio (muestra) y asociar así, las características de la señal con las condiciones en las que en ese momento se encuentra la muestra de interés, obteniendo así, una correlación directa; una correlación directa indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias (Gilbert, 1981). Para éste caso en específico, como se ha venido mencionando reiteradamente la Humedad del concreto y la señal de microondas.

Entiendo que las señales de microondas le resulten de sumo interés para algunas personas sensibles al tema, por ello invito, a quienes deseen profundizar en el maravilloso mundo de las microondas, lo haga, porque estoy seguro que sus aportaciones revolucionaran el mundo académico, de eso estoy seguro.

## **1.4 Breve descripción de los capítulos siguientes.**

## Capítulo dos

### Estudios relacionados con la estimación de humedad del concreto.

Aquí se trata con la brevedad requerida, los temas a fines a ésta obra, se consideran las técnicas y tecnologías utilizadas para determinar algunas características del concreto, en su mayoría lo que hacen es tratar al concreto, conocer del concreto, cuando éste ya está en su fase de concreto maduro, ya presenta ciertas características de fraguado terminado; los datos que obtiene tanto en temperatura humedad y transmitancia lo hacen sobre el concreto solido con una resistencia a compresión que alcanza de 60 a 80% de su valor final.

## Capítulo tres

### Aplicación de señales de Microondas.

En ésta sección se hace una presentación de los sistemas de microondas sus usos y las razones por las que se utiliza este tipo de señales que tiene una fuerte aplicación en los sistemas de telecomunicaciones, pero que recientemente se ha ido proyectando hacia campos antes no pensados. En ésta sección se comparan algunas aplicaciones, y se dan algunas razones por las cuales un sistema funciona para calentar comida, y otro para comunicarnos por el mundo a través de nuestros teléfonos celulares, aún cuando las frecuencias sean casi las mismas, siendo que solo alteramos los protocolos de comunicación y por supuesto, la potencia; se hace énfasis en que, cuando se trata de señales de microondas o aplicaciones de señales de microondas, se debe tener muy en claro, cuál es la frecuencia a la que se pretende trabajar las señales, y cuál será la potencia que se estará asignando a la aplicación. Se desarrolla un modelo matemático que relaciona la actividad de las microondas y el agua. Este modelo da indicios del comportamiento que tienen cuando interactúan. Sin embargo, no considera el comportamiento de al menos los otros tres elementos, que integran una mezcla de concreto. Lo cual deja mucho por cubrir, ya que la mezcla de concreto necesita de la participación de los demás elementos, no es posible aislar la interacción del agua con las microondas, y tratar por separado a los demás elementos.

## Capítulo Cuatro

## Estimacion de la Humedad por Medios No Destructivos

En éste capítulo se inicia con la presentación de estudios que relacionan a la humedad con la resistencia a compresión. Son dos técnicas enfocadas al estudio de la humedad del concreto cuando está en su fase avanzada de fraguado o totalmente fraguado, la primera técnica es la tradicional, la que sigue el protocolo de laboratorio de muestreo y destrucción de las muestras adquiridas y secadas en los 28 días posteriores a la fabricación del concreto.

La segunda se refiere al uso de un método de medición y que utiliza un pulso ultrasónico dando por hecho que con base en la velocidad de propagación del pulso se puede sugerir un cierto estado de calidad del cemento.

Lo importante de estas dos técnicas vistas aquí, es que en ambas al final se llega a la misma conclusión referente a que la resistencia a compresión de un concreto, se basa principalmente en su relación agua/cemento.

En éste capítulo se consideran los resultados obtenidos en los trabajos realizados por colegas investigadores de la Universidad de Mérida Yucatán México; en su trabajo hacen una descripción de los métodos seguidos y de las pruebas realizadas para poder llegar a la conclusión de que la resistencia a la compresión del concreto está ligada a la relación agua/cemento. Lo cual implica o justifica el que sea conveniente mantener un nivel de humedad de la mezcla; humedad que se supone debe tener el concreto desde el diseño de la mezcla y que por ello no debe ser alterada intencionalmente o no.

Se hace énfasis en la investigación debido a que da sustento a la hipótesis que se planteo en un principio acerca de la importancia que tiene la relación agua/cemento; y de cómo afecta resultados tan importantes como la resistencia a compresión que finalmente tiene el concreto. Sus trabajos fueron publicados en el año 2008.

También se presenta una aplicación que hace uso de los pulsos ultrasónicos para determinar mediante una expresión matemática las condiciones de resistencia a compresión que deberá tener el concreto cuando haya alcanzado su madurez; y se menciona por el hecho de llegar a la conveniente conclusión de que la resistencia a compresión de un concreto depende mayormente de la cantidad de agua que se agregue a la mezcla.

Por supuesto que en ésta sección se tienen los experimentos realizados con la instrumentación de microondas propuesta, el método a seguir para la aplicación de la energía de microondas, el modelo matemático propuesto para conocer cómo es que se va deshidratando la mezcla de concreto para ir apareciendo la resistencia final del mismo. En

esta sección se tienen las diferentes correlaciones hechas entre el método de pesado-secado-pesado y los resultados obtenidos con el equipo de microondas; los resultados de la correlaciones entre el modelo matemático y el método de pesado-secado-pesado. Para al final lograr una vinculación entre los valores de voltaje obtenidos con el equipo de microondas después de aplicar la energía a la mezcla y los resultados que se obtienen con el rompimiento de muestras previas de las que ya se conocen sus datos de porcentajes de componentes.

## Capítulo Cinco

### Conclusiones y recomendaciones.

Se presentan las conclusiones a las que se llega después de las diferentes pruebas de laboratorio y de escritorio y de validación, además se hacen las debidas recomendaciones para su aplicación y futuras áreas de uso en las que es posible encontrar utilidad a los sistemas de microondas.

## CAPÍTULO

## DOS

### **Estudios relacionados con la estimación de la humedad en el concreto.**

Como en todos los procesos industriales la preparación del concreto para la industria de la construcción debe contar con diferentes controles de calidad, controles de calidad que muestrean el concreto entregado en la obra; dentro de los controles de calidad se incluye a la experiencia, como una herramienta más para conocer de la calidad del concreto; se cuenta con la experiencia de los maestros de la construcción para presumir la condición del concreto, pero en ocasiones sólo se cuenta con esa experiencia de quien está encargado de la obra y a su juicio decide, si es o no un concreto adecuado para la mencionada obra. Lo anterior deja un margen muy amplio para que se den fallas en el momento de exigir del concreto, una cierta resistencia.

Aún cuando lo principal en un concreto sea su resistencia a compresión, queda también el tratar de asegurar una durabilidad y resistencia a intemperie (ataque de los elementos), y aprovechar al máximo sus ventajas de economía durabilidad eficiencia y estética.

La resistencia a compresión del concreto es un excelente indicador de la calidad del mismo, mediante este dato es posible mantener una certeza en cuanto a que la obra no va a resentir visiblemente el paso del tiempo, que no va a tener problemas a los cuantos años de finalizada la obra.

Las pruebas hechas en los laboratorios sobre muestras tomadas del concreto utilizado en la obra, certifican la calidad del mismo, estas pruebas además de las realizadas en el sitio de la construcción permiten tener confianza en la fortaleza que el concreto le da a la obra.

La utilización de muestras (muestreo en sitio) es una técnica tradicional y muy confiable de control de calidad del concreto, en ella se ven involucrados laboratorios especialmente dedicados a realizar pruebas sobre las muestra extraídas de la obra; las pruebas se realizan siguiendo un protocolo de control de calidad para asegurar que el

concreto suministrado en la obra cumpla con los requisitos mínimos de resistencia a compresión.

Este concreto entregado bajo ciertas normas de calidad y cuidados en el diseño de la mezcla y con temperaturas habituales de la época, no debe exceder el tiempo normal desde que se inicio su mezcla y para cuando es descargado, esto es, no deberá exceder de 1.5 horas entre que inicia la mezcla y que entra en reposo para iniciar el fraguado. Por supuesto que si la temperatura aumenta deberá de reducirse el tiempo máximo. Como dato que arroja la experiencia de quienes están en el negocio, la revoladora debe ser descargada antes de 300 revoluciones.

Un dato adicional que siempre se aconseja por parte de quienes diseñan la mezcla de concreto es, evitar el retemperado; no adicionar agua a la mezcla de concreto (que va a ser entregada) para supuestamente intentar, compensar la pérdida por asentamiento que resulta de la demora en la entrega; no debe ser permitido.

## **2.0 Influencia de la temperatura del medio ambiente en la mezcla.**

La temperatura de la mezcla de concreto está bajo la influencia de la temperatura ambiente del lugar en el que se encuentra; a lo anterior hay que agregar los incrementos de la temperatura propia de la mezcla, ya que esta es una mezcla exotérmica.

Se debe tener presente que la temperatura del concreto se incrementará cuando se inicie la mezcla; la temperatura ambiente influirá durante el proceso de fraguado acelerándolo cuando se incrementa, y retrasando el fraguado, cuando la temperatura disminuya.

Lo anterior da una relación entre aumento de temperatura y aumento en la pérdida de humedad; razón por la cual en la práctica, se tienen que modificar las raciones en el dosificador de la planta, los cuales están basados sólo en la experiencia y en los meses en los cuales se realiza la mezcla. Con ésta acción se pretende compensar la pérdida de humedad excesiva, debida al incremento en la temperatura ambiente (Ortiz, 2007 ) (Sika 2001).

Los fabricantes de concreto pre-mezclado, aumentan las cantidades de cemento y de agua al momento de la preparación (dosificadoras) de los transportes, esta acción la realizan en meses considerados como calurosos, para procurar conservar una cierta relación entre aumento de temperatura y pérdida de humedad.

El incremento en las cantidades, es una posible solución a la excesiva deshidratación de la mezcla, acción que no garantiza un resultado como el esperado, además de que se encarece la mezcla de concreto, elevando el costo total de la construcción.

Alta temperatura	Mayor Pérdida de humedad.
Baja Temperatura	Menor Pérdida de humedad.

Por lo anterior es posible considerar y proponer, que mientras se compense la deshidratación de la mezcla en un modo controlado, se estará procurando un fraguado acorde a lo esperado y por ende, una mejor respuesta del concreto, que redunde en un beneficio para la construcción; logrando un mejor lugar, más seguro para los compañeros constructores mientras dure la obra, y al finalizar, para quienes ocupen la edificación.

Aunque se recomienda que la compensación no afecte la combinación original de la mezcla, esta es benéfica cuando primero se deja avanzar el fraguado durante unas horas, antes de llevar a cabo la mencionada compensación.

## **2.1 Relación entre la resistencia a compresión del concreto y la relación agua/cemento.**

Uno de los parámetros más importantes que influyen de manera considerable, en el comportamiento que presenta el concreto maduro, viéndolo desde el punto de vista de calidad y de seguridad es, sin duda, su resistencia a la compresión. La resistencia a compresión está fuertemente basada en la relación agua/cemento, la que es medida en la mezcla del concreto (Bois 1998).

En la práctica la relación agua/cemento es el factor más importante que influye en la resistencia total del concreto compactado; la fortaleza del concreto disminuye, conforme la tasa de agua/cemento aumenta; la tasa agua/cemento tiene influencia en el desarrollo de la resistencia del concreto con el tiempo, un concreto con baja relación agua/cemento ganará o tendrá una resistencia a compresión rápida en comparación con un concreto con relación agua/cemento alta.

La característica más importante del concreto para quienes son entendidos o no, en la materia de construcción siempre será, la resistencia. La resistencia a compresión del concreto, es la clave para una buena edificación; teniendo buenos cimientos y la preparación adecuada del concreto, se aseguran construcciones confiables, durables, resistentes. Es por ello que surge siempre la inquietud acerca de cómo asegurar esas características, y la respuesta es, teniendo un especial cuidado en el proceso de obtención de cada uno de los elementos que integran una mezcla.

En cuanto a la resistencia a compresión del concreto se refiere, se puede iniciar verificando la calidad del cemento empleado, así como saber las dimensiones y de dónde provienen los elementos agregados al concreto, como lo son, la arena y la grava. De igual manera es recomendable conocer la fuente de donde proviene el agua empleada en la preparación del concreto.

Para la preparación se pueden seguir los métodos ya probados (O'Reilly 1997) (Manual del Constructor 2000) (Sika, 2001)

Tradicionalmente, cuando se edifica una habitación o se hace un agregado a una edificación ya existente se contrata sólo las labores de los compañeros maestros de la construcción; se les deja que ellos sean quienes tomen decisiones acerca de cómo es que se va a preparar el concreto a emplearse en los remiendos, o construcción de la nueva edificación; me parece que no es justo, dejar que los maestros de obra sean los responsables directos de la preparación del concreto, desentenderse de la preparación del concreto por comodidad ignorancia o flojera no es propio de quien está a cargo de la obra.

Es entendible que cuando se trata de trabajos en los que el concreto a utilizar, no va a ser determinante para la seguridad de la construcción, el concreto se prepare localmente, en la construcción, no así, cuando se habla de edificaciones (casas edificios bodegas cuando pueda estar en riesgo la integridad de los usuarios), en ese caso es recomendable siempre la asistencia de un asesor. Un asesor que indique las cantidades de concreto que se van a ir entregando en la obra, además de las respectivas proporciones de los componentes de la mezcla y de la relación agua/cemento; cuando es posible, se debe preferir un concreto que sea preparado haciendo uso de una dosificadora, y entregado en la obra mediante una olla (camión transportador de concreto).

Para los casos en los que se construye un edificio de dimensiones considerables, se realizan diferentes pruebas de laboratorio a varias propuestas de mezclas, previo a ser empleadas en la construcción y es aquí, donde se entiende que no es posible dejar al maestro de obra, que le ponga el agua que necesita, o que altere la composición que ya trae la mezcla; es aquí donde se debe tener especial cuidado a los tiempos de curado, del fraguado completo del concreto; en lo posible, controlar la calidad del concreto a emplear, mediante todas las técnicas que estén a la disposición.

Si el parámetro de interés es la resistencia a compresión del concreto, entonces resulta comprensible el también interés por saber cómo determinar, o mantener una resistencia a compresión específica (Mejía 2009) (Neville 1963).

Desde 1918 *Abrams Duff* (Abrams) propuso que existía una relación, entre la resistencia a compresión del concreto, y su relación de agua a cemento, con la que fue este preparado (Abrams 1918) (ACI.). Inmediatamente surge la idea de controlar la relación agua cemento para de esta forma, estimar una posible resistencia a compresión del concreto empleado.

*Abrams*, fundamentó su propuesta en la química que se lleva a cabo durante la hidratación de los óxidos del cemento (Neville 1963), que son los responsables de la porosidad del concreto; de igual manera se debe tener en consideración la trabajabilidad del concreto la cual dependerá de la humedad contenida en el concreto.

Hasta aquí se ha mencionado la resistencia a compresión, la trabajabilidad (ACI 116R, 2000) y la porosidad, estas propiedades tienen que ver principalmente con la cantidad de humedad que tiene el concreto o la relación agua/cemento que tiene el concreto; dichas características se pueden ver afectadas al variar algunos de los elementos que intervienen en la mezcla del concreto fresco.

Para todas las pruebas realizadas en el laboratorio para el desarrollo de esta investigación, se procedió a la adquisición de todos los materiales comerciales disponibles

en la zona; principalmente los agregados finos y duros fueron adquiridos en tiendas cercanas a la *Ciudad Universitaria*; en cuanto al agua utilizada se prefirió adquirir agua de marca (*Bonafont*) que ostenta una leyenda con los contenidos mínimos que posee por porción de agua.

En cuanto a la porosidad, es conocido que se ve, mayormente afectada por las dimensiones de la grava utilizada, o la relación grava/arena del concreto fresco (Romel 2008), y se estipula que, existe una relación inversa entre la porosidad y la resistencia de los materiales.

Existen situaciones en las que intencionalmente se tenga como diseño, un concreto con una baja resistencia a la compresión (Neville 1963).

Tema aparte en esta obra, resulta la durabilidad del concreto la cual desde principios de siglo (siglo XX), se ha asociado con el contenido propio o natural del aire en la mezcla, y/o a la inclusión intencional de aire en dicha mezcla (ACI) (Romel 2008).

El concreto debe ser capaz de soportar las inclemencias del clima; soportar exposiciones a altas temperaturas así como a bajas temperaturas, estos cambios tienden a disminuir su capacidad para durar; debe ser capaz de soportar ciclos de congelación y de deshielo, de excesiva humedad y de un secado extremo, un calentamiento y enfriamiento no predecible; además, debe soportar los ataques de sustancias químicas, de agentes descongelantes y otros tantos elementos que van contra su durabilidad natural. Sin embargo, la resistencia a compresión se puede mejorar al hacer un uso racional medido de componentes especiales agregados al compuesto.

Se sabe que desde 1918 se proponía establecer una relación entre la conocida relación (de preparación) de agua cemento, de una mezcla de concreto fresco, y su futura resistencia a compresión cuando el concreto ha logrado un fraguado en al menos 28 días. Entonces es razonable proponer, todo método que posibilite conocer el nivel de humedad real, que presenta una mezcla de concreto fresco, una vez que se ha depositado en el lugar destinado de la obra y antes de iniciar el fraguado.

La resistencia a compresión ha sido la característica más apreciada del concreto por la confianza que da el saber que se tiene un concreto fuerte; además de que se puede relacionar esta fortaleza con otras características más complejas, como lo pueden ser: la resistencia al esfuerzo cortante, así como su modulo de elasticidad y su permeabilidad. Estos son altamente valorados por especialistas en la materia (Ballena del río 2009).

Tradicionalmente la resistencia a compresión que tiene una mezcla de concreto, se conoce mediante las pruebas de rompimiento que se realizan en los laboratorios dedicados

a estas pruebas. Este indicador de rompimiento llega a determinar la calidad que tiene el concreto. Básicamente son pruebas realizadas sobre muestras tomadas directamente de la obra; las muestras que son sometidas a compresión uniaxial, son muestras formadas por probetas de dimensiones estándar.

Las características inherentes de los materiales afectan la calidad del concreto, y a eso hay que agregar factores que terminan por afectar el resultado final. Entre los factores se encuentran el curado inicial del concreto, (periodo que da inicio al fraguado total de la mezcla) tamaño de la probeta, velocidad de aplicación de la fuerza, esbeltez de la misma estado de humedad y algo que dan en llamar cabeceo o refrentado (Delibes 1993)

En esta investigación se propone un método, que mediante tecnologías no destructivas, en este caso con base en la aplicación de señales de microondas, (Calva 2006) (Baker 1994) (Zoughi 1990), logre obtener un estimado del nivel de humedad (Meyer, 1980) que tiene una mezcla de concreto fresco al momento de ser vaciada en la obra; conociendo el estimado de humedad que tiene el concreto fresco es posible, estimar la resistencia a compresión que va a tener al final del fraguado. Esto último se logra correlacionando la relación de agua/cemento con la resistencia a compresión (una correlación, indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias.); además, los resultados de la estimación se pueden apoyar haciendo uso de un modelo matemático (Mironov 2004), con el cual sea posible conocer los escenarios que se presentan con las diferentes relaciones agua/cemento, las mismas relaciones con las que se estén manejando las pruebas de laboratorio, y siguiendo las indicaciones de proporción en mezclas sugeridas en los diferentes manuales y técnicas conocidas (Neville 1963) (ACI) (Manual del constructor, 2000) (Kosmatka, 1988)

### **2.1.1 Aditivos en el concreto**

Es posible encontrar que al concreto se le pueden agregar tantos compuestos que rebasan lo esperado, inicialmente se tiene a los elementos básicos agua cemento arena y grava. Sin embargo, es posible agregar algunos de los siguientes aditivos de entre los muchos utilizados actualmente en la industria de la construcción: acelerantes de fraguado; retardantes de fraguado; aditivos reductores de agua superfluidificantes e inclusive, un determinado color a elección del cliente, y muchos otros compuestos químicos para tratar de obtener un concreto óptimo para una obra en específico.

Un comentario sobresaliente respecto de los diferentes aditivos disponibles para diseñar la mezcla de concreto es el siguiente. Al hacer uso de este tipo de aditivos, se debe tener cuidado en cuanto a las cantidades utilizadas ya que, cuando se usan aditivos

químicos en grandes dosis, surgen tendencias a inducir efectos contrarios a los esperados. Son efectos colaterales de grandes dimensiones que se pueden expresar en algunos casos, como un retardo excesivo y hasta un posible incremento desmedido de aire incluido, por citar ejemplos (ACI) (BASF 2006).

Llama poderosamente la atención el que se pueda tener como meta una cierta resistencia de compresión del concreto en vez de la máxima resistencia posible, lo anterior es por el tipo de aplicación en la que el concreto es requerido.

También es posible que se requiera un concreto que posee un revenimiento demasiado alto, para obtener una fluidez tal, que se pueda manejar mejor y por más tiempo, que aquel concreto que es utilizado con un revenimiento menor a los: 10 cm.

De los componentes básicos del concreto, el agua, se relaciona bastante bien con los resultados que se obtienen al variar dentro de un intervalo las cantidades de éste elemento; en los pisos industriales por ejemplo, un excedente de agua en la mezcla aumenta la incidencia de grietas, por lo que a una mayor cantidad de agua, mayores serán las contracciones del piso y mayores serán los daños que se vean; lo que provoca una mayor incidencia de grietas en el piso esto, por una mayor cantidad de agua en la mezcla (PCA 1995).

Se dice que a mayor cantidad de agua mayores serán las contracciones, lo que con lleva a una destrucción mayor y a una apariencia de poca confianza (Vidaud, 2011);

¿Qué tan importante es el agua?,

Es posible hacernos esta pregunta cuando estamos viendo una mezcla de concreto, sin que hayamos participado en su diseño, en su preparado y por supuesto en su manejo; la fabricación del piso industrial (Balsamo, 2008) es un buen ejemplo, y el protocolo que marcan para dicha fabricación nos da una idea más clara del uso del agua.

## **2.2 Protocolo seguido en la fabricación de pisos.**

Se requiere primero tener la superficie del terreno debidamente preparada compactada y con el refuerzo ya en su lugar definitivo; se procede al colado, el contratista debe estar consciente de que parte del agua de mezclado es retenida para que, una vez medido el revenimiento en campo (en el sitio de uso) decida, si se agrega o no esa porción de agua retenida; la porción de agua deberá estar perfectamente definida en cuanto a cantidad. Si resulta que es insuficiente para el revenimiento esperado el responsable, (proveedor) del concreto será quien apruebe el uso de una cantidad mayor de agua, o también puede ser utilizado un aditivo fluidisante, lo cual muchas veces sucede en climas

cálidos. A la par se debe tener un control sobre la disposición de los cuadros del piso, se debe evitar hacerlo como tablero de ajedrez.



Figura. 2.1 Fotografía de un piso con un deterioro a simple vista; la parte faltante dejó un hueco que fácilmente se desmorona.

En la figura 2.1, se aprecia una fotografía de un piso que presenta un severo daño debido principalmente a la no integración total de los elementos y a una posible fuga de cemento durante el proceso de fraguado, probablemente motivado por un exceso de agua en su configuración original del concreto (WRI 2001).

### **2.3 Correlación de variables.**

Se estipula que: dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varía sistemáticamente con respecto a los valores de la otra; la correlación entre dos variables no implica por si misma ninguna relación de causalidad. Una correlación trata de establecer la relación o dependencia que existe entre las dos variables que intervienen en una distribución bidimensional; por ello, una vez que ya se ha establecido una dependencia lineal, un aspecto muy relevante es el investigar las características del modelo matemático (Wang, 1980) que relacione una variable con otra.

Lo anterior representa una explicación de lo que es una correlación entre dos variables cualquiera; lo que en esta investigación se buscó al mencionar una correlación, era tener presente que se debía estimar la humedad de una mezcla de concreto, con base en el cambio que sufría una señal de microondas en su amplitud, después de haber interactuado con la mezcla de concreto.

Ver, si se tenía un cambio positivo o negativo de una señal de microondas cuando la humedad de una mezcla cambiaba; si disminuía la humedad de la mezcla por efecto natural del proceso de la deshidratación, y también se iba a ir disminuyendo el nivel (amplitud) de la señal de microondas que se recuperaba, después de interactuar con la mezcla de concreto. Estimar la humedad de una muestra de concreto por los cambios que tiene una señal de microondas.

Para estudiar la relación que guardan los datos de una variable, contra los de una variable de interés (variable física), es necesario precisamente tener una base de datos de ambas variables para ser comparadas y estudiadas desde un punto de vista estadístico, que permita definir el tipo de correlación que se tiene; definir su fuerza sentido y forma.

Los datos de estas dos variables se representan en un gráfico que se conoce como nube de puntos o diagrama de dispersión. Es una forma de describir una distribución bidimensional.

La relación que guardan estas dos variables (cuantitativas) de interés, queda representada mediante la línea de mejor ajuste, trazada a partir de la nube de puntos generada con los datos de las dos variables.

Los principales componentes de una línea de correlación son, la fuerza, el sentido y la forma.

- La **fuerza**. Según el caso, mide el grado en que la línea representa a la nube de puntos; si la nube es estrecha y alargada, se puede representar por una línea recta, lo que indica una relación fuerte. En cambio si la nube de puntos tiene tendencia elíptica o circular, se tendrá una relación débil.
- El **sentido**. Mide la variación de los valores de la variable B con respecto a la variable A; si al crecer los valores de A, lo hacen los valores de B, la relación entre ellos será positiva. Si al crecer los valores de B, disminuyen los valores de A, la relación será Negativa.
- La **forma**. Establece el tipo de línea que define el mejor ajuste. La línea recta, la curva monotónica o la curva no monotónica.

Como se ha visto hasta este punto. La correlación se puede estimar primero observando la variación en los datos que se van presentando, por parte de las variables de interés; al realizar un diagrama de dispersión, se comprueba que si existe dicha correlación, y se puede clasificar según su nivel o grado de correlación. Hasta aquí sólo ha sido una inspección personal (una apreciación visual de la existencia de correlación) de los datos y graficas, e inclusive se puede suponer una correlación numérica como lo sería una correlación de *pearson* según la cual, la correlación se puede dar en un intervalo que va de los -1 a los +1; este coeficiente de correlación da una medida de la cercanía a la linealidad de una relación entre dos variables.

Al considerar los datos de ambas variables como vectores en la gráfica de dispersión, es posible suponer el valor que tendrá el coeficiente correlación de *pearson*, que siempre se le asigna la letra  $r$ , entonces  $r$ , tendrá los valores de:

**Tabla 2.1**  
Coeficiente de correlación

<b>r</b>	<b>Relación entre variables</b>	<b>Ángulo</b>
1	Cuando ambos vectores son colineales (paralelos)	0°
0	Cuando ambos vectores sean ortogonales	90°
-1	Cuando ambos vectores sean colineales de dirección opuesta	180°

$$\alpha = \arccos(r) \quad 2.1)$$

Claro está que el coeficiente de correlación será 1 o -1, cuando todos los valores de ambas variables estén sobre la línea de regresión, pero esto no siempre es así por lo que, se tendrá que los diagramas de dispersión (de ahí su nombre), muestren valores que agrupan para tener formas un poco diferentes a una línea recta.

Por lo anterior es justificable intentar dar un valor o número al nivel de correlación que guardan las dos variables, con base en la forma en que se aprecian los valores en el diagrama de dispersión.

Por la forma de la figura que integran los valores de las dos variables se define un coeficiente de correlación, tomando el ancho (W) y el largo (L), de una envolvente imaginaria de la figura; la expresión que nos da el coeficiente de correlación será:

$$r = \pm \left(1 - \frac{W}{L}\right) \quad (2.2)$$

En aras de una expresión más cercana a la estadística, se plantea una expresión matemática que utilice los parámetros obtenidos directamente de las bases de datos de las dos variables que presumen una correlación.

Existen diversos coeficientes de correlación entre los que se tienen el coeficiente de *Pearson* y el de *Spearman* y el *canónico*. El más conocido es el coeficiente de correlación de *Pearson*, y que se obtiene dividiendo la covarianza de las dos variables por el producto de sus respectivas desviaciones estándar lo que finalmente da, es el coseno del ángulo alfa, entre los dos vectores formados por las series de valores, de las dos variables.

$$\text{COS}(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.3)$$

## 2.4 Correlación entre humedad y Permitividad.

Por definición, la permitividad es una constante física que describe como un campo eléctrico afecta, y es afectado por un medio (Decreton 1974).

Generalmente sólo se considera a la parte real de la permitividad relativa compleja. Cada vez que se hace referencia a la permitividad no se está considerando la parte compleja de la expresión. Cuando en realidad se debe mencionar, que es la Permitividad Relativa Compleja con la que estamos tratando, y que un caso especial, es cuando sólo se tiene a la constante dieléctrica, o parte real de la permitividad relativa compleja.

$$\epsilon = \epsilon' - j \epsilon'' \quad (2.1)$$

$\epsilon'$  - Constante Dieléctrica

Representa la habilidad del material para almacenar energía.

$\epsilon''$  - Factor de pérdida

Representa la pérdida de energía del campo eléctrico en el material.

También se hace referencia en muchas ocasiones a un valor en específico para la pérdida que se conoce como, Tangente de Pérdida y se define como:

$$tg\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.2)$$

Casi cualquier elemento que pueda ser sujeto a la influencia de la energía de microondas servirá para conocer su permitividad, se le podrán determinar sus características basados en ella. (Zhihong, 1999).

Como se mencionó con anterioridad la permitividad es una constante física, que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio; entonces, es posible relacionar los valores de la permitividad que se obtengan de un medio, con sus características del propio medio (Brown 1956) (Nelson 1977) (O`Neill 2003).

Tratándose del cemento se tiene que, el cemento en polvo está en la familia de los dieléctricos de baja pérdida, por ello la tangente de pérdida (Ec 2.2), es mucho menor que uno. Lo cual llevaría a una tangente de pérdida expresada como:

$$tg\delta = \epsilon''/\epsilon' \ll 1 \quad (2.3)$$

Mientras que el agua está en la familia de los materiales con gran pérdida, el valor de su tangente de pérdida es grande (Mayor a uno). (Bois 1999) (Hippel 1958) Si además agregamos su vulnerabilidad a los incrementos en la temperatura.

El parámetro que si cambia en el concreto con el cambio de temperatura es la permitividad compleja del agua, y mediante éste cambio se pueden suponer cambios en las propiedades del concreto. La parte complicada cuando se trata de relacionar los parámetros del material con las condiciones de su permitividad relativa compleja, es el tener que acceder a la parte (precisamente) compleja de la expresión, se requiere obtener su valor.

Aquí se resalta como dato adicional, la importancia que tiene el curado correcto del concreto, etapa fundamental para lograr obtener un concreto con la suficiente resistencia a compresión y la durabilidad y apariencia acordes con el diseño de la mezcla.

Las propiedades dieléctricas del concreto están determinadas por:

Las proporciones en la mezcla de: cemento arena y agregados y por supuesto de la relación que guardan el agua y el cemento.

De las propiedades dieléctricas de cada elemento integrante de la mezcla.

Tamaño de los agregados duros.

Edad y condiciones de curado del concreto

## 2.5 Correlación de los niveles de humedad, con los voltajes obtenidos de la señal de microondas.

Ya que lo que se pretende es determinar el nivel de humedad de una mezcla haciendo uso de energía de microondas, aplicada a la mezcla de concreto fresco, es conveniente citar que cada estado del agua afectará en modo diferente a la señal aplicada, dependiendo de la frecuencia de ésta; en los intervalos de frecuencia baja.

Para 1 GHz, las propiedades dieléctricas de algunos materiales se ven influenciados por la conducción iónica y los efectos de relajación de los lazos (puentes de hidrogeno) que el agua tiene cuando se mezcla con algunos materiales (Cihlar 1974).

Estos efectos que se han mencionada, se reducen al mínimo cuando se utilizan frecuencias cercanas a y por encima de los: 10 GHz. (Meyer, 1980) (Samir, 1998) (Du 2000)

Como ejemplo de correlación, se presenta el caso en el que se puede llegar a estimar la textura de un suelo, basándose en la constante dieléctrica del mismo (Hippel 1958). Aquí se habla de los efectos de la vegetación en la respuesta a las microondas por el suelo húmedo (Newton 1977) (O`Neill 2001) (Owe 2001).

La sensibilidad del suelo a la emitividad y reflectividad debida a su contenido de humedad ha sido demostrada operando sistemas de microondas (Pozar 1998) (Hipp 1994). Ésta dependencia de la respuesta del suelo a las microondas basándose en el contenido de agua es debido al gran contraste entre las principales propiedades dieléctricas del agua líquida y aquellas del suelo seco.

La gran constante dieléctrica para el agua líquida, resulta del alineamiento del momento bipolar eléctrico de la molécula de agua, en respuesta al campo aplicado (Sardos R., 1990).

Con grandes longitudes de onda, mayores a 5 cm. la constante dieléctrica del agua es aproximadamente 80, comparada con los 3 o 5 del suelo seco.

Por ello, conforme el contenido de humedad del suelo se incrementa, su constante dieléctrica puede alcanzar valores de 20 o mayores (Maryott, 1951).

$$\text{H}_2\text{O} \quad \epsilon = 80.37 \text{ a } 20^\circ\text{c}$$

Se inicia con la toma de medidas de humedad (siguiendo un procedimiento establecido) de las muestras de material de interés (Meyer, 1980), posteriormente o a la par,

arrojar energía de microondas sobre cada una de las muestras y al final correlacionar los niveles de humedad con los niveles de voltaje colectados.

Nivel de humedad (%) ----- Nivel de Voltaje (mV)

Teniendo toda la información se hace una prueba de control.

Se toman muestras con humedad conocida y se verifica que sus niveles de voltaje obtenido tras arrojar energía sobre ellas nos indiquen dentro de un cierto margen, que nivel de humedad deben tener según las lecturas de voltaje.

## **Agua.**

*“ Agua elemento vital en la vida, y elemento imprescindible en una mezcla de concreto. ”*

El Agua es un elemento integrante y determinante en el diseño de mezclas de concreto; no podría dejar de mencionarla aunque sea en forma breve.

El agua es uno de los cuatro elementos que integran la mezcla básica, de concreto y es, la que permite lograr conocer precisamente la humedad de la mezcla utilizando energía de microondas. Por ello es que insisto en el tema, y aclaro que menciono el agua, sólo en el contexto de su uso en las mezclas de concreto.

El papel que juega el agua en el diseño y desempeño de las mezclas de concreto debe ser tomado muy en serio y retomado siempre que sea posible y se amerite su tratamiento. La principal función del agua es habilitar y potencializar las reacciones químicas que preceden a la plasticidad y posterior endurecimiento del concreto cuando el proceso de fraguado se inicia. Es obvio que el agua interactúa con el cemento a un nivel químico para obtener los primeros productos de hidratación.

Otras funciones del agua aunque no lo parezca así, es la de lubricar la mezcla de los agregados duros, suaves y del cemento, de manera que se logre la mezcla lo más uniforme posible (Rzepecka 1972). Agregar agua a la mezcla de los diferentes elementos que integran el concreto, es el detonante que arranca el proceso de hidratación. Posteriormente se propicia la deshidratación de la mezcla, cuando esta entra en reposo. Es por ello que el

agregado de agua debe estar supeditado a un control, que permita una cantidad suficiente de agua para que se logre lubricar el compuesto total, y mantenerlo al mínimo, ya que un excedente de agua aumenta los riesgos de un sobre sangrado de la mezcla; con agua en exceso se pierde una gran cantidad de cemento y de agua por supuesto. Lo anterior lleva a causar cavidades no deseadas en el concreto, esto a su vez conduce a que exista la posibilidad de que algunas de las varillas (elementos de soporte), quedaran al descubierto permitiendo su rápido deterioro. Por el contrario, una insuficiente cantidad de agua causaría un decremento en la fortaleza del concreto; poca agua en el concreto fresco no permite completar el proceso de hidratación inicial de la mezcla.

Ya que se está tratando el tema del agua, elemento muy importante del concreto, se introduce una relación entre el agua y las microondas

La absorción y el corrimiento en fase de las microondas pasando a través, o reflejándose por el material húmedo, son en ocasiones utilizadas para determinar el contenido de agua; la absorción y el corrimiento son causados por el agua en sus diferentes estados (celda de agua, agua superficial, etc.), y responderá en diferentes formas dependiendo de la frecuencia de la señal utilizada.

En frecuencias bajas ( $1\text{GHz} <$ ) las propiedades dieléctricas de algunos materiales (Birchak 1974) (Brown 1956) se ven influenciados por la conductividad iónica y por la relajación de los enlaces (En estructuras cristalinas inorgánicas el agua se comporta diferente del agua en estado líquido). La Presentan como una gran desventaja para los sistemas de medición de humedad basados en microondas, por ello plantean la necesidad de agregar a la medición, el pesado o estimación de la densidad para calcular el contenido de humedad relativa ( $\psi$ ). Sin embargo existen métodos que eliminan esta necesidad, por lo que es posible medir el contenido de humedad relativa ( $\psi$ ) utilizando únicamente microondas, sin considerar la densidad del material. Lo anterior posibilita la generación de nuevos sistemas para una rápida y continua medición de la humedad y su posible control.

## 2.6 Pruebas destructivas aplicadas a muestras de concreto.

### a) Técnica del revenimiento.

Revenimiento o medición de asentamiento.

En si el revenimiento determina en gran medida la fluidez y la forma de derrumbamiento que tiene el concreto fresco, y de ese modo se puede apreciar también la consistencia que tiene ese concreto fresco, que indudablemente se formo mediante el diseño de cada uno de sus elementos que lo integran.

Esta prueba de revenimiento deberá hacerse en cada uno de los vaciados del concreto. Si se busca tener un buen control de la calidad del concreto se puede partir del hecho de que: entre más estricto es el control de calidad mayor muestreo se debe tener.

Como ejemplo de muestreo o mutilación o destrucción del material está el denominado cono de abrams. El **cono de Abrams** es un tipo de prueba que se le practica a la mezcla que se entrega y debe realizarse con cada lote; es una prueba denominada como destructiva porque consiste en tomar muestras directamente del vertedero, cuando la mezcla está en su estado fresco, para medir su trabajabilidad. La prueba consiste en llenar un molde metálico de dimensiones normalizadas (molde piramidal de 40cm x 90cm x 75cm.) (Norma Mexicana 2004), se llena en tres partes o etapas, al término de cada etapa y se apisona la mezcla con una herramienta conocida como pisón. Posteriormente se retira el molde y se mide el tanto que ha disminuido la mezcla desde su borde superior.

La cantidad de mezcla necesaria para efectuar este ensayo no debe ser inferior a 8 litros.

El proceso de llenado es el siguiente:

- Se coloca el molde sobre la plancha de apoyo horizontal, ambos limpios y humedecidos sólo con agua. No se permite emplear algún tipo de aceite ni de grasa.
- El operador debe evitar el movimiento del molde durante el llenado.
- Se llena el molde en tres capas de aproximadamente igual volumen y se apisona cada capa con 25 golpes de la varilla-pisón.

La capa inferior se llena hasta aproximadamente 7 cm de altura y la capa media hasta aproximadamente 16 cm de altura, luego de retirar el molde, se mide el asentamiento

que experimenta la mezcla colocada en su interior. Ésta medición se complementa con la observación de la forma de derrumbamiento del cono de mezcla mediante golpes laterales con el pisón, después de haber retirado el molde metálico.

#### **b) Muestreo del producto vaciado en el lugar de construcción.**

##### **Resistencia a compresión.**

Se obtienen muestras cilíndricas del concreto vaciado en el lugar de la obra, las cuales deben cumplir con las características dimensionales de 4 pulgadas de diámetro por 8 pulgadas de largo. Estas muestras se almacenan hasta que esté curado el concreto. Las muestras son curadas en un cuarto de hidratación por un día, y se curan al aire (en el medio ambiente) los restantes 28 días.

No siempre es así, dependerá de la metodología seguida por el laboratorio en cuestión.

Ya que están curadas las muestras se determina su fuerza de compresión, presionando cada cilindro hasta que es destruido por aplastamiento. El proceso es lento y ya no se pueden obtener más muestras.

Por medio de este tipo de pruebas es posible detectar NaCl en el concreto el cual tiene gran influencia en la fuerza de compresión del concreto (Folgero, 1998) (Bois, 2001). Precisamente el NaCl (Bois, 2001) influye en la construcción, al ser el responsable de corroer la fina capa de protección con que cuentan las varillas inmersas en concreto en la porción de construcción. Las varillas se comienzan a corroer cuando se tienen ciertos niveles de cloruros en el concreto, específicamente se ha fijado como una norma que al tener un nivel igual o superior al 0.15% de cloruros, del peso total del cemento se da la corrosión. Este tipo de componente de la mezcla se integra en diferentes modos y el más conocido o el más obvio es cuando se agrega agua a la mezcla.

#### **c) Pulso ultrasónico.**

La idea básica sobre la que se ha desarrollado el método de pulso ultrasónico con aplicación en concreto es que la velocidad del pulso (de una onda de compresión) a través de un medio dependerá de las propiedades elásticas y de la densidad de dicho medio (Malhotra 2004); originalmente se ideó la aplicación del pulso teniendo como centro a la pieza de concreto como se aprecia en la siguiente figura. Figura 2.1

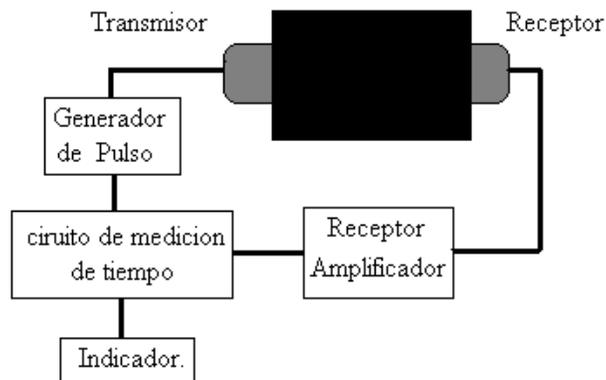


Figura 2.1 Dibujo de un arreglo básico de aplicación de pulso ultrasónico en un bloque de concreto.

Cuando se aplica una perturbación mediante una carga dinámica o vibratoria sobre una superficie de un medio elástico y sólido, se crean tres tipos de ondas mecánicas propagándose en el medio (Leslie 1949) (Fowler 2000).

Estas ondas mecánicas son conocidas como:

- 1 Ondas compresionales o longitudinales u Ondas -P
- 2 Ondas Cortantes u Ondas-S
- 3 Ondas superficiales u Ondas Rayleigh

Las ondas compresionales se propagan a través del medio sólido en modo análogo a las ondas sonoras a través del aire. Cada tipo de onda se propaga con su respectiva velocidad característica. Para un sólido cualquiera las ondas compresionales poseen la más alta velocidad de propagación y las ondas de superficie, la más baja (Jones 1969).

Específicamente para el concreto, las velocidades de las ondas de corte y de superficie son típicamente el 60 y 55 % respectivamente de la velocidad de la onda de compresión (ACI, 1998).

En sí, la velocidad particular de una onda dependerá de las propiedades elásticas y de la densidad del medio.

Existen tres técnicas de aplicación del pulso, llamadas configuraciones y son:

- Modo Directo
- Modo Semidirecto
- Modo indirecto

En las siguientes figuras se pueden apreciar dibujos en los que se muestra la disposición que se hace de los respectivos transductores de transmisión y de recepción necesarios en la utilización de ésta técnica.

Estos métodos son aplicados sobre piezas de concreto maduro.



Figura 2.2 Aplicación del pulso mediante un transmisor y un receptor siguiendo el Modo Directo

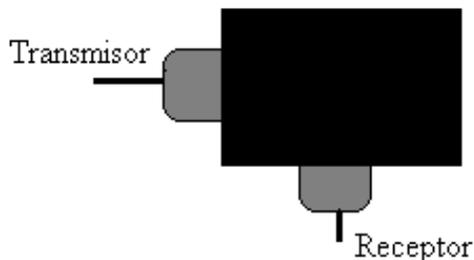


Figura 2.3 Aplicación de los sensores en la muestra de concreto según el Modo Semidirecto

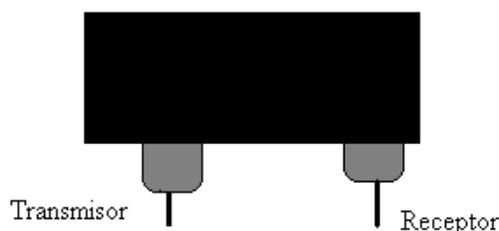


Figura 2.4 Dibujo representando la aplicación de los sensores sobre la muestra de concreto siguiendo el Modo Indirecto.

Catalogado también como una prueba no destructiva, el pulso ultrasónico se utiliza para evaluar estructuras de concreto fraguado, es popular por su simplicidad versatilidad y repetitibilidad (imcyc 2011).

La técnica se sustenta en que las ondas de sonido se propagan en los medios sólidos a partir de excitaciones vibratorias en forma de ondas, cuya velocidad depende de las propiedades elásticas del medio; conocidas la velocidad del sonido y la masa del solido se pueden estimar las propiedades elásticas del medio y relacionarlas con los parámetros de calidad del material.

El artículo de Solís R, *"Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados"* (Solís 2004), presenta en manera extensa resultados de un estudio para identificar variables adicionales a la velocidad (V), que expliquen la variación independiente en la resistencia (R), obteniendo un modelo predictivo de ésta, que incluya características de los agregados y/o algún parámetro de las proporciones.

Experimentalmente manipularon tres variables:

El origen de los agregados,

La relación agua/cemento(a/c) y

La relación entre grava y la arena (g/a)

Prepararon mezclas con relación agua/cemento (a/c) de:

0.4; 0.5; 0.6; 0.7

Buscando cubrir intervalos de resistencia oscilantes entre:

200 y 350 Kg/cm<sup>2</sup>.

Consideraron cuatro mezclas con relación grava arena (g/a) de:

1.5; 1.2; 1.0; 0.8

Para comparar con la prueba (tradicional) de resistencia elaboraron tres cilindros estándar de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Los cilindros los sometieron a curado por inmersión durante 7 días y luego los mantuvieron al aire por 3 semanas. A los 28 días realizaron la medición de la V utilizando transductores de onda compresional acoplados al equipo medidor de pulso.

Posteriormente ensayaron la resistencia a compresión, por el método destructivo tradicional y en ninguno de los cuatro casos hubo correlación alguna entre V (en m/s) y R (en Kg/cm<sup>2</sup>), ya que el nivel de resistencia se mantuvo relativamente constante; según reportan.

De lo anterior se concluye, que el factor más importante para que exista una correlación entre V y R es la variación en la relación agua cemento (a/c), que es responsable de la variación en la estructura porosa del concreto y de la resistencia en concreto fraguado; en resumen, la cantidad de agua en la mezcla.

#### **d) Medidores de Humedad comerciales disponibles.**

Estos métodos para la medición de la humedad se refieren completamente a una medición relativa de la humedad del concreto cuando se encuentra en su fase de concreto joven o posterior (Khalid, 2001), lo cual se obtiene tiempo después del fraguado; puesto que se aplican soluciones en uno de ellos; en otro método se aplica una corriente sobre la superficie del concreto; para el tercer método aquí citado se inserta el sensor en una perforación hecha en la losa de concreto y ahí permanece, por ello es posible regresar a tomar lecturas de humedad de ese punto en específico, no se hace la aclaración del área que comprende un punto de medición por ello es posible que se tengan que repartir los cinco sensores que integran un paquete de medición que suministra el proveedor para una UNICA losa, y se requiera de un paquete para cada monitoreo de losa, todos son métodos o instrumentos invasivos, destructivos.

La siguiente es información tomada directamente del proveedor de equipos de medición de humedad en concreto. (Números de Catálogo: WG-RHKIT )

Descripción general del equipo (disponible en el mercado) / Medidor de Humedad en Materiales

El diseño patentado del sensor inteligente del Rapid RH para concreto le permite obtener lecturas de humedad relativa (RH) mucho más rápido que otros métodos conocidos. El diseño patentado del sensor inteligente del Rapid RH para concreto le permite obtener lecturas de humedad relativa (RH) mucho más rápido que otros métodos conocidos.

Práctico y Sencillo. Usando los métodos convencionales para medir la humedad relativa, usted no puede cambiar rápidamente de un punto a otro en la misma área sin provocar costosos errores de medición. Los medidores con sondas externas requieren hasta 1 hora por orificio para equilibrarse y realizar la primera medición de humedad.

“En cambio, el WG-RHKIT solo necesita una perforación en el concreto que permita empotrar el sensor inteligente en el concreto, colocar el lector de RH (reusable) dentro del sensor, presionar el botón de encendido y 5 segundos después estará obteniendo su primer lectura de humedad relativa – SIN ESPERAR, SIN BATALLAR.”

Métodos disponibles más conocidos para comparar con el WG-RHKIL Rapid RH  
Método del Cloruro de Calcio

Esta prueba mide la tasa de emisión de vapor que expide una placa de concreto. El 90% del vapor que esta prueba detecta proviene de una capa de ½ pulgada (aprox. 12 mm) La prueba es superficial (figura 2.5) y se ve afectada por condiciones climáticas del cuarto, edificio o intemperie. Aun si se hace correctamente, la prueba del cloruro de calcio no da un indicio claro de las condiciones de humedad en la profundidad de la placa.

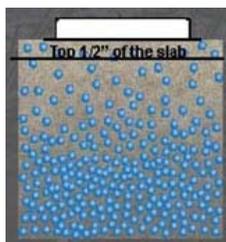


Figura 2.5 Dibujo que ilustra la reaccion del concreto ante este método.

## 2.7 Medidores de humedad / Aplican una corriente al concreto maduro.

Los medidores conocidos de humedad en concreto también miden a partir de la superficie del concreto. Los mejores solo pueden medir humedad hasta una profundidad máxima de ¾ de pulgada (Figura 2.6). Su precisión se ve afectada negativamente por variaciones en la densidad del concreto, y la composición química de los aditivos.

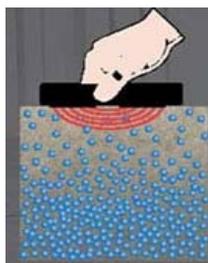


Figura 2.6 Dibujo que ilustra el modo de accionar del sensor utilizado en este método.

La ASTM (*American Society for Testing and Materials*) no ha emitido ningún estándar que apruebe las lecturas de éstos instrumentos como referencia final para determinar si una placa esta lista para la instalación de piso o no.

Medidor comercial: WG-RHKIL Rapid RH

Es la manera más rápida y económica de cumplir con los estándares. “Método estándar para determinar la humedad relativa en placas de piso reconcreto con pruebas in-situ” Realiza la prueba a aproximadamente 1.5” de profundidad (aprox. 40 mm) El sensor permanece incrustado en la placa y no es afectado por factores ambientales.

En resumen, la medición la hacen sobre concreto solido.



Figura 2.7 Fotografía del elemento que se incrusta en el concreto para obtener la información

A partir de que se sugirió el protocolo de investigación acerca de cómo saber el nivel de humedad de una mezcla, se han recibido incontables comentarios acerca de que “eso se hace con ultrasonido” sin embargo no toman en cuenta que el ultrasonido, es una medición si, para estimar la resistencia y, que la prueba, se realiza cuando el concreto es ya un concreto maduro (Figura 2.7); sucede lo mismo que los métodos e instrumentos comentados anteriormente, son para estimar humedad en concretos ya fraguados no en proceso de fraguado, que es extremadamente diferente.

## 2.8 Uso del infrarrojo en la determinación del nivel de resistencia de una muestra.

Para el caso del infrarrojo, es decir aplicaciones que utilizan el infrarrojo para determinación de parámetros, resulta un caso muy similar con el ultrasonido, se tiene la idea de que es posible aplicarlo a cualquier elemento, y en cualquier longitud de onda, siendo que están muy bien definidas las bandas en las que el agua absorbe, parte de la energía (infrarrojo) que se envía hacia el material de interés.

Por mencionar las bandas normalmente empleadas cuando el agua está en su fase líquida son, por longitud de onda, 1.45; 1.94; y 2.95  $\mu\text{m}$  junto con una longitud que se presenta como la más fuerte para ser usada, está a 6.1 $\mu\text{m}$  y que sin embargo se considera fuera del intervalo de operación de este tipo de técnicas.

La mayoría comenta, que sería más conveniente su uso debido a su reducido tamaño y a su facilidad para obtener los emisores y detectores, sin embargo no tienen muy clara la técnica que pueden utilizar; si es factible o no utilizar una técnica de transmisión o si es preferible la de reflexión y al mismo tiempo carecen de información acerca de cuál es la que si se adapta porque olvidan, que en el caso muy particular de la transmisión, es menester el uso (disponibilidad física) de ambos lados de la muestra del material para que la aplicación se lleve a cabo (Carr 1986).

Los polvos, granos y sólidos duros son generalmente opacos a la radiación de infrarrojo (Nelson 1994) (Hoekstra 1974) (Nelson 2002), este es rápidamente atenuado por la combinación del esparcimiento del haz y de la interface aire-sólido y, la absorción dentro del material. Para que funcione su aplicación se requerirían senderos en el material, de una fracción de un milímetro para obtener una intensidad de transmisión medible, lo cual es extremadamente difícil en una situación de operación en línea.

Durante la aplicación de la energía de microondas sobre el concreto fresco en el laboratorio, se presenta un fenómeno que al principio solo se aprecia como una característica propia del material, pero que en realidad se puede explicar con base en lo dicho en el párrafo anterior.

Lo que lleva a plantear la siguiente explicación del fenómeno de interacción entre el material (mezcla fresca) y la energía de microondas aplicada.

## **2.9 Mecanismo de funcionamiento entre la señal de microondas aplicada, y la humedad contenida en la mezcla de concreto fresco.**

Al aplicar la señal de microondas sobre la muestra (mezcla de concreto fresco) el agua permite el paso a dicha energía, debido a que está manteniendo un material esponjoso con cavidades muy similares a las longitudes de onda de la señal y, cuando el agua abandona la mezcla, se evapora, o es absorbida finalmente por el concreto, esos pasos se ven cerrados y la señal de microondas se dispersa sobre (la superficie) la mezcla de concreto, esto se ve apoyado con el hecho de que la frecuencia utilizada es la de: 9.66GHz, es una frecuencia que presenta muy poca penetrabilidad en los materiales, no así, la otra banda de frecuencias que es muy utilizada la banda S<sup>4</sup>.

Por la anterior es que se puede utilizar una frecuencia dentro de la banda X, que aparentemente no penetra la mezcla, pero que, con un nivel de humedad es posible lograr un mecanismo natural, que permite el paso de la señal de operación; mientras la mezcla tenga humedad, la señal de microondas a la frecuencia de 9.66 GHz, podrá penetrar la mezcla, y cuando la mezcla misma elimine o absorba el agua contenida en ella, la señal dejara de penetrar la mezcla y entonces las lecturas obtenidas serán sólo las de una pequeña parte de la señal arrojada sobre ella; sólo se tendrá registro de la señal que alcanza a reflejar en la superficie de la mezcla y llegar al sensor; esto explica las lecturas iniciales de hasta 350 mV (mezcla recién vertida bajo el haz de microondas) y finales de no más de 4 mV (concreto fraguado).

El agua, permite el paso de la señal a pesar de que al mismo tiempo, contribuye absorbiendo parte de la energía aplicada a la mezcla.

En el dibujo de la figura siguiente, se ilustra un punto en el que la señal de microondas incide sobre la mezcla de concreto fresco. Figura 2.8.

---

<sup>4</sup> Las frecuencias (banda S) son responsables, cuando son aplicadas con la debida potencia, de alterar las condiciones de humedad de una muestra afectando de manera directa las condiciones de la permitividad relativa compleja del material, porque inciden directamente en las condiciones de pérdida del material hecho que se ve aprovechado al ligar, la permitividad relativa del material con la o las variables físicas, que presenta en ese momento el material de interés sobre el que se hace incidir la energía de microondas (Schmugge 1983) (Grimberg 2011) (Bussey 1967).

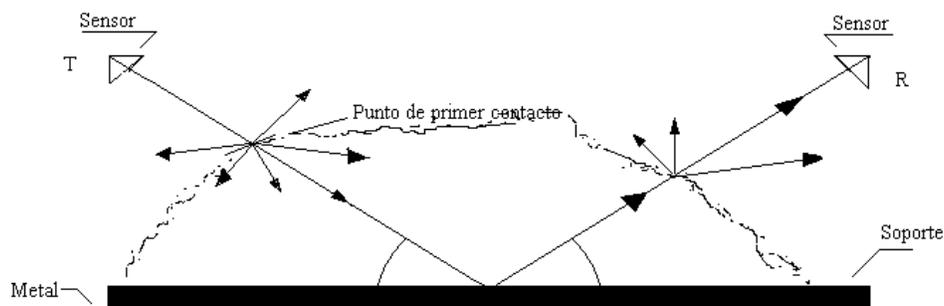


Figura 2.8 Dibujo en el que se trata de ilustrar algunas de las posibles interacciones entre el material y las señales de microondas.

En la figura 2.8 se aprecia un supuesto punto de incidencia de la señal de microondas sobre la mezcla de concreto fresco (por supuesto que los puntos de incidencia son varios y estarán dentro de la forma del haz, patrón de radiación que se está generando por medio de los sensores dirigidos hacia la mezcla) y se considera un punto para ejemplificar los posibles caminos que puede tomar la energía aplicada a la mezcla; la energía puede penetrar parte de la mezcla o toda, puede ser dispersada al contacto con la mezcla o puede también ser absorbida evitando con ello su paso.

En la figura se aprecia una placa metálica sobre la que se apoya el soporte donde deposita la mezcla de concreto fresco (muestra) mediante ésta placa se promueve que la energía que haya logrado llegar hasta el fondo de la muestra (hasta el fondo), tenga un material que le ayude a reflejarse regresar a la muestra e intentar salir hacia el lado receptor donde sería captada por el sensor debidamente dispuesto para tal fin; el tránsito por el material también implica que pueda haber caminos que dispersen la energía y en todo momento existe la posibilidad de que el material absorba la energía lo suficiente como para ya no dejarla salir.

En ciertos momentos esto confunde un poco a los iniciados en el tema de las microondas, ya que al avisar que se tiene una placa metálica en el fondo para propiciar el rebote de la señal, implícitamente para ellos, es la prueba de que siempre se tiene un regreso de la señal; lo que se les olvida es que cuando el concreto ha iniciado el fraguado, y se reduce la humedad en el mismo, las rutas que seguían las señales de microondas hasta el fondo del material y hacia afuera, ya no existen, y la señal que se recupera va disminuyendo

conforme fragua, y al final, es sólo una pequeña parte de lo que inicialmente se arrojaba y se recuperaba (alrededor de los 4 mV) lo que se tiene en el lado receptor.

Hay que tener siempre presente, cual es la Frecuencia de Operación.

# CAPÍTULO TRES

## Sistemas de Microondas

Los sistemas de telecomunicaciones actuales resultan difíciles de entender sin el uso de las señales de microondas, así como resulta impensable no disponer de un horno de microondas para procesar o calentar nuestros alimentos.

Por una parte están los sistemas de comunicaciones que permiten el enlace de nuestros equipos de cómputo mediante una conexión a la red *WiFi*<sup>5</sup> hacia el resto del mundo.

Con esta red es posible acceder tanto a información necesaria así como a diferentes paginas de diversión, pero que pasa con la red *WiFi*; esta red opera actualmente a 2.4 GHz con una potencia que no rebasa los 50 mW y sin embargo, el alcance que tenemos es más que suficiente para nuestra oficina, casa o laboratorio; el comportamiento de la señal permite gozar de movilidad del equipo de computo sin tener que hacer modificación alguna a la red, (comúnmente se le conoce como ruteador al elemento que nos conecta a la red); la propagación de la señal permite que se tenga un enlace aún fuera de la línea de vista como tradicionalmente se tenía (concepto tabú en microondas), como requisito en las señales de microondas.

Ahora veamos el otro lado de digamos, la moneda. Cuando es necesario procesar o calentar los alimentos recurrimos al horno de microondas; el horno genera señales de microondas que están situadas en los alrededores de los 2.46 GHz, poseen una potencia, en un horno convencional actual, de 800 W (como mínimo); en el horno (Figura 3.1), las señales de microondas deben estar confinadas al interior del horno, debido a que estas señales si pueden dañar al ser humano. Cuál es la diferencia con las señales de *WiFi*? A primera vista cualquiera que no presuma de ser un experto en el tema de las microondas, nos puede decir que la diferencia es la potencia, aún cuando los hornos están ligeramente corridos en frecuencia, pero efectivamente la potencia marca la diferencia en la aplicación dada a las señales de microondas (Cook 1986).

---

<sup>5</sup> IEEE 802.11 b de acceso directo



Figura 3.1 Fotografía de un horno de microondas de tipo casero. Su potencia mínima es de alrededor de 800 Watts.

La composición del cuerpo humano es de más de un 70% de agua, las moléculas de agua resuenan a una frecuencia de 2.4 GHz, absorbiendo la energía de microondas cuando esta llega a ellas, es por ello que en lugares muy concurridos las señales de *WiFi* tienden a atenuarse o perderse debido a la absorción de la energía, lo que implica que las señales *WiFi* tienen una penetración menor en el cuerpo humano, y también de generar poco calor; las señales *WiFi* pueden ser absorbidas por el cuerpo sin daño aparente.

Las moléculas de agua tienen como frecuencia fundamental 2.4 GHz, por ello las ondas de microondas pueden hacer oscilar a las moléculas de agua cuando ambas coinciden; al oscilar las moléculas de agua generan fricción entre ellas y eso es lo que genera el calor.

Las moléculas de agua oscilan con la aplicación de microondas, porque son moléculas polares (tienen polaridad positiva y negativa, como los imanes) son moléculas asimétricas e inorgánicas. Las moléculas de agua que se tienen sobre la piel pueden interactuar con las señales *WiFi* y absorberlas, localmente, debido a su bajo factor de penetración y su baja capacidad para generar calor.



Figura 3.2 Sistema inalámbrico de conexión a internet. Modem. (Telmex.)

Las señales *WiFi* para la piel como ya se dijo, tienen un bajo factor de penetración; para algunos materiales las señales son capaces de penetrar con relativa facilidad, por ello es posible lograr conexiones confiables mediante el uso de esta red, sin embargo también tiene ciertas limitaciones debidas a la potencia que utiliza.

El ejemplo más cercano se tiene con los teléfonos celulares, sólo por mencionar una de las bandas de frecuencia de mayor explotación, la banda de los 1900 MHz. Esta banda comprende los límites que van de los 1850.0 MHz hasta los 1990.0 MHz Se toma como ejemplo esta banda por lo cercana (si se permite el término) que está a las frecuencias antes mencionadas de la red *WiFi* (IEEE); los aparatos celulares se desempeñan ajustando sus frecuencias de entrada y salida (Uplink/Downlink)<sup>6</sup> así como su potencia, con base a la demanda y a la relación señal a ruido (s/n) que registran en cada celda en la que son recibidos, en la que son atendidos; existe una pequeña confusión porque se piensa que las señales de estas celdas de servicio, son tan poderosas que pueden hacer llegar la señal aún dentro de los túneles de los trenes subterráneos (metro).

Es preciso aclarar que esto es posible, y sólo en tramos no muy separados entre dos estaciones, porque la compañía de telefonía celular, ha instalado antenas de servicio dentro de los andenes del metro, es por ello que se logra continuar la conversación, dentro de un cierto margen de distancia entre estaciones, cuando el convoy transita de una estación a otra. Figura 3.3 teléfono celular convencional.

---

<sup>6</sup> Los teléfonos celulares utilizan, al menos dos frecuencias para lograr una comunicación. Se denominan de Uplink/Downlink, por sus nombres en ingles. En cada banda ocupan dos intervalos de frecuencia. Como ejemplo se menciona la banda de los 410 MHz. En esta banda se fija como frecuencia de subida la porción de banda que va de los 410.2 a los 419.8 MHz. Para la frecuencia de bajada se utiliza la banda que va de los 420.2 a los 429.8 MHz.



Figura 3.3 Fotografía de un teléfono celular.

Las señales de microondas se pueden utilizar en las más diversas aplicaciones como ya se ha mencionado. Como ejemplo, se utilizan para detectar humedad en la producción de maní (King. 1992) (Nelson. May-2002) y en general en la industria alimentaria; esto es comprensible ya que presenta características de no destructibilidad, no contaminación y de no mutilación o muestreo de productos, de los cuales se interesa conocer su estado de humedad al momento de ser manipulados o procesados (Okamura 1996); las diversas pruebas que se le practican a los alimentos y en general a todo producto que se procese, están establecidos y se desarrollan en laboratorios especializados.

Un caso muy específico se tiene en el concreto. Muestras de concreto son tomadas directamente de la mezcla vertida en la obra y llevados al laboratorio para su posterior análisis (Calva 2007) siguiendo un protocolo bien definido.

Los análisis a muestras de concreto deben cumplir un cierto protocolo de secado, lo que los lleva a tomar turno de entrada ya que parte de ese protocolo incluye dejar secar la muestra al menos por 28 días bajo condiciones bien detalladas (Zoughi. Sept-1990).

Una forma de estimar la calidad del concreto es mediante su resistencia a compresión. Poder estimar cual será desde el principio la resistencia a compresión al final del fraguado. Esto puede ser posible si se relaciona la humedad de una mezcla con la resistencia, que estadísticamente presenta una mezcla de concreto maduro, de la cual se determinó previamente su humedad. De esta forma se tendría un estimado de la humedad al momento del vaciado y con ello un estimado también, de la resistencia al final del fraguado.

Por supuesto que esta forma de estimar la humedad y relacionarla con la resistencia final que va tener el concreto, no elimina las pruebas de laboratorio, ya que estas pruebas se

hacen sobre el concreto maduro (muestras en forma de cilindro), después de pasar su correspondiente proceso de fraguado. En todo caso ambas pruebas o sistemas de control de calidad pueden coexistir y ser complementarias.

### **3.0 Microondas**

La propagación de las microondas se sucede de un punto a otro bajo cuatro posibles rutas que son: directa; reflejada; cielo y ondas superficiales (Cook, 1986) (Connor 1986). Como es entendible aquí se tendrá especial atención en las ondas que arriban en modo directo y en el reflejado, aunque posiblemente tengan una afectación sobre el resultado las ondas de tierra que alcanzan al receptor en el lado opuesto. De hecho, en un enlace la ruta principal se supone que es la que se tiene en modo directo, y se planea para que así sea aunque como ya se vio pueden existir otras rutas; sin embargo, cuando se está aplicando una señal de microondas sobre un material, es más factible que la onda fuerte la de interés, sea precisamente la onda reflejada (Schoenbeck, 1992) y no así la de aplicación directa.

Las microondas viajan y son reflejadas por los objetos metálicos, y son parcialmente o casi totalmente absorbidos por algunos materiales dieléctricos; pueden pasar con ninguna absorción significativa a través de otros materiales dieléctricos (Cook 1986), como ejemplos de materiales susceptibles de absorber energía de microondas se tiene al agua, el carbono y los alimentos que contengan un cierto nivel de agua, y que por ende son buenos para absorber la energía de microondas; por el contrario, el vidrio la cerámica y la mayoría de los materiales termoplásticos permiten el paso de las microondas con ninguno o con un bajo nivel de absorción (Decareu 1986).

#### **3.1 Aplicación de las microondas.**

Se propone utilizar las microondas sobre el material, en este caso muy específico en concreto fresco, arrojando la señal de microondas sobre la mezcla en un cierto ángulo. Una parte de la energía alcanza la mezcla, parte de ella penetra la mezcla, y parte se dispersa al contacto con la superficie del concreto fresco; una buena parte de la energía rebota y llega hasta el sensor que está situado en un ángulo similar al de la antena (sensor); se espera que parte de la señal que logra penetrar la mezcla, logre nuevamente salir de la misma después de haber llegado hasta la base (platina), sobre la cual se depositó la mezcla de concreto (Daniels 2000) (Hashimoto 1986).

Un ejemplo de modo de aplicación de las microondas se tiene, cuando se dispone una pieza de concreto (losa) entre la fuente de microondas y el receptor de microondas.

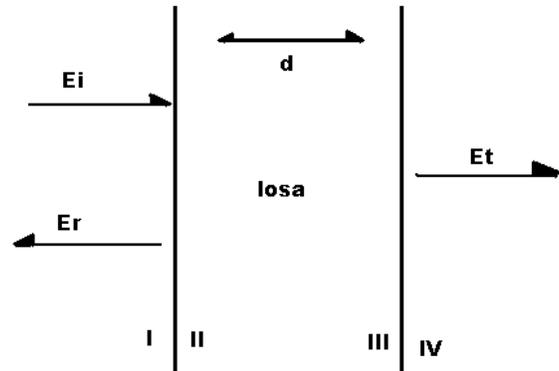


Figura. 3.4 La onda que llega a la losa puede ser reflejada y/o transmitida a través de ella.

En el dibujo de la figura.3.4, la onda viaja desde la antena del transmisor a la antena del receptor a través de dos medios, el del aire y el de la muestra (losa) (Decreton 1975). Como se aprecia, la reflexión ocurre en la interfase aire-muestra (I) y después se suceden múltiples reflexiones dentro de la losa, entre sus paredes. Aquí se puede introducir el coeficiente de reflexión que se puede señalar como  $r_{12}$  en I,  $r_{21}$  en II y  $r_{23}$  en III y el coeficiente de transmisión se señala como  $t_{12}$  en I,  $t_{21}$  en II y  $t_{23}$  en III. (Kharkovsky. 2001) El paso y reflexión de la señal se denota mediante el uso o trazado de rayos; lo anterior no implica que la energía viaje únicamente en los senderos que señala el rayo (traza), se va formando y desvaneciendo una nube en la dirección de propagación y alcanza a la losa en diferentes puntos, cercanos a donde idealmente llega el rayo principal.

## 3.2 Tecnología no destructiva

Las microondas como herramienta no destructiva, tienen sus inicios en la década de los 50's y aunque todavía no son muy reconocidas como una tecnología no destructiva, con el correr del tiempo se han ido consolidando en ese campo, con diferentes aplicaciones (Despres 1997) (Stoyan 1994) entre las que destacan la inspección de materiales dieléctricos (Sardos 1990).

Las mediciones que se hacen sobre este tipo de material pueden ser en contacto directo o no, dependiendo si se tiene acceso a un sólo lado del material o a ambos, lo que nos lleva a considerar el uso de técnicas con base en la *reflexión* o en la *transmisión*.

Las frecuencias que aparecen atractivas para utilizarse en aplicaciones consideradas como no destructivas, no cubren el total del espectro de las microondas, sólo algunas bandas son útiles. Entre las bandas útiles se tienen: S, L, C, X, Ku. El desarrollo de tecnologías con microondas nos lleva a lograr aplicaciones en tiempo real, con aplicaciones en campo cercano que involucran potencias que no superan los miliwatts, evitando así la interferencia por EMI (*Electromagnetic Interference*, por sus siglas en inglés).

### 3.3 Radiación

Cuando se está utilizando energía para radiar, es posible reconocer dos tipos de radiación: radiación ionizante y radiación No ionizante. La energía de microondas utilizada se considera del segundo tipo No ionizante, si a esto agregamos que la potencia es reducida (mW) y que se aplica en campo cercano, se estarán evitando riesgos personales y de cualquier tipo de EMI.

Aún cuando se utilizan potencias bajas (alrededor de los 100 mW como máximo), cuando se aplica una señal de microondas a una mezcla o muestra de la misma, esta puede experimentar un cambio o una alteración, de manera momentánea. Esta momentánea modificación es admisible si se sucede en las partes de agua contenida en el material.

Con la radiación de microondas la transferencia de energía no se produce por convección o conducción, como en la calefacción convencional, sino por pérdidas dieléctricas. La propensión de una muestra a calentarse mediante microondas dependerá de sus propiedades dieléctricas, el factor de pérdida dieléctrica ( $\varepsilon''$ ) y la constante dieléctrica ( $\varepsilon'$ ).

Su cociente, conocido también como Tangente de pérdida se expresa:

$$\varepsilon'' / \varepsilon' = \operatorname{tg} \delta \quad (3.1)$$

El numerador en la Ec. 3.1, es el factor de disipación (factor de pérdida); para valores grandes de este parámetro, indican una buena susceptibilidad a la energía de microondas. Como guía general, compuestos con alta constante dieléctrica tienden a calentarse rápidamente, mientras que las sustancias poco polares, o compuestos que no poseen momento dipolar y compuestos cristalinos altamente ordenados, absorben pobremente la radiación de microondas.

### 3.4 Coeficiente de transmisión.

El coeficiente de transmisión se tiene cuando se consideran medios con discontinuidades en la ruta de propagación de la onda; el coeficiente de transmisión relaciona la amplitud de una onda transmitida respecto de la amplitud de la onda incidente. El coeficiente de transmisión está estrechamente relacionado con el coeficiente de reflexión. Las ondas electromagnéticas experimentan transmisión y reflexión parcial, cuando el medio por el que viajan cambia bruscamente.

$$T = \frac{|j_{transmitida}|}{|j_{incidente}|} \quad (3.2)$$

Como ejemplo de un sistema de transmisión recepción se tiene el siguiente diagrama a bloques. Figura 3.5

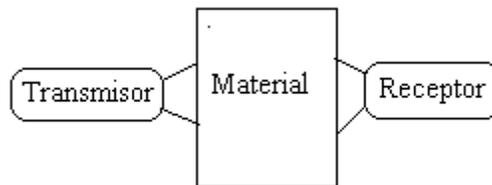


Figura 3.5 Diagrama a bloques de un sistema de transmisión y recepción con una muestra sólida de material entre ambos, teniendo acceso a ambos lados del material.

Aplicando el sistema de microondas se realizan básicamente dos mediciones, que consisten en:

- 1) Cuando se tiene ausencia de elemento de interés o material que interfiere la ruta electromagnética principal. (Prueba en vacío)
- 2) Presencia de elemento de interés o material que interfiere la ruta electromagnética principal. (Prueba a carga plena)

Para el primer caso se tiene una intensidad  $I_0$ , (de incidencia) en el medidor de intensidad en el extremo opuesto al generador o fuente de energía electromagnética; la intensidad en este caso se puede considerar como la máxima intensidad que podrá ser recibida en el lado receptor.

En el segundo caso, se tiene una intensidad menor en el medidor una  $I$ , (de transmisión) menor, esto debido a la afectación que hace el material que interfiere a la señal electromagnética que incide sobre ella, y no permite un libre paso; la cantidad que logre pasar dependerá de la absorbencia que tenga la muestra puesta en la ruta principal de la energía electromagnética.

La absorbencia se define como:

Absorbencia.-Es igual al logaritmo del inverso de la transmitancia con signo cambiado.

$$A = -\log(T) \quad (3.3)$$

A.- Absorbencia

T.- Transmitancia

La transmitancia es una relación directa que se define como:

$$T = I/I_0 \quad (3.4)$$

I – Transmistida

$I_0$  – Incidente.

Mediante estas sencillas expresiones es posible determinar algunas de las características del material que se sitúa entre la fuente de señal electromagnética y el receptor de la misma; considerando como punto máximo de recepción, cuando no existe ninguna interferencia entre ambas.

De igual manera es posible relacionar estas expresiones con la expresión de la ley de:

Lambert Beer o ley de Bourguer

Esta ley establece que la absorbencia está directamente relacionada con las propiedades intrínsecas del material, con su concentración y con la longitud de la trayectoria del haz de radiación al atravesar la muestra.

Se expresa como:

$$A = -\log_{10}(T) \quad (3.5)$$

El coeficiente de reflexión describe la relación entre la amplitud de una onda reflejada respecto de la amplitud de la onda incidente; igualmente, el coeficiente de reflexión está estrechamente ligado con el coeficiente de transmisión.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3.6)$$

$\Gamma$  = Coeficiente de reflexión. Es un número complejo  
 $Z_L$  = Impedancia de carga al final de la línea  
 $Z_0$  = Impedancia característica de la línea de transmisión.

El coeficiente de reflexión puede desplazarse a lo largo de la línea de transmisión, hacia el generador, en ese momento se considera negativa.

Su valor absoluto puede calcularse a partir del coeficiente o razón de onda estacionaria S.

$$|\Gamma| = \frac{S-1}{S+1} \quad (3.7)$$

### 3.5 Modelo de pérdida de energía de microondas por agua.

Los sistemas de microondas suelen ser más sensibles a ciertas frecuencias y dimensiones de antenas, así como, a ciertas elevaciones de sus antenas. Por ello es que se propone un modelado del comportamiento entre el agua y la energía de las señales de microondas, visto esto desde el ángulo de los enlaces. La manera en que se puede ligar la señal de microondas con la humedad puede ser, por parte de las pérdidas que le ocasiona el agua (la lluvia), a la señal.

La mayor pérdida por agua que se conoce, es cuando las señales se acercan a la frecuencia de resonancia del agua 2.4 GHz. Y la receta sería alejarse lo suficiente de esa frecuencia, sin embargo eso no asegura una recepción sin problemas.

Puedes ser que al leer esta obra se dé la impresión de que es necesario un modelo que relacione el agua, sola, con las señales de energía de microondas. Sin embargo este debe ser un caso muy especial, baste recordar que en las mezclas de concreto (motivo de esta obra) intervienen además del agua, el cemento, por supuesto, los agregados tanto suaves (arena) como los duros (grava). Y es en su conjunto que se logra después, de interactuar estos cuatro elementos una mezcla propia de las construcciones.

Si momentáneamente se deja este breve desvarió, acerca de cómo está formada una mezcla de concreto básica, y se aísla al agua junto con la energía de microondas, con la finalidad de intentar una descripción de su interacción. Saber cómo influye el agua en las microondas y viceversa.

Lo primero que salta en este ejercicio es que el agua causa pérdidas en la señales de microondas, por lo que, se puede seguir dicha pista para plantear un modelo básico de interacción de las microondas con el agua.

Primero, hay que considerar que este binomio agua-microondas, se da cuando existe un enlace (Transmiso-Receptor) en el espacio libre, ya que es ahí cuando se puede esperar un asilamiento de los demás elementos que interesan.

Si se tiene que las pérdidas en el espacio libre se pueden estimar por la expresión.

$$L_{fs} = \frac{\text{potencia recibida por una antena isotropica}}{\text{Potencia Transmitida por una antena isotropica}} \quad (3.8)$$

Se tendrá por lo tanto una pérdida de energía de microondas debido o motivado por la lluvia.

Si se considera que las pérdidas de energía en el espacio libre  $L_{fs}$ , estarían dadas en función de la frecuencia de operación de la señal de microondas; por la distancia de viaje, y por un factor de elevación de las antenas utilizadas en el enlace. El factor de elevación se calcula con base a las curvas de absorción.

La manera en que se relacionarían, todos esos factores de interés, sería mediante la expresión de las pérdidas de energía en el espacio libre  $L_{fs}$ , por la potencia transmitida por una antena isotrópica  $P_t$ . Es inevitable referirse a la potencia de transmisión y por lo mismo al *EIRP* (por sus siglas en inglés) que se estaría manejando.

$$\text{Potencia Transmitida} = \frac{EIRP}{\text{Ganancia de la antena}} \quad (3.9)$$

Entonces, en el modelo se propone la inclusión de la frecuencia de operación; ganancia de la antena; apertura de las antenas y por supuesto de la potencia que se utiliza en la transmisión (Martin 1978).

$$P_r = P_t \frac{G}{L_{fs}} \quad (3.10)$$

$P_r$  --- Potencia Recibida  
 $P_t$  --- Potencia Transmitida  
 $G$  --- Ganancia de la antena  
 $L_{fs}$  --- Pérdidas en el espacio libre

Indudablemente que el modelo deberá incluir un factor de vista, factor que tiene su origen o es relacionado directamente con el grado de inclinación de las antenas, el cual puede ser determinante en una transmisión recepción bajo condiciones de lluvia. El modelo pudiera verse asistido o complementado por la inclusión de un modelo regional de lluvia que permitiera hacer las debidas correcciones, por región.

La ganancia de una antena estará determinada por la expresión siguiente

$$G = z \frac{4\pi f^2 A_t}{c^2} \quad (3.11)$$

$z$  – factor de eficiencia de apertura de la antena  
 $G$  – Ganancia de la antena  
 $f$  – frecuencia de operación  
 $c$  – velocidad de la luz  
 $A_t$  – apertura de la antena

Las pérdidas en el espacio libre se pueden estimar mediante la expresión siguiente.

$$L_{fs} = \left( \frac{4\pi f D}{c} \right)^2 \quad (3.12)$$

Si se sustituyen en ec. 3.10 las ecuaciones 3.11 y 3.12 se tendrá

$$P_r = P_t \frac{\left( \frac{z 4\pi f^2 A_r}{c^2} \right)}{\left( \frac{4\pi f D}{c} \right)^2} \quad (3.13)$$

Lo que da la expresión

$$P_r = P_t \frac{z A_r}{4\pi D^2} \quad (3.14)$$

Ahora, teniendo en consideración la ganancia de las dos antenas; antena transmisora y antena receptora. La pérdida total entre transmisor receptor estará expresada mediante la ecuación siguiente.

$$L = \frac{Lfs}{G_t G_r} \quad (3.15)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.12 y 3.11

$$L = \left(\frac{4\pi f D}{c}\right)^2 \left(\frac{c^2}{z_t 4\pi f^2 A_t}\right) \left(\frac{c^2}{z_r 4\pi f^2 A_r}\right) \quad (3.16)$$

Simplificando se obtiene

$$L = \frac{D^2 c^2}{z_t A_t z_r f^2 A_r} = \left(\frac{cD}{f}\right)^2 \frac{1}{z_t A_t z_r A_r} \quad (3.17)$$

Por simplicidad de datos se prefiere considerar el diámetro de cada antena en vez de la apertura de cada una de ellas; se tendrá por resultado la siguiente expresión:

$$L = \left(\frac{cD}{f}\right)^2 \frac{1}{z_t d_t^2 z_r d_r^2} \quad (3.18)$$

Y finalmente, si se agrega el factor de vista de la antena  $f_v$ , se tendrá una expresión que estará ligando, las pérdidas de energía de microondas debidas a la interacción con el agua; la expresión finalmente propuesta sería la siguiente.

$$L = \left(\frac{cD}{f}\right)^2 \frac{1}{z_t d_t^2 z_r d_r^2} + f_v \quad (3.19)$$

L --- Pérdidas

c --- velocidad de la luz

D --- distancia entre antenas

f --- frecuencia de operación

$f_v$  --- factor de vista

$d_t$  --- diámetro antena transmisora

$d_r$  --- diámetro antena receptora

$z_r$  --- eficiencia de la apertura de la antena receptora

$z_t$  --- eficiencia de la apertura de la antena transmisora

La expresión matemática relaciona la energía de microondas con las pérdidas que le ocasiona el agua; el modelo matemático como primer modelo, es aceptable. Sin embargo faltaría incluir un factor que definiera la intensidad de la lluvia o saturación de agua.

Lo realmente faltante en esta expresión es la participación de los demás elementos que integran una mezcla de concreto. Mezcla que se utiliza en cualquier construcción, y que al menos contiene otros tres integrantes. Los cuales reaccionan con el agua y la consumen en mayor o menor medida. Por lo que se puede ir descartando este tipo de modelos, que sólo consideran la acción de la energía de microondas y el agua.

En cualquier otro ámbito en el que se pueda aislar, la acción del binomio agua microondas sin afectar los demás fenómenos físicos, de una aplicación en especial. Este puede ser un buen modelo matemático.

### 3.6 Antenas / sensores

Las antenas piramidales (Sensores/cornetas/lentes) coliman la energía electromagnética en un haz estrecho y dirigible lo que permite que las condiciones de campo-cercano sean cumplidas a una corta distancia desde el transmisor. Permitiendo que las dimensiones de la muestra permanezcan razonables y se minimice la difracción en las orillas.



Figura 3.6 Fotografía de uno de los sensores utilizados en el laboratorio para aplicar la señal de microondas sobre la muestra de concreto fresco.

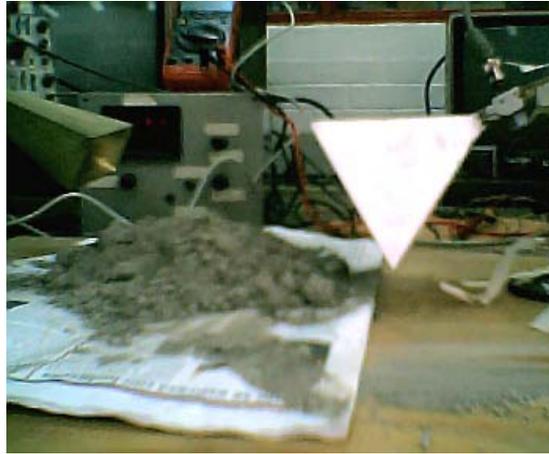


Figura 3.7. Fotografía de los dos sensores aplicados a la mezcla de prueba.

En las figuras 3.6 y 3.7 se parecían a las antenas dirigidas hacia las muestras de concreto; para esta aplicación se consideran más como sensores de señales que como antenas sin embargo su diseño y fabricación no recibe ninguna alteración por la aplicación que se le de.

# CAPÍTULO CUATRO

## **Estimación de la humedad en concreto fresco.**

En ésta sección se plantea el diseño y el desarrollo de un sistema capaz de estimar el nivel de humedad, mediante la detección de un voltaje recolectado de una muestra de concreto, a la cual se le aplicó una señal de microondas.

Habiendo obtenido el valor de voltaje proveniente de la mezcla de concreto, este se asocia con las graficas, previamente generadas en las pruebas de laboratorio de resistencia a compresión. Las pruebas realizadas en muestras de concreto (fraguado a 28 días y siguiendo el protocolo de laboratorio de pruebas de rompimiento), se comparan contra la relación agua/cemento y con base en ésta relación, se puede suponer estimar, la resistencia que finalmente tendrá el concreto.

Aquí se puede centrar toda la atención, debido a que es la presentación, de los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación. Sin embargo, es aconsejable dedicar un espacio en ella para presentar los resultados obtenidos previamente, por colegas dedicados al estudio del concreto, en especial en el trabajo que aquí se cita (Solis 2008), cuya parte medular es el análisis que hacen del concreto. Hacen un análisis destructivo considerando la relación agua / cemento, y la resistencia a compresión. La que finalmente obtiene el concreto mismo; aunado a ello, consideran las fuentes de donde provienen los diferentes elementos que integran una mezcla; elementos que finalmente impactan en la resistencia a compresión desarrollada por el concreto.

En su investigación, hacen énfasis en la resistencia a compresión, no por si misma sino porque se demuestra la dependencia que se presenta, con la relación agua/cemento en la preparación del concreto.

Resulta sano y conveniente, presentar primero los resultados que los colegas obtuvieron, porque se percibe que es una forma de corroborar por terceros, que la aplicación que inicialmente se propuso en ésta investigación, y que se llevó hasta lograr los resultados aquí plasmados es correcta, y que es posible sustentarla no solamente con los resultados propios, ya obtenidos sino además, con los resultados de investigaciones afines a esta, como la que aquí se hace referencia de los citados colegas.

Sus resultados concluyeron lo que se planteo desde un principio, que la resistencia a compresión está fuertemente influenciada, por la relación agua/cemento que tiene desde inicio el concreto fresco; por ello es posible, mediante la aplicación de señales de microondas, asociar un nivel de humedad con un voltaje y con la resistencia a compresión, que finalmente obtiene el concreto maduro.

También se hace mención de un trabajo hecho con pulso ultrasónico. En el se realizaron diversas pruebas con diferentes fuentes de elementos, y con diferentes relaciones agua/cemento. Se hace la aclaración de que este método, se utiliza sobre concreto ya fraguado (con al menos 28 días de edad), sobre el cual se posicionan los sensores para aplicar el pulso ultrasónico.

Es importante esta prueba y su tecnología porque al finalizar sus pruebas, concluyeron que la variable que más influye en la resistencia a compresión final del concreto, es el agua. El agua contenida en la relación inicial de agua/cemento que se utilizó para cada una de las pruebas a las que se sujetó el concreto fresco.

#### **4.0 Técnicas para obtener un estimado de la resistencia a compresión del concreto.**

Con la presentación de estos estudios se le da un mayor énfasis a lo que ya sabemos acerca de la humedad contenida en las mezcla de concreto fresco, que existe una relación directa del nivel de humedad contenido en una mezcla de concreto fresco, y la resistencia a compresión que finalmente obtendrá dicha mezcla, cuando llegue a ser un concreto maduro.

Tradicionalmente se muestrea el concreto entregado en sitio, y se forman los cilindros de concreto. Posteriormente se sigue el procedimiento tradicional de inmersión en agua, seguido del secado por los restantes 28 días, para luego pasar a las pruebas de rompimiento de cada uno de los cilindros. Cumpliendo con lo anterior se obtiene el valor de la resistencia a compresión máxima que soporta cada cilindros; se puede probar la calidad del concreto después de sus 28 días de fraguado, cuando el concreto ha alcanzado una fuerza o resistencia de al menos un 80% - 90% del total de la resistencia que finalmente alcanzará.

## **4.1 Determinación de la resistencia a compresión del concreto mediante rompimiento de la muestra.**

Como ya hemos mencionado reiteradamente una de las características más importantes del concreto es su resistencia a compresión, y determinar esta resistencia lleva a una serie de pruebas de laboratorio (principalmente el rompimiento de cilindros formados con mezcla de la obra previamente fraguados siguiendo un protocolo bien establecido) basan su operación en la toma de muestras del concreto recién vaciado, algunas de las muestras son utilizadas al momento, en el lugar de vaciado del concreto, en la llamada prueba del cono de *Abrams*, con esta prueba se busca estimar el revenimiento que tiene la mezcla, y así saber su trabajabilidad. Que tan fácil se va a deslizar en toda la estructura con la que interactúa, como rellena todos los huecos.

Las muestras que son llevadas al laboratorio generalmente siguen un proceso de fraguado de 28 días, bajo condiciones controladas de estudio, para posteriormente someterlas a un esfuerzo mediante el cual se determina cual es su punto de rompimiento, y es aquí donde se corrobora si la mezcla diseñada, cumplió o no con lo solicitado al proveedor del concreto. Esta es una prueba puramente destructiva, y definitiva.

Se comprueba la calidad de lo recibido después de completado el fraguado. Estas pruebas dan certeza al constructor y al usuario de la edificación sin duda alguna.

Al plantear nuevas pruebas o métodos de prueba, no se espera que los nuevos estudios eliminen a las pruebas tradicionales como la de rompimiento al esfuerzo, por supuesto que no. Todas las pruebas que ya se tienen, forman parte de un control de calidad que debe ser observado meticulosamente, sin desvíos ni composturas, acatando los protocolos establecidos para la consecución de todas las pruebas, ya que todo redunda en una construcción segura, confiable.

Para llegar a las propuestas de estimación de la resistencia a compresión, en relación de la humedad en mezclas de concreto fresco, es preciso primero, establecer las ligas o conexiones entre la mencionada resistencia a compresión del concreto, y la cantidad de agua suministrada en el concreto de acuerdo a una relación agua/cemento. Relación que es señalada como responsable en su mayor parte, de la mencionada resistencia a compresión.

Para llegar a esta relación se parte de estudios serios, de grupos de investigación acreditados, que permitan basar parte de ésta investigación en sus resultados los cuales son acreditados con las publicaciones que han hecho en revistas reconocidas en el área científica.

En algunos estudios del concreto se han establecido ciertos criterios para verificar que la relación agua/cemento, influye en la resistencia a compresión del concreto; se puede presentar la investigación siguiendo la metodología del diseño factorial de tres factores, donde la variable dependiente es la resistencia a compresión del concreto, dada en Kg/cm<sup>2</sup> y situando como variable independiente a la relación agua/cemento, la cual se puede variar según la experiencia, entre los intervalos de: 0.4, 0.5, 0.6 y 0.7; a la proporción de grava/arena se le puede fijar en uno de cuatro posibles niveles, que pudiera ser cualquier otro pero se acostumbra por experiencia, utilizar alguna de las relaciones que a continuación se enlistan:

g / a
0.82
1.0
1.22
1.5

Banco de origen de los elementos.

En algunos estudios resaltan el banco de origen de cada elemento integrante de la mezcla. Éste es un punto importante (aunque no determinante como se verá más adelante) ya que se está tomando en cuenta el lugar, en donde se está preparando el concreto; en su investigación se toman seis lugares diferentes o canteras de extracción dentro de lo que comprende el área de la península de Yucatán, México (Solis 2008).

Un estudio más completo sería como el que se propuso originalmente al inicio de ésta investigación, en la que se estaba planeando considerar los bancos de origen de los cuatro elementos básicos del concreto, en cinco diferentes zonas geográficas de la república, con lo que se abriría el abanico de posibilidades. Esto debido a que se tendrían bancos del norte, del sur del centro del sur y del sureste de la república, sin embargo esto, no fue posible debido a la falta de apoyo institucional.

En el trabajo de *Romel Solis-carcaño* (Solis 2008), en el que relaciona la fuerza de compresión del concreto, debido a efectos combinados de los agregados, en especial de la relación agua cemento, se propone un diseño factorial para poder evaluar los efectos individuales de cada variable independiente sobre la variable dependiente, además de los efectos combinados de las variables independientes; de esta forma aseguran ellos, se pueden evaluar dos tipos de efectos sobre la variable dependiente: efectos principales

producidos por cada una de las variables independientes, y los efectos que producen sobre esta, la combinación de dos o más de las variables independientes.

Para el análisis, propusieron el siguiente modelo matemático:

$$R_{ijk} = \mu + a_i + g_j + b_k + (ag)_{ij} + (ab)_{ik} + (gb)_{jk} + (agb)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (4.1)$$

En donde:

R es la resistencia

$\mu$  es la media global

a, g y b son los efectos de las relaciones agua/cemento (para este artículo: a/c); grava/arena (para este artículo: g/a); banco de procedencia.

$\varepsilon$  es el error.

La metodología que siguieron durante los experimentos en el trabajo referido fue:

- 1 Procedimiento de compactación (Varillado).
- 2 La edad en que las probetas fueron probadas a compresión (28 días).
- 3 El procedimiento de curado de las probetas. Estándar.
- 4 El mismo tipo de cemento empleado durante todas las pruebas.
- 5 Utilización de los mismos equipos
- 6 Utilización del mismo personal técnico

Como se puede apreciar, se siguió un protocolo sencillo pero que sirve para asegurar la confiabilidad y uniformidad de las pruebas realizadas.

Para cada banco de procedencia se utilizaron relaciones agua/cemento de:

0.4; 0.5; 0.6 y 0.7

En total se tuvieron seis bancos de procedencia de los elementos agregados al concreto.

En la siguiente tabla se resume parte de los resultados que ellos obtuvieron en sus pruebas de laboratorio, pruebas todas ellas destructivas, y que se ven reflejados en el

artículo que publicaron (Solis 2008) y que por simplicidad y facilidad sólo se tomó parte de esa información.

**Tabla 4.1**

Resistencia media (Kg/cm<sup>2</sup>) por cada tratamiento.

	Relación W/c			
	0.4	0.5	0.6	0.7
Banco				
A	334	295	255	237
B	323	306	275	246
C	283	279	275	246

Sin tener que realizar grandes análisis sobre los resultados obtenidos, se puede apreciar en la tabla 4.1, cómo es que la resistencia media a compresión va disminuyendo, cuando la relación agua cemento (W/c) en la mezcla, se incrementa.

**Tabla 4.2**

Media y desviación estándar de la resistencia (Kg/cm<sup>2</sup>)

Relacion W/c	Media	Desviación estándar
0.4	335	22
0.5	305	20
0.6	262	20
0.7	237	14

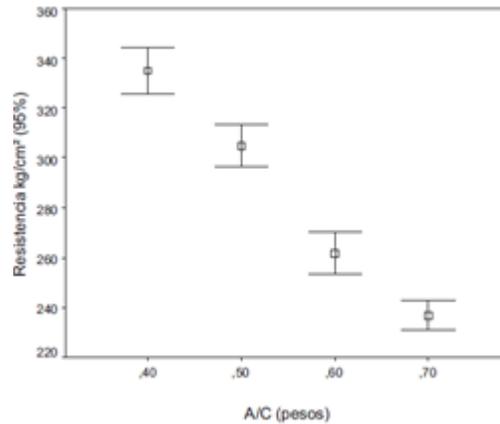


Figura 4.1 Resistencia media según la relación agua cemento (W/c), que tiene asignada la mezcla. (Solis 2008)

En la figura 4.1, se muestra parte de la estadística que se elaboró por parte de los autores del artículo aquí citado. En esta figura se aprecia gráficamente los valores de las resistencias medias a compresión, para cada una de las relaciones agua cemento consideradas en las pruebas de laboratorio; como dato adicional, se incluye un intervalo que ellos llaman de "confianza", que comprende un 95%, y se enfatiza el hecho de que existe una clara diferencia entre las medias obtenidas según la relación agua / cemento que tiene el concreto.

Los colegas también realizan algunos otros análisis con los resultados obtenidos en sus pruebas de laboratorio, como ejemplo está el análisis de varianza, en ella denotan que en promedio, la resistencia a compresión del concreto difiere para los distintos valores de agua cemento, y aun cuando el banco de procedencia crea ciertas diferencias, lo esencial es que la relación agua/cemento, es el factor determinante que finalmente afecta la resistencia del concreto.

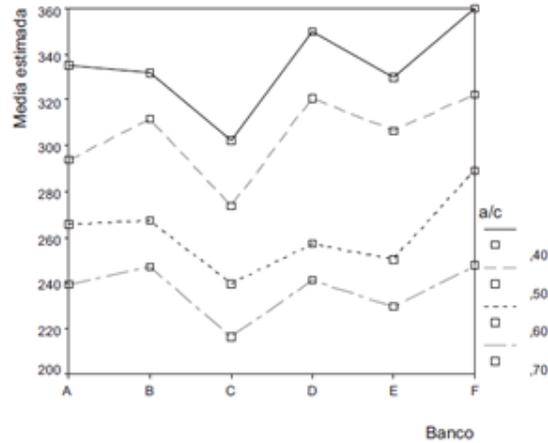


Figura 4.2. Resistencia media (Kg/cm<sup>2</sup>) respecto de la relación agua/cemento y banco de procedencia. (Solis 2008)

En la figura 4.2, se tiene una grafica de la resistencia a compresión promedio, contra el banco de origen de los agregados, para una cierta relación agua/cemento; en esta grafica se muestra como la mayor resistencia a compresión que se obtiene en la pruebas, es para la relación de: 0.4 y se asocia este resultado con el banco etiquetado como F.

Finalmente, se llega a la conclusión que la teoría de *Abrams* (Abrams 1918) en el sentido de que el factor que mayor influencia tiene, sobre la resistencia a compresión en el concreto, es la relación agua/cemento, es correcta.

Se hace énfasis en el hecho de que, en la realización de la investigación a la que se está haciendo referencia, y de la cual se están extrayendo los datos, se llevaron a cabo muestreos del concreto de manera tradicional, no se involucro ningún instrumento, o técnica fuera de lo estipulado en las pruebas de rompimiento a compresión, que se hacen en laboratorios tradicionales dedicados a pruebas en concreto. Ello se aprecia en el protocolo que se siguió durante la realización de las pruebas al concreto.

## 4.2 Utilización de un Pulso ultrasónico para estimar la calidad del concreto.

Se utiliza un pulso ultrasónico sobre concreto, para saber cual es la velocidad de propagación en él, para después asociarla con la resistencia a compresión de ese concreto. Éste es un modo no destructivo de verificar la calidad del concreto. ÉS una técnica aplicable sobre el concreto solido. La idea es relacionar la velocidad de propagación del pulso ultrasónico con todas las características del concreto, como las relaciones previamente establecidas de agua/cemento, grava/arena y fuente de procedencia o banco de procedencia de cada uno de los agregados del concreto. Con la información obtenida es posible lograr un estimado de la calidad o resistencia del concreto, utilizando para ello una formula. Expresada como Ec. 4.2 (Solis 2008) (Neville 1963) (Solis 2004).

Lo ideal sería obtener un cierto valor, un número o un nivel que por sí mismo proporcione certeza en cuanto a la calidad del concreto, sin embargo es válido el obtener una correlación entre el estado del concreto y la velocidad del pulso ultrasónico, como es actualmente el caso.

En la tabla siguiente se aprecia una propuesta (Malhotra 1985) de los posibles niveles en los que un concreto puede estar cuando finalmente se considera que es ya, un concreto solido.

**Tabla 4.3**

Clasificación del concreto según la velocidad ultrasónica

Velocidad ultrasónica, $v$ (m/s)	Clasificación del concreto
$v > 4575$	Excelente
$4575 < v < 3660$	Bueno
$3660 < v < 3050$	Cuestionable
$3050 < v < 2135$	Pobre
$v < 2135$	Muy pobre

En los trabajos relacionados con el tema se busca asociar la calidad del concreto (resistencia a compresión principalmente), con los agregados del concreto, y el uso de la velocidad del pulso ultrasónico no es la excepción (Sturup 1984); observando los procesos del fraguado y curado del concreto, se llevan a cabo las pruebas que constatan la correlación existente entre el pulso, y los modelos matemáticos (Castellanos 1985) que ayudan a estimar la calidad del concreto, aún cuando los resultados obtenidos se dividan por regiones, se logra obtener una buena correlación que llega a ser superior a 0.94 como se aprecia en la figura siguiente.

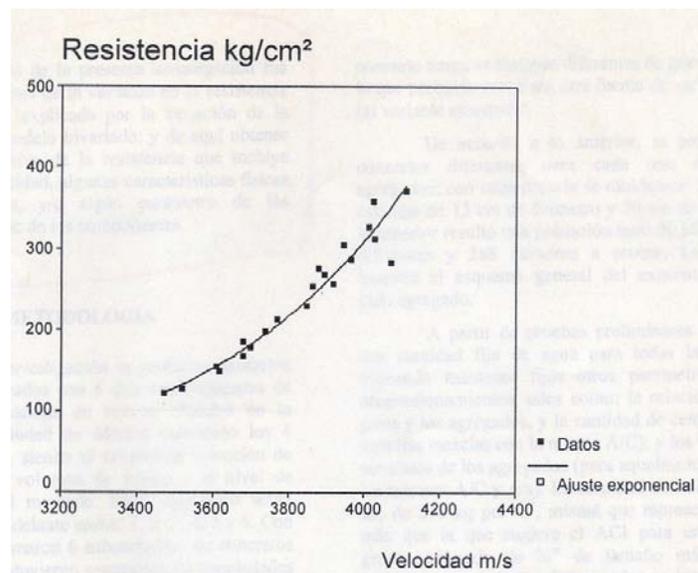


Figura 4.3. Datos y curva de ajuste velocidad-resistencia para un concreto preparado con materiales de una región conocida. (Castellanos)

En la figura 4.3, se aprecia una tendencia a obtener una mayor velocidad de pulso ultrasónico, cuando la resistencia a compresión del concreto es mayor; el estudio se realizó para un cierto tipo de materiales de una región en específico de la península de Yucatán, México y la duda por supuesto surge cuando no es un sólo material el que se controla.

En diferentes ocasiones se ha intentado encontrar la correlación entre la resistencia a compresión del concreto, y alguna aplicación que muestre un nivel del cual sea posible tomar como referencia, para estimar la resistencia a compresión de otros concretos, de los cuales no se tenga un conocimiento amplio de su preparación; también se intenta obtener mayor información, al desarrollar y aplicar algunos modelos matemáticos con los cuales se busca tener, la correlación que ayude a generar una herramienta más, de la cual poder echar mano para conocer de la calidad de un concreto.

La intención final del trabajo de Solis Romel "*Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad del pulso ultrasónico y un índice de la calidad de los agregados*" (Solis, 2004), es lograr un modelo matemático para predecir la resistencia con base en la varianza de la resistencia, y de la velocidad del pulso ultrasónico. Se remarca el hecho de incluir dentro de las consideraciones, algunas características físicas de los agregados y/o algún parámetro que tenga que ver con el proporcionamiento de los componentes que integran la mezcla. Finalmente llega a ser una pieza de concreto con todas sus características de resistencia.

En la metodología que siguieron para la preparación de las pruebas de laboratorio, aseguran haber utilizado seis diferentes agregados, de bancos de procedencia dentro de la periferia de la ciudad de Mérida Yucatán, México; se mantuvieron las propiedades elásticas de los agregados. Se formaron seis subgrupos o subconjuntos, dentro de éstos se encontraron que las propiedades elásticas de los agregados, no introdujeron varianza a la velocidad del pulso ni a la resistencia a compresión.

Se prepararon mezclas de concreto con cuatro relaciones agua/cemento (W/c) a saber: 0.4, 0.5, 0.6 y 0.7. Además prepararon concretos con cuatro relaciones grava/arena (g/a) a saber: 60/40, 55/45, 50/50 y 45/55 en por ciento. Con ello se obtiene una cobertura que va de las mezclas muy "gravosas" hasta las mezclas plásticas cercanas al mortero.

Se procuró mantener la misma cantidad de agua, sin embargo se reporta que de los seis subconjuntos, en cuatro de ellos se tuvo que incrementar el agua en cantidades necesarias para lograr que los componentes que integran el concreto, se mezclaran adecuadamente y obtener así mezclas homogéneas. Lo anterior se debió principalmente a que eran mezclas en las que se tenía una mayor riqueza de agregados suaves (arena).

El curado de los cilindros (para pruebas destructivas a rompimiento) lo llevaron a cabo siguiendo el proceso de siete días en inmersión, y posterior a estos se dejaron al aire por tres semanas; cuando se cumplieron los 28 días de edad del concreto, se aplicó la prueba de medición de la velocidad a los cilindros usando transductores de onda compresional de 54 KHz, los que se acoplan al equipo medidor de pulso.

Posterior a dicha prueba y siguiendo sus protocolos se llevaron a cabo las pruebas de rompimiento.

Para los datos obtenidos en su investigación propusieron que el mejor modelo para pronosticar la resistencia estaría en función de la relación agua/cemento, y un índice de calidad definido por ellos, el modelo final de predicción de la resistencia resulto ser:

$$R = 0.25V - 33.058IC + 1.795A - 904.35 \quad (4.2)$$

V-velocidad del pulso

IC-índice de calidad de los agregados

A-agua

Finalmente se deja que influyan todos los elementos considerados en las mezclas, con sus debidas proporciones, quedando demostrado que el factor más importante para que exista una correlación, entre la velocidad del pulso ultrasónico y la resistencia a compresión del concreto, es la variación en la relación agua/cemento. La cual se considera como mayormente responsable, de la variación en la estructura porosa del concreto y de su resistencia a la compresión.

Se considera este trabajo de Solis Romel (Solis, 2004), debido a que menciona la relación existente, entre la cantidad de agua utilizada en la relación agua/cemento de cada preparación, y de la resistencia a compresión que finalmente se obtuvo, al realizar el rompimiento de cada uno de los cilindros. Además de que al final concluye, que lo único que realmente influye en la resistencia a compresión y en el pulso ultrasónico, en modo significativo, es precisamente la relación agua/cemento, y que los agregados tienen poca o nula influencia en el resultado final de la calidad, que se espera del concreto de joven, a maduro.

Las pruebas, por supuesto que se hicieron sobre los cilindros de concreto cuando ya había concluido el periodo de fraguado del concreto, al menos 28 días de edad.

Las pruebas tuvieron verificativo en la ciudad de Mérida Yucatán México, y reiteran que las mezclas se diseñaron y formaron con base en los agregados encontrados en la región que comprende a la ciudad de Mérida.

### 4.3 Aplicación de señales de microondas con fines no destructivos en la determinación del nivel de humedad en concreto fresco.

Una manera eficiente sin muestreo, rápida y no destructiva de conocer un estimado de la futura resistencia a compresión del concreto fresco, se puede lograr mediante la aplicación de una señal de microondas, siguiendo el método de reflexión, y relacionando la señal obtenida (después de interactuar con la mezcla) con los resultados previos, (que se basan en el rompimiento de las muestras obtenidas previamente en mezclas similares de concreto) que se presentan en estudios, que relacionan precisamente la resistencia a compresión del concreto, y la humedad que tiene la mezcla cuando es vaciada en el lugar de la construcción. (Por esta razón es que primero se presentaron los trabajos de investigación de los compañeros de la Universidad de Yucatán).

Se tienen algunos ejemplos de cómo es que afecta a la resistencia a compresión del concreto, la cantidad de agua que tiene el concreto fresco al inicio del proceso; porque la resistencia a compresión final se ve afectada, por la relación agua / cemento con la que fue diseñada la mezcla de concreto (Solis, 2008).

Se está hablando de aplicar señales de microondas sobre concreto fresco recién vaciado, no sobre concreto que está ya fraguado, o en proceso avanzado de fraguado, cuando ha alcanzado características visibles de fortaleza.

Con las señales de microondas, en conjunto con las relaciones de agua/cemento y rompimiento a compresión conocidas, es posible predecir la resistencia a compresión del concreto fresco antes de que llegue éste a la madurez (con al menos el 80%) de su resistencia final esperada.

La resistencia a compresión del concreto es su característica más conocida sin embargo, en ocasiones, las características que más llaman la atención son: la durabilidad, y en otras más, la impermeabilidad que presenta. Sin embargo, la resistencia a compresión da un cierto panorama acerca de la calidad del concreto que se está utilizando.

En la práctica, se asume que la fuerza del concreto de cierta edad y curado a cierta temperatura, dependerá básicamente de dos factores que son: el grado de compactación que se le dio y de la relación agua/cemento (Neville, 1963). Si la compactación del concreto se da bajo supervisión es posible resumir que la característica principal del concreto, dependerá solo de la relación agua/cemento que tenga la mezcla al momento de ser entregada en la obra; por ello *Abrams* propuso como ley, que: **la resistencia del concreto es inversamente proporcional a la relación agua/cemento** (Neville 1963).

Estableció que la fuerza será:

$$S = \frac{K_1}{K_2^{w/c}} \quad (4.3)$$

Donde la  $w/c$  representa la relación agua/cemento de la mezcla, y  $K_1$   $K_2$  son constantes empíricas.

Aplicando valores a dicha expresión es posible llegar a obtener una curva como la presentada en la siguiente figura. Figura 4.4

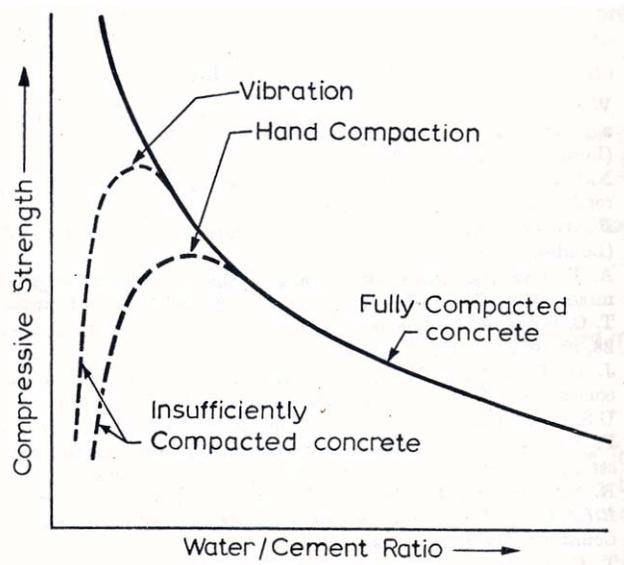


Figura 4.4 Relación entre fortaleza del concreto y la relación agua/cemento del concreto. (Neville 1963).

En esta figura 4.4, se puede apreciar cómo es que afecta la resistencia a compresión del concreto, la relación agua/cemento que tenga la mezcla cuando se encuentra aún fresca. A mayor cantidad de agua, menor resistencia a compresión.

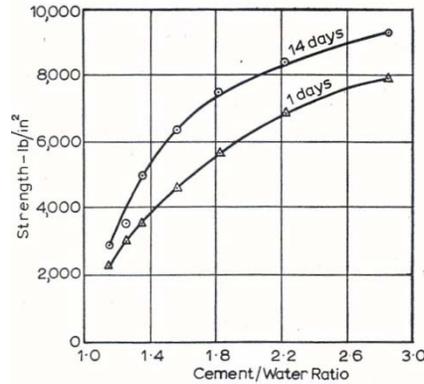


Figura 4.5 Relación entre la resistencia a compresión y la relación cemento / agua (Neville 1963)

En la figura 4.5, se aprecian los valores de compresión que soporta el concreto muestreado y probado en el laboratorio especializado, para su rompimiento. En esta figura la relación se considera cemento/agua, y se puede ver cómo es que aumenta la resistencia cuando esta relación cemento/agua aumenta; se hace una comparación con una curva para un día, y para catorce días de fraguado, en la figura se aprecia la alta resistencia que ya se tiene cuando son catorce días de fraguado.

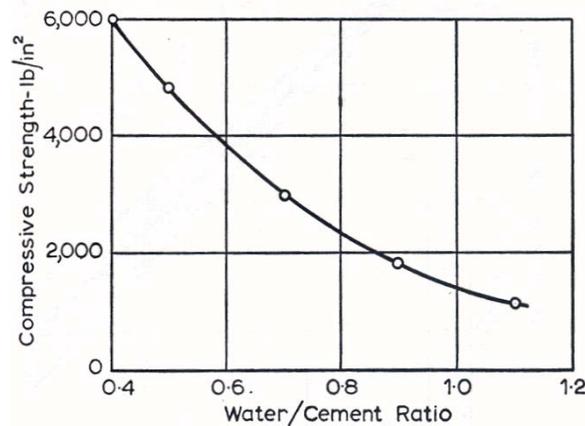


Figura 4.6 Relación entre resistencia (7 días) y la relación agua / cemento para concreto hecho con acelerante. (Neville 1963)

Para esta grafica de la figura 4.6, se presenta una curva obtenida mediante el rompimiento de muestras de concreto fraguado, siguiendo un determinado protocolo, propio del laboratorio que realiza dichas pruebas; es posible ver cómo es que la mayor resistencia a compresión se logra cuando se tiene una relación agua/cemento de 0.4, al

mismo tiempo es posible comprobar, cómo es que va disminuyendo dicha resistencia con el incremento en el contenido de agua en el concreto. Para la grafica se llega a los 1.2 de relación agua/cemento.

Para esta grafica en especial, (figura 4.6) se añadió un aditivo acelerante. Sin embargo la respuesta concuerda con lo visto hasta ahora en relación, con la respuesta de la mezcla de concreto cuando se incrementa el contenido de agua. La resistencia a compresión baja.

## 4.4 Solución Propuesta y Desarrollada

Utilización de señales de microondas a una frecuencia fija, arrojadas sobre concreto fresco recién vertido, para conocer sus características al momento; la energía de microondas se aplica en un mismo plano, teniendo el sensor un cierto ángulo.

El concepto que aquí se está proponiendo es el de utilizar señales de microondas generadas a una sola frecuencia y de baja potencia, aplicadas sobre la mezcla de concreto fresco recién vertido, para conocer una o más de sus características al correlacionarlas con el nivel de voltaje recuperado. Esto con base en experimentos realizados previamente; de este modo se evita el tener que muestrear o tocar el concreto con alguna sonda o sensor y se evita, la necesidad de esperar los tiempos que los laboratorios siguen en sus protocolos de análisis para conocer los resultados (Norma Mexicana. 2004).

Para la detección de humedad se pueden utilizar las más diversas tecnologías y los métodos más accesibles para ello (Meyer 1980) Bahr 1982) (Zoughi 1995) (Bois 1999). En esta obra se está proponiendo la detección de la humedad que tiene el concreto fresco después de ser vertido en su lugar de uso.

La medición de humedad por medio de señales de microondas, es una técnica que permite su uso al momento del vaciado, sin tener necesariamente que muestrear y sin tocar la mezcla y sin interferir con el vaciado mismo. Lo anterior no invalida las pruebas de control de calidad tradicionales que se aplican en la construcción, de hecho, esta prueba con base en señales de microondas se recomienda como complementaria a las confiables pruebas ya existentes, en el área de la construcción.

Para cumplir con lo aquí anunciado se procede a obtener la instrumentación adecuada para lograr las metas propuestas. El diseño y desarrollo de un equipo de microondas, a una frecuencia que permita su aplicación directa sobre la mezcla de concreto sin interferir, con su deshidratación natural (Calva. December 2007), y que pueda ser utilizado sin mayores complicaciones que un simple encendido de equipo; el diseño y desarrollo implica la parte generadora y la receptora de señales de microondas, junto con los aditamentos que hagan posible su aplicación (Calva 2001).

#### **4.4.1 Selección de la frecuencia de funcionamiento del equipo de microondas.**

Para la parte generadora de frecuencias de microondas se selecciona una única frecuencia, ya que es demasiado costoso, e impráctico tener un generador de frecuencias de microondas que comprenda toda la banda de interés. Para este caso en particular, se está proponiendo el usar una frecuencia dentro de la banda de los 8.2 a 12.4 GHz, intervalo que comprende a la banda X de frecuencias.

El equipo debe de cumplir con las siguientes condiciones:

No destructividad.

No mutilación.

No contaminación.

Además de no tener contacto con la muestra y ser de

Baja potencia.

La detección de la señal recuperada por los sensores se logra mediante un diodo, posteriormente se procede a tratar a la señal de tal modo que pueda ser fácilmente "manipulada", para ser utilizada en un medidor de intensidad o reflectómetro (Calva 2008). Al mismo tiempo es posible adaptar la señal para que sea detectada por el sistema de almacenamiento de datos o datalogger. Posteriormente se presenta en una hoja electrónica de datos, lo que posibilita su procesamiento para la generación de gráficas comparativas en las que se aprecia el comportamiento, que va desarrollando la muestra bajo estudio.

#### 4.4.2 Modo de aplicación de la señal de microondas al concreto fresco.

Esencialmente lo que se lleva a cabo es una aplicación directa de la señal de microondas, sobre una porción o muestra de la mezcla de concreto, de la cual se requiere saber sus condiciones de humedad al momento de ser vertida en la obra. Es una interacción de la señal con el concreto, para posteriormente conocer en qué condiciones está la señal de microondas, después de dejar la muestra y salir para ser recolectada por el sensor debidamente dispuesto.

Se espera conocer que le hizo el material a la señal de microondas y no, lo que comúnmente se esperaría que es, conocer que le hizo la señal de microondas al material.



Figura. 4.7 El dibujo muestra la señal de microondas en línea recta de un transmisor a un receptor. Se obtiene un máximo de señal que sirve como referencia para que a partir de ese valor se registren los demás valores obtenidos.

Una señal de microondas tradicionalmente se utilizaba en línea de vista, como en la figura 4.7, entre el receptor y el transmisor. Sin embargo, actualmente esta aplicación o modo de uso ha dejado de ser su limitante ya que es posible el envío de la señal y su recuperación, mediante algún tipo de rebote entre el material al que se aplica, o simplemente en el medio en el que es generada (Katsuyoshi 1996).

Al plantear el uso de una señal de microondas, se tienen dos opciones para su aplicación:

--- Una, que se aplique la señal de modo que atraviese el material de interés, lado a lado

--- Dos, en esta segunda opción, se tiene que se puede aplicar la señal sobre la muestra o porción de la mezcla con cierto ángulo, y esperar el rebote de la señal en el lado opuesto y con el mismo ángulo.

Obviamente que para este segundo caso, lo que se recupera es una señal menor (disminuida en amplitud) debido a las posibles rutas secundarias que la energía de microondas sigue, (Trabelsi 2003) cuando literalmente choca contra el concreto fresco.

Se deben considerar también los efectos de la absorción de la señal por parte del material, que se da en mayor o menor medida según la frecuencia a la que se esté trabajando. Se tiene en el material una señal que puede ser reflectada, absorbida o que simplemente se propague dentro del material y luego salga nuevamente, hacia el medio ambiente (Trabelsi 1998).

Este segundo caso sólo requiere que se tenga una cara del concreto fresco, en vez de los dos lados necesarios cuando se aplica lado a lado.

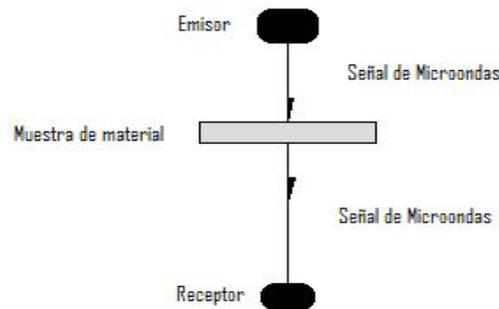


Figura. 4.8 En este dibujo se parecía que una muestra ha sido situada en la trayectoria de la energía de microondas. El receptor recibe la señal que logra atravesar el material de interés.

En el dibujo anterior (Figura 4.8) se ejemplifica cómo la señal deberá primero atravesar la mezcla de concreto fresco, para luego llegar al lado receptor de la señal. Para este caso se tienen disponibles ambos lados del concreto lo que parece poco probable en una construcción, debido a la manera en cómo se aplica el concreto en las obras. Además de no tener ningún control sobre lo que haya después de la pieza de concreto (losa; columna) si es o no un material metálico.

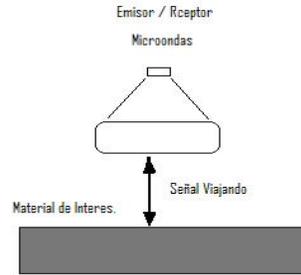


Figura. 4.9 En este dibujo se ilustra el camino que realiza una señal que se aplica perpendicularmente, se utiliza un solo sensor lo que lo vuelve un sistema complejo.

Para la ilustración de la figura 4.9, el sistema debe ser capaz de procesar la señal de llegada y de conjuntar su aplicación con la señal de salida del generador, lo que lo vuelve un sistema caro y un poco complejo.

Este modo de aplicación no deja de ser atractivo por la aparente sencillez en su estructura; este sistema tiene su principal aplicación en la determinación de la constante dieléctrica de materiales (Sasan. 1990) (Rothwell 1971).

Lo interesante en algunas aplicaciones como la presentada por Sasan Bakhtiari en su artículo *“Open-ended rectangular waveguide for nondestructive thickness measurement and variation detection of lossy dielectric slabs backed by a conducting plate”* (Sasan 1993), es que mediante la aplicación de la señal de microondas, en un evidente campo cercano<sup>7</sup>, se determinan las características físicas, de unas muestras de concreto que ya completaron su proceso de fraguado (utiliza cubos con dimensiones de 20x20x20cm), con una relación de agua/cemento 0.5. Esta relación por supuesto que se determina mediante el pesado de las muestras; lo interesante en esta técnica es porque la aplicación del sensor se hace directamente sobre las muestras, se tiene contacto directo (contacto físico) de la apertura de la guía de onda con el material (Teorodoris 1985).

La metodología a seguir es: curar las muestras en un cuarto de hidratación por tres días, y posteriormente se dejan en un cuarto de curado a temperatura ambiente; el

<sup>7</sup> Los intervalos de las antenas externas normalmente satisfacen la aproximación de campo lejano, mientras que los intervalos de uso interno, más compactas, pueden estar en el límite entre el campo cercano y el intervalo del campo lejano. El límite lo fija la expresión matemática  $R = 2D^2/\lambda$ . Menor a R, será campo cercano.

coeficiente de reflexión se midió durante los 28 días, tiempo en el que se supone adquirieron su resistencia final.

En este tipo de pruebas se utilizan dos bandas de frecuencias, (se barre el total de la banda, se usa la banda completa) la banda de frecuencias S (2.6-3.95 GHz), y la banda X (8.2-12.4 GHz). Los datos obtenidos se analizan desde un punto de vista estadístico y se propone correlacionar, la relación agua/cemento con la magnitud del coeficiente de reflexión, con la intención de obtener características de la relación agua /cemento y de la relación arena/grava, y finalmente determinar una resistencia a compresión sobre los bloques ya fraguados (Bois 1998) (Bois 2000) (Bois 2001).

Para el método descrito anteriormente no se utiliza propiamente dicho una antena, se acopla la señal de microondas a la muestra, mediante una sección de guía de onda en cada una de las muestras, con las mismas dimensiones estándar ya citadas (Bois. 1998) (Sasan 1993).

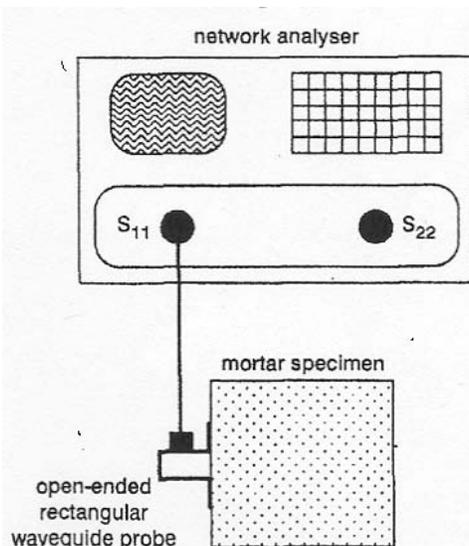


Figura. 4.10 Aparato utilizado para la medición del coeficiente de reflexión sobre una pieza de concreto ya fraguado. (Bois 2001)

## 4.5 Método propuesto para la aplicación de las señales de microondas sobre el concreto fresco.

En este arreglo, emisor-receptor, la señal que se aplica y la que se recibe después de chocar con la mezcla fresca están del mismo lado. Los sensores tienen un cierto ángulo que permite la recolección de una buena parte de la señal, después de interactuar con la mezcla. Es una técnica que simplifica la aplicación/recolección de la energía sobre la mezcla de concreto; el resultado que se obtiene es una señal un poco disminuida, pero todavía en condiciones de ser procesada para determinar su nivel de intensidad. Figura 4.11

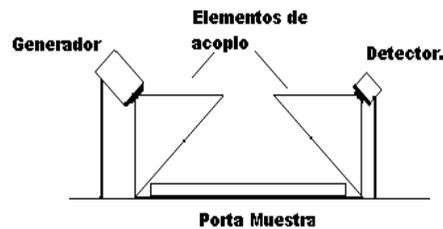


Figura. 4.11 En este dibujo se presenta el arreglo teórico / propuesto que envía y recibe señales en el mismo lado de la mezcla de interés.

En las primeras pruebas se inicio con un barrido en frecuencia (muy limitado) entre la frecuencia más baja de 8.2 GHz, y la más alta de aproximadamente 10GHz. Esto con la intención de obtener una lectura con una intensidad que pudiera ser fácilmente identificable, entre la señal que se tiene cuando no hay muestra y cuando si se tiene la muestra, o porción de concreto; como resultado de este barrido en frecuencia se encontró que la señal tenía una intensidad apreciable cuando se operaba el oscilador principal, en los 9.665 GHz. Ver Figura 4.12



Figura. 4.12 En esta fotografía se aprecia el arreglo utilizado en el laboratorio para aplicar las señales de microondas, sobre el concreto fresco.

¿Por qué esta banda de frecuencias? bueno, como ya se expuso con anterioridad, se tienen referencias bibliográficas (Carr 1986) (Carter 1996) (Meyer 1980) (Hasted 1973) (Schilz 1980) (Bois 1998) donde presentan a ésta banda como al grupo de posibles frecuencias que pueden ser sensibles a la cantidad de humedad, que tienen los materiales, razón por la cual se hace uso de ella y además, en este caso, se está proponiendo usar una única frecuencia dentro de la banda X de frecuencias. Figura 4.13



Figura.4.13 Fotografía donde se aprecia el equipo de microondas y el equipo de cómputo asociado a la captura procesamiento y almacenamiento de los datos.

Teniendo una frecuencia de operación propuesta, y habiendo seleccionado la técnica de aplicación en un mismo plano (reflexión de señales de microondas), se procedió a realizar pruebas sobre materiales diversos, que proporcionaran variedad a la base de datos para aportar diferentes intensidades de señales, bajo diferentes condiciones de humedad.



Figura. 4.14 Fotografía mostrando el equipo electrónico asociado a la generación de señales de microondas, los sensores y la interfaz del sistema datalogger

En la figura 4.14 se aprecia el arreglo del sistema de microondas que se utiliza para arrojar energía de microondas sobre las muestras de concreto preparado para la prueba; se aprecia parte del subsistema de datos, o lo que se ha dado en llamar el subsistema datalogger.

### **4.5.1 Preparación / Proporciones de las mezclas para obtener concreto**

Para toda prueba teórica y de laboratorio (simulación de modelo matemático y pruebas en laboratorio con el equipo de microondas), se utilizaron las siguientes proporciones de elementos integrantes de las mezclas de concreto (Figura 4.15):

Agua:	6.78 %
Cemento:	16.95 %
Arena:	25.42 %
Grava:	50.85 %

Esta combinación de agua/cemento da una relación de: 0.4

Para posteriormente alterar el contenido de agua en un porcentaje conocido, y llegar a obtener las relaciones agua/cemento de:

0.7 y 1.5



Figura. 4.15 Recipiente de preparación de las mezclas de concreto en el laboratorio

**Tabla 4.4**

Relación de componentes (Agua / Cemento) del concreto para cada grupo de pruebas realizadas.

Prueba	Agua	W/c
A.	6.78% (7.0%)	0.4
B.	11.865 % (12.0%)	0.7
<b>C.</b>	<b>23.95 % (24.0%)</b>	<b>1.5</b>

En la tabla 4.4, se aprecia que la tercera relación de agua/cemento la relación (C), se sale bastante de lo esperado, esto debido a que generalmente la relación entre el agua y el cemento, no excede la unidad. Las características del concreto se ven seriamente afectadas cuando se tiene un exceso de agua (Mehta 1998). Aunque todo dependerá de la aplicación que se le dará al concreto; el diseño de la mezcla obedece siempre a su aplicación.

## 4.5.2 Condiciones ambientales durante las pruebas.

Instalaciones / Laboratorio.

Durante las pruebas físicas se estuvo observando una temperatura ambiente de  $23.7^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.8$ ) con una humedad relativa del  $39.1\%$  ( $\pm 4$ )

Lecturas tomadas con un hidrotermómetro al momento de realizar las pruebas; la tolerancia corresponde a la estipulada en la hoja de datos del propio instrumento.

-- Hidrotermómetro --

Modelo: MHB-382SD. Hidrotermómetro utilizándose en el laboratorio para establecer las condiciones en las que realizaban las pruebas. Figura 4.16



Figura 4.16. Instrumento utilizado para conocer las condiciones de temperatura y humedad del medio en el que se realizaron las pruebas.

## 4.5.3 Primeras pruebas sobre materiales

### Pruebas de concepto

En ésta primera prueba se procedió a disponer las antenas (sensores) en un ángulo que permitiera la recaptura de la señal arrojada por el generador (Figura 4.17). Se está suponiendo que una parte de la señal será capturada por la antena (sensor) opuesto, y se verá en qué condiciones está la señal colectada.



Figura. 4.17 Fotografía del sistema de sensores dirigida hacia una muestra de material.

### **Protocolo seguido durante las pruebas con instrumentación de microondas.**

- 1) Encendido del equipo de microondas.
- 2) Encendido del equipo de recuperación de datos (datalogger).
- 3) Selección del material a situar bajo prueba.
- 4) Definir cuáles serán las proporciones adecuadas para cumplir con los requisitos de agua/cemento fijadas para la preparación de la mezcla de concreto.
- 5) Se dispone el material bajo el haz de energía de microondas.
- 6) Registro de datos.
- 7) Iniciar la formación de la base de datos de pruebas de laboratorio.
- 8) Proponer un catalogo de pruebas en las que se involucre solo una aplicación no destructiva sobre el concreto fresco; establecer como referencia las pruebas tradicionales realizadas a muestras de concreto maduro; conocer de establecimientos (Laboratorios) que realizan algún tipo de pruebas sobre muestras de concreto maduro; tipos de pruebas no destructivas que se realizan actualmente y técnicas utilizadas para su aplicación.
- 9) Establecer las etapas del proceso de deshidratación que experimenta una mezcla de concreto fresco; límites a los cuales se puede llevar una cierta mezcla de concreto.
- 10) Dentro del protocolo de pruebas, establecer métodos de aplicación para seleccionar el que más se apegue a los recursos con los que se cuenta; por obvias razones se seleccionan muestras de las mezclas que se realizan y se procede con su utilización.
- 11) Se modifica la humedad intencionalmente para observar los posibles cambios en las lecturas.
- 12) Se almacenan los datos generados en la prueba.



Figura 4.18 Medidor del datalogger utilizado para lectura y almacenamiento de la información.

Como resultado de estas primeras pruebas se obtuvieron lecturas para algunas muestras, cuyos valores van de los 3.6 mV hasta los 368 mV de intensidad de señal recuperada (Figura 4.18).

Como se aprecia en el protocolo de pruebas, se estipulan pasos en los que intencionalmente se modifica el nivel de humedad de la muestra, agregando agua simple sobre la muestra y verificando los cambios de intensidad de señal recuperada. Además, se verifico que estos cambios fueran sin algún tipo de retraso en su presentación, tanto en pantalla de la computadora como en el registro de voltaje del equipo asociado a la prueba. Ambos actuando separadamente.

#### 4.5.4 Prueba a la arena utilizada en mezclas de concreto

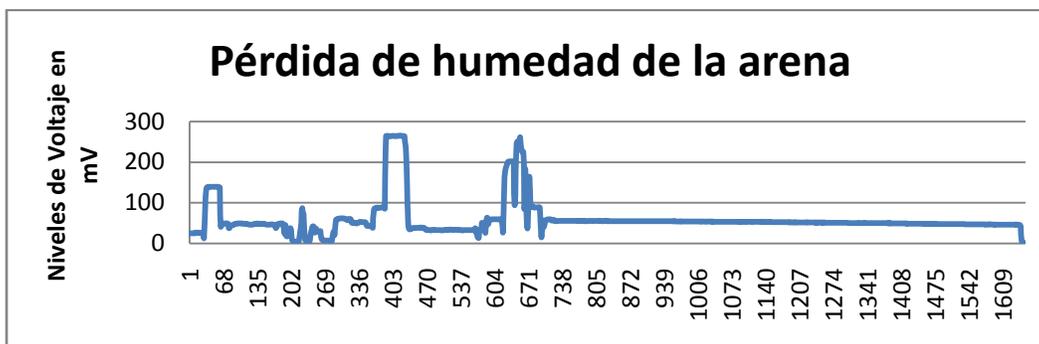


Figura. 4.19 En ésta figura se aprecia un histograma que presenta el nivel de humedad asociado con el voltaje. Es arena similar a la utilizada en las mezclas de prueba. Son niveles de voltaje contra muestras por segundo.

Se tomaron alrededor de 1653 muestras, el programa de captura de datos permite un cierto margen de ajuste de los tiempos de muestreo; en estos primeros casos, se dejó sin modificar los tiempos de muestreo que originalmente presenta el programa al arranque; en la grafica de la figura 4.19, se aprecian cambios en los niveles de voltaje que pueden ser asociados con los valores de humedad, se pueden apreciar picos de voltaje de más de 250 mV.

En ésta primer grafica se aclara que se inicio con el encendido del equipo de microondas y se manipulo la muestra de arena cuando ya estaba registrando valores de señal la parte del equipo de detección de microondas. Por ello se tienen al principio pulsos de voltaje, y ya después a partir de la muestra 573, se modificó la humedad con una cantidad no cuantificada de agua, agregada para verificar el tipo de respuesta que tenia la parte receptora del equipo de microondas; de la misma grafica se aprecia que a partir de la muestra 677, la lectura se estabilizó, la perdida de humedad se redujo hasta alcanzar valores de voltaje de la señal recuperada, por debajo de los 50 mV.

#### 4.5.5 Primeras pruebas a mezclas conteniendo cemento

En ésta primera prueba se prepararon mezclas (Kosmatka 1988) que contenían una relación agua cemento de 0.4., en la grafica de la figura 4.20, se aprecia cómo se va deshidratando la mezcla cuando se da por iniciado el fraguado de la misma, ciclo que inicia cuando se deja en reposo la mezcla.

Para esta grafica se tienen niveles de voltaje (en mV) contra horas transcurridas bajo el haz de microondas.

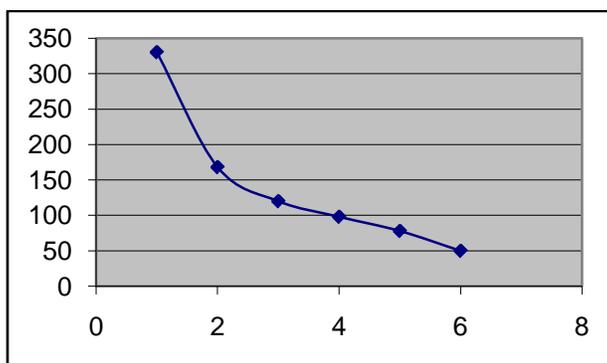


Figura. 4.20 En ésta grafica se aprecia el comportamiento de una mezcla de mortero; se tiene la intensidad de la señal contra las horas transcurridas bajo el haz de microondas.

Para esta prueba sobre una mezcla de mortero, se aprecia que el muestreo de datos se llevó a cabo con un lapso mayor, y los niveles de voltaje se situaron por encima de los 300 mV. Se aprecia de igual modo que la intensidad de la señal decrece (lento en comparación con la gráfica de la arena), cuando se está llevando a cabo el proceso de fraguado de la mezcla; en este caso se tiene ya un nivel de 50mV cuando se estaban alcanzando, las seis horas de exposición del material, al haz de microondas. Figura 4.20

Las proporciones de los elementos que integran las mezclas de concreto se formaron como ya se vio anteriormente, con base a lo que presenta "El Manual del Constructor", editado por la compañía CEMEX.

--- Se determinó sólo tener en cuenta los cuatro elementos principales del concreto: Agua; Cemento; Grava (agregados duros); Arena (agregados suaves) para todas las pruebas realizadas en el laboratorio.

--- Para el agua se utilizó agua purificada embotellada (*Bonafont*) con la intención de eliminar cualquier traza de NaCl (Bois, 2001) que pudiera existir en el agua suministrada por la delegación, además de tener bajo control cualquier otro mineral que pudiera afectar el proceso natural de fraguado del concreto (Jackson, 1987); siempre se procuró un fraguado natural.

--- Los agregados suaves se tamizaron para excluir cualquier basura y componente de dimensión mayor a lo esperado para la arena usada en las mezclas.

--- En los agregados duros, se procuró que las dimensiones no fueran notoriamente dispares; se eliminaron los elementos que estuvieran con dimensiones muy superiores a lo comúnmente visto en este tipo de elementos; en el caso de las piezas pequeñas, es poco probable el eliminar los que tuviesen una dimensión demasiado pequeña al común de las piedras de grava.

--- Cemento. Cemento Portland. Bulto de cemento 50Kgs.



Figura 4.21 En la fotografía se aprecian algunas muestras de los agregados duros tomados directamente de la fuente de suministro.

Se realizó un muestreo de los agregados duros y se encontró, que en promedio las dimensiones eran de:

31.583 mm.

Ver figura 4.21

En cuanto al componente cemento, se utilizó bulto de cemento portland tipo II compuesto, en su presentación de 50 Kg., el cemento *Portland* es el más utilizado en las obras.



Figura 4.22. Fotografía en la que se aprecia la caratula de respuesta del programa utilizado para recolectar los datos que se iban obteniendo directamente del sensor de microondas.

En la figura 4.22, se aprecia la pantalla de la computadora (que forma parte del subsistema datalogger) asociada con el equipo de microondas. En ella se pueden ver parte de los resultados que se obtienen después de la exposición de la muestra de concreto, al haz de microondas dirigido específicamente a esta.

## **4.6 Desarrollo de un modelo matemático para estimar el comportamiento de una mezcla de concreto respecto a sus niveles de humedad.**

Para el desarrollo o adaptación de un modelo o modelos matemáticos, se tiene en cuenta bajo que principios se está llevando la investigación.

- a) Se tiene una mezcla de ciertos elementos.
- b) Estos elementos pueden estar todos presentes siempre, o no, dependiendo de la aplicación que se esté considerando.
- c) Uno de esos elementos es el agua. Variable independiente.
- d) Los elementos tendrán ciertas proporciones cuando sean agregados.
- e) Se considera la no alteración de la mezcla por ningún medio.
- f) El medio que sea utilizado deberá actuar, solo con la potencia necesaria.
- g) El medio responderá de acuerdo a las características propias de la mezcla.

El desarrollo de la investigación tiene como una de sus prioridades, cumplir con los principios de la no destrucción. Entre estos principios está la no alteración de la muestra (en nuestro caso la mezcla); no se debe alterar en forma alguna a la muestra ya sea tocándola, o haciéndola cambiar en su forma o estructura. Por ello, el sensado de la misma deberá ser de tal forma que cumpla con lo anterior y, al mismo tiempo, proporcionarnos la información esperada sin haber alterado la calidad de dicha información, por tener que cumplir con todos los requisitos.

¿Por qué se hace tanto hincapié en el medio de sensado, si lo primero es centrar la atención en el o los modelos matemáticos?

Porque el modelo matemático nos puede proporcionar una idea acerca de cómo serán las respuestas que se van a obtener, después de aplicar la energía de microondas sobre concreto fresco para estimar sus niveles de humedad.

*“ Iniciar la investigación sobre aspectos de modelado para simular la relación agua-cemento. ”*

Condiciones de inicio.

- Las microondas son el medio con el cual estaremos tratando de obtener información acerca de una mezcla real (una o más características).
- Como primer modelo se pensó en hacer uso del llamado método de maduración, con él es posible obtener respuestas acerca del grado de madurez de una mezcla con respecto al tiempo y a la temperatura.
- Y lo más relevante. Considerar en el modelo, que la mezcla No sufre alteraciones debidas a la energía de microondas.
- Son de consideración, las modificaciones que sufre la señal de microondas cuando es captada al abandonar la mezcla, puesto que es la que da la información acerca de dicha mezcla.

Con los dos últimos incisos se está cambiando el punto de vista que generalmente se tiene es decir, ahora no se ve que es lo que hace la energía de microondas sobre la mezcla sino

**“...que le hace la mezcla a la señal de microondas...”**

Pequeña diferencia.

Lo anterior conlleva a reforzar la idea planteada desde el principio referente a que la potencia que es utilizada, será sólo la necesaria para evitar cualquier posible alteración de la mezcla.

Lo antes mencionado es justificable aclararlo, debido a que existen técnicas de minería, que utilizan la combinación de tecnologías para su explotación. Suelen combinar la tecnología de las microondas y la del infrarrojo (Carter 1996).

Como ejemplo se tiene que para detectar mineral se aplica primero una señal de microondas con suficiente energía (superior a 1 KW), para que la parte del material con más agua por obvias razones se caliente más (Carter, 1998) a diferencia del mineral contenido en el material, y la detección de la respuesta generada la realizan con un sistema recolector operando en el infrarrojo. Sensan el nivel de temperatura que alcanza el material para estimar la cantidad de material.

En su conjunto, a ésta aplicación se le cataloga como un sistema muy lento, aunque genera una imagen después de algunos minutos de aplicada la señal. Tiene la restricción de

necesitar que el material tenga al menos una humedad de suelo superior a los 5%, y lo más importante, necesita una gran cantidad de potencia como ya se acotó, de más de 1KW. La energía caliente hasta profundidades de 10cm o más.

Al considerar el desarrollo de un modelo matemático para estimar el contenido de humedad de concreto fresco en etapa de curado, es posible obtener una primera aproximación con una versión mejorada, del modelo de maduración (Malhotra 2004). Aunque realmente la idea principal es la de utilizar o desarrollar un modelo matemático, para estimar el contenido de humedad en una mezcla (concreto fresco, recién vertido) en vez de tratar de obtener un nivel de maduración del concreto cuando éste ya es sólido, cuando ha alcanzado parte de su resistencia a compresión final.

Es tiempo de cambiar a otros métodos que puedan ayudar a estimar el contenido de humedad previo al uso de la instrumentación de microondas; por ello se propone una expresión matemática, que pueda ser usada en la estimación del contenido de humedad en concreto fresco, cuando éste acaba de ser vertido en el sitio de uso, de aplicación.

#### **4.6.1 Antecedentes / Método de maduración**

El método de maduración es una técnica que combina los efectos del tiempo, y de la temperatura en el desarrollo de la fuerza que adquiere el concreto. El método brinda una aproximación simple a lo que es posible llamar, una estimación de la fortaleza del concreto en el lugar de trabajo, la construcción; el origen del uso de este método se sitúa en los principios de los años cincuentas en Inglaterra, sin embargo no prosperó su uso debido a causas desconocidas (Affection 2001). Específicamente el método de maduración se refiere o hace énfasis en la resistencia que tiene un concreto joven, y la resistencia que llega a tener, cuando se considera un concreto maduro (consultar Anexo 1).

Como una referencia, en el afán por encontrar un modelo matemático que aportara una ayuda para estimar el grado de madurez, que una losa adquirirá durante el proceso de fraguado, es que se dio con el método de maduración.

Al método de maduración se le puede considerar, como el primer modelo matemático que ayuda a encontrar un modo, para simular el comportamiento del concreto en las construcciones, durante el proceso conocido como fraguado, y así estimar su resistencia; el método de maduración es una técnica que toma en cuenta los efectos combinados del tiempo y la temperatura, para conocer la fortaleza desarrollada del concreto.

El método de maduración proporciona una simple aproximación a lo que la fortaleza de una losa presenta en la construcción; aún cuando se conoce de su aplicación a principios de los años cuarentas, no fue sino hasta principios de los años setentas que se le dio un gran impulso, esto por un fuerte accidente en Fairfax County, Va. Estados Unidos. En ese lugar se colapso una construcción debido a que se descimbro antes de tiempo; aún cuando la experiencia decía que se había alcanzado la fortaleza esperada al final del fraguado, una variación en la mezcla de concreto alteró los tiempos del proceso y al eliminar el soporte que la cimbra le proporcionaba, se presentó el colapso. De ahí que las autoridades encargadas de la construcción de aquel país, pidieran se aplicara toda la experiencia y el conocimiento teórico hacia la obtención de un medio, que al menos proporcionara indicios acerca de que tanta madurez tiene una construcción. Por ello, cualquier esfuerzo por apoyar esa idea es bienvenido.

El surgimiento del método de maduración se puede rastrear hasta algunas publicaciones inglesas que tratan el método del curado acelerado; se pensó en un procedimiento que considerara el efecto combinado del tiempo y de la temperatura sobre el desarrollo de la fortaleza para diferentes niveles de temperatura de curado. Aquí es cuando se plantea el producto tiempo temperatura para este propósito.

La propuesta llevó a la conocida función de maduración de *Nurse-Saul* (Mejía 2009):

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (4.4)$$

Donde, para ser utilizada como expresión de madurez en el concreto, se le asignan los siguientes términos:

M = Índice de Maduración, °C-horas (o °C-días).

T = temperatura promedio del concreto, °C, durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$

$T_0$  = datum temperatura (usualmente se considera como  $-10^\circ\text{C}$ )

t = tiempo (horas o días)

$\Delta t$  = intervalo de tiempo (horas o días).

Para valores idénticos de índice de maduración, especímenes con alta temperatura de crecimiento resultan en fuerzas iniciales altas, y baja fuerza después de un tiempo. Así mismo se tiene la situación contraria, con una baja temperatura y baja fuerza inicial, resultan al final con una fuerza de resistencia mayor.

El cruce de curvas de fuerza se ilustra en la siguiente figura. Figura 4.23

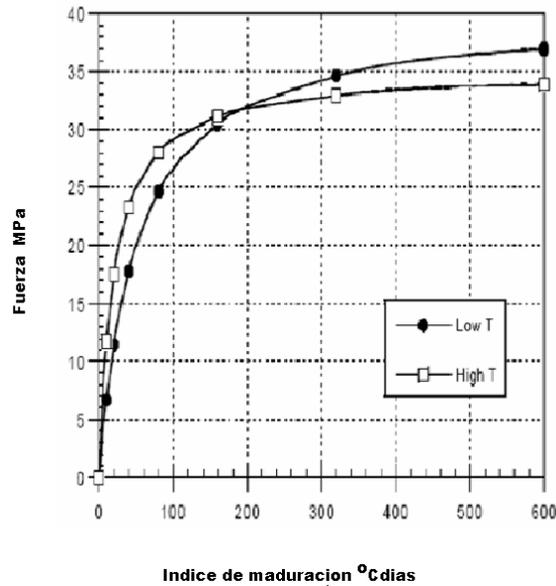


Figura.4.23 El efecto de cruce o crossover, debido a diferentes temperaturas de envejecimiento o maduración del concreto, durante el desarrollo de la relación fuerza-madurez.

Después de que el cemento y el agua fueron mezclados, hay un tiempo de retardo antes de iniciar el desarrollo de la fuerza. Este periodo es llamado periodo de inducción.

Después del periodo de inducción, se tiene un rápido desarrollo de la fuerza, y este es el periodo denominado como, periodo de aceleración (Carino 2001).

Elementos básicos que integran físicamente una mezcla de concreto.

El sistema que comprende a la mezcla queda integrado, según el tipo de aplicación que se le vaya a dar.

-- La masa que comprende a los elementos menos el agua se podrá denotar por la expresión:

$$m (Ca, c, s)$$

Ca -- (agregados duros)

c— (cemento)

s -- (arena)

-- La que se asigna al agua es:

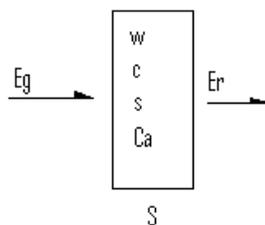
$m_a(w)$

W --- (agua)

De lo anterior se tiene que:

$$S = m + m_a \tag{4.5}$$

Si se considera al sistema (S) que comprende la mezcla, quedará formada por dos grandes bloques, el primero que agrupa a los elementos adicionales, y el segundo para el componente que es considerado como el principal, el agua; cuando ambos bloques están juntos es cuando interesa conocer de su comportamiento al paso del tiempo, ya que en cuanto empieza la mezcla a estar en condiciones de reposo, es cuando el drenado se inicia, y la resistencia a compresión comienza.



$E_g$  – energía arrojada sobre la mezcla.

$E_r$  – energía que se capta.

Esto funciona cuando se está estimando el fraguado de la mezcla mediante el continuo monitoreo del peso de la mezcla, para al final determinar, qué porcentaje del peso inicial era agua. Ahora que si es conocido desde un principio el peso del agua, se sabe por tanto el porcentaje que va a agregar al peso de la mezcla. Se conoce entonces el porcentaje de humedad que tiene la mezcla.

Metodología. Un proceso de laboratorio conocido para estimar el peso del agua, es precisamente. Registrar el peso inicial de un compuesto y posteriormente secarlo, hasta el grado de eliminar cualquier vestigio de humedad que pudiera contener, para volver a pesar

al compuesto, con lo cual se conoce cuál es el porcentaje de humedad que tenía el compuesto.

Es posible mediante esta técnica, realizar una correlación entre el peso de la mezcla y el tipo de respuesta que va presentando la señal de microondas aplicada a la mezcla; sin embargo conviene incluir un margen de tolerancia o error, ya que se estará estimando el tipo de respuesta de la señal, con la energía que llega al sensor ( $E_r$ ), energía reflejada la cual es sólo una parte, y que al variar el ángulo de incidencia en la materia, con su posterior reflexión, puede variar en un determinado margen.

La energía que se utiliza en la estimación es sólo una parte de la arrojada sobre la mezcla, ya que otra parte de ella es absorbida, y otra dispersada. La única que puede dar información de las características de la muestra, es la reflejada que alcanza a llegar al sensor (Mironov 2004).

De todo esto podemos establecer que la correlación se puede hacer entre el peso inicial y final de la mezcla y de las lecturas iniciales y finales de la señal captada.

$$h\% (\downarrow\uparrow) \text{ --- } (\uparrow\downarrow) uw$$

Porque la otra alternativa, la más segura, es la que comprende un muestreo (a ciertos intervalos) de la mezcla elaborada para ir determinando mediante ejemplares de la misma que cantidad va teniendo de humedad, conforme va deshidratando la mezcla hasta llegar a un cierto nivel en el que se mantenga estable, o que previamente sea acordado como límite de comprobación para este paso.

#### **4.6.2 Modelo matemático para el fraguado natural del concreto premezclado.**

Para el modelo matemático es posible iniciar con la bien conocida expresión matemática del coeficiente de humedad relativa ( $h$ ) ecuación 4.6 (Ortiz 2007) (Meyer 1980).

$$h = m_{h_{20}} / (m_d + m_{h_{20}}) \quad (4.6)$$

Para empezar el desarrollo del modelo matemático, que podrá estimar el comportamiento en mezclas de concreto premezclado, desde el momento en el que, el

concreto es vertido e inicia el reposo. Se propone revisar la expresión matemática de la humedad relativa.

Se parte de las siguientes consideraciones

- Dependiendo de la relación entre elementos (agua, cemento arena y grava) la humedad relativa en el concreto premezclado, estará entre un 6% y un 40 %
- Se considera un proceso natural de pérdida de agua. Ningún aditivo.

Se destaca que:

---Parte importante en ésta investigación es la de desarrollar una correlación entre el comportamiento físico de las mezclas, y la respuesta de las señales de microondas que fueron aplicadas a las muestras de mezclas de concreto, con la finalidad de que, cuando se apliquen esas señales de microondas sobre mezclas de las que se desconoce su nivel de agua, pueda entonces ser estimada esta, con base en las pruebas previas, hechas en el laboratorio.

---La instrumentación propuesta deberá consistir de un transmisor de microondas operando en la banda X, junto con un receptor sintonizado a la misma frecuencia que el transmisor. Así como un par de sensores (antenas) para la correcta aplicación y detección de la energía, en la porción de concreto fresco que se encuentra bajo prueba (Calva 2006).

---Estudios previos muestran que a frecuencias de microondas arriba de los 8GHz, y en ciertos tipos de materiales, la calibración para la detección del agua, es independiente de la densidad del material, y podrá ser derivado experimentalmente, permitiendo la determinación de la  $h$  por medio de la utilización de una única frecuencia, en la banda X (Trabelsi Samir. 1998)

--- El modelo deberá permitir una observación más cercana del comportamiento físico del concreto fresco recién vertido; durante sus primeras horas el concreto experimenta la máxima pérdida de humedad.

Pensando en un modelo para describir el comportamiento del concreto fresco, la primera idea o primer intento, es utilizar una versión modificada del modelo matemático de maduración, una versión que pudiera estar acorde con las necesidades planteadas de detección de niveles de humedad que tiene un concreto fresco y no, el nivel de maduración que presenta un concreto con un ciclo de fraguado en proceso. Por lo que, teniendo en mente lo anterior, se planteo un nuevo modelo, un modelo que sea útil, que pueda brindar datos acerca de las condiciones del concreto aún cuando todavía esta iniciándose el fraguado, previo al uso de las señales de microondas.

### Humedad Relativa (h)

El contenido de humedad es el parámetro de interés para varias industrias de la alimentación, y por supuesto también de la agricultura que abastece a dichas empresas (Trabelsi 2006).

La investigación de la humedad en materiales de interés cuando se realiza a frecuencias de microondas arriba de los 8 GHz, muestra que para ciertos tipos de materiales, la función de calibración es independiente de la densidad y esta puede ser derivada experimentalmente, lo que permite la determinación de la  $h$  (humedad), sólo con la medición de la magnitud de la señal de microondas, y lo mejor, a una sola frecuencia (Trabelsi, 1998).

$$h = \frac{mH_2O}{(m_d + mH_2O)} \quad (4.7)$$

$mH_2O$  – masa del agua

$m_d$  – masa del material seco

--- Para completar el proceso de determinación del nivel de humedad, el material es secado mediante un proceso bien conocido que puede ser diferente para cada material.

--- Dependiendo del tipo de material el contenido de humedad se estima puede estar entre el 1% y el 50% del total de la masa.

El proceso de pesado-secado-pesado, es muy confiable exacto y fácilmente reproducible. Éste conocido proceso de secado pesado, puede ser estandarizado pero necesita tiempo de laboratorio, es lento no continuo y no puede ser fácilmente automatizado; esta técnica podría ser considerada como destructiva y consume tiempo y energía.

La técnica de secado pesado (D-W) es útil para una revisión, cuando se están aplicando mediciones con microondas en las que se están, asociando el contenido de humedad, con los niveles de amplitud de la señal en términos de milivolts.

El método de microondas tiene la ventaja de ser no destructivo, permite el continuo monitoreo y debido a esto, una cierta clase de control de calidad, porque se tiene el nivel de humedad en todo momento, sin la necesidad de un contacto directo con la muestra bajo prueba.

### 4.6.3 Primer modelo propuesto para la determinación de la humedad

Modificando la expresión anterior (Ec. 4.7) es posible su uso para estimar el porcentaje de humedad contenido en concreto fresco premezclado recién vertido.

Con la siguiente expresión (Ec. 4.8), es posible estimar el nivel de humedad de una muestra de interés. La expresión representa la humedad de un cierto material de interés, del cual se necesita conocer sus niveles de humedad; a la expresión 4.8, se le añadió un factor específico de pérdida de humedad en función de los incrementos en tiempo, por ésta razón es posible obtener una grafica que muestre el progreso en la pérdida de humedad.

Primera aproximación para el nuevo modelo matemático propuesto.

$$h = \frac{m_a - (d \times n(t))}{m_d + (m_a - (d \times n(t)))} \times 100 \quad (4.8)$$

$d$  - factor de pérdida de humedad.

$n(t)$  - incremento en tiempo.

$m_a$  - masa inicial del agua.

$m_d$  - masa inicial de la mezcla.

Resultados obtenidos para este primer modelo.

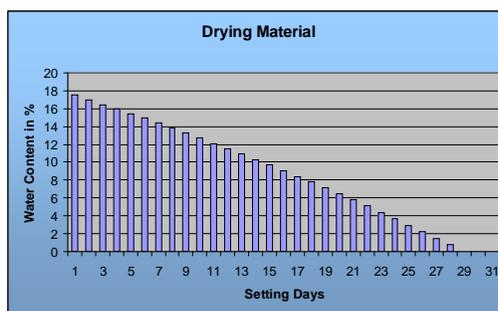


Figura 4.24. Grafica generada con los datos obtenidos de la simulación del primer modelo matemático propuesto.

En la figura anterior (fig. 4.24) se aprecia como el contenido de humedad va disminuyendo de acuerdo a como van pasando los días, permitiendo con ello al concreto ir ganando madurez que se traduce en resistencia a la compresión, ésto debido a la relación existente entre la resistencia del concreto, y la pérdida de humedad en la mezcla.

En la grafica (de la figura. 4.24) se puede ver que pasa de 17.5% de nivel de humedad inicial, a tener un poco menos de 2% al final de los 28 días. Cabe aclarar que el concreto nunca está totalmente seco, ésto es, el concreto conserva cierta humedad característica. Lo anterior es debido a los materiales que la constituyen, y es lo que le permite mantener una relativa flexibilidad,

### **Primera modificación.**

Con la observación de los primeros resultados se volvió a simular el modelo después de modificar el factor de pérdida de humedad; se observa una variación significativa en la grafica obtenida a partir de los datos generados por la simulación del modelo matemático; la grafica del proceso de pérdida de humedad decae mucho más rápido, por la pérdida considerable de agua en las primeras horas del primer día del ciclo de fraguado, lo que coincide con el comportamiento físico del concreto premezclado fresco, cuando este es vertido en el lugar de la construcción.

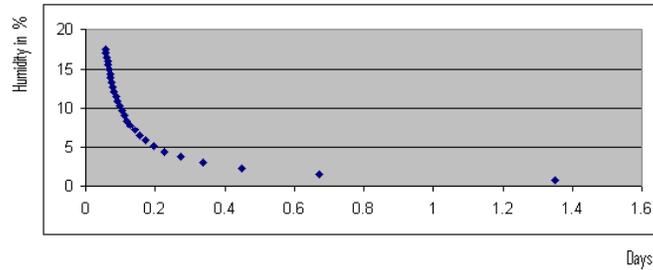


Figura. 4.25 Grafica de la respuesta del modelo matemático únicamente para el tiempo de curado.

En la grafica de la figura 4.25, es posible apreciar como es el cambio de una humedad relativa de más de 16% en el concreto premezclado fresco al momento de ser vaciado, y llegar a un nivel de humedad cercano a cero, y todo esto pasando en un lapso menor a las 24 horas de haber sido vertido el concreto. Lo anterior es fácilmente verificable cuando se realizan las pruebas físicas de laboratorio con mezclas preparadas, y siguiendo las proporciones establecidas para un concreto premezclado básico, sin químicos acelerantes de la mezcla, absorbentes de agua, ni retardantes.

Más específicamente, en la gráfica se puede apreciar fácilmente que en menos de 6 horas tiene lugar la mayor pérdida de humedad en el concreto premezclado, y arribando a límites inferiores a los 5% e inclusive aun en menor cuantía, de humedad relativa.

### **Segunda modificación al modelo**

Con los resultados obtenidos con la primera modificación del modelo, es posible proponer una segunda modificación, para que su respuesta sea más cercana al comportamiento que presenta el concreto fresco desde el momento en que es vaciado, y a las primeras horas de reposo; proceso conocido como curado, y que representa precisamente las primeras horas de una mezcla recién creada. Etapa en la que como se menciono previamente tiene lugar la mayor pérdida de liquido, y que debe ser vigilada para obtener un buen concreto.

La siguiente (Ec. 4.9) es la expresión propuesta como modelo matemático para estimar el comportamiento que tiene la mezcla, en las primeras horas después de haberse iniciado el reposo de la misma (Calva. 2013. Por publicarse).

$$h_1 = \left[ \frac{m_a - (d \times n(t))}{m_d + (m_a - (d \times n(t)))} \times 100 \right] \times \left( \frac{1}{\exp(n(t))} \right) \quad (4.9)$$

$h$  – humedad estimada (%).

$d$  - factor de pérdida de humedad.

$n(t)$  – incremento en tiempo.

$m_a$  – masa inicial del agua.

$m_d$  – masa inicial de la mezcla.

Por diseño de la mezcla se asigna un porcentaje de agua agregada desde el inicio, respecto del total de la mezcla. Mediante la relación de masa de agua  $m_a$  y masa sin el líquido  $m_d$ , se logra definir la relación existente entre la porción de agua agregada en una mezcla y la proporción formada por los restantes tres elementos que incluye la mezcla básica, que es la que se ha estado considerando hasta este momento, compuesta de: agua; cemento; agregados duros; agregados suaves.

#### 4.6.4 Simulación del modelo matemático.

Las simulaciones con el modelo matemático se hicieron considerando una mezcla básica de relación de agua a cemento (W/c) de 0.4; y una relación de agregados a arena (Ca/s) de: 2

Lo anterior nos da un cierto porcentaje de humedad que no rebasa en promedio el 40%; se considera una temperatura ambiente de 23°C (condiciones ambientales obtenidas con medida directa del instrumento) para el lugar donde se deja en reposo la mezcla.

Como era de esperarse y según datos recabados de la experiencia de los trabajadores del medio, aseguran que: "...el mayor porcentaje de absorción se produce durante los primeros minutos...", lo que en términos prácticos podría explicar la poca trabajabilidad en el concreto cuando no se atiende inmediatamente después del vaciado, condición que se acentúa bajo condiciones de alta temperatura ambiente.

La grafica siguiente (Fig. 4.26) muestra la respuesta del modelo matemático propuesto para simular el comportamiento del Proceso de Fraguado del concreto; el tiempo propuesto para la simulación de este modelo fue de 24 horas como mínimo. Cada curva

representa la respuesta del modelo para cada una de las tres combinaciones de agua/cemento propuestas.

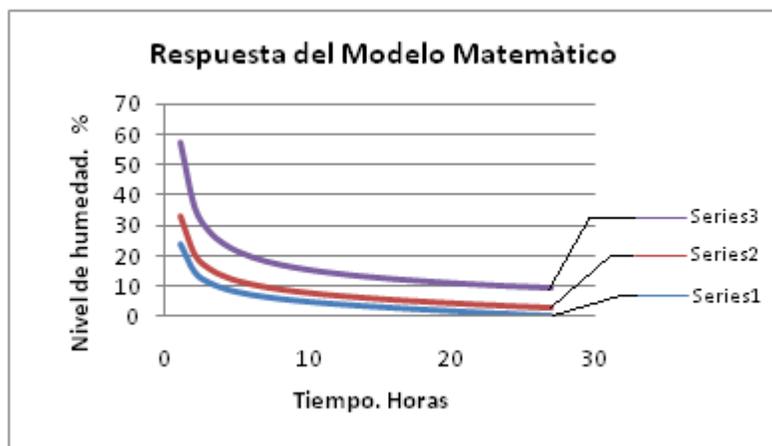


Figura. 4.26 Graficas que nos proporcionan la respuesta a la simulación del modelo matemático propuesto. Se observan las tres combiunaciones propuestas de agua/cemento. Serie 1: 6.78%; Serie 2:11.86%; Serie 3: 23.95%

En esta grafica de la figura 4.26, se pueden apreciar tres curvas, representando el curado de la mezcla teniendo diferentes relaciones de agua a cemento. Las cuales corresponden con los datos ofrecidos en la Tabla 4.4

Se presenta una pobre trabajabilidad del concreto cuando el contenido de humedad no es el adecuado; una rápida pérdida de trabajabilidad se incrementará cuando la temperatura del medio ambiente se incrementa.

La figura 4.27, presenta la respuesta del modelo matemático propuesto para la pérdida de humedad. Se observó la respuesta del proceso durante las primeras 24 horas; se grafica la respuesta para tres diferentes muestras cada una con diferente contenido de agua.

Muestra	Contenido de agua (masa en %)
(A)	6.78
(B)	11.6
(C)	25.5

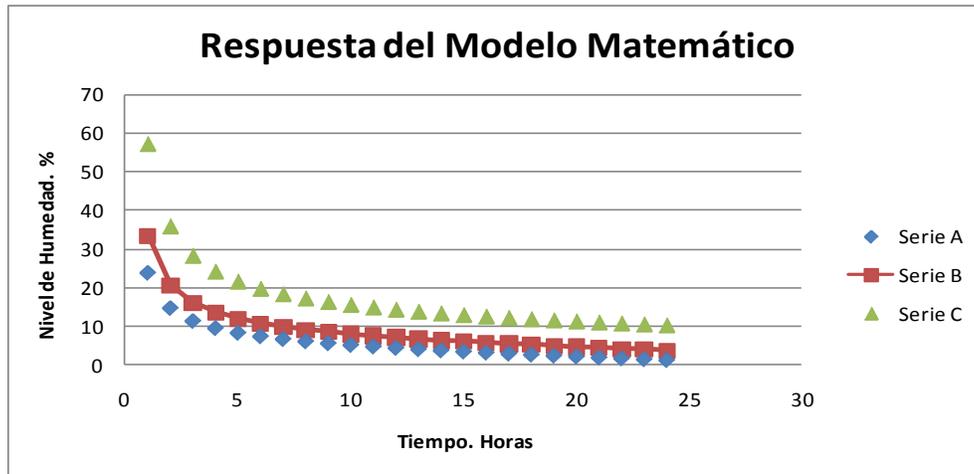


Figura 4.27. Curva de respuesta de la pérdida de humedad en la mezcla según el modelo matemático, para tres posibles combinaciones de agua cemento.

#### 4.6.5 Comprobación de los resultados generados por el modelo sugerido.

A manera de comprobación se utiliza el método de pesado-secado-pesado (Anexo 3), que consiste en tomar una pequeña muestra del concreto (para esta investigación se propuso una muestra no mayor a 10gr, lo anterior debido a las dificultades de infraestructura para lograr un secado de la misma.), secarla ya sea forzando el secado o dejándola secar. En ocasiones se busca una combinación de ambas formas, que permita asegurar la (casi) total eliminación de la humedad en la muestra, para posteriormente pesar la muestra y determinar, la proporción de agua que contenía al inicio (consultar Anexo 3).

En la siguiente gráfica (Fig. 4.28) se está mostrando el comportamiento de las mezclas de concreto, físicamente se toman pequeñas muestras (<10gr) y siguiendo el proceso de pesado-secado-pesado, se determina el nivel de humedad de cada mezcla de concreto; la grafica sólo muestra la parte que corresponde a la toma hecha hasta las seis horas aproximadamente después del vaciado del concreto.



Figura 4.28. Grafica resultante del proceso pesado-secado-pesado aplicado a cada una de las muestras de concreto.

Alterando los contenidos de humedad en las mezclas propuestas, la respuesta que arroja el modelo matemático llevará a resultados en los cuales se podrá apreciar lo que sucede en la vida real. Por una parte, disminuyendo el contenido de humedad en la mezcla, se obtendrá una disminución de la trabajabilidad del concreto. Esto debido a la poca humedad contenida en la propia mezcla, la que se podría ver agravada por un incremento en la temperatura de la misma. Si a lo anterior agregamos la absorción natural que la arena hace del líquido, se estaría privando con ello de más humedad al conjunto.

Por otra parte, un exceso de humedad lleva al extremo en el que se sucede lo que en la práctica se conoce como, sangrado del concreto. Fenómeno este que se presenta debido precisamente a un excedente de agua, que hace que el líquido abandone la mezcla, llevándose consigo importantes cantidades de cemento y además, prolongando en demasía el proceso de curado, con perniciosas consecuencias, ya que al llevarse el cemento en ese drenado excesivo, se está alterando la composición inicial del concreto; se tendrá un desbalance debido a que ahora existe menos cemento, del que inicialmente se adicionó. Pero no sólo es un desbalance de la mezcla y un retraso en el secado de la losa si no que, existe un peligro al disminuir también la resistencia del concreto; es posible tener una losa terminada, en apariencia sólida, y sin embargo su nivel de resistencia no será el correcto, ya que se ha eliminado buena parte del cemento que inicialmente se dispuso para la mezcla, esto debido a un exceso de agua.

Los anteriores han sido ejemplos de posibles situaciones a las que se puede llegar al no controlar el contenido de agua en el concreto.

Se debe buscar un balance entre:

Trabajabilidad-Humedad-Revenimiento.

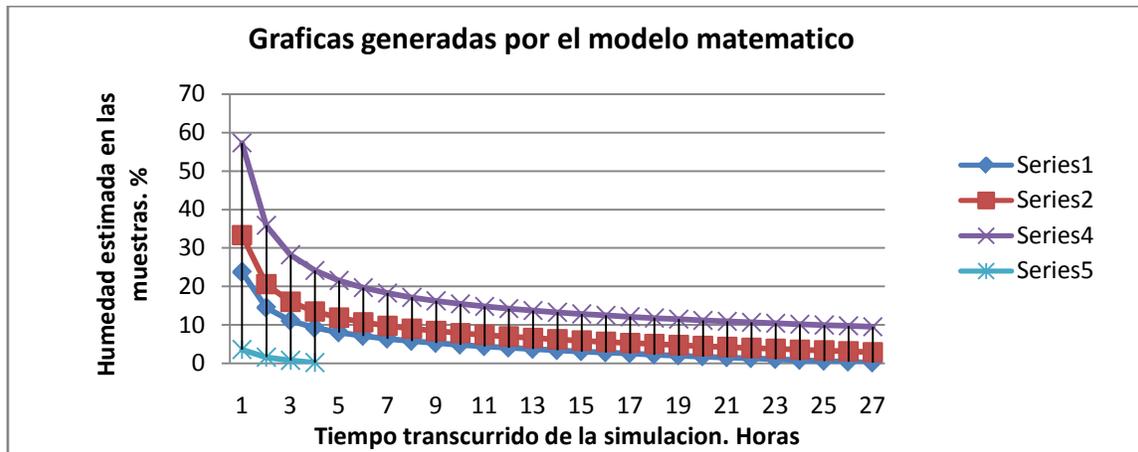


Figura. 4.29. Se muestra la grafica generada por la simulación del modelo matemático para cuatro relaciones de agua/cemento.

La figura 4.30, muestra el perfil de decremento de humedad para las mismas muestras usadas en la simulación del modelo para diferentes relaciones agua/cemento (W/c). En esta figura se puede apreciar lo cercano que se encuentran los resultados arrojados por la simulación del modelo matemático. Los datos corresponden a tres posibles relaciones agua/cemento, se puede ver cómo va decayendo el nivel de humedad conforme se avanza en el tiempo. Sólo se obtuvieron datos para seis horas.

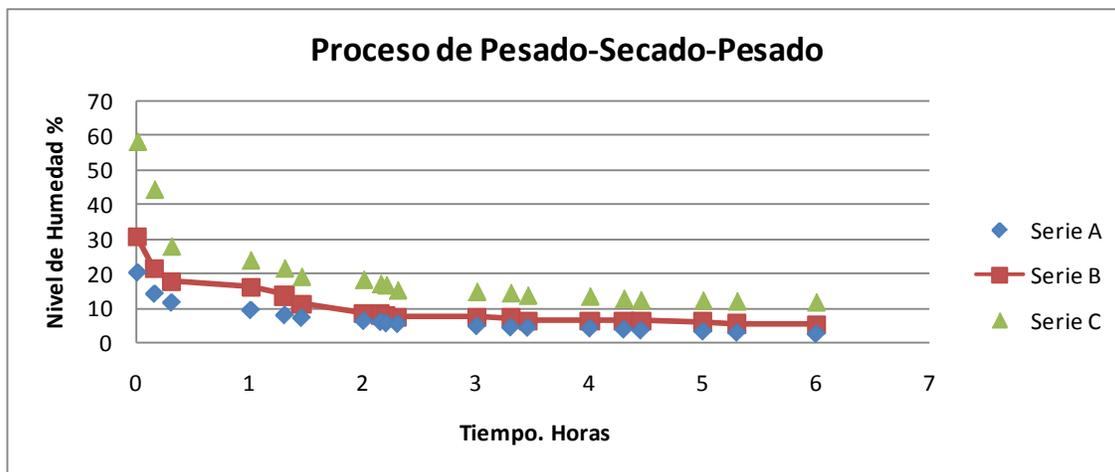


Figura 4.30. Grafica generada por los datos del proceso pesado-secado-pesado, realizado con las muestras de concreto fresco. Concreto preparado para tres posibles relaciones de agua/cemento.

---

En la figura 4.30 se presentan los niveles de humedad que se van reportando conforme se avanza en el proceso de pesado-secado-pesado se puede ver cómo se acerca a un 20% de humedad la mezcla de la serie A, y cómo decae por debajo de un 5% al llegar a las dos horas de haberse iniciado el proceso de fraguado.

Lo mismo sucede con las series restantes; para la serie B, se tiene en un inicio del proceso una humedad relativa de 30%, y llegando hasta un 10% a las dos horas del proceso.

En el caso de la serie C, se tiene que hacer un especial énfasis debido a que se presenta una humedad relativa muy cercana al 60%. En este caso se corre el riesgo de sufrir una pérdida de cemento del inicialmente incorporado por diseño de la mezcla; pérdida que se da con la salida de la excesiva humedad que tiene la mezcla; el exceso de agua arrastra consigo al cemento. La humedad relativa de esta mezcla permanece cercana a los 20% al llegar a las dos horas de fraguado.

#### **4.6.6 Relación entre la resistencia a compresión y el nivel de humedad inicial de la mezcla**

Se propone aprovechar la relación de la resistencia a compresión que presenta el concreto, con el nivel de humedad que tiene cuando es vaciado en el lugar de la obra; como ha sido propuesto con anterioridad por diferentes investigadores. El nivel de humedad del concreto recién vertido se propone sea estimado haciendo uso de señales de microondas aplicadas directamente sobre la mezcla fresca, al momento del vaciado. A diferencia de algunos métodos que proponen el uso de microondas para estimar el nivel de humedad sobre muestras ya fraguadas o en estado avanzado del fraguado, aquí se propone hacerlo (aplicar las señales de microondas) al momento del vaciado, cuando el concreto está fresco y va a ser trabajado en obra.

Con anterioridad se han hecho trabajos de investigación en los que se realizan este tipo de correlaciones, en especial, de resistencia a compresión y de la relación agua cemento propuesta al inicio de la mezcla; las pruebas las han realizado de manera tradicional, siguiendo el protocolo de rompimiento de muestras de concreto curadas según los protocolos establecidos de los laboratorios especializados en el rompimiento de muestras de concreto, y con diferentes relaciones de agua / cemento, entre las relaciones más utilizadas se tienen las de: 0.4; 0.5; 0.7.

Correlacionando ahora los resultados de los niveles de voltaje obtenidos con la aplicación de señales (energía) de microondas, con los valores de resistencia a compresión que presentan las muestras previamente probadas y catalogadas, según su relación agua / cemento, es posible estimar la resistencia a compresión de una mezcla de concreto fresco con el simple dato del voltaje obtenido al aplicar las señales de microondas sobre la mezcla.

Con lo que se llega a qué:

A un cierto voltaje, le podrá corresponder un valor de resistencia a compresión.

#### **4.6.7 Pruebas de Laboratorio realizadas con instrumentación de microondas en simultaneidad, con las Pruebas de laboratorio siguiendo el proceso de Pesado-Secado-Pesado para realizar una correlación de datos.**

Mediante las bases de datos obtenidas en las pruebas de laboratorio, aplicando señales de microondas sobre mezclas previamente preparadas de concreto, y las pruebas hechas con el proceso de pesado secado pesado. Es posible verificar la correlación existente entre el porcentaje de humedad (con P-S-P) y el voltaje que se obtiene, con la instrumentación de microondas aplicada a la muestra.

Si la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias de un proceso; se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores de la otra variable. Al tener dos variables A y B, existe correlación si al aumentar los valores de A lo hacen también los de B y viceversa. Dicha correlación entre dos variables no implica por sí misma, ninguna relación de causalidad.

##### **4.6.7.1 Metodología del proceso**

Para la realización de las pruebas se prepararon diferentes muestras de concreto y se optó por fijar primero, la que mantiene una relación agua cemento (W/c) de: 0.4, como a la mezcla estándar; en cuanto al cemento utilizado para la preparación se fija en: 17%; arena se fija en: 25%; Grava o agregados duros se fija en: 50%. Porcentajes que integran al total de la mezcla.

Para cada uno de los elementos que integran la mezcla se propone una tolerancia de:  $\pm 1\%$ .

Las proporciones de los elementos que integran las mezclas de concreto se formaron con base a lo que presenta "El Manual del Constructor", editado por la compañía CEMEX. Además, es posible observar sugerencias de mezclado en cada envase (bulto) de cemento, lo cual puede llevar a obtener una mezcla apropiada para las pruebas.

##### **Integración de las series.**

Se generaron tres series de mezclas cada una compuesta de al menos cinco muestras; en la primer serie se tiene la mezcla estándar con 10% de agua, en la segunda serie se aumenta hasta alcanzar un 11.9% y, finalmente se tiene la tercer serie con un 25.5%

Quedando las series de la siguiente manera:

Serie **A.** Agua 6.8 % ( $\approx 10.0$  %)

Serie **B.** Agua 11.9 % ( $\approx 12.0$  %)

Serie **C.** Agua 25.5 % ( $\approx 25.0$  %)

Se procuro mantener cada serie con al menos cinco muestras, de las cuales se eligieron a tres para realizar la grafica que le corresponde.

Condiciones prevalecientes durante las pruebas:

Una temperatura ambiente de  $23.7^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.8$ )

Con una humedad relativa del 39.1%. ( $\pm 4$ )

Las lecturas anteriores fueron tomadas con un hidrotermómetro

La tolerancia corresponde a la estipulada en la hoja de datos del propio instrumento.

Hidrotermómetro.

Modelo: MHB-382SD.

Ver figura 4.25



Figura.4.31. Fotografía del hidrotérmetro en la mesa de pruebas del laboratorio.

### --- Agua utilizada en la mezcla.

Para el agua se utilizó agua purificada (*Bonafont*), con la intención de eliminar cualquier traza de NaCl que pudiera existir en el agua suministrada por la delegación, además de cualquier otro mineral que pudiera afectar el proceso natural de fraguado del concreto (Lane, 1952).

Serie A: 299.2 gr.

Serie B: 444.402 gr.

Serie C: 949.99gr.

### --- Agregados: suaves y duros.

Los agregados suaves se tamizaron para excluir cualquier basura y componente de dimensión mayor a lo esperado en la arena.

En los agregados duros, se procuró que las dimensiones no fueran notoriamente dispares; se eliminaron los elementos que estuvieran con dimensiones muy superiores a lo comúnmente visto en este tipo de elementos; en el caso de las piezas pequeñas, es poco probable el eliminar los que tuviesen una dimensión demasiado pequeña al común de las piedras de grava.

Se realizó un muestreo de los agregados duros tomando muestras y encontrando que en promedio las dimensiones son de: 31.583 mm. Figura 4.32



Figura 4.32. Fotografía tomada a algunas muestras de los agregados duros utilizados en las pruebas de laboratorio.

**--- Cemento utilizado.**

En cuanto al componente cemento, se utilizó:

Bulto de cemento portland tipo II compuesto, en su presentación de 50 Kg., cemento más comúnmente utilizado en las obras.

En cada muestra se tenía un equivalente de cemento a: (748 gr.) 750gr. Figura 4.33



Figura 4.33. Cemento en el recipiente utilizado para la preparación de las mezclas.

**4.6.7.2 Protocolo seguido para las pruebas utilizando microondas.**

1. Primero se hace el encendido de la instrumentación de microondas y se prepara la base donde se sitúa la muestra.
2. Posteriormente se preparan los elementos en sus recipientes, por separado.

Agregados;	Cemento;	Agua
Suaves		
Duros		

3. En un recipiente apropiado se inicia la mezcla de agregados; se mezcla.
4. A la mezcla de agregados se añade el cemento y se inicia una mezcla sugerida (se mezcla primero con el reloj 20 veces, y se repite la misma acción contra reloj), al término se observa si se tiene una mezcla adecuada, visiblemente homogénea.

5. A la preparación anterior se agrega el agua y se repite la misma acción de mezclado.
6. Se deposita la muestra bajo el haz de microondas.  
Se separa la muestra para ser pesada y después secada (para efectos prácticos se tomaron utilizando una cuchara para café); para secar la muestra se recurre a todos los medios posibles para llegar a eliminar casi en su totalidad el agua contenida en la muestra; se deja al sol y se usa un horno de microondas de cocina de baja potencia no más de 900 W, en intervalos de 15-20 minutos, para su revisión y en su caso repetición del proceso.
7. Una vez secada la muestra, se pesa se compara y se registran los datos.
8. Simultáneamente se va registrando el proceso de secado de la muestra puesta en el haz de microondas; se registran automáticamente los valores de voltaje que va recuperando el sistema.

#### **4.6.7.3 Determinación de la humedad de las muestras siguiendo el proceso de pesado secado pesado**

Para lograr una comprobación creíble de los niveles de humedad, que tiene una muestra de material se sigue un proceso estándar, de pesar secar y volver a pesar para conocer la cantidad de agua que contenía; este proceso aunque lento y muy laborioso, es el más recomendable cuando se tiene que saber el nivel de agua que contenía un cierto material (Meyer 1980) (Pande 1975).

En este proceso se toma una muestra de la mezcla que se encuentra bajo el haz de microondas y se seca hasta obtener el peso del material restante, para luego ser pesado este material nuevamente y así determinar con cierto grado de aproximación la cantidad o porcentaje de humedad, contenida en la muestra (Anexo 3).

El objetivo fundamental como ya se ha comentado es comparar el nivel de humedad de la muestra, con el nivel de voltaje que va detectando en el lado receptor el sistema de microondas utilizado en el proceso.

Se tomaron muestras de concreto y se siguió el proceso, hasta completar un total de seis horas de incidencia del haz sobre el concreto; se proceso una muestra de concreto cada 15 minutos; se tomaron alrededor de veinte muestras/por prueba/por relación W/c, de concreto y se fueron secando y pesando una a una para volverlas a pesar, hasta obtener su

porcentaje de humedad relativa. Utilizando las conocidas expresiones matemáticas de la estadística, se formaron las tablas con los datos generados en las diferentes pruebas.

**Tabla 4.5**

Valores obtenidos del pesado y secado de las muestras de mezcla preparadas en el laboratorio

Relación W/c	Sumatoria	Media	Desviación estándar
0.4	120.343	6.33384211	4.55214961
0.7	196.48	10.3410526	6.75978213
1.5	376.91	19.8373684	12.2141179

#### 4.6.7.4 Mediciones obtenidas con el sistema de microondas.

En la siguiente tabla (Tabla 4.6), se presenta la estadística de los valores obtenidos, a partir de los niveles de voltaje que fueron detectados por el sub sistema de detección, y almacenamiento de datos incorporado al sistema de microondas; estos valores representan las tres posibles combinaciones de agua cemento, y en cada una de ellas se registraron los valores de voltaje, para formar tres curvas que fueran representativas de las condiciones del concreto preparado.

**Tabla 4.6**


---

 Media, Desviación Estándar y Sumatoria de los valores de voltaje obtenidos de las muestras
 

---

 Para una relación agua/cemento de: 0.4
 

---

Suma	Media	Desviación estándar
199	7.96	2.7100123
205	8.2	3.00859879
196.5	7.86	2.62710233

 -----
   
 Para una relación agua/cemento de: 0.7
   
 -----

381.6	15.264	3.71717635
364.06	14.5624	3.8065265
380.8	15.232	3.60239735

 -----
   
 Para una relación agua/cemento de: 1.5
   
 -----

2638.4	119.4912	21.2581213
2931.57	117.2628	17.1756731
2805.07	112.2028	13.7428898

## 4.7 Correlación de los Datos Generados Durante los Procesos.

Las bases de datos generadas en las diferentes pruebas son de:

- Modelo matemático (x hora);
- Proceso de pesado y secado (se procuró un muestreo/lectura cada 15 minutos);
- Aplicación continua de señales de microondas (cada 15 minutos; programa de captura.)

## Correlación de Pearson.

La correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra.

Existe correlación entre dos variables aleatorias si al aumentar los valores de una de ellas, lo hacen también los valores de la otra y viceversa.

Se considera que las variables bajo investigación son mediciones numéricas, es decir, que se miden mediante un dispositivo o procedimiento que genera números reales y no categorías.

Es necesaria una medición de la correlación existente entre dos variables. La medición que se utiliza comúnmente para esta relación es el: *coeficiente de correlación*. Dos variables con una relación negativa perfecta tienen un coeficiente de correlación igual a -1. Por otro lado, dos variables con una relación positiva perfecta tienen un coeficiente de correlación igual a +1.

De aquí que el coeficiente de correlación entre dos variables puede variar entre -1 y +1, dependiendo de la cantidad de correlación entre las dos variables que se están considerando.

El coeficiente de correlación mide el grado al cual se relacionan en forma lineal dos variables entre sí. (Hanke)

Existen diversos coeficientes que miden el grado de correlación (Pearson; Spearman; Canónica). El más conocido por el autor, es el coeficiente de correlación de *Pearson*. Éste se obtiene dividiendo la covarianza de dos variables por el producto de sus desviaciones estándar. Debido a que  $\cos(\alpha)$  es el coeficiente de correlación de *Pearson*. Consultar sección 2.3

El coeficiente de correlación tiene siempre un sentido, cualquiera que sea su valor entre -1 y 1.

La correlación entre dos variables no implica, por sí misma, ninguna relación de causalidad.

### **4.7.1 Correlación de datos. Microondas / Proceso de Pesado Secado Pesado**

Con base en los diferentes experimentos aplicados sobre muestras de concreto fresco, se sabe que existe una correlación entre las dos variables (humedad en la mezcla fresca; Nivel de voltaje obtenido). Esto debido a que los cambios en una de ellas se corresponden con los valores de la otra; por lo tanto es posible asegurar que las variables están correlacionadas.

Considerando las lecturas obtenidas con la aplicación de señales de microondas sobre la mezcla (en volts), y se relacionan con los niveles de humedad que aporta el modelo matemático (en % de humedad), y si además, las dos bases de datos se relacionan una a la vez, con la base de datos generada por el método de pesado-secado-pesado, será posible lograr:

**Primero:** Conocer que tanto se alejan de la realidad las dos bases de datos, tanto la generada por el modelo matemático, como la generada por la instrumentación implementada para determinar la humedad.

**Segundo:** Generar una cierta lista de niveles posibles que se le pueden asignar a una mezcla de concreto fresco, de la cual en teoría no se sepa su composición pero que se podrá estimar el porcentaje de humedad que tiene dicha mezcla, al aplicarle señales de microondas directamente.

Al hacer uso de señales de microondas, se tendrá una estimación más cercana de las condiciones de humedad que guarda la mezcla en tiempo real, al momento de ser vertida, ya que no es necesario tomar muestras y llevarlas a los laboratorios para su análisis, de aquí la importancia de lograr una correlación entre las lecturas de señales de microondas, y los niveles de humedad de las mezclas de prueba; las lecturas, mediante instrumentación con microondas se hacen al momento y en el lugar en el que se encuentra dispuesta la mezcla de concreto.

Como se ha venido mencionando, durante el proceso de curado se elimina la mayor parte del líquido contenido en la mezcla por lo que, se considera necesario conocer de esa pérdida de humedad, de preferencia en un lapso no mayor a 24 horas. Lo anterior es porque la pérdida de humedad puede llegar al 80% en menos de las 24 horas antes mencionadas.

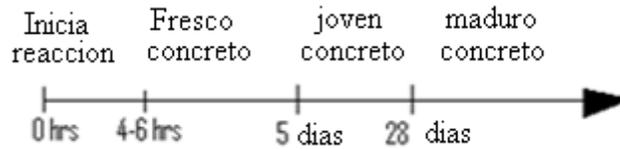


Figura 4.34. Dibujo que nos ilustra las etapas consideradas en el fraguado del concreto

En la gráfica de la figura 4.34, se representan los tiempos considerados en el proceso de fraguado de una mezcla que puede catalogarse como básica (Agua; Cemento; Agregados) y que según éste, en un lapso menor a seis horas; la mezcla presenta ya un aspecto y consistencia de concreto terminado, sin embargo se aprecia en la gráfica, que todavía faltaría un tiempo para considerar al concreto como un concreto maduro; el mayor cambio de la mezcla, se sucede en edades tempranas de la propia mezcla de concreto (Neville 1963).

Ahora, teniendo un modelo matemático que proporciona una predicción de la humedad del concreto; la medición de voltaje por medio de un equipo de microondas, y la determinación de la humedad de una mezcla mediante el proceso de pesado-secado-pesado de la muestra. Es posible lograr ajustar lo más cercano posible a la realidad, las lecturas que proporcione el prototipo de equipo de microondas.

Con lo anterior se puede adelantar que si es posible tener suficientes herramientas para cuidar el proceso de fabricación del concreto, desde la reacción inicial hasta llegar a la obtención de un concreto maduro.

En la siguiente figura (Figura 4.35) se presenta un diagrama de flujo de intercambio de datos entre las tres opciones antes mencionadas.

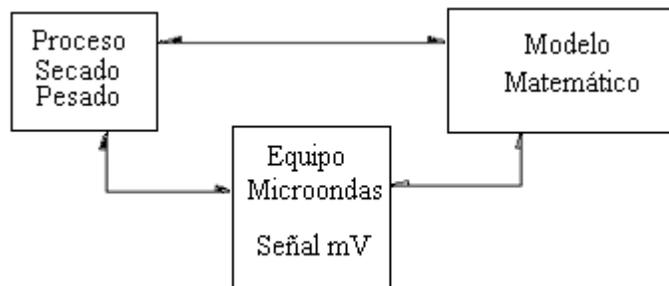


Figura 4.35. Diagrama a bloques que nos representa la correlación entre los métodos de medida.



Figura 4.36. Grafica que muestra el proceso de pesado secado pesado para las tres opciones de relación agua cemento utilizadas en las pruebas de humedad en concreto fresco. Datos tomados en las primeras seis horas de fraguado.

En la correlación que se muestra a continuación se utilizaron los datos generados durante el proceso de pesado secado pesado, (Figura 4.36) así como los datos generados mediante la aplicación de señales de microondas. Se considera un periodo de 6 Horas; para cada serie sólo se consideraron tres muestras de cada una del total que se tomaron.

Las pruebas de laboratorio utilizando el sistema de microondas, y la comprobación de pesado-secado-pesado se agruparon en los tres posibles escenarios de relación agua/cemento considerados hasta ahora:

- Serie A. Con un: 6.78% considerado como normal
- Serie B. Con un: 11.9%
- Serie C. Con un: 25.5%.

**Tabla 4.7**

Correlación de datos generados por el equipo de Microondas, y las mediciones obtenidas mediante el método de pesado-secado-pesado

Serie	Correlación 1	Correlación 2	Correlación 3
A	0.94199958	0.95504146	<b>0.97868523</b>
B	<b>0.88967181</b>	0.87588488	0.88477909
C	0.92182071	0.94711593	<b>0.98698808</b>

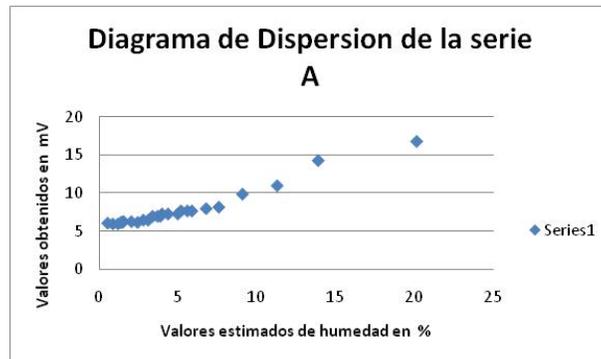
Una forma de describir la distribución bidimensional es representar los pares de valores en el plano cartesiano; como en las graficas que a continuación se presentan y que reciben el nombre de *Nube de Puntos* o *Diagrama de Dispersión*.

Ver gráficas en la figura 4.37.

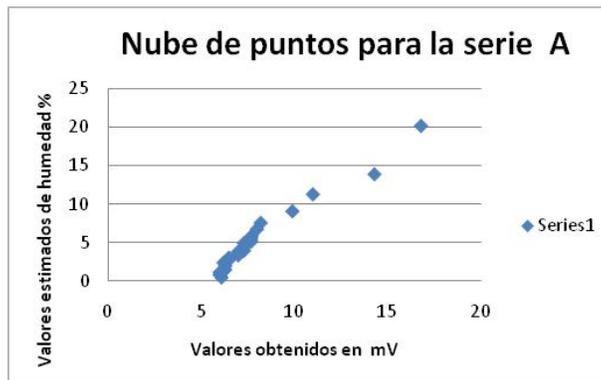
#### Diagramas de Dispersión

La primera forma de describir una distribución bidimensional es representar los pares de valores en el plano cartesiano, el gráfico obtenido recibe el nombre de nube de puntos o diagrama de dispersión.

Un diagrama de dispersión gráfica los puntos de datos X-Y en una gráfica bidimensional.

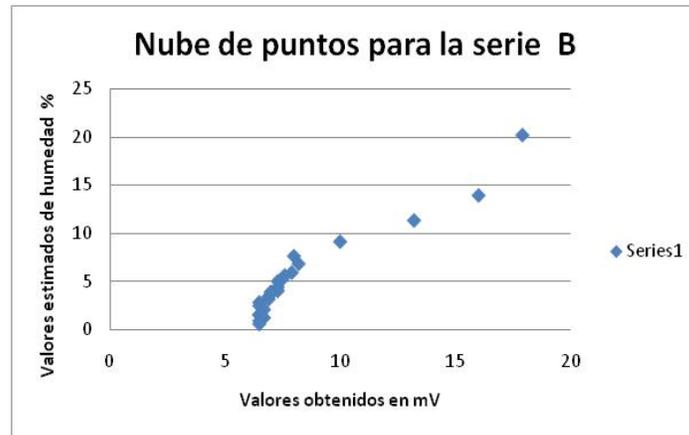


a)

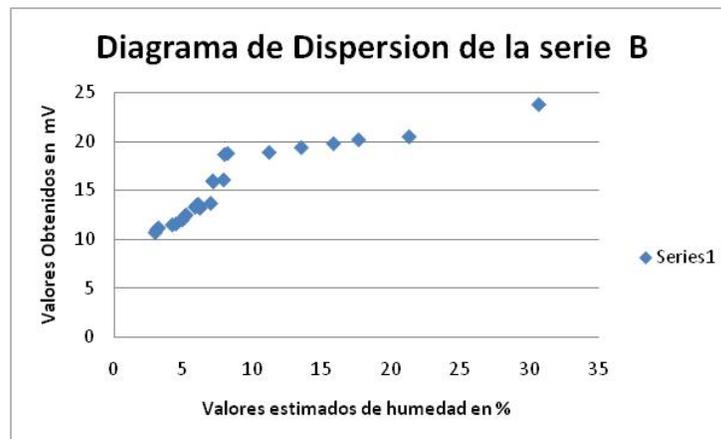


b)

Figura 4.37 Graficas que muestran la dispersión de puntos de las pruebas realizadas utilizando instrumentación de microondas. Serie A. a) Se tienen valores estimados de humedad en % contra valores en mV. b) Se tienen valores en mV contra valores estimados de humedad en %.

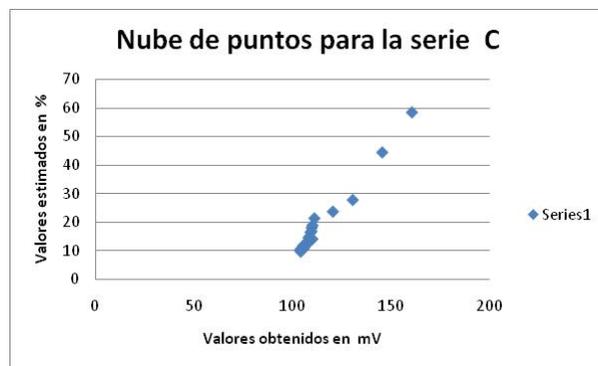


a)

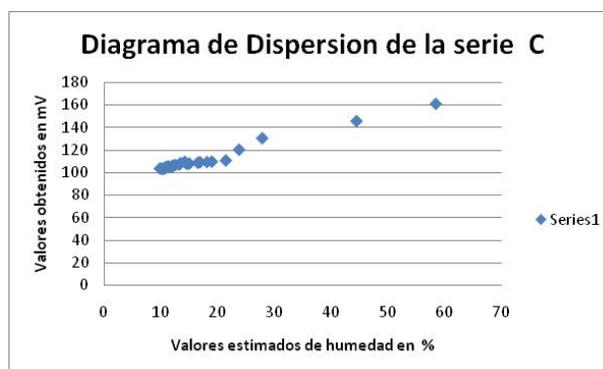


b)

Figura 4.38 Graficas que muestran la dispersión de puntos de las pruebas realizadas utilizando instrumentación de microondas. Serie B. a) Se tienen valores estimados de humedad en % contra valores en mV. b) Se tienen valores en mV contra valores estimados de humedad en %.



a)



b)

Figura 4.39 Graficas que muestran la dispersión de puntos de las pruebas realizadas utilizando instrumentación de microondas. Serie C. a) Se tienen valores estimados de humedad en % contra valores en mV. b) Se tienen valores en mV contra valores estimados de humedad en %.

Es posible argumentar que la mayoría de los puntos en las graficas antes presentadas (figuras 4.37, 4.38, 4.39) se agrupan en las cercanías de una recta, por lo que es factible presentar a la correlación de cada grafica, como a una correlación Lineal.

La cercanía de los puntos en las graficas a una recta hace suponer una correlación lineal fuerte; como además la recta sería creciente, la correlación es positiva o directa. Debido a que, como se mencionó con anterioridad, al aumentar una variable, la otra también tendería a aumentar; se corresponden.

### 4.7.2 Correlación de datos. Modelo Matemático / Proceso de Pesado Secado Pesado

Igualmente para este caso del modelo matemático y el proceso de pesado secado pesado se utilizaron las dos bases de datos para generar las respectivas correlaciones de cada una de las series.

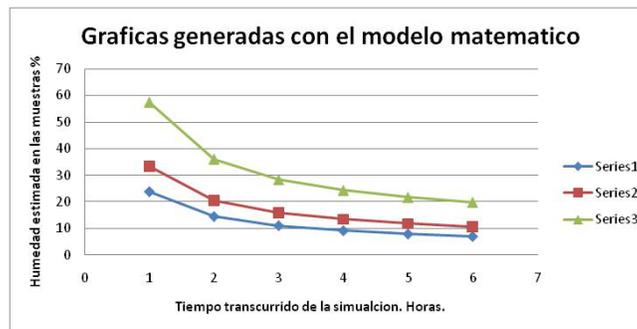


Figura 4.40. Graficas generadas por el modelo matematico. Se consideraron datos de seis horas en cada una de las series.

En las graficas del modelo matemático de la figura 4.40, se contemplan las tres versiones del concreto premezclado fresco utilizado, series A; B; C.

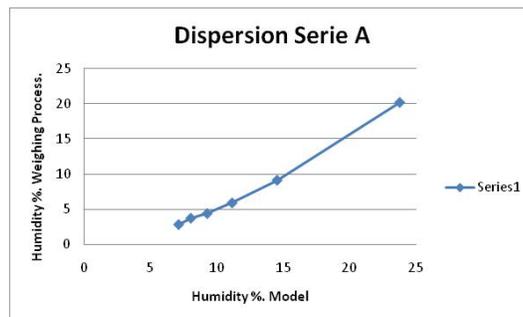
**Tabla 4.8**

Correlación de valores generados por el modelo matemático y por las mediciones P-S-P

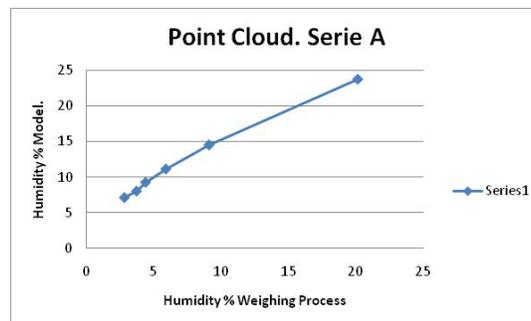
Serie		
A	B	C
0.99541516	0.99021411	0.98098288

Para realizar la correlación de valores del modelo matemático propuesto y el proceso de pesado secado pesado, se hizo uso sólo de la mejor versión de cada serie (A; B; C, generada con él antes mencionado proceso de laboratorio; microondas).

A continuación se pueden apreciar las graficas generadas para la dispersión de datos de las series; se generaron dos versiones de cada relación debido al cambio de ejes que se hace.

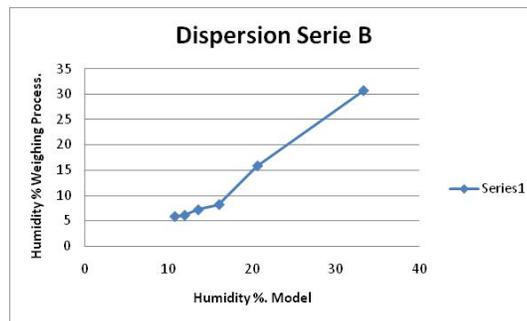


a)

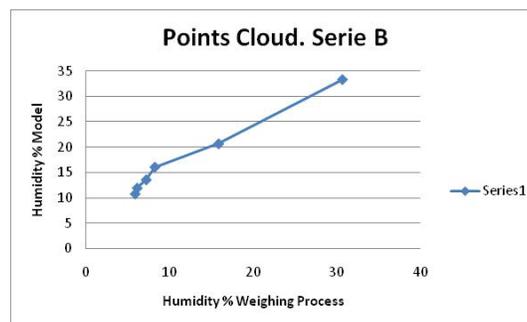


b)

Figura 4.41. Graficas mostrando la dispersión de puntos de la correlación entre el Proceso de pesado secado pesado y el modelo matemático. Serie A. a) Valores generados por el modelo matemático en %, contra valores de humedad obtenida de las muestras mediante el proceso de P-S-P. b) Valores de humedad en % obtenidos de las muestras mediante el proceso de P-S-P, contra los valores generados por el modelo matemático en %

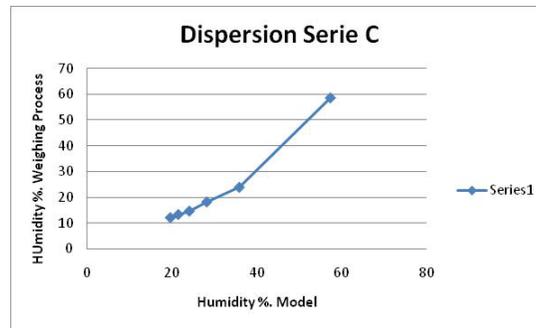


a)

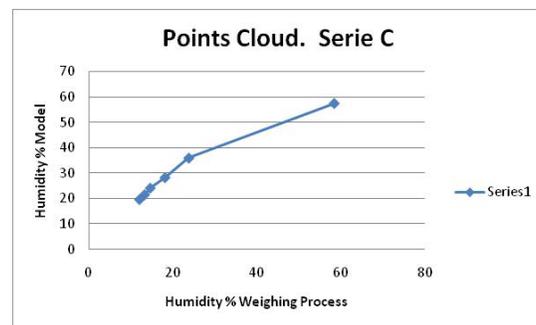


b)

Figura 4.42. Graficas mostrando la dispersión de puntos de la correlación entre el Proceso de pesado secado pesado y el modelo matemático. Serie B. a) Valores generados por el modelo matemático en %, contra valores de humedad obtenida de las muestras mediante el proceso de P-S-P. b) Valores de humedad en % obtenidos de las muestras mediante el proceso de P-S-P, contra los valores generados por el modelo matemático en %



a)



b)

Figura 4.43. Graficas mostrando la dispersión de puntos de la correlación entre el Proceso de pesado secado pesado y el modelo matemático. Serie C. a) Valores generados por el modelo matemático en %, contra valores de humedad obtenida de las muestras mediante el proceso de P-S-P. b) Valores de humedad en % obtenidos de las muestras mediante el proceso de P-S-P, contra los valores generados por el modelo matemático en %

### 4.7.3 Escala de humedad para concreto fresco.

Dados los valores de la simulación del modelo, y los datos obtenidos con el proceso de pesado-secado-pesado, aunados a las lecturas obtenidas con el equipo de microondas. Es posible lograr una correlación inicial, para estimar el nivel de humedad que una mezcla de concreto fresco pueda tener. Ahora lo importante es fijar esa correspondencia entre la señal de microondas, y el comportamiento natural que tiene la mezcla conforme va deshidratándose. Figuras 4.41, 4.42, 4.43

Esta escala que se presenta a continuación, correspondería a la escala de valores de voltaje que la instrumentación con microondas presentaría, al aplicar una señal de microondas y recuperarla; el nivel de voltaje se interpreta como un estado o condición de humedad.

**Tabla 4.9**

Niveles de voltaje y posible estado del concreto al momento de ser vertido.

Condición de humedad	Respuesta de la mezcla. [mV]
Seca	2.0 - 3.0
Baja	3.5 - 4.8
Leve	3.1 - 4.8
Normal I	6 - 18
Normal II	19 - 25
Alta	26 - 50
Exceso	51 - 80
Saturado	80 - 99
Riesgo	100 - 150

#### 4.7.4 Ventajas del método aquí propuesto.

Se obtiene la información requerida al momento, sin tocar el material y sin muestreo del mismo; es un aproximado de la cantidad de humedad con la que llega el concreto a la obra. El estimado se compara contra las pruebas de resistencia a compresión y relación agua/cemento que ya se tienen, obteniendo con ello también, un estimado de la resistencia a compresión que deberá presentar el concreto al cumplirse el periodo de fraguado y se podrá comparar con las pruebas físicas de rompimiento realizadas en el laboratorio, al término de los 28 días de fraguado de las muestras.

Se agrega también que éste es un método sencillo debido a que la instrumentación requerida, utiliza sólo la parte de la magnitud (es un método completamente escalar) de la señal generada, para proponer un estimado de humedad.

La potencia generada por el equipo de microondas es baja, no rebasa los 50 mW y es posible considerarla como una tecnología no destructiva, ya que cumple con éste y con los demás requisitos que la sitúan en tal condición.

Los diseños de los diferentes componentes que integran el equipo de microondas utilizado en las pruebas está plenamente establecido y comprobado, su operación es ya conocida y cumple los requisitos de no destructibilidad, y de seguridad para el operario.

La técnica de aplicación es también sencilla y fácil de utilizar para el análisis del concreto fresco.

Y se hace énfasis nuevamente. **Es aplicación de energía de microondas sobre concreto fresco.**

# CAPÍTULO CINCO

## Conclusiones y recomendaciones

Es posible estimar el nivel de humedad que contiene una mezcla de concreto fresco recién vertido, utilizando señales de microondas; la aplicación de la energía se hace en modo de un solo plano, los sensores están inclinados un cierto ángulo para capturar la señal después de haber sido enviada, hacia la mezcla de interés.

Al obtener un nivel de voltaje de la instrumentación de microondas, se le asocia con un cierto porcentaje de humedad. Ambos niveles fueron obtenidos a partir de la misma porción de concreto, siguiendo los protocolos establecidos para determinar qué porcentaje de humedad tiene la muestra.

De igual modo teniendo una humedad relativa, ésta se asocia con un nivel de resistencia a compresión, el cual fue obtenido a través de pruebas extensivas, siguiendo el protocolo tradicional de muestreo y rompimiento de muestras al término de los 28 días de fraguado convencional para toda construcción.

Una prueba que se realiza al momento del vertido de la mezcla en el lugar de la obra, es la prueba del revenimiento; a partir de pruebas de revenimiento ya realizadas, es posible asociar el revenimiento en una muestra, con el nivel de voltaje que se obtenga, con la aplicación de las señales de microondas sobre la mezcla fresca del concreto.

A partir de la aplicación de una señal no destructiva de microondas sobre la mezcla de concreto fresco, se están obteniendo características propias del concreto: humedad resistencia a compresión revenimiento, y las demás características que sea posible asociar a un nivel de voltaje aplicado a una mezcla de concreto siguiendo una técnica diseñada para determinar el nivel de voltaje.

Este método no destructivo que utiliza señales de microondas, es ante todo un complemento para las técnicas ya existentes de control de la calidad en el concreto. No se busca eliminar a ningún proceso o método de control de calidad, sino complementar en la

medida de lo posible a los ya existentes controles de calidad en el concreto premezclado; aumentar los niveles de seguridad, con una simple prueba que pueda llegar a ser totalmente transparente para los operarios de las unidades de entrega, esa es la meta.

Esta técnica o método de medición se puede acoplar o implementar en los camiones de traslado (ollas), para que al momento de deslizarse el concreto por la rampa de descarga y que se vaya obteniendo una gráfica en tiempo real, la cual deberá mostrar qué tan homogénea llegó la mezcla, y que humedad tiene al momento de ser descargada.

Resulta creíble que por el momento este tipo de pruebas de control de calidad pudiera ser aplicado a mezclas de concreto fresco entregado en obra, por camiones especializados, ollas; en un futuro tal vez sea aconsejable, y hasta recomendable que aún en pequeñas cantidades de concreto mezclado, y para uso doméstico, en obras de restauración o modificación sea también auditado por este tipo de controles de calidad, para intentar por todos los medios aumentar el nivel de seguridad y confiabilidad en todas las construcciones sin importar sus dimensiones.

Existen técnicas que se pueden implementar con los sistemas de microondas que se encuentran a nuestro alcance, y ello nos permite desarrollar pruebas de detección no destructiva de parámetros de las mezclas, ya sea con reflexión o transmisión, lo importante es tener en consideración que *La detección de la energía absorbida puede ser realizada por la atenuación (pérdida) o por métodos de cambio de fase; o ambas mediciones pueden ser realizadas simultáneamente.*

Es importante promover e impulsar el uso de la tecnología de microondas para que puedan ser consideradas dentro de las tecnologías no destructivas como tal. Se tiene la oportunidad de presentar progresos en el desarrollo de sistemas de microondas, mediante el diseño y fabricación de los equipos, y en la promoción de técnicas de medición, propias.

## Referencias

- Abrams D** (1918). "Design of Concrete Mixtures". Lewis Institute, Structural Materials Research Laboratory. Bulletin No.1.
- ACI.** (1998) "Committee 228, Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI Farmington Hills, MI
- ACI.** (2001). American Concrete Institute. "Proporcionamiento de mezclas: Concreto normal, pesado y masivo" ACI 211.1 Detroit,
- ACI 116R** (2000). "Cemento y Concreto Terminología". American Concrete Institute. Detroit
- Affection N.J. and Lew H. S.** (2001). "The Maturity Method: From Theory to Application" "Proceedings of the 2001 Structures Congress and Exposition. Washington, D.C. May 21-23
- Aracil Javier.** (1986) "maquinas, sistemas y modelos" Ed. Tecnos
- Balsamo, H.** (2008). BASF. "que hay debajo de nuestros zapatos" Revista de la asociación argentina del hormigón Año 5, num.15.
- Ballena del Rio Pedro Manuel y Roger Job Navarro Tello.** (2009). "Dosificación y diseño de mezclas de concreto" Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo. Escuela profesional de ingeniería civil, tecnologías de los materiales. Peru.
- Bahr, A.J.** (1982) "Microwave Nondestructive Testing Methods" Gordon and Breach Science Publishers, N.Y.
- Baker Jarvis J, Janzek M. V. and Geyer R. G.** (1994) "Analysis of an open ended coaxial probe with lift-off for nondestructive testing of dielectric and magnetic material properties". IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. Vol. 43, October.
- Bakhtiari Sasan, Stoyan I. Ganchev and Reza Zoughi.** (1993). "Open-Ended Rectangular Waveguide for Nondestructive Thickness Measurement and Variation Detection of Lossy Dielectric Slabs Backed by a Conducting Plate". IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement vol.42, no.1. Feb
- BASF.** (2006). "Cloruros y Aditivos" Construction Chemicals Latin America. Boletín Técnico
- Birchak J.R., Gardner C.G.,** (1974) "High Dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture" Proc. IEEE, vol. 62, Jan.
- Bois Karl Aaron Benally and Reza Zoughi.** (1998). "Near Field Microwave reflection Property Analysis of Concrete Using Open-Ended Rectangular Waveguides at S-Band and X-Band" Nondestructive evaluation of materials and Composites II. SPIE Vol. 3396 San Antonio Texas April. ISBN 0-8194-2845-0
- Bois Karl Aaron Benally Paul S. Nowak and Reza Zoughi.** (1998). "Cure State Monitoring and Water-to-cement Ratio Determination of Fresh Portland Concrete Cement-Based

Materials Using Near-Field Microwave Techniques". IEEE. Transaction on Instrumentation and Measurement. vol, 47, No.3. June.

**Bois Karl J.**, Larry F. Handjojo, Aaron D. Benally, Khalid Mubarak and Reza Zoughi. (1999). "Dielectric Plig-Loaded Two-port Transmission Line Measurement Technique for Dielectric Property Characterization of Granular and Liquid Materials". IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol, 48, No. 6. Dec.

**Bois Karl J.**, Aaron D. Benally and Reza Zoughi. (2000). "Microwave Near-Field Reflection Property Analysis of Concrete for Material Content Determination". IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol, 49, No.1. Feb.

**Bois Karl J.**, A. D. Benally and R. Zoughi. (2001). "Near-Filed non-invasive determination of NaCl in Mortar". IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol.148. No. 4, July

**Brown W.F.**, (1956) "Dielectrics" Encyclopedia of physics vol. 17, Berlin: Springer.

**Bussey H. E.** (1967) "Measurement of Rf Properties of Materials a Survey" Proceedings of the IEEE, vol. 55. No. 6, June.

**Calva Olmos Gerardo.** (2001). "Desarrollo de un equipo Transmisor Receptor de Microondas en la Banda X, con Aplicación en un Laboratorio de Electromagnetismo, y en la Transmisión de Datos." Tesis de Grado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.,

**Calva Olmos Gerardo y Mario Pacchiano.** (2006). "Instrumentación Electrónica para Análisis No destructivo" Memorias de Congreso de Instrumentación. Ensenada Baja California, México. Octubre.

**Calva O. Gerardo; Esau Vicente Vivas; Rafael Prieto M.; Mario Pacchiano.** (2007). "Microwave Based Detection, Quantification and non-Destructive Evaluation of Materials and Compounds". Cairo Egypt. December 29-31 pp.148-151

**Calva Olmos V.G., A. Padron, A. Nogueira Jimenez, R. Prieto Melendez, J.G. Bañuelos Muñeton.** (2007). "Reflexión y/o refracción de energía de Microondas en Materiales" L Congreso nacional de Física, Octubre. Veracruz Veracruz, México.

**Calva Olmos Gerardo; J. Guadalupe Bañuelos; Rafael Prieto; Mario Pacchiano; Alejandro Padrón .** (2008) "Diseño de un Reflectómetro para Aplicación en Detección de Señales No Invasivas". Congreso Nacional de Instrumentación SOMI XXIII. Xalapa Veracruz, México Octubre

**Calva Olmos Gerardo; Jèsus Acosta Flores y Mario Pacchiano de la Garza.** (2013). "Humidity estimation in fresh concrete via a new mathematical model and a microwave detection system to estimate the state of cure of setting concrete. Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico. Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria. México D. F. México. Por publicarse en Journal of Applied Research and Technology (*JART*). Aceptado: Abril 18 de 2013.

**Carino N.J. and Lew H.S.** (2001) The maturity method: From Theory to Application. Building and fire research laboratory. National Institute of Standards and Technology. USA.

**Carr-Brion K..** (1986). "Moisture Sensors in Process Control". Elsevier Applied Science Publishers.

- Carter** L. J., Bryant G. H., Fevre M Le and Wong W.C. (1996) "Moisture and landmine detection" University of Auckland. New Zeland. October.
- Carter** L. J., Sullivan M. J., Hung Y. J. and Teng J. (1998) "Thermal imaging for landmine detection" University of Auckland, New Zeland Conference Publication. No. 458.
- Castellanos G.** (1985). "Aplicaciones del método de velocidad de pulso ultrasónico correlacionado con la Resistencia a la compresión para la evaluación del concreto hidráulico". Tesis de maestría Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Cihlar** J. and Ulaby F.T., (1974) "Dielectric properties of soils as a function of moisture content" Univ. Kansas, Lawrence Tech. Rep. nov.
- Collin** Robert E. (1985) "Antennas and Radiowave Propagation" Mc Graw Hill Company
- Connor** F.R. 1986. "Waves. Introductory Topics in Electronics and Telecommunication" Ed. Edward Arnold. Second edition.
- Cook** Nigel P. (1986) "Microwave principles and systems" Prentice Hall
- Daniels D.J.** (2000). "Radar for non destructive testing of materials" Microwave systems and devices department. Leatherhead, surrey, U.K.
- Decareau** R.V and Peterson R.A. (1986). "Microwave processing and engineering": Ellis Horwood Ltd. England
- Decreton** M. C. and Gardiol F. E. (1974) "Simple nondestructive method for measurement of complex permittivity ". IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. Vol. IM-23, December.
- Decreton** M. C. and Ramachan D. (1975) "Nondestructive measurement of complex permittivity for dielectric slabs " IEEE Transaction on microwave theory technology. Vol. MT-23. December.
- Delives A.,** (1993). "Tecnología y Propiedades Mecánicas del Hormigón" 2da Edición Instituto Técnico de Materiales y Construcciones. Madrid.
- Despres V.** and C. Akyel. (1997). "Microwave Sensing of Moisture Content In Wine Corks". Asia Pacific Microwave Conference.
- Du** Yang, Ulaby Fawwaz T. and Dobson Craig. (2000) "Sensitivity to Soil Moisture by Active and Passive Microwave Sensors" IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 38, No.1 January
- Folgero Kjetil.** (1998). "Broad-Band Dielectric Spectroscopy of Low-Permittivity Fluids Using One Measurement Cell" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.47, No. 4 August
- Fowler** Kenneth A. Elfbaum Gerry M., Smith Karen A. and Nelligan Thomas J. (2000) Teoría y aplicación de la medición de precisión por ultrasonido.
- Galejs** J. (1969) "Antennas in homogeneous media". New York. Pergamon.
- Ganchev** S. Sasan Bakhtiari and Zoughi R. (1992) "A novel numerical techniques for dielectric measurement of lossy dielectric". IEEE Transaction Instrumentation Measurement vol. 41, June.
- Ghedira** Hosni, Lakhankar Tarendra, Jahan Nasim and Khanbilvardi Reza. (2004) "Combination of Passive and Active Microwave Data for Soil Moisture Estimates" IEEE.

- Gilbert** Norma (1981). "Estadística" Ed. Interamericana.
- Grimberg** Raimond, Savin Adriana, Iftimie Nicoleta, Leitoiu Sorin and Andreescu Aurel. (2011) "GPR for UXO recognition" Electromagnetic nondestructive evaluation" T chady et al (ed's). IOS Press.
- Gupta** K.C. (1983) "Microondas". Limusa. ISBN 968-18-1578-5
- Hanke** John E.; Reitsch Arthur G.(1996) "Pronosticos en los negocios". Prentice Hall. Quinta edicion.
- Hashimoto** O. and Shinizu Y. (1986) "Reflecting characteristics of anisotropic rubber sheets and measurement of complex permittivity tensor". IEEE trans. Microwave Theory Tech., vol. MIT-34. Nov.
- Hasted** J.B. (1973) Aqueous dielectrics. London. Chapman and hall
- Hipp** J.E. (1994) "Soil electromagnetic parameters as a function of frequency, soil density and soil moisture." Proc.IEEE, vol. 62 .
- Hippel** Von A.R. (1958) "Dielectric materials and applications. New York. Wiley.
- Hoekstra** P. and Delany A. (1974) "Dielectric properties of soils at UHF and a microwave frequency" J. Geophys. Res., vol.99
- IEEE** Standard. 802.11n, 802.11g, 802.11b
- Imcyc** (2011). "Resistencia del concreto basada en la velocidad de pulso ultrasónico". Pruebas no destructivas. CONSTRUCCION Y TECNOLOGIA EN CONCRETO del Num. 05. Agosto
- Jackson** Thomas J., and O'Neill Peggy (1987) "Salinity Effects on the Microwave Emission of Soils" IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. GE-25, No. 2, March
- Jones** R. and I. Facaoaru. (1969) "Testing of concrete by the ultrasonic pulse method." Materials and Structures, Vol. 2, No. 10, July-August, p. 253-661.
- Katsuyoshi Sato**, Takeshi Manabe, Jiri Polivka, Toshio Ihara, Yoshinori Kasashima and Katsunori Yamaki. (1996). "Measurement of the Complex Refractive Index of the Concrete at 57.5 GHz" IEEE Transactions on Antennas and propagation , Vol. 44, No 1, January
- Kharkovsky S.N.**; M.F. Akay; U.C. Hasar; C.D. Atis. (2001). "Measurement and Monitoring of Microwave Reflection and Transmission Properties of Cement-Based Specimens" IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference May21-23.
- Kharkovsky Sergey**, Adam C. Ryley, Vivian Stephen and Reza Zoughi. (2008). "Dual-Polarized Near-Field Microwave Reflectometer for Noninvasive Inspection of Carbon Fiber Reinforced Polymer-Strengthened Structures" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.57, No.1. January
- Khalid Mubarak**; Karl, J Bois and Reza Zoughi. (2001). "A Simple, Robust, and On-Site Microwave Technique for Determining Water-to-Cement Ratio (W/c) of Fresh Portland Cement-Based Materials". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol.50, No.5, October.
- King** R. J. and Whoo (1992) "Microwave moisture measurement of grains" IEEE Transaction on Instrumentation and measurement. Vol. 41. February

- Kosmatka** and Panarese. (1988). "Design and Control of Concrete Mixtures". Portland Cement Association.
- Lane J. A.** and **saxton J. A.** (1952) " Dielectric dispersion in pure polar liquids at very high radio-frequencies, measurements on water, methyl and ethyl alcohols", Proc. Roy. Soc., vol. A213
- Law Averill M.** (2005) "How to Build Valid and Credible Simulation Models" Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. M.E. Kuhl, N.M. Steiger, F.B. Armstrong and J.A. Joines eds.
- Leslie J.R.** and **W.J. Cheeseman.** (1949) "An ultrasonic method for studying deterioration and cracking in concrete structures" Amer. Concrete Inst., Proceedings, Vol. 46, Sept.
- Malhotra V.M.** (1985). "Nondestructive methods for testing concrete". Department of Energy, Mines and Resources. Ottawa, Canada.
- Malhotra V. M.** and **N. J. Carino.** (2004). "Handbook on Nondestructive Testing of Concrete". ASTM. CRC Press Washington, D.C.
- Manual Del constructor.** (2000)
- Martin James** (1978). "Communications Satellite Systems". Prentice-Hall.
- Maryott Arthur A.** and **Smith Edgar R..** (1951). "Table of dielectric Constants of Pure Liquids". National Bureau of Standards. August 10,
- Mehta K. y Monteiro P.** (1998). "Concreto Estructura, Propiedades y Materiales" 1ª edición Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. A. C. México, D.F.
- Mejia Dorantes Lucia.** (2009). Estructuras en obra civil: Resistencia Temprana del hormigón en infraestructura. Investigación Doctoral.
- Meyer W. and W Schilz.** (1980). "A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids" J. Phys D: Appl. Phys.,
- Mironov Valery L., Dobson Craig, Kaupp Verne H., Komarov Sergej A., Kleshchenko Vladimir N.** (2004) "Generalized Refractive Mixing Dielectric Model for Moist Soil" IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, No. 4 April
- Nelson S. Forbus Jr. and Lawrence K.** (1994) " Permittivities of fresh fruits and vegetables at 0.2 to 20 GHz ". J Micro power electromagnetism energy. Vol. 29, No. 2
- Nelson Stuart O.** (1977) "Use of Electrical Properties for Grain Moisture Measurement" Microwave Power, Vol 12. No. 1
- Nelson Stuart O. and Trabelsi Samir.** (2002). " Sensing Grain Moisture Content Through Dielectric Properties" IEEE Press.
- Nelson Stuart O., Trabelsi Samir and Kraszewski Andrzej W.** (2002) "Principles of Microwave Moisture in Grain" IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Anchorage AK. May
- Neville A.M.** (1963). "Properties of Concrete" John Willey & sons.
- Newton R.W.** Microwave remote sensing and its application to soil moisture detection. Texas A&M University college Station TX. Rep. Jan. 1977
- Norma mexicana.** (2004). "NMX-C-165-ONNCCE"

- Okamura S.** Tomita F. and Ma Z. (1996) "Microwave moisture content determination in dried green tea applied for control of a drying process" Asia Pacific Conference. New Delhi India. December.
- O'Neill P.E.,** Hsu A.Y., Kim E.J. Peters-Lidard C., England A.W. (2001) "Performance Comparison of a Point Scale LSP Model and the NOAA Distributed SVAT Model for Soil Moisture Estimation Using Microwave Remote Sensing" IEEE
- O'Neill P.E.,** Joseph A., De lannoy G., Lang R, Utku C., Kim E., Houser P. and Gish T. (2003) "Soil Moisture Retrieval Through Changing Corn Using Active/Passive Microwave Remote Sensing" IEEE.
- O'Reilly V.** (1997). "Métodos para dosificar Mezclas de Hormigón". Tecnocret. La Paz, Bolivia.
- Ortiz Lozano J.A.,** Aguado de CEa, Zermeño de León, Alonso Farrera, F.A. (2007). "Influencia de la temperatura ambiental en las propiedades del concreto hidráulico". Revista académica de la FI-UADY.
- Owe Manfred,** De jeu Richard. (2001) "Retrieving Surface Soil Moisture and Vegetation Optical Depth from Satellite Microwave Observations" IEEE. Goddard Space Flight Center. NASA.
- Pande A.** (1975). "Handbook of Moisture Determination and Control" vol.1-4. (New York: Marcel Dekker)
- PCA** (1995) "Concrete floors on ground". Portland cement association.
- P-N design** (2009). "Network Analyzer Measurement. Microwave Encyclopedia." Tanque verde 309-155 Tucson Az.
- Poe G.,** Stogryn A. and Edgerton A.T. (1971) "Determination of soil moisture content using microwave radiometry", final report Aerojet general corp., microwave Div. El monte Cal.
- Pozar D. M.** (1998) " Microwave Engineering" 2<sup>nd</sup> ed. N.Y. Wiley
- Rothwell W.S.,** (1971) "Complex permittivity of conductor-dielectric mixtures" IEEE Trans.Microwave theory tech., vol. MTT-19 Apr.
- Rzepecka Maria,** M.A.K. Hamid and Afifi H. Soliman. (1972). "Monitoring of Concrete Curing by Microwave Terminal Measurements". IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation. Vol., ieci-19, No.4, Nov.
- Sasan Bakhtiari** and Zoughi R. (1990) "Microwave thickness measurement of lossy layered dielectric slabs using incoherent reflectivity " Res. In Nondestructive Eval. Vol. 2, No. 4
- Sasan Bakhtiari,** Stoyan Ganchev I., Zoughi Reza. (1993) "Open-ended rectangular waveguide for nondestructive thickness measurement and variation detection of lossy dielectric slabs backed by a conducting plate. " IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. Vol. 42, February.
- Sardos Rene,** Jean-francois Escarmout and Saint Christopher Emmanuel. (1990) "Anisotropic Measuremnets of rubber sheets with an X-band three wave interferometer". IEEE Transactions on microwave theory and techniques. Vol 38, no. 3, March.
- Schilz W** and Schilk B. (1980) "Advanced electronics

- Schmugge** Thomas J. (1983). "Remote Sensing of Soil Moisture: Recent Advances". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.GE-21, No.3 July
- Schoenbeck** Robert J. (1992) " Electronic Communications" Maxwell Macmillan Internacional Editions.
- Sika**. 2001. Construcción. Curado del Concreto. Información Técnica.
- Solis-Carcaño Romel**, Eric I. Moreno y carlos Arcudia-Abad. (2008). "Study of the concrete's compressive strength due to the combined effect of the water-cement ratio, the coarse-fine aggregate ratio and the source of the aggregates". Rev.Tec.Univ. Zulia. Vol.31 No. 3. 213-224.
- Solis, R.**; Moreno E; Castilla, W., (2004). "Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad del pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados", Ingeniería. Revista Académica de la FIUADY,
- Stoyan I. Ganchev**, Jay Bhattacharyya, Sasan Bakhtiari, Nasser Qaddoumi, Deborah Brandenburg and Reza Soughi. (1994). "Microwave Diagnosis of Rubber Compounds" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques vol. 42, No.1 January
- Sturup V.R.**; VecchioF.J. y Caratin H. (1984). "Pulse velocity as a measure of concrete compressive strengths". American Concrete Institute, Detroit, USA.
- Teodoris V**, Sphicopoulos T. and Gardiol F. T. (1985) "The reflection from an open-ended waveguide terminated by a layered dielectric medium". IEEE Transaction on microwave theory technology. Vol. MIT- 33
- Trabelsi Samir**, Andrzej W. Kraszewski and Stuart O. Nelson. (1998). "A Microwave Method for On-Line Determination of Bulk Density and Moisture Content of Particulate Materials" IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. Vo. 47, No. 1, February.
- Trabelsi Samir**, Andrzej W. Krazsewski and Stuart O. Nelson. (1998). "New Density-Independent Calibration Function for Microwave Sensing of Moisture Content in Particulate Materials" IEEE Transactions on instrumentation and measurement, Vol. 47, No. 3, JUNE
- Trabelsi Samir**, Nelson Stuart O. (2003). "Free Space Measurement of Dielectric Properties of Cereal Grain and Oilseed at Microwave Frequencies. Measurements Science and Technology.
- Trabelsi Samir**, Nelson Stuart O. (2006). "Nondestructive sensing of bulk density and moisture content in shelled peanuts from microwave permittivity measurements" Elsevier. Food Control .
- Tsuyoshi** Matsuoka and Mitsuo tateba. (2003). "Calculation of scattered power from random medium layers by using radiative transfer theory for the estimation of moisture in soil by microwaves" IEEE press
- Vidaud E.** (2011). "Materiales, diseño y construcción" 2 Parte. Construcción y Tecnología en Concreto. Imcyc. Num. 05. Agosto
- Wang** James R. and schmugge Thomas J. (1980) "An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content" IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, Vol. GE-18, No. 4 October.

**Wood E. F., Gao H., Drusch M., Jackson T. and Bindlish R. (2003)** "Soil Moisture Retrieval over the Southern Great Plains" IEEE

**WRI (2001)** "Innovative ways reinforce slabs on ground" TF 705-R-01. Wire reinforcement Institute Ohio, E.U.

**Zhihong Ma and Okamura Seichi. (1999).** "Permittivity Determination Using Amplitudes of Transmission and Reflection Coefficients at Microwave Frequency" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, No. 5, MAY.

**Zoughi R. and Lujan M. (1990)** "Nondestructive microwave thickness measurement of dielectric slabs" Materials Evaluation. Vol. 48, September.

**Zoughi R. and Bakhtiari S". (1990)** "Microwave nondestructive detection and evaluation of disbanding and delamination in layered dielectric slabs "IEEE. Transaction on Instrumentation and measurement. Vol.39. December.

**Zoughi, R. (1995).** "Microwave and Millimeter Wave Nondestructive Testing: A Succinct Introduction" Research in nondestructive Evaluation, vol.7, no.2/3, pp.71-74,

### **Bibliografía.**

Aracil Javier. "maquinas, sistemas y modelos" Ed. Tecnos.

Grinich H. Victor. "Introduction to Integrated Circuits. Mc Graw hill.1981

Kennedy George. "Electronic Communication Systems". Mc Graw Hill. 1985

Kenneth A. Fowler (2002) "Teoría y aplicación de la medición de precisión del espesor por ultrasonido. <http://olympusndt.com>

Martin James. "Communications Satellite Systems: Prentice Hall. 1978

Nigel P. Cook "Microwave Principles and Systems." Prentice Hall. 1986

Schoenbeck Robert J. "Electronic Communications" second edition. Maxwell Mcamillan. 1992.

Sears Francis W. "Electricidad y Magnetismo. Fundamentos de Física"1974.

Shrader Robert L. " Comunicación Electrónica" Mc Graw Hill. 1967

Taub and Schilling. "Principles of Communication systems" Mc Graw Hill engineering series 1971.

Tomaz Chady. editor. "Electromagnetic Nondestructive Evaluation" IOS Press. vol. 35, 2011

## Revistas

Construcción y tecnología en concreto. Pruebas no destructivas. Resistencia del concreto basada en la velocidad de pulso ultrasónico. Imcyc. Abril 2011. Num 01.

Construcción y tecnología en concreto. Pruebas no destructivas. Resistencia del concreto basada en la velocidad de pulso ultrasónico. Imcyc. Agosto 2011. Num 5.

Espacios de construcción y arquitectura año XIX, No. 159 Abril/Mayo 2011.

## Anexos

### Anexo 1

#### **Método de maduración / Modelo matemático.**

Como una referencia en el afán por encontrar un modelo matemático que aportara soporte para estimar el grado de madurez que una losa adquiriría durante el proceso de fraguado es que se dio con el método de maduración.

El método de maduración se puede considerar como el primer modelo matemático que ayuda a encontrar un modo para simular el comportamiento del concreto en las construcciones durante el proceso conocido como fraguado y, así estimar su resistencia; el método de maduración es una técnica que toma en cuenta los efectos combinados del tiempo y la temperatura para conocer la fortaleza desarrollada del concreto. Este método proporciona una simple aproximación a lo que la fortaleza de una losa presenta en la construcción; aun cuando se conoce de su aplicación a principios de los años cuarentas, no fue sino hasta principios de los años setentas que se le dio un gran impulso, debido a un fuerte accidente en Fairfax County, Va., estados Unidos en que se colapso una construcción debido a que se descimbro antes de tiempo, aun cuando la experiencia decía que se había alcanzado la fortaleza que el fraguado daba, una variación en la mezcla de concreto altero los tiempos del proceso y al eliminar el soporte que la cimbra le proporcionaba se presento el colapso, de ahí que las autoridades de la construcción de aquel país pidieran se aplicara toda la experiencia y el conocimiento teórico hacia la obtención de un medio que al menos proporcionara indicios de que tanta madurez tiene una construcción por ello, cualquier esfuerzo por apoyar esa idea es bienvenido.

El surgimiento del método de maduración se puede rastrear hasta algunas publicaciones inglesas que tratan el método del curado acelerado; se pensó en un procedimiento que considerara el efecto combinado del tiempo y de la temperatura sobre el desarrollo de la fortaleza para diferentes niveles de temperatura de curado, aquí es cuando se plantea el producto tiempo temperatura para este propósito.

La propuesta lleva a la conocida función de maduración de *Nurse-Saul* (A.1):

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (\text{A.1})$$

Donde:

$M$ = Índice de Maduración, °C-horas (o °C-días).

$T$ = temperatura promedio del concreto, oC, durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$

$T_o$ = datum temperatura (usualmente se considera como  $-10^{\circ}\text{C}$ )

$t$ = tiempo (horas o días)

$\Delta t$ = intervalo de tiempo (horas o días).

Para valores idénticos de índice de maduración, especímenes con alta temperatura de crecimiento resultan en fuerzas iniciales altas y baja fuerza después de un tiempo, así mismo se tiene la situación contraria con una baja temperatura y baja fuerza inicial, resultan al final con una fuerza de resistencia mayor. El cruce de curvas de fuerza se ilustra en la siguiente figura. Figura A.1

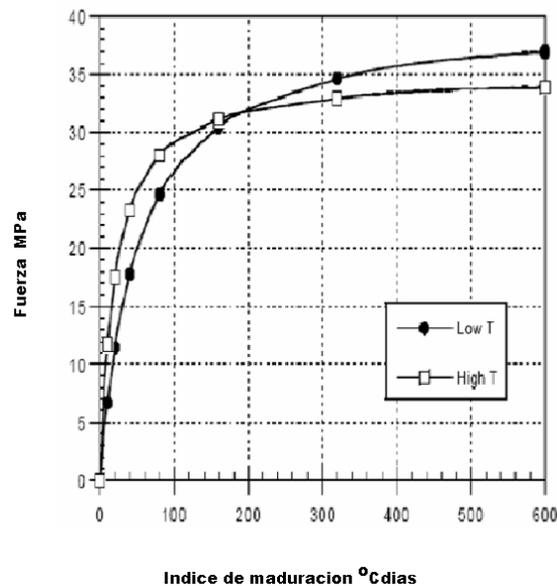


Figura. A.1 El efecto de cruce o crossover, debido a diferentes temperaturas de envejecimiento o maduración del concreto durante el desarrollo de la relación fuerza-madurez.

Después de que el cemento y el agua fueron mezclados, hay un tiempo de retardo antes de iniciar el desarrollo de la fuerza. Este periodo es llamado periodo de inducción. Después del periodo de inducción se tiene un rápido desarrollo de la fuerza, y este es el periodo de aceleración.

## Anexo 2

### Desarrollo Tecnológico / Instrumentación para la detección de humedad.

La idea de llegar al desarrollo de una tecnología que permita el estimar las condiciones de humedad que una cierta mezcla presenta sin interferir en su proceso natural de deshidratación sin mutilación alguna sin destruirla, es para contribuir con una herramienta que pueda al menos dar una certeza de las condiciones en las que se debe encontrar una pieza de construcción, principalmente una losa, la que debe soportar el peso de ese nivel. Todo lo que refuerce las medidas de seguridad para bien de los esforzados trabajadores de la construcción y posteriormente para los ocupantes de la edificación siempre será apreciado.



Figura A.2.1. Vista frontal del modulo de control del generador de microondas.

Para ello se diseño y desarrollo un primer prototipo de instrumentación para laboratorio que ayuda en la estimación del contenido de humedad (Fig.A.2.1); el equipo posee primeramente un oscilador principal generador de microondas; las fuentes de control los generadores que permiten la modulación de la señal así como los diferentes sistemas de amplificación de señales y aislamiento de las mismas (Fig. A.2.2, Fig.A.2.3).



Figura A.2.2. Vista superior del modulo de control del generador de microondas.



Figura A.2.3. En esta fotografía se aprecia la parte posterior del modulo de control del generador de microondas.

### Reflectómetro.

El reflectómetro puede proporcionar un nivel de intensidad de señal recibida por el detector acoplado al sensor de microondas utilizado en la aplicación (Kharkovsky 2008); posee un arreglo amplificador que le permite recibir señales de menos de 4 mV y manejar un indicador de aguja; las lecturas son instantáneas y podemos seguir el nivel que va

presentando una mezcla de concreto; el nivel que tiene el reflectómetro se asocia con un nivel de humedad que previamente se conoció de una mezcla controlada (Fig. A.2.4).



Figura A.2.4. Fotografía del frente del reflectómetro diseñado y desarrollado para su aplicación en las pruebas sobre concreto.

#### Antenas Piramidales

#### Banda X / Microondas / Sensores

Para cualquier aplicación del equipo microondas, es necesario tener una transmisión dirigida punto a punto. Para tal efecto se considerará que tanto el transmisor y el receptor, forman parte de un sistema de comunicaciones en pequeña escala.

Las antenas (cornetas/lentes) coliman la energía electromagnética en un haz estrecho lo que permite que las condiciones de campo-lejano sean cumplidas a una corta distancia desde el transmisor, permitiendo que las dimensiones de la muestra permanezcan razonables y se minimice la difracción en las orillas.

En un sistema de comunicaciones el medio por el cual viaja la información recibe el nombre de canal. En ocasiones el canal es una línea física de transmisión, ya sea un cable coaxial o par balanceado o fibra óptica, y por supuesto el aire. Cuando se trata del aire como medio de enlace o canal, las condiciones son diferentes con respecto a los otros medios, ya que se está pasando la energía de un medio acoplado a uno que presenta una impedancia diferente. La forma en que se puede lograr un acoplamiento entre el medio de transmisión o canal y el transmisor, es haciendo uso de un elemento conocido como antena.

La antena es el elemento que permite radiar la energía en todas direcciones, en una sola o en varias, según sean las necesidades de comunicación que se presenten.

### *Antenas piramidales o de corneta*

Las guías de onda rectangulares son por sí mismas elementos útiles en la radiación, se comportan como antenas sencillas que radian energía por la parte abierta. Si se intenta transmitir de esta forma, es posible lograr una ganancia de aproximadamente 4db, con respecto de una antena isotrópica. Esto es posible dependiendo de la relación que se tenga entre las dimensiones físicas de la guía de onda, y de la longitud de onda a la frecuencia de operación. La posible ganancia que se tenga, es el resultado de la concentración de la energía en una sola dirección.

Al utilizar de esta forma a la guía, se está obteniendo un patrón de radiación muy parecido, a la forma de un balón, esta misma forma se aprecia en una antena dipolo de media longitud de onda, sólo que los patrones vertical y horizontal radiados desde la guía de onda, serán idénticos.

En la figura siguiente (Fig. A.2.5) se presenta la fotografía de un par de antenas piramidales, una de ellas con soporte descubierto para el oscilador *Klystron*, la otra presenta una nueva versión (redonda) de brida para el acoplo con el oscilador o con la parte de recepción.



Figura A.2.5. Fotografía de un par de antenas piramidales o de corneta

## Anexo 3

### Método de Pesado-Secado-Pesado.

Este método es ampliamente utilizado cuando se requiere conocer el contenido de agua que una mezcla tiene; se siguen los sencillos pasos de:

Tomar una muestra de la mezcla, de la cual se quiere conocer su contenido de humedad.

Dejar secar esa muestra e inclusive forzar de algún modo la eliminación total o casi total de agua.

Se pesa lo que queda de la muestra para conocer el peso que tiene después del secado.

Esta es la manera de conocer el contenido de agua que contenía la muestra del material que interesa..

Es una manera fácil de conocer el contenido de agua pero es lento tedioso y difícilmente se puede mecanizar para hacer de esta prueba un paso habitual en la determinación de la humedad.

Se procede a obtener la relación que guarda la masa del agua contra lo que aportan los restantes elementos que integran la mezcla.

$$M_a = \frac{M_T - M_R}{M_T} \times 100 \quad (\text{A.3.1})$$

$M_T$  = masa total de la mezcla.

$M_a$  = masa del agua.

$M_R$  = masa restante.

## Anexo 4

### CONCRETO

#### Introducción / Breve historia del concreto

El concreto u hormigón en su presentación básica, es una mezcla homogénea de cemento, agua, arena y Grava; para versiones sofisticadas se tiene que en algunas casos se le añade aditivos e inclusive color. Es actualmente el material más empleado en la industria de la construcción por su duración resistencia impermeabilidad facilidad de producción y en ocasiones relativa economía.

El concreto es una roca recreada por el hombre, diseñada y producida de acuerdo a normas establecidas para fines y aplicaciones que se requieren en un proyecto determinado y con las características de economía, facilidad de colocación, velocidad de fraguado y apariencia adecuada según su aplicación.

El concreto presenta como cualquier piedra natural una alta resistencia a la compresión, pero una baja resistencia a la tracción, por lo cual siempre es necesario el refuerzo con varillas de acero, para que sean éstas las que soporten tales esfuerzos; lo que da motivo a que esto sea lo que coloquialmente llamamos “CONCRETO ARMADO”

En una buena calidad del concreto pueden intervenir alrededor de 200 variables; unas con respecto al diseño de la mezcla y otras con respecto a su fabricación.

La dosificación en la producción del concreto es un trabajo complejo debido a que se debe seguir ciertas normas que incluye un buen control sobre la calidad de los agregados, durante el proceso de fabricación y una observancia de su proceso de curado, que asegure un concreto de calidad.

#### Historia del concreto hidráulico.

Los orígenes del concreto se remontan al menos a 2 siglos A. de C., en Roma, cuando utilizaron unas mezclas de caliza calcinada, tobas volcánicas un tipo de roca ligera de consistencia porosa formada por acumulación de cenizas y por supuesto algunos otros elementos volcánicos y piedras, para construir algunas de las estructuras que hoy todavía subsisten, como el panteón o la iglesia de Santa María de los Mártires, cuya cúpula, de más

de 44 metros de claro, es de concreto simple; esta cúpula también está aligerada por medio de casetones (elementos de construcción que sirven de adorno y que son huecos).

En el siglo 7 de nuestra era, con la caída del imperio Romano se olvidó su uso. En el siglo XVIII es redescubierto por los ingleses, cuando en 1756, John Smeaton lo utilizó para la reconstrucción del Faro de Adystone, en la costa sur de Inglaterra.

En 1817, Vicat, propuso por primera vez el procedimiento de fabricación del cemento, que en términos generales se sigue utilizando hoy en día. Sin embargo fue Joseph Aspdin, quien, en 1824. Obtuvo la patente para fabricarlo.

El prototipo del cemento moderno fue producido en 1845 por Isaac Johnson, quien por primera vez utilizó una temperatura suficientemente elevada, para formar clinker de la arcilla y la piedra caliza, utilizadas como materia prima.

En 1845, Lambot, comenzó a construir en el sur de Francia, objetos en que combinaba el concreto y el acero, naciendo así el concreto reforzado.

Sólo en 1861, Francois Coignet en su libro publicado en París expresa por primera vez el papel que corresponde al concreto y al acero como partes del nuevo material. Joseph Monier fue el primero en darse cuenta de la importancia industrial del concreto reforzado; tomando sus ideas, se construyó en 1875, el primer puente de concreto reforzado cerca de Chazete en Francia, con un claro de 16.5 metros. Sin embargo, en este país no avanzó el concreto; la patente de Monier fue adquirida por la casa Wayss de Berlín, donde se impulsó su desarrollo.

El concreto reforzado se debe fundamentalmente al francés Freyssinet, quien empezó fabricando postes para transmisión de energía eléctrica, a principios de 1933. La fabricación de piezas de concreto se inició desde 1896. Hennebique, el difusor del concreto en todo el mundo, fabricaba en serie casetas de señales para los ferrocarriles franceses. En Pier Luigi Nervi, italiano, construyó un hangar, destruido durante la guerra, de 100 x 40 metros, con algunas partes colocadas en el lugar, pero la mayoría prefabricadas y unidas con juntas colocadas en el lugar. A estas unidades prefabricadas las denominó, ferro cemento.

#### Materiales naturales.

El conocimiento profundo de los materiales que la naturaleza nos ha dado y de algunos otros derivados que a partir de estos se logran, es el primer paso para lograr innovaciones tecnológicas en la industria de la construcción.

Problemas como el agotamiento de los recursos naturales y la mayor demanda de viviendas para una población en continuo crecimiento, hacen que cada día se necesiten con más urgencia nuevos materiales e innovaciones tecnológicas en la construcción, para que las viviendas sean más funcionales, seguras y en lo posible económicas.

### Definición y composición del cemento portland

La palabra cemento se emplea para designar todo elemento que posea bajo ciertas circunstancias condiciones de aglutinante, cualquiera que sea su origen. El cemento portland se define, como el producto obtenido al pulverizar el clinker con adición de yeso. El Clinker resulta de la calcinación hasta una fusión incipiente de una mezcla debidamente dosificada de materiales silíceos, calcáreos y férricos.

### Materias primas del cemento portland

Los compuestos principales del cemento portland son:

Cal (  $CaO$  )

Sílice (  $SiO_2$  )

Alúmina (  $Al_2O_3$  )

Oxido de hierro (  $Fe_2O_3$  )

Como pocas veces se encuentran juntos en la naturaleza y en las proporciones requeridas, para la fabricación del cemento, generalmente se hace necesario mezclar sustancias minerales que los contienen; como calizas por el aporte de cal y las arcillas por el aporte de alúmina y oxido de hierro; en algunas ocasiones es necesario agregar directamente oxido de hierro o arenas silíceas, para ajustar las proporciones de cada compuesto con el fin de obtener reacciones químicas equilibradas.

Una tercera sustancia necesaria en la fabricación del cemento, es el yeso hidratado que se adiciona al clinker durante la molienda con el fin de retardar el tiempo de fraguado de la pasta de cemento.

Generalmente, a los cementos disponibles en el mercado se les adicionan otras sustancias en la etapa de la molienda del clinker por razones económicas; esas sustancias pueden ser escorias puzolanas o calizas.

Cuando se les agregan escorias, se les llama cemento portland siderúrgico.

Cuando se les agregan puzolanas, se les llama cemento portland puzolanico.

### Calizas

Rocas de origen volcánico compuestas por carbonatos de calcio (  $\text{CaCO}_3$  ), formados por procesos químicos u orgánicos, que se encuentran en estado de gran pureza o mezclados con arcillas y minerales de hierro, las de origen químico se forman por precipitación de disoluciones bicarbonatadas o por reacción entre carbonatos de amónicos y sulfato de calcio.

### Arcillas

Silicatos aluminios hidratados amorfos o cristalinos, resultado de la meteorización particularmente de los feldspatos y micas. Estas se clasifican en los siguientes grupos de minerales:

Grupo Caolín

Grupo Montmorillonita

Grupo illita

El yeso es un sulfato cálcico cristalizado, abundante en la naturaleza; se encuentra en la zona de antiguos lagos o mares interiores, como resultado de la sedimentación de sulfatos que se hallan disueltos en el agua.

Las escorias de alto horno son un subproducto que resulta del procesamiento de las rocas ricas en mineral de hierro. Este subproducto o producto no metálico está constituido esencialmente por silicatos, aluminosilicatos de calcio y de otras bases. Las escorias poseen propiedades de aglomerante como el cemento portland.

### Proceso de Fabricación del Cemento

El proceso de fabricación del cemento portland se desarrolla de la siguiente manera: Se inicia con la extracción y trituración de cada una de las materias primas; estas deben triturarse al menor tamaño posible, pero al mismo tiempo el proceso debe ser eficiente; a menor tamaño se obtiene mejor homogenización en la mezcla de materias primas, aspecto definitivo para que después se produzca una reacción química completa.

Las etapas siguientes son la dosificación y homogenización de las materias primas.

La dosificación depende de la composición química de las materias primas, para lo cual es necesario realizar continuamente análisis químicos que permitan dosificar con la mayor exactitud. A continuación se realiza la mezcla y la homogenización de materias primas, para conducir luego la mezcla que va al horno.

Se distinguen tres métodos para realizar las etapas de mezcla, homogenización y conducción de la mezcla al horno:

Vía húmeda, vía semi húmeda y vía seca.

El método utilizado marca la diferencia entre las fábricas de cemento.

En el método de fabricación por vía húmeda se requiere agua, para dispersar y suspender en ellas las partículas de cada materia prima separadamente. La dispersión se hace en grandes tanques con sistemas mecánicos de paletas para el agitado posteriormente por bombeo, se conduce cada sustancia para realizar la mezcla, dosificando la cantidad de cada una de ellas al entrar al tanque, con características semejantes a las descritas anteriormente.

La lechada allí preparada con contenido de agua entre 35 y 50% se conduce por bombeo al horno, de **longitud cercana a los 150 metros**.

El empleo de un método u otro dependerá de las condiciones en que se encuentra la materia prima en estado natural y de las condiciones climáticas de la zona, por la repercusión en los costos del producto. Además, el método determina la longitud del horno requiriendo mas longitud cuanto más húmeda ingrese la mezcla.

En el método por vía semiseca se realizan las etapas de dosificación y homogenización con partículas muy finas y secas, empleando corrientes de aire para la movilización y mezcla. Una vez alcanzada la homogenización se agrega agua hasta llegar a la humedad del 12% y en un granulador se forman pastillas de 15mm de diámetro para llevarlas al horno a la fase de secado y clinkerización.

Cuando el método de fabricación es el seco, las etapas de dosificación, homogenización y llevado al horno se efectúan aplicando aire a presión sobre las partículas secas (la humedad no es mayor al 1%).

**El horno en este método tiene una longitud de 100 a 110 metros.**

Después de la homogenización, la mezcla pasa al horno rotatorio, que tiene una ligera inclinación con respecto a la horizontal para facilitar el avance del material en el horno cuando este gira sobre su eje. En el extremo opuesto al del ingreso de la mezcla se encuentra el sistema para calentamiento, con quemadores que trabajan con combustible como ACPM, fuel-oíl, gas o carbón pulverizado. La temperatura alcanzada es de 1400 a 1500 °C, requerida para alcanzar una fusión incipiente de la mezcla, que provoca la formación del clinker en forma de esferas de diámetro entre 3 y 30 mm.

El clinker debe ser enfriado rápidamente por medio de aire, produciendo el descenso de temperatura hasta los 70 °C. Este aire caliente es aprovechado dentro del mismo horno para la fase inicial de secado y calentamiento de la mezcla.

Los cambios que suceden en el horno son: inicialmente el secado de la mezcla que contiene agua, después de la liberación del CO<sub>2</sub> sigue una serie de reacciones químicas hasta llegar a la fusión del 20 al 30% de la mezcla, combinándose así la cal, el sílice y la alúmina.

El proceso de la fabricación del cemento continúa con la molienda del clinker, agregando durante esta el yeso hidratado para retardar el fraguado del cemento. En la actualidad con el fin de disminuir costos y mejorar ciertas características, adicionan al clinker durante la molienda otras sustancias, que pueden ser caliza, escorias o puzolanas. Las escorias y las puzolanas reaccionan lentamente, ocasionando un retardo de tiempo para llegar a la resistencia final.

Al añadir caliza se mejoran las cualidades de plasticidad pero se reduce la resistencia a la compresión de la pasta o del concreto.

La etapa final del proceso es el empaque en sacos de 50kilos, o el almacenamiento en silo para distribuirlo a granel.

El proceso de la fabricación del cemento es estricto, para obtener un buen producto; por lo tanto es necesario ejercer un control permanente en cada etapa para garantizar la calidad.

El control estricto debe hacerse en la molienda de materias primas para garantizar una correcta homogenización, en la dosificación de materias primas para obtener el producto deseado, en la homogenización para lograr la combinación de los elementos, en la temperatura en el horno y su buen funcionamiento para la formación adecuada del clinker, en la velocidad de enfriamiento del clinker, para lograr que en la cristalización se formen los compuestos deseados y por último en la adición del yeso y molienda, puesto que en estos factores tienen gran influencia en el comportamiento del cemento hidratado.

Otros Compuestos del Cemento/Otros compuestos presentes en las materias primas. Sólo por mencionar, en el cemento también se encuentran elementos como:

- **OXIDO DE MAGNESICO**

El oxido magnésico se puede encontrar en las calizas como la dolomita o en las escorias de alto horno. Esta se combina hasta en un 2% en las fases principales del clinker; el exceso ya aparece como MgO (periclasa).

La periclasa con el agua se hidrata en una reacción muy lenta, sucediendo cuando las restantes reacciones de endurecimiento del cemento ya han concluido; esta hidratación del MgO lleva consigo un aumento del volumen que puede ocasionar agrietamiento y hasta desintegración del concreto ya endurecido. El máximo admisible es de 5% al 6%.

- **ALCALIS**

Recibe el nombre de álcalis los óxidos de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y los de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) que se encuentran presentes en las margas y en las arcillas, también pueden ser aportadas por las cenizas del carbón si este se emplea como combustible.

Los álcalis pueden reaccionar con ciertos agregados que contienen sílice activa, como la fridimita y algunas rocas volcánicas; esta reacción puede dar lugar a fenómenos de expansión por los álcalis, ocasionando la desintegración del concreto.

La expansión del concreto, por causa de los álcalis, se puede evitar controlando su contenido en el cemento, dosificación que no debe ser mayor al 0.6%. En cementos con escorias este porcentaje límite de álcalis puede llegar al 2%, si el contenido de escorias es superior al 65%.

El contenido de álcalis no debe eliminarse, porque se ha comprobado que en cementos que no contienen este material la resistencia inicial de la pasta de cemento, puede ser anormalmente baja.

Como parte de los álcalis se volatilizan en el horno, la forma de controlar el porcentaje es liberando una fracción de los gases desprendidos en el horno.

- **AZUFRE**

El azufre se encuentra en casi todas las materias primas para el cemento, combinado con sulfuros (pirita y marcasita); además los combustibles también contienen azufre en cantidades muy volátiles.

El azufre en el alto horno se gasifica en forma de  $\text{SO}_2$  y se combina con los álcalis, produciendo sulfatos alcalinos gaseosos que se depositan en las partes frías del horno y en la mezcla calizo-arcillosa.

El sulfato alcalino combinado en las fases del clinker, es ventajoso para las resistencias iniciales de la pasta de cemento. Pero altos contenidos de azufre no combinado, pueden dar lugar a emisiones elevadas de  $\text{SO}_2$  o a la formación de costras en el horno que impidan el avance del material.

El cemento necesita una cantidad mínima de sulfato de calcio, en la mayoría de los casos, como de yeso molido, para regular el tiempo de fraguado; sin embargo, se ha limitado la máxima cantidad permisible de  $\text{SO}_3$  con el fin de impedir la expansión de los sulfatos. Según las normas ICONTEC, los máximos son de 3.5 y 4.5%, dependiendo del tipo de cemento.

El aluminato tricalcico del cemento al hidratarse reacciona con los sulfatos formando sulfoaluminato tricalcico, que se hidrata con 32 moléculas de agua; si esta reacción ocurre después de endurecido el concreto se produce agrietamiento y hasta desintegración, porque es expansiva, también puede causar manchas en el concreto.

#### • CLORUROS

El cloro, presente en las materias primas, en el horno reaccionan con el oxígeno y los álcalis formando cloruros en estado gaseoso, que después se precipitan, depositándose en el horno y creando costras que interrumpen el buen funcionamiento del mismo. Esto se impide mediante la desviación de los gases, cuando el contenido del cloro es del orden del 0.015% del peso del crudo.

Antes se acostumbraba agregar cloruros a los cementos de alta resistencia con el fin de elevarla en su etapa inicial; cuando se demostró que los cloruros facilitan la corrosión de las armaduras de acero, se prohibió esta costumbre. El máximo admisible de cloro es de 0.1%.

#### • FOSFORO

El contenido de fósforo no debe ser superior a 0.5%, porque puede disminuir fuertemente la resistencia inicial del concreto.

-----

### Composición química del cemento.

El cemento portland no es un compuesto puro, porque no se le puede asignar una fórmula química exacta, sin embargo, al estar constituido por cierto número de elementos conocidos, que al combinarse entre sí, lo hacen según las leyes ponderables de la química pura, es posible deducir a partir de su composición elemental toda una serie de relaciones estequiométricas que permiten entender, modificar y controlar sus propiedades tanto durante el proceso de fabricación como al emplearlo como material de construcción.

Químicamente se define el cemento portland como una mezcla de composición heterogénea finamente pulverizada, cuyos elementos esenciales son:

NOMBRE DEL COMPUESTO	FORMULA QUIMICA	ABREVIATURA
A: Silicato tricalcico	3 CaO.SiO <sub>2</sub>	C3S
B: Silicato di cálcico	2 CaO.SiO <sub>2</sub>	C2S
C: Aluminato tricalcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C3A
D: Ferro aluminato tricalcico	4CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C4AF
E: Yeso Natural	CaSO <sub>4</sub> .	2H <sub>2</sub> O
F: Óxidos menores de	Ca, Mg, Na, K, Mn, TI, P, Fe	

### Fraguado del cemento

Al mezclar el cemento con el agua, se forma una pasta en estado plástico, en el cual la pasta es trabajable y moldeable, después de un tiempo que depende de la composición química del cemento, la pasta adquiere rigidez; es conveniente distinguir entre el fraguado y el endurecimiento, pues este último se refiere a resistencia de una pasta fraguada. El tiempo que transcurre desde el momento que se agrega el agua, hasta que la pasta pierde viscosidad y eleva su temperatura se denomina “tiempo de fraguado inicial”, e indica que la pasta esta semidura y parcialmente hidratada. Posteriormente la pasta sigue endureciendo hasta que deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega al mínimo de temperatura; el tiempo trascurrido desde que se echa el agua hasta que llega al estado descrito anteriormente se denomina “tiempo de fraguado final”, e indica que el cemento se encuentra aun mas hidratado (no totalmente) y la pasta ya esta dura. A partir de este momento empieza el proceso de endurecimiento y la pasta ya fraguada va adquiriendo resistencia.

La determinación de los tiempos de fraguado es arbitraria y da una idea del tiempo disponible para mezclar, transportar, colocar, vibrar y apisonar los concretos y morteros de

una obra así como el tiempo necesario para transitar sobre ellos y el tiempo para empezar el curado.

### **Falso fraguado**

Con este nombre se conoce al endurecimiento prematuro y anormal del cemento, que se presenta dentro de los primeros minutos que sigue a la adición del agua y difiere del fraguado relámpago porque no presenta desprendimiento de calor; además, al volver a mezclar la pasta sin agregarle agua se restablece la plasticidad y fragua normalmente sin pérdida de resistencia.

Este fenómeno se debe a las temperaturas altas (mayores de 100°C) en la molienda, que ocasionan deshidratación parcial o total del retardador que es el yeso. Si la operación de falso fraguado se presenta en la mezclada del concreto, se debe prolongar el tiempo de mezclado y no debe agregarse más agua, porque se altera la relación agua-cemento.

Los Factores que más inciden en los Tiempos de Fraguado son:

- Composición química del cemento
- Finura del cemento; entre más fino sea, es mayor la velocidad de hidratación
- Mientras mayor sea la cantidad de agua de amasado, dentro de ciertos límites, más rápido es el fraguado.
- A menor temperatura ambiente, las reacciones de hidratación son más lentas.

La norma ICONTEC 121 determina los tiempos de fraguado del cemento portland.

## Anexo 5

### **Aplicación de los Sistemas de Microondas para el Desarrollo de Tecnologías No Destructivas.**

La tendencia actual en la mayoría de los instrumentos es la de desarrollar su función sin intervenir en la actividad del medio. Esta tecnología con base en las microondas tiene una fuerte aplicación en la inspección de nuevos materiales dieléctricos o compuestos aislantes.

La tecnología de microondas no destructiva, penetra fácilmente los aislantes. La profundidad de penetración depende de su factor de pérdida del mismo material dieléctrico y de la frecuencia de operación.

Existe la posibilidad de medir en contacto directo o no con la muestra, se tienen tecnologías de *Reflexión* o de *Transmisión*. La experiencia que se ha obtenido dentro del laboratorio se centra en la aplicación en campo cercano de señales de microondas en la banda X, (8.2 GHz a 12.4 GHz.) modulada con una señal cuadrada a 1KHz. Mediante el uso de una frecuencia fija que está dentro de la banda X (9.6 GHz) se ha podido detectar la presencia de agua en una mezcla cualquiera, sin que se haya preparado ésta para su análisis, no se pulverizó ni se acomodó en el porta muestra. Se logró detectar humedad mediante la medición de la amplitud de la reflexión de la señal aplicada.

El equipo dispone de acopladores que dirigen la señal hacia la muestra, y un detector acoplado a un medidor que nos presenta lecturas en milivolts

El desarrollo de las Tecnologías no destructivas (*NDT*), requiere del aprovechamiento de todas las herramientas que puedan ser capaces de detectar la presencia, de algún componente de una mezcla y de ser posible relacionar esa presencia con un porcentaje, sin que por ello se tenga que cercenar o invadir la muestra, evitando con ello la obvia destrucción y la posible contaminación de la misma al tener que hacer contacto con ella mediante el sensor o sonda utilizada (Zoughi 1995).

Con ello estamos presentando los puntos de partida para el desarrollo de las tecnologías No Destructivas, y podemos aseverar que su principal objetivo es el de determinar mediciones de contenidos o niveles, mediante tecnologías que permitan "ver", en qué condiciones se encuentra la sustancia, mezcla o pieza, se mencionan las piezas, debido a que en muchas ocasiones no es posible realizar una inspección del interior de una

columna, en el caso de una edificación, o como es que está depositado un aislante en una placa conductora, que requiere de dicho recubrimiento plástico (Malhotra 2004). Es necesario determinar la uniformidad del depósito del aislante en toda la placa.

¿Cómo se utilizarían las microondas? Las microondas pueden chocar con elementos metálicos y rebotar con una intensidad menor a la que tenían al ser emitidas por la fuente. De igual manera, cuando la energía choca con un material o muestra que contiene cierta humedad, la señal se podrá reflejar o atravesar, y se detectará pero con una intensidad menor.

Una forma de forzar el reflejo de una señal, es haciendo a que la base que soporta la muestra sea metálica, de tal forma que la señal forzosamente se refleje aún cuando el material le haya permitido atravesar el depósito del mismo.

La energía que pueda ser aplicada sin tener contacto con una muestra o que tenga un contacto mínimo que no implique destrucción o contaminación, abre las puertas para que pueda ser considerada como una tecnología no destructiva. El uso de sistemas de microondas no está completamente aceptado como tecnología No destructiva, aún cuando esté cumpliendo con las características fundamentales de tales tecnologías. Como muestras de aplicación tenemos primero, la detección de agua en mezclas, está es una de las primeras aplicaciones en la industria de la construcción (Calva 2007) su tarea es detectar el porcentaje de agua-cemento (w/c), segundo, en la fabricación de alimentos como es el caso de la fabricación de queso panela e igualmente en la detección del espesor (o uniformidad) del aislante que cubre una sección metálica.

Un ejemplo de tecnología No destructiva muy utilizada es el ultrasonido. El ultrasonido está ampliamente recomendado para cumplir con la tarea de determinar el espesor, la integridad o alguna otra propiedad que pueda ser caracterizada con ondas sonoras de alta frecuencia, ello con la finalidad de lograr un control de calidad efectivo. Para el caso específico de la medición de espesor, la técnica de ultrasonido permite una rápida y confiable medida, sin que se deba tener forzosamente, acceso a ambos extremos de la pieza (Malhotra 2004) esto es, se mide el espesor desde una cara del material.

Muchos materiales de uso en la ingeniería pueden ser medidos ultrasónicamente, incluidos los metales, los plásticos, las cerámicas, algunos compuestos, algunas sustancias epóxicas, vidrio e inclusive el nivel de ciertos líquidos. Todo ello en línea (proceso), o en muestras de laboratorio.

El uso de sensores en la banda de los infrarrojos nos da la posibilidad de detectar humedad en el material. Esto se logra aprovechando que las moléculas de agua resuenan a

ciertas frecuencias que quedan dentro de las bandas del infrarrojo, reacción que es aprovechada. La cantidad de energía absorbida por el agua en esa banda de frecuencias, es una medición de la concentración de humedad en un material.

### **Sistemas de Microondas**

Los sistemas de microondas se perfilan como una herramienta poderosa en el desarrollo de las tecnologías no destructivas, sin embargo son considerados apenas como una tecnología emergente dentro del ámbito no destructivo, se desconoce el porqué de esa aparente oposición a reconocer, que las microondas pueden y deben de ser consideradas como una tecnología que por sus características, nos puede ayudar a determinar ciertas relaciones de interés de algunos materiales sin destruirlos, inclusive en tiempo real si así se requiere.

Esencialmente la técnica propuesta utilizando los sistemas de microondas, se basa en la aplicación directa con baja potencia de una cierta energía de microondas sobre una muestra.

Como podemos apreciar en el dibujo siguiente (Fig.5.1), se tiene una fuente generadora de microondas la cual nos entrega una cierta cantidad de energía en una banda específica, esta es dirigida hacia la muestra, lo cual da como resultado que tengamos energía que atraviesa la muestra, energía que se refleja y energía que es absorbida por la misma muestra.

Para el caso de la energía reflejada, esta se ve disminuida por el nivel de agua que presenta la mezcla, este caso en particular nos interesa porque es de aquí de donde partiremos para la propuesta de detección de humedad.

Debemos tener en consideración, que la energía que atraviesa la mezcla también se ve afectada por la humedad de la misma, y dependerá de donde se detecte la energía, para el diseño del sistema de microondas más adecuado, el que sea de mayor utilidad en las mediciones. La determinación del sistema se verá fuertemente afectado por el intervalo de frecuencias al cual se desee desarrollar, habrá frecuencias para las cuales el atravesar la muestra de material o mezcla de interés será sencillo, y por supuesto también tenemos las frecuencias para las que será mejor su desempeño con la reflexión de la señal. (Fig.A.5.1)

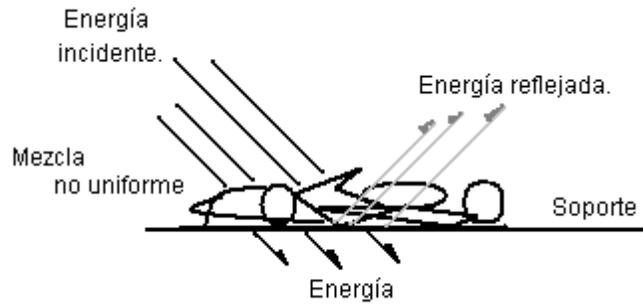


Figura. A.5.1 Dibujo que representa lo que podría suceder al aplicar una señal a una mezcla.

Uno de los pilares más importantes de las telecomunicaciones lo constituyen las microondas, y resulta muy importante el conocimiento que se tiene con respecto a su comportamiento en el medio ambiente, sabemos que a ciertas frecuencias sucede algo similar al infrarrojo, las moléculas de agua resuenan. Este tipo de respuesta es aprovechado para determinar el nivel de humedad en el material al que se le aplica la señal, esto al realizar una correlación entre el contenido de humedad y la respuesta que se tiene, principalmente lo que se busca es obtener una respuesta que se exprese en un nivel de voltaje, con ella es posible presentarla ya sea en un medidor convencional o en un sistema de captura de datos automatizado.

La automatización en la captura de datos es fundamental cuando se tiene una aplicación del sistema de microondas en tiempo real. Cuando se aplica a un material que se mueve mediante una banda transportadora, y la única oportunidad de medir la humedad es durante su traslado, se vuelve necesario entonces ir monitoreando las características del material al ir de un proceso a otro.

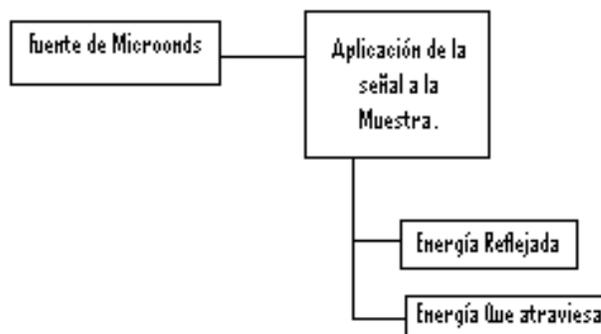


Figura. A.5.2 Diagrama esquemático de un sistema emisor de microondas

La frecuencia de la energía electromagnética empleada en los dispositivos de microondas está o inicia en la región de los 1000 MHz, y se llega a frecuencias que comprenden bandas como la **S**, y la **X**, que van de 2.60 GHz a 3.95 GHz, y de 8.2 GHz a los 12.4 GHz, además de la banda **K**. Como lo habíamos planteado anteriormente, las moléculas de agua contenidas en una muestra atenúan la señal transmitida esto, dependiendo del nivel de humedad que se tenga en ella, esta observación se contrasta con otras muestras del material a analizar en las frecuencias S y X cuando el contenido de humedad es muy bajo, e inclusive cuando se considera cero, para lo cual se prepara una muestra similar a la que contiene humedad a la que previamente se ha secado siguiendo un método estipulado de secado.

Para la banda K (18.0 GHz - 26.5 GHz), las moléculas no responden a esta frecuencia de resonancia en particular por lo que se deja esta banda de frecuencias, específicamente para la medición de vapor de agua, y especialmente cuando se requiere detectar esa humedad en productos de papel.

### Sistema de Detección

Como se presentó en el diagrama esquemático de la figura A.5.2, podemos disponer de dos modos de detección, uno de ellos basado en la **transmisión** de la energía aplicada al material (atravesada), y la segunda, basada en la **reflexión** de la energía en el material.

Transmisión

Para el caso de la transmisión, la energía aplicada a la muestra de interés atraviesa la misma y se debe contar con los elementos de detección en el otro extremo de la muestra es decir, se está interponiendo la mezcla entre el emisor y el detector de la señal de energía. (Fig. A.5.3)

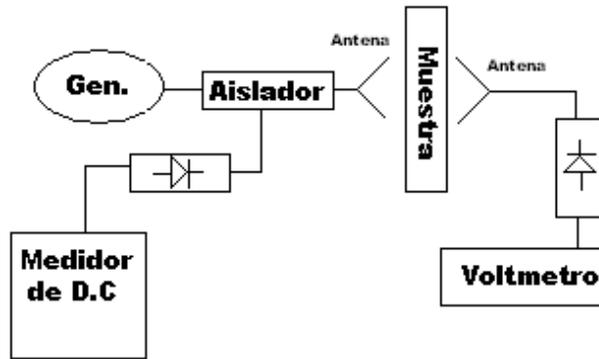


Figura. A.5.3 Diagrama de bloques de un sistema de microondas que está basado en la transmisión a través del material.

Reflexión

Para el caso de la energía reflejada, es hacer incidir una señal en el compuesto y, dependiendo de la cantidad reflejada por el mismo material (compuesto) es posible lograr una correlación que nos permita inferir que cantidad de liquido está depositado en la mezcla, todo ello es posible realizarlo en una cierta fracción de tiempo, o mejor dicho en tiempo real ya que la acción de la energía aplicada a la muestra se detecta en ese mismo instante. En la siguiente figura, (Fig. A.5.4) vemos un sistema que utiliza la reflexión.

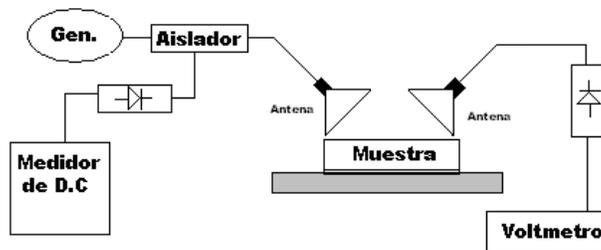


Figura. A.5.4 Diagrama de bloques de un sistema de microondas que utiliza la captura de la señal reflejada en la muestra de interés.

El reflejo de la señal de microondas se asegura al depositar la muestra en un soporte (porta muestra) metálico, con ello toda la energía que atraviesa la muestra y choca contra el soporte es reflejada hacia el acoplador del detector. Es casi seguro que el total de la energía reflejada No sea recibida en el acoplador, sin embargo lo detectado es suficiente para fijar un nivel de humedad en la muestra.

La energía aplicada a la muestra no logra hacer que está, se vea afectada por el uso de la señal de microondas, lo anterior es debido a que la cantidad aplicada en el mejor de los casos no rebasa los 50 mWatts.

### Aplicación del sistema de microondas.

En el siguiente dibujo (Fig. A.5.5) se representa en forma muy general lo que el sistema de microondas utilizaría para lograr la detección no destructiva. Este sencillo arreglo es utilizado bajo la idea de la detección de la energía reflejada por la muestra es decir, utiliza la reflexión como principio de funcionamiento. Nos decidimos por este esquema debido a que es el que menor aplicación ha reportado, la mayoría utiliza la transmisión a través de la muestra, y cuando se utiliza la reflexión, utilizan un arreglo que permite el uso dual de los acopladores.



Figura. A.5.5 Diagrama de bloques de un equipo de microondas.

Los acopladores utilizados en la reflexión requieren de un cierto ángulo que permita primero, enviar la mayor concentración de energía hacia la muestra y segundo, recolectar la mayor cantidad de energía reflejada.

### Acopladores

Después de generar la señal de microondas es necesario concentrar y dirigir la energía hacia la muestra de interés, para ello hacemos uso de un sistema de acopladores que son conocidos como antenas piramidales (antenas de corneta), estos elementos resultan los

más apropiados para nosotros en el diseño y desarrollo del sistema, debido a que nos son muy familiares por ser utilizados en la mayoría de los laboratorios de electromagnetismo (Folgero 1998.) Su diseño se basa en la banda de frecuencias en las que se va a generar la señal de microondas, y su comportamiento nos permite cumplir con dirigir y concentrar la señal. Figura A.5.6



Figura. A.5.6 Fotografía de antenas piramidales con montura para oscilador

Como se mencionó, en nuestras experiencias hemos adoptado la técnica de la reflexión en la muestra, y utilizando una frecuencia que cae dentro de la Banda-X, logrando detectar variaciones de voltaje dependiendo del contenido de agua en la mezcla.

En la gráfica siguiente (Fig. A.5.7) se muestran algunas lecturas obtenidas sobre un grupo de muestras a las que se les agrega agua, la primer muestra está tal cual se obtuvo el material, y las demás muestras van incrementando su contenido de agua, conforme esto sucede se nota una disminución en el voltaje detectado en el lado recolector. Se sucede la absorción.

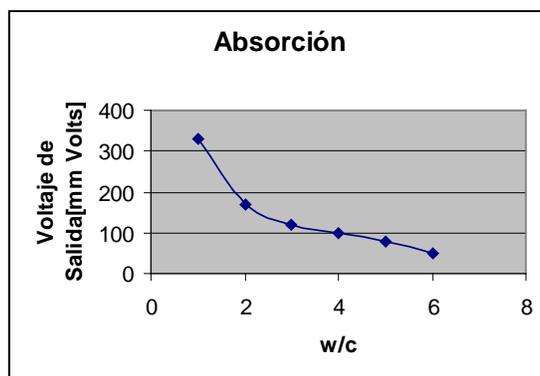


Figura. A.5.7 Dibujo de la respuesta que presenta la muestra cuando su nivel de humedad es modificado.

La curva obtenida es muy similar a las reportadas en trabajos realizados sobre muestras de mezclas de cemento grava y agua, al aumentar la relación (w/c), disminuye también el voltaje reflejado por la muestra. La industria del cemento, se ha visto beneficiada con el desarrollo de técnicas que posibilitan el análisis de muestras con sistemas de microondas, en ellas se puede detectar la relación agua cemento, la relación grava a cemento, ambas relaciones tienen influencia en el nivel de fortaleza de compresión del concreto.

Los equipos que hemos diseñado y desarrollado hasta ahora (Fig. A.5.8) permiten el impulso de técnicas que ayuden mediante la reflexión, a determinar los niveles o relaciones líquido / masa. No se está por el momento, desarrollando experimentación alguna con el índice de reflexión, sólo se detecta la magnitud de la reflexión (la cual asociamos con la absorción de la energía) para suponer un nivel de líquido en la muestra.



Figura. A.5.8 Fotografía de la primera generación de equipos de microondas. Generador/Receptor.

Los equipos con los que llevamos a cabo nuestros experimentos se diseñaron para desempeñarse en las frecuencias que van de los 8.2 GHz a los 12.4 GHz, tanto las guías de onda como los acopladores corresponden a dicha banda de frecuencia, nuestro oscilador (Fig. A.5.9) no genera potencia ( $W_0$ ) arriba de los 45 mW, pero es potencia suficiente para cumplir con la tarea sin que se modifique la muestra. Los amplificadores en el lado de detección de la energía reflejada, reciben la señal de un diodo rectificador acoplado a una sección de guía de onda.

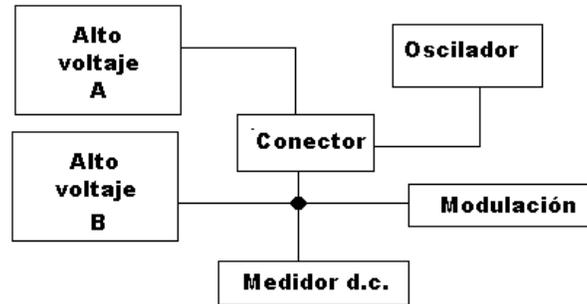


Figura. A.5.9 Diagrama de bloques del sistema de oscilación utilizado

Los equipos NO realizan un barrido por toda la banda de frecuencias posibles. Al inicio del experimento se sintoniza a una frecuencia y se procede a realizar las mediciones.

Actualmente se están corriendo los experimentos a una frecuencia aproximada de **9.6 GHz**. Que en comparación con las pruebas reportadas para el análisis de muestras de concreto, éstas se corren a una frecuencia aproximada de 10 GHz, y por lo general utilizan la transmisión a través de la muestra.