

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**"MÁQUINA DE VISIÓN COMPUTACIONAL PARA LA EVALUACIÓN DE
CARBONATACIÓN EN CONCRETO HIDRÁULICO"**

TESIS:

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA**

PRESENTA

GRACIELA ZULEMA ARVIZU OCEJO

DIRECTOR

DR. CARLOS VILLA ANGULO

CODIRECTOR

DR. ROGELIO ARTURO RAMOS IRIGOYEN

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral es el resultado de un trabajo en equipo. De ahí que deseo expresar mi mas sentido agradecimiento a quienes directa o indirectamente participaron en su ejecución.

De manera especial, en agradecimiento a mi director de tesis: Dr. Carlos Villa Angulo y Codirector Dr. Rogelio Arturo Ramos Irigoyen, por su invaluable capacidad cooperativa, profesional y humana que siempre mostraron para mí.

A mis sinodales en esta tesis doctoral, por la revisión y aportación a mi trabajo de tesis.

A mi familia por su apoyo incondicional en todas las acciones que he emprendido, gracias por estar siempre para mí y ser el motor de mi superación personal.

Al Instituto de Ingeniería de la UABC y CONACYT como Instituciones Educativas y Gubernamentales, que me permitieron participar de forma entusiasta facilitando las condiciones necesarias para mi formación doctoral.

Contenido

Resumen	- 4 -
Introducción.....	- 6 -
Instrumentación virtual.....	- 6 -
El concreto hidráulico.....	- 7 -
Hipótesis	- 9 -
Justificación	- 9 -
Objetivo	- 10 -
1. Marco teórico.....	- 10 -
1.1. Concreto	- 10 -
1.2. El concreto reforzado (armado).....	- 11 -
1.3. La Instrumentación virtual, máquinas de visión computacional y lógica difusa.....	- 16 -
1.4. Características de la instrumentación virtual.....	- 17 -
1.5. Máquinas de visión computacional	- 20 -
1.6. Etapas de las máquinas de visión para estudios de colorimetría	- 21 -
1.7. Filtrado de la imagen	- 23 -
1.8. Color, Colorimetría y Espectro de Color.....	- 24 -
1.9. Espectro de color	- 25 -
1.10. Espacio de color usado para generar el espectro de color	- 26 -
1.11. Generando el espectro de color	- 26 -
1.12. Coincidencia de color (Color Matching)	- 29 -
1.13. Lógica difusa	- 30 -
1.14. Sistemas de lógica difusa.....	- 30 -
1.15. Variables lingüísticas.....	- 31 -
1.16 Términos lingüísticos y funciones de membresía.....	- 31 -
1.17 Reglas	- 32 -
1.18. Controladores difusos	- 32 -
1.19. Fuzzificación	- 33 -
1.20. Implementando una estrategia de control lingüístico	- 33 -
1.21. Defuzzificación.....	- 35 -
1.22. Métodos matemáticos de defuzzificación.	- 35 -
1.22.1 Centro de área.....	- 35 -

1.22.2. Centro de área modificado.....	- 36 -
1.22.3. Centro de Sumas.....	- 37 -
1.22.4. Centro de Máximo	- 38 -
1.22.5. Media de la máxima	- 38 -
2. Programación, Materiales y Métodos.....	- 39 -
2.1. Programación.....	- 39 -
2.2. Flujo general del VI.....	- 40 -
2.3. Estructura principal del VI.	- 41 -
2.3.1. Flujo de ejecución del VI por Secciones de la estructura Flat Sequence.	- 43 -
2.3.1.1 Sección 1 Inicialización de variables.	- 43 -
2.3.1.2 Sección 2 Selección de imagen a analizar.	- 44 -
2.3.1.3. Sección 3. Interfaz con el usuario para seguimiento del flujo del VI.....	- 44 -
2.3.1.4. Sección 4. Procesos de colorimetría parte 1	- 45 -
2.3.1.5. Sección 5. Interfaz de dialogo con el usuario con indicaciones del pH.	- 46 -
2.3.1.6. Sección 6 Comparación del espectro de color para determinación del pH.	- 47 -
2.3.1.7. Sección 7 Determinación del pH con el uso de lógica difusa.	- 48 -
2.3.1.8. Sección 8 Interfaz de dialogo con el usuario que le indica el procedimiento para determinar la profundidad de carbonatación.	- 49 -
2.3.1.9. La sección 9, cálculo de profundidad y velocidad de carbonatación y tiempo de vida del concreto hidráulico.	- 50 -
2.3.1.10. Sección 10 Interfaz de dialogo con el usuario dando instrucciones finales para el uso del VI.	- 51 -
2.4. Materiales de prueba, Características y propiedades de los materiales utilizados. ..	- 52 -
2.4.1 Preparación de especímenes de prueba	- 52 -
2.4.1.1. Cemento.....	- 52 -
2.4.1.2. Agregados pétreos: arena y grava.....	- 52 -
2.4.1.3. Agua	- 52 -
2.4.1.4. Aditivos	- 53 -
2.4.1.5. Diseño de los especímenes	- 53 -
2.4.1.6. Preparación del acero de refuerzo	- 55 -
2.4.1.7. Diseño de la mezcla.....	- 55 -
2.4.1.8. Procedimiento de medición del pH y la velocidad de carbonatación acorde a la normatividad vigente	- 56 -
3. Resultados.....	- 57 -
	- 2 -

3.1. Resultados de operación del instrumento virtual (VI).....	- 57 -
Conclusiones.....	- 62 -
Bibliografía.....	- 63 -

Resumen

Esta tesis presenta el desarrollo en un instrumento virtual computarizado en la plataforma de instrumentación virtual de LabVIEW, con él que es posible medir el potencial de hidrogeno (pH), carbonatación, velocidad de carbonatación y tiempo de vida del concreto hidráulico y concreto hidráulico armado.

Hace uso de la programación por flujo de datos y modular, además de herramientas generales y exclusivas como Ni Visión y Lógica Difusa de LabVIEW®.

Este instrumento da solución a la problemática asociada a dar certeza y eliminar el error humano en mediciones relacionadas con la determinación de las condiciones en tiempo real de las estructuras de concreto hidráulico armado, edificadas por la industria de la construcción y en los ensayos realizados por las plantas de concretos hidráulicos.

Para las pruebas del instrumento virtual que presenta esta tesis se manipularon especímenes de concreto hidráulico armado, utilizando concreto elaborado a nivel industrial en plantas de concretos premezclados locales, mismos que fueron usados como ensayos previos en otros trabajos de investigación relacionados con la determinación de carbonatación.

Los especímenes pasaron por ensayos de evaluación de la calidad de concreto hidráulico fresco, así como de calidad del concreto endurecido por medio de la prueba de resistencia a la compresión en laboratorio.

El uso de estos especímenes permitió comprobar la operación de la instrumentación virtual desarrollada y dar seguridad en el uso del instrumento propuesto y dado a conocer en este documento de tesis.

El desarrollo de este instrumento virtual es de gran utilidad en la industria de la construcción, así como a las plantas de concretos hidráulicos, dado que agiliza la obtención de resultados en las pruebas para el concreto hidráulico y asegura mediciones de pH, lineales de profundidad y cálculo de velocidad de carbonatación, así como predicción de vida útil en años del concreto hidráulico armado con referencia a las normas mexicanas NMX-C-515 ONCE-2016, para la determinación de la profundidad de carbonatación en concreto hidráulico, especificaciones y métodos de ensayo RILEM CPC-18 para la determinación de la profundidad de la capa carbonatada en la superficie de concreto endurecido por medio de un indicador.

Introducción

Instrumentación virtual.

La instrumentación virtual en la actualidad y futuro da una mayor funcionalidad a la electrónica avanzada y se debe a que los dispositivos se han convertido y centrado alrededor del software. La tecnología nunca se detiene, los ingenieros y científicos pueden mejorar la funcionalidad a través del software en lugar de desarrollar más electrónica específica para hacer un trabajo particular, la forma eficaz de satisfacer estas demandas es utilizar arquitecturas de prueba y control que están centrados en el software [1].

El diseño a partir de un sistema gráfico de programación (LabVIEW) es un enfoque moderno para diseñar un sistema completo. Un diseño gráfico que compita en la economía global actual requiere de empresas para ingresar rápidamente al mercado con productos innovadores que ofrecen una mayor funcionalidad para operar sin problemas, tales son casos ejemplo como los de la industria aeroespacial y de la defensa, que durante décadas han utilizado la instrumentación modular y el software de aplicación de LabVIEW de NI para reducir el costo y el riesgo asociados con las pruebas y el soporte de sus productos. En los sistemas de radar usados en el campo militar, en las áreas de la guerra electrónica, con el monitoreo del espectro de radio frecuencia donde deben tener un rendimiento más alto, anchos de banda más amplios y velocidades de respuesta más rápidas para adaptarse a las necesidades emergentes que operan a largo plazo. Por lo anterior, NI ha trabajado con miles de ingenieros y equipos de liderazgo para administrar el riesgo y generar una ventaja de mercado sostenible a través de avances en Ingeniería de pruebas y soporte operativo.

Los beneficios del diseño de sistemas gráficos comprenden un tiempo reducido para mercado, escalabilidad óptima del sistema, iteración de diseño, un rápido y mayor rendimiento a menor costo.

El diseño de sistema gráfico trae una plataforma de software combinada con una plataforma de hardware que ofrece la oportunidad para reducir significativamente el costo de desarrollo y el tiempo de comercialización que integra múltiples modelos de cómputo y minimiza el tiempo para implementar especificaciones en un diseño [2].

El concreto hidráulico

El concreto es un material cuya elaboración no requiere elevados costos, debido a que sus componentes son de origen natural, este aspecto y las ventajas que proporcionan sus propiedades tanto en su estado fluido como endurecido, (elaboración, resistencia, durabilidad, etc.) son las principales razones por lo que se considera el material de construcción más importante en la actualidad y el más utilizado en este campo, de ahí la importancia de su constante estudio. El concreto hidráulico es un material constituido por la mezcla de cemento; árido grueso, árido fino y agua, con o sin la incorporación de aditivos o adiciones que desarrolla sus propiedades por la hidratación del cemento, factor que sugiere que las cualidades del concreto se deban fundamentalmente al tipo y calidad del cemento utilizado.

Se estima que por cada habitante del planeta se producen como promedio 3 toneladas de hormigón cada año [3]. Esto representa el 57% de todas las producciones antropogénicas, excluyendo los combustibles fósiles y los flujos de desechos [4]. Debido a que su elaboración se realiza con materiales de origen natural disponibles en la superficie de la corteza terrestre,

posee un relativo bajo costo de producción, pero su mayor importancia repercute en las propiedades y características del mismo material.

Por otra parte, se considera en términos generales que las estructuras de concreto reforzado son durables y que proporcionan una vida útil de 50 años o más, con poco o nulo mantenimiento [5]. Esta durabilidad depende de las características del concreto, del acero y de la interacción entre ambos [6].

Los refuerzos utilizados en el concreto son materiales metálicos que presentan una buena resistencia a la corrosión en medios alcalinos. Durante la elaboración del concreto y debido al uso de cal (CaO) y agua, el concreto hidráulico provee un pH muy alcalino (12 a 12.5). Esta alcalinidad le permite al acero de refuerzo lograr su estado pasivo, protegido por la capa pasiva de óxido (Fe_3O_4), siempre y cuando el pH del concreto no cambie significativamente [3]. Sin embargo, este estado pasivo es difícil de conseguir de manera constante en las diversas etapas de la vida útil de las obras civiles, siendo uno de los más graves problemas en la actualidad el deterioro del concreto por la interacción con el medio ambiente [8].

Debido a que los problemas de corrosión en las estructuras de concreto dependen en gran medida a su exposición ante el medio ambiente, es necesario analizar detalladamente el comportamiento de las estructuras en diversas condiciones ambientales. Con el fin de poder determinar el tratamiento que se le debe dar a las estructuras y tomar en consideración dicho comportamiento para el diseño de nuevas estructuras [8].

Por lo anteriormente expuesto, esta investigación presenta un desarrollo tecnológico de instrumentación virtual basado en las normas NMX-C-515 ONCE-2016 y RILEM CPC-18 para la determinación de la profundidad de la capa carbonatada en la superficie de concreto

endurecido por medio de un indicador. El instrumento virtual contribuye a agilizar y eliminar el error humano de interpretación además de, eliminar la incertidumbre asociada a las mediciones del potencial de hidrogeno (pH), carbonatación, velocidad de carbonatación y tiempo de vida del concreto hidráulico y concreto hidráulico armado.

Hipótesis

Es posible desarrollar, programar e implementar un instrumento virtual con el uso de algoritmos de máquinas de visión e inteligencia artificial y una computadora para medir el potencial de hidrogeno, profundidad de carbonatación, velocidad de carbonatación y tiempo de vida para el concreto hidráulico y concreto hidráulico armado.

Justificación

Esta investigación y desarrollo tecnológico se justifica por el hecho de que en la búsqueda de información en el estado del arte de las diferentes normas que rigen y dictan los procedimientos y ensayos para determinar la carbonatación del concreto hidráulico y otras fuentes como artículos actuales de investigación o desarrollo tecnológico no se encontró un instrumento moderno capaz de medir y determinar la carbonatación, el cual de seguridad, elimine el error humano de interpretación, además de minimizar la incertidumbre asociada a las mediciones para determinar la carbonatación en el concreto hidráulico e hidráulico armado.

Objetivo

Desarrollar e implementar un instrumento virtual para la medición de la carbonatación en el concreto hidráulico y concreto hidráulico armado

1. Marco teórico

El marco teórico se divide en dos áreas principales del conocimiento base, el concreto hidráulico y la instrumentación virtual.

1.1. Concreto

A nivel mundial el uso del concreto reforzado en obras civiles, puentes, pavimentos, presas, tanques de almacenamiento, etc., se coloca como el material de construcción más utilizado en la actualidad. El tiempo de vida útil de una estructura es en función de su fabricación y al servicio que vaya a prestar, según las condiciones a que estará sometido, es deseable que una obra se mantenga en buen estado estructural, químico y estético por tiempo indefinido [8].

El concreto es sin duda uno de los materiales más importantes en la industria de la construcción, ya que ha hecho posible en mayor o menor grado la existencia de la infraestructura de todos los países del mundo [9]. Se considera, en términos generales que las estructuras de concreto reforzado son durables y que proporcionan una vida útil de 50 años o más, con poco o nulo mantenimiento [5]. Sin embargo, esta durabilidad depende de las características del concreto, del acero y de la interacción entre ambos [6].

Los refuerzos utilizados en el concreto son materiales metálicos que presentan una buena resistencia a la corrosión en medios alcalinos. En la elaboración del concreto, se usa cal

(CaO) y agua, con estos agregados el cemento hidráulico provee un pH alcalino elevado (12 a 12.5). Esto le permite al acero de refuerzo estar en estado pasivo, protegido por la capa pasiva de óxido (Fe_3O_4), siempre y cuando el pH del concreto no cambie significativamente [5]. Sin embargo, este estado pasivo es difícil de conseguir de manera constante en las diversas etapas de la vida útil de las obras civiles, siendo el deterioro del concreto uno de los problemas más graves en la actualidad por determinar, debido principalmente a la interacción del concreto con el medio ambiente [8].

1.2. El concreto reforzado (armado)

Definición: La **diferencia** básica entre concreto y mortero es que el **cemento** es un polvo que une y que nunca se utiliza solo, el **concreto** está compuesto de **cemento**, arena y grava y el mortero está compuesto solo por **cemento** y arena. Además de estas **diferencias**, los usos también son distintos.

Definimos al concreto reforzado como la unión entre concreto y acero Figura 1. El concreto está compuesto básicamente por el agregado (arena y grava), cemento, agua y en algunos casos, aditivo; El acero que se utiliza depende en gran medida de las especificaciones de la estructura a construir; puede ser acero galvanizado, acero inoxidable o lo que se utiliza comúnmente, que es acero al carbono o de refuerzo.

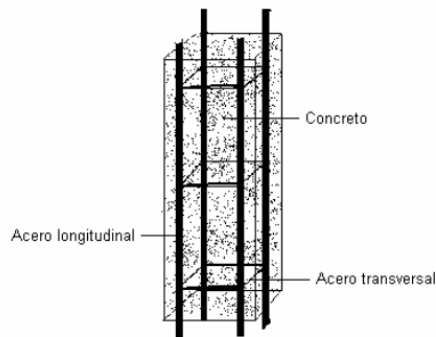


Figura 1.- Esquema de una columna común de concreto reforzado

La relación existente entre el concreto y el acero de refuerzo se basa en que el concreto provee una protección tanto química como física en contra de la corrosión [5]. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido en la superficie del acero. A este fenómeno se le denomina pasivación, ya que la capa de óxido evita la propagación de la corrosión del acero. Esta alcalinidad del concreto se debe principalmente al hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que se forma durante la hidratación de los silicatos (C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF) del cemento y a los álcalis (sodio y potasio), que pueden estar incorporados como sulfatos en los elementos constituyentes del cemento. El concreto también funciona como una capa protectora en contra de los agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) que puedan des pasivar al acero e iniciar la corrosión [10].

La corrosión del acero de refuerzo disminuye la vida útil en las estructuras de concreto reforzado, por lo que predecir la vida útil de las estructuras dañadas por corrosión reviste una enorme importancia. No existe un método totalmente aceptado para calcular la vida residual de las estructuras de concreto reforzado, aunque se han establecido varios procedimientos

para estimar su vida útil. Un modelo que describe desde el punto de vista de la corrosión el proceso de deterioro de las estructuras es el propuesto Figura 2.

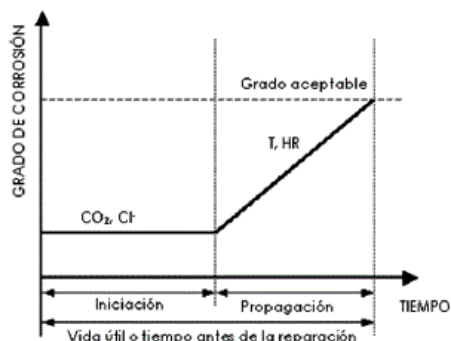


Figura 2.- Modelo e la vida útil propuesta por Tuutti

Quien establece un nivel de corrosión máximo aceptable relacionado con la apariencia de las grietas, y sugiere presencia de dos periodos, tales como el que sea de iniciación y el de propagación [10].

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. Es un proceso bien comprendido que ha sido investigado y documentado. En el caso del concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es generalmente un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia el interior de la superficie expuesta del concreto y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión [11].

Es un problema que actualmente afecta a muchas estructuras en el país, cuyo fenómeno ocurre cuando el dióxido de carbono CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte al hidróxido de calcio en $Ca(OH)_2$ con un pH de 12 a 13, a carbonato

de calcio CaCO_3 que tiene un pH menos alcalino. El hidróxido de calcio y los iones de sodio (Na) y potasio (K) por su alta alcalinidad, forma en el acero de refuerzo embebido en el concreto una capa pasiva de hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_2$, que lo cubre y protege de la corrosión. La permanencia de esta capa depende de que el concreto conserve dicha alcalinidad, al descender ante la presencia de dióxido de carbono en el concreto, el acero pierde su capa pasiva con un pH menor a 11. La corrosión de acero de refuerzo es el mayor factor en la reducción de la vida de servicio de las estructuras y elementos de concreto reforzado. La carbonatación es el proceso que causa mayor deterioro de las estructuras en ambientes urbanos.

En el diseño de estructuras de hormigón, la carbonatación es uno de los muchos factores importantes que determinan la vida útil en servicio de una estructura de hormigón armado.

La carbonatación se puede definir como la reducción de la alcalinidad del hormigón por acción de los componentes ácidos de la atmósfera dióxido de carbono (CO_2) y de azufre (SO_2).

La cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ procedente del hidrólisis del cemento Pórtland puede llegar hasta el 25% del peso del cemento empleado, confiriendo así un elevado carácter básico o alcalino ($\text{pH} > 12$) a las pastas, morteros u hormigones. Los hormigones confeccionados con cementos poseerán elevada alcalinidad, la cual proporcionará un ambiente protector frente al medio exterior a las armaduras existentes, dotándolas de una capa de óxido pasivante sobre las mismas (Guinier, 2009) [12].

El proceso de carbonatación comienza con la difusión de CO_2 en el hormigón (según la ley de Fick (Visser, 2012) [13]. El CO_2 del aire puede penetrar a través de los poros del hormigón y reaccionar con el CaOH_2 del cemento produciéndose un cambio en la basicidad del material al combinarse tales elementos y formarse carbonato de calcio (CaCO_3). Se producirá una reducción del valor del pH hasta alcanzar valores mínimos de basicidad ($\text{pH} < 9$).

El avance del frente de carbonatación se produce desde exterior hasta el interior de la estructura de hormigón, este depende directamente de:

Relación agua cemento (a/c)
Humedad Relativa (HR)
Compacidad del hormigón
Tipo y cantidad de cemento empleado
Cantidad de CO_2 en el ambiente

La velocidad de penetración en el hormigón en la mayoría de los casos depende de la facilidad de ingreso de CO_2 y de la HR (Galán, 2011), por lo tanto, hormigones densos y bien curados presentan una menor velocidad de penetración. La temperatura y la presencia de humedad en el ambiente son de gran influencia, en hormigones sometidos a ambientes secos con $\text{HR} < 20\%$ se presenta un índice de carbonatación muy bajo en forma similar a lo que sucede en ambientes húmedos con $\text{HR} > 80\%$, como es el caso de ambientes marinos tropicales, donde el agua contenida en los poros capilares del hormigón dificulta el ingreso del CO_2 , sin embargo, los ambientes intermedios con $25\% < \text{HR} < 75\%$ presentan mayor velocidad de penetración y la condición óptima para el avance de la carbonatación.

1.3. La Instrumentación virtual, máquinas de visión computacional y lógica difusa

El término "computación científica" o "ciencia computacional" se ha utilizado durante muchos años para definir el uso de computadoras (software y hardware) para resolver problemas relacionados con la ciencia y la ingeniería, que generalmente implican investigación experimental o aplicada, modelado y simulación. En una definición simplista, que se refiere al uso de computadoras para resolver problemas científicos. Las aplicaciones informáticas científicas suelen seguir un proceso de tres pasos: adquisición de datos, análisis de datos y visualización / presentación de datos [14]

Este enfoque de tres pasos ha sido el modelo pilar de la instrumentación virtual de National Instruments desde su conceptualización original desde a principios de la década de 1980, y su expansión a un modelo más completo conocido como diseño de sistema gráfico. La finalidad de este modelo tiene como objetivo el acelerar el ciclo de investigación, desarrollo y entrega de modelos matemáticos a computadoras integradas en tiempo real de manera fácil y rápida. NI LabVIEW logra esta aceleración con el uso de su lenguaje de programación G como herramienta común de diseño a nivel de sistema para todas las diferentes fases en el flujo de diseño a implementación. [15]

Podemos abordar el tema de la instrumentación virtual con la definición de dos tipos de instrumentos; el instrumento tradicional y el virtual, señalando la característica principal de cada uno de ellos. Un instrumento tradicional es el instrumento tipo hardware rígido, cuya funcionalidad está definida por sus fabricantes a diferencia, de un instrumento virtual que se considera un instrumento cuya funcionalidad la define su usuario final.

Definiciones más formales para instrumentación virtual son la de varios autores que definen instrumento virtual a los programas de cómputo que en apariencia y operación son análogos a los instrumentos físicos como, osciloscopios y multímetros, nada lejos de una buena definición; sin embargo, al hacer una búsqueda de distintas definiciones de virtualidad aplicada al desarrollo de instrumentación eléctrica y electrónica podemos llamar a un instrumento virtual como, “El Instrumento cuya forma física se encuentra implementada en una computadora”. Lo anterior, con fundamento y tomando en cuenta que el área del conocimiento de la cibernética, el significado para la palabra virtual se refiere específicamente, a una realidad construida mediante sistemas o formatos digitales que implican indiscutiblemente el uso de hardware. Parte de este hardware es requerido y llamado adquirente de datos que en conjunto con la computadora y la plataforma de programación virtual conforman un instrumento virtual. En ocasiones dependiendo de la aplicación la computadora pasa a ser un sistema computarizado embebido pequeño y poderoso, ejemplos de estos sistemas son los de National Instruments® y otras compañías de desarrollo de sistemas electrónicos.

Otras definiciones con respecto a la virtualidad pueden confundir el significado de instrumento virtual y llegar a pensar que la definición del diccionario de la Real Academia Española; Virtual como aquello que tiene existencia aparente y no real, que un instrumento virtual es un simulador, algo que difiere mucho del contexto para la definición o significado de instrumento virtual en las áreas del conocimiento de Instrumentación general.

1.4. Características de la instrumentación virtual.

Ya hemos comentado que la principal característica y ventaja de un instrumento virtual (VI) es que se define por el usuario final y no el fabricante de instrumentos como sucede con la

instrumentación tradicional, pero otras características importantes es que son reciclables y escalables, es decir manipulables fácilmente y reconfigurables a otros modos de operación que permiten expandir sus capacidades de medición y control a un número de canales de entrada y salida importante y a bajo costo por canal, lo que implica la rentabilidad de los instrumentos virtuales.

Son precisamente las características de funcionalidad definida por el usuario, reciclaje y escalabilidad lo que permite que su diseño se considere una aportación al desarrollo tecnológico ya que cada instrumento virtual se diseña para satisfacer los requerimientos específicos de su aplicación. Lo anterior puede desarrollarse con una gama importante de funciones de programación definidas por la plataforma de instrumentación y la apertura de la plataforma para definir nuestras propias funciones cuyos algoritmos pueden ser registrados como derecho de autor en México, en otros países como patentes.

Por ello, de las características definidas para la instrumentación virtual estas nos permiten afirmar que los diseños de instrumentos virtuales deben ser considerados como aportación de entrega de una tesis doctoral en ciencia y tecnología, por aportar la posibilidad de un diseño específico de sistemas de adquisición de datos, máquinas de visión y sistemas inteligentes a la medida del usuario final o desarrollo de trabajo doctoral concluido.

Una herramienta esencial para el desarrollo de la instrumentación virtual es la plataforma de programación LabVIEW® (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench). Este programa fue creado por National Instruments (1976) para operar computadoras MAC, se lanzó al mercado por primera vez en 1986. Hoy en día está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux. Los programas desarrollados con LabVIEW® se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs y su principal característica es la facilidad de uso, válido

para programadores profesionales como para personas con poco conocimiento en programación, pudiendo lograr programas de resultados complejos.

Su principal característica está basada en la programación en LabVIEW® y es por medio del paradigma de flujo de datos de LabVIEW® el cual se basa en el hecho de que un nodo se ejecuta una vez que la información está disponible en sus terminales de entrada. Completada su ejecución, genera datos de salida que generalmente están destinados a la siguiente función o nodo. Es este movimiento de datos el que determina el orden de ejecución en el Diagrama de Bloques de un VI.

Es importante mencionar que, las variables locales rompen con el paradigma de flujo de datos debido a que son utilizadas en circunstancias donde no es posible enviar los datos a través de un cable, ya que las variables locales se comunican por referencia con los controles e indicadores del Panel Frontal del VI que las utiliza para acceder a la memoria donde se encuentran los datos correspondientes. Podría decirse que la forma de utilizar a una variable local es similar a usar un apuntador en lenguaje C.

Las principales ventajas de la programación por flujo de datos de LabVIEW® son.

- La ejecución del flujo de datos hace que administrar la memoria sea más fácil que el modelo de ejecución del flujo de control. En LabVIEW®, no se asigna memoria para variables ni les asigna valores. En su lugar, crea un diagrama de bloques con cables que representan la transición de datos.
- Los VI y las funciones que generan datos asignan automáticamente la memoria para esos datos. Cuando el VI o la función ya no usa los datos, LabVIEW® desasigna la

memoria asociada. Cuando agrega nuevos datos a una matriz o cadena, LabVIEW® asigna suficiente memoria para administrar los nuevos datos.

- Debido a que LabVIEW® maneja automáticamente la administración de memoria, usted tiene menos control sobre cuándo se asigna o desasigna la memoria. Si un VI funciona con grandes conjuntos de datos, debe comprender cuándo se realiza la asignación de memoria. Comprender los principios involucrados puede ayudarlo a escribir VIs con requisitos de memoria significativamente menores. Minimizar el uso de memoria a medida que se desarrolla puede ayudarlo a aumentar la velocidad a la que se ejecutan los VI.

1.5. Máquinas de visión computacional

En lo que se refiere a máquinas de visión computacional estas se encuentran implícitas en la instrumentación virtual y en el campo de estudio de la visión computacional, donde es importante mencionar que todo sistema computarizado que emula las capacidades del ser humano se considera como un sistema de inteligencia artificial. Hacer que una computadora interprete imágenes, no ha sido una tarea trivial y ha requerido de muchos años de investigación ya que es un problema complejo. Sin embargo, en los últimos años hay avances considerables básicamente en 3 rubros [16].

- El desarrollo tecnológico en las capacidades de procesamiento y de memoria en las computadoras, que facilitan el almacenamiento y procesamiento de las imágenes.
- Los avances teóricos en los principios y algoritmos para el procesamiento y análisis de imágenes.
- La creciente necesidad del procesamiento automático de imágenes, que se capturan y almacenan en grandes cantidades en diversos dominios, como en medicina,

seguridad, tránsito de vehículos y por su puesto en el análisis y caracterización precisa de patologías del concreto armado.

La instrumentación virtual en las que implícitamente se encuentran las máquinas de visión computacional presentan hoy en día una mejora continua, lo que permite que puedan ser usadas multidisciplinariamente, siendo la caracterización de materiales como el concreto armado una de ellas.

El uso de este tipo de instrumentación en el área del conocimiento de los materiales es de vanguardia y permite mejorar significativamente el análisis de los materiales de construcción, incluso crear los sistemas usados para la detección temprana de patologías del concreto armado.

En la actualidad todo el equipamiento de vanguardia se encuentra manipulado y controlado por sistemas de instrumentación virtual, grandes instituciones como NASA y empresas como Airbus y Boeing emplean instrumentos virtuales que implementan el desarrollo en grandes proyectos de innovación.

1.6. Etapas de las máquinas de visión para estudios de colorimetría

Digitalización y generación de archivo tipo imagen

Existen diferentes dispositivos para la captura de imágenes. Dichas imágenes son digitalizadas y almacenadas en la memoria de la computadora. Una vez en la computadora y en ocasiones desde el mismo dispositivo de captura, la imagen puede ser ya procesada.

Para la adquisición de la imagen se requiere de un dispositivo físico que sea sensible a una determinada banda del espectro electromagnético. El dispositivo produce una señal eléctrica

proporcional al nivel de energía detectado, la cual es posteriormente digitalizada. Entre los dispositivos de captura o sensores se encuentran:

- Cámaras fotográficas
- Cámaras de televisión (vidicón o de estado sólido - CCD)
- Digitalizadores (escáneres)
- Sensores de rango (franjas de luz, laser)
- Sensores de ultrasonido (sonares)
- Rayos X
- Imágenes de tomografía
- Imágenes de resonancia magnética

El proceso de digitalización usado comprende la previa preparación y aplicación de fenoltaleína al espécimen, bajo estudio acorde a lo estipulado en la normatividad. El dispositivo usado es un equipo de barrido digital (escáner) convencional con resolución de 300 puntos por pulgada o Píxeles por pulgada (300 ppp); Esta resolución de impresión elegida es la más común, pues está optimizada para lo que el ojo es capaz de ver en una imagen de calidad o utilidad fotográfica. El equipo utilizado es un escáner HP Scanjet G3110 y su aplicación para computadora (software). La imagen obtenida por el proceso de digitalización es en formato JPG. Este formato JPG viene del término acuñado por Joint Photographic Experts Group, grupo de expertos que creó los archivos comprimidos con extensión .jpg, JPG es un formato de compresión de imágenes tanto en color como en escala de grises, con alta calidad.

1.7. Filtrado de la imagen

El filtrar una imagen, consiste en aplicar una transformación para obtener una nueva imagen de forma que ciertas características son acentuadas o disminuidas, el objetivo en nuestro caso es eliminar ruido de la imagen capturada en el proceso de digitalización de la misma imagen. En nuestro sistema se usó para el propósito la transformada wavelet.

La transformada wavelet (WT) tiene una amplia aplicación en el análisis de señales estacionarias y no estacionarias. Estas aplicaciones incluyen la remoción de ruido en imágenes, permite la detección de discontinuidades abruptas y compresión de grandes cantidades de datos [17].

Con la WT es posible descomponer una señal en un grupo de señales constituyentes, conocidas como wavelets y cada una con frecuencia dominante bien definida. Similar a la transformada de Fourier (FT) en la cual la representación de una señal es mediante funciones seno y coseno de duración ilimitada, en WT las wavelets son funciones transitorias de corta duración, es decir duración limitada centrada alrededor de un tiempo específico.

La principal ventaja de usar la WT es evitar la problemática de la transformada de Fourier FT que al pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia la información de lo que ocurre en el tiempo se pierde. Al observar el espectro frecuencias obtenido utilizando la FT es simple distinguir el contenido de frecuencias de la señal que se está analizando, pero no es posible deducir en que tiempo aparecen o desaparecen las componentes de la señal del espectro de frecuencias. A diferencia de la FT, la WT permite un análisis en ambos dominios

tiempo y frecuencia dando información sobre la evolución del contenido de frecuencia de una señal en el tiempo [18].

Para esta sección en nuestro instrumento virtual usamos la función denoise la cual incluye la transformada wavelet para su aplicación en la atenuación de ruido.

1.8. Color, Colorimetría y Espectro de Color

El utilizar color en visión es importante ya que puede ayudar a la extracción de características e identificación de objetos en la imagen, lo cual implica dificultad para casos presentados en imágenes monocromáticas. El ojo humano puede distinguir miles de colores (con diferentes intensidades y saturaciones) y en cambio solo distingue alrededor de 20 niveles de gris. Por tal razón, se piensa que el color tiene un papel muy importante en el reconocimiento de imágenes.

La percepción del color en el ser humano es un proceso psicofisiológico que aún no es bien comprendido. El color que percibe el ser humano de un objeto depende de la naturaleza de la luz reflejada por el objeto, lo que a su vez depende de la luz incidente en el objeto.

Físicamente, la luz visible es parte del espectro electromagnético y el color tiene que ver con la longitud de onda dentro del espectro visible (400 - 700 nm); En donde la luz blanca consiste en la combinación de todos los colores de dicho espectro.

En la plataforma de programación de LabVIEW®, el procesamiento del color, la colorimetría y el espectro de color son abordados en la Inspección del Color. Esto está incluido en el espacio del color, los espacios de color permiten representar un color. Un espacio de color es un subespacio dentro de un sistema de coordenadas 3D donde cada color está representado

por un punto. Se pueden usar espacios de color para facilitar la descripción de colores entre personas, máquinas o programas de software [17].

Diversas industrias y aplicaciones utilizan varios espacios de color diferentes; Como se comenta anteriormente, los humanos perciben el color de acuerdo con parámetros como brillo, tonalidad e intensidad. Sin embargo, las computadoras perciben el color como una combinación de rojo, verde y azul. En LV usamos el espacio de color para procesar imágenes a color; Con LV se especifica el espacio de color asociado a una imagen a color y usa los espacios de color Rojo, Verde, Azul (RGB) y Tonalidad, Saturación y Luminancia (HSL).

1.9. Espectro de color

El espectro de color representa la información de color en 3D asociada con una imagen o una región de una imagen en forma 1D concisa, que puede ser utilizada por muchas de las funciones de procesamiento de color de Visión de National Instruments (NI Vision). El espectro de color es usado para aplicaciones de coincidencia de color, ubicación de color y coincidencia de patrones de color.

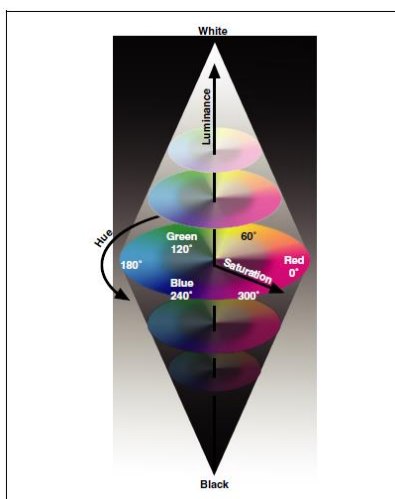


Figura 3. Espacio de color HSL.

Los colores representados en el espacio modelo HSL de la figura 3, son fáciles de cuantificar para los humanos. El componente de luminancia (o intensidad) en el espacio HSL está separado de la información del color. Esta característica de representación independiente de la variación de intensidad de luz conduce a un color más robusto, sin embargo, en el plano de cromaticidad (o matiz y saturación) no se puede utilizar para representar los colores blanco y negro que a menudo comprenden los colores de fondo en muchas aplicaciones de visión artificial.

1.10. Espacio de color usado para generar el espectro de color

El espectro de color representa la distribución de color de una imagen en el espacio HSL como se muestra en la figura 3. Si la imagen de entrada está en formato RGB, la imagen se convierte primero al formato HSL y se calcula el espectro de color desde el espacio HSL. Utilizando imágenes HSL directamente, que son aquellas adquiridas con un dispositivo de captura de imágenes y con una conversión RGB a HSL integrada para coincidencia de colores, mejorando la velocidad de operación.

1.11. Generando el espectro de color

El espectro de color es una representación en un arreglo de una dimensión (1D) de la información de color de un arreglo de tres dimensiones (3D) de una imagen. El espectro representa toda la información de color asociada con esa imagen o una región de la imagen en el espacio HSL. La información es empaquetada en una forma que puede ser utilizada por las funciones de procesamiento de color en National Instruments Vision (NI Vision).

Cada elemento en el arreglo de espectro de color corresponde a un grupo de colores en el espacio HSL. Los dos últimos elementos de la matriz representan negro y colores blancos respectivamente. La figura 4 ilustra cómo el espacio de color HSL se divide en contenedores.

El espacio de matiz se divide en un número igual de sectores y cada sector se divide en dos partes; una parte que representa valores de saturación altos y otra parte que representa valores bajos de saturación. Cada una de estas partes corresponde a un contenedor de colores, un elemento en arreglo de espectro de color.

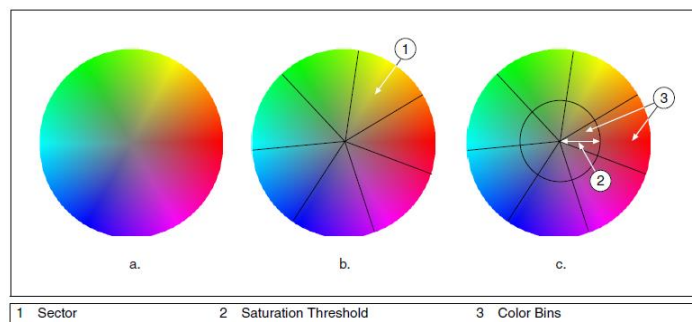


Figura 4 a, b y c. El espacio HSL dividido en contenedores y sectores

El parámetro de sensibilidad del color determina el número de sectores donde el espacio de color se divide. La Figura 4 a, muestra el espacio de color del tono cuando la luminancia es igual a 128. La figura 4 b, muestra el espacio de matiz dividido en varios sectores, dependiendo de la sensibilidad de color deseada. La figura 4 c, muestra cada sector dividido en una alta saturación y un contenedor de baja saturación. El umbral de saturación determina el radio del círculo interno que separa cada sector en contenedores.

La figura 5, ilustra la correspondencia entre los elementos del espectro de color y los contenedores en el espacio de color. El primer elemento en el arreglo de color de espectro representa la parte de alta saturación del primer sector; el segundo elemento representa la parte de baja saturación; el tercer elemento representa la parte de alta saturación del segundo sector y así sucesivamente. Si hay n contenedores en el espacio de color, el arreglo de

espectro de color contiene $n + 2$ elementos. Los dos últimos componentes en el espectro de color representan el color blanco y negro, respectivamente.

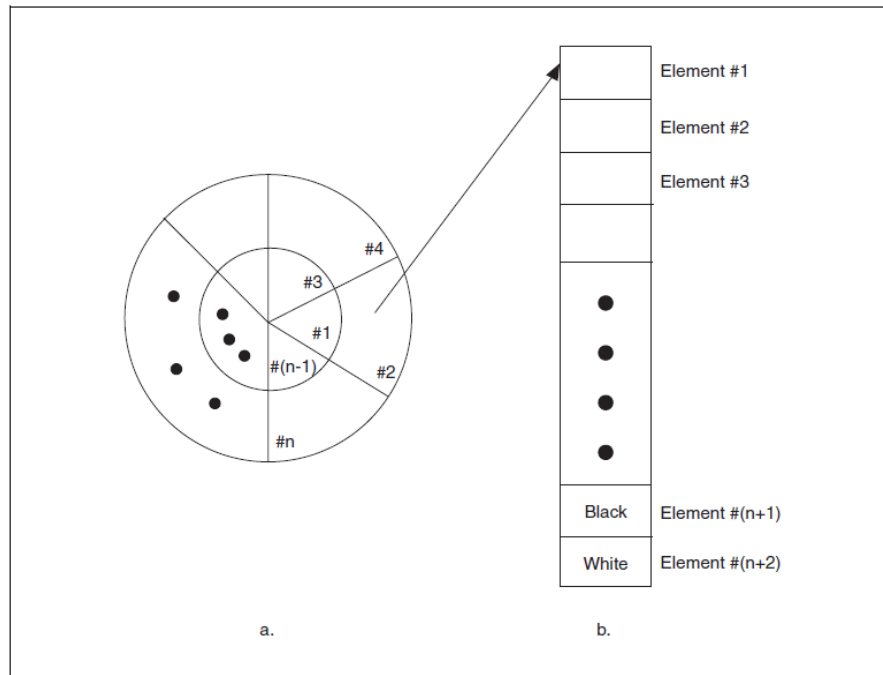


Figura 5 a y b. Espacio de color HUE y la relación de matriz de espectro de color.

Un espectro de color con un mayor número de contenedores o elementos representa la información de color en una imagen con más detalle, como un color más alto en resolución, que un espectro con menos contenedores. En NI Visión, puedes elegir entre tres configuraciones de sensibilidad de color baja, media y alta. Sensibilidad Baja, divide el espacio de color de tono en siete sectores, dando un total de $2 \times 7 + 2 = 16$ contenedores. Sensibilidad Media, divide el espacio de color del matiz en 14 sectores, dando un total de $2 \times 14 + 2 = 30$ contenedores. Sensibilidad Alta, divide el espacio de color de matiz en 28 sectores, dando un total de $2 \times 28 + 2 = 58$ contenedores (bins).

El valor de cada elemento en el espectro de color indica el porcentaje de píxeles de imagen en cada contenedor de color. Cuando el número de contenedores se establece de acuerdo el parámetro de sensibilidad del color, el software de visión artificial escanea la imagen y cuenta el número de píxeles que caen en cada contenedor y almacena la relación del recuento y el número total de píxeles en la imagen del elemento apropiado dentro de la matriz de espectro de color.

El software también aplica un algoritmo especial de aprendizaje adaptativo para determinar si los píxeles son blancos o negros antes de asignarlos a un contenedor de color. La figura 3b, representa el espectro de color de baja sensibilidad de la figura 3a. La altura de cada barra corresponde al porcentaje de píxeles en la imagen que caen en el contenedor correspondiente.

El espectro de color contiene información útil sobre la distribución del color en la imagen, puede analizar el espectro de color para obtener información como el color más dominante en la imagen, que es el elemento con el valor más alto en el espectro de color. También puedes usar la matriz del espectro color para analizar directamente la distribución del color y para la coincidencia de colores en aplicaciones.

1.12. Coincidencia de color (Color Matching)

La coincidencia de colores cuantifica los colores y cuánto existe de cada color en una región de una imagen, utiliza esta información para verificar si otra imagen contiene los mismos colores en el mismo radio del círculo de la figura 5.

La coincidencia de colores es utilizada para comparar el contenido de color de una imagen o regiones dentro de una imagen con una información de referencia de color. Con coincidencia de colores (color matching), se crea una imagen o seleccionan regiones en una imagen que

contiene la información de color que desea usar como referencia. La información de color en la imagen puede consistir en uno o más colores. El software de visión artificial por medio de aprendizaje adaptativo aprende la información del color en tres dimensiones 3D en la imagen y representa esta información como espectro de color de una dimensión (1D). Esta función de visión artificial compara la información de color en toda la imagen o regiones de la imagen del espectro de color aprendido, calculando una puntuación para cada región. El registro relata cuán estrechamente coincide la información de color en la región de la imagen representada por el espectro de color.

1.13. Lógica difusa

La lógica difusa es un método de toma de decisiones basado en reglas que se utiliza para sistemas expertos y control de procesos. La lógica difusa difiere de la tradicional booleana en que la lógica difusa permite la pertenencia parcial a un conjunto.

La lógica booleana tradicional tiene dos valores en el sentido de que un miembro pertenece a un conjunto o no. Los valores de uno y cero representan la pertenencia de un miembro al conjunto con uno que representa membresía absoluta y cero que no representa una membresía. La lógica difusa permite membresía parcial, o un grado de membresía, que podría ser cualquier valor a lo largo del continuo entre cero y uno lógicos [19].

1.14. Sistemas de lógica difusa

Un sistema difuso es un sistema de variables asociadas con la lógica difusa. Un controlador difuso usa reglas definidas para controlar un sistema difuso basado en valores actuales de las variables de entrada.

En LabVIEW se puede usar Fuzzy System Designer y Fuzzy Logic VI para diseñar y controlar sistemas difusos.

Los sistemas difusos constan de tres partes principales:

- Variables lingüísticas
- Funciones de membresía
- Reglas

1.15. Variables lingüísticas

Las variables lingüísticas representan en palabras, las variables de entrada y salida son las variables del sistema que desea controlar. Por ejemplo, para un calentador es posible que tenga dos variables lingüísticas de entrada, temperatura actual y temperatura deseada, y una variable lingüística de salida, ajuste del calentador. Cada variable lingüística tiene un rango de valores esperados. Por ejemplo, el rango de temperatura actual puede ser de 0 a 100 grados y el rango deseado de la temperatura de 50 a 80 grados.

Un controlador difuso requiere al menos una variable lingüística de entrada y una variable lingüística de salida.

1.16 Términos lingüísticos y funciones de membresía

Las variables lingüísticas de temperatura actual y deseada en donde la temperatura puede incluir los términos lingüísticos frío, moderado y caliente. La configuración del calentador como variable lingüística puede incluir los términos lingüísticos, apagado, bajo y alto.

Las funciones de membresía son funciones numéricas correspondientes a las condiciones lingüísticas. Una función de membresía representa el grado de membresía de variables lingüísticas dentro de sus términos lingüísticos. El grado de membresía es continuo entre 0 y 1, donde 0 es igual a 0% de membresía y 1 es igual al 100% de membresía. Por ejemplo, en la variable lingüística actual la temperatura puede tener membresía completa (1) dentro del

término lingüístico caliente a 100 grados, sin membresía (0) dentro de ese término a 70 grados o menos, y membresía parcial a todas las temperaturas entre 70 y 100 grados.

1.17 Reglas

Las reglas describen en palabras, las relaciones entre las variables lingüísticas de entrada y salida basadas en sus términos lingüísticos. Por ejemplo, podemos definir la siguiente regla:

Si la temperatura actual es fría Y (AND) la temperatura deseada es moderada, ENTONCES (THEN) la configuración del calentador es baja. Las cláusulas "la temperatura actual es fría" y "la temperatura deseada es moderada" son los antecedentes de esta regla. El conectivo Y (AND) especifica cómo el controlador de lógica difusa relaciona los dos antecedentes para determinar el valor de verdad para el antecedente de la regla agregada. La cláusula "ajuste del calentador es bajo" es el consecuente de esta regla.

Una base de reglas es el conjunto de reglas para un sistema difuso. La base de la regla es equivalente a la estrategia de control del controlador.

1.18. Controladores difusos

Se puede usar controladores difusos para controlar sistemas difusos. Los algoritmos de control tradicionales requieren un modelo matemático del sistema que desea controlar. Sin embargo, muchos sistemas físicos son difíciles o imposibles de modelar matemáticamente, además muchos procesos son no lineales o demasiado complejos para que se puedan controlar con estrategias tradicionales. Sin embargo, si se puede describir una estrategia de control cualitativamente, es posible usar lógica difusa para desarrollar un controlador difuso que emule una estrategia de regla general heurística, es decir como técnica del descubrimiento. Un sistema de control o de toma de decisiones difuso está compuesto de tres secciones o etapas básicas, Fuzzificación, estrategias de control lingüístico y la

defuzzificación. La figura 6 ilustra el proceso de un controlador difuso.

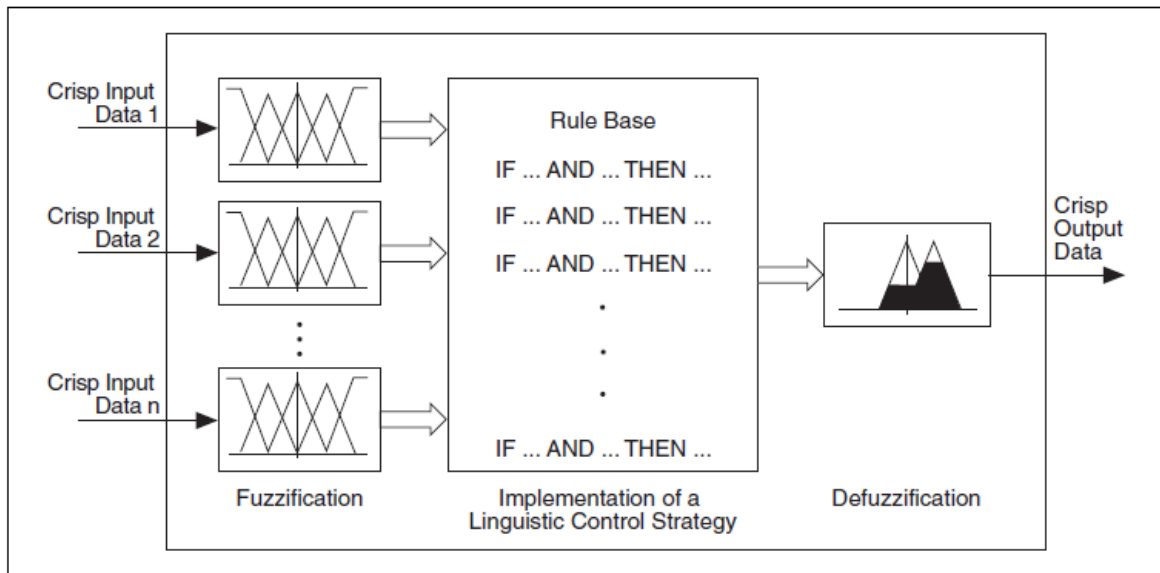


Figura 6. Proceso de un controlador difuso

1.19. Fuzzificación

Fuzzificación es el proceso de asociar valores de entrada cualitativos o numéricos con los términos lingüísticos de las variables lingüísticas correspondientes de entrada. Por ejemplo, un controlador difuso podría asociar la lectura de temperatura desde un termómetro con los términos lingüísticos frío, moderado y caliente para la variable lingüística de temperatura actual. Dependiendo de las funciones membresía para los términos lingüísticos, el valor de temperatura puede corresponder a uno o más de los términos lingüísticos.

1.20. Implementando una estrategia de control lingüístico

Después de que un controlador difuso, fuzzifica los valores de entrada de un sistema difuso, el controlador difuso usa los términos lingüísticos de entrada correspondientes y la regla base para determinar los términos lingüísticos resultantes de las variables salida lingüística.

Por ejemplo, supongamos que la temperatura actual de una habitación es de 50 grados, que corresponde a un término lingüístico de frío con un grado de membresía de 0.4; Supongamos también que la temperatura deseada es 70, que corresponde a un término lingüístico de moderado con un grado de membresía de 0.8; El controlador difuso invoca la siguiente regla del sistema difuso: IF la temperatura actual es fría y la temperatura deseada es moderada, ENTONCES el ajuste del calentador es puesto en bajo.

Debemos tener en cuenta que esta regla consta de dos antecedentes, "la temperatura actual que es fría "y" la temperatura deseada que es moderada" por consiguiente, el valor de verdad de cada antecedente será igual al grado de pertenencia de la variable lingüística dentro del término lingüístico correspondiente.

El controlador de lógica difusa usa un antecedente conectivo para determinar cómo calcular el valor de verdad de la regla de antecedente agregada. Supongamos que la regla invocada en este ejemplo usa el antecedente AND (mínimo) conectivo, que especifica el uso del menor grado de pertenencia a los antecedentes como el valor de verdad que le antecede de regla agregada. Por lo tanto, el valor de verdad del agregado del antecedente de la regla es 0.4.

Puede especificar un grado de soporte para cada regla de un sistema difuso. El peso de una regla es igual al grado de apoyo multiplicado por la verdad, valor del antecedente de la regla agregada. El controlador difuso usa un método de implicación para escalar las funciones de pertenencia de una salida variable lingüística basada en el peso de la regla antes de realizar la defuzzificación.

1.21. Defuzzificación

La defuzzificación, es el proceso de convertir los grados de membresía de salida de variables lingüísticas dentro de sus términos lingüísticos en valores numéricos. Un controlador difuso puede usar uno de varios métodos matemáticos para realizar la defuzzificación. El método de defuzzificación más preciso para un controlador difuso varía según la aplicación de control.

1.22. Métodos matemáticos de defuzzificación.

1.22.1 Centro de área

En el método de defuzzificación del Centro de Área (CoA), también llamado Centro del método de gravedad (CoG), el controlador difuso calcula primero el área bajo las funciones de membresía escaladas y dentro del rango de salida variable. El controlador de lógica difusa luego usa la siguiente ecuación para calcular el centro geométrico de esta área.

$$CoA = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) \cdot x \, dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) \, dx}$$

Donde CoA es el centro del área, X es el valor de la variable lingüística y X min y X max, representan el rango de la variable lingüística. El método de defuzzificación del Centro de Área calcula efectivamente el mejor compromiso entre múltiples términos lingüísticos de salida.

1.22.2. Centro de área modificado

Debido a que el método de defuzzificación de CoA evalúa el área bajo las funciones de membresía escaladas solo dentro del rango de la salida lingüística variable, los valores de salida resultantes no pueden abarcar todo el rango. Para resolver este problema, se usa la defuzzificación del método de Centro de Área modificada.

El método de defuzzificación modificado del Centro de Área es similar al Método de defuzzificación del centro de área. Sin embargo, el controlador de lógica difusa considera el área completa bajo las funciones de membresía escalada, incluso si, El área se extiende más allá del rango de la variable de salida. En la lógica difusa, el controlador utiliza la siguiente ecuación para calcular el centro geométrico del área completa bajo las funciones de membresía escalada.

$$mCoA = \frac{\int f(x) \cdot x dx}{\int f(x) dx}$$

Donde mCoA es el centro de área modificado.

El intervalo de integración es entre el valor mínimo y el valor máximo de la función de membresía. Teniendo en cuenta que este intervalo podría extenderse más allá del rango de la variable de salida.

1.22.3. Centro de Sumas

En el método de defuzzificación del Centro de Sumas (CoS), la lógica difusa el controlador primero calcula el centro geométrico del área para cada función de membresía, como se ilustra la Figura 7:

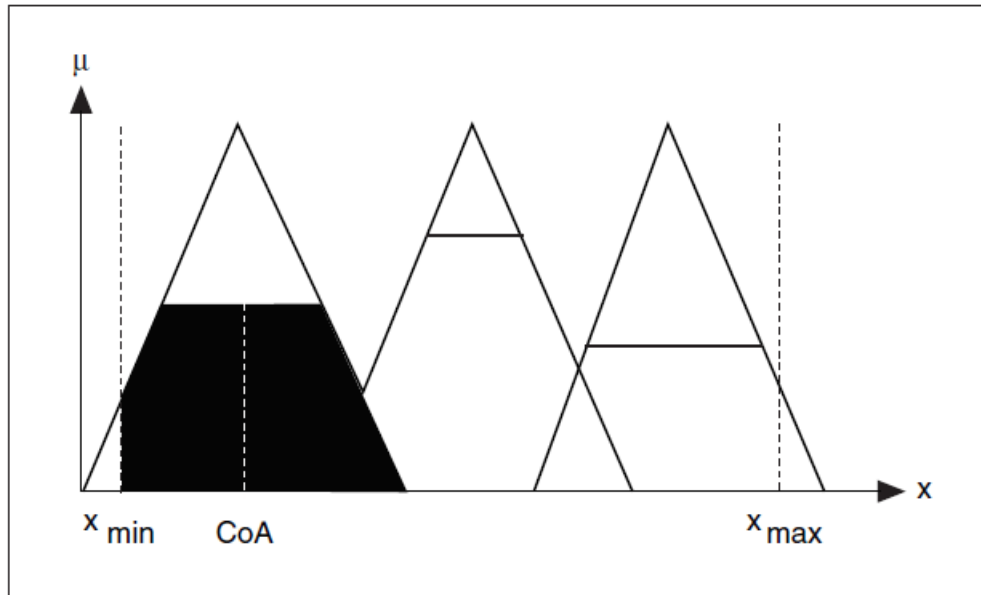


Figura 7. Cálculo del centro geométrico del área para una función de pertenencia

El controlador difuso posteriormente usa la siguiente ecuación para calcular un promedio ponderado del centro geométrico del área para todos los miembros funciones.

$$x_{final} = \frac{(CoA_1 area_1 + CoA_2 area_2 + \dots + CoA_n area_n)}{(area_1 + area_2 + \dots + area_n)}$$

Donde CoA_n es el centro geométrico del área de la función de membresía escalada n , y $area_n$ es el área de la función de membresía escalada n .

1.22.4. Centro de Máximo

En el método de defuzzificación del Centro de Máximo (CoM), el controlador de lógica difusa primero determina el valor numérico típico para cada función de membresía escala. El valor numérico típico es la media de valores numéricos correspondientes al grado de membresía en el que la función de membresía fue escalada.

El controlador de lógica difusa luego usa la siguiente ecuación para calcular un promedio ponderado de los valores típicos.

$$x_{final} = \frac{(x_1\mu_1 + x_2\mu_2 + \dots + x_n\mu_n)}{(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n)}$$

Donde X_n es el valor numérico típico para la función de membresía escalada n , y es el grado de membresía en el que la función de membresía n es escalada.

1.22.5. Media de la máxima

Utilice el método de defuzzificación de la media del máximo (MoM) para el patrón aplicaciones de reconocimiento. Este método de defuzzificación calcula un resultado más plausible (merecedor). En lugar de promediar los grados de membresía de los términos lingüísticos de salida, el método de defuzzificación MoM selecciona el típico valor del término lingüístico de salida más válido. La Figura 8 ilustra el método de defuzzificación MoM.

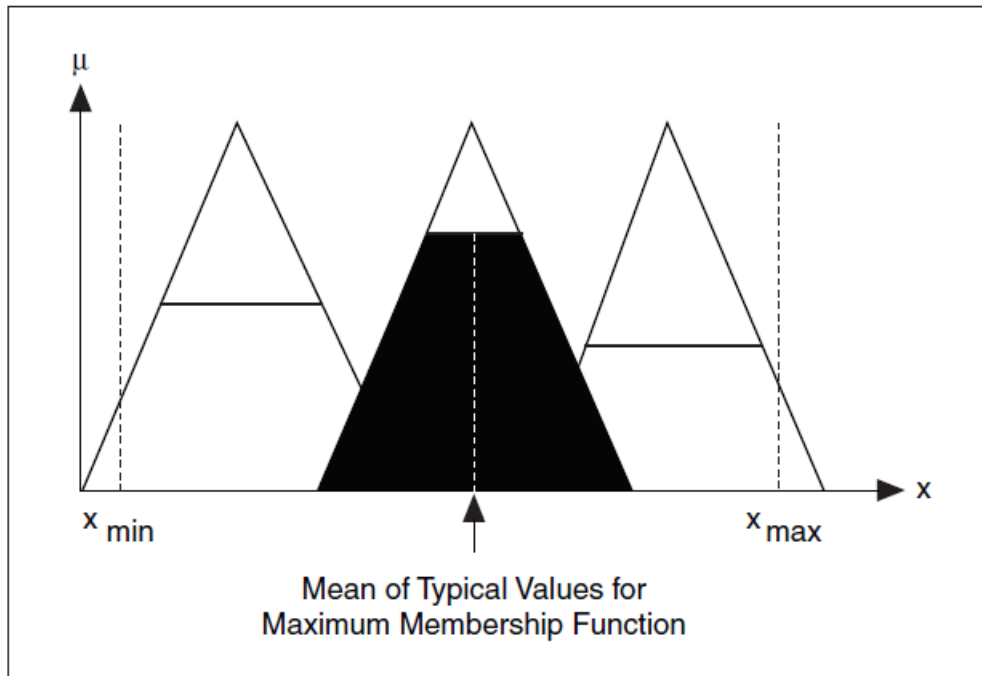


Figura 8. Método de defuzzificación media de máxima (MoM)

2. Programación, Materiales y Métodos

2.1. Programación

La programación para el “Instrumento Virtual para determinación de potencial de hidrogeno, velocidad de carbonatación y predicción de vida del concreto armado”, se fundamenta en una programación por flujo de datos modular, desarrollada en la plataforma de instrumentación virtual LabVIEW®; Hace uso de las herramientas generales y exclusivas como Ni Visión y Lógica Difusa de LabVIEW®. En esta sección se detallan las estructuras y diferentes etapas que comprenden el instrumento virtual de esta tesis.

La programación por flujo de datos que es un modelo de programación que optimiza los tiempos de procesamiento, lo que logra una ejecución más eficiente de los programas de cómputo en la computadora. El paradigma de flujo de datos de LabVIEW se basa en el hecho de que un nodo se ejecuta una vez que la información está disponible en sus terminales de

entrada. Una vez que completa su ejecución, genera datos de salida que generalmente están destinados a la siguiente función o nodo. Es este movimiento de datos el que determina el orden de ejecución en el Diagrama de Bloques de un VI. En los casos en los que no es conveniente la programación por flujo de datos se usan variables locales que son utilizadas en circunstancias donde no es posible enviar los datos a través de un cable que conduzcan los datos de una función a otra o de un SubVI a otro por flujo de datos.

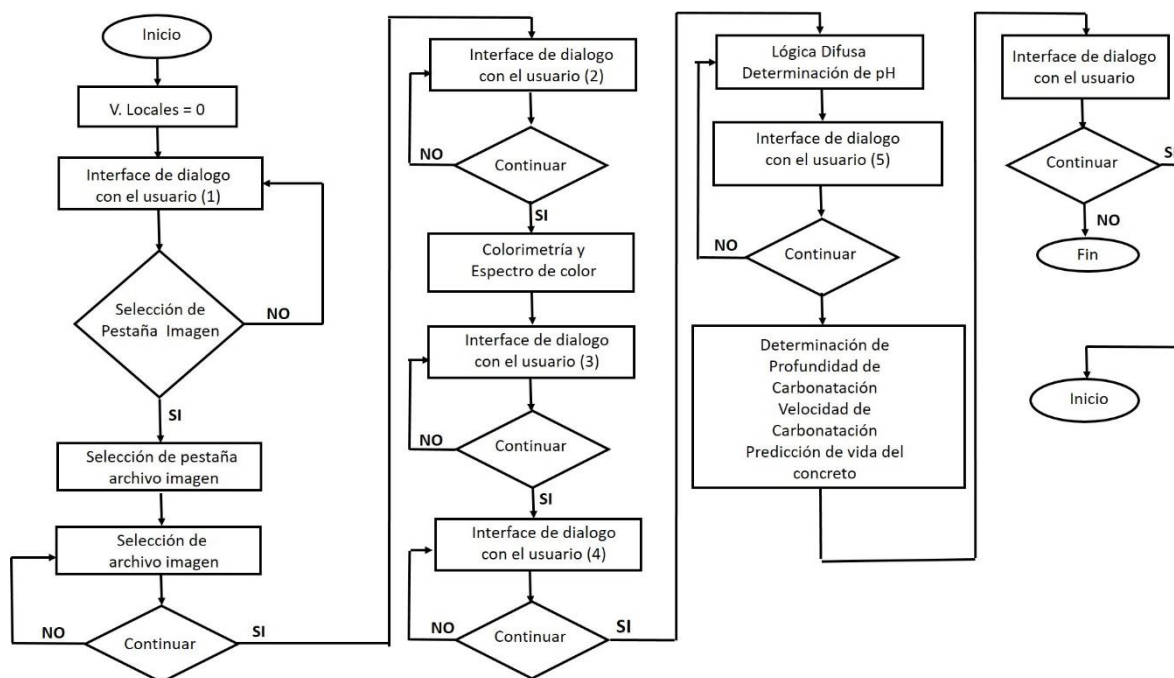


Figura 9. Diagrama de flujo Instrumento Virtual para de terminación de potencial de hidrogeno, velocidad de carbonatación y predicción de vida del concreto armado

2.2. Flujo general del VI

Tomado como referencia la figura 9 del diagrama de flujo del VI, la secuencia de ejecución se divide en etapas y es la siguiente.

Etapa 1. En esta sección se da la inicialización de variables locales a cero, seguido de una Interfase de dialogo con el usuario, la cual detiene la ejecución del VI y da indicaciones de guía al usuario de para el uso del VI, una vez que el usuario oprime continuar la ejecución del VI continua, el usuario seleccione la imagen del espécimen de concreto a analizar y oprime continuar para seguir con la ejecución del VI, de lo contrario tiene la opción de cambiar la imagen a analizar.

Etapa 2. En esta sección, el VI da indicaciones al usuario para seleccionar con el apuntador la región de inspección seleccionada, la región de inspección, el VI solicita datos del espécimen como lo son los días del espécimen y la profundidad del acero de refuerzo, una vez que el usuario captura la información al dar continuar el VI determina automáticamente el pH del espécimen con el uso de técnicas de colorimetría y toma de decisiones por lógica difusa.

Etapas 3. En esta sección, el VI da las indicaciones al usuario para la medición de la profundidad de carbonatación con el uso del apuntador, al dar continuar el VI muestra la imagen del espécimen, el usuario traza una línea recta con el apuntador sobre la región carbonatada de imagen, posteriormente el VI determina automáticamente la profundidad de carbonatación, la velocidad de carbonatación y el tiempo de vida en años del concreto bajo estudio con apego a la normatividad vigente y los modelos matemáticos incluidos en ella. Para finalizar, una interfaz de dialogo con el usuario interroga al usuario si desea analizar otra imagen, de ser así, el proceso inicia de nuevo de lo contrario el VI culmina su ejecución.

2.3. Estructura principal del VI.

Lo descrito anteriormente con la implementación de una programación por jerarquía con el uso de dos tipos de estructura principales: Estructuras While Loop y Flat Sequence Structure. La estructura principal es un una Estructura While Loop que permite una ejecución iterativa

del VI hasta que se dé la condición de paro por el usuario. La Estructura While Loop incluye o encierra una estructura tipo Flat Sequence Structure, la cual consiste en uno o más subdiagramas, cuadros que se ejecutan secuencialmente de izquierda a derecha.

Esta configuración de estructura es usada para asegurar que un subdiagrama se ejecute antes o después de otro subdiagrama. Es importante mencionar que los cuadros en una estructura de secuencia plana se ejecutan de izquierda a derecha y cuando todos los valores de datos conectados a un cuadro están disponibles. Los datos salen de cada cuadro cuando termina de ejecutarse el algoritmo que se encuentra dentro de ese cuadro. Esto significa que la entrada de un cuadro puede depender de la salida de otro cuadro. La estructura tipo Flat Sequence incluye en su interior While Loops, así como VIs de diálogo e interfaz de usuario y funciones para la toma de decisiones en el VI y control de flujo. La figura 10, muestra un código G con el uso de la estructura de programación implementada en el VI.

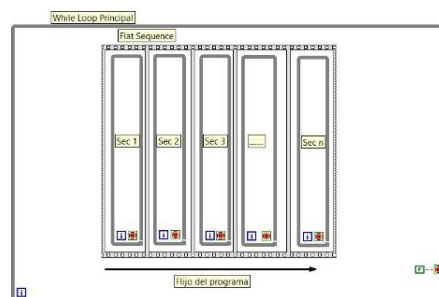


Figura 10. Código G y Estructura de implementación del VI.

2.3.1. Flujo de ejecución del VI por Secciones de la estructura Flat Sequence.

2.3.1.1 Sección 1 Inicialización de variables.

La figura 11, muestra la sección 1 de la estructura Flat Sequence del VI. Esta consiste en una etapa de inicialización de variables locales usadas por el VI para acceso directo a memoria y la ejecución de una interfaz de dialogo con el usuario, con el uso de la función de dialogo de un botón el mismo detiene la ejecución del VI con la ayuda de una estructura While Loop la cual espera la repuesta del usuario para continuar o no la ejecución del VI.

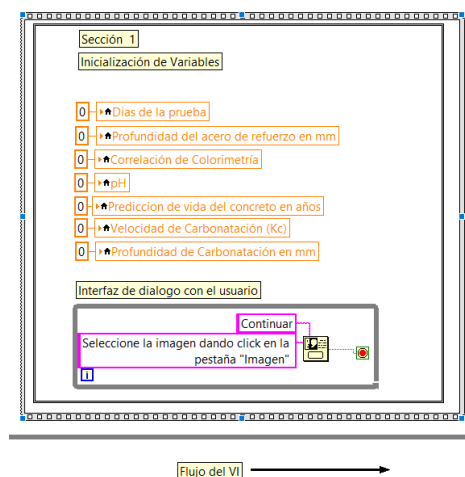


Figura 11. Sección 1 de inicialización de variables locales e interfaz de dialogo con el usuario.

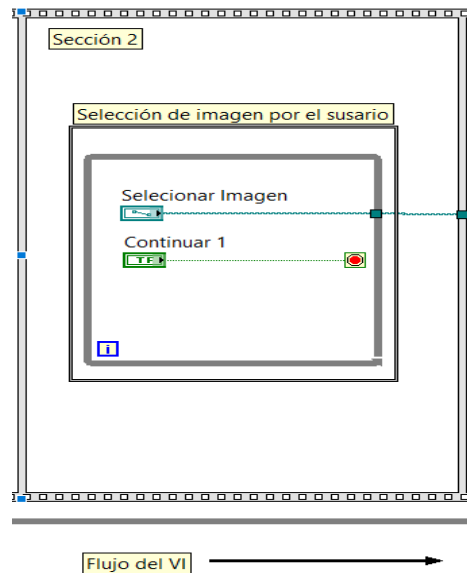


Figura 12. Selección de imagen a analizar.

2.3.1.2 Sección 2 Selección de imagen a analizar.

La figura 12, muestra la sección 2 en donde, con la ayuda de un While Loop y una función File Path además, de un control de paro, el usuario elige de la imagen a analizar con el VI.

2.3.1.3. Sección 3. Interfaz con el usuario para seguimiento del flujo del VI.

En la figura 11, podemos ver esta sección la cual corresponde al uso de funciones de interfaz y dialogo con el usuario, la cual da indicaciones con mensajes de texto del procedimiento de uso del VI para continuar con el análisis.

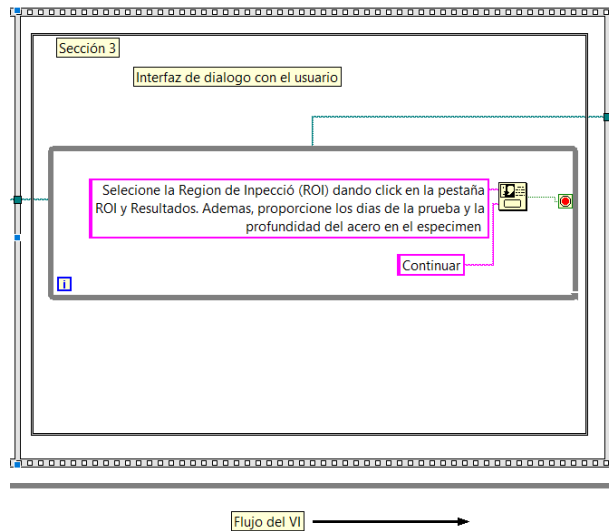


Figura 13. Sección 3 interfaz de dialogo con el usuario.

2.3.1.4. Sección 4. Procesos de colorimetría parte 1

Aquí se inicia con el proceso de colorimetría en la imagen analizada, desde el punto de vista de visión computacional esta sección contiene funciones y SubVI (Iconos de programación) complejos, específicos de las herramientas de LV para máquinas de visión computacional. véase figura 13. Se usan principalmente iconos de programación de LV como Read File que permite leer la información de un archivo imagen tipo RGB (red (“rojo”), green (“verde”) y blue (“azul”)). Este consiste en un modelo cromático que representa distintos colores de una imagen a partir de la mezcla de estos tres colores primarios y con la opción de visualizar la imagen en pantalla con la ayuda de un indicador de imagen en LV. Con la ayuda de un nodo propietario ROI, el usuario elige la región de inspección de la cual desea obtener el espectro de color del espécimen a estudiar, los datos de la región de inspección son proporcionados al icono de programación Color Learn descrito en el marco teórico de esta tesis. Color Learn obtiene el espectro de color de la región de inspección dato principal para poder determinar el pH del espécimen por comparación con patrones de espectro de color obtenidos de

imágenes de las diferentes tonalidades que presenta en la fenolftaleína al ser aplicada al concreto.

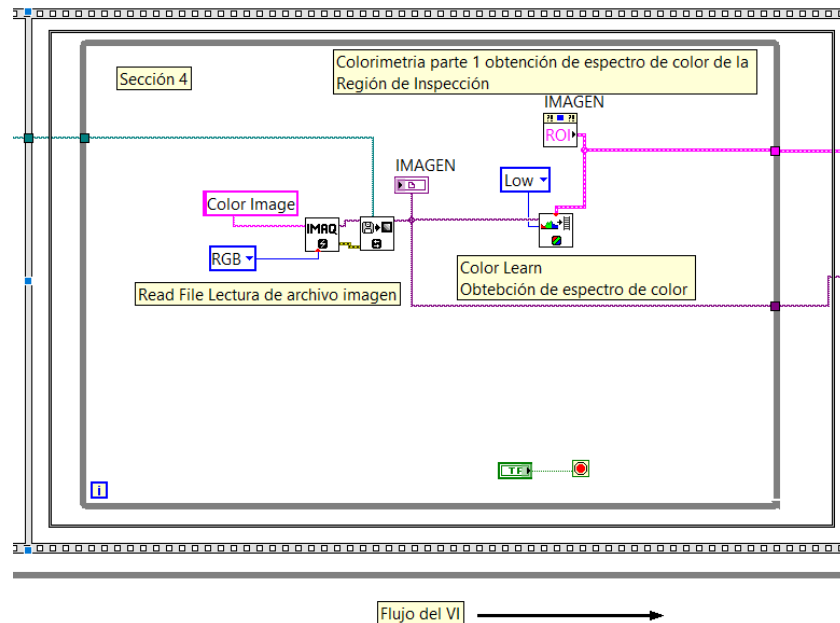


Figura 14. Colorimetría parte 1.

2.3.1.5. Sección 5. Interfaz de dialogo con el usuario con indicaciones del pH.

Consiste en una simple interfaz de dialogo con el usuario precedida de la sección 4, la cual notifica al usuario que a partir de esta sección se determina de forma automática el pH del espécimen de estudio. ver figura 14.

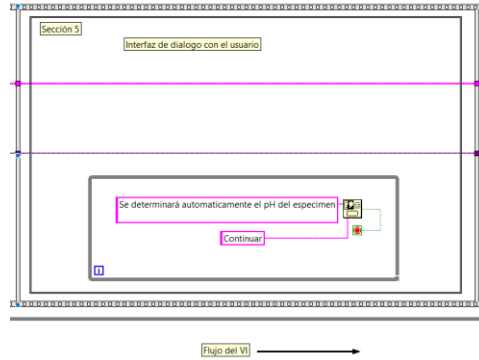


Figura 14. Interfaz de dialogo con el usuario notificación de determinación automática del potencial de hidrogeno (pH).

2.3.1.6. Sección 6 Comparación del espectro de color para determinación del pH.

En esta sección se compara el espectro de color del espécimen obtenido en la sección 4. El flujo de operación es modular y se ejecuta con el siguiente procedimiento. Tomando como referencia la figura 15, primeramente se cuenta con un banco de espectros de color de referencia para los pH 7,8,9 y 10, en base a la carta de colores patrón de la fenolftaleína, posteriormente, el espectro de color del espécimen obtenido en la sección 4 es comparado con cada uno de los bancos de color de pH de referencia con el SubVI IMAQ ColorMatch VI de la herramientas de visión computacional, este SubVI encuentra la coincidencia entre el contenido de color de múltiples regiones en una imagen y los definidos por el espectro de color de entrada (espécimen). Cada una de las comparaciones con el SubVI IMAQ ColorMatch da como resultado un valor de correlación del 0 al 1000 donde 0 es sin correlación y 1000 una correlación exacta. Cada valor de correlación posteriormente es almacenado en un arreglo de datos. Seguido, se obtiene con el uso de la función Array Max & Min el índice del máximo valor de correlación y su valor para el espectro de color del espécimen comparado con el banco de espectro de color. Este valor puede pertenecer al banco

de colores para el pH 7 al 10, así como su índice el cual es de gran utilidad para la siguiente sección en donde se determinará por lógica difusa, cual será el valor del pH del espécimen.

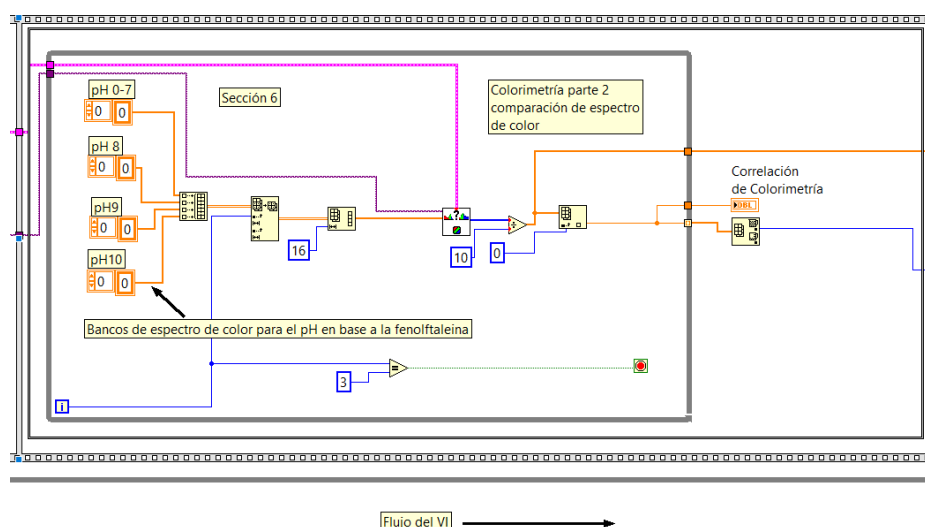


Figura 15. Comparación de espectro de color

2.3.1.7. Sección 7 Determinación del pH con el uso de lógica difusa.

En esta sección se obtiene por medio de toma de decisiones con el uso de lógica difusa el pH del espécimen de estudio. El flujo de operación es modular y se ejecuta con el siguiente procedimiento. Su operación consiste en una estructura de programación Case, que contiene uno o más subdiagramas, o casos en donde el valor conectado al terminal selector determina qué caso ejecutar. Para esta estructura existen 4 casos a ejecutar y son seleccionados de acuerdo al índice y valor del espectro de color que se obtienen del proceso de comparación de espectros de color para obtención del pH de la sección 6. Cada caso contiene un código de programación de lógica difusa para cada uno de los diferentes niveles de pH, los SubVI usados pertenecen a las herramientas del grupo de herramientas Fuzzy Sytem Designer de la sección de Control, Diseño y Simulación de LabVIEW. En cada caso de la estructura Case, es usado el VI FL Fuzzy Controller VI en la que se implementa un controlador de lógica

difusa para el sistema difuso que el diseñador especifique. En particular el controlador implementado por lógica difusa es del tipo MISO, múltiples entradas una salida y se diseñó con la ayuda del sistema de diseño de lógica difusa de LabVIEW. El controlador difuso decide de forma computarizada, es decir, inteligencia artificial el pH del espécimen en estudio mediante funciones de membresía de entrada y salida con los valores de correlación y pH respectivamente y el método de defuzzificación de centro de área.

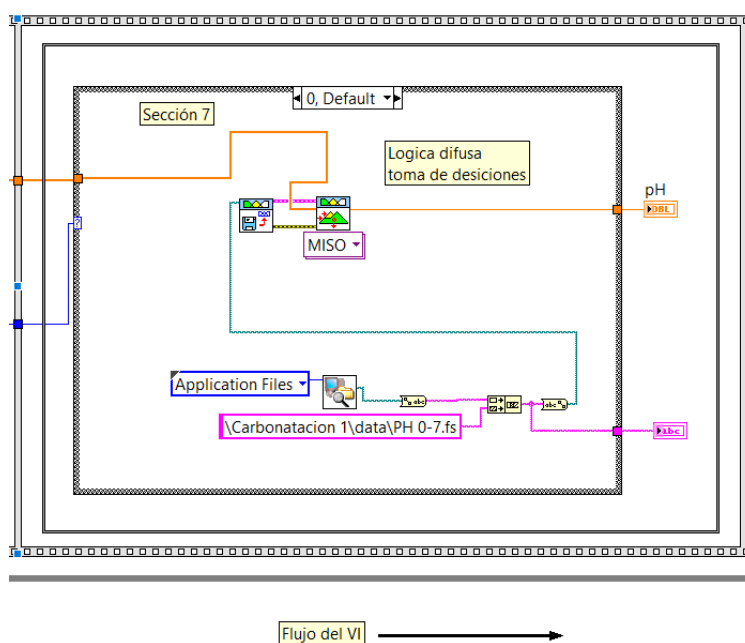


Figura 16. Lógica difusa para toma de decisiones y determinación del pH.

2.3.1.8. Sección 8 Interfaz de dialogo con el usuario que le indica el procedimiento para determinar la profundidad de carbonatación.

En esta sección se tiene una interfaz de dialogo con el usuario en el que se le notifica que se obtuvo el pH del espécimen y da explicaciones para la medición de profundidad de carbonatación del espécimen. figura 17.

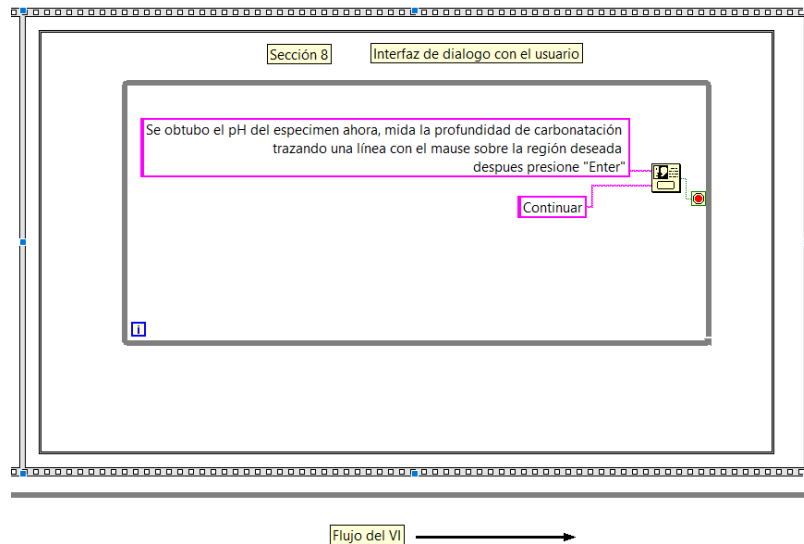


Figura 17. Indicaciones al usuario para determinar la profundidad de carbonatación.

2.3.1.9. La sección 9, cálculo de profundidad y velocidad de carbonatación y tiempo de vida del concreto hidráulico.

Véase la figura 18 como referencia de esta sección. La velocidad de carbonatación y predicción de vida del concreto con el uso de las herramientas de máquinas de visión de LabVIEW y modelos matemáticos que permiten determinar la profundidad de carbonatación, así como, la predicción de la vida del concreto. Cabe destacar que los modelos matemáticos usados son tomados de la NORMA Mexicana NMX-C-515 ONCE-2016, para la determinación de la profundidad de carbonatación en concreto hidráulico, especificaciones y métodos de ensayo. En cuanto herramientas de visión computacional se usan los SubVI IMAQ Select Line VI, que permite al usuario especificar la ubicación de una línea en la imagen. IMAQ Select Line, muestra la imagen en la ventana especificada y proporciona una herramienta de línea. IMAQ Select Line devuelve las coordenadas de la línea seleccionada cuando el usuario hace clic en Aceptar en la ventana. Las mediciones lineales proporcionadas por IMAQ Select Line VI, son posteriormente ingresadas como variables de entrada a un nodo de fórmula de LabVIEW en donde se introducen los modelos matemáticos para cálculo

de profundidad de carbonatación, velocidad de carbonatación y predicción de vida del concreto.

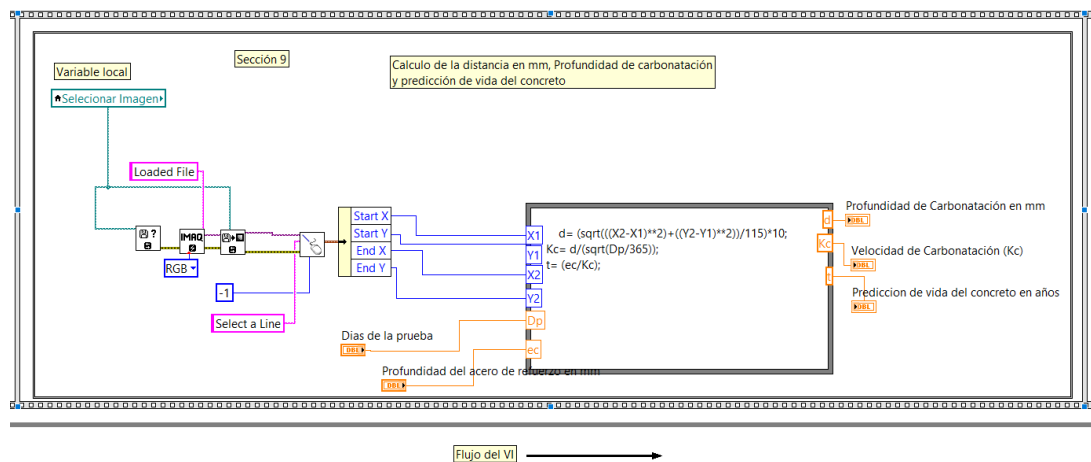


Figura 18. Cálculo de profundidad y velocidad de carbonatación y tiempo de vida del concreto hidráulico.

2.3.1.10. Sección 10 Interfaz de dialogo con el usuario dando instrucciones finales para el uso del VI.

Esta sección presenta una interfaz de dialogo con el usuario en la cual le permite al usuario tomar la decisión de realizar un nuevo estudio o terminar con la ejecución del VI. La figura 19 muestra la interfaz de dialogo con el usuario.

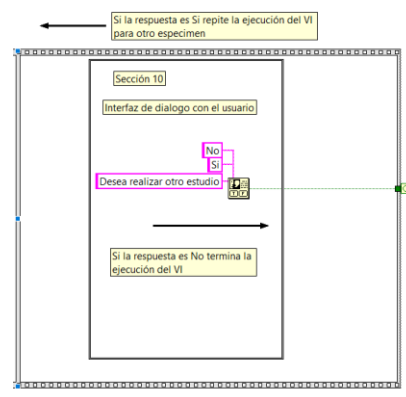


Figura 19. Interfaz de dialogo con el usuario indicaciones finales para la ejecución de VI.

2.4. Materiales de prueba, Características y propiedades de los materiales utilizados.

2.4.1 Preparación de especímenes de prueba

2.4.1.1 Cemento

Para la fabricación de los especímenes de concreto se utilizó cemento Portland hidráulico CPO 40 RS, el cual cumple con las especificaciones de la NMX-414-ONNCCE-2014 [15].

La Tabla 1, muestra y resume las características del cemento usado.

Tabla 1. Características del cemento usado

Tipo de Cemento	Resistencia a la compresión (N/mm²)	Características Especiales
CPO	40	RS
Cemento Portland Ordinario	Resistencia a la compresión a los 28 días mínima	Resistencia a los Sulfatos
	408 kg/cm ²	

2.4.1.2. Agregados pétreos: arena y grava

Los agregados utilizados para las mezclas de concreto por cada planta cumplen con las recomendaciones, de la Norma ASTM C 33 [42], que define los requerimientos para evaluar la calidad de los agregados finos y gruesos que se utilizan en la fabricación del concreto, entre otros requerimientos de la Norma NMX C-111- ONNCCE-2014.

2.4.1.3. Agua

Para las mezclas que se realizaron a nivel industrial por la planta de concreto C1, se utilizó agua purificada procedente de una planta purificadora de agua. Por otra parte, la planta de concretos C2 utilizó agua potable de la red de suministro para uso doméstico, las dos aguas

son procedente de Mexicali, Baja California. Estas aguas poseen buenos antecedentes de uso en la fabricación de concreto las cuales cumplen con los requerimientos de la Norma NMX C-122 ONNCCE-2004.

2.4.1.4. Aditivos

El aditivo empleado para la elaboración de las mezclas de concreto a nivel industrial para la planta de concretos, fueron el RA 700 M, y el DAG de EUCOMEX. Estos aditivos son empleados para todos los concretos convencionales elaborados por la planta, tienen como función la reducción de agua dentro de la mezcla y retardar el fraguado del concreto, su uso mejora las mezclas de concreto, haciéndolas más plásticas y fluidas, para su colocación en obra.

2.4.1.5. Diseño de los especímenes

El diseño de los especímenes EC y especímenes ECA fueron en forma cilíndrica, con dimensiones de 15cm de diámetros aproximadamente y 30cm de alto aproximadamente, como se muestra en la Figura 20 y 21.

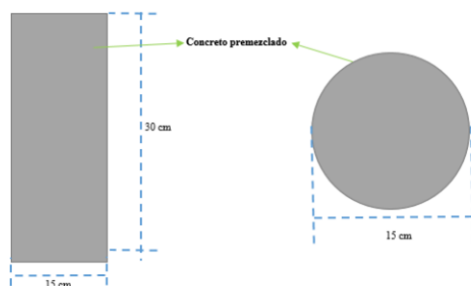


Figura 20.- Diseño de espécimen de concreto

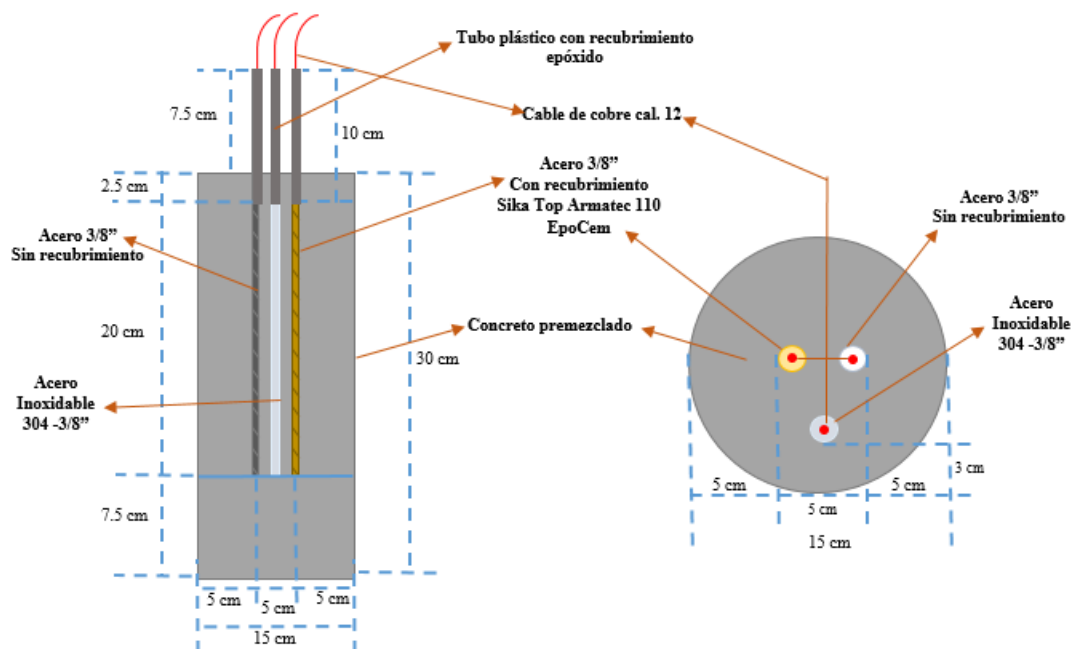


Figura 21.- Diseño de espécimen de concreto con acero

Los especímenes fueron elaborados en el laboratorio, la planta de concreto y en obra, bajo las normas mexicanas de calidad, así como con las normas de las ASTM. Los materiales utilizados se indican en la Tabla 2.

Tabla 2.- Materiales utilizados para la elaboración de los especímenes

Especímenes EC	Especímenes ECA
Cemento	Cemento
Agua	Agua
Agregados	Agregados
Aditivo	Aditivo
----- -----	Acero al carbono de 3/8
----- -----	Acero inoxidable 304 de 3/8

2.4.1.6. Preparación del acero de refuerzo

A los especímenes de concreto con acero de refuerzo, se les colocaron dos tramos de varillas corrugadas de acero al carbono No. 3 (3/8") Grado 60, de las cuales a una varilla se le aplicó un recubrimiento cementante, y se agregó una tercera varilla de acero inoxidable 304 del No 3 (3/8"). Las varillas corrugadas de acero al carbono se colocaron con 5cm de recubrimiento y la de acero inoxidable con un recubrimiento de 3cm, como se muestra en la Figura 22.

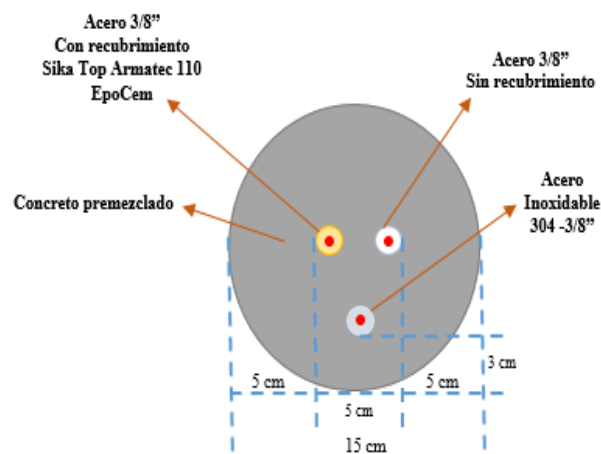


Figura 22. Distribución de la colocación de las varillas acero y acero inoxidable en los especímenes

2.4.1.7. Diseño de la mezcla

El diseño de la mezcla se realizó a nivel industrial, cumpliéndose con los requisitos de desempeño bajo la Norma NMX-155-ONNCCE-2014 [41], las propiedades y características de los materiales se describen en la Tabla 2.

Tabla 2.- Tipos de materiales empleados

Material	Concreto 1	Concreto 2
Cemento	CPO 40 RS de la planta de cemento CEMEX Mexicali, Baja California	CPO 40 RS de la planta de cemento CEMEX Mexicali, Baja California
Agua	Agua purificada para consumo humano de Mexicali, Baja California	Agua potable de red municipal de Mexicali, Baja California
Arena	Arena lavada, Banco López Mateos Mexicali, Baja California	Arena lavada, Banco López Mateos Mexicali, Baja California
Grava	T.M.A. $\frac{3}{4}$ " de roca minera granítica, Banco López Mateos Mexicali, Baja California	T.M.A. $\frac{3}{4}$ " de roca minera granítica, Banco López Mateos Mexicali, Baja California
Aditivo	RA 700 M, de EUCOMEX	DAG, de CEMEX

2.4.1.8. Procedimiento de medición del pH y la velocidad de carbonatación acorde a la normatividad vigente

Para esta prueba se usaron los especímenes expuestos al ambiente mismo que fueron ensayados por la prueba de resistencia a la compresión. Esta prueba está basada a la Norma RILEM CPC-18, que consiste en la determinación de la profundidad de la capa carbonatada en la superficie de concreto endurecido por medio de un indicador. Las mediciones se realizaron 27, 78, 130 y 183 días.

Esta prueba se realizó con un indicador al 1% de fenolftaleína en 70 % de alcohol etílico para la medición de la profundidad de la carbonatación en base a la Norma RILEM CPC-18.

Para la medición de la profundidad de la carbonatación se digitalizaron los cortes de especímenes con el instrumento virtual desarrollado en esta tesis y un escáner HP Scanjet 3110.

3. Resultados

Cabe destacar que los resultados mostrados en esta sección se refieren únicamente a la ejecución del instrumento virtual de esta tesis, para lo cual se usaron especímenes desarrollados en otros trabajos de investigación. Por otra parte, el propósito de esta sección es destacar los resultados que entrega el instrumento virtual

Para la prueba del Instrumento Virtual “Medición de pH, profundidad de carbonatación, velocidad de carbonatación y tiempo de vida en años para el concreto hidráulico” se usaron materiales de concretos descrito en “Programación, Materiales y Métodos” de esta tesis en concretos expuestos a condiciones del ambiente urbano de la ciudad de Mexicali Baja California, utilizando concreto elaborado a nivel industrial dentro de la zona de estudio y una estación de ensayo de exposición al ambiente.

Solo se muestran los resultados de un espécimen, ya que de lo contrario la información presentada seria redundante y reiterativa. La finalidad de la sección es presentar los resultados entregados por el instrumento virtual desarrollado.

3.1. Resultados de operación del instrumento virtual (VI)

La figura 23, muestra la interfaz gráfica principal con el usuario del VI, en ella pueden observarse los controles que permiten al usuario seleccionar el archivo imagen del espécimen a analizar, controles con opciones de continuar y un par de pestaña Imagen y ROI (región de inspección y resultados). La pestaña Imagen es predeterminada al iniciar la ejecución del VI.



Figura 23. Interfaz gráfica principal

La figura 24, muestra una interfaz gráfica con el usuario con la leyenda, “Seleccione la imagen dando click en la pestaña imagen” Con la finalidad de guiar al usuario del VI en su operación y asegurarse de que inicio con la selección de la imagen a analizar una vez que se presiona continuar, se puede continuar con el flujo de operación del VI.

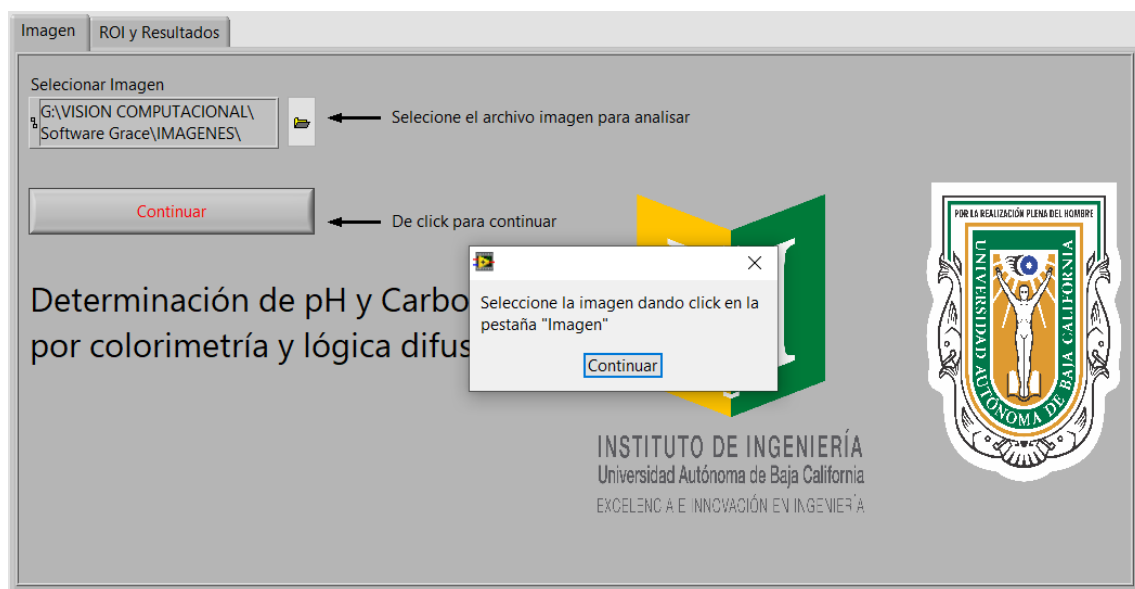


Figura 24. Interfaz gráfica con el usuario e interfaz de dialogo con el usuario

La figura 25, muestra el mensaje de interfaz gráfica de dialogo con el usuario dando las indicaciones para pasar la pestaña ROI y Resultados y continuar con el estudio.

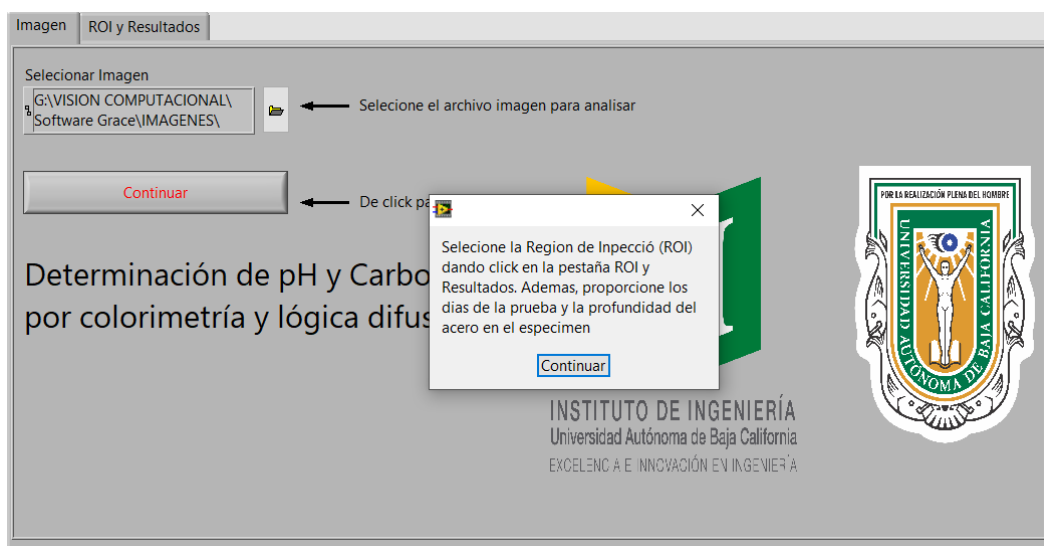


Figura 25, Interfaz gráfica y de dialogo con indicaciones para selección de región de inspección, así como captura de datos del espécimen.

Una vez seleccionada el área de inspección ROI La figura 26, muestra la interfaz gráfica y de dialogo con el usuario indicando que el siguiente paso es para la medición de la profundidad de carbonatación del espécimen y da indicaciones al usuario para realizar esta tarea.

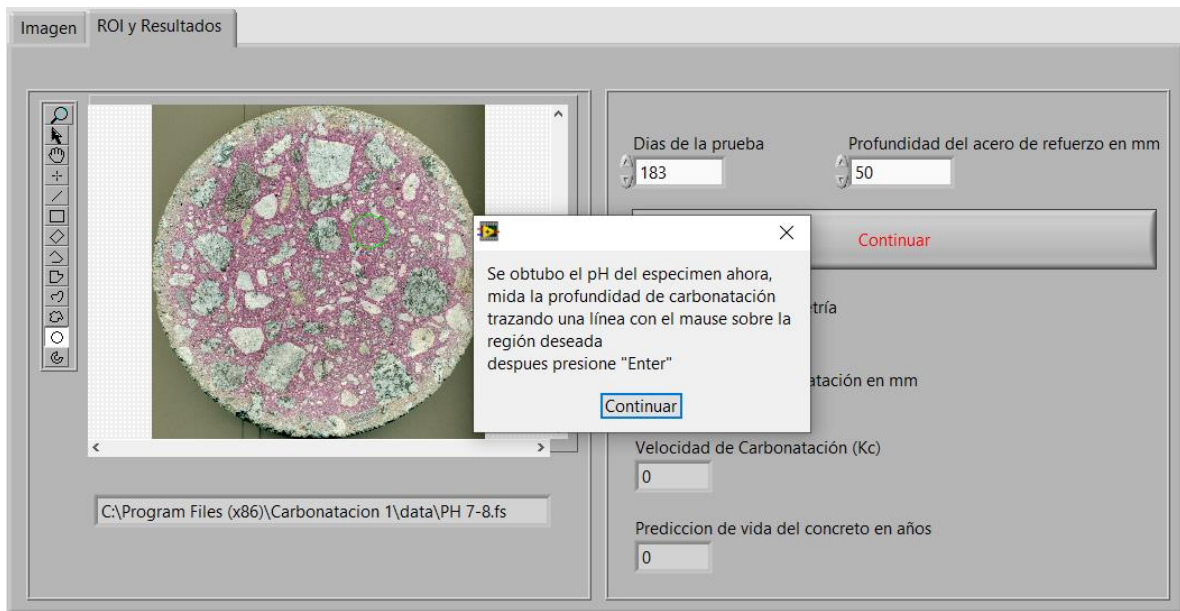


Figura 26. Indicaciones al usuario con indicaciones para el seguimiento de análisis con el VI

La figura 27, muestra el resultado final para el espécimen analizado, en ella pueden verse los siguientes datos de analisis.

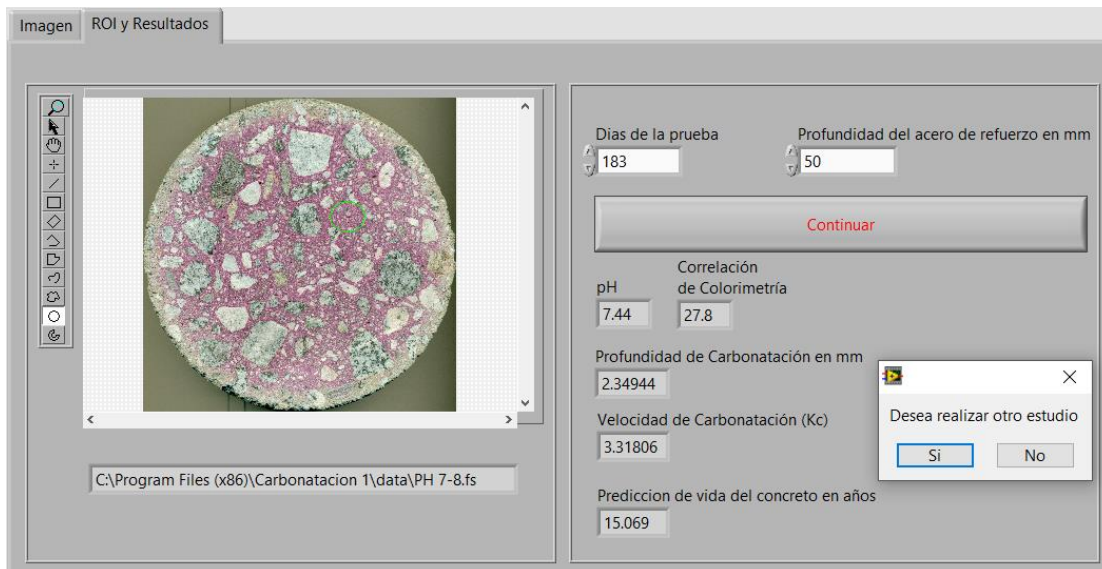


Figura 27. Interfaz gráfica y de dialogo, con el usuario con los resultados del análisis del espécimen.

Tomando como referencia la figura 27, puede verse la imagen del espécimen y un círculo verde que es el ROI seleccionado, para determinar el pH del espécimen además de, los datos proporcionados por el usuario acerca de los días de la prueba de espécimen, la profundidad del acero de refuerzo en milímetros. Al presionar continuar se calcula de manera automática con los datos del pH y los días de la prueba, la profundidad del acero de refuerzo y la medición lineal realizada por el usuario del área carbonatada por visión computación, la profundidad de carbonatación, la velocidad de carbonatación y la predicción de vida del concreto hidráulico en años. La tabla 3, muestra un resumen de los datos obtenidos por VI.

Tabla 3. Resumen de datos obtenidos por VI en un espécimen real de concreto hidráulico

Datos proporcionados por el usuario		Por ROI determinado por colorimetría y espectro de color y lógica difusa	Medición por marcado lineal con el uso de Visión computacional	Calculo de acuerdo a la normatividad	Calculo de acuerdo a la normatividad
<i>Días de la prueba</i>	<i>Profundidad del acero de refuerzo</i>	<i>pH</i>	<i>Profundidad de carbonatación</i>	<i>Velocidad de carbonatación</i>	<i>Predicción de vida del concreto en años</i>
183	50mm	7.44	2.34mm	3.31	15.069 años

Conclusiones

Se desarrolló e implementó en una computadora de propósito general con el uso de la plataforma de instrumentación de LabVIEW, así como su herramienta de máquinas de visión computacional y lógica difusa, un instrumento virtual que determina por inteligencia artificial, el potencial de hidrógeno, carbonatación, velocidad de carbonatación y tiempo de vida en años para el concreto hidráulico e hidráulico armado. Con lo anterior, se demuestra la diversidad de aplicaciones de la instrumentación virtual en las diferentes áreas del conocimiento de la ciencia y la tecnología, mismas que no se limitan a estas áreas del conocimiento, pudiendo tener aplicaciones muy importantes en las ciencias humanas y de la salud.

El instrumento virtual desarrollado al tratarse de un sistema de máquinas de visión, lógica difusa e inteligencia artificial reduce la incertidumbre asociada a las mediciones humanas para la determinación del potencial de hidrógeno, carbonatación, velocidad de carbonatación y tiempo de vida en años para el concreto hidráulico e hidráulico armado.

El instrumento virtual desarrollado se encuentra en proceso de registro de derechos de autor en la modalidad de programa de cómputo por la Oficina de la Propiedad Intelectual (OPI) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y ante el Instituto Nacional de Derechos de Autor (INDAUTOR) de la Secretaría de Educación Pública (SEP) en México.

Bibliografía

- [1].Jovitha Jerome. (2010). VIRTUAL INSTRUMENTATION USING LabVIEW. Connaught Circus, New Delhi-110001 and Printed by Mudrak, 30-A, Patparganj, Delhi-110091: Asoke K. Ghosh, PHI Learning Private Limited.
- [2].RONALD W. LARSEN. (2011). LabVIEW for Engineers. Boston Columbus Indianapolis New York San Francisco Upper Saddle River Amsterdam Cape Town Dubai London Madrid Milan Munich Paris Montreal Toronto Delhi Mexico City Sao Paulo Sydney Hong Kong Seoul Singapore Taipei Tokyo: Prentice Hall.
- [3].AYLARD, R. H., L. 2002. World Business Council for Sustainable Development and Cement Sustainability Initiative.
- [4].PURNELL, P. 2013. The carbon footprint of reinforced concrete. *Advances in Cement Research*, p. 1–7.
- [5].Raicho R, Veleza L, & Valdéz B. (2009). Corrosión de metales y degradación de materiales. Mexicali, Baja California, México: Departamento Editorial Universitario.
- [6].Sanjuán M, & Castro P. (2001). *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto* (Primera ed.). D.F., México: IMCYC.
- [7].Rendon Belmonte, M. (septiembre de 2013). Estudio de la película de óxido formada en la superficie de a armadura metálica de estructuras de concreto protegidas catódicamente. Mexicali, Baja California.
- [8].López Celis, R., Pérez Quiroz, J. T., Torres Acosta, A. A., Martínez Madrid, M., Martínez Molina, W., Ariza Aguilar, L. E., Valdez Salas, B. (2006). Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. *Publicación Técnica No. 292*. Sanfandila, Querétaro, México: IMT.
- [9].Castro P, Castillo R, Carpio J, Genescá J, Helene P, López W, . . . Véleza L. (1998). *Corrosión en estructuras de concreto armado* (Primera ed.). D. F., México: IMCYC.
- [10]. Lee Orantes, F., Torres Acosta, A., Terán Guillén, J., & Martínez Madrid, M. (2006). Caracterización de un sistema de refuerzo-protección en elementos de concreto reforzado dañados por corrosión, utilizando compuestos base fibras de carbón. *Publicación Técnica No 295*. Sanfandila, Querétaro: IMT.
- [11]. Campos Silva, A. R. (diciembre de 2011). Estudio de la carbonatación del concreto en condiciones aceleradas y naturales: aplicación al ambiente de la zona metropolitana de Monterrey. *Tesis para obtener el título el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción*. Monterey, Nuevo León, México.
- [12]. GUINER 2006. Carbonatación vs Aluminosis. *Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Málaga*.
- [13]. VISSER, J. 2012. Accelerated carbonation testing of mortar with supplementary cement materials: limitation of the acceleration due to drying.
- [14]. National Instruments Corporate Headquarters. (2010). Introduction to LabVIEW™ Graphical Programming Hands-On Seminar Customer Manual. USA: NI.
- [15]. National Instruments. (2003). LabVIEW TM User Manual. USA: National Instruments Corporation.

- [16]. L. Enrique Sucar, Giovani Gómez. (2008). Visión Computacional. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica Puebla, México: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica Puebla, México.
- [17]. National Instruments. (2007). NI Vision NI Vision Concepts Manual. USA: National Instruments Corporation.
- [18]. Rogelio Ramos,¹ Benjamin Valdez-Salas,¹ Roumen Zlatev,¹ Michael Schorr Wiener,¹ and José María Bastidas Rull². (2017). The Discrete Wavelet Transform and Its Application for Noise Removal in Localized Corrosion Measurements. International Journal of Corrosion, 2017, 7 Pages.
- [19]. National Instruments. (2009). LabVIEWTM PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual. USA: National Instruments Corporation.