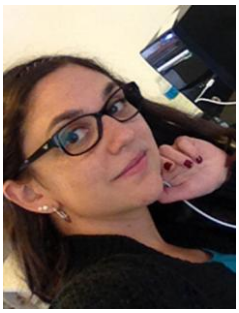
CORRELACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS DE DETECCIÓN SUPERFICIAL DE ANOMALÍAS EN EL HORMIGÓN ARMADO



V. BADILLA
Máster Tecnología de la Arquitectura (UPC)
Universidad de Chile
Santiago (Chile)
vbadilla@gmail.com

J. LL. ZAMORA
Dr. Arquitecto
Universitat Politècnica de Catalunya
Barcelona (España)
joan.lluis.zamora@upc.edu

RESUMEN

Se hace necesario avanzar en la investigación acerca de métodos ágiles que permitan monitorear periódicamente el estado de salud en que se encuentran los elementos constructivos realizados con hormigón y poder así elaborar un plan coordinado de manutenciones y tomar las oportunas decisiones de rehabilitación. Los métodos no destructivos de auscultación aquí aplicados son ya conocidos y aplicados de forma individual [4][5] (resistividad, ultrasonidos y esclerometría) y permiten obtener observaciones a pie de obra de ciertos parámetros físicos de este material de construcción. Se trata de técnicas útiles para conocer con mayor precisión el estado superficial y subsuperficial del elemento constructivo para generar diagnósticos, sin necesidad de realizar prácticas destructivas ni análisis en laboratorio. El propósito de este trabajo es entender la correlación que pueden tener entre si los valores obtenidos con cada uno de estos métodos y superponerlos a la cartografía visual y así obtener un cuadro más completo de la situación.

1. INTRODUCCIÓN

Existen grandes superficies de hormigón expuestas a la intemperie y esto conlleva un deterioro progresivo que hay que conocer y evaluar. La protección inicial que se da al hormigón en la obra frente a las acciones ambientales es generalmente baja y con el paso del tiempo las características iniciales del material van siendo mermadas por la acción simultánea de la humedad, suciedad, golpes, lluvias, erosiones, que ocasionan procesos de deterioro combinado que se manifiestan progresivamente en forma de corrosión del acero, de fisuración superficial, de deslaminación, etc.
En este estudio se plantea la posibilidad de poder correlacionar entre si los resultados de los distintos métodos no detructivos ya conocidos de detección de anomalías, así como también con respecto al levantamiento visual, para acercarse progresivamente a una cartografía más inteligente que aporte una mayor efectividad a la diagnosis, base fundamental a la hora de la conservación y manutención delos elementos constructivos de hormigón.

1.1 Especimen

El espécimen objeto del estudio fue un muro de hormigón armado que compone la fachada Este del edificio CRItt de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Valles (ETSAV), ubicada en C/ Pere Serra, 1, Sant Cugat del Valles, (Barcelona, Catalunya) y que fue construido el mes de abril del año 2006. En las figuras 1 y 2 se representa el muro de forma planimétrica y fotográfica. El muro tiene una longitud de 12,53m y una altura de 3,80m. Su espesor total es de 0,50m (0,15/0,20/0,15) de hormigón armado, según el detalle que se muestra en la figura 3, aligerado con 0,20m de EPS en su interior, con zunchos perimetrales verticales y horizontales. El hormigón fue prescrito con una resistencia de 25 N/mm² a los 28 días, una relación agua/cemento <= 0,50, tamaño de árido inferior a 20 mm y con un recubrimiento de

3,5 cm.; la armadura es una malla cuadrada de 15x15 cm, de barras de acero corrugado de 10 mm de diámetro. Para este estudio se subdividió su superficie mediante una cuadricula de 15 columnas y 13 filas, obteniendo un total de 195 cuadrantes a los cuales se les aplicó cada una de las técnicas que en el apartado siguiente se especifican. Cada columna tenía un ancho de 45 cm y las filas un alto de 30 cm.

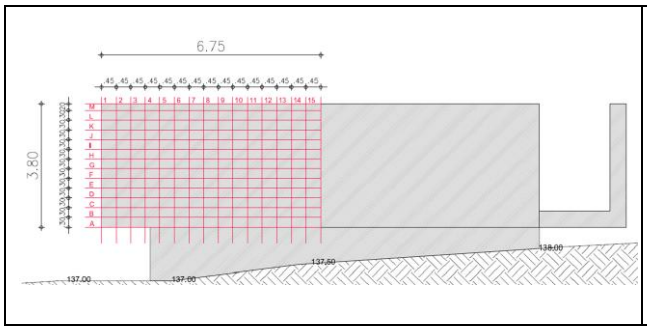


Figura 1: Alzado planimetría muro (elaboración propia)

Figura 2: Vista fotográfica muro (elaboración propia)

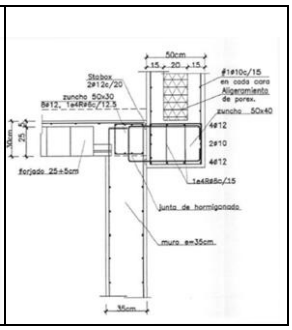


Figura 3: Detalle constructivo (BOMA)

1.2 Métodos no destructivos y metodología de trabajo

Los métodos no destructivos (NDT) son técnicas instrumentales ligeras y portátiles que permiten reconocer ciertas características de un material sin necesidad de destruirlo o penetrarlo. Las técnicas aquí utilizadas para auscultar este especimen fueron seleccionadas debido a su efectividad y especificidad, y porque cuentan ya con abundante respaldo en diversas investigaciones [1]. Cada uno de los métodos se aplicó diversas veces en cada uno de los 195 cuadrantes hasta obtener un valor medio que lo identificaba. Los valores obtenidos para un mismo método se clasificaron en 4 rangos (bajo, mediobajo, medioalto y alto) y a cada rango se le adjudicó un color gris para realizar la oportuna representación. Con ello se elaboraron unas cartografías simplificadas en escala de grises que permiten visualizar de forma conjunta las variaciones de valores entre cuadrantes. Posteriormente se superpuso esta cartografía simplificada sobre la cartografía de imagen fotográfica y se buscaron unas primeras correlaciones entre los rangos de valores obtenidos por los diversos métodos.

1.2.1 Imagen de fotografía digital

El reconocimiento visual se realizó de manera manual sobre las imágenes de fotografía digital realizadas cuadrante por cuadrante; éstas imágenes pueden orientar al técnico inspector experto sobre el nivel de daño y deterioro aparente del hormigón. Su experiencia clínica permite al inspector inferir a partir de dicha imagen visual los posibles procesos de deterioro existentes. La obtención de una cartografía fotográfica a partir de las imágenes de fotografía digital por cuadrantes como la que aquí se presenta debe permitir al inspector:

- Detectar la presencia de las lesiones, delimitar su ubicación y diagnosticar los materiales afectados.
- Clasificar y cualificar, en primera instancia, la extensión e intensidad de las lesiones detectadas.

Se realizó posteriormente un censo de las anomalías presentes en cada uno de los 195 cuadrantes del muro, clasificándolas de la forma que se expresa en la tabla 1. En la figura 4 se muestra el caso, a título de ejemplo, de un cuadrante concreto.

Tabla 1: Cartografía visual de imagen de fotografía digital (elaboración propia)

Defecto General	Defecto Especifico	Número de cuadrantes	% de cuadrantes
FISURAS	Micro por retracción hidráulica	15	7,7
	Macro por corrosión expansiva de las armaduras	12	6,15
COQUERAS	Pequeño tamaño (burbujas)	195	100
	Gran tamaño (árido a la vista) por lavado	95	48,7
HUMEDAD	Manchas	93	47,7
	Microorganismos	15	7,7
ACCIONES EXTERNAS	Desprendimientos de material	2	1
	Adiciones de material (reparaciones)	17	8,7

Se puede afirmar de forma general que en este espécimen los defectos diagnosticados son generalizados en toda la superficie del hormigón; en mayor cantidad se presentan las coqueras y escorrentías, así como las señales de humedad que en estas discontinuidades se retiene. También hay zonas con abundantes microfisuras que se mezclan visualmente con las marcas dejadas por las juntas imperfectas del encofrado. Se han detectado zonas con reparaciones realizadas con mortero en lugares donde se produjeron desprendimientos de hormigón probablemente durante el desencofrado o por golpes recibidos durante la obra. Estos morteros de reparación vuelven a presentar sus propias fisuraciones que se convierten a su vez en focos de retención de humedad.

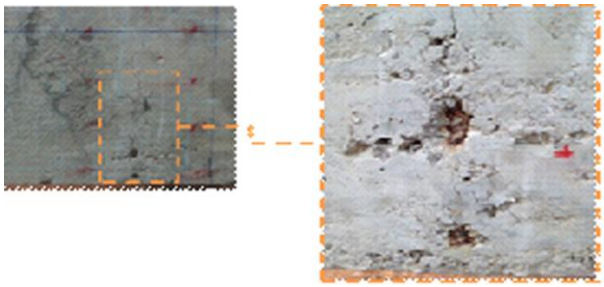
EJEMPLO **Cuadrante A6** Reparación con mortero de cemento realizada sobre un desprendimiento previo provocada por algún defecto de desencofrado o golpe.	

Figura 4: Ejemplo del censo visual de anomalías realizado en cada uno de los 195 cuadrantes: cuadrante A6

Sobre esta cartografía visual de conjunto realizada a partir de las fotografías digitales de cada cuadrante (ver figura 5) se práctico una cartografía digital manual para destacar con líneas y zonas de colores cada una de las 4 categorías de defectos generales censados. En próximas investigaciones de buscaran procedimientos de tratamiento de la imagen digital para que esta cartografía por colores se obtenga de forma automática, para ser más rápida y precisa de obtención.
El conjunto cartográfico ya muestra que los defectos censados no se distribuyen de forma homogénea sino que su extensión se circunscribe a determinadas áreas:
- las acciones externas se circunscriben a la arista inferior
- la humedad se retiene en las zonas intermedias y bajas por causa de una fisuración horizontal predominante
- las coqueras coinciden en las mismas zonas de la humedad
- la fisuración presenta patrones muy diversos

Todo ello advierte que probablemente se obtendrán valores diversos al aplicar en los cuadrantes los NDT seleccionados.

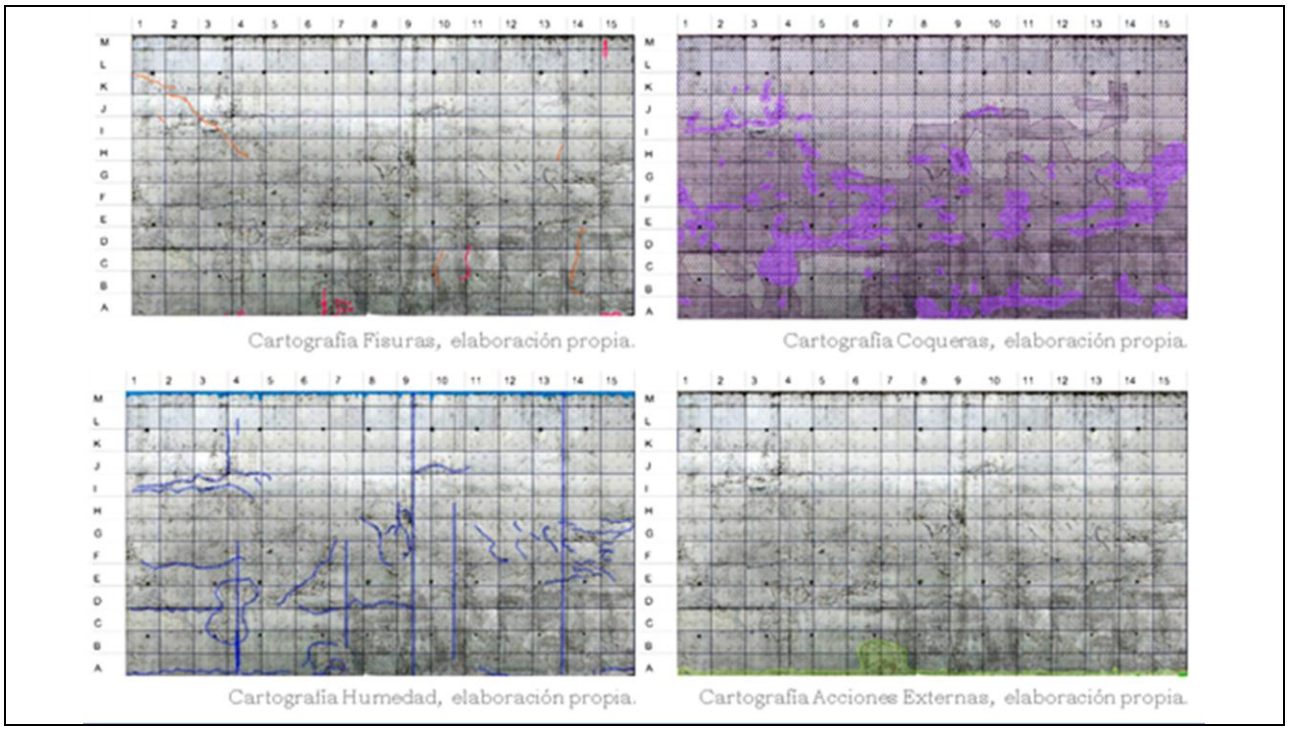


Figura 5: Cartografía manual para destacar con colores cada una de las 4 categorías de defectos generales censados

1.2.2. Resistividad Eléctrica

Es la capacidad de un material para resistir la transmisión de la electricidad a través suyo. Su valor está relacionado con la porosidad de la superficie donde se mide y por lo tanto de su permeabilidad al aire y al agua. Una alta resistividad eléctrica del hormigón indica una baja posibilidad y de ello deriva una baja velocidad de corrosión de sus armaduras de acero [2]. La American Association of State and Highway Transportation Officials ha desarrollado un método de medición recogido en la norma AASHTO TP 95-11 y que se aplica con el equipo Resipod de la firma Proceq. Se usa una sonda Wenner de cuatro puntos, se aplica una corriente a los dos puntos exteriores y se mide la diferencia de potencial entre los dos puntos interiores (ver figura 6). Es importante, para una correcta medición, conocer previamente la ubicación de las armaduras más superficiales. En este caso se utilizó un detector normalizado de barras de acero. La posición detectada fue marcada con tiza de yeso en la superficie antes de realizar las mediciones (ver figura 7).

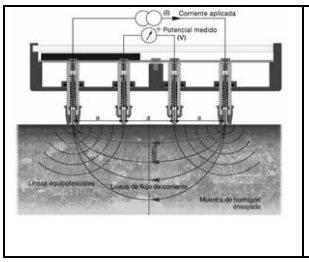


Figura 6: Sonda Resipod (Proceq)

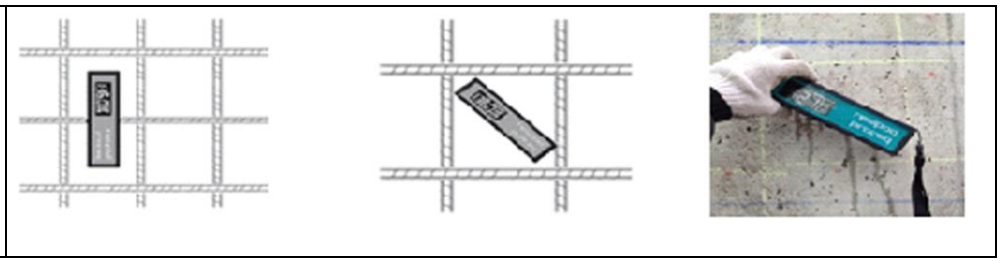


Figura 7: Aplicación de la sonda una vez detectadas las armaduras de acero

Tabla 2 : Clasificación de probabilidad de corrosión según resistividad (Polder)

Resistividad	**Clasificación**	**Número de cuadrantes**	**% de cuadrantes**
>100 kΩcm	Riesgo de corrosión despreciable	82	42,1
50 a 100 kΩcm	Riesgo de corrosión bajo	40	20,5
10 a 50 kΩcm	Riesgo de corrosión moderado	71	36,4
<10 kΩcm	Riesgo de corrosión alto	2	1

En la tabla 2 se recogen los valores obtenidos después de aplicar el método de la resistividad eléctrica en cada uno de los 195 cuadrantes y posteriormente agrupar estos valores por rangos según la escala de Polder. Se observa que algo más del 40% del espécimen presenta un riesgo de corrosión despreciable, un 20% presenta un riesgo bajo, algo más del 35% presenta un riesgo moderado y solo un 1% presenta un riesgo de corrosión alto. En la tabla 3, y solo con los fines de este estudio, se ha establecido un rango por cuartiles a la hora de aplicar los valores de la escala de grises. En la figura 8 se aplica esta escala de grises a la cartografía de cuadrantes. Es posible ver que la mayoría de los cuadrantes con valores de resistividad más baja se encuentran en las 3 filas superiores del muro. Por contra, los valores de resistividad más altos se ubican claramente en dos franjas, aproximadamente siempre en el tercio inferior de la banda superior e inferior del muro. La zona superior presenta mayor probabilidades de corrosión. Además ello se agrava porque la zona superior del muro es aquella que tiene una mayor exposición a la lluvia; por contra la zona inferior presenta menor exposición a la lluvia y al mismo tiempo una resistividad más alta.

RANGO	**CANTIDAD**	**kΩcm**	**COLOR**
BAJO	54	8,9 – 39,6	
MEDIA BAJO	59	40,5 – 99,6	
MEDIA ALTO	53	103,2 – 299	
ALTO	29	304– 1130	

Tabla 3: Rangos de resistividad y asignación color (elaboración propia)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
M	26	20,9	25,6	22,2	24	43,9	14,2	15,3	15,5	13,8	21,2	15,2	17	14,8	13,9
L	8,9	14,3	11,7	19,9	16,3	14,6	17,2	19,6	9,3	24,9	21,3	34,1	23,9	17,4	14,3
K	32,5	51,3	38,5	41,2	22,8	23,4	20,9	22,3	21,7	195,8	108,3	121,6	99,6	14,9	234
J	299	211	260	136,3	150,9	275	287	446	396	210	412	364	354	372	439
I	387	316	192,9	263	264	307	286	304	120,6	287	193,4	333	395	203	266
H	35,9	27,6	40,5	43,3	53,8	47,6	37	31,8	33	39,6	42,6	48,3	45,9	40,5	103,8
G	28,7	33,2	60,9	69,4	65,1	56,6	35,8	28,5	59	42,7	53,3	49,9	71,2	98	113,1
F	22,2	38,4	68,3	70,9	48,2	67,2	64,1	54,7	33,1	48,4	55,3	73,5	76,3	40,8	55,4
E	38,6	45,7	51,6	65,5	68,4	141,6	53,1	45,6	35,5	78,3	130,6	167,6	146,9	58,5	94,3
D	33,2	45,4	53,4	54,8	103,2	98,5	104,1	61,5	62,4	84,1	61	86,4	42,1	47,8	71,3
C	195,5	653	379	178,3	772	350	291	289	274	319	299	471	421	122,3	869
B	160,3	481	111,5	113	156,5	192,4	369	182,7	409	105	490	284	271	248	447
A	28,7	87,6	54,7	51,3	61,7	183,8	1130	157,3	355	279	1035	202	150,1	150,3	235

Figura 8: Cartografía resultante rangos de resistividad (elaboración propia)

1.2.3. Velocidad Ultrasónica

Es la velocidad a la que un impulso ultrasónico recorre el material evaluado. El equipo (figura 7) emite un impulso ultrasónico (>20 KHz) a través de una sonda emisora y lo recibe con otra sonda receptora. Un software incorporado permite medir el tiempo transcurrido e indirectamente la velocidad del recorrido de la onda. Las referencias indican que a mayor velocidad de propagación del impulso ultrasónico, mayor será la resistencia mecánica del hormigón [3].

Figura 9: Vista del equipo utilizado (Pundit Lab)

Se usó el equipo Pundit Lab+ de Proceq y se aplicó un tipo de medición denominada compuesta que realiza un promedio del tiempo de transmisión de dos impulsos entres ondas situadas a distancias diferentes para luego determinar la velocidad de ese registro. Se realizó un total de 390 mediciones (2 por cuadrante, que se promediaron). Los registros van desde los 574 m/s en el cuadrante A5, hasta los 10.000 m/s en el cuadrante I9.

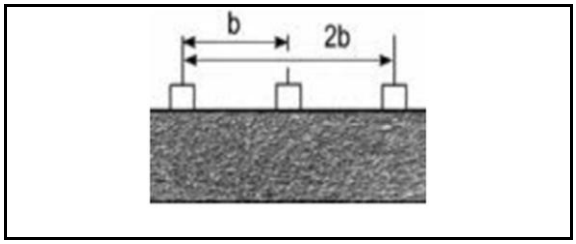


Figura 10: Proceso de medición (Pundit Lab)

Tabla 4: Clasificación del hormigón según su velocidad ultrasónica (Pundit Lab)

Velocidad Ultrasónica v (m/s)	**Clasificación**	**Número de cuadrantes**	**% de cuadrantes**
V>4575	Excelente	103	26,4
4575 > V > 3660	Bueno	88	22,5
3660 > V > 3050	Cuestionable	87	22,3
3050 > V > 2135	Pobre	47	12,1
V < 2135	Muy Pobre	65	16,7

En la tabla 4 se recogen los valores obtenidos después de aplicar el método de la velocidad ultrasónica en cada uno de los 195 cuadrantes y posteriormente agrupar estos valores por rangos según la escala de Pundit Lab. Se observa que casi el 50% del espécimen presenta un valor excelente o muy bueno mientras que más de un 50% presenta un valor pobre o muy pobre. En la tabla 5, y solo con los fines de este estudio, se ha establecido un rango por cuartiles a la hora de aplicar los valores de la escala de grises. En la figura 11 se aplica esta escala de grises a la cartografía de cuadrantes.
Se puede ver que las valores más altos se ubican desde la fila E hacia arriba y los valores hacia abajo. Se constatan también apreciables saltos de valores entre cuadrantes próximos como el L3 (687 m/s) y el L5 6849 (m/s).

RANGO	CANTIDAD	m/s	COLOR
BAJO	49	687 – 2.797	
MEDIO BAJO	49	2.799 – 3.779	
MEDIO ALTO	49	3.798 – 4.615	
ALTO	48	4.626 – 9.900	

Tabla 5: Rangos de velocidad y asignación color (elaboración propia)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
M	4054	2814	1875	4298	3282	2530	4559	3151	4425	3304	4348	3171	1517	3226	3138
L	1502	3268	687	4559	6849	4464	6787	4747	4399	4918	4425	1738	1374	3425	3086
K	1150	9900	4381	4068	5017	4685	3779	4806	6266	5068	4917	4612	2479	4569	4393
J	3330	2100	2015	4473	4407	5000	5051	3378	3345	5211	4729	4967	4821	1322	4885
I	7177	2412	2799	4286	4532	3386	3233	3304	5017	4615	3488	3667	3521	4438	4155
H	4286	4854	4967	1834	4886	4478	4673	4545	5034	5455	5102	4951	3268	5415	3827
G	1442	4304	4775	4243	3330	5086	3798	4459	6750	4699	4598	4967	5440	3685	4655
F	4598	4967	4569	4714	4821	4917	4420	721	4555	4583	4626	4917	3631	3667	4685
E	3180	4598	4744	3445	4869	3322	2797	2872	4420	3264	4473	4641	3462	3713	3207
D	1469	2372	3207	4125	1743	1897	4381	2395	2912	2250	3527	2207	2619	2240	3100
C	3293	3445	3271	3511	4160	4219	3544	1977	2274	2253	2260	1625	2496	2015	4068
B	2628	3808	4280	4541	3587	1999	1889	1540	4355	857	2071	1676	2012	2867	1333
A	7212	3363	4381	1533	1469	2430	1969	2086	4641	3867	2274	2900	3414	3414	1962

Figura 11: Cartografía resultante rangos de velocidad ultrasónica (elaboración propia)

1.2.4 Esclerómetro

Este equipo se conoce también como "Martillo Schmidt" o martillo de rebote y su principio de medición es la relación que existe entre la dureza de una superficie y la energía recuperada en el rebote que se genera sobre esta superficie al percutirla con una fuerza conocida. Se usa habitualmente como referencia para deducir la resistencia a la compresión del hormigón.
En este caso, al reconocer la naturaleza poco homogénea del espécimen estudiado, se decide que en cada cuadrante se registrarán 6 valores y se promediarán para determinar el valor que corresponde al cuadrante. La medición fue realizada con el esclerómetro aplicado en sentido horizontal, circunstancia que es importante en el momento de relacionar los valores de rebote obtenidos con las curvas conversión de la resistencia a la compresión.

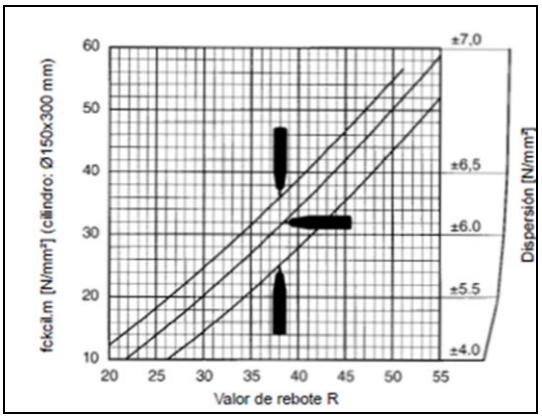


Figura 12: Curvas de conversión (Martillo Schmidt de Proceq)

En la tabla 6 se recogen los valores obtenidos después de aplicar el método del esclerómetro en cada uno de los 195 cuadrantes y posteriormente agrupar estos valores por rangos según la escala del Martillo Schmidt de Proceq. Se observa que casi todos los cuadrantes se encuentran en un rango aceptable (el espécimen tenía una resistencia prescrita en proyecto de 25 N/mm²) y sólo hay 3 cuadrantes con un valor menor a 35. El promedio general del muro es de 41,48, lo que se consideraría como equivalente a 35 N/mm².

Tabla 6: Clasificación del hormigón según su valor de rebote

Valor de rebote	**N/mm²**	**Número de cuadrantes**	**% de cuadrantes**
>50	50	2	1
45 > V > 50	45	25	12,9
40 > V > 45	38	109	55,9
35 > V > 40	30	56	28,7
V < 35	25	3	1,5
Promedio valor de rebote muro = 41,48 Valor más bajo (cuadrante J2) = 31,6 Valor más alto (cuadrante G7) = 51,3			

En la tabla 7, y solo con los fines de este estudio, se ha establecido un rango por cuartiles a la hora de aplicar los valores de la escala de grises. En la figura 13 se aplica esta escala de grises a la cartografía de cuadrantes. Se puede ver que los valores más altos se agrupan en el centro del muro, siendo esta una zona de mayor continuidad (pocas discontinuidades entre valores de cuadrantes vecinos) por lo que respecta a la resistencia a la compresión. Los valores más bajos están en cuadrantes muy dispersos. Llama la atención el borde más inferior del espécimen, donde se han realizado diversas reparaciones posteriores con mortero de cemento.

RANGO	CANTIDAD	VALOR DE REBOTE	**COLOR**
BAJO	47	31,67 – 39	
MEDIA BAJO	49	39,33 – 41,33	
MEDIA ALTO	52	41,67 – 43,67	
ALTO	47	44 – 51,33	

Tabla 7: Rangos de rebote y asignación color (elaboración propia)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
M	40,00	41,33	39,33	42,67	41,33	40,67	39,33	39,33	36,67	40,00	40,00	40,67	40,00	39,33	38,67
L	40,67	42,00	42,67	39,33	38,67	42,00	38,33	40,33	40,00	41,67	39,00	37,00	36	36,67	40,00
K	42,00	39,67	43,67	38,33	40,33	41,00	42,67	38,33	39,33	37,00	34,66	35,66	38,00	36,33	37,33
J	38,67	31,66	37,67	39,00	40,33	42,67	39,33	40,00	44,00	38,67	44,67	43,00	45,00	42,33	40,33
I	49,33	44,00	39,67	45,00	44,00	44,67	44,67	45,33	44,00	44,00	45,33	43,33	42,33	41,67	43,33
H	41,67	45,00	45,67	43,00	43,67	44,33	44,00	43,67	42,67	41,00	43,00	41,00	39,00	44,00	37,67
G	42,33	44,67	45,33	43,33	42,00	44,67	51,33	44,33	38,00	46,00	43,00	38,33	42,33	41,67	37,33
F	41,33	43,67	45,33	50,33	46,33	46,33	43,33	46,66	49,66	46,33	41,67	46,00	40,67	40,00	41,33
E	41,67	45,00	43,33	49	44,67	42,67	45,67	49,66	42,67	36,67	38,67	43,00	39,67	38,33	36,67
D	40,00	44,67	49,66	41,33	42,33	42,00	41,00	44,67	42,67	42,67	45,33	42,33	44,67	42,00	40,67
C	43,00	43,33	45,00	36	42,67	38,33	40,33	39,33	40,00	40,33	41,00	44,67	43,33	42,00	41,33
B	36,33	42,67	40,00	36	40,33	37,67	37,67	39,33	40,67	38,33	40,67	38,67	43,00	37,33	41,00
A	43,00	38,33	43,00	44,33	36,67	36,67	33	45,67	35,33	36,33	36,33	37,67	43,00	46	41,67

Figura 13: Cartografía resultante mediciones esclerómetro (elaboración propia)

2. CORRELACION ENTRE LOS DIVERSOS METODOS NO DESTRUCTIVOS

En la figura 14 se ha realizado una superposición de las 3 cartografías (Figuras 8, 11, 13) en escala de grises con las 4 cartografías visuales con líneas y zonas de colores (figura 5). Esta superposición ha permitido evaluar cuales son los cuadrantes que presentan coincidencias, es decir que los valores obtenidos por los NDT están en el mismo rango de calidad.

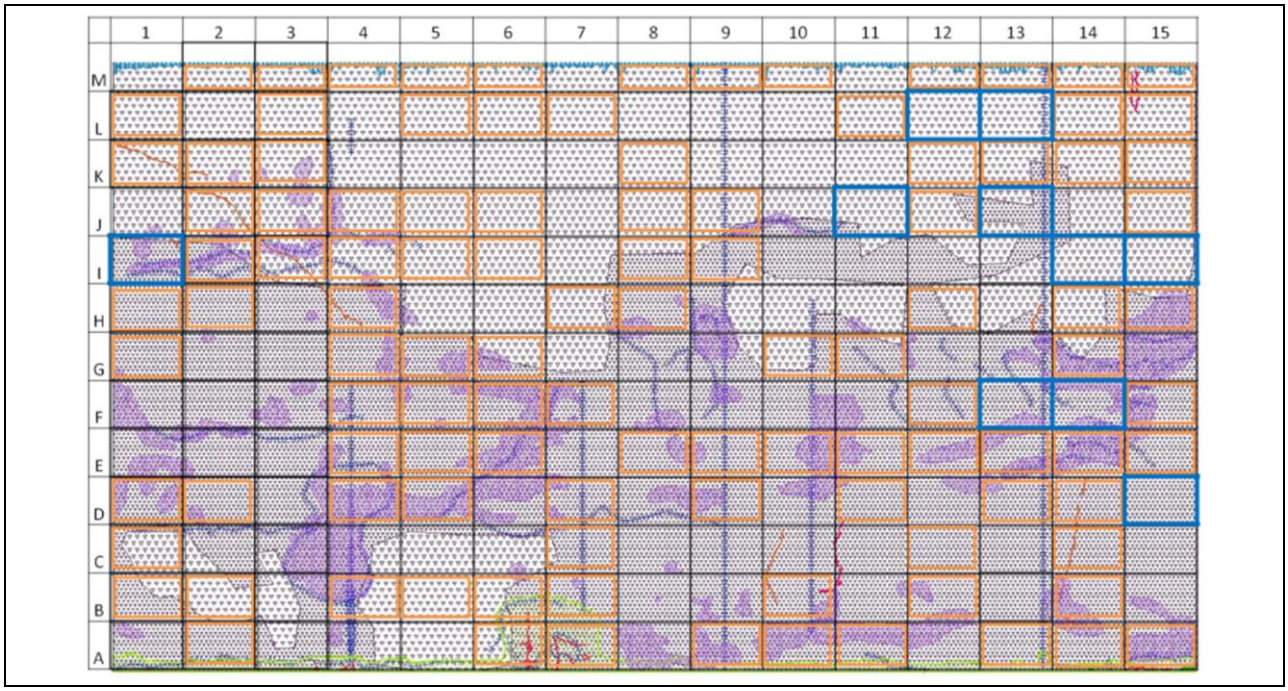


Figura 14: Superposición de las cartografías en escala de grises con las cartografías visuales con líneas y zonas de colores (elaboración propia)

	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12			13			14			15		
M	4.054	40	26	2.814	41	21	1.875	39	26	4.298	43	22	3.282	41	24	2.530	41	44	4.559	39	14	3.151	39	15	4.423	37	16	3.304	40	14	4.348	40	21	3.171	41	15	1.517	40	17	3.226	39	15	3.158	39	14
L	1.502	41	9	3.268	42	14	6.87	43	12	4.559	39	20	6.849	39	16	4.464	42	13	6.787	38	17	4.747	40	20	4.399	40	9	4.918	42	25	4.425	39	21	1.738	37	54	1.374	36	24	3.425	37	17	3.086	40	14
K	1.150	42	33	9.900	40	51	4.381	44	39	4.068	38	41	3.017	40	23	4.685	41	23	3.779	43	21	4.806	38	22	6.266	39	22	5.068	37	196	4.917	35	108	4.612	36	122	2.479	38	100	4.369	36	13	4.393	37	234
J	3.330	39	299	2.100	32	211	2.015	38	260	4.473	39	136	4.407	40	151	5.000	43	275	5.051	39	287	3.378	40	448	3.345	44	396	5.211	39	210	4.729	43	412	4.967	43	364	4.821	43	354	1.322	42	372	4.885	40	439
I	7.177	49	387	2.412	44	316	2.799	40	193	4.286	45	263	4.532	44	264	3.586	43	307	3.233	43	286	3.304	43	304	5.017	44	121	4.613	44	287	3.488	43	193	3.667	43	333	3.521	42	393	4.438	42	203	4.155	43	266
H	4.286	42	36	4.854	43	28	4.967	46	41	1.834	43	43	4.886	44	54	4.478	44	48	4.673	44	37	4.545	44	32	5.054	43	33	5.455	41	40	5.102	43	43	4.951	41	48	3.268	39	46	5.413	44	41	3.827	38	104
G	1.442	42	29	4.304	43	33	4.775	43	61	4.243	43	69	3.330	42	63	5.086	43	57	3.798	33	36	4.459	44	29	6.730	38	59	4.699	46	43	4.398	43	33	4.967	38	30	5.440	42	71	3.883	42	98	4.653	37	113
F	4.598	41	22	4.967	44	38	4.569	43	68	4.714	50	71	4.821	46	48	4.917	46	67	4.420	43	64	721	47	55	4.555	50	33	4.583	46	48	4.626	42	55	4.917	46	74	3.631	41	76	3.667	40	41	4.883	41	55
E	3.180	42	39	4.598	43	46	4.744	43	32	3.445	49	66	4.869	43	68	3.322	43	142	2.797	46	53	2.872	50	46	4.420	43	36	3.264	37	78	4.473	39	131	4.641	43	168	3.462	40	147	3.713	38	59	3.207	37	94
D	1.469	40	33	2.372	43	43	3.207	30	33	4.125	41	33	1.743	42	103	1.897	42	99	4.381	41	104	2.395	43	62	2.912	43	62	2.250	43	84	3.527	43	61	2.207	42	86	2.619	43	42	2.240	42	48	3.100	41	71
C	3.293	43	196	3.445	43	653	3.271	43	379	3.511	36	178	4.180	43	772	4.219	38	350	3.544	40	291	1.977	39	289	2.274	40	274	2.253	40	319	2.260	41	299	1.625	43	471	2.496	43	421	2.013	42	122	4.068	41	869
B	2.628	36	160	3.808	43	481	4.280	40	112	4.541	36	113	3.587	40	157	1.999	38	192	1.889	38	369	1.540	39	183	4.355	41	409	857	38	105	2.071	41	490	1.676	39	284	2.012	43	271	2.867	37	248	1.333	41	447
A	7.212	43	29	3.363	38	88	4.381	43	33	1.333	44	31	1.469	37	62	2.430	37	184	1.969	33	1.130	2.086	46	157	4.641	35	355	3.867	36	279	2.274	36	1.033	2.900	38	202	3.414	43	130	3.414	46	130	1.962	42	233
3 COINCIDENCIAS	1			0			0			0			0			0			0			0			0			0			1			1			3			2			2		
2 COINCIDENCIAS	7			8			11			8			11			9			7			6			6			5			5			8			4			8			8		
SIN COINCIDENCIAS	5			5			2			5			2			4			6			7			7			8			7			4			6			3			3		

TOTAL	10	5,12%
TOTAL	111	56,92%
TOTAL	74	37,96%

Figura 15: Superposición de las cartografías en escala de grises y contabilización de las coincidencias (elaboración propia)

En la figura 15 se observa que sólo el 5,12% de los cuadrantes (10) presenta 3 coincidencias (cuadros azules en la figura 14), mientras que el 56,92% de los cuadrantes (111) presenta 2 coincidencias (cuadros naranjos). El resto de cuadrantes (74) no presentan coincidencia alguna. Los cuadrantes con 3 coincidencias de rango de escala de grises se corresponden con cuadrantes que presentan también varios defectos simultáneos registrados visualmente (figura 5) como humedades, coqueras, microorganismos, etc. En la tabla 8 se presenta un estudio más pormenorizado de los 10 cuadrantes que presentan 3 coincidencias. Su distribución es homogénea en los 4 rangos, con ligero predominio del bajo. En la tabla 9 se presenta un estudio más pormenorizado de las dobles coincidencias, cruzándolas dos a dos.

Tabla 8: Características resumidas de los cuadrantes con tres coincidencias (elaboración propia)

RANGO BAJO	L 13 L12	2	**RANGO MEDIO BAJO**	F 13 F 14 D 15	3
RANGO MEDIO ALTO	I 14 I 15	2	**RANGO ALTO**	I 1 J 11 J 13	3

Tabla 9: Cuantificación de las coincidencias por NDT y por rangos (elaboración propia)

COINCIDENCIAS	**BAJA**	**MEDIA BAJA**	**MEDIA ALTA**	**ALTA**	**TOTAL**	**PORCENTAJE**
Velocidad Ultrasónica/ Resistividad Eléctrica	9	10	12	5	36	32,44%
Velocidad Ultrasónica/ Valor de Rebote	12	12	11	14	49	44,14%
Resistividad Eléctrica/ Valor de Rebote	8	5	7	6	26	23,42%
TOTAL	**29**	**27**	**30**	**25**	**111**	
PORCENTAJE	**26,13%**	**24,33%**	**27,02%**	**22,52%**		**100%**

Se observa que existe una mayor correlación entre los resultados de las mediciones de velocidad ultrasónica con los de esclerometría, sumando 49 coincidencias del total de 111 detectadas, lo que representa el 44,14% del total de coincidencias, resaltando la distribución casi equivalente de dichas coincidencias entre rangos bajos, medios bajos, medios altos y altos. Se observa que existe una mediana correlación entre los resultados de la velocidad ultrasónica con la resistividad eléctrica con un 32,44% del total. Finalmente, se observa que existe una correlación más baja entre la resistividad eléctrica y la esclerometría, que representa el 23,42% de los cuadrantes coincidentes.

3. CONCLUSIONES

Los diversos métodos no destructivos de auscultación aplicados en este espécimen de hormigón armado han aportado resultados técnicamente coherentes por separado. Al ponerlos conjuntamente sobre una misma cartografía de síntesis se aprecia que las coincidencias ya son más bajas especialmente cuando confluyen en cuadrantes diversos tipos de lesiones y deterioros simultáneos. Ello se apercibe al superponer la cartografía visual. Ello no resulta una gran novedad científica pero si técnica puesto que a pie de obra los fenómenos son concurrentes y no individuales como sucede en el laboratorio. La elaboración de cartografías conjuntas por capas que sintetizan visualmente parámetros numéricos se ha revelado como una herramienta útil para interpretar mejor los NDT y contrastarlos con las situaciones propias de la obra como las tongadas de vertido, la proximidad a los extremos o la exposición a la lluvia. Disponer de esta información de conjunto ha de permitir mejorar la comprensión de los fenómenos locales, afinar la diagnosis y fundamentalmente acertar en los métodos de mantenimiento y reparación. Los retos futuros que se plantea esta investigación son:
. Mejorar la cartografía visual mediante el procesado de la imagen digital
. Correlacionar la imagen digital con los valores de los NDT ya validados por la práctica profesional
. Generar informes cartográficos para el seguimiento diacrónico de grandes superficies de hormigón.

4. AGRADECIMIENTOS

Esta contribución es parte del Trabajo Final del Máster Universitario en Tecnologías de la Arquitectura de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Se agradece la colaboración prestada por la ETSAV y el grupo de investigación LiTA (Laboratorio de innovación y Tecnología de la Arquitectura) que ha otorgado los recursos y equipos para la realización del estudio, así como también la participación de la estudiante de grado Laia Arimany.

4. REFERENCIAS

[1] Damazo, J. D. (2006). *Pruebas no destructivas del concreto*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
[2] D'Andrea, R. (2010). *Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica.* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
[3] González, E. A. (s.f.). *Ensayos de hormigón en estructuras: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. Medida de transmisión indirecta*.
[4] Malhotra, V.M, C. N. (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. Philadelphia: CRC Press LLC.
[5] Ortega, N. R. (2007). *Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas*. Argentina: Universidad Nacional del Sur