

Title No. 116-M65

Influence of Steel Bars in Detection of Voids in Concrete Using Ultrasonic Pulse-Echo Method

by Leonel Lipa, Laura M. Navarro, and Enrique N. Pasquel

In this research, the influence of steel bars in the detection of voids in concrete elements using the ultrasonic pulse-echo method was analyzed. For this purpose, reinforced concrete walls were made that contain No. 3, No. 4, or No. 5 steel bars, and expanded polystyrene spheres 50 mm (1.97 in.) in diameter, which represent internal voids. Spheres of smaller diameter were not used because their detection is very low. An ultrasonic pulse-echo device of 50 kHz frequency transverse waves that uses a synthetic aperture focusing technique (SAFT) was used. The steel bars were placed with different separations to observe the effect they cause in a scan. In addition, the spheres were laid between these different configurations with the purpose of verifying if their detection is possible. Additionally, image processing was carried out to eliminate or totally reduce the effect of the steel bars in the scans.

This research concluded that when scans are performed on strips with transverse No. 3, No. 4, and No. 5 bars, these would appear in the ultrasound image with a probability of 35.4%, 41.7%, and 62.5%, respectively. In addition, if the scan is performed on a strip with No. 4 or No. 5 bars, which have the same direction of the scan, they appear in large magnitude in the ultrasound images, so it is very difficult to distinguish if there is another material in these areas. However, in this last case, if the bars are No. 3, they do not appear in the scan. On the other hand, the spheres were located with a probability of 81.3% when they were located between steel bars separated by a distance greater than or equal to 100 mm (1.97 in.).

Keywords: flaw detection; honeycombs; pulse echo; reinforced concrete; ultrasonic; voids.

INTRODUCTION

Sometimes, poor construction processes, which cause problems in concrete quality, can affect the capacity of a structure. A common problem arising from these practices is usually honeycombs, which are voids that frequently occur on the concrete surface. Sometimes, these honeycombs are of such high magnitude that they affect the concrete core and can cause a considerable decrease in the properties of the concrete elements. These internal voids cannot be seen and to verify their existence within a concrete structure, the most common method is taking drilled core samples; this method is expensive, destructive, and requires the subsequent repair of holes.¹ Another method for flaw detection is using nondestructive testing (NDT), which consists in a wide group of analysis techniques to evaluate certain properties and conditions of concrete, without deteriorating or destroying the specimen²; in this way, a large number of tests can be carried out on the concrete elements. ACI 228.2R³ summarizes some NDT for concrete, and one of these methods is the use of ultrasonic pulse waves for flaw detection. Pulse-echo equipment consists of grouped piezoelectric transducers that

allow an operator to analyze an element on a single face without having to access the opposite side of the element.

The pulse-echo method was studied by Carino et al.⁴⁻⁸ who proposed a transmitter/receiver impact pulse echo technique. In 1986, Doctor et al.⁹ proposed a synthetic aperture focusing technique (SAFT), which is a post-processing signal designed to improve the result of an area scan to locate metal defects. Many studies have been developed using this technique to locate voids in concrete such as Shandiz and Gaydecki¹⁰ and Hosseini et al.¹¹ In 2010, Tong et al.¹² used the Hilbert Huang transform to develop an improved SAFT for flaw detection inside concrete. This new SAFT was used for the location of voids in subsequent investigations such as Cassidy et al.¹³ and De La Haza et al.¹⁴ Finally, in 2016, Haach and Ramirez¹⁵ used another technique called simultaneous iterative reconstruction technique (SIRT) to detect cylindrical elements within the concrete. This technique uses only two transducers—one emitter and one receiver; as a result, numerous measurements are needed to obtain acceptable images.

Nevertheless, in all these researches, the dimensions of the internal or empty elements were very large, not typical of concrete building thicknesses. “A general rule of thumb is that a discontinuity must be larger than one-half the wavelength to stand a reasonable chance of being detected.”¹⁶ In 2015, concrete elements were made with expanded polystyrene spheres of different sizes, close to one-half wavelength of the pulse-echo equipment used, to calculate the probability of detecting these spheres with ultrasonic waves.¹⁷ According to this research, in concrete elements 150 x 150 x 520 mm (5.91 x 5.91 x 20.47 in.) in dimension, the probability of locating expanded polystyrene spheres 50 mm (1.97 in.) in diameter is 82.35% and the probability is very low if the spheres are smaller.

In this research, a study of the influence of steel bars in the detection of voids in concrete elements using ultrasonic pulse-echo method is carried out. For the development of this research, 15 concrete walls were made that contained No. 3, No. 4, and No. 5 steel bars and expanded polystyrene spheres 50 mm (1.97 in.) in diameter, which represent the voids inside the material. In addition, a program was developed to eliminate the steel bars detected by the ultrasonic waves.

ACI Materials Journal, V. 116, No. 4, July 2019.

MS No. M-2018-089.R2, doi: 10.14359/51715582, received August 21, 2018, and reviewed under Institute publication policies. Copyright © 2019, American Concrete Institute. All rights reserved, including the making of copies unless permission is obtained from the copyright proprietors. Pertinent discussion including author's closure, if any, will be published ten months from this journal's date if the discussion is received within four months of the paper's print publication.

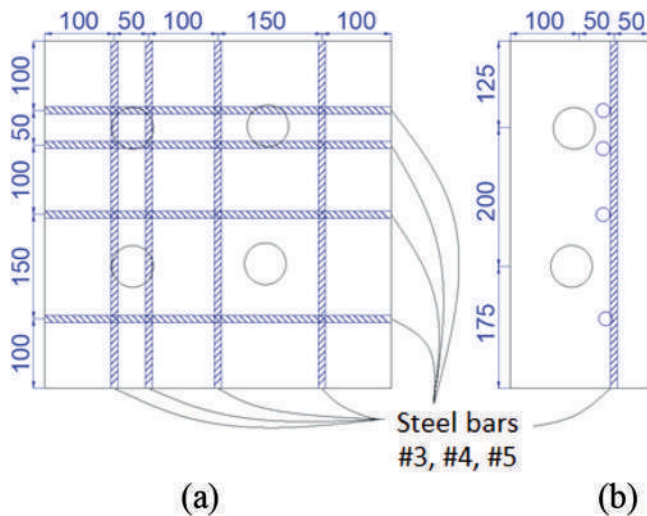


Fig. 1—Model 1, reinforced concrete walls: (a) front view; and (b) lateral view. (Note: Units in mm; 1 mm = 0.0394 in.)

RESEARCH SIGNIFICANCE

To date, no research has studied flaw detection in concrete elements with steel bars nor evaluated the influence the elements cause with respect to their diameter. In addition, there is no information about the possibility of detecting voids located in different configurations of steel bars.

SCOPE

Only concrete of with a specified compressive strength f'_c of 21 MPa (3.05 ksi) was prepared and only No. 3, No. 4, and No. 5 steel bars were used. These specifications represent the most common type of concrete and bars used in Peru and other Latin American countries. In addition, only polystyrene spheres with diameters of 50 mm (1.97 in.) were used because smaller-diameter spheres are not located with a high probability.¹⁷ The study parameters were selected according to the available resources.

EXPERIMENTAL WORK

Material properties

Ordinary portland cement Type I was used according to ASTM C150.¹⁸ This cement has a specific weight of 3110 kg/m³ (194.15 lb/ft³), the fine aggregate has a fineness modulus of 3.09 and a specific weight of 2630 kg/m³ (164.19 lb/ft³), and the coarse aggregate has a maximum size of 19.05 mm (3/4 in.) and a specific weight of 2760 kg/m³ (172.30 lb/ft³). In addition, a high-range water-reducing admixture (HRWRA) was used.

Concrete specimens

Fifteen reinforced concrete walls with dimensions of 500 x 500 x 200 mm (19.69 x 19.69 x 7.87 in.) were made in accordance to ASTM C192.¹⁹ These were divided into three groups of five walls. Each group had different diameter reinforcement, with No. 3, No. 4, or No. 5 bars. In addition, each group had two Model 1 walls, two Model 2 walls, and one Model 3. Model 1 and 2 walls had four spheres of expanded polystyrene, 50 mm (1.97 in.) in diameter, with different interior distribution, and Model 3 was a block without spheres (refer to Fig. 1 to 4). In each wall, the spheres were

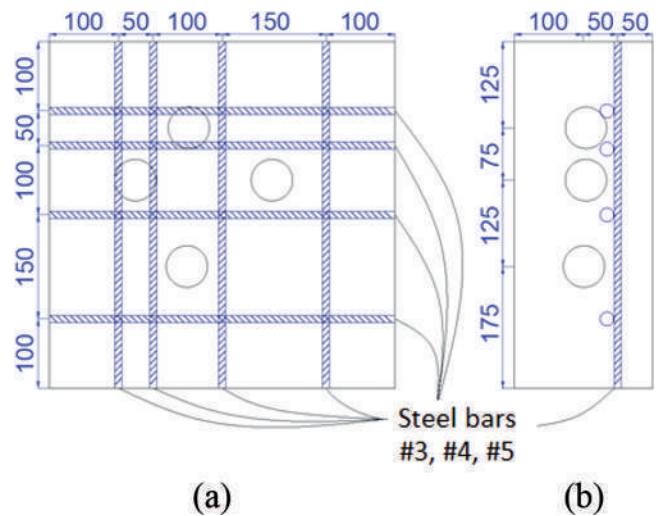


Fig. 2—Model 2, reinforced concrete walls: (a) front view; and (b) lateral view. (Note: Units in mm; 1 mm = 0.0394 in.)

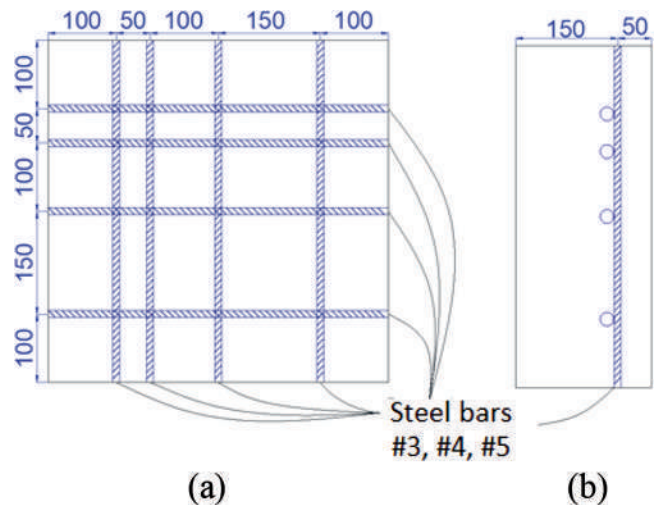


Fig. 3—Model 3, reinforced concrete walls: (a) front view; and (b) lateral view. (Note: Units in mm; 1 mm = 0.0394 in.)

placed at a depth of 100 mm (3.94 in.) and the steel mesh at 50 mm (1.97 in.) of 200 mm (7.87 in.) thickness. Cylindrical concrete specimens 150 mm (6 in.) in diameter and 300 mm (12 in.) in height were prepared for each wall, to be tested in compression at 28 days.

Concrete characteristics

All the concrete walls were made with a specified compressive strength of 21 MPa (3.05 ksi). The slump was controlled to 150 mm (6 in.) and the air content between 1 and 3%. All specimens were scanned with ultrasonic pulse-echo waves at an age greater than 28 days.

Equipment

The ultrasonic pulse-echo device used had 18 transverse-wave transducers (S wave) of 50 kHz frequency. This equipment allows performing an area scan, in strip, of an element. The device has a width of 110 mm (4.33 in.); thus, a scanned strip has approximately the same width. To perform an area scan, partial scans need to be made over the strip length (the operator defines the distance between two partial scans).



(a)



(b)

Fig. 4—Concrete walls: (a) Model 1; and (b) Model 2.

The smaller the distance, the better resolution of the scans obtained. The width of the scanned strip is averaged over a central longitudinal line, so the result of the area scan will be the longitudinal axis of the strip versus the depth of the scanned element. Also, when scanning an edge-to-edge strip in a specimen, the initial and final 80 mm (3.15 in.) of the total strip are out of range because the equipment has a length of 160 mm (6.30 in.) and the scans are always averaged in the central part of the device. Therefore, it is unlikely to find an element or void close to the edges, which are out of the equipment's range (refer to Fig. 5). Finally, knowing the distance between emitters and receivers, the equipment allows the estimation of the wave velocity in a specimen through its transducers using surface waves.

Scan procedure

The walls were scanned on both sides of 500 x 500 mm (19.69 x 19.69 in.). The face where the steel mesh was at a depth of 50 mm (1.97 in.) was called Face F, and the opposite face where the mesh was at a depth of 150 mm (5.91 in.) was called Face G. Each face was scanned in horizontal (from left to right) and vertical strips (upward) in areas where the expanded polystyrene spheres had been placed. Model 1 was scanned in two horizontal and two vertical strips, Model 2 in three horizontal and three vertical strips, and Model 3 was scanned in the same way as Model 1, as well as Model 2 (refer to Fig. 6 and 7). In all scans, the

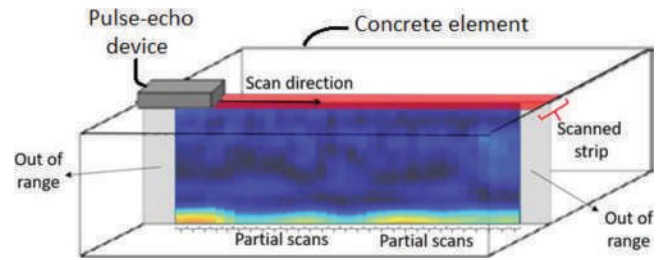


Fig. 5—Ultrasonic scan.

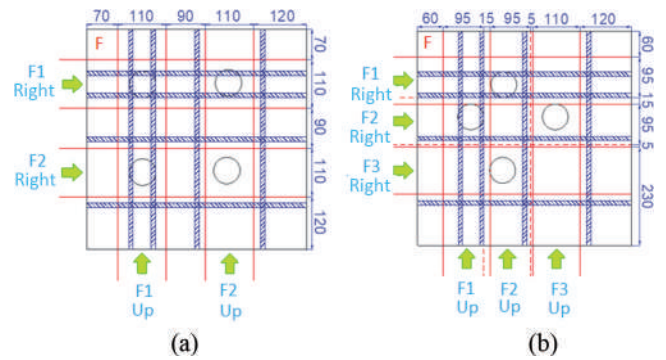


Fig. 6—Horizontal and vertical scans, Face F: (a) Model 1; and (b) Model 2. (Note: Mesh depth is 50 mm; units in mm; 1 mm = 0.0394 in.)

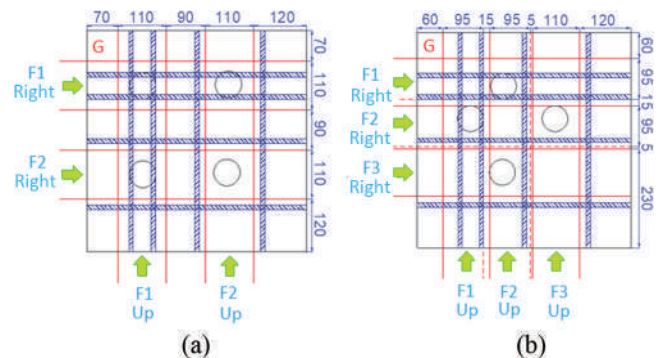


Fig. 7—Horizontal and vertical scans, Face G: (a) Model 1; and (b) Model 2. (Note: Mesh depth is 150 mm; units in mm; 1 mm = 0.0394 in.)

length of the partial scans was 10 mm (0.394 in.) to get better image resolution.

EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

Compressive strength

Compressive strength was determined from cylindrical specimens according to ASTM C39²⁰ at an age of 28 days. The compressive strength obtained was 25.48 MPa (3.70 ksi) with a standard deviation of 1.45 MPa (0.21 ksi).

Probability of finding transverse steel bars

As shown in Fig. 8, the steel bars transverse to the scanned strip were shown as spots in the scan, which can be mistaken as voids or other material if it is not certain that they are steel bars. In addition, in this case it was observed that the transverse No. 3 and No. 4 steel bars, spaced 50 mm (1.97 in.), appeared as a single spot in the ultrasound image.

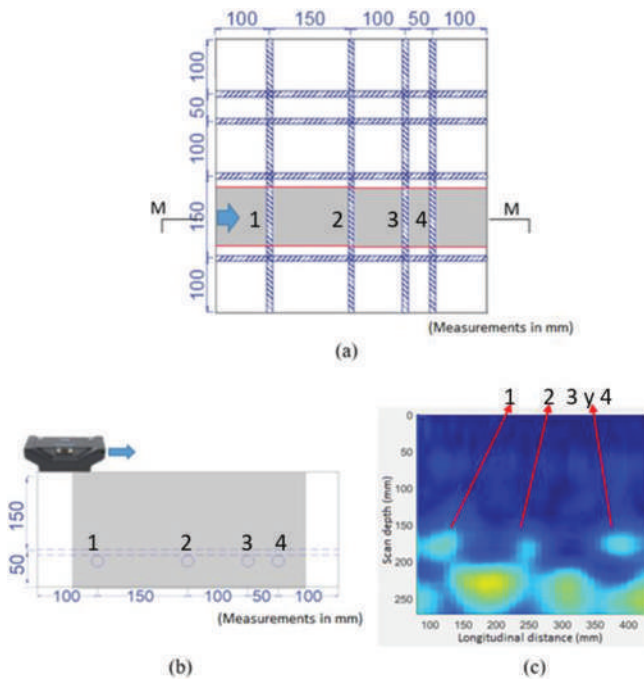


Fig. 8—Influence of No. 4 transverse steel bars: (a) front view; (b) M-M view; and (c) ultrasound scan. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

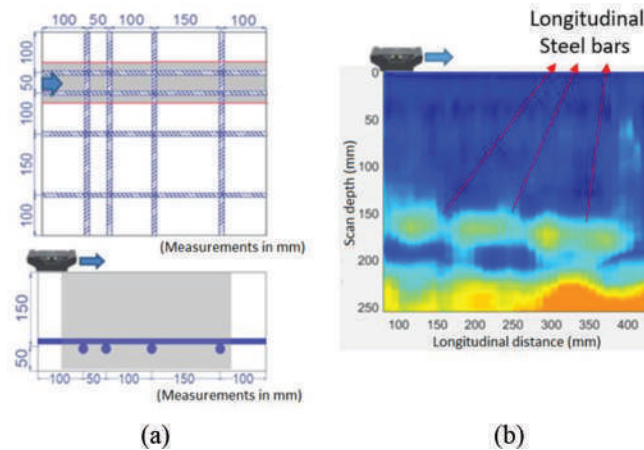


Fig. 9—Influence of No. 5 longitudinal steel bars spaced 50 mm: (a) scanned element; and (b) ultrasound scan. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

Table 1 shows the probability of finding transverse steel bars (how many times they appeared in the ultrasound images). In this table, it can be seen that the transverse steel bars are not 100% detected and if they are smaller diameter, the possibility of detection is lower. Table 2 shows the probability of finding transverse steel bars according to their depth: 50 or 150 mm (1.97 or 5.91 in.). In Table 2, for each diameter, 100% represented only the steel bars found in Table 1. Table 2 shows that when the transverse steel bars are at a depth of 150 mm (5.91 in.), detection probability with ultrasound equipment is greater than when they are at a depth of 50 mm (1.97 in.). For this analysis, the transverse steel bars separated 50 mm (1.97 in.) have not been considered because they tend to appear as a single spot in the image (as in the case of Fig. 8).

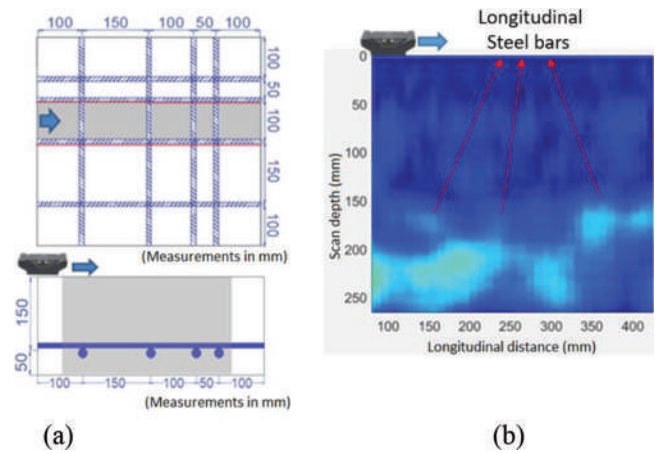


Fig. 10—Influence of No. 5 longitudinal steel bars spaced 100 mm: (a) scanned element; and (b) ultrasonic scan. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

Table 1—Probability of finding transverse steel bars

Type	Found	Total	Probability, %
Steel No. 5	30	48	62.5
Steel No. 4	20	48	41.7
Steel No. 3	17	48	35.4

Table 2—Probability of finding transverse steel bars according to their depth

Type	Depth of 50 mm (1.97 in.)	Depth of 150 mm (5.91 in.)
Steel No. 5	40.0%	60.0%
Steel No. 4	15.0%	85.0%
Steel No. 3	11.8%	88.2%

Probability of finding longitudinal steel bars

When the steel bars are in the same direction as the scanned strip, they can appear as a continuous spot or as fragments, so it is difficult to distinguish if there is a void or other element within the analyzed strip. Figure 9 shows an example of how the longitudinal steel bars can be seen parallel to the scanning direction, when two bars are spaced 50 mm (1.97 in.). As shown in this image, the two bars appear as a continuous spot at a depth of 150 mm (5.91 in.), which makes it very difficult to differentiate other elements in this scan; for instance, the transverse steel bars are not detected.

On the other hand, Fig. 10 shows the case of longitudinal steel bars parallel to the scanning direction, when two bars are spaced 100 mm (3.94 in.). As shown in this image, the two bars appear as a spot of less intensity than the bars spaced 50 mm (1.97 in.). Although this spot is tenuous, the possibility to make a mistake considering them to be honeycombs or internal elements is high if there is no certainty that they are steel bars.

Table 3 shows the probability of finding longitudinal steel bars when they are spaced 50 mm (1.97 in.)—that is, how many times they were detected in the ultrasound images. Table 4 shows the probability of finding longitudinal steel bars according to their depth, of those found in Table 3.

Table 5 shows the probability of finding longitudinal steel bars when they are spaced 100 mm (3.94 in.)—that is, how many times they were detected in the ultrasound images. Table 6 presents the probability of finding the longitudinal steel bars found in Table 5, according to their depth.

From Tables 3 and 5, it can be inferred that longitudinal No. 3 bars were not detected. In addition, the probability

Table 3—Probability of finding longitudinal steel bars spaced 50 mm (1.97 in.)

Type	Found	Total	Probability, %
Steel No. 5	19	24	79.2
Steel No. 4	13	24	54.2
Steel No. 3	0	24	0.0

Table 4—Probability of finding longitudinal steel bars according to their depth

Type	Depth of 50 mm (1.97 in.)	Depth of 150 mm (5.91 in.)
Steel No. 5	52.6%	47.4%
Steel No. 4	46.2%	53.8%
Steel No. 3	—	—

Table 5—Probability of finding longitudinal steel bars spaced 100 mm (3.94 in.)

Type	Found	Total	Probability, %
Steel No. 5	9	12	75.0
Steel No. 4	4	12	33.3
Steel No. 3	0	12	0.0

Table 6—Probability of finding longitudinal steel bars according to their depth

Type	Depth of 50 mm (1.97 in.)	Depth of 150 mm (5.91 in.)
Steel No. 5	55.6%	44.4%
Steel No. 4	50.0%	50.0%
Steel No. 3	—	—

of detecting longitudinal steel bars is greater when they are at a depth of 50 mm (1.97 in.) than when they are 150 mm (5.91 in.) deep. On the other hand, Tables 4 and 6 show that there is practically no difference in the probability of locating the bars if they are at a depth of 50 or 150 mm (1.97 or 5.91 in.).

Voids found

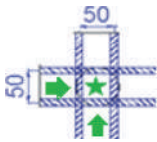
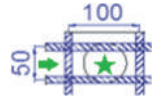
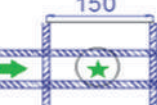
Tables 7, to 10 show the percentage of spheres detected according to the steel distribution around them (the arrows indicate the direction of the scan). Table 7 shows the percentage of spheres detected between bars spaced 50 mm (1.97 in.) with the same scanning direction. As previously seen, the influence of this steel in a scan is considerable and that is why the possibility of locating internal elements in strips of this type is low. It is important to note that the probability obtained in Table 7 is referential, because for this analysis, the spots that were considered detected spheres have part of the longitudinal steel effect.

Table 8 shows the percentage of spheres detected between steel bars spaced 100 mm (3.94 in.) with the same scanning direction. As in the previous case, the influence of steel bars with the same scanning direction is considerable, so the possibility of locating internal elements in strips of this type is relatively low. As in Table 7, the percentage obtained in Table 8 is referential because the spots that were considered detected spheres may include part of the effect of the steel bars.

On the other hand, Table 9 shows the probability of detecting spheres and transverse bars spaced 50 mm (1.97 in.). In this type of scan, the sphere and the two steel bars appeared as a single spot, so it is not possible to specify if only the sphere was detected. Also from Table 9, it can be inferred that although these three elements are very close, their location probability is not 100%.

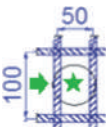
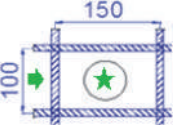
Table 10 shows the probability of detecting spheres when they are between steel bars with the same scan direction, spaced greater than or equal to 150 mm (5.91 in.), and between transverse steel bars greater than or equal to 100 mm (3.94 in.). This table shows that the detection probability of a 50 mm diameter sphere is high because the steel around it is far enough away, so its influence is zero. It also

Table 7—Referential probability of detecting spheres between longitudinal bars spaced 50 mm (1.97 in.)

Type	Steel No. 5			Steel No. 4			Steel No. 3		
	Found	Total	Probability	Found	Total	Probability	Found	Total	Probability
	2	8	25.0%	3	8	37.5%	3	8	37.5%
	6	8	75.0%	7	8	87.5%	4	8	50.0%
	2	8	25.0%	2	8	25.0%	6	8	75.0%

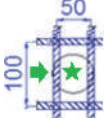

Note: Measurements in mm; 1 mm = 0.0394 in.

Table 8—Referential probability of detecting spheres between longitudinal bars spaced 100 mm (3.94 in.)

Type	Steel No. 5			Steel No. 4			Steel No. 3		
	Found	Total	Probability	Found	Total	Probability	Found	Total	Probability
	8	8	100.0%	7	8	87.5%	8	8	100.0%
	8	8	100.0%	5	8	62.5%	7	8	87.5%

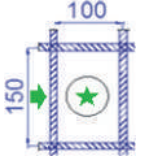
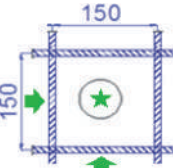
Note: Measurements in mm; 1 mm = 0.0394 in.

Table 9—Probability of detecting a sphere and transverse steel bars spaced 50 mm (1.97 in.)

Type	Steel No. 5			Steel No. 4			Steel No. 3		
	Found	Total	Probability	Found	Total	Probability	Found	Total	Probability
	8	8	100.0%	7	8	87.5%	8	8	100.0%
	7	8	87.5%	8	8	100.0%	8	8	100.0%

Note: Measurements in mm; 1 mm = 0.0394 in.

Table 10—Probability of detecting a sphere between steel bars spaced greater than 100 mm (3.94 in.)

Type	Steel No. 5			Steel No. 4			Steel No. 3		
	Found	Total	Probability	Found	Total	Probability	Found	Total	Probability
	7	8	87.5%	6	8	75.0%	6	8	75.0%
	7	8	87.5%	6	8	75.0%	7	8	87.5%
Total	14	16	87.5%	12	16	75.0%	13	16	81.3%

Note: Measurements in mm; 1 mm = 0.0394 in.

Table 11—Total spheres detected between steel bars spaced greater than 100 mm (3.94 in.)

Found	Total	Probability, %
39	48	81.3

shows that the probability of locating a 50 mm sphere is not 100%. Finally, Table 11 shows the probability of detecting 50 mm diameter spheres. For this analysis, only the spheres detected in Table 10 were considered.

IMAGE PROCESSING TO ELIMINATE EFFECT OF TRANSVERSE STEEL BARS

An ultrasonic pulse-echo device is useful for flaw detection in concrete; however, in some cases, the transverse steel bars appear in great magnitude in the ultrasonic scans. For this reason, an image processing was developed in MATLAB to eliminate or minimize the interference of the transverse steel bars in the scanning strips. Consequently, all the walls were scanned with a profometer in the same areas previously

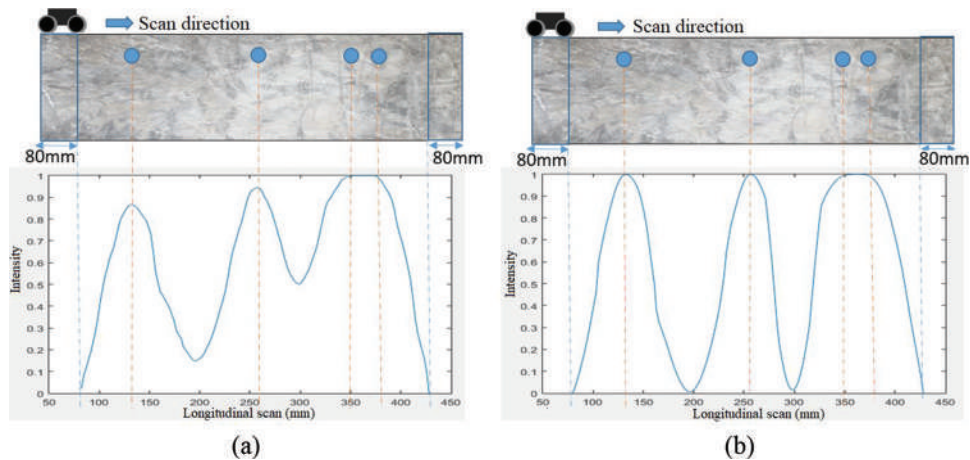


Fig. 11—Profometer signal – MATLAB: (a) without processing; and (b) processed.

scanned with the ultrasonic pulse-echo device. The idea was to use the profometer signal as an experimental empirical filter in the ultrasound image.

Processing profometer signal

A profometer that allows scanning in strips was used. This equipment has coils that generate a magnetic field that is affected by the current induced in the steel bars. It is important to note that this device does not cover a depth greater than approximately 100 mm (3.94 in.), so only the face of the walls where the steel mesh was at a depth of 50 mm (1.97 in.) was scanned.

Each strip scan performed with the ultrasonic pulse-echo equipment, from edge to edge, has a horizontal compensation of 80 mm (3.15 in.) initial and final. However, the profometer has a horizontal compensation of 40 mm (1.57 in.), initial and final. Figure 11(a) shows a strip scan of a reinforced concrete element with a profometer, where the y-axis is the variation of the magnetic field due to the steel bars (scaled to 1), and the x-axis is the length of the scanned strip. In this case, the bars have the same diameter; however, the intensities generated by the first two steel bars are not completely equal and, in addition, the last two bars are very close, so their intensities overlap and, thus, the intensity between them does not reach zero. Besides, the signal appears to have some noise, so it would be ideal to soften the signal.

To achieve this, a series of steps were performed. First, to filter the ultrasound image with the profometer signal, it was necessary that both have the same longitudinal scan. As mentioned, the scans are made from edge to edge, so the profometer signal was cut on each side 40 mm (1.6 in.) so that it had the same longitudinal distance as the ultrasound image. Figure 11(a) shows a concrete element and the profometer signal cut with MATLAB. Second, the profometer signal was smoothed with a linear average filter of the type: (0.2 0.2 0.2 0.2 0.2). Third, the signal was scaled to a maximum intensity of one. Fourth, the peaks of the signal have different amplitude (due to the effects of diameter, oxidation degree, bar depth, among others) and when the transverse steel bars are located very close, these peaks overlap and do not let the intensity between them be zero. Therefore, using MATLAB, these maximum peaks were increased to 1 if they were greater

than 0.3, and minimum peaks decreased to 0 if they were less than 0.7 (these values can be changed depending on the operator’s experience; however, it is advisable to use values of 0.3 and 0.7). In such a way, a new signal was obtained as vector 1_x_N . In Fig. 11(b), the signal of Fig. 11(a) smoothed and scaled is shown. In this case, the overlap of the last two bars could not be separated.

Processing the pulse-echo ultrasonic image

First, the image was converted to grayscale as a jpg or png image. As a consequence, the five dimensions (longitudinal distance, depth, and RGB) were reduced to three dimensions—an A_x_B matrix in which each element of the matrix has a value from 0 to 255 (gray color intensity). Second, the image $A \times B$ was scaled in such a way that B is equal to N (the length of the profometer signal), so now the new matrix was an image of $M \times N$. Third, the matrix intensity was scaled from $[0, 255]$ to $[0, 1]$. Finally, this new matrix was shown in jet colormap $[0, 1.5]$ in MATLAB to obtain an image similar to the initial one (if necessary, the user can change the 1.5 value).

Image filtering

Each ultrasound image was filtered in three row sections. Section one is from the first row to the row where the “Thickness – 20 mm” is found, Section two from the “Thickness – 20 mm” row to “Thickness + 20 mm” row, and Section three from the row “Thickness + 20 mm” up to the last row (20 mm = 0.79 in.). Figure 12(a) shows the scan of a concrete element, and Fig. 12(b) presents the obtained image of the scan, where the three sections mentioned in the ultrasound image $M \times N$ are shown (colormap: jet). In this example, the thickness element is 200 mm (8 in.): Section one is from Row 1 to the row that has a depth of 180 mm; Section two, from the 180 mm depth row to the one 220 mm; Section three, from the 220 mm depth row to the final row of the ultrasound image.

Two filters were used for the ultrasound images. For Section one, Filter 1 was used; for Section three, Filter 2; and for Section two, a combination of Filters 1 and 2 was used. To better understand these filters, the scan of Fig. 13 is used as example. In this image of the ultrasound scan, it can be seen that the first two transverse bars appear as a single

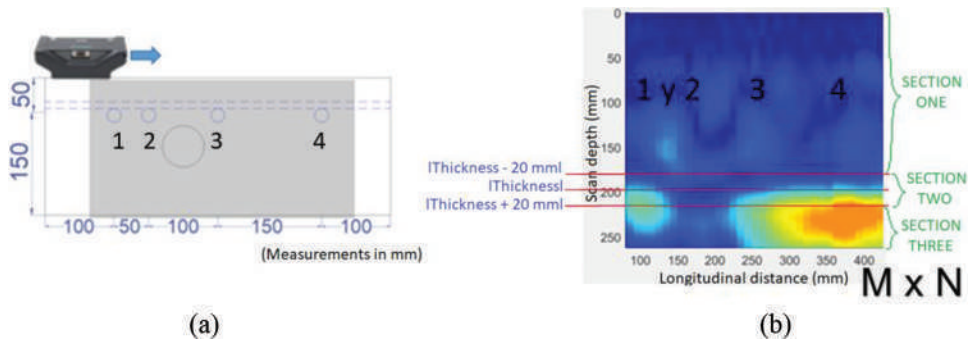


Fig. 12—Sections for filtering in a concrete wall with No. 4 steel bars: (a) scanned element; and (b) ultrasonic scan. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

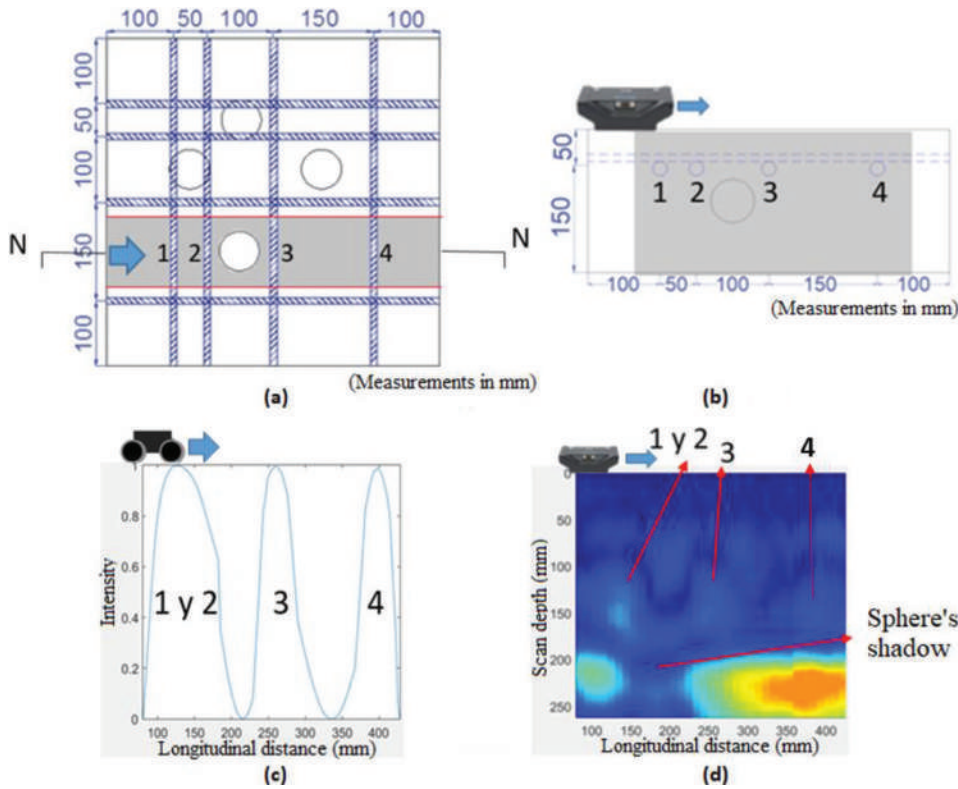


Fig. 13—Filtering example in a concrete wall with No. 4 steel bars: (a) front view; (b) N-N view; (c) profometer scan; and (d) ultrasonic scan. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

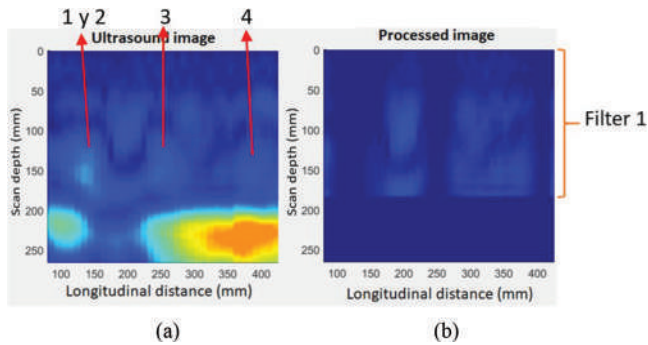


Fig. 14—Filter 1: Section one: (a) ultrasonic scan; and (b) processed image, section one. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

spot, the sphere leaves a shadow on the thickness (it does not appear as a spot), the third bar appears as another spot, and the fourth bar as a faint spot.

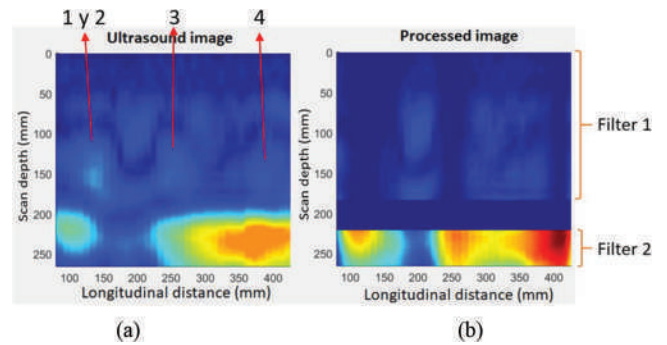


Fig. 15—Filter 2: Section three: (a) ultrasonic scan; and (b) processed image, section one and three. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

a) Filter 1: Section one—This filter reduces the spots left by the transverse steel bars of the ultrasound image. For this, each row “1 x N”, “2 x N”, ..., “[Thickness – 20 mm] x N” is

divided by the vector “1 x N” of the profometer. This way, the intensity of the steel bars, if any, is considerably reduced. Figure 14(a) shows the ultrasound image before processing, and Fig. 14(b) after Filter 1, which disappears the spots of the transverse steel bars of Fig. 14(a).

b) *Filter 2: Section three*—This filter fills the openings left by the steel bars in the thickness of the ultrasound image. For this, each row “|Thickness + 20 mm| x N “,” |Thickness + 20 mm + 1| x N “,” ..., ”M x N” is multiplied by the vector “1 x N” of the profometer. This way, the intensity of the steel shadows in the ultrasound image, if any, increases considerably. In Fig. 15(a), the image obtained with the equipment is shown and in Fig. 15(b), the image is already processed in Sections one and three. As can be seen, Filter 2 has filled the openings caused by the transverse steel bars; however, an opening is still shown, which is the sphere shadow.

c) *Filters 1 and 2: Section two*—To avoid border effects in the ultrasound image, a linear combination

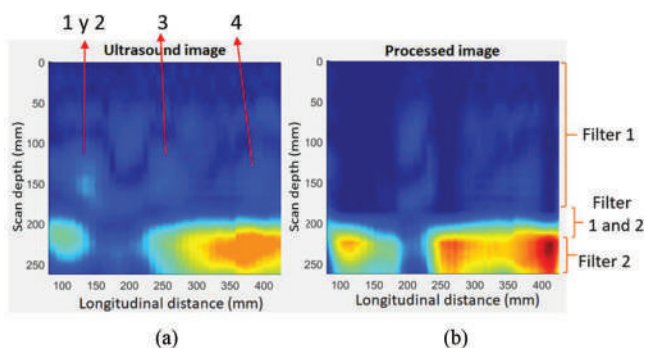


Fig. 16—Filters 1 and 2: Section two: (a) ultrasonic scan; and (b) processed image, section one and three. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

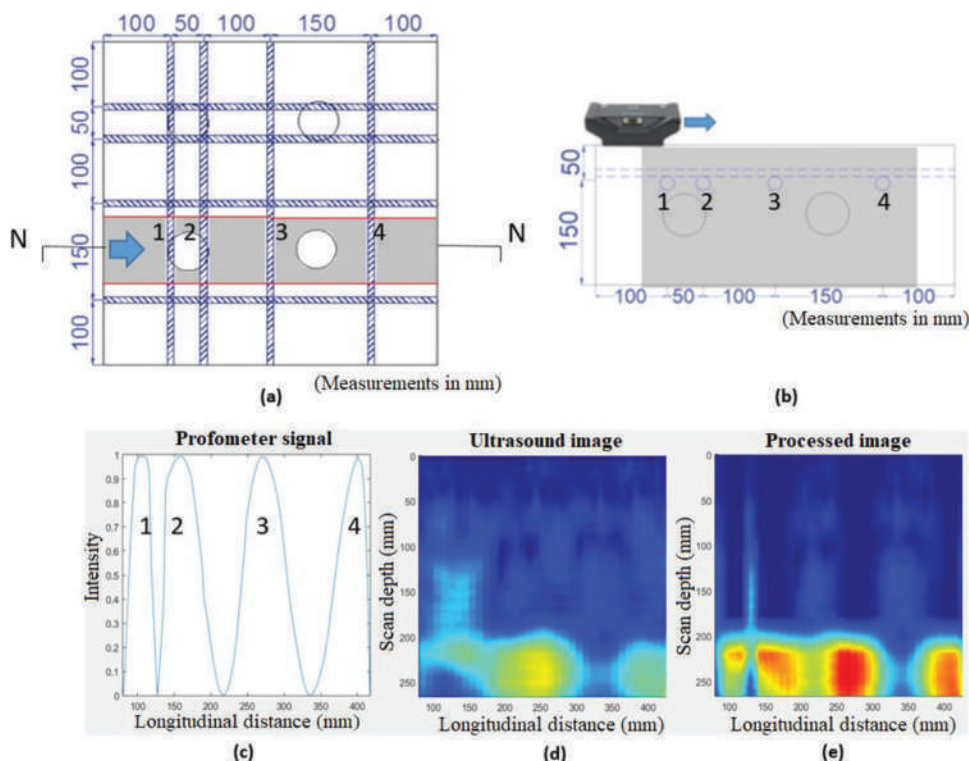


Fig. 17—Filtering example in concrete wall with No. 5 steel bars: (a) front view; (b) N-N view; (c) profometer scan; (d) ultrasound image; and (e) processed image. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

of Filters 1 and 2 is performed between rows |Thickness – 20 mm| and |Thickness + 20 mm|. In Fig. 16(a), the image obtained with the equipment is shown and in Fig. 16(b), the image has been completely processed. As shown in the latter, in Section two, a combination of Filters 1 and 2 is applied so now there is continuity between Sections one and three. Figure 16(b) shows the ultrasound image without spots and openings from the steel bars, and only the opening left by the 50 mm (1.97 in.) diameter sphere can be seen.

Figure 17 shows another example of a scan. Figure 17(a) presents the front view of a concrete wall, Fig. 17(b) shows the N-N view of the concrete element, Fig. 17(c) presents the processed profometer signal of the scanned strip of Fig. 17(a), Fig. 17(d) is the unprocessed ultrasound image, and Fig. 17(e) is the image already processed. In Fig. 17(d), the steel bars 1 and 2 appear with the sphere as a single spot, bars 3 and 4 do not appear, and the second sphere is shown as an opening in the image. Figure 17(e) shows that the spots of the steel bars 1 and 2 have disappeared completely and only the first sphere is shown as the opening of the second sphere. It is important to note that the ultrasound image has lost its initial nature and the processed result is only for visualization.

USE OF PROGRAM IN THE FIELD

Concrete elements in bridge

The bridge studied is located in Chacanto, Cajamarca, Peru, and was under construction (Fig. 18). The scanning of the bridge’s springer arch was carried out using the pulse-echo and profometer devices. In this case, it was necessary to check if there were internal voids in the concrete elements.

The scanning was performed on the four faces of each element using both the ultrasonic equipment and the profo-

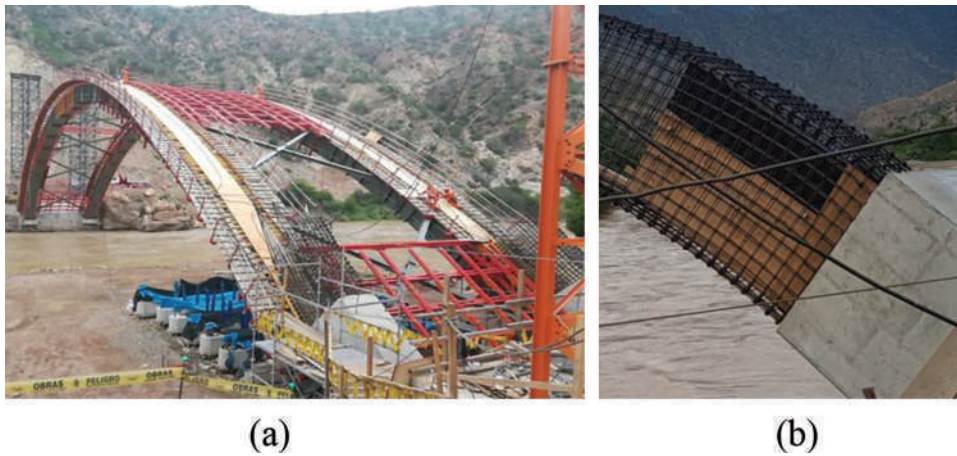


Fig. 18—Bridge in construction: (a) global view; and (b) Springer arch.

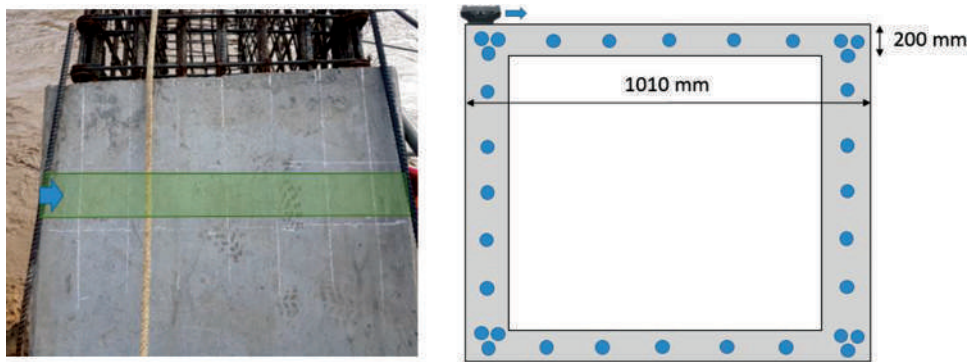


Fig. 19—Scan of springer arch (No. 4 steel bars): (a) top view; and (b) front view.

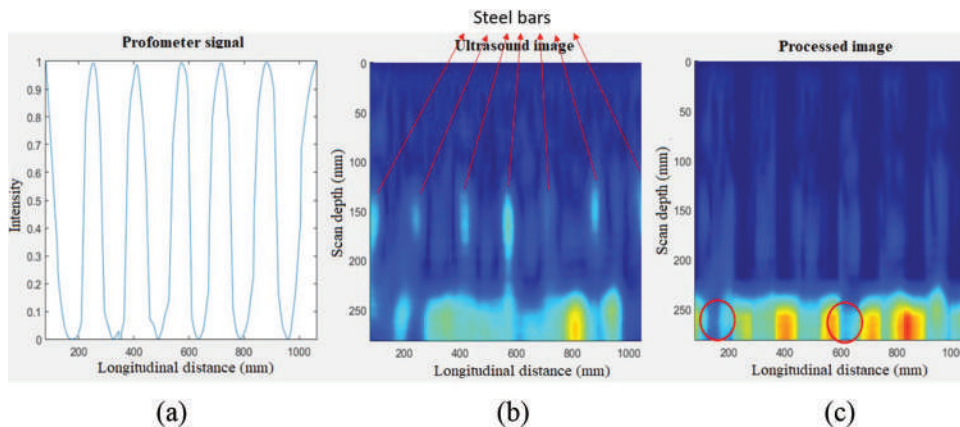


Fig. 20—Ultrasonic scans of bridge: (a) profometer signal; (b) ultrasonic image; and (c) processed image. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

meter. In Fig. 19(a), the springer arch is shown, and in Fig. 19(b), the cross section of the arch. Figure 20 shows the profometer signal, the ultrasound image obtained, and the image already processed of a scanned strip on the top face. In this case, the spots caused by the steel bars were almost completely removed; however, when the shadows of the steel bars were filled, an area (red circles in the image) was not completely done. Therefore, it is likely that there are internal or empty elements in this area of the concrete element. In this structure, there were internal steel hooks and, because the openings in Fig. 20(c) are small, it is possible that these are hook shadows that the profometer could not detect.

Cistern wall

A perimeter wall of a cistern was scanned in Tacna, Peru, to verify the existence of internal voids in the concrete element (refer to Fig. 21). The wall had a thickness of 250 mm (9.84 in) and No. 4 steel bars. Figure 22 shows the scanning and processing performed on a portion of the cistern perimeter wall. In Fig. 22(b), the steel bars appear like openings in the ultrasound image. However, when the image is processed, all shadows disappear except for one (refer to Fig. 22(c)). This perimeter wall had a double steel mesh so the profometer equipment only detected the mesh closest to the analysis face and not the rear one.

Thus, it is possible that one of the steel bars of the deep mesh is the one that leaves an opening in Fig. 22(c).

METHODOLOGY TO SCAN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

When scans on reinforced concrete elements are required, it is necessary to locate the position of the horizontal and vertical steel bars in the analysis area using a profometer. It is important to note that scans should not be performed in strips with steel bars of No. 4 or larger diameter, which are in the same direction of the scan. Then, the S-wave velocity in the material must be calculated if the thickness of the element is known or estimated using the transducers. Finally, the strip scan should be performed.

In case a void or internal element is detected, it is necessary to verify that it is not a steel bar again using the profometer. If this anomaly is discarded as a steel bar, a strip scan perpendicular to the initial scanned strip must be carried out

in the area in discussion and/or if possible, a strip scan made in the opposite face to ensure that the anomaly is actually inside the concrete element. Finally, the ultrasound image can be filtered with the profometer signal to visualize the image without the presence of transverse steel bars.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Based on this study, the following conclusions are made:

- To detect voids in reinforced concrete using an ultrasonic pulse-echo device, it is essential to use profometer equipment first because the steel bars appear in the scans as spots.
- The steel transverse to the scanned strip appears with greater probability when it is of larger diameter and decreases when it is smaller. In addition, a transverse steel bar is more likely to be located when it is deeper than when it is close to the analysis face. This effect can occur because the waves need approximately the first 50 mm (1.97 in.) to stabilize each other, so it is difficult to detect voids or internal elements in this area.
- When scans were made on No. 4 and No. 5 steel bars, which have the same scan direction spaced 50 mm (1.97 in.), they appeared in great magnitude in the scans, so it was not possible to detect if there was any other material in these scanned strips. However, when these steel bars were No. 3 spaced 50 mm (1.97 in.), they did not appear in the scans, but the detection probability of 50 mm diameter spheres was reduced. Therefore, it is not recommended to scan on steel bars larger than No. 4 that have the same scan direction.
- In scans on No. 4 and No. 5 steel bars, with the same direction of the scan, spaced 100 mm (3.94 in.), the probability that they appear decreases as compared to those spaced 50 mm (1.97 in.). However, there is still the probability of confusing these bars with other elements if it is not certain that they are steel bars.
- The methodology for flaw detection using an ultrasonic pulse-echo device in concrete was improved because the previous technique was to scan voids in concrete without the interference of steel bars.¹⁷ In this proposed methodology, it is explained in which area of a reinforced concrete element is suitable for scanning and what necessary precautions should be taken when scanning concrete strips.



Fig. 21—Wall scan of cistern.

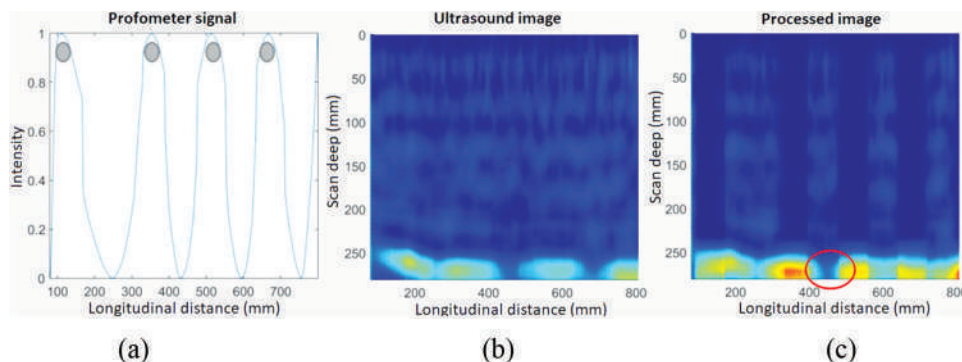


Fig. 22—Image processing of wall scan: (a) profometer signal; (b) ultrasonic image; and (c) processed image. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

- This methodology is useful for flaw detection in reinforced concrete; however, take into account that if the voids are less than 50 mm in diameter, the probability of detecting them is too low. In addition, No. 5 bars appear in ultrasound images with high probability, so it is deduced that larger bars also appear as spots.
- The equipment is efficient to detect 50 mm (1.97 in.) spheres with a probability of 81.3% in reinforced concrete if the strip does not have steel bars with the same scanning direction and if it has transverse steel bars spaced greater than 100 mm (3.94 in.). This probability is very close to the 81.25% value obtained in past research to locate expanded polystyrene spheres of 50 mm (1.97 in.) diameter.¹⁷
- In the case of the bridge and the cistern, it was possible to find internal voids with dimensions greater than 50 mm; however, by using the proposed methodology and the developed code, the presence of voids or internal elements could be ruled out.
- Regarding the code, this program is useful to eliminate the effect of steel from the ultrasound image, and, thus, to detect only the presence of voids or internal elements in a scan. It is important to note that this program has been developed only for visualization purposes because the matrix of each image has lost its initial nature. Also, the program may not be completely effective if the quality of the signal and image obtained has been poor.

AUTHOR BIOS

Leonel Lipa is a Researcher at the Pontifical Catholic University of Peru (PUCP), Lima, Peru, working in the Laboratory of Earthquake Structures. His research interests include construction materials and nondestructive testing of concrete elements.

Laura M. Navarro is a Researcher at PUCP and Head of the construction and materials area of the Laboratory of Earthquake Structures. She received her MS in structural engineering from PUCP. Her research interests include construction materials and nondestructive testing of concrete elements.

ACI Honorary Member **Enrique N. Pasquel** is a Research Engineer at PUCP in construction materials. He was awarded ACI's Henry C. Turner Medal in 2006 and the Chapter Activities Award in 2007 for his work in the Peru Chapter – ACI.

ACKNOWLEDGMENTS

This project was carried out thanks to the scholarship funds for postgraduate studies of CONCYTEC PERU. Also, the tests were performed at the Structures Laboratory of the Pontifical Catholic University of Peru.

REFERENCES

1. Carino, N. J., and Sansalone, M., "Pulse-Echo Method for Flaw Detection in Concrete," *Final Report*, Center for Building Technology, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1984.

2. Hola, J., and Schabowicz, K., "State-of-the-Art Nondestructive Methods for Diagnostic Testing of Building Structures—Anticipated Development Trends," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, V. 10, No. 3, 2010, pp. 5-18. doi: 10.1016/S1644-9665(12)60133-2
3. ACI Committee 228, "Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (ACI 228.2R-13)," American Concrete Institute Farmington Hills, MI, 2013, 82 pp.
4. Carino, N. J., "Laboratory Study of Flaw Detection in Concrete by the Pulse-Echo Method," *In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, SP-82, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1984, pp. 557-580.
5. Carino, N. J., and Sansalone, M., "Detection of Voids in Grouted Ducts Using the Impact-Echo Method," *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 3, May-June 1992, pp. 296-303.
6. Carino, N. J.; Sansalone, M.; and Hsu, N., "A Point Source Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 83, No. 2, Mar.-Apr. 1986, pp. 199-208.
7. Sansalone, M., and Carino, N. J., "Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves," NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 1986.
8. Carino, N. J., and Sansalone, M., "Detecting Voids in Metal Tendon Ducts Using the Impact-Echo Method," *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 3, May-June 1992, pp. 296-303.
9. Doctor, S. R.; Hall, T. E.; and Reid, L. D., "SAFT—The Evolution of a Signal Processing Technology for Ultrasonic Testing," *NDT & E International*, V. 19, No. 3, 1986, pp. 163-167. doi: 10.1016/0308-9126(86)90105-7
10. Shandiz, H. T., and Gaydecki, P. A., "An Enhanced, High-Speed Ultrasonic SAFT System for Imaging of Defects within Concrete Structures," D. O. Thompson, D. E. Chimenti, and L. Poore, eds., *AIP Conference Proceedings*, 2001, pp. 703-709.
11. Hosseini, Z.; Momayez, M.; Hassani, F.; Lévesque, D.; Thompson, D. O.; and Chimenti, D. E., "Detection of Inclined Cracks inside Concrete Structures by Ultrasonic SAFT," *AIP Conference Proceedings*, V. 975, 2008, pp. 1298-1304. doi: 10.1063/1.2902583
12. Tong, J. H.; Chiu, C. L.; and Wang, C. Y., "Improved Synthetic Aperture Focusing Technique by Hilbert-Huang Transform for Imaging Defects inside a Concrete Structure," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, V. 57, No. 11, 2010
13. Cassidy, N. J.; Eddies, R.; and Dods, S., "Void Detection beneath Reinforced Concrete Sections: The Practical Application of Ground-Penetrating Radar and Ultrasonic Techniques," *Journal of Applied Geophysics*, V. 74, No. 4, 2011, pp. 263-276. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.06.003
14. De La Haza, A. O.; Samokrutov, A. A.; and Samokrutov, P. A., "Assessment of Concrete Structures Using the Mira and Eyecon Ultrasonic Shear Wave Devices and the SAFT-C Image Reconstruction Technique," *Construction and Building Materials*, V. 38, 2013, pp. 1276-1291. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.002
15. Haach, V. G., and Ramirez, F. C., "Qualitative Assessment of Concrete by Ultrasound Tomography," *Construction and Building Materials*, V. 119, 2016, pp. 61-70. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.056
16. Martin, T., "Ultrasonic Testing on EUROFER Welded Joints for Determination of the Minimum Detectable Flaw Size," *KIT Scientific Publishing*, V. 7543, 2010, pp. 1-2.
17. Lipa, L.; Pasquel, E. N.; Navarro, L. M.; and Del Álamo, J., "Void Detection and Thickness Measurement in Concrete Elements," *ACI Materials Journal*, V. 115, No. 4, July 2018, pp. 557-564. doi: 10.14359/51702188
18. ASTM C150/C150M-16^{e1}, "Standard Specification for Portland Cement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 10 pp.
19. ASTM C192/C192M-16a, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 8 pp.
20. ASTM C39/C39M-16b, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 7 pp.

Influencia de las barras de acero en la detección de vacíos en el concreto usando el pulso ultrasónico

Leonel Lipa^(a), Laura M. Navarro^(b), Enrique N. Pasquel^(c)

Laboratorio de Estructuras Antisísmicas, Pontificia Universidad Católica del Perú; Lima, Perú

^(a)leonel.lipa@pucp.pe, ^(b)lnavarro@pucp.edu.pe, ^(c)epasquel@controlmixexpress.com

RESUMEN

En esta investigación, se analizó la influencia de las barras de acero en la detección de vacíos internos en elementos de concreto usando el método pulso eco ultrasónico. Para este propósito se elaboraron muros de concreto armado, los cuales contienen barras de acero corrugado #3, #4 y #5, y esferas de poliestireno expandido de 50 mm de diámetro, que representan los vacíos internos. No se usaron esferas de menor tamaño ya que su detección es muy baja. Se utilizó un equipo pulso eco ultrasónico, de ondas transversales de 50 kHz de frecuencia, que utiliza una técnica de apertura sintética de enfoque (SAFT por sus siglas en inglés). Las barras de acero fueron colocadas con separaciones diferentes para así observar el efecto que ocasionan en un escaneo. Además, las esferas fueron puestas entre estas diferentes configuraciones con el propósito de verificar si su detección era posible. Adicionalmente, se realizó un procesamiento de imágenes para eliminar o reducir el efecto de las barras de acero en los escaneos.

De esta investigación se concluyó que cuando se realizan escaneos sobre franjas donde existan barras de acero #3, #4 o #5, transversales a la línea de escaneo, estos aparecerán en la imagen de ultrasonido con una probabilidad de 35.4%, 41.7% y 62.5% respectivamente. También, si el escaneo se realiza sobre una franja con barras de acero #4 o #5, que tienen la misma dirección del escaneo, estos aparecen en gran magnitud en las imágenes de ultrasonido, por lo que es muy complicado distinguir si existe algún otro material en estas zonas. En cambio, en este último caso, si las barras son #3, estas no aparecen en el escaneo. Por otro lado, las esferas fueron detectadas con una probabilidad de 81.3 %, cuando estas se ubicaban entre aceros separados una distancia mayor o igual a 100 mm.

Palabras clave

Ultrasonido, concreto armado, concreto reforzado, pulso eco, vacíos.

INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción existen procesos constructivos deficientes los cuales provocan problemas en la calidad del concreto elaborado que puede afectar la capacidad de una estructura. Un problema usual producto de estas prácticas suelen ser las cangrejeras, los cuales son vacíos y se presentan comúnmente en la superficie del concreto. Además, en ocasiones las cangrejeras son de gran magnitud que afectan el núcleo del concreto y pueden causar una disminución considerable de las propiedades de los elementos de concreto. Estos vacíos internos no se aprecian a simple vista y una manera rutinaria de verificar su existencia es por medio de extracciones de núcleos de concreto; sin embargo, este método no es económico, es destructivo y requiere de la reparación de los huecos ocasionados por la extracción [1]. Otra manera de detectar estos vacíos en el concreto es por medio de ensayos no destructivos (NDT por sus siglas en inglés). Estos consisten en un amplio grupo de técnicas de análisis para determinar algunas propiedades y condiciones del concreto sin deteriorarlo ni destruirlo [2], por lo tanto, es posible realizar numerosas pruebas en los elementos analizados. El ACI 228.2R-13 [3] resume algunos NDT para el concreto y uno de estos métodos consiste en el uso de ondas pulso eco ultrasónicas para la ubicación de vacíos internos. Un equipo pulso eco ultrasónico posee un grupo de transductores emisores y receptores piezoeléctricos, los cuales permiten a un operador analizar un elemento por una sola cara sin tener la necesidad de acceder a la cara opuesta del elemento.

El pulso eco fue estudiado por Carino et al. [4-8] quienes desarrollaron una técnica de transmisor/receptor pulso eco de impacto. En 1986, Doctor et al. [9] plantearon una técnica de apertura sintética de enfoque (SAFT por sus siglas en inglés), el cual es un procesamiento de señal diseñado con el propósito de optimizar el resultado de un escaneo de área al localizar defectos. Investigaciones tales como las de Shandiz et al. (2001) [10] y Hosseini et al. (2008) [11] utilizaron esta técnica para localizar vacíos. En el año 2010, Tong et al. [12] utilizaron la transformada de Hilbert Huang con el fin de perfeccionar la técnica SAFT en la detección de vacíos dentro del concreto. Esta nueva técnica fue utilizada en investigaciones posteriores tales como las de Cassidy et al. [13] y De La Haza et al.

[14]. Por último, en el año 2016, Haach y Ramirez [15] propusieron la técnica de reconstrucción iterativa simultánea (SIRT por sus siglas en inglés) para detectar elementos cilíndricos dentro del concreto. Para utilizar esta técnica es necesario únicamente dos transductores (emisor y receptor), sin embargo, numerosos escaneos son necesarios para obtener imágenes aceptables.

No obstante, en todos estos estudios, las dimensiones de los elementos internos o vacíos eran muy grandes, los cuales no son típicos en espesores de edificaciones de concreto. Una regla general es que, si se quiere tener una probabilidad razonable de detectar discontinuidades, estas deben ser mayores a la mitad de la longitud de onda [16]. Por ende, en el año 2015, se elaboraron elementos de concreto con esferas de poliestireno expandido de varios tamaños, cercanos a la mitad de la longitud de onda del equipo pulso eco utilizado, con el fin de calcular cuál es la probabilidad de detectar estas esferas con ondas ultrasónicas [17]. De acuerdo a este estudio, existe una probabilidad de 82.35% de detectar esferas de poliestireno expandido de 50 mm de diámetro, y la probabilidad es más baja si las esferas son más pequeñas.

En esta investigación se desarrolla un análisis de la influencia de las barras de acero en la detección de vacíos internos en elementos de concreto, por medio del método pulso eco ultrasónico. Para el desarrollo de esta investigación se elaboraron 15 muros de concreto los cuales contienen barras de acero corrugado #3, #4 y #5 y esferas de poliestireno expandido de 50 mm de diámetro, que representan los vacíos dentro del material. Además, se elaboró un código para eliminar las barras de acero detectadas por las ondas ultrasónicas.

IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

En la actualidad aún no se ha evaluado la influencia de las barras de acero colocado en diferentes configuraciones y de distintos diámetros en imágenes de ultrasonido. Además, no hay información acerca de la posibilidad de detectar vacíos ubicados en diferentes configuraciones de barras de acero.

ALCANCES

Se ha utilizado únicamente concreto con una resistencia característica a la compresión de 210 kg/cm² y barras de acero #3, #4 y #5. Estas características son las más utilizadas en el Perú y otros países de Latinoamérica. También, solo esferas de poliestireno expandido con diámetros de 50 mm se utilizaron, ya que esferas de menor tamaño no son detectadas con una alta probabilidad [17]. Los parámetros de estudio fueron seleccionados de acuerdo a los recursos disponibles.

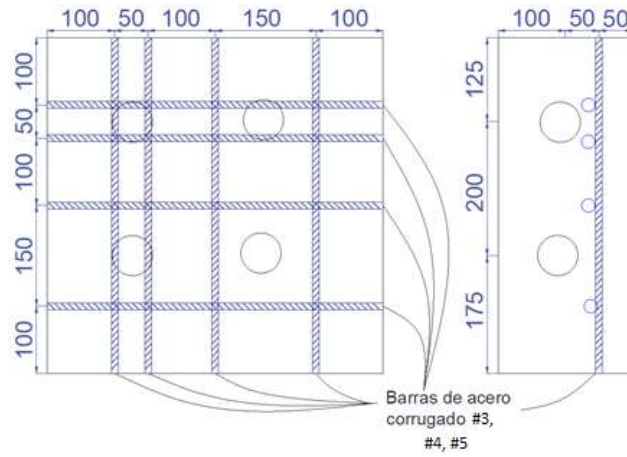
TRABAJO EXPERIMENTAL

Propiedades de los materiales

Se utilizó cemento Portland tipo I acorde con la norma ASTM C150 [18]. El cemento utilizado tiene un peso específico de 3.11, el agregado fino tiene un módulo de finura de 3.09 y un peso específico de 2.63; y el agregado grueso posee un tamaño máximo nominal de 19.05 mm (3/4") y un peso específico de 2.76. Además, se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango para todas las mezclas.

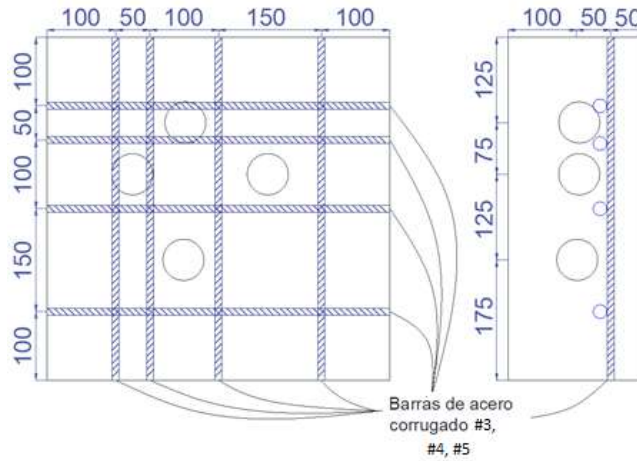
Especímenes elaborados

Se elaboraron 15 muros de concreto armado de 500 x 500 x 200 mm acorde con la norma ASTM C192 [19]. Estos fueron divididos en 3 grupos de 5 unidades cada uno, en el cual cada grupo está conformado por muros únicamente con barras de acero #3, #4 o #5. En cada grupo se tiene dos muros del modelo 1, dos del modelo 2 y uno del modelo 3. Los muros modelo 1 y 2 poseen cuatro esferas de poliestireno expandido, de 50 mm de diámetro, distribuidas de diferente manera en su interior; y el modelo 3 es un bloque patrón sin esferas (véase figura 1, 2, 3 y 4). En cada muro, las esferas fueron ubicadas a una profundidad de 100 mm y la malla de acero a 50 mm del espesor de 200 mm. Por último, se elaboraron probetas cilíndricas de concreto de 150 mm de diámetro (6") y 300 mm de altura (12") por cada muro, para luego ser ensayadas a 28 días en compresión.



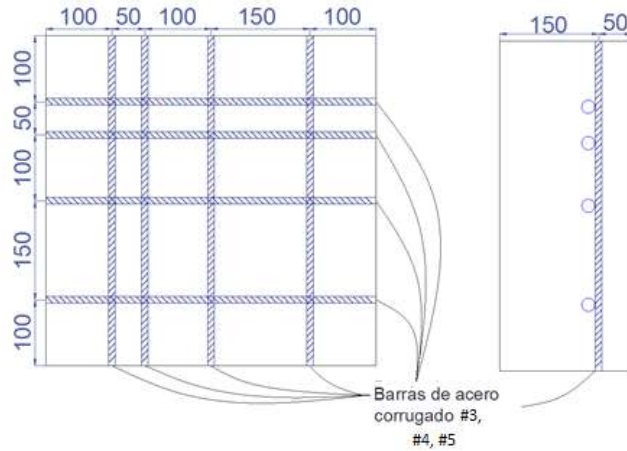
(a) (b)

Figura 1: Modelo 1, muros de concreto armado
 (a)Vista frontal (b) Vista lateral
 Medidas en mm



(a) (b)

Figura 2: Modelo 2, muros de concreto armado
 (a)Vista frontal (b) Vista lateral
 Medidas en mm



(a) (b)

Figura 3: Modelo 3, muros de concreto armado (bloque patrón)
 (a)Vista frontal (b) Vista lateral
 Medidas en mm



(a)

(b)

Figura 4: Encofrado de los muros
(a) modelo 1 (b) modelo 2

Características del concreto

Todos los muros fueron elaborados con una resistencia característica de 210 kg/cm^2 . El slump fue controlado en 150 mm (6"), y el contenido de aire, entre 1 y 3% en el concreto fresco. Todos los especímenes fueron ensayados con el equipo pulso eco ultrasónico a una edad mayor de los 28 días.

Equipo

Para la detección de los elementos internos se utilizó un equipo pulso eco ultrasónico Proceq S.A: Pundit PL-200 PE. Este equipo cuenta con 18 transductores de ondas transversales (Ondas S) de 50 kHz de frecuencia, con el cual se puede realizar escaneos de área en franjas en elementos de concreto. El equipo tiene un ancho de 110 mm, por lo que una franja escaneada tiene aproximadamente este mismo ancho. Para realizar un escaneo de área se debe realizar escaneos parciales sobre toda la longitud de la franja (la distancia entre dos escaneos parciales es definida por el operador). Tener en cuenta que mientras esta distancia es más pequeña, la calidad del escaneo tiene mayor resolución. Por otro lado, el ancho de la franja escaneada es promediado en una línea longitudinal central, por lo que el resultado del escaneo será el eje longitudinal de la franja versus la profundidad del elemento analizado. También, cuando se realiza un escaneo de franja de borde a borde en un elemento, se pierden los 80 mm iniciales y finales de la franja total (compensación horizontal), ya que los escaneos se promedian en la zona central del equipo (el equipo utilizado tiene una longitud de 160 mm). Por lo tanto, es muy complicado encontrar un elemento o vacío interno cerca al borde (zona fuera de rango del equipo, véase figura 5). Por último, el equipo también permite estimar la velocidad de la onda transversal, por medio de la distancia entre sus emisores y receptores usando ondas superficiales.

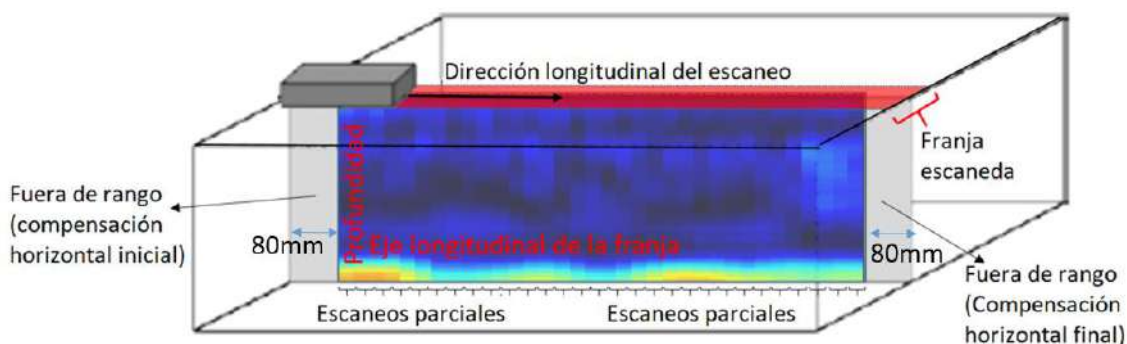


Figura 5. Escaneo con equipo de ultrasonido pulso eco

PROCEDIMIENTO DE ESCANEO

Los muros fueron escaneados por ambas caras de 500 x 500 mm. La cara cuando la malla de acero se encontraba a una profundidad 50 mm se denominó cara F, y la cara opuesta, cuando la malla se encontraba a una de

profundidad de 150 mm, se denominó cara G. Cada cara fue escaneada en franjas horizontales (hacia la derecha) y verticales (hacia arriba) en zonas donde se encuentran las esferas de poliestireno expandido. Los muros modelo 1 fueron escaneados en dos franjas horizontales y dos verticales, los muros modelo 2 en tres franjas horizontales y tres verticales, y los muros modelo 3 fueron escaneadas de la misma manera que el modelo 1, así como el modelo 2 (véase figura 6 y 7).

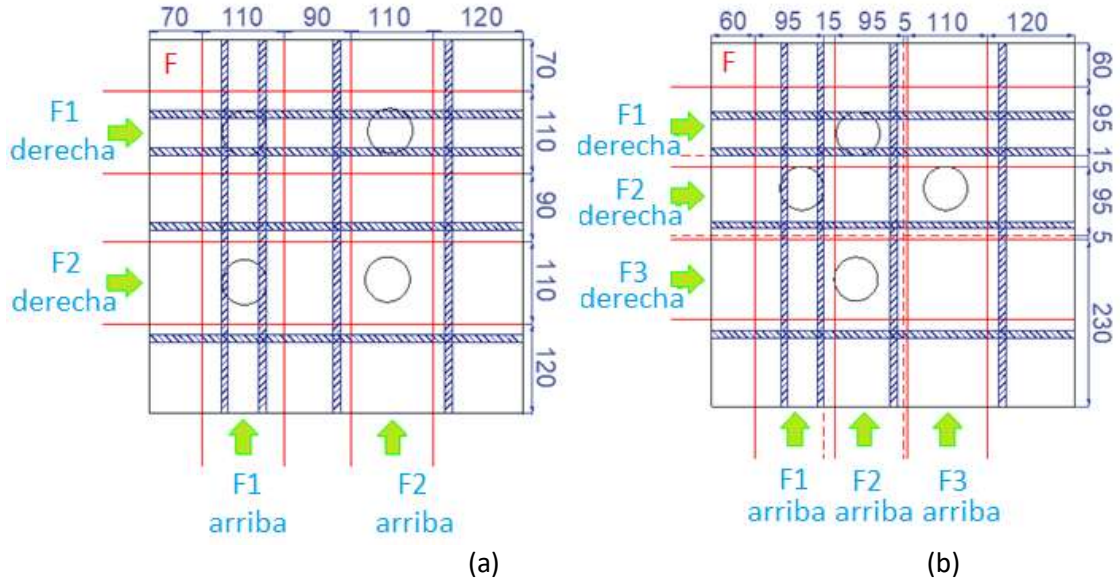


Figura 6: Escaneos horizontales y verticales en los muros – cara F
 Profundidad de la malla: 50 mm (medidas en mm)
 (a) Modelo 1 (b) Modelo 2

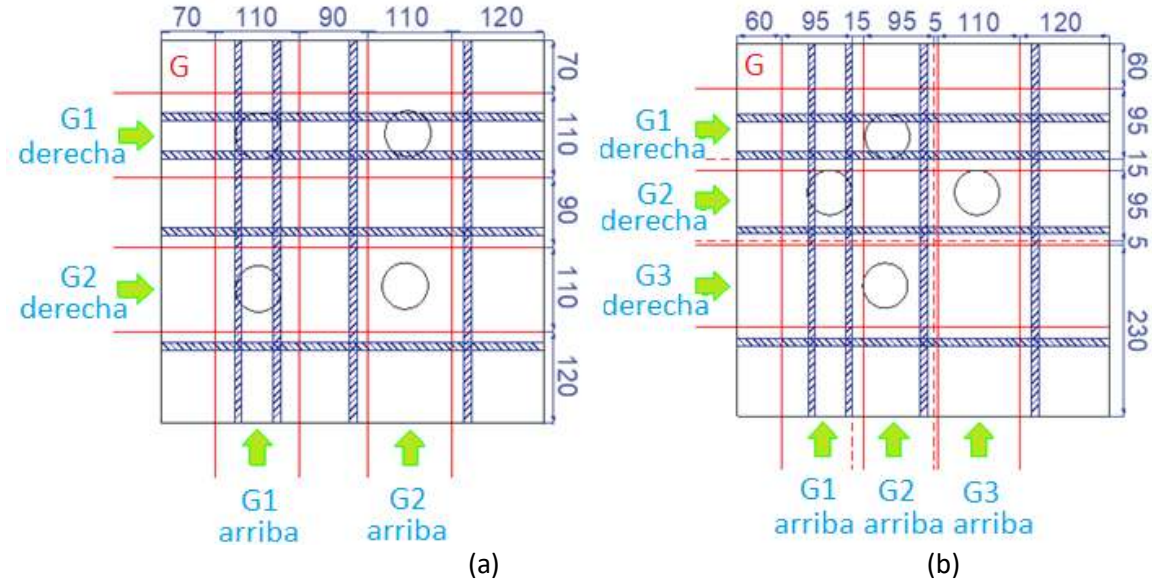


Figura 7: Escaneos horizontales y verticales en los muros – cara G
 Profundidad de la malla: 150 mm (medidas en mm)
 (a) Modelo 1 (b) Modelo 2

RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

Resistencia a la compresión

Por medio de las probetas cilíndricas, se obtuvo una resistencia a la compresión promedio de 260 kg/cm² y una desviación estándar de 10.4 kg/cm² a 28 días.

Probabilidad de detectar barras de acero transversales

En la figura 8 se muestra un escaneo en uno de los muros de concreto con barras #4. Como se aprecia en esta imagen, los aceros transversales a la franja escaneada se muestran como manchas en la imagen de ultrasonido (figura 8(c)), la cual puede ser confundida con un vacío u otro material si no se tiene la certeza que es acero. Además, en este caso se observa que las barras 3 y 4, espaciadas 50 mm, aparecen como una sola mancha en la imagen de ultrasonido (efecto de superposición).

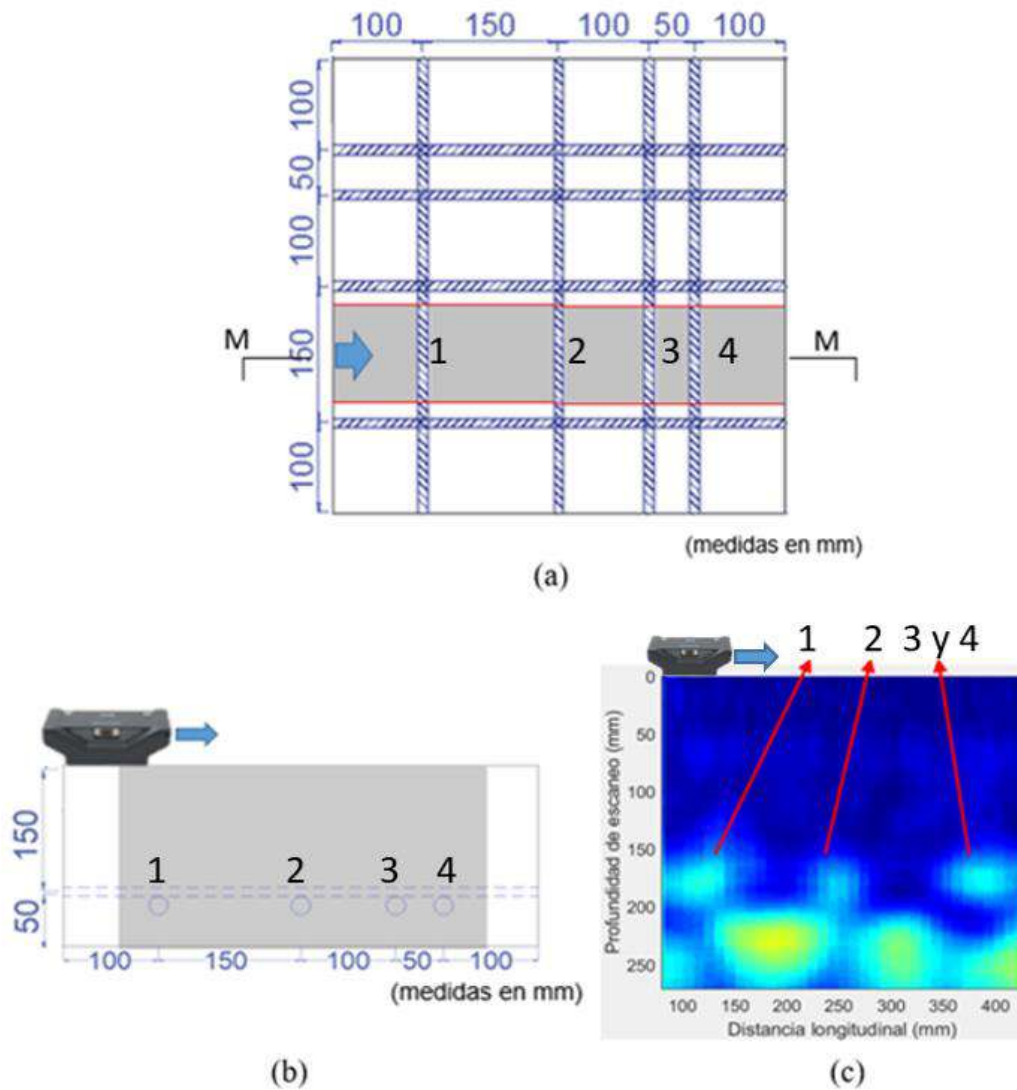


Figura 8: Influencia de acero transversal #4
(a) Vista frontal (b) Vista corte M-M (c) Escaneo de ultrasonido

En la tabla 1 se muestra la probabilidad de detectar barras de acero transversales (la cantidad de veces que fue detectado en las imágenes de ultrasonido). En esta tabla, se aprecia que las barras de acero transversales no son 100% detectadas y si la barra es de menor diámetro, la posibilidad de detección es menor. En la tabla 2, para cada diámetro, el 100% representa solo las barras detectadas en la tabla 1. La tabla 2 muestra que cuando las barras transversales están a una profundidad de 150 mm, la probabilidad de detección con un equipo de ultrasonido es mayor que cuando las barras están a una profundidad de 50 mm. Para este análisis, las barras transversales separadas 50 mm no han sido considerados ya que estas tienden a aparecer como una sola mancha en las imágenes (como se aprecia en la figura 8).

Tabla 1: Probabilidad de detectar barras transversales

Tipo	Detectados	Total	Probabilidad (%)
Acero #5	30	48	62.5
Acero #4	20	48	41.7
Acero #3	17	48	35.4

Tabla 2: Probabilidad de detectar barras transversales de acuerdo a su profundidad

Tipo	Profundidad de 50 mm	Profundidad de 150 mm
Acero #5	40.0%	60.0%
Acero #4	15.0%	85.0%
Acero #3	11.8%	88.2%

Probabilidad de detectar barras de acero longitudinales

Cuando las barras de acero se encuentran en la misma dirección que la franja escaneada, estos pueden aparecer como una mancha continua o en fragmentos en la imagen de ultrasonido, por lo que es complicado distinguir si hay un vacío u otro elemento dentro de la franja analizada. En la figura 9 se muestra un escaneo sobre barras longitudinales #5 separadas 50 mm. Como se aprecia en la imagen, las dos barras aparecen como una mancha continua a una profundidad de 150 mm, lo cual hace muy difícil diferenciar otros elementos en el escaneo. Por ejemplo, en este caso es muy complicado distinguir barras de acero transversales a la dirección del escaneo.

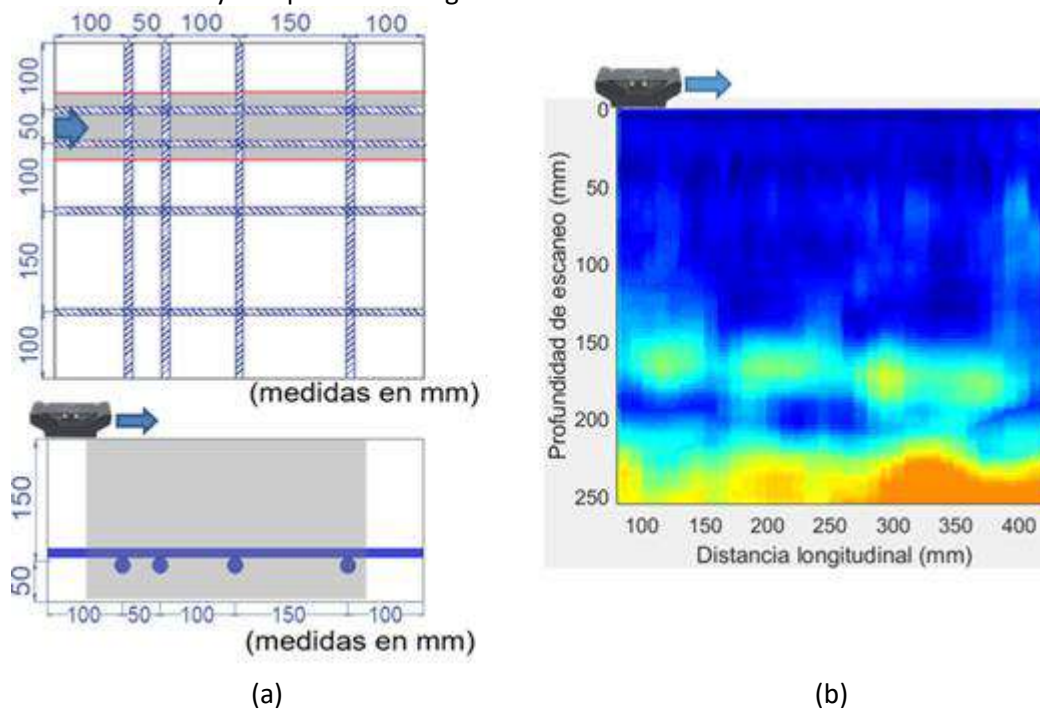


Figura 9: Influencia de barras de acero longitudinales #5 separados 50 mm
 (a) Elemento escaneado (b) Escaneo de ultrasonido

Por otra parte, en la figura 10 se muestra el caso de escaneos sobre barras longitudinales, paralelas a la dirección del escaneo, separadas 100 mm. Como se muestra en la imagen, las dos barras aparecen como una mancha de menos intensidad que si estarían separadas 50 mm. Aunque esta mancha es tenue, la posibilidad de ubicar vacíos o elementos internos dentro del escaneo es casi improbable.

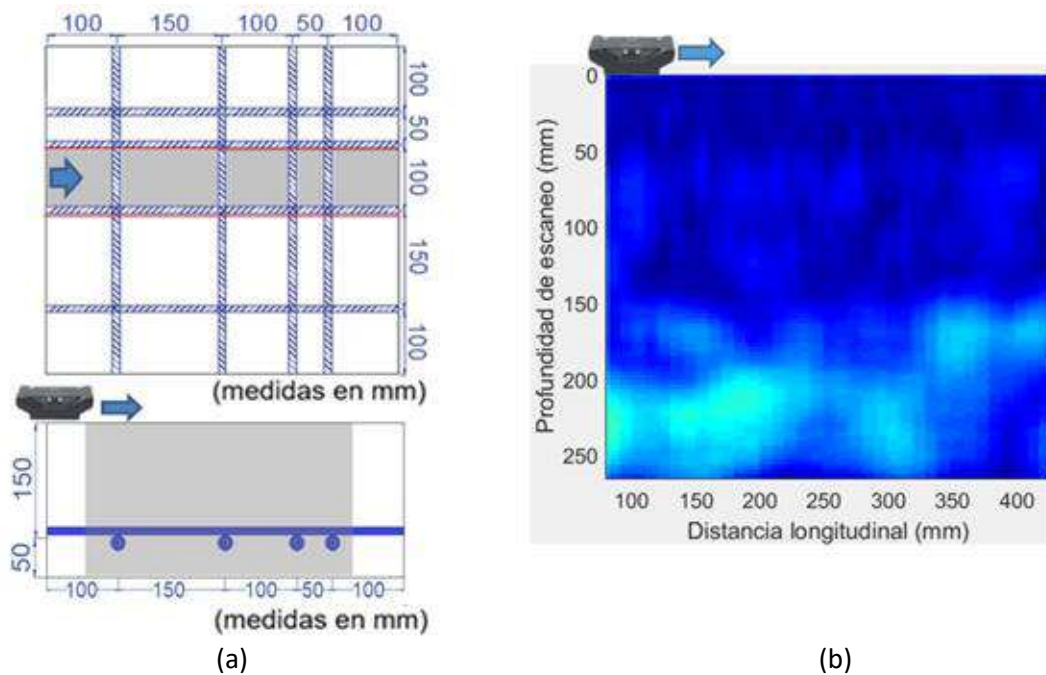


Figura 10: Influencia de aceros longitudinales #5 separados 100 mm
 (a) Elemento escaneado (b) Escaneo de ultrasonido

En la tabla 3 se muestra la probabilidad de detectar barras longitudinales cuando se encuentran separados 50 mm, es decir, cuantas veces fueron detectados en las imágenes de ultrasonido. Por otra parte, en la tabla 4 se aprecia la probabilidad de detectar barras longitudinales de acuerdo a su profundidad. Tener en cuenta, que para este último caso solo se consideraron las barras detectadas en la tabla 3.

Tabla 3: Probabilidad de detectar barras longitudinales distanciados 50 mm.

Tipo	Detectados	Total	Probabilidad (%)
Acero #5	19	24	79.2
Acero #4	13	24	54.2
Acero #3	0	24	0.0

Tabla 4: Probabilidad de detectar barras longitudinales de acuerdo a su profundidad.

Tipo	Profundidad de 50 mm	Profundidad de 150 mm
Acero #5	52.6%	47.4%
Acero #4	46.2%	53.8%
Acero #3	-	-

En la tabla 5 se muestra la probabilidad de detectar aceros longitudinales cuando se encuentran separados 100 mm, es decir, cuantas veces fueron detectado en las imágenes de ultrasonido. En la tabla 6, se presenta la probabilidad de detectar barras longitudinales de acuerdo a su profundidad. Tener en cuenta, que para este último caso solo se consideraron las barras detectadas en la tabla 5.

Tabla 5: Probabilidad de detectar barras longitudinales distanciados 100 mm.

Tipo	Detectados	Total	Probabilidad (%)
Acero #5	9	12	75.0
Acero #4	4	12	33.3
Acero #3	0	12	0.0

Tabla 6: Probabilidad de detectar barras longitudinales de acuerdo a su profundidad.

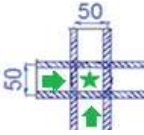
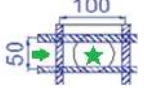
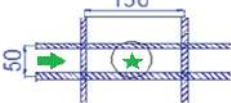
Tipo	Profundidad de 50 mm	Profundidad de 150 mm
Acero #5	55.6%	44.4%
Acero #4	50.0%	50.0%
Acero #3	-	-

De la tabla 3 y 5 se puede apreciar que las barras #3 no fueron detectadas. También, la probabilidad de detectar barras longitudinales es mayor cuando están separados 50 mm que cuando están separados 100 mm. Por otro lado, en las tablas 4 y 6 se muestra que no hay diferencia si las barras están a 50 o 150 mm de profundidad, la probabilidad de detectarlos es parecida.

Esferas detectadas

En las tablas 7, 8, 9 y 10 se muestran el porcentaje de esferas detectadas según la distribución de los aceros a su alrededor (las flechas indican la dirección del escaneo). En la tabla 7 se aprecia el porcentaje de esferas detectadas entre aceros distanciados a 50 mm, con la misma dirección del escaneo, y como se analizó anteriormente, la influencia de este acero en un escaneo es considerable, por lo que la posibilidad de ubicar elementos internos en franjas de este tipo es baja. Tener en cuenta que la probabilidad obtenida en la tabla 7 es referencial, ya que, para este análisis, las manchas que se consideró como esferas detectadas tienen parte del efecto de las barras de acero.

Tabla 7: Probabilidad referencial al detectar esferas entre barras longitudinales separadas 50 mm

Configuración	Barras de acero #5			Barras de acero #4			Barras de acero #3		
	Detectado	Total	Probabilidad	Detectado	Total	Probabilidad	Detectado	Total	Probabilidad
	2	8	25.0%	3	8	37.5%	3	8	37.5%
	6	8	75.0%	7	8	87.5%	4	8	50.0%
	2	8	25.0%	2	8	25.0%	6	8	75.0%

Medidas en mm.

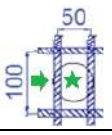
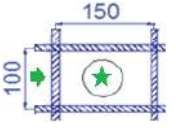
Por otra parte, en la tabla 8 se muestra el porcentaje de esferas detectadas entre barras de acero espaciadas 100 mm con la misma dirección del escaneo. Como se aprecia en el caso anterior, la influencia de las barras de acero con la misma dirección del escaneo es considerable, por lo que la posibilidad de detectar elementos internos en franjas de este tipo es relativamente baja. Como en la tabla 7, el porcentaje obtenido en la tabla 8 es referencial ya que las manchas que fueron consideradas como esferas detectadas podrían incluir parte del efecto de las barras de acero.

En la tabla 9 se muestra la probabilidad de detectar una esfera y dos barras de acero transversales espaciadas 50 mm. En este tipo de escaneo, la esfera y las barras de acero aparecen como una sola mancha por lo que no es posible especificar que solo la esfera fue detectada. También de la tabla 9 se puede inferir que, aunque estos tres elementos están muy cercanos, la probabilidad de detectarlos no es 100%.

En la tabla 10 se muestra la probabilidad de detectar esferas cuando estas se encuentran ubicadas entre barras de acero longitudinales espaciadas igual o mayor a 150 mm, y entre barras de acero transversales espaciadas mayor o igual a 100 mm. Esta tabla también presenta que la probabilidad de detección de estas esferas es alta ya

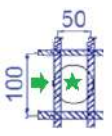
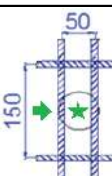
que los aceros alrededor están lo suficientemente alejados por lo que su influencia es prácticamente nula. También se muestra que la probabilidad de detectar esferas de 50 mm de diámetro en esta configuración no es 100%. Finalmente, en la tabla 11 se presenta la probabilidad de detectar esferas de 50 mm de diámetro. Para este último caso, solo se ha considerado las esferas detectadas en la tabla 10.

Tabla 8: Probabilidad referencial al detectar esferas entre barras longitudinales separadas 100 mm

Configuración	Barras de acero #5			Barras de acero #4			Barras de acero #3		
	Detectado	Total	Probabilidad	Detectado	Total	Probabilidad	Detectado	Total	Probabilidad
	8	8	100.0%	7	8	87.5%	8	8	100.0%
	8	8	100.0%	5	8	62.5%	7	8	87.5%

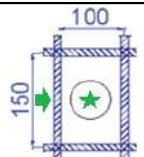
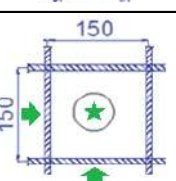
Medidas en mm.

Tabla 9: Probabilidad de detectar una esfera y dos barras transversales espaciadas 50 mm

Configuración	Barras de acero #5			Barras de acero #4			Barras de acero #3		
	Detectado	Total	Probabilidad	Detectado	Total	Probabilidad	Detectado	Total	Probabilidad
	8	8	100.0%	7	8	87.5%	8	8	100.0%
	7	8	87.5%	8	8	100.0%	8	8	100.0%

Medidas en mm.

Tabla 10: Probabilidad de detectar una esfera entre barras de acero espaciadas mayor o igual a 100 mm

Configuración	Barras de acero #5			Barras de acero #4			Barras de acero #3		
	Detectado	Total	Probabilidad	Detectado	Total	Probabilidad	Detectado	Total	Probabilidad
	7	8	87.5%	6	8	75.0%	6	8	75.0%
	7	8	87.5%	6	8	75.0%	7	8	87.5%
TOTAL	14	16	87.5%	12	16	75.0%	13	16	81.3%

Medidas en mm.

Tabla 11: Esferas detectadas entre barras de acero espaciadas mayor o igual a 100 mm

Detectadas	Total	Probabilidad (%)
39	48	81.3

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PARA ELIMINAR EL EFECTO DEL ACERO TRANSVERSAL

Como se apreció en las tablas anteriores, el acero transversal incide en gran parte en los escaneos realizados con un equipo pulso eco ultrasónico, por lo que se desarrolló un procesamiento de imágenes con el fin de desaparecer o minimizar al máximo la interferencia del acero transversal a la línea de escaneo. Para esto, se escanearon todos los muros por medio de un detector de metales en las mismas franjas escaneadas con el equipo pulso eco ultrasónico. La idea de esto es utilizar la señal del detector de metales como un filtro empírico experimental en la imagen de ultrasonido.

Procesamiento de la señal del detector de metales

Se utilizó un equipo profometer 630 Ai, el cual permite realizar escaneos en franjas. Este equipo posee bobinas, que generan un campo magnético, el cual es afectado por la corriente inducida en las barras de acero. Tener en cuenta que este dispositivo no abarca una profundidad mayor a los 100 mm, por lo que solo se escaneo la cara de los muros, en la que la malla de acero se encontraba a 50 mm de profundidad.

Cada escaneo en franja realizado con el equipo pulso eco ultrasónico, de borde a borde, tiene una compensación horizontal de 80 mm inicial y final. Sin embargo, en el caso del detector de metales en un escaneo de franja se tiene una compensación horizontal de 40 mm inicial y final. En la figura 11(a) se muestra un escaneo en franja, de un elemento de concreto armado con un detector de metales, en el cual el eje "y" es la variación del campo magnético debido a las barras de acero (escalado a 1), y el eje "x", la longitud de la franja escaneada. En este caso, las barras en el concreto son del mismo diámetro, sin embargo, las intensidades generadas por las dos primeras barras transversales no son completamente iguales, y, además, las dos últimas barras se encuentran muy cerca, por lo que sus intensidades se superponen y no dejan que la intensidad entre ellos sea cero. También, se aprecia que la señal tiene algo de ruido, por lo que lo ideal es suavizarla.

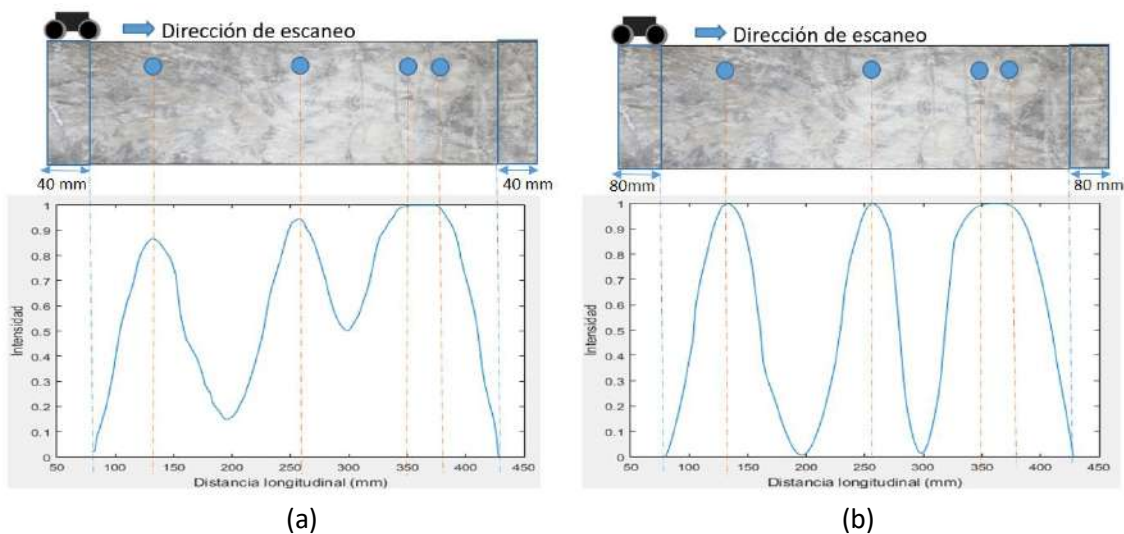


Figura 11: Señal del detector de metales. (a) Sin procesar (b) procesado

Para lograr lo dicho anteriormente, se realizó una serie de pasos. Primero, para poder filtrar la imagen de ultrasonido con la del detector de metales, se necesita que ambos tengan la misma distancia longitudinal. En el caso de que se haya realizado un escaneo de borde a borde, la imagen de ultrasonido ha perdido los primeros y últimos 80 mm, y del detector de metales solo 40 mm en cada lado; por lo tanto, se recortó la señal del detector de metales 40 mm (1.57 in) a cada lado (la compensación horizontal depende de los equipos utilizados). Segundo, la señal del detector de metales se suavizó con un filtro promedio lineal del tipo: (0.2 0.2 0.2 0.2 0.2). Tercero, la señal se escaló a una intensidad máxima de 1. Cuarto, los picos de la señal poseen diferente amplitud (por efectos del diámetro, grado de oxidación, profundidad de la barra, entre otros), y también que cuando los aceros transversales se encuentran muy cerca, estos picos se superponen y no dejan que la intensidad entre ellos sea cero. Entonces, por medio de Matlab se incrementó estos picos máximos a 1, si eran mayores a 0.3, y picos

mínimos a 0, si eran menores de 0.7 (este valor puede ser cambiado dependiendo de la experiencia del operador, sin embargo, es recomendable utilizar un valor de 0.3 y 0.7). De este modo se obtuvo una nueva señal como vector $1 \times N$. En la figura 11(b) se muestra la señal obtenida en 11(a) suavizada y escalada. En este caso, la superposición de las dos últimas barras no pudo ser separadas.

Procesamiento de la imagen de ultrasonido

Primero, la imagen se convirtió en escala de grises como una imagen jpg o png. Debido a esto, la matriz de 5 dimensiones (distancia longitudinal, profundidad, RGB color) se reduce a 3, es decir a una matriz $A \times B$, en el cual cada elemento de la matriz tiene un valor del 0 a 255 (intensidad de color de grises). Segundo, la imagen $A \times B$ fue escalada con el fin de que B sea igual a N (la longitud de la señal del detector de metales). Tercero, la intensidad de la matriz fue escalada de [0, 255] a [0, 1]. Por último, esta nueva matriz es mostrada en colormap jet [0, 1.5] en MATLAB para obtener una imagen similar a la original (si es necesario se puede cambiar este valor de 1.5 a lo deseado).

Filtro de imagen

Cada imagen de ultrasonido $M \times N$ se dividió en tres secciones de filas. La sección 1 está conformado desde la primera fila hasta la fila donde se encuentre el “Espesor – 20 mm”, la sección 2 desde la fila “Espesor – 20 mm” hasta “Espesor + 20 mm”, y la sección 3 de la fila Espesor + 20 mm” hasta el final. En la figura 12(a) se muestra el escaneo de uno de los muros de concreto y en la figura 12(b) la imagen obtenida de ultrasonido, donde las tres secciones mencionadas en la imagen de ultrasonido $M \times N$ son mostradas (colormap: jet). En este ejemplo, el espesor del elemento es de 200 mm: la sección 1 es desde la fila 1 hasta la fila donde se ubica los 180 mm; la sección 2, desde la fila de los 180 mm hasta la fila de los 220 mm; y la sección 3, desde la fila de los 220 mm hasta la última fila de la imagen de ultrasonido.

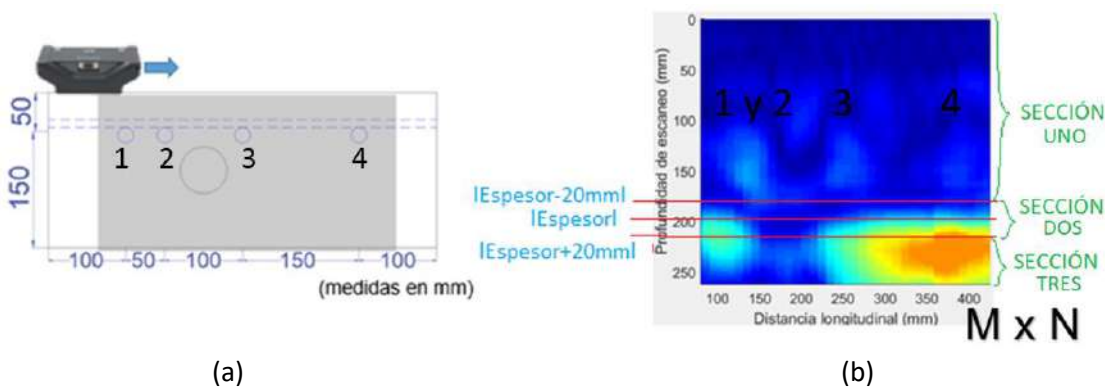


Figura 12: Secciones para el filtro en un concreto con barras #4
 (a) Elemento escaneado (b) Escaneo de ultrasonido

Para el filtrado de las imágenes de ultrasonido se utilizaron dos filtros. Para la sección 1 se utilizó el filtro 1; para la sección 3, el filtro 2; y para la sección 2, una combinación del filtro 1 y 2. Para entender de mejor manera estos filtros, se utilizará el escaneo de la figura 13 como ejemplo. En este caso se aprecia en la imagen de ultrasonido que las dos barras transversales aparecen como una sola mancha, la esfera deja una abertura en el borde final (no aparece como mancha), la tercera barra aparece como otra mancha y la cuarta barra como una mancha muy tenue.

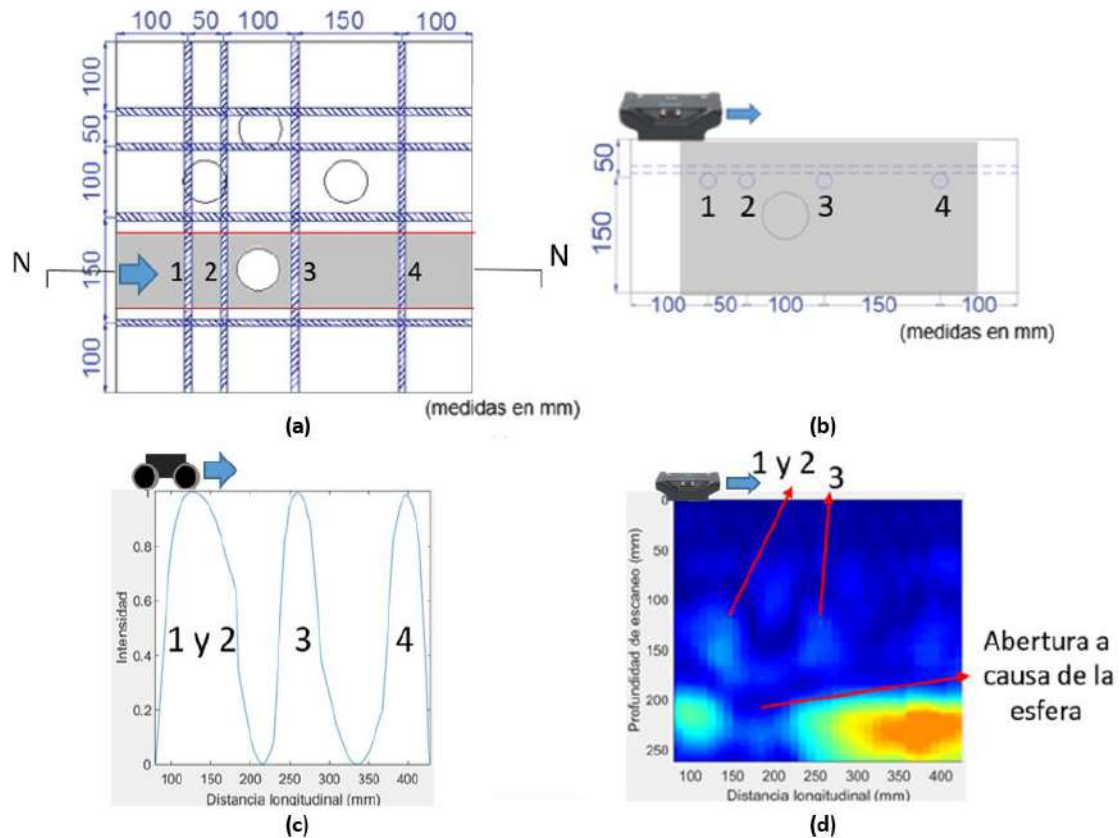


Figura 13: Ejemplo de filtro en un muro de concreto con barras #4
 (a) Vista frontal (b) vista N-N (c) Escaneo del detector de metales (d) Escaneo de ultrasonido

a) Filtro 1: sección 1

Este filtro reduce las manchas dejadas por las barras de acero transversales de la imagen de ultrasonido. Para ello, cada fila "1 x N", "2 x N", ..., " $|Espesor - 20 \text{ mm}| \times N$ " es dividido por el vector 1 x N del detector de metales. De este modo la intensidad de las manchas de acero, si es que hubiese, se reducen considerablemente. En la figura 14(a) se muestra la imagen de ultrasonido antes de ser procesado; la figura 14(b), la imagen luego de ser procesado con el filtro 1, el cual desaparece las manchas de los aceros transversales de la figura 14(a).

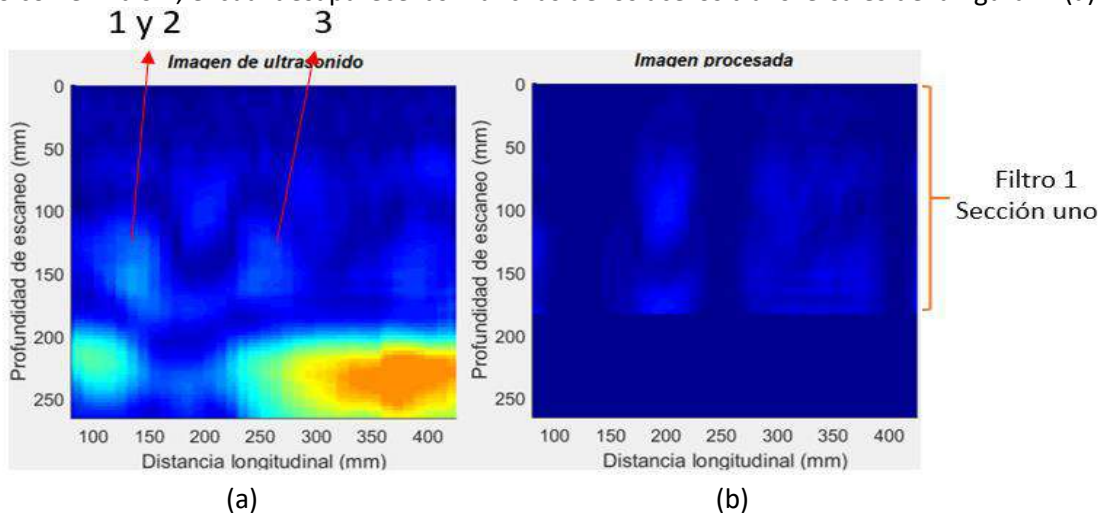


Figura 14: Filtro 1 – sección uno.

(a) Imagen de ultrasonido (b) Imagen procesada con el filtro 1

b) Filtro 2: sección 3

Este filtro rellena las aberturas dejadas por el acero, en el espesor, en la imagen de ultrasonido. Para ello, cada fila " $|Espesor + 20 \text{ mm}| \times N$ ", " $|Espesor + 20 \text{ mm} + 1| \times N$ ", ..., " $M \times N$ " es multiplicado por el vector "1 x N" del

detector de metales. De este modo la intensidad de las sombras de acero en la imagen de ultrasonido, si es que hubiese, se incrementa considerablemente. En la figura 15(a) se muestra la figura obtenida con el equipo de ultrasonido; en la figura 15(b), la imagen ya está procesada en las secciones 1 y 3. Como se aprecia, el filtro 2 ha llenado todas las aberturas causadas por las barras de acero transversales; sin embargo, una abertura aún es mostrada, el cual es la abertura ocasionada por la esfera.

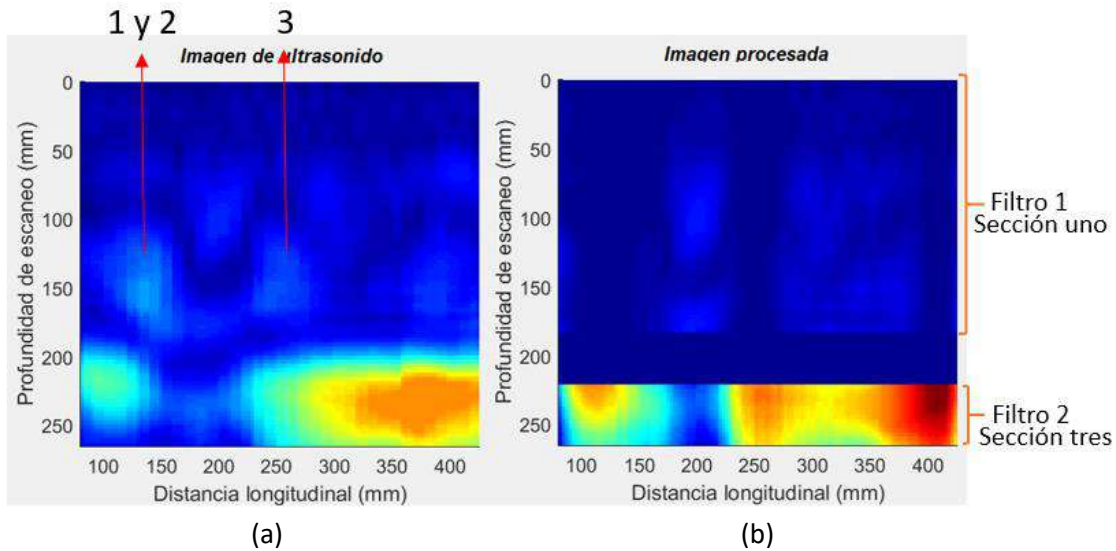


Figura 15: Filtro 2 – sección tres
 (a) Imagen de ultrasonido (b) Imagen procesada con el filtro 1 y 2

c) Filtro 1 y 2: sección 2

Para evitar efectos de borde o de frontera en la imagen de ultrasonido, se realiza una combinación lineal de los filtros 1 y 2 entre las filas “|Espesor – 20 mm|” y “|Espesor + 20 mm|”. En la figura 16(a), la imagen obtenida con el equipo de ultrasonido es mostrado; en la figura 16(b), la imagen completamente procesada. Como se muestra en la imagen, en la sección dos, una combinación de los filtros 1 y 2 es aplicado para que exista una continuidad entre las secciones uno y tres. La figura 16(b) presenta la imagen de ultrasonido sin manchas y aberturas generadas por las barras de acero transversales, y la única abertura que se muestra es debido a la esfera.

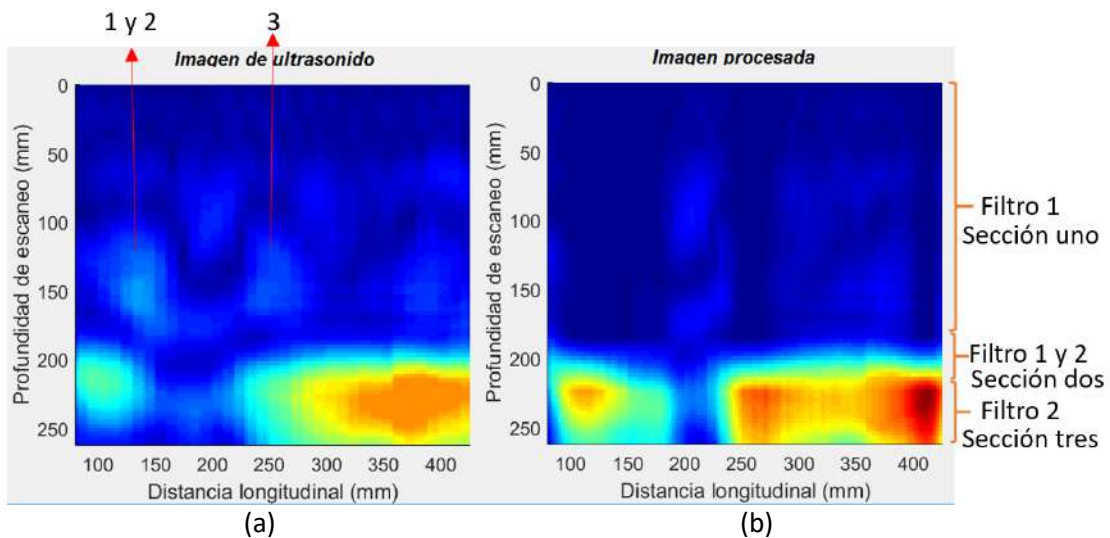


Figura 16: Filtro 1 y 2 – sección dos
 (a) Imagen de ultrasonido (b) Imagen procesada completamente

En la figura 17 se muestra otro ejemplo de un escaneo. La figura 17(a) presenta la vista frontal de un muro de concreto; la figura 17(b), la vista N-N; la figura 17(c), la señal del detector de metales ya procesada; la figura 17(d), la imagen de ultrasonido sin procesar; y la imagen 17(e), la imagen procesada completamente. En la figura 17(d), las barras de acero 1 y 2 aparecen con la esfera como una única mancha, las barras 3 y 4 no aparecen, y la segunda esfera genera una abertura en la imagen. En la figura 17(e) se muestra que la mancha generada por las barras 1 y 2 han desaparecido completamente y solo la primera esfera es mostrada, como también la abertura generada por la segunda esfera. Es importante mencionar que esta nueva imagen de ultrasonido ha perdido su naturaleza inicial, por lo que la imagen procesada es únicamente con fines de visualización.

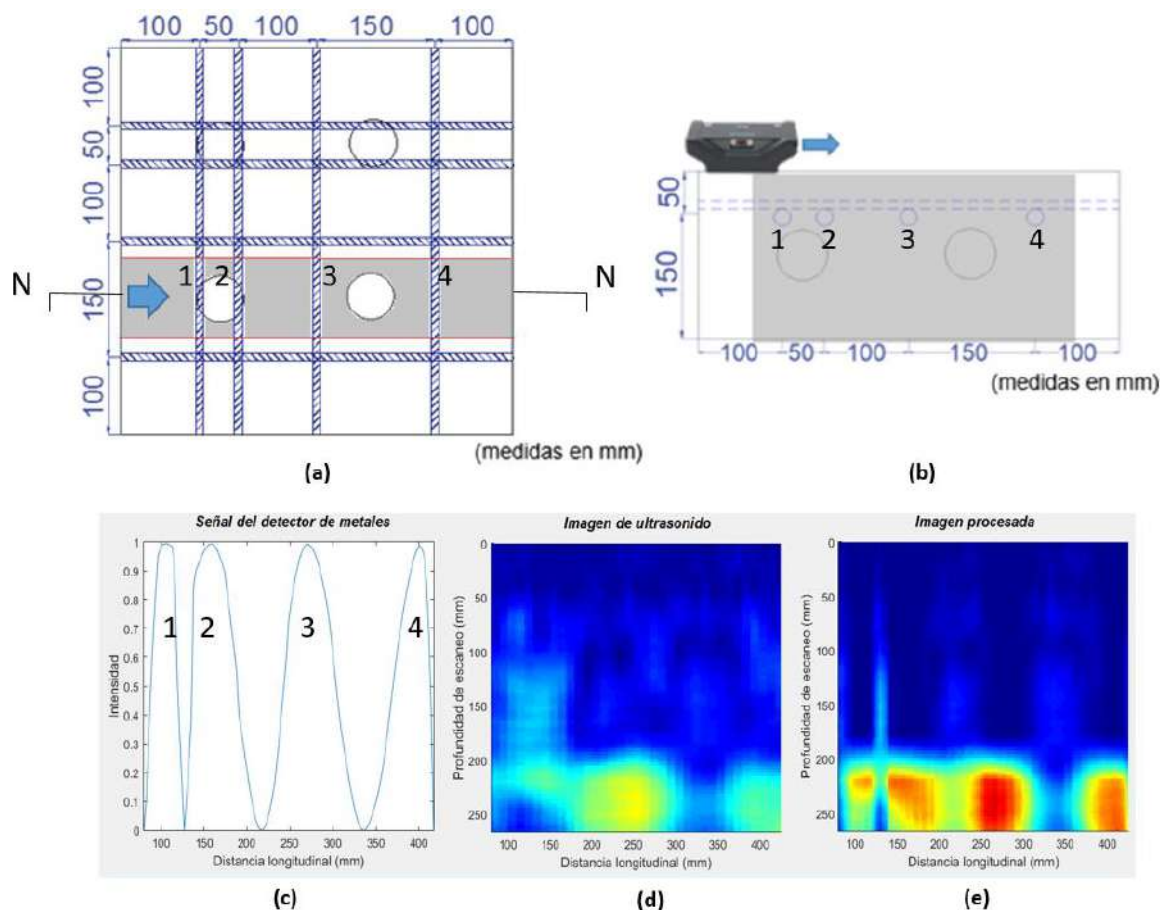


Figura 17: Ejemplo de filtro de un elemento de concreto con barras de acero #5
 (a) Vista frontal del elemento escaneado (b) Corte N-N
 (c) Señal del detector de metales obtenida
 (d) Imagen de ultrasonido sin procesar (e) Imagen de ultrasonido procesada

USO DEL PROGRAMA EN OBRA

Arranques de puente

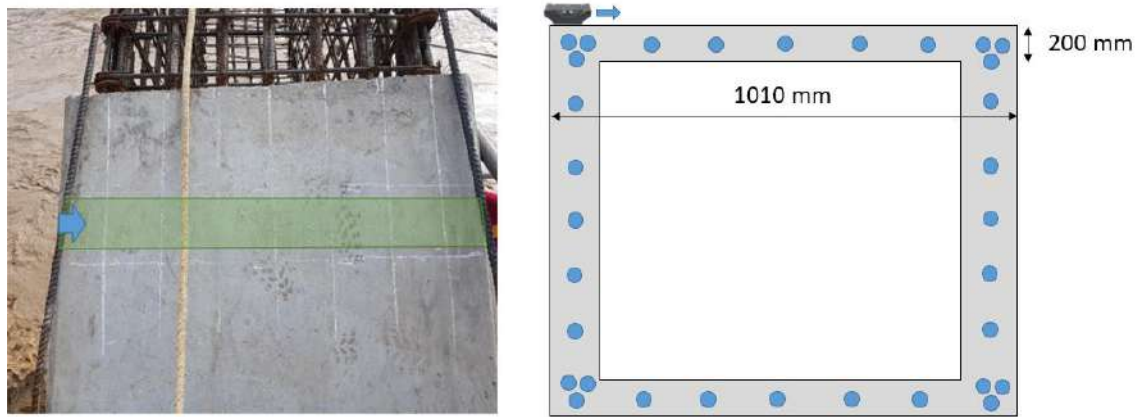
El puente en estudio está localizado en Chacanto, Cajamarca, Perú y se encontraba aún en construcción (véase figura 18). El escaneo de los arranques del puente fue realizado por medio de un equipo de ultrasonido y detector de metales. En este caso se quería verificar si existían cangrejeras internas en los elementos de concreto.

El escaneo se realizó en las cuatro caras de cada estribo por medio del equipo pulso eco ultrasónico, como también con un equipo detector de metales. En la figura 19(a) se muestra la zona escaneada de uno de los arranques y en la figura 19(b), la sección transversal del arranque. En la figura 20 se presenta la señal del detector de metales la imagen de ultrasonido obtenida y la imagen ya procesada de la cara superior de uno de los arranques (figura 19(a)). En la figura 20(c) se aprecia que se ha podido eliminar casi completamente las manchas ocasionadas

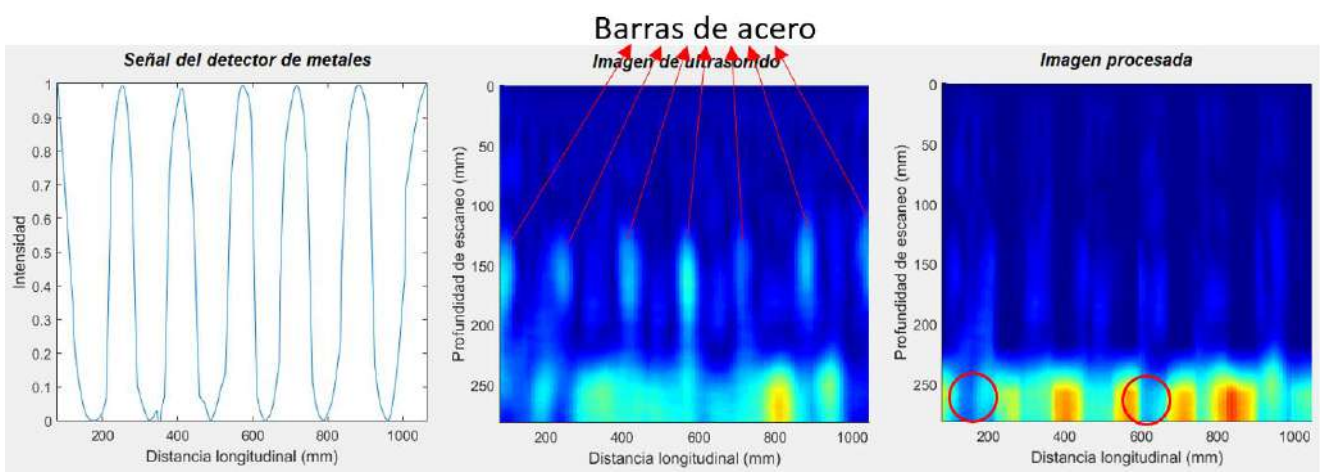
por las barras de acero. Sin embargo, al rellenar las sombras dejadas por los aceros, se aprecian zonas que no fueron rellenadas completamente (véase en la imagen los círculos rojos), por lo que se deduce que es probable que existan elementos internos o vacíos en el elemento de concreto. Sin embargo, al revisar nuevamente los elementos de concreto se verificó que en ciertos puntos se ubicaban ganchos, por lo que es posible que estas dos sombras se hayan dado a causa de estos.



(a) (b)
 Figura 18: Arranques del puente en construcción.
 (a) Vista global (b) Vista de un arranque



(a) (b)
 Figura 19: Escaneo superior de arranque del puente
 (a) Vista superior del puente (b) Vista frontal referencial del escaneo



(a) (b) (c)
 Figura 20: Escaneos del puente Chacanto
 (a) Señal del detector de metales (b) Imagen del pulso eco ultrasónico (c) Imagen procesada

Cisterna

Por otra parte, se realizó el escaneo de una cisterna de un muro perimetral en Tacna, en el cual también se quería verificar la existencia de vacíos internos en el elemento de concreto (véase figura 21). El muro tenía un grosor de 250 mm y barras de acero #4. En la figura 22 se muestra el escaneo y el procesamiento de imagen realizado en una porción del muro perimetral. En la figura 22(b), las barras de acero aparecen como aberturas en la imagen de ultrasonido, sin embargo, cuando la imagen es procesada, todas las aberturas son rellenadas a excepción de una (véase figura 22(c)). Este muro perimetral tenía una doble malla, por lo que es probable que el detector de metales solo haya detectado la malla más cercana a la cara de análisis y no la segunda malla. Por lo tanto, es probable que esta abertura en la figura 22(c) haya sido generada por una barra de acero de la malla profunda.



Figura 21: Escaneo de cisterna.

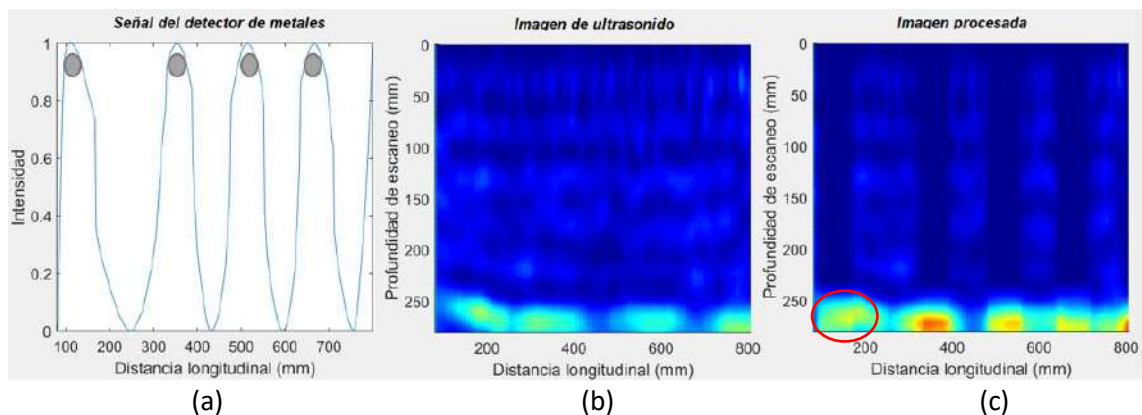


Figura 22: Procesamiento de señales - Tacna.

a) Señal del detector de metales (b) Imagen del pulso eco ultrasónico (c) Imagen procesada

METODOLOGÍA

Cuando se deseen realizar escaneos en elementos de concreto armado, es necesario antes ubicar la posición de las barras de acero horizontal y vertical por medio de un detector de metales. Tener en cuenta que no se deberían realizar escaneos en franjas sobre acero #4 o de mayor diámetro, que se encuentre en la misma dirección que el

escaneo. Luego, se debe obtener la velocidad de la onda transversal en el material por medio del grosor del elemento, si es que este es conocido, o sino estimarlo por medio de los transductores.

En caso de que se ubique un vacío o elemento en el interior del concreto se debe verificar que este no sea una barra de acero por medio del detector de metales. Si esta anomalía se descarta como acero, se debe realizar un escaneo de franja perpendicular a la franja escaneada inicial por la zona en controversia, para así asegurar que dicho elemento o vacío se encuentra realmente en el interior del elemento de concreto. Por último, se puede filtrar la imagen de ultrasonido con la señal del detector de metales para así visualizar la imagen sin presencia de aceros transversales a la línea de escaneo.

4. Conclusiones y recomendaciones

Basado en este estudio se puede concluir lo siguiente:

- Para detectar vacíos en el concreto armado usando un pulso eco ultrasónico, es imprescindible el uso de un equipo de detector de metales, ya que las barras de acero aparecen en los escaneos de ultrasonido.
- El acero transversal a la franja escaneada aparece con mayor probabilidad cuando este es de mayor diámetro y disminuye cuando es de menor dimensión. Además, es más probable detectar un acero transversal que se encuentre a una profundidad de 150 mm que aquel que se encuentre a 50 mm. Este efecto se puede dar ya que las ondas necesitan aproximadamente los primeros 50 mm para estabilizarse entre sí, por lo que es complicado detectar vacíos o elementos internos en esta zona.
- Cuando se realizaron escaneos sobre aceros longitudinales #4 o #5 (con la misma dirección que la franja escaneada) distanciados 50 mm, estos se mostraban en gran magnitud en las imágenes de ultrasonido, por lo que es muy complicado distinguir si existe algún otro material en estas zonas. Sin embargo, en el caso de escanear sobre aceros longitudinales #3 separados 50 mm o 100 mm, las barras de acero no aparecen en las imágenes, por lo que existe la posibilidad de ubicar vacíos u objetos dentro de la franja analizada, pero no es recomendable.
- En escaneos sobre aceros longitudinales #4 o #5 que estén distanciados 100 mm, la probabilidad de que estos aparezcan como manchas es menor que a los que estaban distanciados 50 mm. No obstante, aún existe la probabilidad de confundir estos aceros con otros elementos si no se tiene la certeza que son barras de acero.
- El equipo es eficiente para detectar esferas de 50 mm con una probabilidad de 81.3% en concreto reforzado cuando se analicen franjas con aceros en la misma dirección del escaneo, distanciados mayor o igual que 150 mm, o con aceros transversales distanciados mayor o igual a 100 mm. Esta confiabilidad es muy cercana al valor 82.35% obtenida en una investigación pasada al ubicar esferas de poliestireno expandido de 50 mm de diámetro [17].
- En las imágenes del puente o la cisterna se pudo apreciar la efectividad del código desarrollado, sin embargo, este puede mejorarse dependiendo el caso en análisis.
- Por último, el programa desarrollado es útil para eliminar o reducir de la imagen de ultrasonido el efecto del acero transversal a la dirección del escaneo, y así ver únicamente en un escaneo la presencia de vacíos o elementos internos. Este programa ha sido desarrollado sólo con fines de visualización, ya que la matriz de cada imagen ha perdido su naturaleza inicial. Tomar en cuenta que el programa puede no ser completamente eficaz si es que la calidad de la señal e imagen obtenida ha sido deficiente.

Agradecimientos

Este proyecto fue realizado gracias a los fondos de becas para estudios de postgrado de CONCYTEC PERÚ. La elaboración de los elementos y los ensayos fueron realizados gracias al Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Referencias

1. Carino, N. J., and Sansalone, M., "Pulse-Echo Method for Flaw Detection in Concrete," Final Report, Center for Building Technology, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1984.
2. Hoła, J., and Schabowicz, K., "State-of-the-Art Nondestructive Methods for Diagnostic Testing of Building Structures—Anticipated Development Trends," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, V. 10, No. 3, 2010, pp. 5-18. doi: 10.1016/S1644-9665(12)60133-2.
3. ACI Committee 228, "Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (ACI 228.2R-13)," American Concrete Institute Farmington Hills, MI, 2013, 82 pp.
4. Carino, N. J., "Laboratory Study of Flaw Detection in Concrete by the Pulse-Echo Method," In *Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, SP-82, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1984, pp. 557-580.
5. Carino, N. J., and Sansalone, M., "Detection of Voids in Grouted Ducts Using the Impact-Echo Method," *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 3, May-June 1992, pp. 296-303.
6. Carino, N. J.; Sansalone, M.; and Hsu, N., "A Point Source Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 83, No. 2, Mar.-Apr. 1986, pp. 199-208.
7. Sansalone, M., and Carino, N. J., "Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves," NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 1986.
8. Carino, N. J., and Sansalone, M., "Detecting Voids in Metal Tendon Ducts Using the Impact-Echo Method," *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 3, May-June 1992, pp. 296-303.
9. Doctor, S. R.; Hall, T. E.; and Reid, L. D., "SAFT—The Evolution of a Signal Processing Technology for Ultrasonic Testing," *NDT & E International*, V. 19, No. 3, 1986, pp. 163-167. doi: 10.1016/0308-9126(86)90105-7.
10. Shandiz, H. T., and Gaydecki, P. A., "An Enhanced, High-Speed Ultrasonic SAFT System for Imaging of Defects within Concrete Structures," D. O. Thompson, D. E. Chimenti, and L. Poore, eds., *AIP Conference Proceedings*, 2001, pp. 703-709.
11. Hosseini, Z.; Momayez, M.; Hassani, F.; Lévesque, D.; Thompson, D. O.; and Chimenti, D. E., "Detection of Inclined Cracks inside Concrete Structures by Ultrasonic SAFT," *AIP Conference Proceedings*, V. 975, 2008, pp. 1298-1304. doi: 10.1063/1.2902583.
12. Tong, J. H.; Chiu, C. L.; and Wang, C. Y., "Improved Synthetic Aperture Focusing Technique by Hilbert-Huang Transform for Imaging Defects inside a Concrete Structure," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, V. 57, No. 11, 2010.
13. Cassidy, N. J.; Eddies, R.; and Dods, S., "Void Detection beneath Reinforced Concrete Sections: The Practical Application of Ground Penetrating Radar and Ultrasonic Techniques," *Journal of Applied Geophysics*, V. 74, No. 4, 2011, pp. 263-276. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.06.003.
14. De La Haza, A. O.; Samokrutov, A. A.; and Samokrutov, P. A., "Assessment of Concrete Structures Using the Mira and Eyecon Ultrasonic Shear Wave Devices and the SAFT-C Image Reconstruction Technique," *Construction and Building Materials*, V. 38, 2013, pp. 1276-1291. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.002.
15. Haach, V. G., and Ramirez, F. C., "Qualitative Assessment of Concrete by Ultrasound Tomography," *Construction and Building Materials*, V. 119, 2016, pp. 61-70. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.056.
16. Martin, T., "Ultrasonic Testing on EUROFER Welded Joints for Determination of the Minimum Detectable Flaw Size," *KIT Scientific Publishing*, V. 7543, 2010, pp. 1-2.
17. Lipa, L.; Pasquel, E. N.; Navarro, L. M.; and Del Álamo, J., "Void Detection and Thickness Measurement in Concrete Elements," *ACI Materials Journal*, V. 115, No. 4, July 2018, pp. 557-564. doi: 10.14359/51702188.
18. ASTM C150/C150M-16e1, "Standard Specification for Portland Cement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 10 pp. 19. ASTM C192/C192M-16a, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 8 pp.
20. ASTM C39/C39M-16b, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 7 pp.