

Evaluación de discontinuidades tipo grietas y fisuras en estructuras de hormigón empleando un analizador de vibraciones y procesamiento digital de imágenes¹

Evaluation of cracks and fissures discontinuities in concrete structures using a vibration analyzer and digital image processing

B. Tarazona y C. Sandoval

Recibido: noviembre 16 de 2018 - Aceptado: mayo 30 de 2019

Resumen— En esta investigación se realiza una evaluación de discontinuidades tipo grietas y fisuras en estructuras de hormigón como alternativa para su identificación, en la cual se expone el diseño y construcción de un analizador de vibraciones, para la caracterización de los datos obtenidos por medio de un sensor laser modelo M70LL de MEL, tras la aplicación de la transformada wavelet; el procesamiento de los datos obtenidos se realiza mediante un análisis estadístico de promedios y desviación de cada placa, para normalizar los resultados empleando un cartograma dividido en 64 espacios (correspondientes a cada zona evaluada), representados en 5 tonos de colores diferentes (azul, verde, amarillo, terracota y rojo), el cual, a mayor intensidad, evidencia la posibilidad de anomalía en esa zona. Con estos resultados se busca corroborar la presencia de anomalías estructurales presentes por medio de un sistema de visión artificial, basado en técnicas de procesamiento digital de imágenes.

Palabras clave— Vibraciones mecánicas, inspección visual de estructuras, transformada wavelet, visión artificial y discontinuidades.

Abstract— In this research, an evaluation of cracks type discontinuities in concrete structures are made as an alternative for their identification, which the design and construction of a vibration analyzer is exposed, for the characterization of the data obtained by means of a sensor laser model M70LL of MEL after the application of the wavelet transform. The processing of the obtained data is done by means of a statistical analysis of averages and deviation of each plate, to normalize the results using a cartogram divided into 64 spaces (corresponding to each evaluated area), represented in 5 shades of different colors (blue, green, yellow, terracotta and red) which, at a higher intensity, evidences the possibility of anomaly in that area. With these results, it is sought to corroborate the presence of structural anomalies presents through an artificial vision system, based on digital image processing techniques.

Keywords— Mechanical vibrations, Visual inspection of structures, wavelet transform, algorithm, discontinuities.

I. INTRODUCCIÓN

EN la sociedad moderna [1], la construcción emplea concreto, el material de construcción más popular hasta el momento que ha contribuido significativamente al desarrollo de la infraestructura en constante expansión en el mundo. Sin embargo, este material sufre daños debido a cargas externas causadas por las fluctuaciones de temperatura y carga dinámica y estática [2]. Existen diversos sondeos de defectos de concreto [3] y estudios en estructuras de hormigón como colapsos [4], análisis de confiabilidad de la durabilidad [5], estático y dinámico no lineal [6], numérico [7], sísmico probabilístico [8], detección de daños por congelación y descongelación [9], análisis de imágenes [10] y análisis de vibraciones [11], método basado en ondas [12], entre otras para detectar fisuras, grietas [13] y porosidades.

El análisis de vibraciones [14] en estructuras de hormigón tiene fundamentalmente dos vertientes de aplicación. Por un lado, el modelar o medir la respuesta de la estructura ante ciertos tipos de excitaciones, puede servir

¹Producto derivado del trabajo de investigación “Implementación de estructuras, máquinas y equipos con sistemas electromecánicos y termofluidos, aplicando energías alternativas y materiales estructurales, orientados a la competitividad del sector productivo”, presentado por el grupo de investigación en Sistemas de energía, automatización y control, Facultad de ciencias naturales e ingenierías. Unidades Tecnológicas de Santander.

B. Tarazona, Unidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga, Colombia, email: btarazona@correo.uts.edu.co.

C. Sandoval, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, email: csandoval@correo.uts.edu.co.

Como citar este artículo: Tarazona, B. y Sandoval, C. Evaluación de discontinuidades tipo grietas y fisuras en estructuras de hormigón empleando un analizador de vibraciones y procesamiento digital de imágenes, *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 13, no. 25, pp. 85-94, enero-junio de 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.4018>.



para evaluar potenciales daños sufridos, estimando con ello el nivel de daño estructural e incluso, la posición en la que se presenta este debilitamiento [15]. Por otro lado, la transformada wavelet [16] ha sido empleada para el modelado de una grieta de fatiga en una estructura plana, en el cual se realiza el Análisis Modal realizado a varios Modelos de Elementos Finitos de una armadura plana, con el objeto de detectar la presencia de una grieta transversal en uno de sus elementos, a partir del análisis de los desplazamientos nodales del primer modo a flexión por medio de la transformada de Wavelet [17].

Una alternativa paralela al estudio por medio de vibraciones es la implementación de algoritmos en visión [18] empleando Matlab, el cual permite el procesamiento de imágenes [19] con la confianza de utilizar algoritmos científicamente probados y robustos para trabajar con imágenes binarias, transformaciones geométricas, morfológicas y manipulación de color como alternativa para la identificación o detección de alteraciones estructurales [20].

Tomando en cuenta lo anterior, el presente trabajo plantea una comparación entre dos métodos no destructivos para la evaluación de discontinuidades tipo fallas y grietas en estructuras de hormigón, por medio de un analizador de vibraciones [21] y un sistema de detección autónomo mediante el procesamiento digital de imágenes [22].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

1) Estructuras de Hormigón (ver Fig. 1)

Se diseñan 5 placas como material de estudio, con las siguientes características:

- Concreto de 3000 PSI,
- Fraguado Durante 27 días
- Dimensiones 0.80 m * 0,80 m * 0,04 m
- Peso de 65 kg cada una.

2) Analizador de Vibraciones

Componentes del sistema de Análisis de Vibraciones. En el diseño y construcción del medidor se empleó un computador portátil, un sensor laser de desplazamiento MEL M70LL para la recepción de datos, con un rango de medida desde 0.5mm hasta 200mm, resolución hasta de 0.05µm, ancho de banda hasta 100kHz y opciones de salida: Analógica o digital en corriente y tensión, también ETHERNET, compatible con la Tarjeta NI USB 6001, comunicadas entre sí por medio de la unidad electrónica MEL M70LL, de manera analógica o digital, mediante el estándar RS-232. Adicionalmente, se utilizó una maleta plástica tipo pelican para albergar todos los componentes del sistema de manera práctica y portátil.

Componentes del sistema de Análisis de Vibraciones. En el diseño y construcción del medidor se empleó un computador portátil, un sensor laser de desplazamiento MEL M70LL para la recepción de datos, con un rango de

medida desde 0.5mm hasta 200mm, resolución hasta de 0.05µm, ancho de banda hasta 100kHz y opciones de salida: Analógica o digital en corriente y tensión, también ETHERNET, compatible con la Tarjeta NI USB 6001, comunicadas entre sí por medio de la unidad electrónica MEL M70LL, de manera analógica o digital, mediante el estándar RS-232. Adicionalmente, se utilizó una maleta plástica tipo pelican para albergar todos los componentes del sistema de manera práctica y portátil.

B. Equipo de Excitación

Para excitar las placas fue necesaria la utilización de la mesa de vibraciones del Laboratorio de Diseño de Máquinas de las Unidades Tecnológicas de Santander [23].

Sistema de visión Artificial. En el sistema de visión artificial, basado en técnicas de procesamiento digital de imágenes, se emplean los siguientes equipos: un computador portátil, una cámara profesional y el software Matlab para la construcción del algoritmo de procesamiento.



Fig. 1. Placa de Estudio 01.

C. Métodos

La evaluación de las discontinuidades se planteó en dos métodos como alternativa para la identificación o detección de alteraciones estructurales, así:

Metodología para el análisis de vibraciones. Para la realización de las pruebas con el analizador, cada una de las placas se seccionó en 64 cuadros del mismo tamaño, 8 filas y columnas de 10 cm cada una, acotadas con el fin de evaluar de forma específica la placa (ver Fig. 1) y generar un cartograma con el fin de evidenciar las discontinuidades.

Mediante el algoritmo procesador ON-LINE (ver Fig. 5) se adquieren y transforman los datos entregados por el sensor de desplazamiento mediante la tarjeta de adquisición de datos, la aplicación DAQ assistant comunica la tarjeta de adquisición con el software LabVIEW; seguidamente,

mediante las librerías de Matlab (Matlab script) se decodifican los datos mediante la transformada wavelet, para obtener los coeficientes de estos. Los valores obtenidos se almacenan en forma de datos de coordenadas para graficar, la cantidad de datos almacenados se toman por el sistema durante 10 segundos, luego de dar inicio a la ejecución del programa en LabVIEW.

Posteriormente, en la Fig. 3 se refleja la metodología del procesamiento de datos OFF-LINE, el cual se dividió en dos etapas: en la primera parte se emplea el software Matlab utilizando los datos obtenidos y determinando las siguientes características de: valores pico, valores de energía, valores RMS y coeficientes wavelet. La segunda fase emplea el programa Excel para realizar un análisis estadístico, calculando el promedio y la desviación de cada fila y columna, precedido por el cálculo de porcentaje de desviación sobre el promedio de cada fila para determinar el valor de cada una. Con esos datos se procede a determinar el valor numérico de cada zona. Finalmente, se normalizan los datos, el valor de cada zona se divide con el valor numérico mayor en la placa a estudiar, esto permite ponderar cada zona de 0-1, siendo el valor máximo el 100%.

Con el resultado de los datos analizados en la normalización se genera un Cartograma con ponderaciones de 0 – 0,2, con una intensidad de color Azul (Intensidad del tono muy baja); 0,21-0,4 Verde (Intensidad del tono baja); 0,41—0,6 Amarillo (Intensidad del tono media); 0,61-0,8 Terracota (Intensidad del tono alta) y 0,801 a 1 Rojo (Intensidad de tono Muy Alta). Nota: La intensidad del color aumenta de acuerdo con la posibilidad de existencia de discontinuidad tipo grieta o fisura.

Metodología para el desarrollo del Sistema de visión artificial. El Sistema de visión artificial para el procesamiento de imágenes tiene como objetivo mejorar el aspecto de las imágenes y hacer más evidentes en ellas ciertos detalles que se desea hacer notar. Un fotógrafo profesional realiza un registro fotográfico (130 fotos) con una cámara Nikon D5300 con Wi-Fi + Lente 18-55 mm 24,2 mpx.

En la Fig. 4 se evidencia el diagrama de flujo del paso a paso al que fue sometida cada una de las imágenes, desde la lectura de la imagen, tratamiento de escala de grises, filtro especial, generar los arreglos morfológicos, realizar el histograma, binarizar la imagen arreglada, calcular el área para, finalmente, entregar los resultados de la imagen tratada.

Para el diseño del algoritmo se plantea un diseño experimental, de modo que proporcione la información buscada con el menor número de experimentos. Cuando el objetivo es medir cómo influyen k factores en una identificación de discontinuidades, en imágenes mediante el procesamiento digital de imágenes en Matlab.

F1= Arreglos morfológicos (APERTURA Y CIERRE) = (square “cuadrado” Crea un elemento estructurador cuadrado cuyo ancho es w píxeles, w debe ser un entero no negativo, disk “disco” crea un elemento estructurante plano en forma de disco, donde R especifica el radio. R debe ser un entero no negativo.

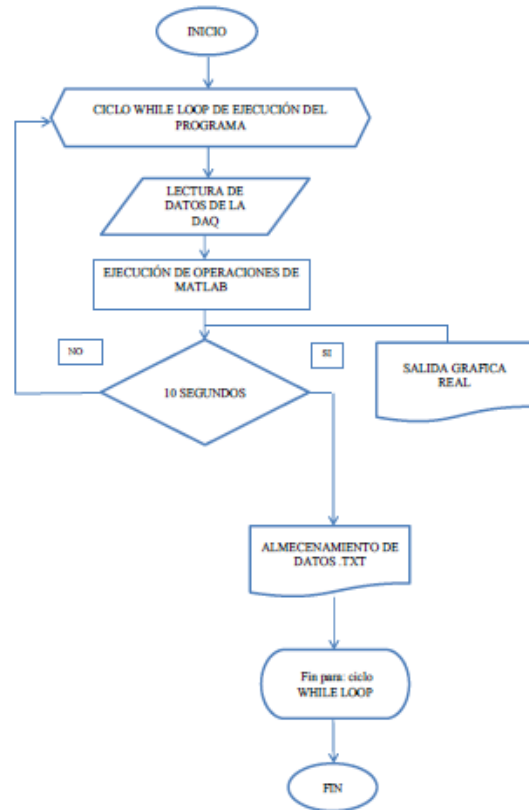


Fig. 2. Algoritmo de procesamiento ON-LINE

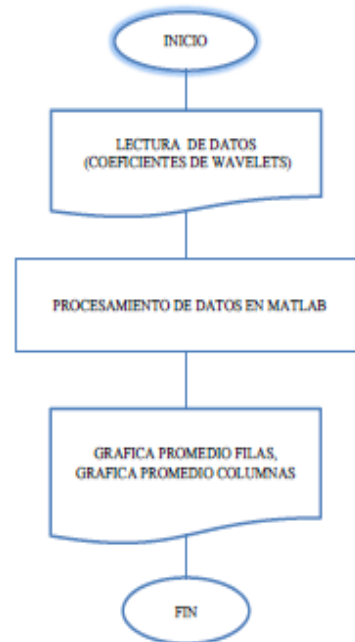


Fig. 3. Algoritmo de procesamiento OFF-LINE.

F2= Filtro espacial= (average “Promedio” Devuelve un filtro de promedio, el argumento puede ser un vector que especifique el número de filas y columnas, en cuyo caso es una matriz cuadrada, disk “Promediado circular”

Devuelve un filtro de promediado circular dentro de la matriz cuadrada del lado) crea un filtro predeterminado en dos dimensiones.

Con un diseño factorial 2^2 se estudia el efecto de dos factores considerados dos niveles en cada uno. Cada réplica de este diseño consiste en 2×2 combinaciones o tratamientos que se pueden denotar de diferentes maneras. Las pruebas que se van a hacer son de 4 ensayos por placa. $4 \times 6 = 24$ PRUEBAS

1. Y11=PRUEBA 1= PROTOTIPO (Disk, square)
2. Y21=PRUEBA 2= PROTOTIPO (Disk, disk)
3. Y12=PRUEBA 3= PROTOTIPO (Average, square)
4. Y22=PRUEBA 4= PROTOTIPO (Average, disk)

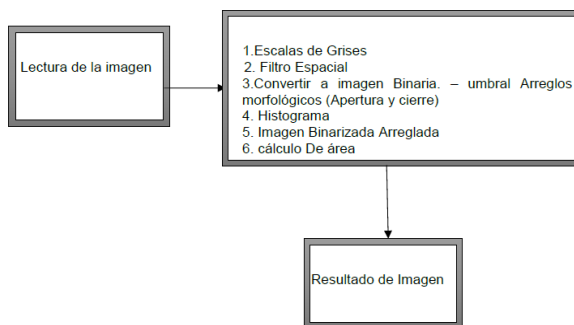


Fig. 4. Diagrama de flujo del procesamiento de imagen.

```

close all
clear all
clc

%% Leer la imagen
[a b] = uigetfile('*.jpg','All Files');
I = imread([b a]);
%I = imread('Fotos/Placa 1-7.jpg');
%% Convertir la imagen a escala de grises
Igray = rgb2gray(I);
%% Filtro Espacial Promedio
H = fspecial('average',[10 10]);
Ifilter1=imfilter(Igray,H);
imshow(Ifilter1)
%% Convertir a imagen Binaria
imgBW=im2bw(Ifilter1,0.6); %Convierte la imagen en imagen binaria
mediante el umbral.
se = strel('disk',7);
I3 = imopen(imgBW,se);
I3 = imclose(I3,se);
I3=~I3;
I4= bwareaopen(I3,5000);
[L Ne]=bwlabel(I4);
RGB = label2rgb(L,'jet','k');
caracteristicas = regionprops(I4,'Centroid','Area');
label = 1:Ne;

% Figuras
figure(1),imshow(I),title('Imagen original');
figure(2),imshow(Igray),title('Imagen en escala de grises');
figure(3),imshow(Ifilter1),title('Imagen filtrada');
figure(4),imshow(I3),title('histograma');
figure(5),imshow(I3),title('Imagen binarizada');

imhist(Ifilter1);
figure(6),imshow(RGB),hold on

prop = regionprops(I4,'Centroid','Area','BoundingBox','PixelIdxList',
'PixelList');
areas=[prop.Area]';

for cnt=1:length(prop)

text(prop(cnt).Centroid(1),prop(cnt).Centroid(2),num2str(label(cnt)),'Font
Size',15,'color','white');
end
  
```

Fig. 5. Algoritmo Sistema Artificial de Visión.

Se realizan 4 prototipos resultado del diseño Experimental, para elegir el mejor y así facilitar la identificación de la grieta; adicionalmente, nos arroja el área de las grietas de las placas de hormigón. Se tuvieron en cuenta los Arreglos morfológicos y el filtrado espacial como resultado del diseño experimental. En la Fig. 6 se puede ver el ejemplo del prototipo 1 algoritmo para el Sistema artificial de visión en Matlab.

Se realiza una serie de inspecciones a cada placa y se obtuvo un total de 320 perfiles gráficos mediante el escaneo, 64 por placa. En la Fig. 7 se observan los puntos capturados con el escaneo al evaluar una zona específica, procesada previamente por los valores RMS, para la placa 01, de igual manera la Fig. 8 refleja el mismo proceso para la placa 02, a su vez la Fig. 9 evidencia el resultado de la placa 03, la Fig. 10 corresponde a la placa 04 y finalmente la Fig. 11 a la placa 05.

III. PRUEBAS Y RESULTADO

A. Analizador de vibración

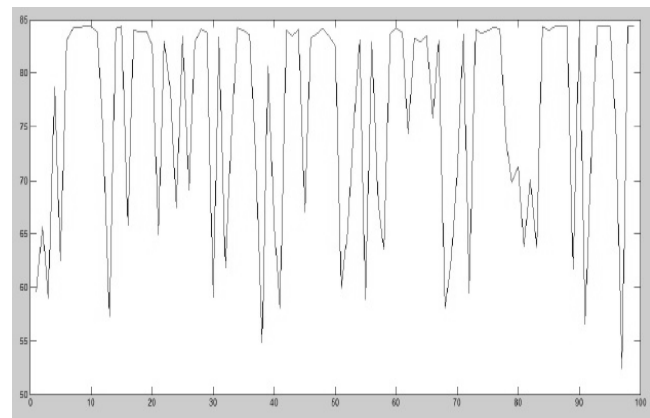


Fig. 6. Captura de zona escáner.

Los datos de cada zona escaneada se procesan en el software Matlab para calcular los valores de las características de valores pico, RMS, energía y coeficientes de wavelet, para ser nuevamente tratados en una hoja de cálculo de Excel, con el fin de realizar el proceso de normalización por medio de un cartograma, facilitando el reconocimiento de las zonas con presencia de grietas y fisuras en las placas de hormigón.

En la Fig.12 se observan los puntos capturados al escanear una zona específica, procesada previamente por las Características Promedio de Coeficiente de Wavelets para la placa 01, de igual manera en la Fig.13 se refleja el mismo proceso para la placa 02, a su vez la Fig.14 evidencia el resultado de la placa 03, la Fig.15 corresponde a la placa 04 y finalmente la Fig.16 a la placa 05.

En la Fig.17 se observan los puntos capturados al escanear cada zona específica de la placa 01, procesada previamente por las Característica Valores pico, de igual manera en la Fig.18 se refleja el mismo proceso para la placa 02, a su vez la Fig.19 evidencia el resultado de la

placa 03, la Fig.20 corresponde a la placa 04 y finalmente la Fig. 21 a la placa 05, al igual que en las dos figuras anteriores, salvo que en esta normalización la variación en la intensidad de color es muy baja.

Y, por último, en las figuras 22, 23, 24, 25 y 26 en el mismo orden presentado en los casos de las características anteriores, se observan los resultados del proceso de normalización efectuado en las 5 placas con la Característica de Energía. Como en las figuras de la 7 a la 21, se refleja a su vez una variación en el cartograma visualmente permisible, gracias al cambio de intensidad de color a diferencia de las figuras reflejadas a continuación (22-26), la variación es diferente a las anteriores reflejando una variabilidad en los tonos de intensidad.

0,50775962	0,47363881	0,40380483	0,53993922	0,35637364	0,3223785	0,37077582	0,4679219
0,70802592	0,59083236	0,4973186	0,51862891	0,43750127	0,37993989	0,37535785	0,42163887
0,63235303	0,61159269	0,55445565	0,53654228	0,48702177	0,43348083	0,40441934	0,41302961
0,49012117	0,55085693	0,55265629	0,54459928	0,51581053	0,47464568	0,43953251	0,42628106
0,57751558	0,56418626	0,55842127	0,55151028	0,5336604	0,50415304	0,47184278	0,44906192
0,55120052	0,55769339	0,55805733	0,5547838	0,5442221	0,52418757	0,49801517	0,47353855
0,57488317	0,56628828	0,5621728	0,5584783	0,5513502	0,53776889	0,51789203	0,49571529
0,44555987	0,50592407	0,53404844	0,54626337	0,54880679	0,54328784	0,53058993	0,51315261

Fig. 7. Cartograma Característica RMS placa 01.

0,13459512	0,26333154	0,46192085	0,34143266	0,36688933	0,08616088	0,17069306	0,33935489
0,26878189	0,30373974	0,50232905	0,47561943	0,50107611	0,22034766	0,30487984	0,30386422
0,12378632	0,15874417	0,35733348	0,33062386	0,35608054	0,07535209	0,15988427	0,15886865
0,22837369	0,26333154	0,46192085	0,43521123	0,46066791	0,17993946	0,26447164	0,26345602
0,21411669	0,24907455	0,44766385	0,42095424	0,44641091	0,16568246	0,25021464	0,24919903
0,27416709	0,30912494	0,50771425	0,48100463	0,50646131	0,22573286	0,31026504	0,30924942
0,23630665	0,2712645	0,46985381	0,44314419	0,46860087	0,18787242	0,2724046	0,27138898
0,17308748	0,20802533	0,40661464	0,37990502	0,4053617	0,12463325	0,20916543	0,20814981

Fig. 8. Cartograma Característica RMS placa 02.

0,55003618	0,51513533	0,33946192	0,60276438	0,38912466	0,49795714	0,29273783	0,33066226
0,79839293	0,76349209	0,58781867	0,85112113	0,63748142	0,74631389	0,54109458	0,57901901
0,57736471	0,54246386	0,36679045	0,63009291	0,41645319	0,52528566	0,32006636	0,47473179
0,61364414	0,57874329	0,40306988	0,66637234	0,45273262	0,56156509	0,35634579	0,39427021
0,63019994	0,59529909	0,41962568	0,68292813	0,46928842	0,57812089	0,37290159	0,41082601
0,64800867	0,61310783	0,43743442	0,70073687	0,48709716	0,59592963	0,39071033	0,42863475
0,9472718	0,91237095	0,73669754	1	0,78636028	0,89519276	0,68997345	0,72789788

Fig. 9. Cartograma Característica RMS placa 03.

0,10892671	0,10892671	0,10217339	0,13475333	0,16811854	0,09564461	0,11584871	0,13374447
0,11973084	0,11973084	0,11297753	0,14555747	0,17892268	0,10644875	0,12665285	0,14454884
0,12601765	0,12601765	0,11926434	0,15184428	0,18520949	0,11273555	0,13293965	0,15083564
0,09882989	0,09882989	0,09207658	0,12465652	0,15802173	0,08554779	0,10575189	0,12364788
0,06757502	0,08436	0,06082171	0,09340165	0,12676686	0,05429292	0,07449702	0,09239301
0,11605579	0,11605579	0,10930247	0,14188241	0,17524762	0,10277369	0,12297779	0,14087378
0,09760952	0,09760952	0,09085621	0,12343615	0,15680136	0,08432743	0,10453153	0,12242752
0,10586357	0,10586357	0,09911026	0,1316902	0,16505541	0,09258148	0,11278558	0,13068157

Fig. 10. Cartograma Característica RMS placa 04.

0,14517705	0,13966854	0,13419492	0,15245155	0,14979211	0,14557259	0,12459486	0,14266419
0,13300131	0,12749279	0,12201918	0,14027581	0,13761637	0,13339685	0,11241912	0,13048845
0,13078743	0,12527892	0,1198053	0,13806193	0,13540249	0,13118298	0,11020524	0,12827457
0,1425211	0,13701258	0,13153896	0,1497956	0,14713615	0,14291664	0,1219389	0,14000824
0,12198079	0,117446	0,11099865	0,12925529	0,12659584	0,12237633	0,10139859	0,11946792
0,13707424	0,13156572	0,12609211	0,14434874	0,14168929	0,13746978	0,11649205	0,13456138
0,12427028	0,11876176	0,11328815	0,13154478	0,12888534	0,12466582	0,10368809	0,12175742

Fig. 11. Cartograma Característica RMS placa 05.

0,52119234	0,50242415	0,42993251	0,60207265	0,39586812	0,36050408	0,28429123	0,42167278
0,72999082	0,61620748	0,52307	0,56257132	0,47921972	0,4198619	0,35207656	0,38687466
0,68520661	0,65070705	0,58688852	0,57472992	0,52697482	0,47341836	0,41274746	0,39981106
0,50969006	0,58019855	0,58354354	0,57913673	0,55305578	0,51323707	0,46299227	0,43140166
0,55815959	0,56917907	0,57636131	0,57774902	0,5654024	0,53931973	0,501156	0,46627883
0,55535047	0,56226477	0,56931304	0,57353103	0,56946671	0,55439322	0,52777461	0,49702672
0,57052385	0,56639431	0,56785367	0,57069235	0,57007953	0,56223638	0,54500549	0,52101611
0,45721497	0,51180464	0,53982916	0,55526075	0,56267014	0,56245326	0,55372938	0,53737274

Fig. 12. Cartograma Característica Coeficiente de Wavelet placa 01

0,17382626	0,37564748	0,37491325	0,25142605	0,23678434	0,19983225	0,20637347	0,42087569
0,29951748	0,42002152	0,41928729	0,37731727	0,38267557	0,32572347	0,33226489	0,33632907
0,13769797	0,25820201	0,25746778	0,21549776	0,20085606	0,16390396	0,17044518	0,17450956
0,25514344	0,37564748	0,37491325	0,33294323	0,31830153	0,28134944	0,28789065	0,29195503
0,2435149	0,36401894	0,36328471	0,32131469	0,30667298	0,26972089	0,27626211	0,28032649
0,35753855	0,47804259	0,47730836	0,43533834	0,42069663	0,38374454	0,39028576	0,39435014
0,35881338	0,47931742	0,47858319	0,43661317	0,42197146	0,38501937	0,39156059	0,39562497
0,30780221	0,48852359	0,48742246	0,4244795	0,40252116	0,34710366	0,3569136	0,363009

Fig. 13. Cartograma Característica Coeficiente de Wavelet placa 02.

0,52550946	0,36686503	0,64565881	0,66679461	0,42229617	0,53300851	0,45595581	0,33106954
0,84587316	0,68722873	0,96602251	0,98715831	0,74265987	0,85337222	0,77631951	0,65143324
0,56688919	0,40824476	0,68703854	0,70817434	0,4636759	0,57438824	0,49733554	0,5343159
0,62425485	0,46561042	0,7444042	0,76554	0,52104156	0,6317539	0,55470119	0,42981493
0,62767239	0,46902796	0,74782174	0,76895753	0,5244591	0,63517144	0,55811873	0,43323247
0,65939408	0,50074965	0,77954343	0,80067922	0,55618079	0,66689313	0,58984042	0,46495416
0,85871485	0,70007042	0,9788642	1	0,75550156	0,86621391	0,7891612	0,66427493
0,70246501	0,54382058	0,82261436	0,84375016	0,59925172	0,70996407	0,63291136	0,50802509

Fig. 14. Cartograma Característica Coeficiente de Wavelet placa 03.

0,15094078	0,18282341	0,13394844	0,17838678	0,18822242	0,12592575	0,16473637	0,16969209
0,16394875	0,19583138	0,14695641	0,19139475	0,20123039	0,13893372	0,17774434	0,18270007
0,15670854	0,18859117	0,1397162	0,18415453	0,19399017	0,1316935	0,17050413	0,17545985
0,1377041	0,16958674	0,12071176	0,1651501	0,17498574	0,11268907	0,15149969	0,15645542
0,08894734	0,12707441	0,071955	0,11639333	0,12622897	0,0639323	0,10274293	0,10769865
0,1512954	0,18317804	0,13430306	0,1787414	0,18857704	0,12628037	0,16509099	0,17004672
0,13124252	0,16312515	0,11425018	0,15868851	0,16852415	0,10622748	0,14503811	0,14999383
0,14079934	0,17268198	0,123807	0,16824534	0,17808098	0,11578431	0,15459493	0,15955066

Fig. 15. Cartograma Característica Coeficiente de Wavelet placa 04.

0,18268336	0,17582604	0,17349016	0,16838667	0,17719185	0,16743459	0,14490834	0,16470425
0,18509505	0,17823773	0,17590185	0,17079836	0,17960354	0,16984628	0,14732003	0,16711594
0,16755536	0,16069804	0,15836216	0,15325867	0,16206385	0,15230659	0,12978034	0,14957625
0,18405174	0,17719442	0,17485854	0,16975505	0,17856023	0,16880297	0,14627672	0,16607263
0,1646657	0,15932773	0,15547225	0,15036901	0,15917419	0,14941693	0,12689068	0,14668659
0,17383321	0,16697589	0,16464001	0,15953652	0,1683417	0,15858444	0,13605819	0,1558541
0,17609072	0,1692334	0,16689751	0,16179403	0,17059921	0,16084195	0,1383157	0,15811161
0,17942109	0,17256377	0,17022788	0,1651244	0,17392958	0,16417232	0,14164607	0,16144198

Fig. 16. Cartograma Característica Coeficiente de Wavelet placa 05.

0,07507475	0,03868708	0,02585372	0,01970161	0,01877966	0,01310208	0,01127102	0,02981893
0,10581875	0,07226322	0,04905347	0,03437754	0,0265786	0,01984034	0,01555568	0,0226873
0,06397163	0,06811242	0,05850295	0,04648024	0,03652942	0,02818488	0,02187028	0,02227879
0,03851846	0,05331544	0,05594919	0,05121472	0,04387207	0,03602847	0,02894938	0,02581408
0,20400052	0,1286798	0,09230359	0,07175915	0,05781581	0,04692204	0,03793571	0,0317749
0,10911644	0,1188721	0,1055954	0,08867728	0,07324644	0,06008424	0,04900998	0,04039244
0,07708209	0,09798465	0,10179003	0,09523365	0,08424005	0,07216215	0,06058606	0,05048925
0,04174219	0,06986342	0,08582672	0,09053019	0,08738512	0,07977363	0,07017985	0,06033455

Fig. 17. Cartograma Característica de Valores pico placa 01.

0,02118093	0,01702172	0,00907577	0,02519942	0,02662928	0,01611952	0,02371991	0,03305019
0,01837294	0,01421373	0,01384954	0,02239144	0,0238213	0,01331154	0,02091192	0,01371711
0,01264937	0,00849017	0,00812598	0,01666787	0,01809773	0,00758797	0,01518835	0,00799354
0,01359916	0,00943996	0,00907577	0,01761766	0,01904752	0,00853776	0,01613814	0,00894333
0,02437379	0,02021458	0,01985039	0,02839229	0,02982215	0,01931239	0,02691277	0,01971796
0,02538773	0,02122852	0,02086433	0,02940623	0,03083608	0,02032632	0,02792671	0,0207319
0,02421653	0,02005732	0,01969313	0,02823503	0,02966488	0,01915512	0,02675551	0,0195607
0,01336534	0,00920613	0,00884194	0,01738384	0,01881369	0,00830393	0,01590432	0,00870951

Fig. 18. Cartograma Característica de Valores pico placa 02.

0,03962836	0,02513942	0,02397029	0,51802634	0,02712797	0,01940343	0,05012778	0,01822603
0,21748523	0,20299629	0,20182715	0,69588321	0,20498484	0,1972603	0,22798465	0,19608289
0,03371235	0,01922341	0,01805428	0,51211033	0,02121196	0,01348742	0,04421177	0,1083029
0,03274187	0,01825293	0,01708379	0,51113985	0,02024148	0,01251694	0,04324129	0,01133953
0,03667553	0,02218658	0,02101745	0,51507351	0,02417514	0,0164506	0,04717495	0,01527319
0,0353243	0,02083536	0,01966623	0,51372228	0,02282392	0,01509938	0,04582372	0,01392197
0,52160202	0,50711307	0,50594394	1	0,50910163	0,50137709	0,53210144	0,50019968
0,02973524	0,01524629	0,01407716	0,50813322	0,01723485	0,00951031	0,04023465	0,0083329

Fig. 19. Cartograma Característica de Valores pico placa 03.

0,00526419	0,00443649	0,0045503	0,00470963	0,00494346	0,00404126	0,00427509	0,00506554
0,00499726	0,00416956	0,00428336	0,0044427	0,00467652	0,00377433	0,00400815	0,00479861
0,00454202	0,00371432	0,00382813	0,00398746	0,00422129	0,00331909	0,00355292	0,00434337
0,00551457	0,00468687	0,00480068	0,00496001	0,00519384	0,00429164	0,00452547	0,00531592
0,00496208	0,0041768	0,00424819	0,00440752	0,00464135	0,00373915	0,00397298	0,00476343
0,00565114	0,00482344	0,00493725	0,00509658	0,00533041	0,00442821	0,00466204	0,0054525
0,00600913	0,00518142	0,00529523	0,00545456	0,00568839	0,00478619	0,00502002	0,00581048
0,00493518	0,00410748	0,00422129	0,00438062	0,00461445	0,00371225	0,00394608	0,00473653

Fig. 20. Cartograma Característica de Valores pico placa 04.

0,00410748	0,00565321	0,00526419	0,00399367	0,00436407	0,00477585	0,00423991	0,00503037
0,00413645	0,00568218	0,00529316	0,00402264	0,00439303	0,00480482	0,00426888	0,00505934
0,00292179	0,00446753	0,00407851	0,00280798	0,00317838	0,00359016	0,00305422	0,00384468
0,004631	0,00617674	0,00578771	0,00451719	0,00488759	0,00529937	0,00476343	0,00555389
0,00410955	0,005378	0,00526626	0,00399574	0,00436613	0,00477792	0,00424198	0,00503244
0,0026114	0,00451714	0,00376812	0,00249759	0,00286799	0,00327977	0,00274384	0,00353429
0,00395021	0,00549595	0,00510693	0,0038364	0,0042068	0,00461858	0,00408265	0,0048731
0,00415507	0,00570081	0,00531179	0,00404126	0,00441166	0,00482344	0,0042875	0,00507796

Fig. 21. Cartograma Característica de Valores pico placa 05.

0,46417622	0,444692	0,34404478	0,34613259	0,36329576	0,56679691	0,46371058	0,42741351
0,60387976	0,52428088	0,43416283	0,39014771	0,37672173	0,47175932	0,46773495	0,44757423
0,72600308	0,62514198	0,52965241	0,45990006	0,4183109	0,44503511	0,45638503	0,45197963
0,46932293	0,54723246	0,53844243	0,49917124	0,45874107	0,45188809	0,45413658	0,45305809
0,43489616	0,49106431	0,51475337	0,50696231	0,48285169	0,46736989	0,46075322	0,45690566
0,38948345	0,44027388	0,47751362	0,49223796	0,48754483	0,47745736	0,46910529	0,46300547
0,3867429	0,41350839	0,44551101	0,46887449	0,47820966	0,47783351	0,4734694	0,46823744
0,32911309	0,37131074	0,40841087	0,43864268	0,45842617	0,46812984	0,47079962	0,46951853

Fig. 22. Cartograma Característica de Energía placa 01

0,39633806	0,29284812	0,42788389	0,65720564	0,51427378	0,49774142	0,47063567	0,39772535
0,29406341	0,33490484	0,46994062	0,55493099	0,41199913	0,39546677	0,36836102	0,39772535
0,19993205	0,24077348	0,37580925	0,46079963	0,31786776	0,30133541	0,27422966	0,30359399
0,25200668	0,29284812	0,42788389	0,51287427	0,3699424	0,35341005	0,3263043	0,35566863
0,24117811	0,28201954	0,41705531	0,50204569	0,35911383	0,34258147	0,31547572	0,34484005
0,2103043	0,25114574	0,38818151	0,47117188	0,32824002	0,31170767	0,28460192	0,31396624
0,26360081	0,30444225	0,43947802	0,52446839	0,38153653	0,36500417	0,33789842	0,36726275
0,0920993	0,13294074	0,26797951	0,35296889	0,21003502	0,19350267	0,16639692	0,19576124

Fig. 23. Cartograma Característica de Energía placa 02

0,34881065	0,28354688	0,26227649	0,44595063	0,28264458	0,36239971	0,26452238	0,25794168
0,37094622	0,30568244	0,28441206	0,4680862	0,30478014	0,38453528	0,28665794	0,28007724
0,35587587	0,2906121	0,26934171	0,45301585	0,2897098	0,36946493	0,2715876	0,27432999
0,39064368	0,32537991	0,30410952	0,48778366	0,3244776	0,40423274	0,30635541	0,29977471
0,39714355	0,33187978	0,31060939	0,49428353	0,33097748	0,41073261	0,31285528	0,30627458
0,41456364	0,34929987	0,32802948	0,51170362	0,34839757	0,4281527	0,33027537	0,32369467
0,57431735	0,50905358	0,48778319	0,67145733	0,50815127	0,58790641	0,49002908	0,48344838
0,43883889	0,37357511	0,35230473	0,53597887	0,37267281	0,45242795	0,35455062	0,34796991

Fig. 24 Cartograma Característica de Energía placa 03

0,83604541	0,81581925	0,55431555	0,82837067	0,66905401	0,66698294	0,9110644	0,6655594
0,61452764	0,59430149	0,26740646	0,6068529	0,44753624	0,44546517	0,68954663	0,4440417
0,55889784	0,53867168	0,21177665	0,55122309	0,39190643	0,38983537	0,63391682	0,3884118
0,80948339	0,78925724	0,46236221	0,80180865	0,64249199	0,64042092	0,88450238	0,6389974
0,54703396	0,47573204	0,19991278	0,53935921	0,38004256	0,37797149	0,62205295	0,3765480
0,56374396	0,5435178	0,21662277	0,55606921	0,39675255	0,39468149	0,63876294	0,3932580
0,69862888	0,67840272	0,35150769	0,69095413	0,53163747	0,52956641	0,77364786	0,5281429
0,68668041	0,66645425	0,33955922	0,67900566	0,51968901	0,51761794	0,76169939	0,5161944

Fig. 25. Cartograma Característica de Energía placa 04.

0,93049211	0,88203233	0,79340454	0,66816252	0,79841514	0,71266298	0,6658029	0,6704389
0,69072291	0,64226313	0,55363534	0,42839332	0,55864594	0,47289378	0,4260337	0,4306697
0,72287263	0,67441285	0,58578506	0,46054304	0,59079566	0,57259069	0,45818342	0,4628194
0,77920501	0,73074523	0,64211744	0,51687542	0,64712804	0,56137588	0,5145158	0,5191518
0,61410281	0,50957522	0,47701524	0,35177321	0,48202584	0,39627368	0,3494136	0,3540496
0,63959287	0,59113309	0,5025053	0,37726328	0,5075159	0,42176374	0,37490366	0,3795397
0,90251414	0,85405435	0,76542656	0,64018454	0,77043717	0,684685	0,63782492	0,6424609
0,82591189	0,7774521	0,68882432	0,56358229	0,69383492	0,60808276	0,56122268	0,5658587

Fig. 26. Cartograma Característica de Energía placa 05.

B. Sistema artificial de visión

Se realizaron 4 prototipos, resultado del diseño experimental, para elegir el más acertado y facilitar la identificación de la discontinuidad del arreglo morfológico y el filtrado espacial, como resultado del diseño experimental.

Por otro lado, dando paso al tratamiento de imágenes, la Fig. 27 se evidencia el tratamiento de imagen realizado a la placa 3 con el prototipo de algoritmo 1. A su vez, la Fig. 28 refleja el tratamiento de imagen realizado a la placa 3 con el prototipo de algoritmo 2. Además, en la Fig. 29 se evidencia el tratamiento de imagen realizado a la placa 3 con el prototipo de algoritmo 3. Finalmente, en la Fig. 30 se evidencia el tratamiento de imagen realizado a la placa 3 con el prototipo de algoritmo 2.

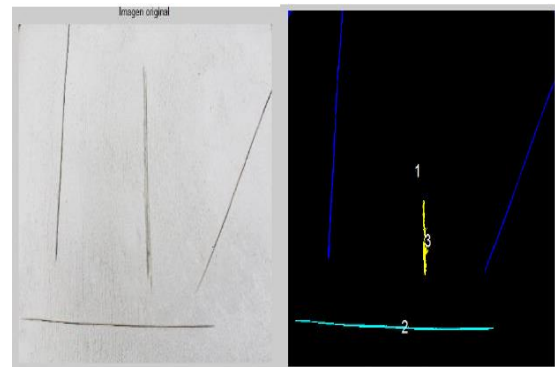


Fig. 27. Tratamiento de imagen placa 3 algoritmo 1.

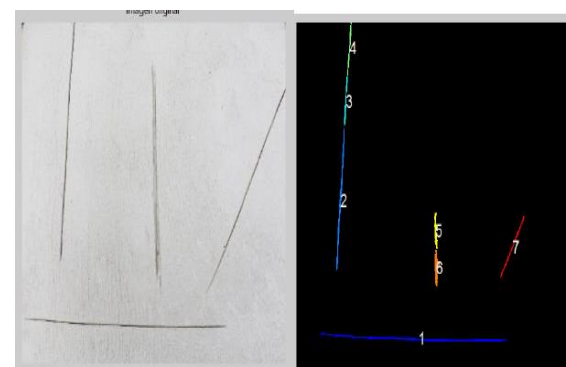


Fig. 28. Tratamiento de imagen placa 3 algoritmo 2.

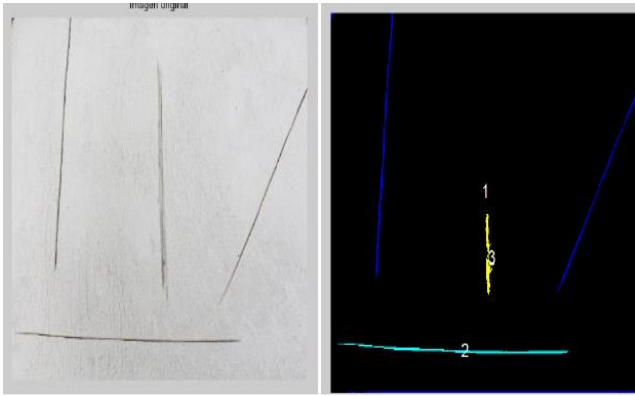


Fig. 29. Tratamiento de imagen placa 3 algoritmo 3

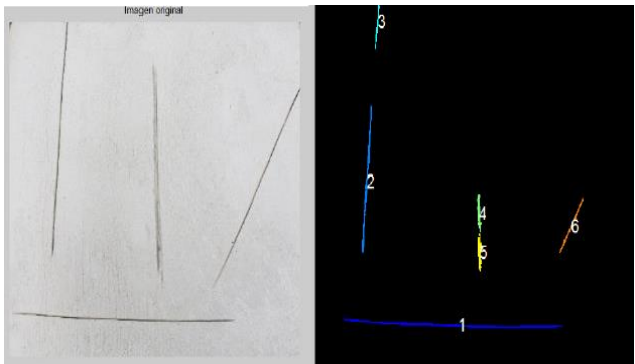


Fig. 30. Tratamiento de imagen placa 3 algoritmo 4.

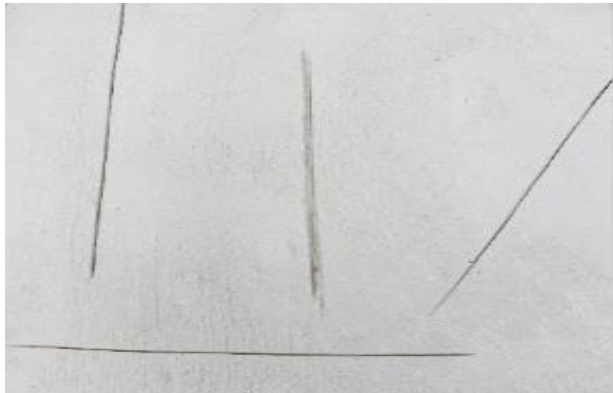


Fig. 31. Placa 03 original para comparación con el Sistema de visión artificial y el analizador de vibraciones

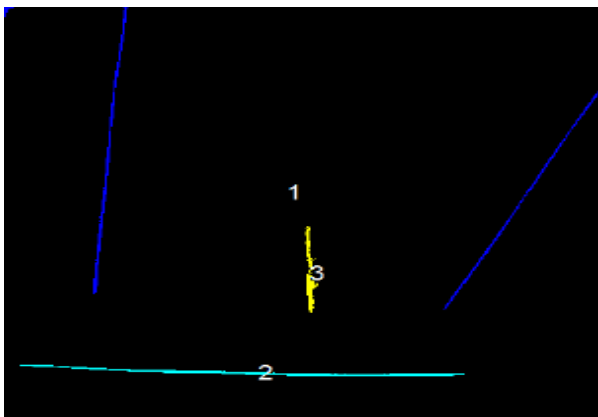


Fig. 32. Resultado sistema de visión artificial de la Placa 03 para comparación con la inspección visual y el analizador de vibraciones.

0,55003618	0,51513533	0,33946192	0,60276438	0,38912466	0,49795714	0,29273783	0,33066226
0,79839293	0,76349209	0,58781867	0,85112113	0,63748142	0,74631389	0,54109458	0,57901901
0,57736471	0,54246386	0,36679045	0,63009291	0,41645319	0,52528566	0,32006636	0,47473179
0,61364414	0,57874329	0,40306988	0,66637234	0,45273262	0,56156509	0,35634579	0,39427021
0,63019994	0,59529909	0,41962568	0,68292813	0,46928842	0,57812089	0,37290159	0,41082601
0,64800867	0,61310783	0,43743442	0,70073687	0,48709716	0,59592963	0,39071033	0,42863475
0,94727118	0,91237095	0,73669754	1	0,78636028	0,89519276	0,68997345	0,72789788

Fig. 33. Resultado del analizador de vibraciones de la Placa 03 para comparación con la inspección visual y el sistema de visión artificial.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para realizar una interpretación de los resultados obtenidos en las inspecciones, se efectúa una comparación entre los datos obtenidos por medio del analizador de vibraciones y un sistema de visión artificial en la placa 3, que es la que visualmente presenta mayor afectación por discontinuidades. En las figuras 7, 8, 9, 10 y 11 se encuentran los cartogramas de las 05 placas estudiadas basadas en la característica RMS; el cartograma representativo de la placa 03 presenta un aumento de color (Mayor intensidad) en la zona horizontal y vertical de toda la placa; si se observan las figuras 27, 28, 29 y 30 referentes a los 04 prototipos de resultado final de tratamiento de imagen por medio del sistema de visión artificial, se evidencian claramente unas discontinuidades, tanto horizontales como verticales. Las figuras 31, 32 y 33 refleja mejor la comparativa entre el prototipo 1 de algoritmo que es el de mejor resolución al momento de efectuar el tratamiento de imágenes de los 4 aplicados, la inspección visual y el resultado final del analizador de vibración. Por un lado, las placas 01 y 02 presentan un comportamiento similar en las zonas de discontinuidades entre el resultado final del sistema de visión artificial y el analizador de vibraciones, por otro lado, las placas 04 y 05 visualmente no presentan ninguna discontinuidad, lo que se evidencia tanto en el tratamiento de imágenes como en los cartogramas.

A su vez, los resultados de la comparativa para los valores promedio de coeficientes de wavelet presentan similitud con las características RMS en cada una de las 05 placas, evidenciando discontinuidades en las placas 01, 02 y 03, en las mismas zonas detectadas en las imágenes tratadas con el sistema de visión artificial, y ninguna discontinuidad en las placas 04 y 05.

Con las características de los valores pico, la similitud con los valores RMS y Coeficientes de wavelet son mínimos en cada una de las 05 placas, evidenciando pocas discontinuidades en las placas 01, 02 y 03, y ninguna discontinuidad en las placas 04 y 05, las cuales se reflejan

claramente en las zonas detectadas en las imágenes tratadas con el sistema de visión artificial.

Finalmente, la característica de Energía no tiene ninguna similitud con las discontinuidades detectadas en las placas 01, 02 y 03, las cuales se reflejan claramente en las zonas detectadas en las imágenes tratadas con el sistema de visión artificial, y ninguna discontinuidad en las placas 04 y 05.

V. CONCLUSIONES

La normalización realizada con los datos de las características RMS y promedios de coeficientes de Wavelets entregados por el analizador de vibración, reflejan en el cartograma las zonas de discontinuidades por fallas tipo grietas y fisuras que, al momento de ser corroboradas por el sistema de visión artificial, basado en el tratamiento de imágenes, evidencia de forma clara cada una de las zonas afectadas, coincidiendo con las mismas zonas detectadas por el analizador.

Los datos de las características Valores pico y Energía de Wavelets entregados por el analizador de vibración y posteriormente normalizados, No reflejan claramente en el cartograma las zonas de discontinuidades por fallas tipo grietas y fisuras, tampoco hay similitud con los resultados obtenidos con las características RMS y valores promedio de coeficientes de wavelets y los resultados del sistema de visión artificial.

La característica RMS y PROMEDIO CW, efectivamente, sirven para evaluar por medio del análisis de vibraciones, Fisuras y grietas en estructuras de hormigón; sus valores y cartogramas son similares y corresponden a los sitios en los cuales se evidencia alguna discontinuidad con el sistema artificial visual.

Por otro lado, se descartan las características de ENERGÍA y VALORES PICO, ya que en el estudio realizado no se evidencian con claridad los lugares afectados, su cartograma es confuso y no tiene precisión con los sitios en los cuales se evidencia alguna discontinuidad con el sistema artificial visual.

Se recomienda desarrollar estudios con diferentes diseños geométricos de estructuras de hormigón, que permitan realizar un análisis más detallado de la tipología de discontinuidades tipo falla y grietas, utilizando en ensayos no destructivos diferentes al análisis de vibración y al tratamiento de imágenes, para permitir una comparación amplia y una revisión crítica sobre los diferentes métodos enfocados en la prevención en términos de salud estructural.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen las contribuciones de J. Marín y D. Marín en el proyecto de “Diseño y construcción de un analizador de vibraciones para la detección de grietas y fisuras en estructuras de hormigón”, el cual fue base para el desarrollo del artículo. Agradecen también a M. L. Ríos y J. C. Triana por su contribución intelectual en el proyecto titulado “Detección de discontinuidades superficiales en

placas planas de hormigón mediante ensayos no destructivos a través de procesamiento digital de imágenes en Matlab”, el cual fue el soporte para corroborar los datos obtenidos con el proyecto anterior.

REFERENCIAS

- [1] Sliseris, J. «Numerical analysis of reinforced concrete structures with oriented steel fibers and re-bars,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 194, pp. 337-349, 2018.
- [2] Zhang, H. «Durability reliability analysis for corroding concrete structures under uncertainty,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 101, pp. 26-37, 2018.
- [3] Mohana A. y Poobal, S. «Crack detection using image processing: A critical review and analysis,» *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, pp. 787-798, 2018.
- [4] Mourlas, C.; Markou, G. y Papadarakakis, M. «Accurate and computationally efficient nonlinear static and dynamic analysis of reinforced concrete structures considering damage factors,» *Engineering Structures*, vol. 178, pp. 258-285, 2019.
- [5] Kim, H.; Ahn, E.; Cho, S.; Shin, M. y Sim, S.-H. «Comparative analysis of image binarization methods for crack identification in concrete structures,» *Cement and Concrete Research*, vol. 2017, pp. 53-61, 2017.
- [6] Mancilla, T. y Gomez, R. *Deteccion de discontinuidades superficiales en placas planas de hormigon mediante ensayos no destructivos a traves de procesamiento de imagenes en matlab*, Bucaramanga, 2017.
- [7] Marin, J.; Marin, D. y Tarazona, B. *Diseño y construccion de un analizador de vibraciones para la deteccion de grietas y fisuras en estructuras de hormigon*, Bucaramanga, 2015.
- [8] J. Hernandez, F. Niño y J. P. Parra, *Diseño y construccion de una mesa de vibraciones en tres ejes para el Laboratorio de Diseño de Maquinas de las Unidades tecnologicas de Santander*, Bucaramanga, 2015.
- [9] Peng, J.-L.; Ho, C.-M. Chang, Y.-P. y Chan, S.-L. «Study on collapse of steel-reinforced concrete structure caused by self-weight during construction,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 156, pp. 276-286, 2018.
- [10] Kuang, K. y Goh, T. «Crack sensing and healing in concrete beams based on wire-crack sensors and healing tube,» *Construction and Building Materials*, vol. 132, pp. 395-411, 2017.
- [11] Freeseaman, K.; Khazanovich, L. y Hoegh, K. «Nondestructive analysis techniques for freeze-thaw damage detection in concrete slabs using shear waves,» *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2018.
- [12] Sichani, M. E.; Padgett, J. E. y Bisadi, V. «Probabilistic seismic analysis of concrete dry cask structures,» *Structural Safety*, vol. 73, pp. 87-98, 2018.
- [13] Fabela Gallegos, M. d. J.; Lozano Guzman, A. y Guzman, A. H. «Alguna investigacion recientes sobre el proceso de cortes de pavimentos,» *SCT*, vol. 114, 1999.
- [14] Matienzo y Rodriguez, J. «Deteccopm de ña ´resemcoa de grietas cerradas en elemento tipo viga mediante la transformada de wavelet,» *Ingenieria Mecanica*, vol. 11, pp. 41-47, 2008.
- [15] Jassas, M. R.; Bidgoli, M. R. y Kolahchi, R. «Forced vibration analysis of concrete slabs reinforced by agglomerated SiO₂ nanoparticles based on numerical methods,» *Construction and Building Materials*, vol. 211, pp. 796-806, 2019.
- [16] Usman Hanif, M.; Ibrahim, Z.; et. al «Damage assessment of reinforced concrete structures using a model-based nonlinear approach – A comprehensive review,» *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 846-865, 2018.
- [17] Cardenas, P.; Flores, J. y Lopez, J. *Diseño de un sistema de reconocimiento de placas utilizando Matlab*, Mexico, 2009.
- [18] Fletcher, P. y Sangwine, S. «The development of the quaternion wavelet transform,» *Signal Processing*, vol. 136, pp. 2-15, 2017.

- [19] Blaney, S. y Gupta, R. «Sounding of subsurface concrete defects using frequency response of flexural vibration.» *Cement and Concrete Composites*, vol. 92, pp. 155-164, 2018.
- [20] Shatilov, A. y Lyapin, Y. «Vibration-based Damage Detection of the Reinforced Concrete Column.» *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 1867-1871, 2016.
- [21] Wang, Y.; Li, X.; Li, J.; Wang, Q.; Xu, B. y Deng, J. «Debonding damage detection of the CFRP-concrete interface based on piezoelectric ceramics by the wave-based method.» *Construction and Building Materials*, vol. 210, pp. 514-524, 2019.
- [22] Yang, Yuan-Sen, C.-I. Wu, Hsu, T.; Yang, H.-C.; Lu, H.-J.; Chan y Chang-Ching, «Image analysis method for crack distribution and width estimation for reinforced concrete structures.» *Automation in Construction*, vol. 91, pp. 120-132, 2018.
- [23] Instituto Mexicano de Transporte, *Evaluacion de puentes mediante el analisis de vibraciones*, Queretaro, 1999.

Brayan E. Tarazona R. nació en Floridablanca, Santander, el 21 de agosto de 1992. Tecnólogo electromecánico de las Unidades Tecnológicas de Santander, Ingeniero Electromecánico de las Unidades Tecnológicas de Santander y Master en Energías Renovables y eficiencia energética de la Universidad a Distancia de Madrid. Docente de las Unidades Tecnológicas de Santander, adscrito a la Coordinación de Electromecánica, al semillero Evolución Tecnológica EVOTEC y al Grupo de Investigación en Sistemas de Energías, Automatización y Control GISEAC. <https://orcid.org/0000-0001-6099-0921>

Camilo L. Sandoval R. nació en Bucaramanga, Santander, el 24 de Julio de 1977. Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander y Magister en Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander. Docente de las Unidades Tecnológicas de Santander, adscrito a la Coordinación de Electromecánica y Director del Grupo de Investigación en Sistemas de Energías, Automatización y Control GISEAC.