

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS FIBRAS Y RESISTENCIA  
RESIDUAL EN DOVELAS DE HRFA PARA TUNELES**

**AUTOR**  
**HECTOR EDUARDO JIMENEZ ESCOBAR**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE**  
**CONSTRUCTOR CIVIL**

**PROFESOR GUÍA**  
**SERGIO CARMONA MALATESTA**

**VALPARAÍSO, 2017**

---

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero expresar un profundo agradecimiento y amor, a la mujer y madre de mis hijos, la cual me ha acompañado durante este largo camino, para cumplir uno de mis objetivos. Uno de los grandes apoyos para dar culmine a este proceso, Camila Ignacia Chacana Sánchez.*

*De igual manera, quiero expresar mis agradecimientos y amor, a mis padres, Olga Elisa Escobar Martínez y Hector Guillermo Jimenez Salazar, por brindarme todo el apoyo posible para poder lograr uno de los objetivos de mi vida, el cual es ser profesional.*

*Junto con ellos, quiero expresar mi gratitud y cariños a la familia Chacana Sánchez, en especial a mis suegros, Eduardo Humberto Chacana Sánchez y Enriqueta Sánchez Castro, por brindar el apoyo, tanto a mí, a la madre de mis hijos y a sus nietos.*

*Quiero hacer una especial mención al apoyo de la familia Fuentes, en especial a Don Hector Fuentes, quien fue como un abuelo para mí, durante 6 años, acogiéndome en su hogar y brindándome un incondicional apoyo al hacerme parte de su familia. Para él y su gran familia, mis más sinceros agradecimientos y cariños.*

*También quiero agradecer el apoyo de mis tíos, Roxana Jimenez y José Luis Aedo, por brindar ayuda en momentos difíciles de este proceso, además de mi primo Miguel Ángel Jimenez Cuadra e Ingrid Jimenez Chacana, ambos por su preocupación y presencia durante este largo proceso.*

*Por último, agradecer la compañía, los buenos momentos, más el apoyo de compañeros y amigos, como lo son, Matías Silva, Valentina Espinoza, Dana Bonet, Sabrina Niño, entre otros que fueron parte de este proceso. Y en especial a un gran amigo, persona y compañero, Alexis Fuentes Carrasco.*

---

## RESUMEN

En Chile, históricamente los túneles se han fortificado y revestido utilizando hormigón moldeado o proyectado (shotcrete), sin embargo, en los últimos años se han incorporado el uso de máquinas tuneladora (TBM) y con ello se ha iniciado la fabricación de dovelas en importantes proyectos mineros, donde la confección de la malla de refuerzo resulta compleja y de alto costo, debido a la forma curva de estas. Por lo que soluciones constructivas, como la fabricación de dovelas con hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) se proponen para enfrentar esa problemática.

Considerando lo anterior, el objetivo de la presente memoria ha sido estudiar la distribución de las fibras de refuerzo y establecer la dirección preferente en que estas se orientan en la masa de hormigón, concluyendo y proponiendo recomendaciones para posteriores estudios, para el reemplazo total o parcial de las barras de refuerzo, por fibras de acero.

Para lograr el objetivo propuesto, se utilizaron los resultados de una amplia campaña experimental desarrollada en Barcelona, para la construcción de la Línea 9 del metro, en la que se extrajeron testigos desde tres dovelas en diferentes puntos de ellas y en distintas orientaciones, los que fueron ensayados para determinar su resistencia residual y su cuantía de fibras, mediante el ensayo Barcelona.

Obtenidos los resultados de las cargas, para los 6 valores de fisuración, más la cuantía de fibras por probeta, se crea una base de datos, filtrando estos por orientación de extracción, estrato y diámetro. Con los cuales se realiza un análisis estadístico básico, confeccionando ilustraciones comparativas, con el fin de obtener una mejor evaluación y disponer de los antecedentes necesarios, para concluir sobre la distribución, orientación y resistencia residual de la fibra.

Como conclusiones importantes del trabajo cabe destacar que las fibras no se distribuyen aleatoriamente en el elemento, ya que el vibrado tiende a darle una orientación preferente, paralela a la superficie de llenado y en el caso de la dovela, la geometría de ésta hace que las fibras tengan una mayor concentración y resistencia residual, en las zonas de las esquinas.

---

## ABSTRAC

In Chile, tunnels have historically been fortified and covered using moulded or shotcrete concrete, however, in recent years the use of boring machines (TBM) has been incorporated and with that the manufacture of segments has started in many important mining projects, where the fabrication of the reinforcing mesh is often complicated and expensive, due to the curve shapes of this one. Consequently, structural solutions, as the manufacture of segments with steel fibre reinforced concrete (SFRC), are proposed to address this problem.

Considering the above, the objective of the present thesis has been studying the distribution of the reinforcing fibers and to establish the preferential direction in which these are orientated in the concrete mass, concluding and proposing recommendations for further studies, to the full or partial replacement of the reinforcing bars, by steel fibres.

To achieve this intended objective, the results of a wide experimental campaign carried out in Barcelona were used, for the construction of Line 9 of the Barcelona Metro, in which witnesses from three segments in different points of them and different directions were extracted, those who were tested to determine their residual resistance, and their amount of fibers, through the Barcelona experiment.

Once the results of the loads were obtained, for the six values of the cracking, plus the sum of fibers per measuring cylinder, a data base is created, filtering these by pulling orientation, layer and diameter. With which a basic statistical analysis is carried out, preparing comparative illustrations, in order to obtain a better evaluation and come with the necessary backgrounds, to conclude about the distribution, orientation and residual resistance of the fiber.

As important results of this paper it is worth stressing that the fibers aren't randomly distributed in the element, since the vibrated tends to give it a preferential orientation, parallel to the fill surface, and in the case of the segment, its geometry make the fibers have a greater consolidation and residual resistance, in the corners zone.

---

## INDICE

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| AGRADECIMIENTOS .....            | 1  |
| RESUMEN .....                    | 2  |
| ABSTRAC .....                    | 3  |
| INDICE .....                     | 4  |
| INDICE DE ILUSTRACIONES .....    | 5  |
| INTRODUCCIÓN .....               | 8  |
| I. ANTECEDENTES GENERALES .....  | 9  |
| II. DETALLES EXPERIMENTALES..... | 12 |
| III. ANALISIS DE RESULTADOS..... | 16 |
| IV. CONCLUSIÓN.....              | 42 |
| V. RECOMENDACIONES .....         | 48 |
| REFERENCIAS.....                 | 51 |
| ANEXO 1 .....                    | 52 |
| ANEXO 2 .....                    | 56 |

---

## INDICE DE ILUSTRACIONES

|                                                                                                                                                                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ILUSTRACIÓN 1-A:</b> BOSQUEJO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS ANILLOS USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA 9 DEL METRO DE BARCELONA.....                                                                        | <b>10</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 2-A:</b> IMAGEN REPRESENTATIVA DE LAS FIBRAS DE ACERO UTILIZADAS EN LA CONFECCIÓN DE LAS DOVELAS. ....                                                                                                | <b>11</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 3-A:</b> IMÁGENES DE LA CONSTRUCCIÓN DE LAS DOVELAS. TRASLADO DEL HORMIGÓN MEDIANTE TOLVA, VACIADO DE LA MEZCLA AL MOLDE Y ALISADO DE LA SUPERFICIE DE LA DOVELA E INGRESO A LA CÁMARA DE CURADO..... | <b>13</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 4-A:</b> POSICIÓN DE LOS VIBRADORES EN EL MOLDE DE LA DOVELA.....                                                                                                                                     | <b>13</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 5-A:</b> ILUSTRACIÓN SOBRE ZONAS Y POSICIÓN DE EXTRACCIÓN DE LOS TESTIGOS EN LAS DOVELAS. ....                                                                                                        | <b>14</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 6-A:</b> CORTE DE LOS DE TESTIGOS Ø150 MM, DEFINIDOS EN 2 PROBETAS, PARTE SUPERIOR (INTRADÓS) Y PARTE EXTERIOR (EXTRADÓS).....                                                                        | <b>15</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 7-A:</b> ILUSTRACIÓN SOBRE LOS RESULTADOS DEL TESTIGO A9-2 DEL ESTRATO INTRADÓS. ....                                                                                                                 | <b>15</b> |
| <br>                                                                                                                                                                                                                 |           |
| <b>ILUSTRACIÓN 1-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA CUANTÍA DE FIBRAS, DE LAS PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE LAS DOVELAS. ....                                         | <b>18</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 2-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE LAS DOVELAS. ....                                       | <b>18</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 3-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA CUANTÍA DE FIBRAS, DE LAS PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL CENTRAL Y LONGITUDINAL ESQUINA DE LAS DOVELAS. ....                                      | <b>20</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 4-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL Y ESQUINA DE LAS DOVELAS. ....                                      | <b>21</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 5-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA CUANTÍA DE FIBRAS, DE LAS PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL CENTRAL Y TRANSVERSAL ESQUINA DE LAS DOVELAS. ....                                       | <b>22</b> |

---

|                                                                                                                                                                                                         |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ILUSTRACIÓN 6-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL CENTRAL Y TRANSVERSAL ESQUINA<br>DE LAS DOVELAS. ....                  | <b>23</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 7-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA CUANTÍA DE FIBRAS, DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL ESQUINA Y RADIAL ESQUINA DE LAS<br>DOVELAS. ....                         | <b>25</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 8-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL ESQUINA Y RADIAL ESQUINA DE LAS<br>DOVELAS. ....                       | <b>25</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 9-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL Y RADIAL DE LA<br>ZONA ESQUINA DE LAS DOVELAS.....  | <b>27</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 10-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL Y RADIAL DE LA<br>ZONA ESQUINA DE LAS DOVELAS..... | <b>28</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 11-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL Y RADIAL DE LA<br>ZONA ESQUINA DE LAS DOVELAS..... | <b>29</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 12-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE<br>LAS DOVELAS. ....                   | <b>30</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 13-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE<br>LAS DOVELAS. ....                   | <b>31</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 14-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE<br>LAS DOVELAS. ....                   | <b>32</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 15-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE<br>LAS DOVELAS. ....                   | <b>33</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 16-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE<br>LAS DOVELAS. ....                   | <b>34</b> |

---

|                                                                                                                                                                                                         |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ILUSTRACIÓN 17-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE<br>LAS DOVELAS. ....                   | <b>35</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 18-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE<br>LAS DOVELAS. ....                   | <b>36</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 19-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE<br>LAS DOVELAS. ....                   | <b>37</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 20-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN RADIAL Y LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL DE<br>LAS DOVELAS. ....                   | <b>38</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 21-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL Y RADIAL DE LA<br>ZONA ESQUINA DE LAS DOVELAS..... | <b>40</b> |
| <b>ILUSTRACIÓN 22-B:</b> ILUSTRACIÓN COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE LAS<br>PROBETAS EXTRAÍDAS EN POSICIÓN LONGITUDINAL DE LA ZONA CENTRAL Y RADIAL DE LA<br>ZONA ESQUINA DE LAS DOVELAS..... | <b>40</b> |

---

## INTRODUCCIÓN

El uso de HRF en la actualidad es utilizado en aplicaciones con relevancia estructural, como pavimentos, hormigón proyectado, entre otras. Pero sin duda en la construcción de obras subterráneas. El hecho de que en el último tiempo se esté utilizando este material compuesto en dovelas prefabricadas para el revestimiento de túneles, ha conducido a análisis con respecto a su geometría, respuesta mecánica, tenacidad, resistencia al fuego, comportamiento post agrietamiento, entre otras. Teniendo en consideración además de que su uso permita el reemplazo parcial o incluso total, de la armadura tradicional, obteniendo una serie de ventajas desde el punto de vista de costos y estructurales. Por ello es que se requiere un análisis en el comportamiento post-fisuración, además de la distribución de estas en la fabricación, debido, por una parte, a la falta de una normativa simple, clara y por otra parte, por la falta de experiencia en aspectos relacionados con el control y la caracterización del HRF. Por ende dado estudios anteriores obtenidos de la confección de dovelas prefabricadas para la construcción del túnel L9 del Metro de Barcelona donde se logró determinar mediante el muestreo de la cuantía de fibras a través de los testigos extraídos en diferentes direcciones y zonas de las dovelas, el número mínimo de testigos necesarios y la dimensión recomendada para el control de la cuantía de fibras en el hormigón, es que se procede a realizar una comparación entre el promedio de cuantía de los testigos de dimensiones 150 mm de altura, con un diámetro de 150 mm, de todas las direcciones de extracción, de 3 de las dovelas confeccionadas, comparando el promedio de cuantía que existe en sus dos estratos, parte superior (intradós) y parte inferior (extradós). Además de comparar la resistencia residual promedio a los 6 mm, de cada dirección de extracción de las probetas, por cada dovela confeccionada, obteniendo resultados analizados y concluidos a continuación.

---

## I. ANTECEDENTES GENERALES

Los análisis realizados en este estudio son en base a probetas extraídas de las dovelas prefabricadas empleadas en el revestimiento del túnel de la Línea 9 del Metro de Barcelona. Estos estudios fueron encargados por G.I.S.A. (Gestor d'Infrastructures S.A.) al Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de Catalunya.

En el tramo de túnel utilizado para desarrollar dicha investigación, el revestimiento está formado por 5 dovelas estándar (A), 2 dovelas contraclave (B y C) y una dovela clave (K). Cada dovela abarca un sector de  $48^\circ$  a excepción de la clave que abarca un sector de  $24^\circ$ . Se trata de un anillo del tipo universal con un ancho medio de 1,80 m y un ángulo entre los planos que contienen el anillo (conicidad) de  $0,57^\circ$ , el que permite trazar las curvas en planta y en alzado (*Ilustración 1-A*).

Las dovelas, de 350 mm de espesor, se fabricaron en una planta a pie de obra con un hormigón de 50 MPa de resistencia característica a compresión ( $f_{ck}$ ) a 28 días, y un módulo de deformación, a la misma edad, de aproximadamente 38.0 GPa. El hormigón se reforzó con  $60 \text{ kg/m}^3$  de fibras de acero cilíndricas de extremos conformados de 1 mm de diámetro y 50 mm de longitud, que se proveían en sacos y sueltas. El límite elástico del acero era de 1000 MPa, lo que garantizaba que la rotura no se produjera por tracción de las fibras, sino por arrancamiento de las mismas. Se especificó una resistencia a flexión equivalente a una flecha límite de 3 mm ( $f_{ct,keq300}$ ) de 3,2 MPa, determinada de acuerdo al ensayo belga NBN 15-238 (1992).

Para el análisis de la distribución de las fibras y la resistencia residual se utilizaron testigos extraídos de 3 de las 8 dovelas prefabricadas.

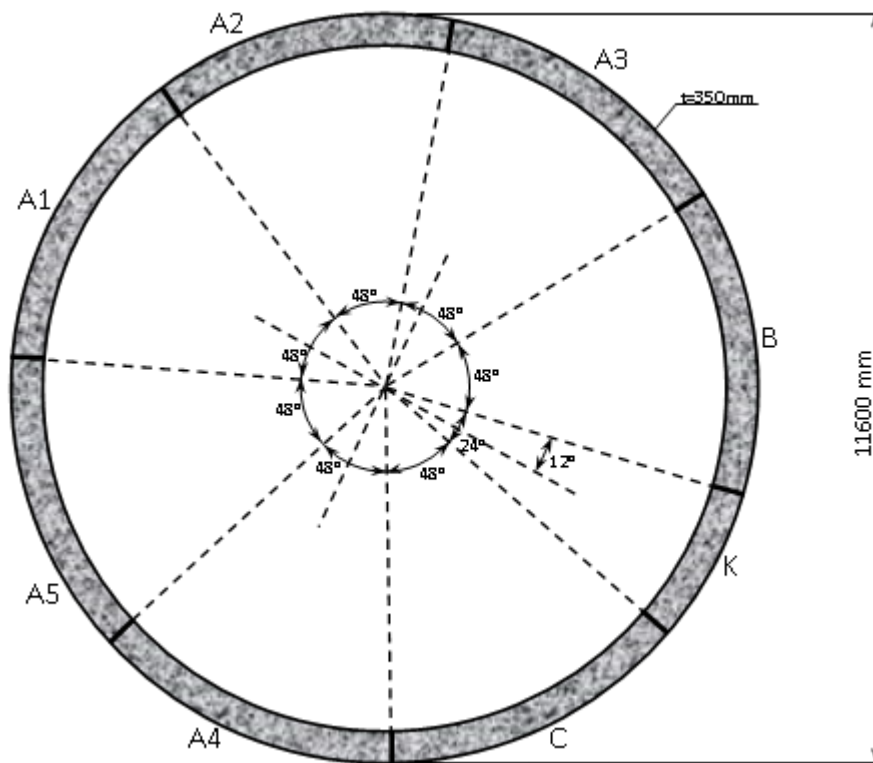


**Ilustración 1-A:** Bosquejo de la sección transversal de los anillos usados en la construcción de la Línea 9 del Metro de Barcelona.

Las características generales de las dovelas estudiadas son:

Espesor: 35 cm

Dovelas: 8

Características del Hormigón: HA-50

Contenido de las Fibras: 60 kg/m<sup>3</sup>

Longitud de las Fibras: 50 mm

Diámetro de las Fibras: 1 mm

Tipo de Fibra: extremos conformados.

Tenacidad: 3,2 MPa (Ensayo Belga NBN 15-238,1992).

---

Con respecto a la construcción de las dovelas, estas se fabricaron en una planta a pie de obra con un hormigón de resistencia 50 MPa a la compresión a los 28 días, y un módulo de deformación a la misma edad, de aproximadamente de 38 GPa. Para la confección de la dovela además se usó un contenido de fibras de acero (*Ilustración 2-A*), cuyas características son mencionadas anteriormente. La fibra era provista en sacos y sueltas. El límite elástico del acero era de 1000 MPa, lo que garantizaba que la rotura no se produjera por tracción de las fibras, sino por arrancamiento de las mismas.



**Ilustración 2-A:** Imagen representativa de las fibras de acero utilizadas en la confección de las dovelas.

---

## II. DETALLES EXPERIMENTALES

El volumen de cada dovela es de 3.3 m<sup>3</sup> aproximadamente y el hormigonado se realizó mediante una tolva móvil en dos etapas, con un proceso de vibración que dura en toda la etapa de llenado del molde a fin de compactar y rellenar todos los espacios.

Una vez concluido el hormigonado, se alisa manualmente la superficie superior de las dovelas y posteriormente se trasladaron a la cámara de curado, donde la temperatura se mantuvo normalmente entre los 40° y 45° C durante unas 5 horas. Al salir de la cámara de curado, se desmoldaron las dovelas y a su vez se colocaron las juntas de estanqueidad y los packers, para finalmente transportar las dovelas a la zona de acopio, donde se extrajeron los testigos que se utilizaron para el presente análisis.

En cuanto a la construcción misma de las dovelas, el hormigonado se realizó transportando el hormigón desde la mezcladora hasta el molde cuyo volumen de 3,3 m<sup>3</sup> aproximadamente confeccionaba una dovela. El transporte de la mezcla se realizó mediante una tolva de capacidad de 1,5 m<sup>3</sup> (*Ilustración 3-A*), por ende, se requería más de un vaciado para rellenar el contenido faltante por cada dovela. Cabe destacar que durante todo el proceso de vaciado se vibra el molde a fin de que el hormigón alcance todos los espacios, se compacte bien y no queden espacios vacíos.

El proceso de vibrado se realiza mediante cuatro vibradores que se encuentran en la parte inferior del mismo (*Ilustración 4-A*), pudiéndose regular la compactación, disminuyendo la potencia o simplemente apagándolos, para de esta forma lograr una mayor homogeneidad del hormigón, evitando segregación del árido y las fibras.

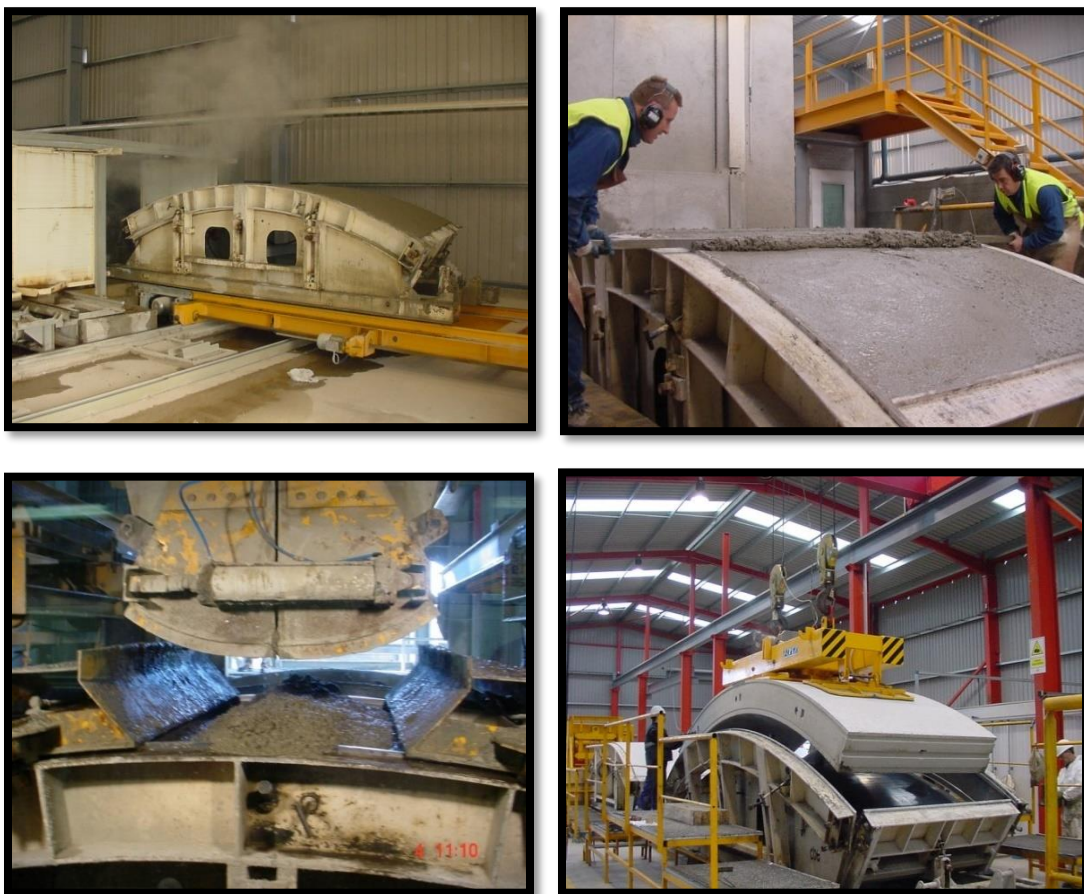


**Ilustración 3-A:** Imágenes de la construcción de las dovelas. Traslado del hormigón mediante tolva, vaciado de la mezcla al molde y alisado de la superficie de la dovela e ingreso a la cámara de curado.

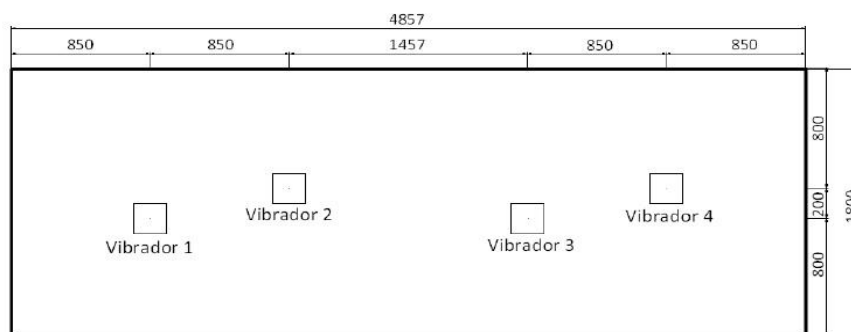


**Ilustración 4-A:** Posición de los vibradores en el molde de la dovela.

Para realizar el análisis comparativo sobre el promedio de cuantía de fibras y la resistencia residual de las dovelas construidas, se extrajeron testigos de tres de las dovelas prefabricadas correspondientes a diferentes anillos y diferentes edades de fabricación, en donde con el fin de analizar la distribución de la fibra, las dovelas se dividieron en tres zonas de extracción, que se definen como zona esquina, zona central y zona intermedia. Mientras que en la forma de extracción se definen tres posiciones, siendo estas, extracción longitudinal, transversal y radial, representadas en la *Ilustración 5-A*.

Una vez extraídos los testigos se procedió a extraer las probetas para ser evaluadas. Para ello de cada testigo se obtuvieron 2 probetas con esbeltez ( $1/\varnothing$ ), igual a 1, es decir altura igual al diámetro, esto con el fin de eliminar el efecto pared. Esta medida se representa según la *Ilustración 6-A*.

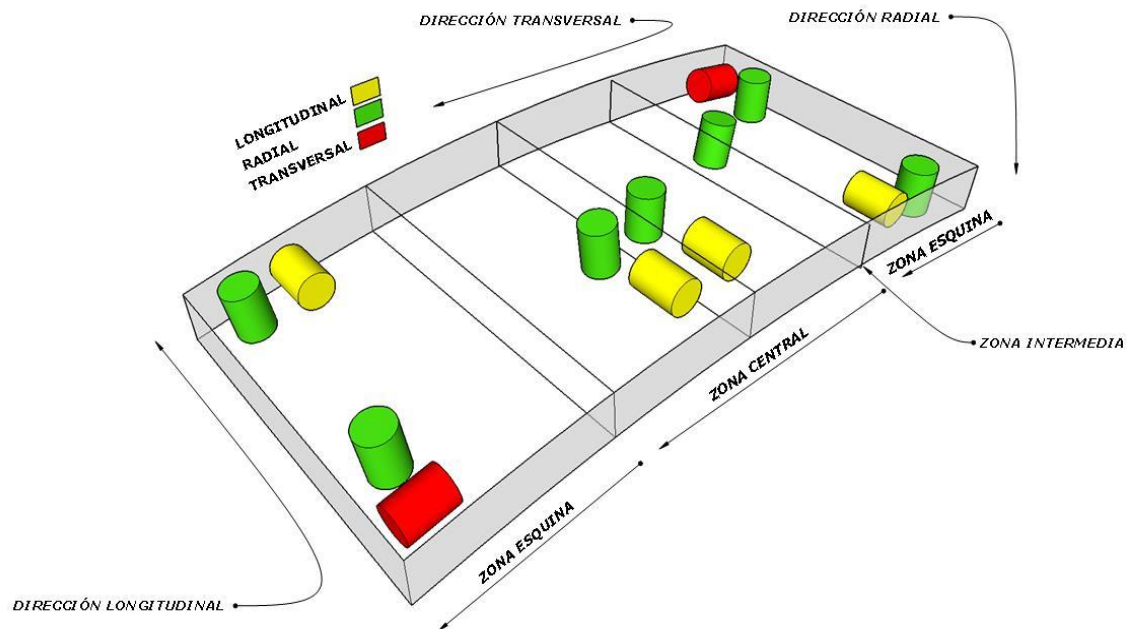


**Ilustración 5-A:** zonas y posiciones de extracción de los testigos en las dovelas.

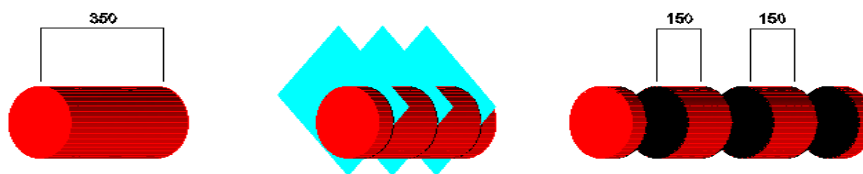
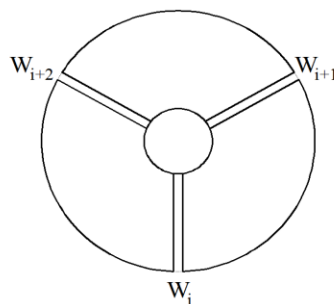
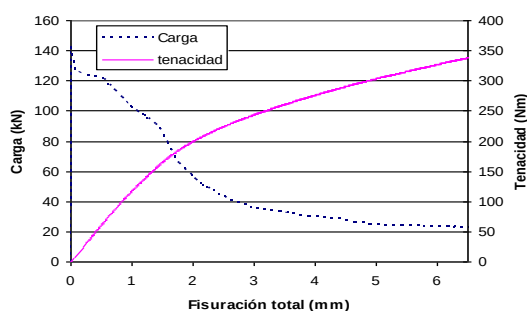


**Ilustración 6-A:** Corte de los de testigos Ø150 mm, definidos en 2 probetas, parte superior (intradós) y parte inferior (extradós).

Ya obtenidas las probetas se procedieron a evaluar mediante el ensayo Barcelona de resistencia a tracción indirecta, así como una posterior determinación del contenido de fibras.

En el caso de las probetas en estudio en el presente capítulo, se presentan los resultados de las cargas ( $P_i$ ) para los 6 valores de fisuración total, y los resultados de cuantía y resistencias máximas ( $Q_{\text{máx}}$ ) para todas las probetas ensayadas. En las tablas A-1; A-2; A-3; A-4; A-5; A-6; Mientas que en las tablas B-1; B-2; B-3; B-4; B-5; B-6 Se muestran los resultados obtenidos como resistencia residual, para ser analizados, (*ver anexo 1*).

A modo de ejemplo, se presenta en la *Figura 7-A*, una gráfica de los valores de carga y tenacidad para la probeta A9-2 (Ø150 mm), extraída radialmente y analizada por su estrato intradós. En ella se puede ver los distintos valores de carga y tenacidad para las diferentes fisuraciones totales.



$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, \dots, 6 \text{ mm fisuración total}$$

**Ilustración 7-A:** Ilustración sobre los resultados del testigo A9-2 del estrato intradós.

---

### III. ANALISIS DE RESULTADOS

Con los datos obtenidos del ensayo Barcelona, presentados en las tablas del Anexo 1, es que se procede a realizar un análisis de los resultados. Para ello De acuerdo con la norma UNE 83 515 (AENOR, 2010), la carga máxima,  $Q_{\max}$ , se utiliza para calcular el primer pico de fuerza, FCT, utilizando la ecuación (1):

$$f_{ct} = \frac{4 Q_{\max}}{9 \pi a h} \quad (1)$$

Donde " $a$ " es el diámetro de los punzones de carga, y " $h$ " es la altura de la muestra.

Las fuerzas residuales de la FRC,  $f_{ctRx}$ , definidas como las cargas unitarias correspondientes a un determinado TCOD =  $R_x$ , pueden calcularse utilizando la expresión:

$$f_{ctRx} = \frac{4 P_{Rx}}{9 \pi a h} \quad (2)$$

Con estas expresiones se procede a obtener las cargas unitarias por cada milímetro de fisuración de las probetas extraídas por posición y zona de extracción, más la obtención del primer pico de fuerza calculado con la carga máxima.

Los datos obtenidos son mostrados en las tablas en el *Anexo 2*.

## COMPARACIÓN DE CUANTÍA DE FIBRAS Y RESISTENCIA RESIDUAL EN TESTIGOS Ø 150 MM

Con los resultados mostrados en tablas (ver anexo 2), se procedió a realizar un análisis comparativo entre las cuantías promedio de los testigos extraídos de las 3 dovelas experimentales, con el fin de visualizar conclusiones con respecto a la distribución y cantidad de éstas por cada sentido y zona de extracción del testigo.

A su vez se realiza una comparación de la resistencia residual promedio de las 3 dovelas experimentales por cada sentido y zona de extracción, cuyos resultados y conclusiones se ejemplifican en las tablas y figuras mostradas a continuación.

### LONGITUDINAL CENTRAL V/S RADIAL CENTRAL

|         | LONGITUDINAL<br>CENTRAL |       |       | RADIAL<br>CENTRAL |       |       | LONGITUDINAL<br>CENTRAL |      |       | RADIAL<br>CENTRAL |       |       |
|---------|-------------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------------|------|-------|-------------------|-------|-------|
|         | INTRADOS                |       |       |                   |       |       | EXTRADOS                |      |       |                   |       |       |
|         | Prom                    | S     | CV    | Prom              | S     | CV    | Prom                    | S    | CV    | Prom              | S     | CV    |
| Cuantía | 59,70                   | 17,02 | 28,51 | 61,00             | 13,01 | 21,33 | 60,07                   | 8,00 | 13,32 | 61,35             | 15,13 | 24,66 |
| Qmáx    | 1,07                    | 0,07  | 6,26  | 1,08              | 0,24  | 22,33 | 0,98                    | 0,08 | 7,83  | 1,18              | 0,06  | 5,35  |
| P1      | 0,61                    | 0,18  | 29,41 | 0,71              | 0,11  | 15,53 | 0,52                    | 0,09 | 17,15 | 0,59              | 0,13  | 22,02 |
| P2      | 0,40                    | 0,15  | 38,34 | 0,51              | 0,09  | 17,99 | 0,29                    | 0,06 | 22,49 | 0,36              | 0,15  | 41,83 |
| P3      | 0,28                    | 0,10  | 35,04 | 0,36              | 0,10  | 28,03 | 0,20                    | 0,04 | 18,73 | 0,25              | 0,09  | 36,87 |
| P4      | 0,23                    | 0,08  | 34,99 | 0,28              | 0,09  | 32,69 | 0,15                    | 0,02 | 14,66 | 0,21              | 0,07  | 35,38 |
| P5      | 0,20                    | 0,07  | 33,79 | 0,24              | 0,08  | 33,17 | 0,12                    | 0,02 | 16,15 | 0,17              | 0,07  | 37,94 |
| P6      | 0,17                    | 0,06  | 33,88 | 0,20              | 0,07  | 34,04 | 0,11                    | 0,02 | 19,02 | 0,15              | 0,06  | 39,71 |

**Tabla 1-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima, y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las 3 dovelas analizadas.

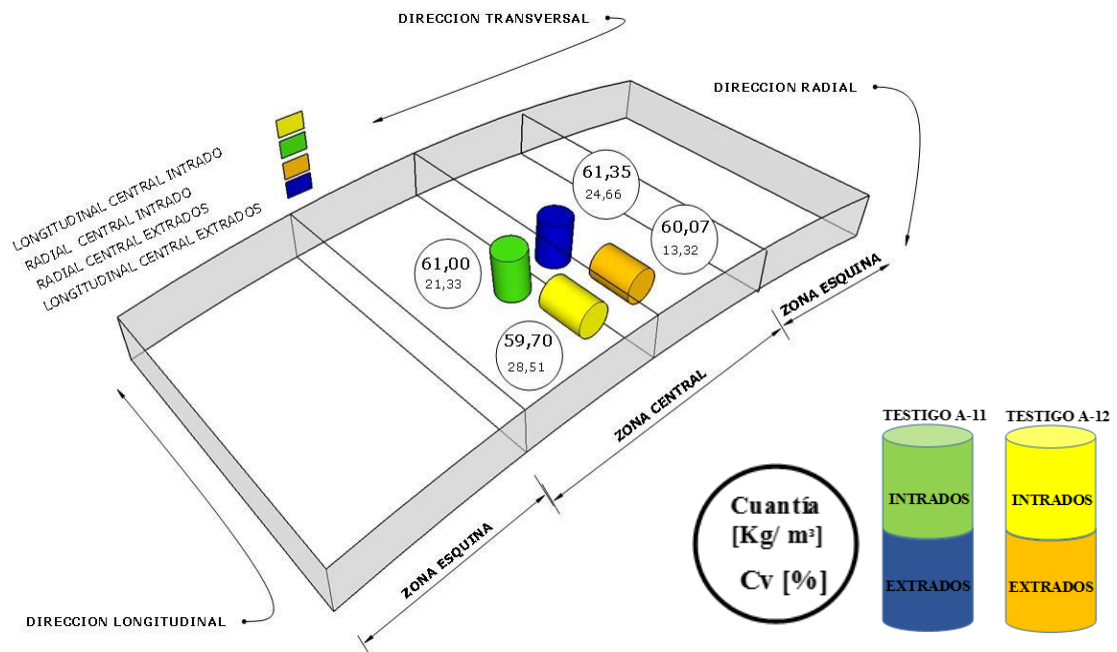


**Ilustración 1-B:** Ilustración Comparativa de la Cuantía de Fibras, de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

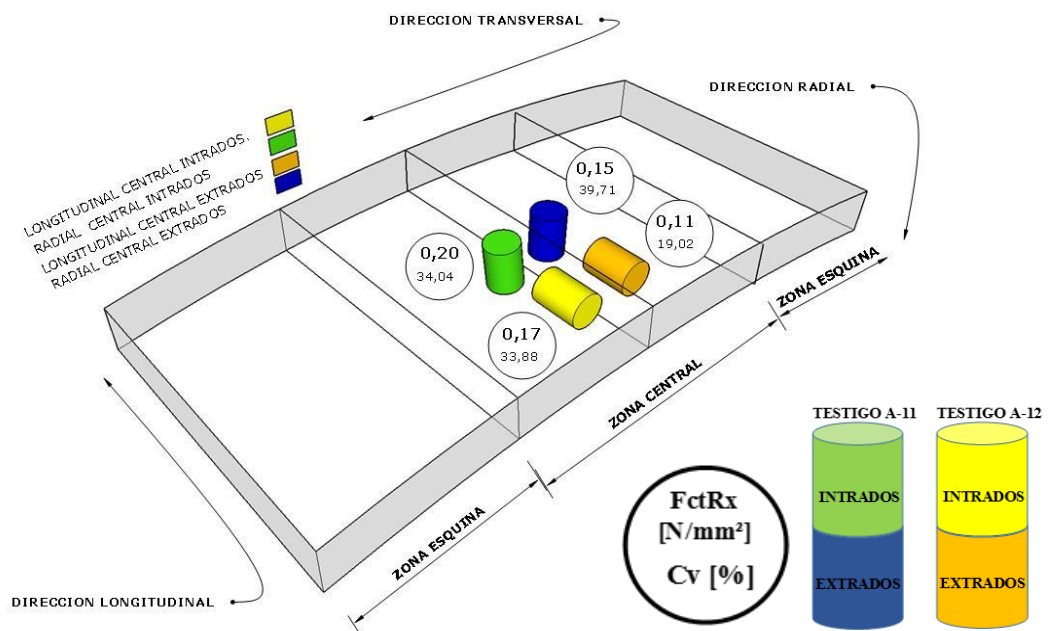


**Ilustración 2-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

---

De los resultados de la tabla 1- C se destaca que el promedio de cuantía obtenidos en el volumen de las probetas tanto radial como longitudinal se acerca al utilizado experimentalmente, por lo que se deduce una homogeneidad en la zona central, correspondiente a la zona de vertido del hormigón. Mientras que, analizando del punto de vista del espesor de las probetas, tanto en su sección intradós y extradós, los resultados reflejan que no hay mucha variación de la cuantía, descartando que el proceso de vibrado hiciese descender la fibra.

Los resultados de esta comparación reflejan que la cuantía es mayor en los testigos extraídos Radialmente de la zona central, en la parte extradós de las probetas, con un promedio de cuantía de 61,35 [kg/m<sup>3</sup>] y CV de 24,66 %. Obteniendo la mayor variabilidad en las probetas extraídas longitudinalmente de la zona central, sección intradós.

Con respecto a la Resistencia Residual es mayor en testigos obtenidos Radialmente de la zona central, en la parte intradós de las probetas, con un promedio de Resistencia de 0,20 [N/mm<sup>2</sup>] y CV de 34,04 %, corroborando la dependencia de la cuantía de fibras en el resultado de la resistencia residual.

## LONGITUDINAL CENTRAL V/S LONGITUDINAL ESQUINA

|         | LONGITUDINAL<br>CENTRAL |       |       | LONGITUDINAL<br>ESQUINA |       |       | LONGITUDINAL<br>CENTRAL |      |       | LONGITUDINAL<br>ESQUINA |      |       |
|---------|-------------------------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------------------------|------|-------|-------------------------|------|-------|
|         | INTRADOS                |       |       |                         |       |       | EXTRADOS                |      |       |                         |      |       |
|         | Prom                    | S     | CV    | Prom                    | S     | CV    | Prom                    | S    | CV    | Prom                    | S    | CV    |
| Cuantía | 59,70                   | 17,02 | 28,51 | 72,68                   | 10,54 | 14,50 | 60,07                   | 8,00 | 13,32 | 69,57                   | 4,69 | 6,75  |
| Qmax    | 1,07                    | 0,07  | 6,26  | 1,14                    | 0,08  | 6,93  | 0,98                    | 0,08 | 7,83  | 1,12                    | 0,07 | 6,69  |
| P1      | 0,61                    | 0,18  | 29,41 | 0,90                    | 0,12  | 13,75 | 0,52                    | 0,09 | 17,15 | 0,78                    | 0,11 | 13,98 |
| P2      | 0,40                    | 0,15  | 38,34 | 0,67                    | 0,13  | 20,06 | 0,29                    | 0,06 | 22,49 | 0,49                    | 0,12 | 24,25 |
| P3      | 0,28                    | 0,10  | 35,04 | 0,49                    | 0,12  | 24,80 | 0,20                    | 0,04 | 18,73 | 0,34                    | 0,09 | 26,25 |
| P4      | 0,23                    | 0,08  | 34,99 | 0,41                    | 0,10  | 24,53 | 0,15                    | 0,02 | 14,66 | 0,28                    | 0,09 | 31,51 |
| P5      | 0,20                    | 0,07  | 33,79 | 0,36                    | 0,10  | 26,95 | 0,12                    | 0,02 | 16,15 | 0,24                    | 0,08 | 32,38 |
| P6      | 0,17                    | 0,06  | 33,88 | 0,31                    | 0,09  | 28,71 | 0,11                    | 0,02 | 19,02 | 0,21                    | 0,07 | 31,44 |

**Tabla 2-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima, y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición longitudinal, de la zona Central y Esquina de las dovelas.

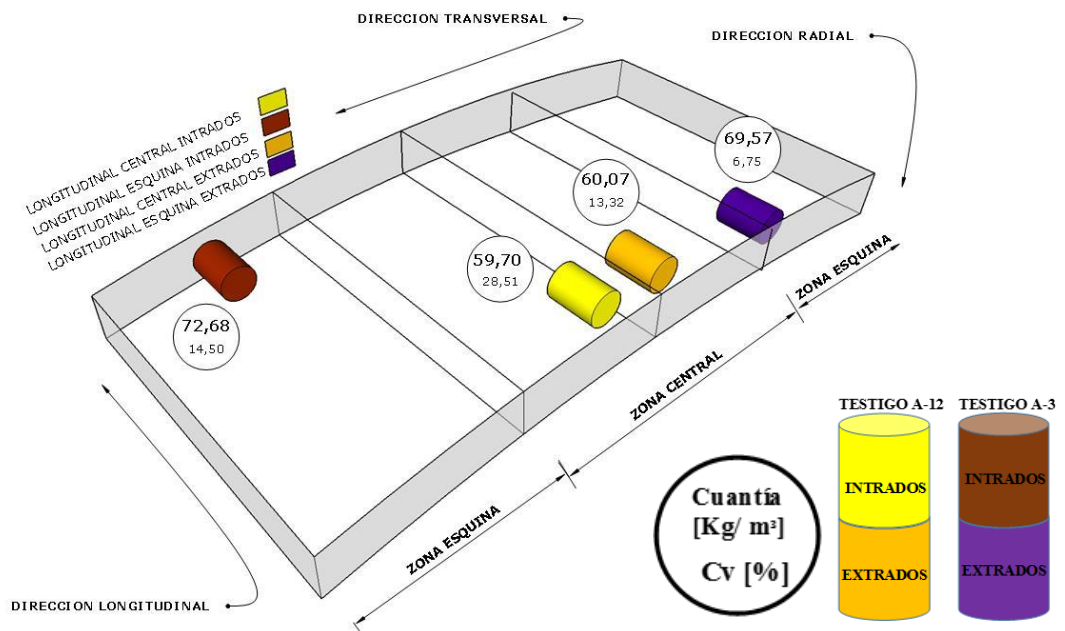


**Ilustración 3-B:** Ilustración Comparativa de la Cuantía de Fibras, de las probetas extraídas en posición longitudinal Central y longitudinal Esquina de las dovelas.

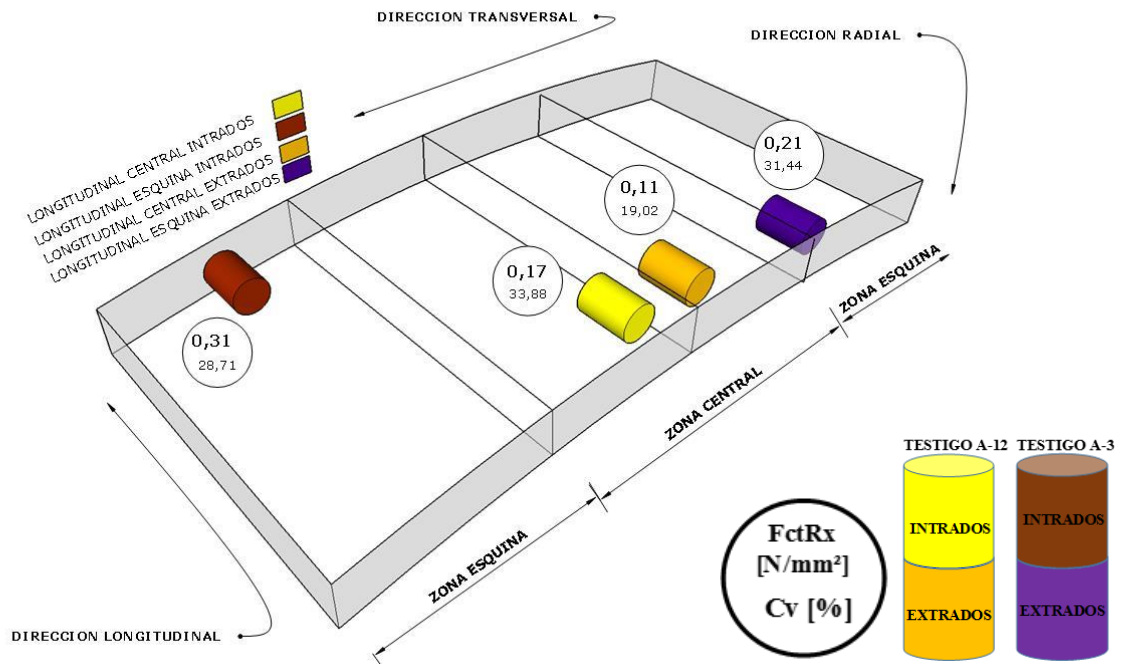


**Ilustración 4-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición longitudinal de la zona Central y Esquina de las dovelas.

De la tabla 2-C, se destacan mayores valores de cuantía en las probetas en su sección intradós, lo que cual se refleja en el cálculo de las resistencias residuales a los distintos momentos de fisuración, en donde los incrementos en el valor varían entre un 17,3 y 66,6% más de resistencia en la parte intradós de cada probeta, tanto en la extraídas de la zona central como de la zona de las esquinas.

La mayor cuantía promedio se obtiene de los testigos extraídos Longitudinalmente de la zona de las esquinas, en su sección intradós, con un promedio de cuantía de 72,68 [kg/m<sup>3</sup>] y un CV de 14,5 %.

La mayor variabilidad en los datos se encuentra en las probetas obtenidas Longitudinalmente de la zona central, sección intradós, con un CV de 17,03 %.

Con respecto a la Resistencia Residual, ésta es mayor en testigos extraídos de manera Longitudinal de la zona de las esquinas, en su sección intradós de las probetas, con un promedio de Resistencia de 0,31 [N/mm<sup>2</sup>] y CV de 28,71 %.

## LONGITUDINAL CENTRAL V/S TRANSVERSAL ESQUINA

|         | LONGITUDINAL<br>CENTRAL |       |       | TRANSVERSAL<br>ESQUINA |      |       | LONGITUDINAL<br>CENTRAL |      |       | TRANSVERSAL<br>ESQUINA |      |       |
|---------|-------------------------|-------|-------|------------------------|------|-------|-------------------------|------|-------|------------------------|------|-------|
|         | INTRADOS                |       |       |                        |      |       | EXTRADOS                |      |       |                        |      |       |
|         | Prom                    | S     | CV    | Prom                   | S    | CV    | Prom                    | S    | CV    | Prom                   | S    | CV    |
| Cuantía | 59,70                   | 17,02 | 28,51 | 63,17                  | 6,00 | 9,50  | 60,07                   | 8,00 | 13,32 | 64,05                  | 4,41 | 6,89  |
| Qmax    | 1,07                    | 0,07  | 6,26  | 1,12                   | 0,08 | 7,33  | 0,98                    | 0,08 | 7,83  | 1,12                   | 0,10 | 9,30  |
| P1      | 0,61                    | 0,18  | 29,41 | 0,76                   | 0,06 | 8,53  | 0,52                    | 0,09 | 17,15 | 1,12                   | 0,10 | 9,30  |
| P2      | 0,40                    | 0,15  | 38,34 | 0,48                   | 0,07 | 14,33 | 0,29                    | 0,06 | 22,49 | 0,39                   | 0,12 | 30,04 |
| P3      | 0,28                    | 0,10  | 35,04 | 0,33                   | 0,03 | 8,12  | 0,20                    | 0,04 | 18,73 | 0,28                   | 0,10 | 34,88 |
| P4      | 0,23                    | 0,08  | 34,99 | 0,26                   | 0,03 | 10,02 | 0,15                    | 0,02 | 14,66 | 0,23                   | 0,08 | 33,97 |
| P5      | 0,20                    | 0,07  | 33,79 | 0,22                   | 0,03 | 15,76 | 0,12                    | 0,02 | 16,15 | 0,23                   | 0,08 | 33,97 |
| P6      | 0,17                    | 0,06  | 33,88 | 0,18                   | 0,02 | 13,34 | 0,11                    | 0,02 | 19,02 | 0,19                   | 0,06 | 32,62 |

**Tabla 3-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima, y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición longitudinal, de la zona Central y en probetas extraídas transversalmente de las Esquinas de las dovelas.

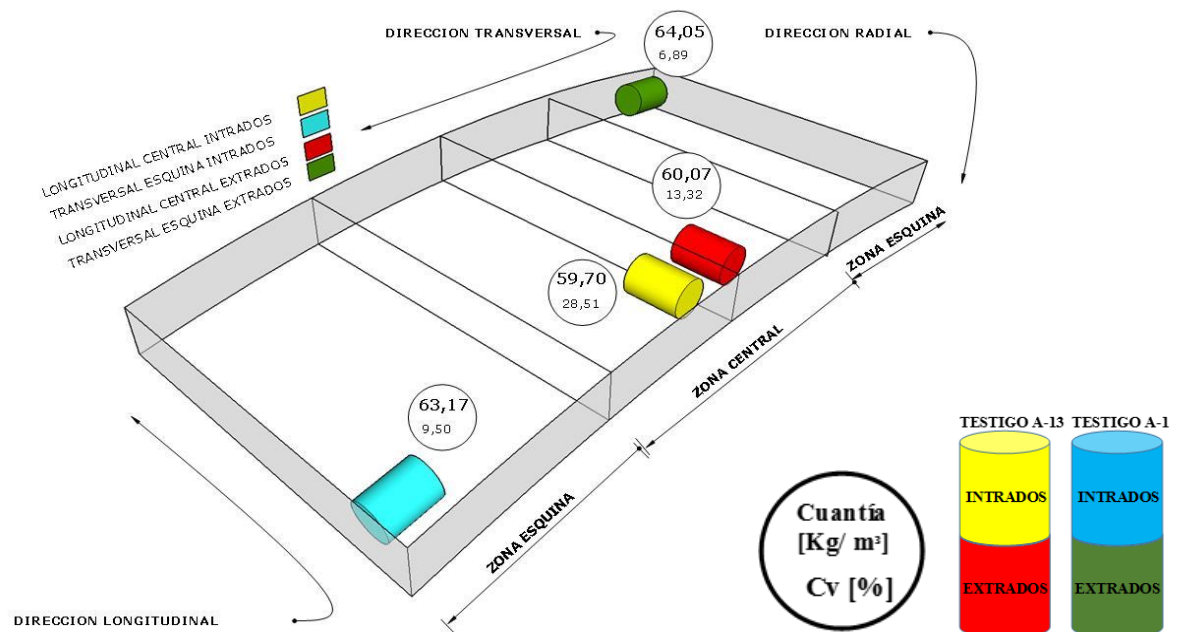


**Ilustración 5-B:** Ilustración Comparativa de la Cuantía de Fibras, de las probetas extraídas en posición longitudinal Central y Transversal Esquina de las dovelas.

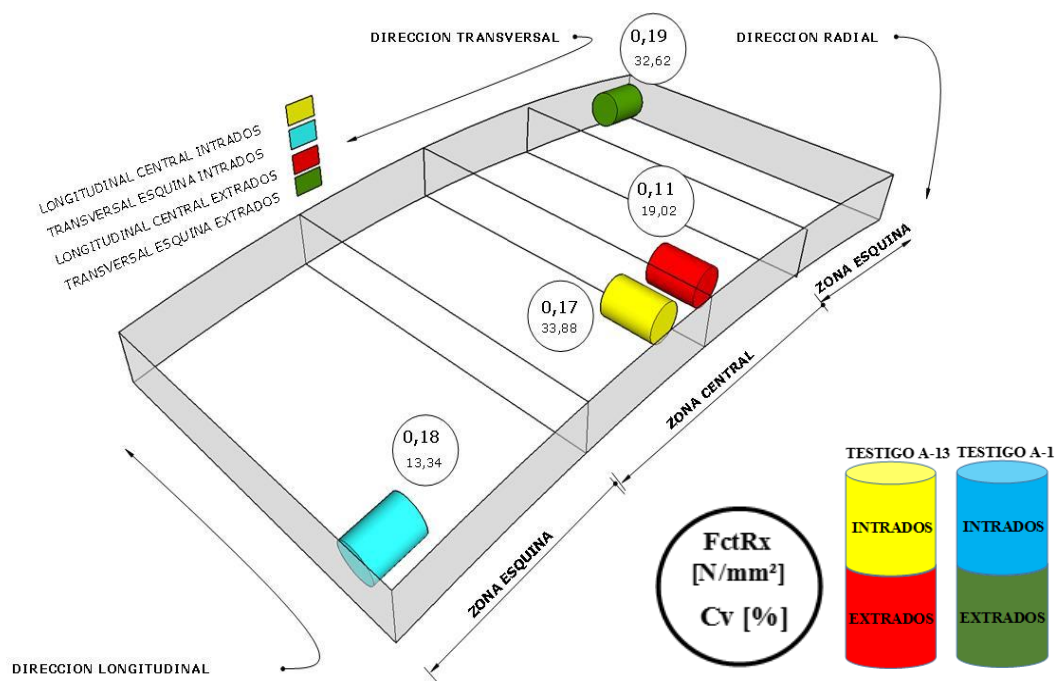


**Ilustración 6-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición longitudinal Central y Transversal Esquina de las dovelas.

Analizando la tabla, se observa que la variabilidad de los resultados respecto a su media es mayor en la zona central, mientras que en las esquinas es notoriamente menor, pero a su vez concentrando mayor cuantía de fibras en sus probetas en dicha zona, valores por sobre la cuantía experimental.

Con respecto a esta comparación se destaca que la cuantía es mayor en probetas extraídas de manera Transversal de la zona de las esquinas, en su sección extrados, con un promedio de cuantía de 64,05 [kg/m<sup>3</sup>] y CV de 6,89 %, por ende, obteniendo mayor resistencia residual en dicha zona.

Otro detalle es la variación que existe en el promedio de la cuantía en ambas zonas, cuyo valor es bajo en comparación a otros resultados analizados, obteniendo en esta equiparación una diferencia promedio entre ambas zonas de extracción, un valor de 3,7 kg/m<sup>3</sup>, equivalente a un 6,21 % más de fibras en la zona de las esquinas en relación a la zona central.

## LONGITUDINAL ESQUINA V/S RADIAL ESQUINA V/S TRANSVERSAL ESQUINA

|         | LONGITUDINAL<br>ESQUINA |       |       | RADIAL<br>ESQUINA |      |       | TRANSVERSAL<br>ESQUINA |      |       |
|---------|-------------------------|-------|-------|-------------------|------|-------|------------------------|------|-------|
|         | INTRADOS                |       |       |                   |      |       |                        |      |       |
|         | Prom                    | S     | CV    | Prom              | S    | CV    | Prom                   | S    | CV    |
| Cuantía | 72,68                   | 10,54 | 14,50 | 70,68             | 8,37 | 11,84 | 63,17                  | 6,00 | 9,50  |
| Qmáx    | 1,14                    | 0,08  | 6,93  | 1,02              | 0,34 | 33,24 | 1,12                   | 0,08 | 7,33  |
| P1      | 0,90                    | 0,12  | 13,75 | 0,43              | 0,18 | 40,92 | 0,76                   | 0,06 | 8,53  |
| P2      | 0,67                    | 0,13  | 20,06 | 0,26              | 0,11 | 43,23 | 0,48                   | 0,07 | 14,33 |
| P3      | 0,49                    | 0,12  | 24,80 | 0,18              | 0,09 | 47,81 | 0,33                   | 0,03 | 8,12  |
| P4      | 0,41                    | 0,10  | 24,53 | 0,14              | 0,07 | 50,24 | 0,26                   | 0,03 | 10,02 |
| P5      | 0,36                    | 0,10  | 26,95 | 0,12              | 0,06 | 48,45 | 0,22                   | 0,03 | 15,76 |
| P6      | 0,31                    | 0,09  | 28,71 | 0,10              | 0,05 | 48,56 | 0,18                   | 0,02 | 13,34 |

|         | LONGITUDINAL<br>ESQUINA |      |       | RADIAL<br>ESQUINA |       |       | TRANSVERSAL<br>ESQUINA |      |       |
|---------|-------------------------|------|-------|-------------------|-------|-------|------------------------|------|-------|
|         | EXTRADOS                |      |       |                   |       |       |                        |      |       |
|         | Prom                    | S    | CV    | Prom              | S     | CV    | Prom                   | S    | CV    |
| Cuantía | 69,57                   | 4,69 | 6,75  | 64,07             | 10,91 | 17,03 | 64,05                  | 4,41 | 6,89  |
| Qmáx    | 1,12                    | 0,07 | 6,69  | 1,04              | 0,32  | 30,42 | 1,12                   | 0,10 | 9,30  |
| P1      | 0,78                    | 0,11 | 13,98 | 0,49              | 0,26  | 53,09 | 1,12                   | 0,10 | 9,30  |
| P2      | 0,49                    | 0,12 | 24,25 | 0,34              | 0,20  | 57,70 | 0,39                   | 0,12 | 30,04 |
| P3      | 0,34                    | 0,09 | 26,25 | 0,23              | 0,15  | 62,55 | 0,28                   | 0,10 | 34,88 |
| P4      | 0,28                    | 0,09 | 31,51 | 0,17              | 0,09  | 56,11 | 0,23                   | 0,08 | 33,97 |
| P5      | 0,24                    | 0,08 | 32,38 | 0,14              | 0,08  | 55,14 | 0,23                   | 0,08 | 33,97 |
| P6      | 0,21                    | 0,07 | 31,44 | 0,12              | 0,06  | 54,59 | 0,19                   | 0,06 | 32,62 |

**Tabla 4-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima, y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona Esquina de las 3 dovelas analizadas.

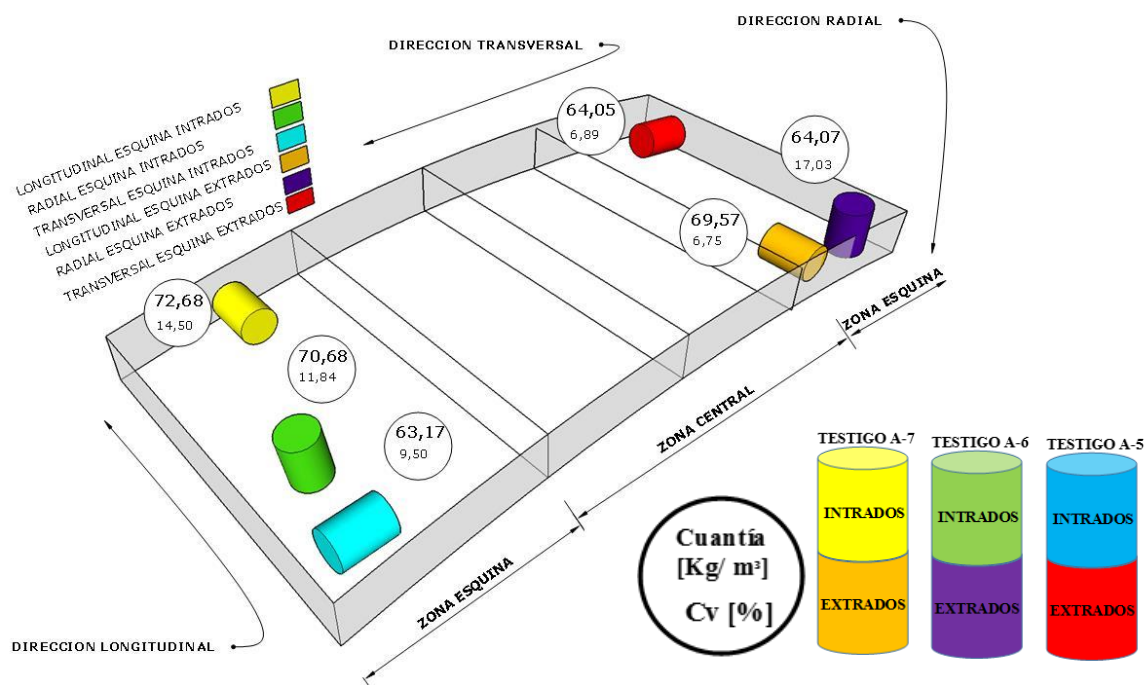


**Ilustración 7-B:** Ilustración Comparativa de la Cuantía de Fibras, de las probetas extraídas en posición Longitudinal, Radial y Transversal de la zona de las esquinas de las dovelas.

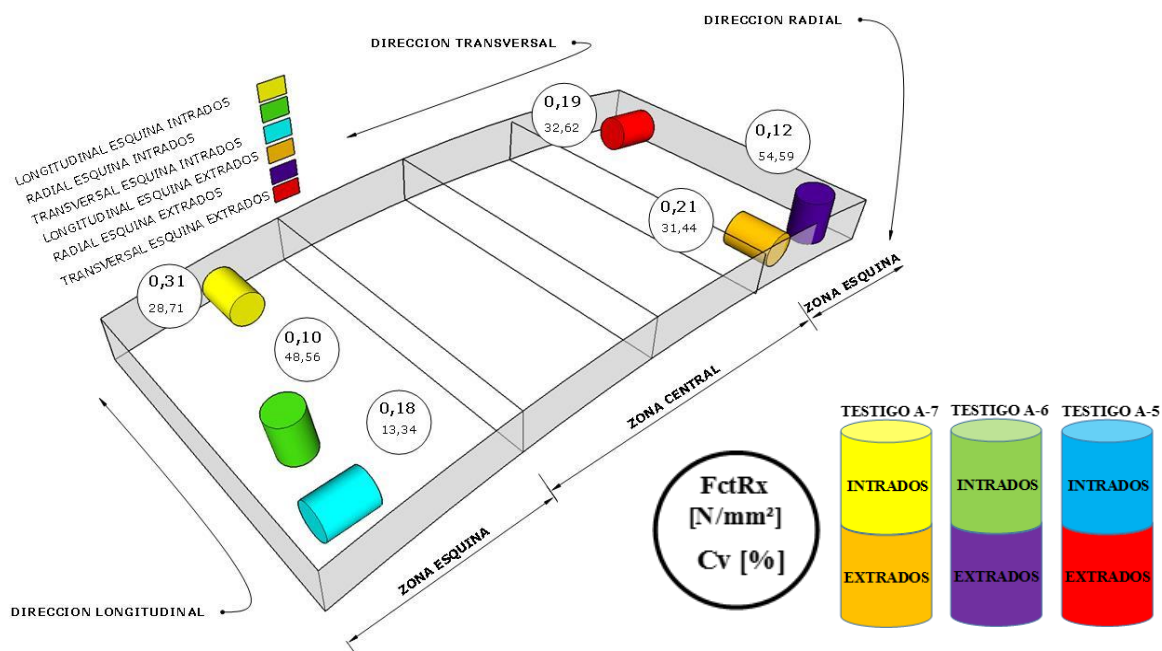


**Ilustración 8-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición Longitudinal, Radial y Transversal de la zona de las esquinas de las dovelas

---

Los resultados de esta comparación reflejan que la cuantía es mayor en los testigos extraídos Longitudinalmente de la zona de las esquinas, parte intradós de las probetas, con un promedio de cuantía de 72,68 [kg/m<sup>3</sup>] y CV de 14,50 %. Con lo anterior se obtiene un valor promedio de resistencia residual de 0,31[N/mm<sup>2</sup>] y CV de 28,71 %.

La mayor variabilidad de los resultados se observa, en las probetas extraídas en posición longitudinal, mientras que la menor, se obtiene en probetas transversales. Aunque los resultados reflejen lo anterior la variabilidad en los resultados de las probetas de esta zona de extracción es baja, por lo que aun cuando la muestra datos no es grande, estos resultados reflejan homogeneidad en sus valores, ofreciendo seguridad en el análisis.

En esta equiparación se denota además que la mayor concentración de fibras se obtiene en la sección intradós de las probetas, reflejando por ejemplo en probetas en dirección longitudinal un incremento de un 4,47% en su parte intradós con respecto a su sección extradós, lo mismo ocurre en las probetas radiales con un incremento de un 6,61%, exceptuando el caso de las probetas trasversales en donde se obtienen mayores concentraciones en su sección extradós, reflejando un aumento de 6,4 % respecto al sector intradós.

En esta zona de extracción en particular es donde se reflejan mayores cuantías, cuyos valores están por sobre el valor experimental. Por consiguiente, entre las direcciones de extracción las variaciones de cuantía son del orden de un 9,92 %, en su clase intradós, mientras que de un 5,73 % en su sección extradós.

## LONGITUDINAL CENTRAL V/S RADIAL ESQUINA

|         | LONGITUDINAL<br>CENTRAL |       |       | RADIAL<br>ESQUINA |      |       | LONGITUDINAL<br>CENTRAL |      |       | RADIAL<br>ESQUINA |       |       |
|---------|-------------------------|-------|-------|-------------------|------|-------|-------------------------|------|-------|-------------------|-------|-------|
|         | INTRADOS                |       |       |                   |      |       | EXTRADOS                |      |       |                   |       |       |
|         | Prom                    | S     | CV    | Prom              | S    | CV    | Prom                    | S    | CV    | Prom              | S     | CV    |
| Cuantía | 59,70                   | 17,02 | 28,51 | 70,68             | 8,37 | 11,84 | 60,07                   | 8,00 | 13,32 | 64,07             | 10,91 | 17,03 |
| Qmax    | 1,07                    | 0,07  | 6,26  | 1,02              | 0,34 | 33,24 | 0,98                    | 0,08 | 7,83  | 1,04              | 0,32  | 30,42 |
| P1      | 0,61                    | 0,18  | 29,41 | 0,43              | 0,18 | 40,92 | 0,52                    | 0,09 | 17,15 | 0,49              | 0,26  | 53,09 |
| P2      | 0,40                    | 0,15  | 38,34 | 0,26              | 0,11 | 43,23 | 0,29                    | 0,06 | 22,49 | 0,34              | 0,20  | 57,70 |
| P3      | 0,28                    | 0,10  | 35,04 | 0,18              | 0,09 | 47,81 | 0,20                    | 0,04 | 18,73 | 0,23              | 0,15  | 62,55 |
| P4      | 0,23                    | 0,08  | 34,99 | 0,14              | 0,07 | 50,24 | 0,15                    | 0,02 | 14,66 | 0,17              | 0,09  | 56,11 |
| P5      | 0,20                    | 0,07  | 33,79 | 0,12              | 0,06 | 48,45 | 0,12                    | 0,02 | 16,15 | 0,14              | 0,08  | 55,14 |
| P6      | 0,17                    | 0,06  | 33,88 | 0,10              | 0,05 | 48,56 | 0,11                    | 0,02 | 19,02 | 0,12              | 0,06  | 54,59 |

**Tabla 5-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima, y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición Longitudinal de la zona Central y posición Radial de la zona Esquina de las 3 dovelas.

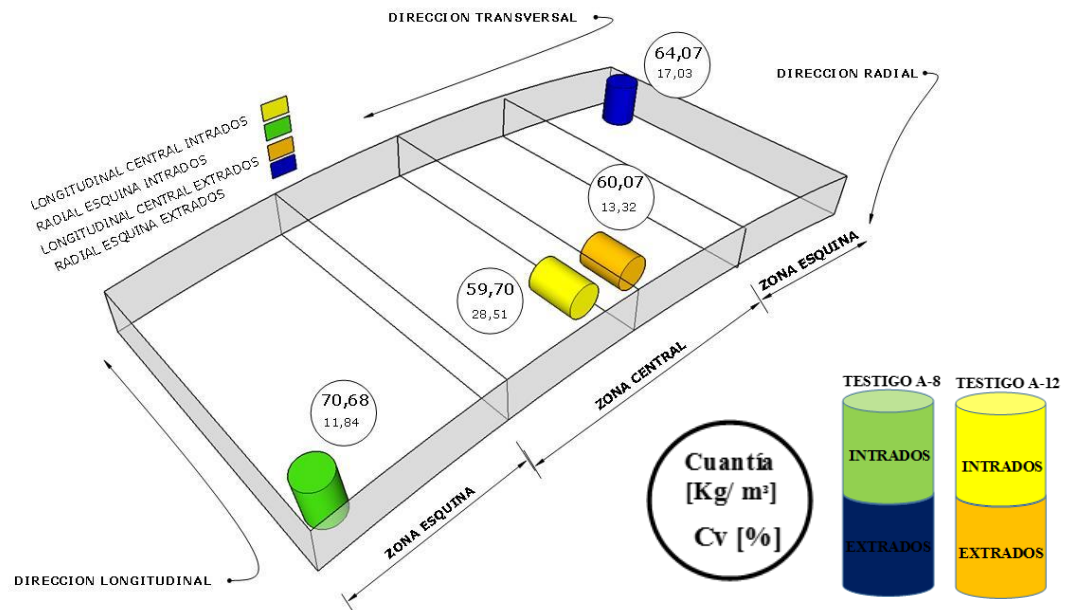


**Ilustración 9-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición longitudinal de la zona Central y radial de la zona Esquina de las dovelas.

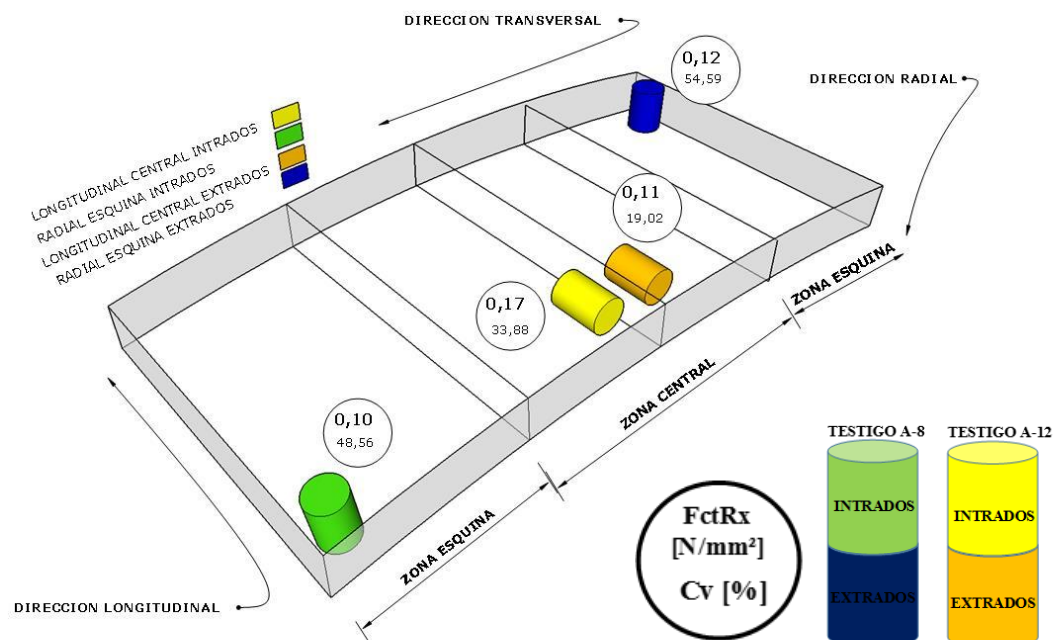


**Ilustración 10-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición longitudinal de la zona Central y radial de la zona Esquina de las dovelas.

De acuerdo a la tabla y las ilustraciones comparativas, se observa que la cuantía es mayor en los testigos extraídos Radialmente de la zona de las esquinas, por su parte intradós, con un promedio de cuantía de 70,68 [kg/m<sup>3</sup>] y CV de 11,84 %. En este caso en particular la mayor resistencia residual se refleja en la zona central de las dovelas, específicamente en los testigos extraídos de manera longitudinal, con una resistencia de 0,17 [N/mm<sup>2</sup>] y CV de 33,88 %, en su sección intradós. Esto debido a la falta de datos en uno de los ensayos realizados al testigo A8-1 (ver anexo 2).

En este caso las mayores cuantías, se concentran en la zona de las esquinas, las cuales sobrepasan en promedio, un 12,3 % la cuantía experimental. Lo cual refleja la tendencia de la fibra a posicionarse en dicha zona, aunque en el cálculo de las resistencias residuales se observen variabilidades medianamente altas, debido a que los datos de la muestra presentan una leve heterogeneidad.

## RADIAL ESQUINA V/S RADIAL CENTRAL

|         | RADIAL<br>CENTRAL |       |       | RADIAL<br>ESQUINA |      |       | RADIAL<br>CENTRAL |       |       | RADIAL<br>ESQUINA |       |       |
|---------|-------------------|-------|-------|-------------------|------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
|         | INTRADOS          |       |       |                   |      |       | EXTRADOS          |       |       |                   |       |       |
|         | Prom              | S     | CV    | Prom              | S    | CV    | Prom              | S     | CV    | Prom              | S     | CV    |
| Cuantía | 61,00             | 13,01 | 21,33 | 70,68             | 8,37 | 11,84 | 61,35             | 15,13 | 24,66 | 64,07             | 10,91 | 17,03 |
| Qmax    | 1,08              | 0,24  | 22,33 | 1,02              | 0,34 | 33,24 | 1,18              | 0,06  | 5,35  | 1,04              | 0,32  | 30,42 |
| P1      | 0,71              | 0,11  | 15,53 | 0,43              | 0,18 | 40,92 | 0,59              | 0,13  | 22,02 | 0,49              | 0,26  | 53,09 |
| P2      | 0,51              | 0,09  | 17,99 | 0,26              | 0,11 | 43,23 | 0,36              | 0,15  | 41,83 | 0,34              | 0,20  | 57,70 |
| P3      | 0,36              | 0,10  | 28,03 | 0,18              | 0,09 | 47,81 | 0,25              | 0,09  | 36,87 | 0,23              | 0,15  | 62,55 |
| P4      | 0,28              | 0,09  | 32,69 | 0,14              | 0,07 | 50,24 | 0,21              | 0,07  | 35,38 | 0,17              | 0,09  | 56,11 |
| P5      | 0,24              | 0,08  | 33,17 | 0,12              | 0,06 | 48,45 | 0,17              | 0,07  | 37,94 | 0,14              | 0,08  | 55,14 |
| P6      | 0,20              | 0,07  | 34,04 | 0,10              | 0,05 | 48,56 | 0,15              | 0,06  | 39,71 | 0,12              | 0,06  | 54,59 |

**Tabla 6-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima, y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las 3 dovelas analizadas.

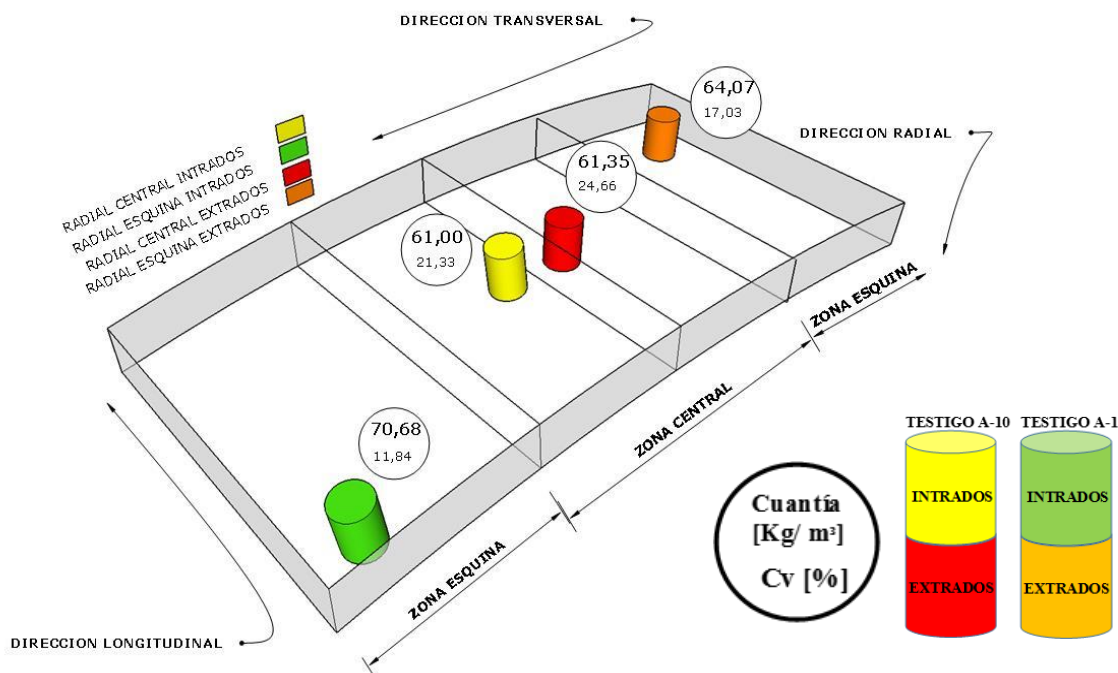


**Ilustración 11-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición longitudinal de la zona Central y radial de la zona Esquina de las dovelas.

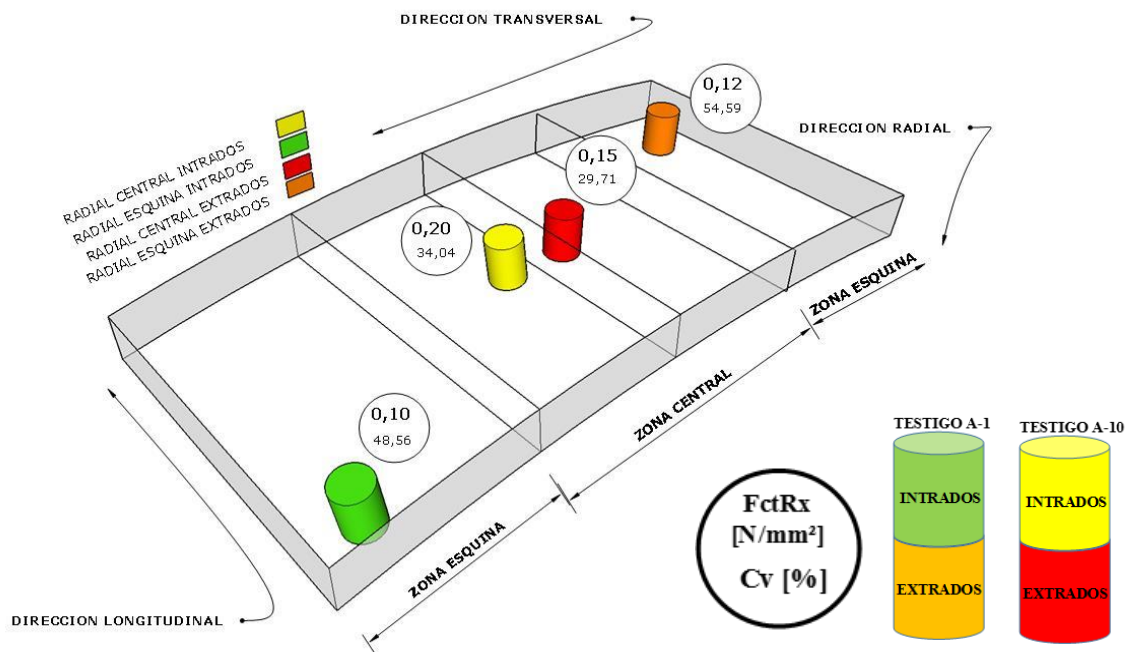


**Ilustración 12-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 6-c, se observa que la cuantía es mayor en las probetas extraídas Radialmente de la zona de las esquinas, en su sección intradós, con un promedio de cuantía de 70,68 [kg/m³] y CV de 11,84 %.

Además, se denota un alza considerable de la cuantía en las esquinas con respecto a la zona central de la dovela, donde en la fabricación era la zona de vertido del hormigón. El incremento de las fibras entre una zona y otra, alcanza los 9,68 [kg/m³] en la sección intradós, mientras que en la parte extradós, la diferencia es de 2,72 [kg/m³].

Otro detalle importante es la variabilidad de los datos, la cual es medianamente alta en la zona central, independiente de la posición del testigo a extraer, como se ha visto reflejado en comparaciones anteriores.

Por ultimo las resistencias residuales promedio mantienen un valor que varía entre los 10 [N/mm²] y los 20 [N/mm²], siendo en este caso por falta de datos del testigo A8-1, mayor la resistencia en la zona central.

## RADIAL CENTRAL V/S RADIAL INTERMEDIO

|         | RADIAL<br>CENTRAL |       |       | RADIAL<br>INTERMEDIO |      |        | RADIAL<br>CENTRAL |       |       | RADIAL<br>INTERMEDIO |       |       |
|---------|-------------------|-------|-------|----------------------|------|--------|-------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
|         | INTRADOS          |       |       |                      |      |        | EXTRADOS          |       |       |                      |       |       |
|         | Prom              | S     | CV    | Prom                 | S    | CV     | Prom              | S     | CV    | Prom                 | S     | CV    |
| Cuantía | 61,00             | 13,01 | 21,33 | 60,60                | 2,17 | 3,57   | 61,35             | 15,13 | 24,66 | 61,47                | 10,51 | 17,11 |
| Qmax    | 1,08              | 0,24  | 22,33 | 0,68                 | 0,60 | 88,50  | 1,18              | 0,06  | 5,35  | 0,74                 | 0,64  | 86,68 |
| P1      | 0,71              | 0,11  | 15,53 | 0,46                 | 0,40 | 87,36  | 0,59              | 0,13  | 22,02 | 0,25                 | 0,25  | 98,22 |
| P2      | 0,51              | 0,09  | 17,99 | 0,46                 | 0,40 | 87,36  | 0,36              | 0,15  | 41,83 | 0,17                 | 0,17  | 98,85 |
| P3      | 0,36              | 0,10  | 28,03 | 0,23                 | 0,24 | 102,02 | 0,25              | 0,09  | 36,87 | 0,17                 | 0,17  | 98,85 |
| P4      | 0,28              | 0,09  | 32,69 | 0,20                 | 0,20 | 102,27 | 0,21              | 0,07  | 35,38 | 0,13                 | 0,13  | 97,82 |
| P5      | 0,24              | 0,08  | 33,17 | 0,17                 | 0,19 | 106,40 | 0,17              | 0,07  | 37,94 | 0,11                 | 0,10  | 96,20 |
| P6      | 0,20              | 0,07  | 34,04 | 0,16                 | 0,18 | 106,73 | 0,15              | 0,06  | 39,71 | 0,09                 | 0,08  | 99,15 |

**Tabla 7-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima, y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las 3 dovelas analizadas.

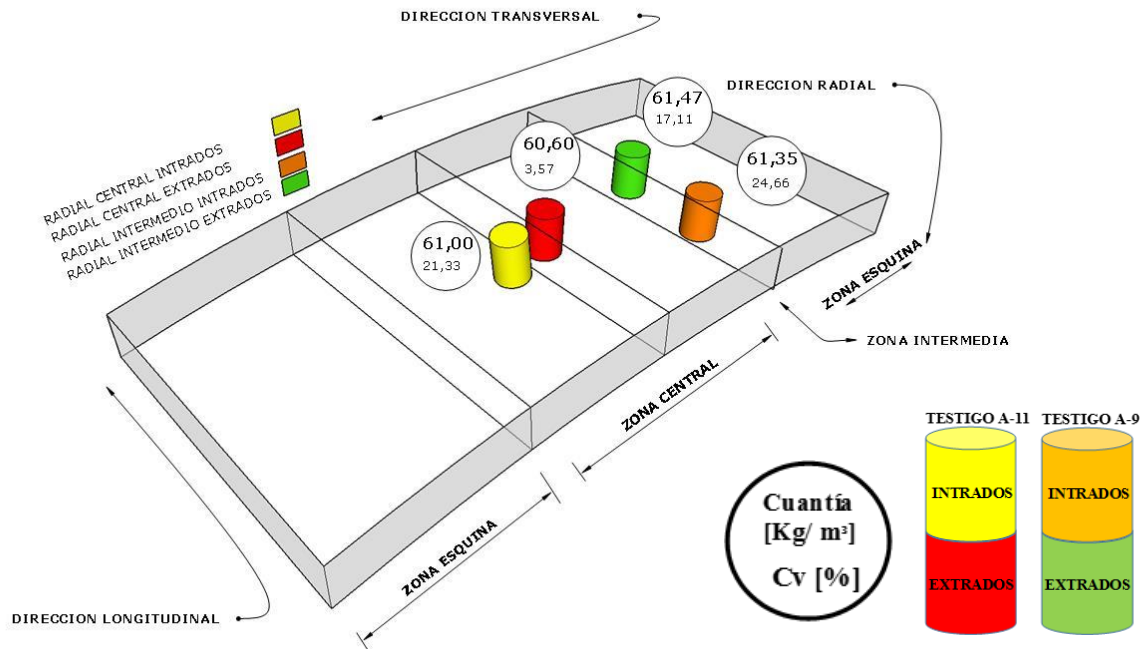


**Ilustración 13-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

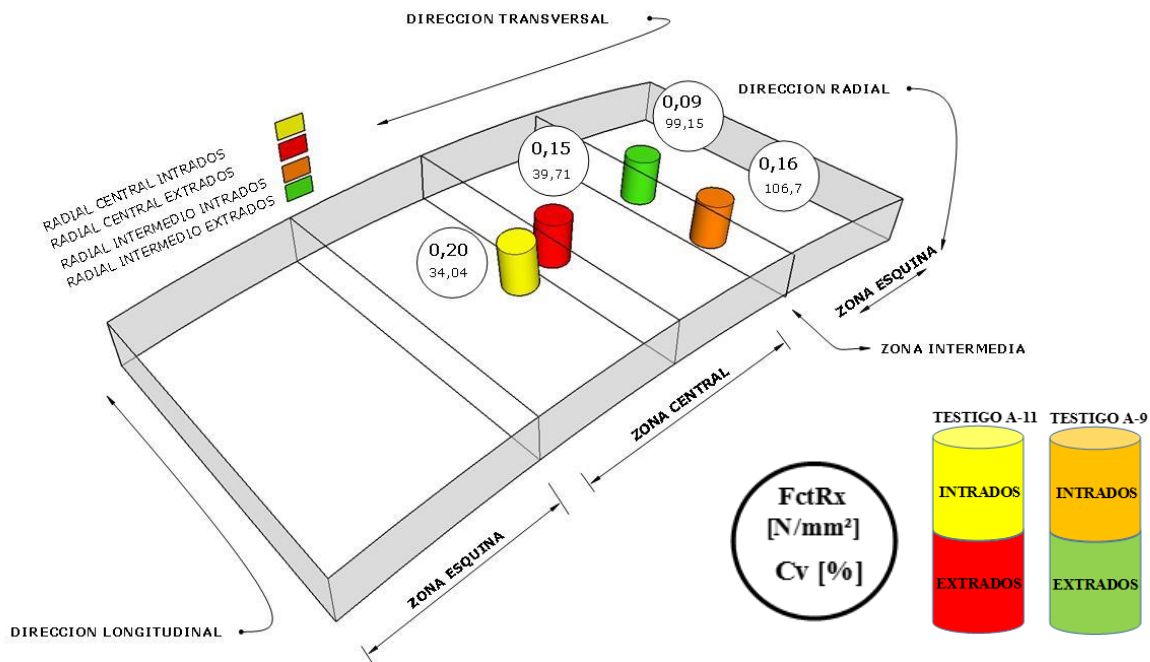


**Ilustración 14-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

Dado la tabla 7-C y los resultados en ella, es que se obtiene una mayor cuantía en las probetas obtenidas Radialmente de la zona intermedia, en la parte extradós, con un promedio de cuantía de 61,47 [kg/m<sup>3</sup>] y CV de 17,11 %.

Estos resultados reflejan la concurrencia de acumular más fibras en la zona de las esquinas, observando que esta nueva zona de extracción intermedia, cercana a dicho sector, obtiene una mayor cuantía con baja variabilidad, aunque esto a su vez se debe a la poca cantidad de testigos de la muestra que se extrajeron de la región intermedia de las tres dovelas analizadas

Por otro lado, se destaca la poca variación, en los resultados que existe, entre ambas secciones de las probetas. Pero percibiendo que las resistencias residuales, no reflejan los resultados esperados, dado la falta de datos en la probeta de ensayo A9-1 (ver anexo 2), de la zona intermedia, obteniendo resultados de variabilidad, que hacen prácticamente nulos los valores de resistencia residual calculados, como se muestra en la ilustración 14-B.

## TRANSVERSAL ESQUINA V/S RADIAL CENTRAL

|         | TRANSVERSAL<br>ESQUINA |      |       | RADIAL<br>CENTRAL |       |       | TRANSVERSAL<br>ESQUINA |      |       | RADIAL<br>CENTRAL |       |       |
|---------|------------------------|------|-------|-------------------|-------|-------|------------------------|------|-------|-------------------|-------|-------|
|         | INTERNO                |      |       |                   |       |       | EXTERNO                |      |       |                   |       |       |
|         | Prom                   | S    | CV    | Prom              | S     | CV    | Prom                   | S    | CV    | Prom              | S     | CV    |
| Cuantía | 63,17                  | 6,00 | 9,50  | 61,00             | 13,01 | 21,33 | 64,05                  | 4,41 | 6,89  | 61,35             | 15,13 | 24,66 |
| Qmax    | 1,12                   | 0,08 | 7,33  | 1,08              | 0,24  | 22,33 | 1,12                   | 0,10 | 9,30  | 1,18              | 0,06  | 5,35  |
| P1      | 0,76                   | 0,06 | 8,53  | 0,71              | 0,11  | 15,53 | 1,12                   | 0,10 | 9,30  | 0,59              | 0,13  | 22,02 |
| P2      | 0,48                   | 0,07 | 14,33 | 0,51              | 0,09  | 17,99 | 0,39                   | 0,12 | 30,04 | 0,36              | 0,15  | 41,83 |
| P3      | 0,33                   | 0,03 | 8,12  | 0,36              | 0,10  | 28,03 | 0,28                   | 0,10 | 34,88 | 0,25              | 0,09  | 36,87 |
| P4      | 0,26                   | 0,03 | 10,02 | 0,28              | 0,09  | 32,69 | 0,23                   | 0,08 | 33,97 | 0,21              | 0,07  | 35,38 |
| P5      | 0,22                   | 0,03 | 15,76 | 0,24              | 0,08  | 33,17 | 0,23                   | 0,08 | 33,97 | 0,17              | 0,07  | 37,94 |
| P6      | 0,18                   | 0,02 | 13,34 | 0,20              | 0,07  | 34,04 | 0,17                   | 0,06 | 34,48 | 0,15              | 0,06  | 39,71 |

**Tabla 8-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima, y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las 3 dovelas analizadas.

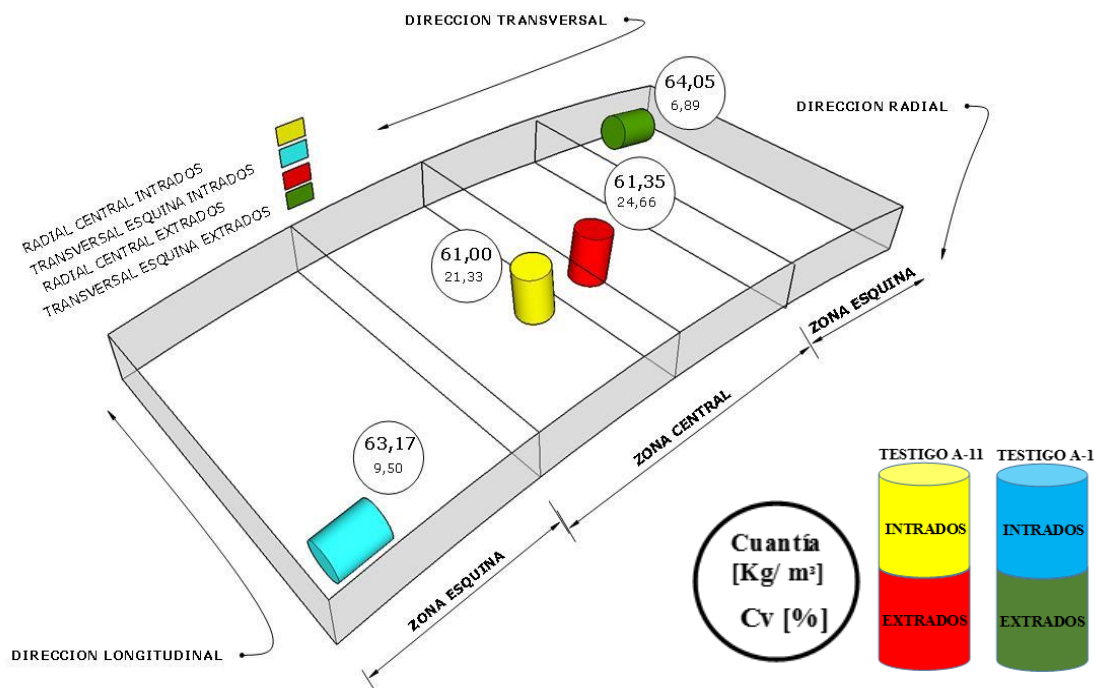


**Ilustración 15-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

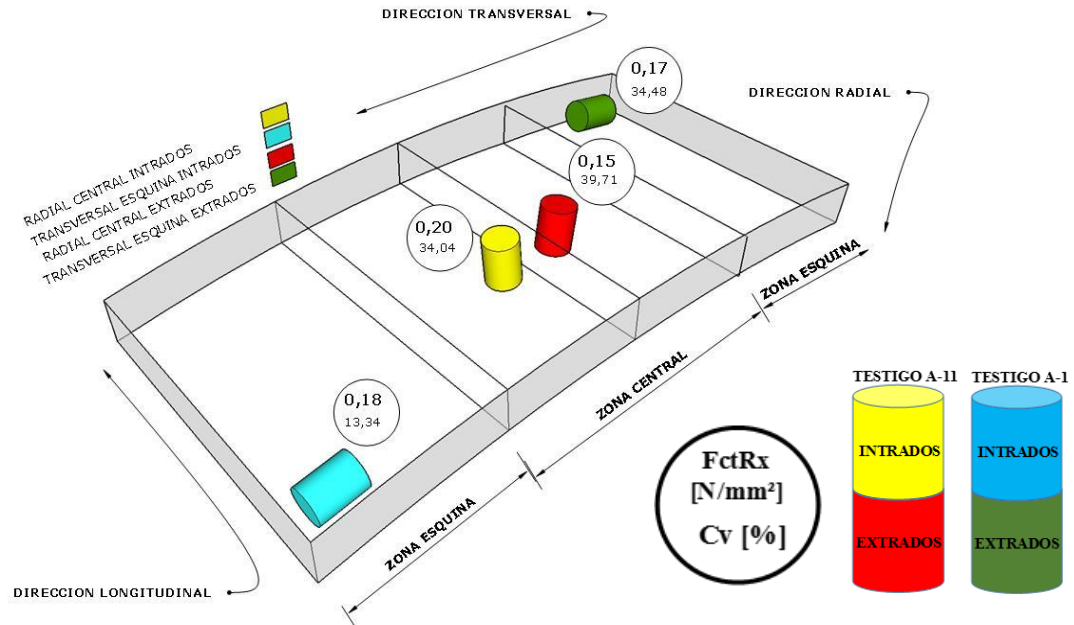


**Ilustración 16-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

De acuerdo a la tabla 8-C, la mayor cuantía se observa en testigos extraídos de manera Transversal de la zona de las esquinas, en su parte extradós, con un promedio de cuantía de 64,05 [kg/m³] y CV de 6,89 %. Mientras que en el caso de la evaluación de las resistencias, se observa que el valor promedio de la zona de las esquinas en su sección intradós es donde se obtiene un mayor resultado con 0,18 [N/mm²], con una baja dispersión de los datos, reflejado en su coeficiente de variación, tal cual lo muestra la ilustración 16-B, en donde también se muestra el resultado de los demás testigos donde la heterogeneidad sigue estando en la zona central de las dovelas con variabilidades por sobre el 30%, mientras que en la zona de las esquinas en su sección extradós, siendo esta parte la de mayor cuantía, se obtiene una resistencia menor y con más variabilidad con respecto a su sección intradós, esto debido a las resistencias puntuales conseguidas en los ensayos previos.

Otro detalle a presentar es la poca variación en los valores de cuantía y resistencia residual, de ambas posiciones de extracción, en relación a comparaciones anteriores, además de mostrar resultados cercanos a la cuantía experimental.

## RADIAL INTERMEDIO V/S RADIAL ESQUINA

|         | RADIAL<br>ESQUINA |      |       | RADIAL<br>INTERMEDIO |      |        | RADIAL<br>ESQUINA |       |       | RADIAL<br>INTERMEDIO |       |       |
|---------|-------------------|------|-------|----------------------|------|--------|-------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
|         | INTRADOS          |      |       |                      |      |        | EXTRADOS          |       |       |                      |       |       |
|         | Prom              | S    | CV    | Prom                 | S    | CV     | Prom              | S     | CV    | Prom                 | S     | CV    |
| Cuantía | 70,68             | 8,37 | 11,84 | 60,60                | 2,17 | 88,21  | 64,07             | 10,91 | 17,03 | 61,47                | 10,51 | 17,11 |
| Qmax    | 1,02              | 0,34 | 33,24 | 0,68                 | 0,60 | 88,50  | 1,04              | 0,32  | 30,42 | 0,74                 | 0,64  | 86,68 |
| P1      | 0,43              | 0,18 | 40,92 | 0,46                 | 0,40 | 87,36  | 0,49              | 0,26  | 53,09 | 0,25                 | 0,25  | 98,22 |
| P2      | 0,26              | 0,11 | 43,23 | 0,46                 | 0,40 | 87,36  | 0,34              | 0,20  | 57,70 | 0,17                 | 0,17  | 98,85 |
| P3      | 0,18              | 0,09 | 47,81 | 0,23                 | 0,24 | 102,02 | 0,23              | 0,15  | 62,55 | 0,17                 | 0,17  | 98,85 |
| P4      | 0,14              | 0,07 | 50,24 | 0,20                 | 0,20 | 102,27 | 0,17              | 0,09  | 56,11 | 0,13                 | 0,13  | 97,82 |
| P5      | 0,12              | 0,06 | 48,45 | 0,17                 | 0,19 | 106,40 | 0,14              | 0,08  | 55,14 | 0,11                 | 0,10  | 96,20 |
| P6      | 0,10              | 0,05 | 48,56 | 0,16                 | 0,18 | 106,73 | 0,12              | 0,06  | 54,59 | 0,09                 | 0,08  | 99,15 |

**Tabla 9-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima, y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las 3 dovelas analizadas.

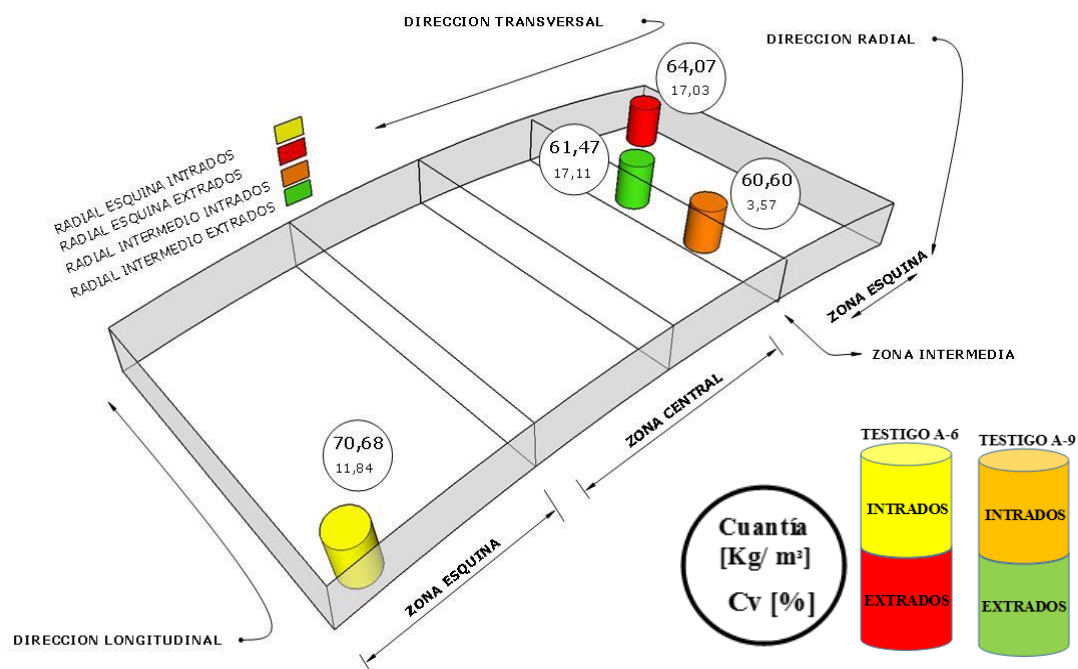


**Ilustración 17-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

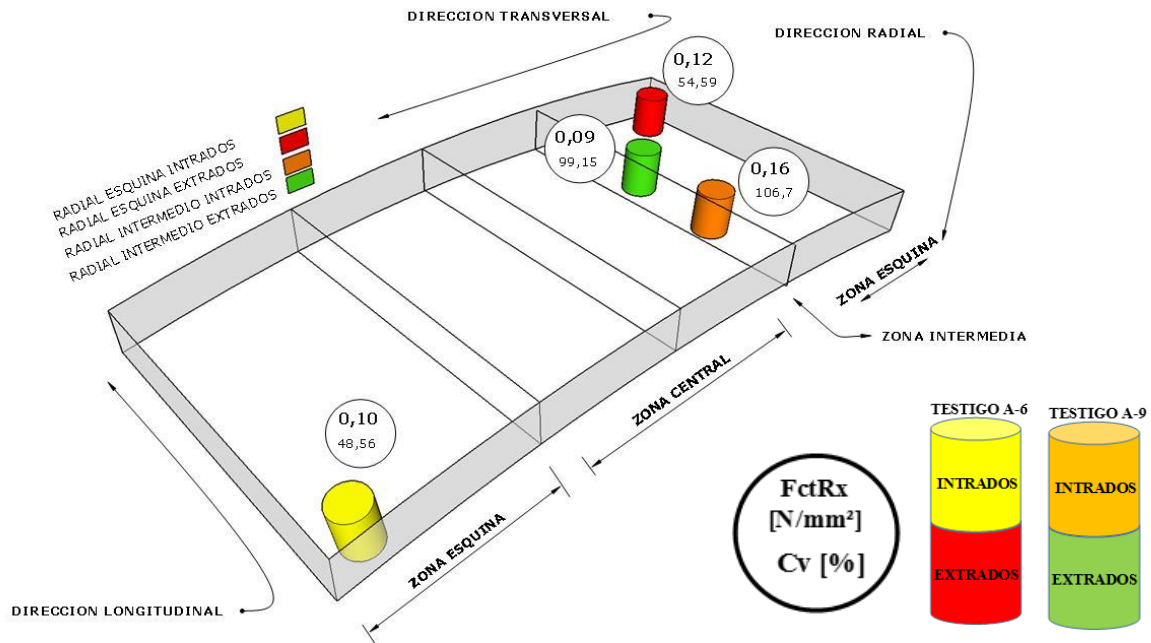


**Ilustración 18-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

Tanto en la tabla 9-C, como en las ilustraciones, se muestran los resultados obtenidos, en donde se observa que la mayor cuantía obtenida tras esta comparación, se consigue en la zona de las esquinas en la sección intradós de las probetas analizadas, con un valor promedio de 70,68 [kg/m³] y un valor de variabilidad de 11,84 %, un valor bajo que demuestra la homogeneidad de los datos en la zona, además de una gran concentración de fibras, superando en un 17,8 % a la cuantía con la cual se fabricó el HRF.

Con respecto a la resistencia residual se observan variabilidades grandes, debido a la alta dispersión de datos, dado que de esta zona se extrajeron más testigos, por lo que la muestra es mayor, además de que los valores de las cargas puntuales obtenidas de los ensayos realizados presentan una heterogeneidad, con variaciones de hasta un 84% en sus valores, tanto en la sección intradós, como el extradós.

Otro detalle importante que arroja los resultados de la ilustración es que la mayor resistencia residual es obtenida en la zona intermedia, situación que diverge de las comparaciones anteriores donde estaba presente la zona de las esquinas como análisis, esto debido a la dispersión y la falta de datos de la probeta A8-1.

## LONGITUDINAL CENTRAL V/S RADIAL INTERMEDIO

|         | LONGITUDINAL<br>CENTRAL |       |       | RADIAL<br>INTERMEDIO |      |        | LONGITUDINAL<br>CENTRAL |      |       | RADIAL<br>INTERMEDIO |       |       |
|---------|-------------------------|-------|-------|----------------------|------|--------|-------------------------|------|-------|----------------------|-------|-------|
|         | INTRADOS                |       |       |                      |      |        | EXTRADOS                |      |       |                      |       |       |
|         | Prom                    | S     | CV    | Prom                 | S    | CV     | Prom                    | S    | CV    | Prom                 | S     | CV    |
| Cuantía | 59,70                   | 17,02 | 28,51 | 60,60                | 2,17 | 3,57   | 60,07                   | 8,00 | 13,3  | 61,47                | 10,51 | 17,11 |
| Qmax    | 1,07                    | 0,07  | 6,26  | 0,68                 | 0,60 | 88,50  | 0,98                    | 0,08 | 7,83  | 0,74                 | 0,64  | 86,68 |
| P1      | 0,61                    | 0,18  | 29,41 | 0,46                 | 0,40 | 87,36  | 0,52                    | 0,09 | 17,1  | 0,25                 | 0,25  | 98,22 |
| P2      | 0,40                    | 0,15  | 38,34 | 0,46                 | 0,40 | 87,36  | 0,29                    | 0,06 | 22,5  | 0,17                 | 0,17  | 98,85 |
| P3      | 0,28                    | 0,10  | 35,04 | 0,23                 | 0,24 | 102,02 | 0,20                    | 0,04 | 18,7  | 0,17                 | 0,17  | 98,85 |
| P4      | 0,23                    | 0,08  | 34,99 | 0,20                 | 0,20 | 102,27 | 0,15                    | 0,02 | 14,7  | 0,13                 | 0,13  | 97,82 |
| P5      | 0,20                    | 0,07  | 33,79 | 0,17                 | 0,19 | 106,40 | 0,12                    | 0,02 | 16,1  | 0,11                 | 0,10  | 96,20 |
| P6      | 0,17                    | 0,06  | 33,88 | 0,16                 | 0,18 | 106,73 | 0,11                    | 0,02 | 19,02 | 0,09                 | 0,08  | 99,15 |

**Tabla 10-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima, y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las 3 dovelas analizadas.

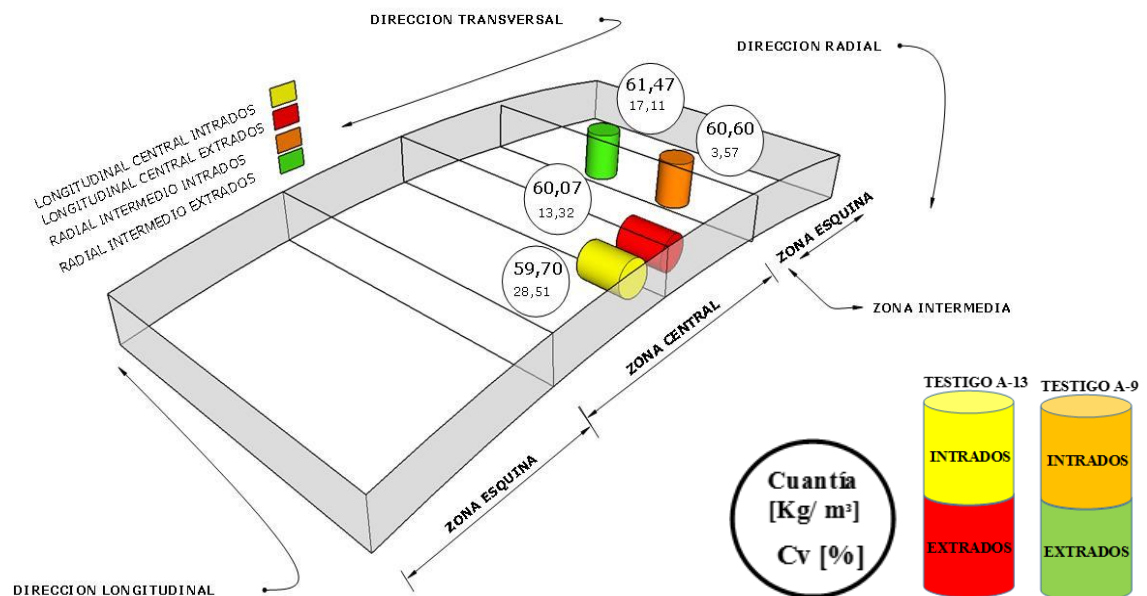


**Ilustración 19-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

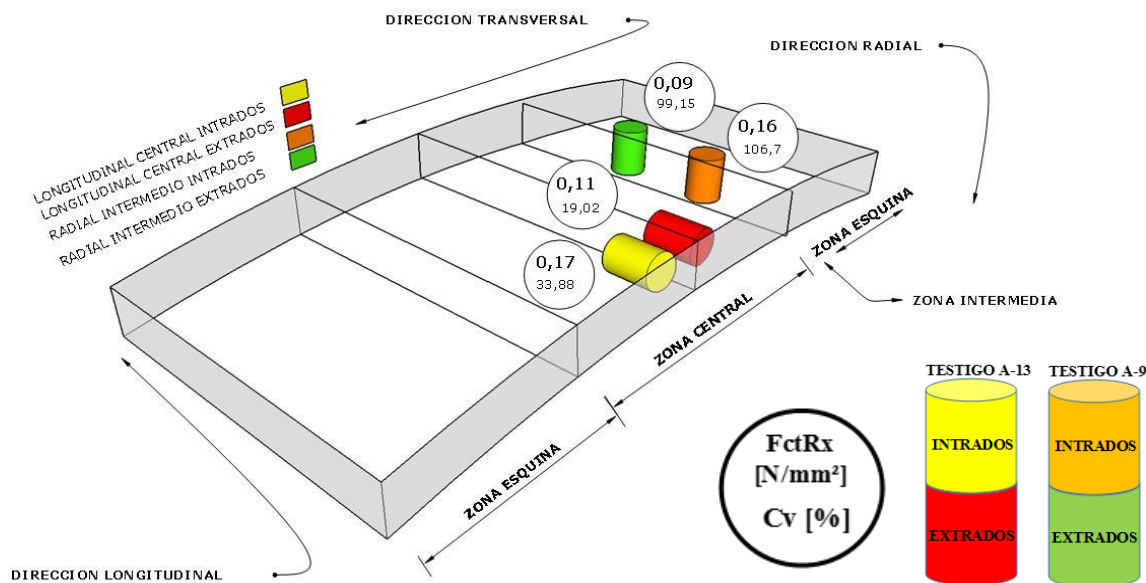


**Ilustración 20-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las dovelas.

Mediante la tabla y las ilustraciones anteriores se destaca que en la zona intermedia se obtiene la mayor cantidad de cuantía, específicamente en la sección extradós de las probetas radiales con un valor de 61,47 [kg/m<sup>3</sup>] y CV de 17,11 %.

En cuanto a las resistencias residuales en los 6 momentos de fisuración se denota una leve diferencia en los valores entre la zona central e intermedia, obteniendo en esta última, valores más pequeños. Pero cabe destacar el alto porcentaje de variabilidad de los resultados, que van desde el 86,68 hasta un 106,73 %, en ambas secciones de las probetas radiales, lo cual refleja un alta dispersión y heterogeneidad de los datos, debido a que la muestra del conjunto de la zona intermedia es pequeña, además de la falta de resultados en el testigo A9-1.

Aun cuando la cuantía es mayor en la zona intermedia, la resistencia residual es mayor en la zona central, específicamente en la probeta longitudinal, en su parte intradós, con un valor de 0,17 [N/mm<sup>2</sup>], y un CV de 33,88%.

## LONGITUDINAL ESQUINA VS TRANSVERSAL ESQUINA VS RADIAL INTERMEDIO

|         | LONGITUDINAL<br>ESQUINA |       |       | RADIAL<br>INTERMEDIO |      |        | TRANSVERSAL<br>ESQUINA |      |       |
|---------|-------------------------|-------|-------|----------------------|------|--------|------------------------|------|-------|
|         | INTRADOS                |       |       |                      |      |        |                        |      |       |
|         | Prom                    | S     | CV    | Prom                 | S    | CV     | Prom                   | S    | CV    |
| Cuantía | 72,68                   | 10,54 | 14,50 | 60,60                | 2,17 | 3,57   | 63,17                  | 6,00 | 9,50  |
| Qmax    | 1,14                    | 0,08  | 6,93  | 0,68                 | 0,60 | 88,50  | 1,12                   | 0,08 | 7,33  |
| P1      | 0,90                    | 0,12  | 13,75 | 0,46                 | 0,40 | 87,36  | 0,76                   | 0,06 | 8,53  |
| P2      | 0,67                    | 0,13  | 20,06 | 0,46                 | 0,40 | 87,36  | 0,48                   | 0,07 | 14,33 |
| P3      | 0,49                    | 0,12  | 24,80 | 0,23                 | 0,24 | 102,02 | 0,33                   | 0,03 | 8,12  |
| P4      | 0,41                    | 0,10  | 24,53 | 0,20                 | 0,20 | 102,27 | 0,26                   | 0,03 | 10,02 |
| P5      | 0,36                    | 0,10  | 26,95 | 0,17                 | 0,19 | 106,40 | 0,22                   | 0,03 | 15,76 |
| P6      | 0,31                    | 0,09  | 28,71 | 0,16                 | 0,18 | 106,73 | 0,18                   | 0,02 | 13,34 |

|         | LONGITUDINAL<br>ESQUINA |      |       | RADIAL<br>INTERMEDIO |       |       | TRANSVERSAL<br>ESQUINA |      |       |
|---------|-------------------------|------|-------|----------------------|-------|-------|------------------------|------|-------|
|         | EXTRADOS                |      |       |                      |       |       |                        |      |       |
|         | Prom                    | S    | CV    | Prom                 | S     | CV    | Prom                   | S    | CV    |
| Cuantía | 69,57                   | 4,69 | 6,75  | 61,47                | 10,51 | 17,11 | 64,05                  | 4,41 | 6,89  |
| Qmax    | 1,12                    | 0,07 | 6,69  | 0,74                 | 0,64  | 86,68 | 1,12                   | 0,10 | 9,30  |
| P1      | 0,78                    | 0,11 | 13,98 | 0,25                 | 0,25  | 98,22 | 1,12                   | 0,10 | 9,30  |
| P2      | 0,49                    | 0,12 | 24,25 | 0,17                 | 0,17  | 98,85 | 0,39                   | 0,12 | 30,04 |
| P3      | 0,34                    | 0,09 | 26,25 | 0,17                 | 0,17  | 98,85 | 0,28                   | 0,10 | 34,88 |
| P4      | 0,28                    | 0,09 | 31,51 | 0,13                 | 0,13  | 97,82 | 0,23                   | 0,08 | 33,97 |
| P5      | 0,24                    | 0,08 | 32,38 | 0,11                 | 0,10  | 96,20 | 0,23                   | 0,08 | 33,97 |
| P6      | 0,21                    | 0,07 | 31,44 | 0,09                 | 0,08  | 99,15 | 0,19                   | 0,06 | 32,62 |

**Tabla 11-C:** Tabla Comparativa de los resultados promedio de la cuantía de fibras, carga máxima y resistencia residual en las diferentes fisuraciones totales, en probetas extraídas en posición radial y longitudinal de la zona central de las 3 dovelas analizadas.

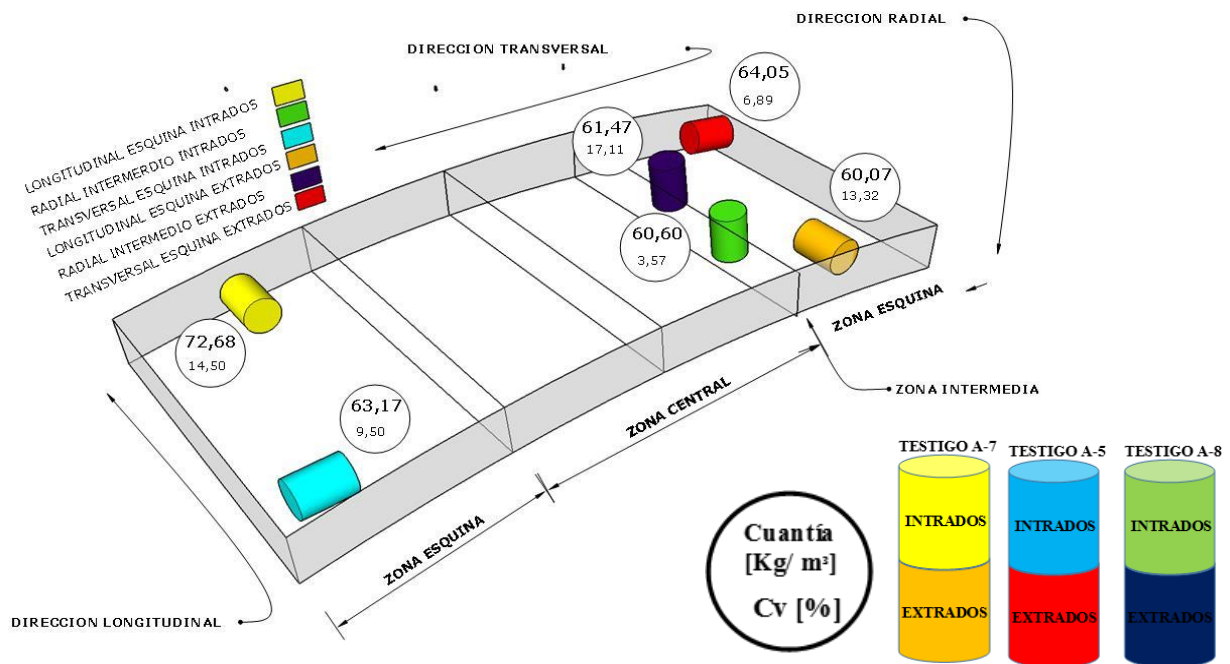


**Ilustración 21-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición longitudinal de la zona Central y radial de la zona Esquina de las dovelas.

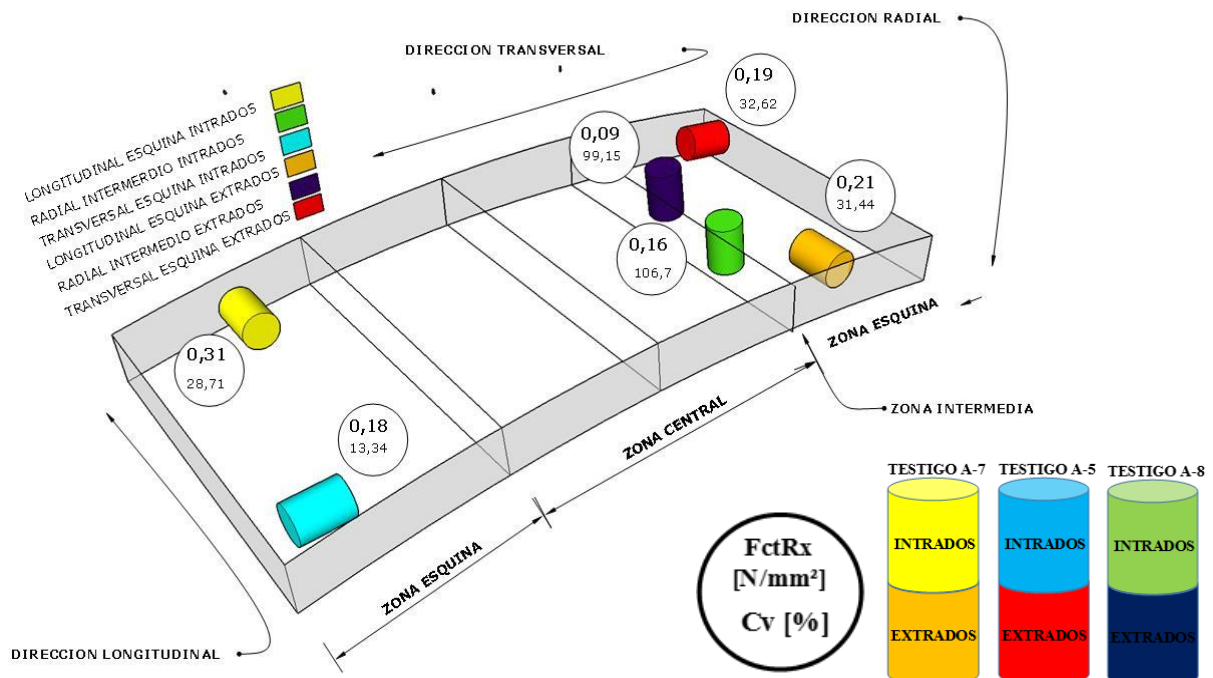


**Ilustración 22-B:** Ilustración Comparativa de la Resistencia Residual de las probetas extraídas en posición longitudinal de la zona Central y radial de la zona Esquina de las dovelas.

---

De acuerdo al análisis comparativo reflejado en la tabla 11-C, e ilustrado en las imágenes anteriores es que se observa que el valor más alto del promedio de cuantía se obtiene en las probetas en su parte intradós, extraídas de manera longitudinal, de las esquinas de las dovelas, con una cuantía promedio de 72,68 [kg/m<sup>3</sup>] y CV de 14,50 %. Además de esto, se destaca que los porcentajes de variabilidad en este análisis, son bajos, lo que hace deducir una homogeneidad de los datos, asumiendo una mayor precisión en los resultados.

Por otro lado, se denota una variación promedio de un 15 % de incremento de la cuantía de fibras, en probetas extraídas de manera longitudinal de la zona de las esquinas, con respecto a las otras posiciones y zonas de extracción, en este caso en particular.

Otro detalle a considerar es la mayor resistencia obtenida tras este análisis, la cual se obtiene en la zona esquina de las dovelas, en posición de extracción de manera longitudinal, con un valor promedio de 0,31 [N/mm<sup>2</sup>] y CV de 28,71 %, lo cual releja la tendencia de la fibra a posicionarse en dicha zona y ofrecer mayor resistencia en la post-fisuración.

Tras este último y anteriores análisis, se logró esclarecer que los resultados en la zona intermedia, no proveen de una confiabilidad deseada, dado su alto porcentaje de variabilidad con respecto a las otras zonas y posiciones de extracción, por lo que dichos valores deben ser descartados para las conclusiones finales, pero quizás siendo considerados para futuras campañas donde se realicen muestras, con un conjunto de datos mayor al utilizado en este análisis, para ser estudiados con una mayor precisión.

---

## IV. CONCLUSIÓN

Según el análisis comparativo, mediante una estadística básica sobre la cuantía de fibras y resistencia residual, del conjunto de datos obtenidos de los ensayos realizados a testigos extraídos de las 3 dovelas estudiadas, es que se concluye individualmente lo siguiente:

La mayor cuantía de fibras se obtiene en las probetas longitudinales, con una cuantía promedio de 65,50 [kg/m<sup>3</sup>] y un CV de 15,77 %, superando un 9,2 % a la cuantía experimental. Por otro lado, la mayor variabilidad de datos, se encuentra en las probetas extraídas de manera longitudinal de la zona central de las dovelas, zona donde es vertido el hormigón, por lo que al vaciar éste, la distribución de las fibras tiende a ir con el flujo del mismo hacia las esquinas, dado la forma curva de las dovelas.

Siguiendo con el análisis de la cuantía, el mayor valor obtenido se concentra en la zona de las esquinas en las probetas extraídas de manera longitudinal en su parte intradós, con un valor promedio de 72,68 [kg/m<sup>3</sup>], con un CV 14,50 %, relativamente bajo, quedando en evidencia la homogeneidad de la zona, con una tendencia de la fibra en orientarse preferentemente en las esquinas, de manera paralela al flujo de hormigonado. Esto se corrobora observando que la menor variabilidad, se obtiene en la zona intermedia en probetas radiales con un coeficiente de variación bajísimo, el cual no confiere un resultado muy preciso debido a la falta de datos en los ensayos, además de ser una muestra pequeña, debido a los pocos testigos que se extrajeron de dicha zona. Por lo que, continuando con el análisis, se llega a que la mayor homogeneidad, por lo tanto, distribución de la fibra, es en la zona de las esquinas, con un CV promedio de 15,77 %.

El valor mínimo de la cuantía, se encuentra en probetas extraídas de manera longitudinal de la zona de central, con un valor de 59,70 [kg/m<sup>3</sup>] y CV de 28,51%, reflejando una baja concentración de la fibra en esa zona, además de una menor homogeneidad.

---

En cuanto a la comparación analizada sobre la Resistencia Residual de las probetas:

El valor más alto del promedio de la resistencia residual se obtiene en las probetas en su estrato intradós, extraídas de manera longitudinal, zona esquinas de las dovelas, con una resistencia promedio de 0,31 [N/mm<sup>2</sup>] y CV 28,71%. Lo cual coincide con la zona donde la cuantía es mayor, reflejando a su vez una variabilidad relativamente menor, dato que nos da una mayor confiabilidad en la precisión del resultado, debido a la homogeneidad de los valores.

En cuanto a la variación del valor que existe entre la resistencia residual en los dos estratos, intradós y extradós de las probetas, se puede observar que es de alrededor de un 15,48 %, lo cual refleja una tendencia a resistir más en una de las zonas, específicamente, en la sección intradós de las probetas, pero es un porcentaje menor.

Los mayores valores de resistencia residual se obtienen de probetas extraídas de las esquinas de las dovelas, salvo las probetas extraídas en la dirección radial, zona intermedia, donde el menor valor alcanza los 0,09 [N/mm<sup>2</sup>], por las razones, de falta de datos y baja cantidad de muestras, para el análisis. Resultado que no refleja en un cien por ciento la realidad debido a que presenta una variabilidad altísima con respecto a la media, con un valor de 99,15 %, no siendo el resultado con mayor variabilidad, el cual se observa en la misma zona, pero en la sección intradós de las probetas radiales con un CV de 106,73 %, reflejando la poca precisión y confiabilidad del análisis.

En general, a partir de estos resultados y otros estudios sobre el mismo tema, se puede concluir que la resistencia post-fisuración del hormigón reforzado con fibras depende de la orientación y distribución de las fibras en la matriz de hormigón, siendo estos dos factores influenciados por la viscosidad del hormigón en estado fresco, la vibración y geometría del molde. Por tanto, es de vital importancia realizar ensayos lo más representativos posibles de la aplicación estructural a la que el material está destinado, y de las condiciones que se darán una vez estos elementos sean puestos en obra.

---

Con las conclusiones anteriores e investigaciones sobre los daños estructurales que sufren las dovelas (ver ilustración 1-C) y con el fin de entender la real importancia de este mecanismo durante y después de la fase de construcción del túnel, es que se observan los daños más frecuentes, de los cuales, apreciados en la práctica, presentan una aparente relación con por lo menos un tipo de imperfección, debido al proceso de fabricación o de montaje, por lo que al observar las zonas de los daños y contrastar con los resultados obtenidos en este escrito, es que se puede apreciar que los daños más frecuente según estudios de la sociedad japonesa de los ingenieros civiles (JCSE), son las fisuras longitudinales, las cuales aparecen generalmente por una diferencia en su posición ideal, caracterizando un resalto paralelo al eje del túnel. Lo que implica que la dovela recién instalada sea apoyada longitudinalmente en una superficie imperfecta, generando una condición de apoyo parcial, produciendo la grieta. Por otro lado, se encuentran las fisuras en las esquinas, que resultan generalmente del manejo impropio de la dovela durante el montaje del anillo o bien de deficiencias de contacto en las juntas longitudinales. Con estos datos, y las conclusiones obtenidas tras el análisis del escrito es que se concluye que la incorporación de la fibra presenta una mejora significativa de algunas propiedades en el desempeño estructural, por un lado, tiene mayor resistencia al impacto contribuyendo para la reducción de los problemas de roturas y daños localizados, resultantes de eventuales impactos a causa del transporte o en el proceso de instalación, como los mostrados en la *imagen 1- C*. Por otro lado, tras los resultados, la mayor concentración y distribución de la fibra, se obtiene en la zona de las esquinas de las dovelas, con una orientación preferente de manera paralela a la superficie, por lo que mejoraría aspectos como la sección de fisuración, la cual sería más ancha, implicando que la apertura máxima y la longitud de la fisura sea bastante menor en comparación a la de un hormigón sin fibras y solo con armadura pasiva. Lo que podría contribuir significativamente a la reducción de las infiltraciones de trozos de hormigón hacia el interior del túnel y por ello la reducción de los costos de reparación de los daños en las dovelas.

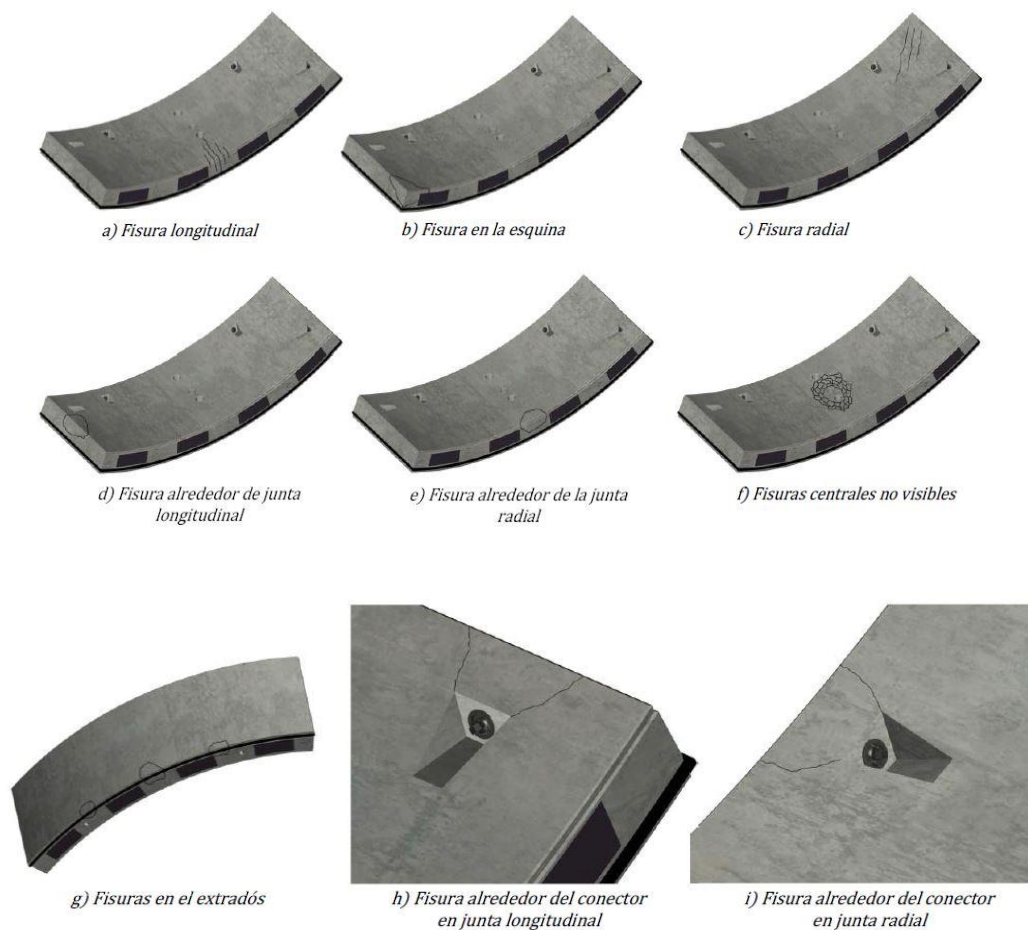


**Ilustración 23-C:** Ilustración de los daños estructurales frecuentes (fisuras) de las dovelas, durante y después de la fase de construcción del túnel, según la asociación japonesa de ingenieros civiles (JCSE).

Tras el análisis comparativo se observa también, que la mayor cuantía de fibras se concentra en la zona de las esquinas de las dovelas, a su vez reflejando una menor variabilidad con respecto a la media, tal cual muestra el porcentaje obtenido del cálculo del coeficiente de variación.

Del mismo estudio y resultados anteriores se observa que la dirección de extracción de los testigos no influye en el control de la cuantía, dado que para las tres direcciones analizadas la cuantía promedio es mayor en las esquinas, aunque se observan cuantías mayores en las probetas extraídas en la dirección longitudinal.

---

Sobre la cuantía de fibras en el espesor de las dovelas, se obtiene una tendencia de concentración mayor de éstas en el estrato intradós de las probetas, no siendo relevante, tras analizar que la diferencia de valores de la cuantía y resistencia residual en ambos estratos es muy baja.

La existencia de fibras permite el refuerzo tridimensional, incluso en esquinas y zonas donde el refuerzo de armadura pasiva tradicional no sería efectivo, lo que conduce a una mejora de la respuesta frente a impactos, cargas concentradas y cargas previstas y/o no previstas que pueden provocar pérdidas del recubrimiento, obligando a invertir en tareas de reparación.

Con respecto a las fibras a utilizar, con una resistencia mecánica adecuada y distribuida de forma homogénea en la matriz de hormigón, constituyen una armadura tridimensional muy resistente capaz de soportar apreciables deformaciones manteniendo una buena resistencia, evitando la propagación del fenómeno de fisuración y disipando la energía de deformación (tenacidad). Por ende, el tipo de fibra de acero en comparación con fibras poliméricas, está mejor evaluada para este tipo de usos a nivel europeo, donde las recomendaciones del uso de este tipo de hormigones son establecidas en la norma EHE 2008, la cual incluye un anejo 14, donde la tipificación propuesta de este, refleja las especificaciones básicas que se exigen cuando las fibras tienen finalidad estructural, además de las propiedades que quedan implícitas en la tipificación del hormigón, así como los métodos de ensayos para su verificación y los valores que deben alcanzar dichas características. Mientras que en Chile este tipo de hormigones no tienen una normativa clara siendo sus efectos establecidos por normas como la ASTM C-11116.

Las fibras plásticas no se quedan atrás dado que expertos consideran que este tipo de fibras destacan por su alta resistencia a la corrosión a los álcalis y ácidos en ambientes agresivos. Además, su mayor flexibilidad hace que se esconda por completo en el hormigón, a diferencia de otras más rígidas.

---

Hoy en día, ya existen varias experiencias a nivel mundial en las que se ha empleado las fibras como único refuerzo del hormigón para dovelas de anillos de revestimientos de túneles, sin embargo, en la gran mayoría de estos, los valores de sus radios fueron inferiores al empleado en la Línea 9 del Metro de Barcelona. Por lo que es importante destacar los beneficios que se obtienen de realizar tramos experimentales in situ, rescatando importantes deducciones e instrucciones del uso de este material, tal como lo refleja la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), incorporando el anejo 14 relativo al empleo de fibras con finalidad estructural, lo cual en el sistema de diseño europeo proporciona un mayor margen de confianza al proyectista para emplearlo como soluciones de ingeniería.

Sin embargo, el camino por recorrer para un amplio uso del HRF como material estructural es importante y extenso, puesto que aún existen aspectos que dificultan el uso de las fibras como refuerzo del hormigón, entre los que destacan, la estimación económica de las ventajas del uso de éstas y la falta de experiencia en su utilización en revestimientos para túneles en Chile.

---

## V. RECOMENDACIONES

Para posteriores estudios, ya teniendo claro la cantidad de testigos necesarios, el tamaño idóneo de estos, además de la cuantía teórica a utilizar, sería necesario emplear distintos tipos de fibras para obtener más resultados del comportamiento de estas dentro de la masa de hormigón. A su vez también podría emplearse un hormigón distinto al convencional, como, por ejemplo, un hormigón auto-compactante, para evitar una mala manipulación en la confección y disminuir, o evitar completamente el vibrado de los elementos, debido a que la compactación origina una orientación preferencial de las fibras, en general estas tienden a colocarse paralelas a la superficie encofrada, como se concluyó anteriormente, esto ocurre especialmente si se aplica vibradores de superficie, pero este efecto es tan solo local, lo cual es bueno para elementos de poco espesor, pero el uso de vibradores internos genera zonas con exceso de pasta y pocas fibras en la zona donde se ha dispuesto el vibrador, así como cierta orientación en el sentido tangencial al diámetro externo del vibrador.

El empleo de hormigón auto compactante (HAC), a la vez que permite eliminar completamente la armadura pasiva tradicional, garantiza un correcto comportamiento en la rotura, con las ventajas que ello conduce en relación a los procesos industriales, costes y tiempo. Además, la posibilidad de emplear este tipo de hormigón es la reducción de los inconvenientes asociados con el vibrado y la contaminación acústica que derivan de éste, y proporcionar un mejor acabado superficial, con menor incidencia de imperfecciones de hormigonado.

Otro de los aportes que generaría el empleo de HAC en la fabricación de las dovelas debido a su mejor acabado superficial es un menor consumo de grasa en el paso de las dovelas por los cepillos de la tuneladora.

Todas estas son claras ventajas económicas dado la optimización del proceso productivo y los gastos en vibradores, además de la seguridad y el confort. Teniendo en cuenta estos aspectos, queda claro que el hormigón Autocompactante es una opción a considerarse.

---

La sustitución de armadura convencional por fibras de acero también tiende a justificarse desde un punto de vista económico, aunque el costo unitario de las fibras es más elevado, la sustitución permite agilizar el proceso de producción de las dovelas y eliminar costos asociados al montaje de la armadura. En ese contexto, es que el empleo de un HAC con fibras de acero en sustitución a la armadura convencional puede resultar un aporte extremadamente interesante a la fabricación y a las solicitaciones estructurales de las dovelas para los túneles.

Cabe destacar que esta alternativa no está muy estudiada aun, ni tampoco existen muchos ejemplos de la aplicación de dicho material en túneles. Cuestiones con respecto a la compatibilidad del sistema puesta en obra y la posición de hormigonado de las dovelas todavía deben ser mejor estudiadas. Por un lado, se debe mostrar que la fabricación de las dovelas con HAC con fibras en las plantas de prefabricados es plenamente factible, no siendo necesarios cambios significativos en la organización actual de las mismas.

La combinación de fibras y armadura convencional se presenta como una solución estructural y económicamente competitiva en el diseño de estas estructuras, dado que el armado tradicional aporta en gran medida la capacidad resistente, mientras que la contribución estructural de la fibra, permitiría reducir significativamente las cuantías de la armadura convencional.

Finalmente, la consideración de realizar campañas experimentales para recolectar datos e información con respecto al uso de este material, se hace necesario, debido a que Chile es uno de los países mineros más importantes del mundo y está catalogado dentro de aquellos que emplean un alto nivel de tecnología, aunque el proceso constructivo con máquinas tuneladora ha sido escasa comparada con países vecinos.

Dentro del país la utilización de esta maquinaria y proceso constructivo destacan la exploración minera y centrales hidroeléctricas. Dos proyectos importantes son el túnel Sur de la Minera Los Bronces y el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo. Donde el primero, el cual se encuentra terminado, se construyó en base a un revestimiento de tipo convencional y en sectores donde el terreno era de la mala calidad geo mecánica, se utilizaron dovelas metálicas. El segundo aún está en proceso de construcción.

---

Por lo que la sugerencia debido al fuerte avance tecnológico en este tipo de proceso constructivo de túneles, donde la utilización de esta maquinaria provee de grandes ventajas para la confección de este, es que tramos experimentales como los que se confeccionaron en Europa, como el presentado en este escrito, sean utilizados para obtener experiencia y estudios sobre un tipo de revestimiento que mejoraría aún más los procesos de construcción y coste de este tipo de proyectos. Lo anterior haría bien a un país con desafíos subterráneos importantes, tales como una futura línea 1 exprés o línea 7 de Metro, planteada desde Maipú hasta Tobalaba. O la construcción del túnel de Aguas Negras en la cordillera de la cuarta región, que permitiría la salida de mercancía de San Juan, Argentina, por el puerto de Coquimbo durante todo el año. O la construcción de un túnel, desde Avenida Grecia, hasta el Salto, en un tramo de 6,8 km, para la autopista Vespucio Oriente en la ciudad de Santiago.

---

## REFERENCIAS

**Felipe Mora Apablaza. 2008.** “Distribución y orientación de fibras en dovelas, aplicando ensayo Barcelona”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de ingeniería de la construcción.

**Sergio Henrique Píalarissi Cavalaro. 2009.** “Aspectos tecnológicos de túneles construidos con tuneladora y dovelas prefabricadas de hormigón”, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya.

**Albert De La Fuente. 2015.** “Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado con fibras”, Publicación en [www.ResearchGate.net/publication](http://www.ResearchGate.net/publication).

**Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), Anejo 14,** “Recomendaciones para la utilización del hormigón con fibras, con finalidad estructural” Norma Española.

**NTC 5214, ASTM A 820,** “Fibras de acero para refuerzo de hormigón”

**NTC 5541, ASTM C1116,** “Hormigones reforzados con fibras”.

**Norma UNE 83 515 (AENOR, 2010),** “Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona”.

**Artículo Concrete, Sika S.A. Chile,** “Hormigón Reforzado con Fibras”. [www.sika.cl](http://www.sika.cl)

## ANEXO 1

| Extracción           | Dovela | Testigo | Posición | Cuantía<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Q <sub>máx</sub><br>(kN) | P1<br>(kN) | P2<br>(kN) | P3<br>(kN) | P4<br>(kN) | P5<br>(kN) | P6<br>(kN) |
|----------------------|--------|---------|----------|---------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Longitudinal Central | 1      | A 12-1  | Intradós | 59,0                            | 159,6                    | 95,0       | 43,3       | 30,5       | 25,1       | 20,4       | 14,8       |
|                      |        |         | Extradós | 63,0                            | 147,7                    | 65,2       | 31,7       | 24,1       | 19,1       | 17,2       | 16,9       |
|                      |        | A 13-1  | Intradós | 58,5                            | 165,2                    | 114,5      | 86,1       | 57,4       | 47,4       | 42,4       | 37,5       |
|                      |        |         | Extradós | 64,2                            | 153,8                    | 92,3       | 60,4       | 40,3       | 24,9       | 20,9       | 17,4       |
|                      | 2      | A 12-2  | Intradós | 48,4                            | 179,0                    | 45,3       | 36,7       | 30,5       | 23,6       | 23,0       | 23,1       |
|                      |        |         | Extradós | 64,4                            | 173,6                    | 76,5       | 53,1       | 31,9       | 23,2       | 18,7       | 16,3       |
|                      |        | A 13-2  | Intradós | 53,3                            | 161,3                    | 90,1       | 57,9       | 39,3       | 33,3       | 30,3       | 26,8       |
|                      |        |         | Extradós | 64,6                            | 140,4                    | 73,2       | 37,9       | 25,9       | 20,7       | 17,7       | 15,5       |
|                      | 3      | A 12-3  | Intradós | 92,8                            | 171,3                    | 112,6      | 57,6       | 39,0       | 32,4       | 25,7       | 23,4       |
|                      |        |         | Extradós | 60,1                            | 167,1                    | 82,5       | 46,9       | 34,4       | 28,8       | 25,4       | 24,1       |
|                      |        | A 13-3  | Intradós | 46,2                            | 186,8                    | 125,4      | 98,9       | 68,7       | 55,5       | 46,0       | 39,1       |
|                      |        |         | Extradós | 44,1                            | 155,4                    | 104,4      | 44,7       | 31,3       | 22,5       | 17,5       | 15,0       |

**Tabla 1-A:** Datos de Cuantía, Carga máxima y Carga puntual por mm de deformación, de los testigos extraídos de forma longitudinal de la zona central de las 3 dovelas analizadas.

| Extracción            | Dovela | Testigo | Posición | Cuantía<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Q <sub>máx</sub><br>(kN) | P1<br>(kN) | P2<br>(kN) | P3<br>(kN) | P4<br>(kN) | P5<br>(kN) | P6<br>(kN) |
|-----------------------|--------|---------|----------|---------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Longitudinal Esquinas | 1      | A 3-1   | Intradós | 72,3                            | 162,9                    | 129,8      | 110,3      | 94,8       | 80,3       | 73,3       | 66,1       |
|                       |        |         | Extradós | 67,3                            | 161,3                    | 116,7      | 76,6       | 52,7       | 42,5       | 35,8       | 31,0       |
|                       |        | A 7-1   | Intradós | 61,3                            | 170,0                    | 112,9      | 76,8       | 55,5       | 46,6       | 41,3       | 35,6       |
|                       |        |         | Extradós | 75,7                            | 170,3                    | 115,8      | 72,1       | 51,6       | 45,2       | 39,8       | 36,0       |
|                       | 2      | A 3-2   | Intradós | 65,2                            | 185,3                    | 134,5      | 96,6       | 64,4       | 51,8       | 40,9       | 34,5       |
|                       |        |         | Extradós | 69,0                            | 190,9                    | 130,0      | 62,4       | 46,0       | 37,1       | 31,9       | 29,8       |
|                       |        | A 7-2   | Intradós | 91,9                            | 188,1                    | 174,2      | 125,2      | 90,7       | 79,4       | 73,6       | 64,5       |
|                       |        |         | Extradós | 62,2                            | 175,2                    | 150,5      | 99,5       | 67,9       | 56,5       | 50,3       | 46,0       |
|                       | 3      | A 3-3   | Intradós | 73,3                            | 188,0                    | 147,7      | 94,4       | 61,0       | 52,5       | 47,8       | 41,4       |
|                       |        |         | Extradós | 70,1                            | 191,8                    | 133,5      | 99,7       | 74,3       | 61,5       | 49,9       | 42,4       |
|                       |        | A 7-3   | Intradós | 72,1                            | 196,2                    | 157,0      | 127,6      | 98,6       | 77,1       | 62,7       | 53,7       |
|                       |        |         | Extradós | 73,1                            | 176,2                    | 100,2      | 54,5       | 35,2       | 22,6       | 17,9       | 16,3       |

**Tabla 2-A:** Datos de Cuantía, Carga máxima y Carga puntual por mm de deformación, de los testigos extraídos de forma longitudinal de la zona esquina de las 3 dovelas analizadas.

| Extracción           | Dovela | Testigo | Posición | Cuantía<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Q <sub>máx</sub><br>(kN) | P1<br>(kN) | P2<br>(kN) | P3<br>(kN) | P4<br>(kN) | P5<br>(kN) | P6<br>(kN) |
|----------------------|--------|---------|----------|---------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Transversal Esquinas | 1      | A 1-1   | Intradós | 70,3                            | 164,5                    | 118,5      | 92,2       | 54,3       | 42,8       | 34,6       | 27,9       |
|                      |        |         | Extradós | 65,1                            | 170,4                    | 106,5      | 44,6       | 29,1       | 20,8       | 16,5       | 14,4       |
|                      |        | A 5-1   | Intradós | 66,8                            | 176,6                    | 125,2      | 64,1       | 47,0       | 38,1       | 31,6       | 25,8       |
|                      |        |         | Extradós | 62,1                            | 167,8                    | 97,7       | 59,4       | 51,6       | 45,2       | 39,7       | 38,0       |
|                      | 2      | A 1-2   | Intradós | 59,5                            | 170,4                    | 106,3      | 66,1       | 47,5       | 37,1       | 28,1       | 23,3       |
|                      |        |         | Extradós | 57,9                            | 203,5                    | 119,3      | 49,6       | 38,2       | 33,6       | 30,0       | 25,2       |
|                      |        | A 5-2   | Intradós | 56,2                            | 189,1                    | 133,2      | 82,4       | 52,3       | 43,5       | 37,1       | 31,7       |
|                      |        |         | Extradós | 65,6                            | 183,7                    | 139,7      | 97,3       | 72,9       | 55,4       | 43,8       | 38,5       |
|                      | 3      | A 1-3   | Intradós | 57,9                            | 170,2                    | 110,7      | 80,4       | 57,4       | 38,6       | 31,6       | 28,3       |
|                      |        |         | Extradós | 62,5                            | 156,8                    | 111,4      | 60,7       | 38,6       | 29,9       | 24,9       | 21,0       |
|                      |        | A 5-3   | Intradós | 68,3                            | 198,7                    | 126,9      | 70,5       | 55,3       | 47,9       | 43,6       | 33,7       |
|                      |        |         | Extradós | 71,1                            | 186,9                    | 122,6      | 58,9       | 37,7       | 31,8       | 28,1       | 24,7       |

**Tabla 3-A:** Datos de Cuantía, Carga máxima y Carga puntual por mm de deformación, de los testigos extraídos de forma Transversal de la zona esquina de las 3 dovelas analizadas.

| Extracción     | Dovela | Testigo | Posición | Cuantía<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Q <sub>máx</sub><br>(kN) | P1<br>(kN) | P2<br>(kN) | P3<br>(kN) | P4<br>(kN) | P5<br>(kN) | P6<br>(kN) |
|----------------|--------|---------|----------|---------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Radial Central | 1      | A10-1   | Extradós | 64,9                            | 177,9                    | 101,9      | 76,3       | 49,9       | 44,2       | 31,9       | 24,5       |
|                |        |         | Intradós | 78,1                            | 182,1                    | 119,1      | 82,9       | 64,1       | 52,7       | 45,4       | 40,0       |
|                |        | A11-1   | Extradós | 67,8                            | 189,3                    | 103,0      | 83,2       | 53,5       | 38,2       | 32,4       | 29,3       |
|                |        |         | Intradós | 71,5                            | 174,2                    | 129,0      | 92,6       | 73,1       | 56,9       | 45,2       | 36,6       |
|                | 2      | A10-2   | Extradós | 80,1                            | 199,4                    | 101,5      | 30,0       | 19,6       | 14,9       | 10,3       | 8,3        |
|                |        |         | Intradós | 65,2                            | 188,2                    | 98,8       | 60,0       | 40,3       | 33,3       | 29,9       | 26,2       |
|                |        | A11-2   | Extradós | 69,1                            | 199,1                    | 54,0       | 35,9       | 28,0       | 25,6       | 22,0       | 20,2       |
|                |        |         | Intradós | 58,1                            | 182,9                    | 133,1      | 98,9       | 70,0       | 53,9       | 43,3       | 34,4       |
|                | 3      | A10-3   | Extradós | 45,6                            | 176,4                    | 111,3      | 74,2       | 55,4       | 45,9       | 40,9       | 37,0       |
|                |        |         | Intradós | 46,3                            | 116,4                    | 112,5      | 85,6       | 58,7       | 48,3       | 45,6       | 39,8       |
|                |        | A11-3   | Extradós | 40,6                            | 184,3                    | 89,3       | 40,3       | 35,1       | 32,0       | 28,3       | 25,9       |
|                |        |         | Intradós | 46,8                            | 182,9                    | 87,5       | 68,6       | 34,5       | 20,1       | 15,3       | 12,2       |

**Tabla 4-A:** Datos de Cuantía, Carga máxima y Carga puntual por mm de deformación, de los testigos extraídos de forma Radial de la zona Central de las 3 dovelas analizadas.

| Extracción     | Nº Dovela | Testigo | Posición | Cuantía<br>(kg/m³) | Qmax<br>(kN) | P1<br>(kN) | P2<br>(kN) | P3<br>(kN) | P4<br>(kN) | P5<br>(kN) | P6<br>(kN) |
|----------------|-----------|---------|----------|--------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Radial Esquina | 1         | A2-1    | Extradós | 56,9               | 171,8        | 91,0       | 56,7       | 39,0       | 28,3       | 22,8       | 19,0       |
|                |           |         | Intradós | 89,8               | 169,9        | 94,4       | 62,5       | 47,0       | 40,3       | 32,9       | 29,7       |
|                |           | A4-1    | Extradós | 62,8               | 172,1        | 98,7       | 65,0       | 45,4       | 37,2       | 31,6       | 25,8       |
|                |           |         | Intradós | 75,6               | 185,1        | 73,3       | 47,6       | 33,4       | 26,0       | 21,9       | 17,3       |
|                |           | A6-1    | Extradós | 61,2               | 173,9        | 70,1       | 38,3       | 31,4       | 24,4       | 20,3       | 18,4       |
|                |           |         | Intradós | 71,3               | 163,7        | 53,5       | 20,5       | 13,6       | 11,0       | 10,3       | 10,0       |
|                |           | A8-1    | Extradós | 65,2               | S/D          | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        |
|                |           |         | Intradós | 70,6               | S/D          | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        |
|                | 2         | A2-2    | Extradós | 52,6               | 194,6        | 82,0       | 52,7       | 32,1       | 23,6       | 20,2       | 17,1       |
|                |           |         | Intradós | 76,3               | 175,4        | 87,6       | 46,4       | 32,9       | 28,7       | 25,5       | 24,0       |
|                |           | A4-2    | Extradós | 63,3               | 180,8        | 84,4       | 50,8       | 35,7       | 27,8       | 20,1       | 17,1       |
|                |           |         | Intradós | 73,5               | 174,5        | 68,4       | 40,1       | 28,3       | 20,6       | 16,8       | 14,5       |
|                |           | A6-2    | Extradós | 58,5               | 182,4        | 17,2       | 17,2       | 11,9       | 8,2        | 6,9        | 5,5        |
|                |           |         | Intradós | 75,8               | 134,8        | 63,7       | 41,0       | 43,9       | 19,9       | 16,6       | 15,1       |
|                |           | A8-2    | Extradós | 58,6               | 191,2        | 40,6       | 38,3       | 29,2       | 22,7       | 18,9       | 15,5       |
|                |           |         | Intradós | 63,7               | 179,0        | 88,3       | 60,9       | 45,7       | 33,9       | 27,7       | 23,6       |
|                | 3         | A2-3    | Extradós | 96,1               | 170,7        | 144,2      | 104,8      | 63,1       | 49,6       | 41,8       | 34,6       |
|                |           |         | Intradós | 66,4               | 202,5        | 87,9       | 54,4       | 24,5       | 18,4       | 16,5       | 14,6       |
|                |           | A4-3    | Extradós | 60,3               | 185,3        | 115,9      | 110,6      | 89,9       | 50,3       | 37,0       | 31,5       |
|                |           |         | Intradós | 60,6               | 187,7        | 96,4       | 41,2       | 28,4       | 23,4       | 20,7       | 18,4       |
|                |           | A6-3    | Extradós | 66,9               | 169,3        | 77,1       | 51,5       | 22,5       | 14,8       | 12,5       | 11,0       |
|                |           |         | Intradós | 60,6               | 188,9        | 35,2       | 28         | 17         | 11         | 9,5        | 8,3        |
|                |           | A8-3    | Extradós | 66,4               | 178,6        | 106,8      | 72         | 48         | 35         | 30         | 26         |
|                |           |         | Intradós | 64,0               | 194,7        | 78,8       | 49         | 35         | 27         | 23         | 19         |

**Tabla 5-A:** Datos de Cuantía, Carga máxima y Carga puntual por mm de deformación, de los testigos extraídos de forma Radial de la zona esquina de las 3 dovelas analizadas.

---

| Extracción        | Dovela | Testigo | Posición | Cuantía<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Qmax<br>(kN) | P1<br>(kN) | P2<br>(kN) | P3<br>(kN) | P4<br>(kN) | P5<br>(kN) | P6<br>(kN) |
|-------------------|--------|---------|----------|---------------------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Radial Intermedia | 1      | A9-1    | Extradós | 73,2                            | S/D          | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        |
|                   |        |         | Intradós | 59,3                            | S/D          | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        | S/D        |
|                   | 2      | A9-2    | Extradós | 58,3                            | 180,5        | 86,2       | 41,4       | 27,8       | 21,6       | 18,2       | 13,8       |
|                   |        |         | Intradós | 63,1                            | 142,6        | 101,8      | 56,2       | 35,8       | 29,7       | 24,4       | 22,9       |
|                   | 3      | A9-3    | Extradós | 52,9                            | 171,7        | 127,5      | 78,4       | 53,7       | 40,4       | 32,3       | 26,9       |
|                   |        |         | Intradós | 59,4                            | 182,1        | 118,7      | 88,8       | 76,0       | 63,5       | 58,6       | 55,5       |

**Tabla 6-A:** Datos de Cuantía, Carga máxima y Carga puntual por mm de deformación, de los testigos extraídos de forma Radial de la zona Intermedia de las 3 dovelas analizadas.

## ANEXO 2

| TESTIGOS HRF Ø150 mm |        |         |          | fctRx (N/mm <sup>2</sup> ) |        |        |        |        |        |        |
|----------------------|--------|---------|----------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Extracción           | Dovela | Testigo | Posición | Q <sub>máx</sub>           | P1 (N) | P2 (N) | P3 (N) | P4 (N) | P5 (N) | P6 (N) |
| Longitudinal Central | 1      | A 12-1  | Intradós | 1,00                       | 0,60   | 0,27   | 0,19   | 0,16   | 0,13   | 0,09   |
|                      |        |         | Extradós | 0,93                       | 0,41   | 0,20   | 0,15   | 0,12   | 0,11   | 0,11   |
|                      |        | A 13-1  | Intradós | 1,04                       | 0,72   | 0,54   | 0,36   | 0,30   | 0,27   | 0,24   |
|                      |        |         | Extradós | 0,97                       | 0,58   | 0,38   | 0,25   | 0,16   | 0,13   | 0,11   |
|                      | 2      | A 12-2  | Intradós | 1,13                       | 0,28   | 0,23   | 0,19   | 0,15   | 0,14   | 0,15   |
|                      |        |         | Extradós | 1,09                       | 0,48   | 0,33   | 0,20   | 0,15   | 0,12   | 0,10   |
|                      |        | A 13-2  | Intradós | 1,01                       | 0,57   | 0,36   | 0,25   | 0,21   | 0,19   | 0,17   |
|                      |        |         | Extradós | 0,88                       | 0,46   | 0,24   | 0,16   | 0,13   | 0,11   | 0,10   |
|                      | 3      | A 12-3  | Intradós | 1,08                       | 0,71   | 0,36   | 0,25   | 0,20   | 0,16   | 0,15   |
|                      |        |         | Extradós | 1,05                       | 0,52   | 0,29   | 0,22   | 0,18   | 0,16   | 0,15   |
|                      |        | A 13-3  | Intradós | 1,17                       | 0,79   | 0,62   | 0,43   | 0,35   | 0,29   | 0,25   |
|                      |        |         | Extradós | 0,98                       | 0,66   | 0,28   | 0,20   | 0,14   | 0,11   | 0,09   |

**Tabla 2-B:** Resultados de la resistencia residual por cada mm de deformación para cada carga asignada a las probetas extraídas y separadas por estrato longitudinalmente de la zona central de las dovelas. Además de la resistencia residual para la Carga máxima obtenida en los testigos.

| TESTIGOS HRF Ø150 mm  |        |         |          |         | fctRx (N/mm <sup>2</sup> ) |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------|--------|---------|----------|---------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Extracción            | Dovela | Testigo | Posición | Cuantía | Q <sub>máx</sub>           | P1 (N) | P2 (N) | P3 (N) | P4 (N) | P5 (N) | P6 (N) |
| Longitudinal Esquinas | 1      | A 3-1   | Intradós | 72,3    | 1,02                       | 0,82   | 0,69   | 0,60   | 0,50   | 0,46   | 0,42   |
|                       |        |         | Extradós | 67,3    | 1,01                       | 0,73   | 0,48   | 0,33   | 0,27   | 0,23   | 0,19   |
|                       |        | A 7-1   | Intradós | 61,3    | 1,07                       | 0,71   | 0,48   | 0,35   | 0,29   | 0,26   | 0,22   |
|                       |        |         | Extradós | 75,7    | 1,07                       | 0,73   | 0,45   | 0,32   | 0,28   | 0,25   | 0,23   |
|                       | 2      | A 3-2   | Intradós | 65,2    | 1,17                       | 0,85   | 0,61   | 0,40   | 0,33   | 0,26   | 0,22   |
|                       |        |         | Extradós | 69,0    | 1,20                       | 0,82   | 0,39   | 0,29   | 0,23   | 0,20   | 0,19   |
|                       |        | A 7-2   | Intradós | 91,9    | 1,18                       | 1,10   | 0,79   | 0,57   | 0,50   | 0,46   | 0,41   |
|                       |        |         | Extradós | 62,2    | 1,10                       | 0,95   | 0,63   | 0,43   | 0,36   | 0,32   | 0,29   |
|                       | 3      | A 3-3   | Intradós | 73,3    | 1,18                       | 0,93   | 0,59   | 0,38   | 0,33   | 0,30   | 0,26   |
|                       |        |         | Extradós | 70,1    | 1,21                       | 0,84   | 0,63   | 0,47   | 0,39   | 0,31   | 0,27   |
|                       |        | A 7-3   | Intradós | 72,1    | 1,23                       | 0,99   | 0,80   | 0,62   | 0,48   | 0,39   | 0,34   |
|                       |        |         | Extradós | 73,1    | 1,11                       | 0,63   | 0,34   | 0,22   | 0,14   | 0,11   | 0,10   |

**Tabla 1-B:** Datos de resistencia residual por cada mm de deformación para cada carga asignada a las probetas extraídas y separadas por estrato longitudinalmente de las zonas esquina de las dovelas. Además de la resistencia residual para la Carga máxima obtenida en los testigos.

| TESTIGOS HRF Ø150 mm |        |         |          |         | fctRx (N/mm²) |        |        |        |        |        |        |
|----------------------|--------|---------|----------|---------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Extracción           | Dovela | Testigo | Posición | Cuantía | Qmáx          | P1 (N) | P2 (N) | P3 (N) | P4 (N) | P5 (N) | P6 (N) |
| Transversal Esquinas | 1      | A 1-1   | Intradós | 70,3    | 1,03          | 0,75   | 0,58   | 0,34   | 0,27   | 0,22   | 0,18   |
|                      |        |         | Extradós | 65,1    | 1,07          | 0,67   | 0,28   | 0,18   | 0,13   | 0,10   | 0,09   |
|                      |        | A 5-1   | Intradós | 66,8    | 1,11          | 0,79   | 0,40   | 0,30   | 0,24   | 0,20   | 0,16   |
|                      |        |         | Extradós | 62,1    | 1,06          | 0,61   | 0,37   | 0,32   | 0,28   | 0,25   | 0,24   |
|                      | 2      | A 1-2   | Intradós | 59,5    | 1,07          | 0,67   | 0,42   | 0,30   | 0,23   | 0,18   | 0,15   |
|                      |        |         | Extradós | 57,9    | 1,28          | 0,75   | 0,31   | 0,24   | 0,21   | 0,19   | 0,16   |
|                      |        | A 5-2   | Intradós | 56,2    | 1,19          | 0,84   | 0,52   | 0,33   | 0,27   | 0,23   | 0,20   |
|                      |        |         | Extradós | 65,6    | 1,16          | 0,88   | 0,61   | 0,46   | 0,35   | 0,28   | 0,24   |
|                      | 3      | A 1-3   | Intradós | 57,9    | 1,07          | 0,70   | 0,51   | 0,36   | 0,24   | 0,20   | 0,18   |
|                      |        |         | Extradós | 62,5    | 0,99          | 0,70   | 0,38   | 0,24   | 0,19   | 0,16   | 0,13   |
|                      |        | A 5-3   | Intradós | 68,3    | 1,25          | 0,80   | 0,44   | 0,35   | 0,30   | 0,27   | 0,21   |
|                      |        |         | Extradós | 71,1    | 1,18          | 0,77   | 0,37   | 0,24   | 0,20   | 0,18   | 0,16   |

**Tabla 3-B:** Datos de resistencia residual por cada mm de deformación para cada carga asignada a las probetas extraídas y separadas por estrato Transversalmente de las zonas esquina de las dovelas. Además de la resistencia residual para la Carga máxima obtenida en los testigos.

| TESTIGOS HRF Ø150 mm |        |         |          |         | fctRx (N/mm²) |        |        |        |        |        |        |
|----------------------|--------|---------|----------|---------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Extracción           | Dovela | Testigo | Posición | Cuantía | Qmáx          | P1 (N) | P2 (N) | P3 (N) | P4 (N) | P5 (N) | P6 (N) |
| Radial Central       | 1      | A10-1   | Intradós | 64,9    | 1,12          | 0,64   | 0,48   | 0,31   | 0,28   | 0,20   | 0,15   |
|                      |        |         | Extradós | 78,1    | 1,14          | 0,75   | 0,52   | 0,40   | 0,33   | 0,29   | 0,25   |
|                      |        | A11-1   | Intradós | 67,8    | 1,19          | 0,65   | 0,52   | 0,34   | 0,24   | 0,20   | 0,18   |
|                      |        |         | Extradós | 71,5    | 1,10          | 0,81   | 0,58   | 0,46   | 0,36   | 0,28   | 0,23   |
|                      | 2      | A10-2   | Intradós | 80,1    | 1,25          | 0,64   | 0,19   | 0,12   | 0,09   | 0,06   | 0,05   |
|                      |        |         | Extradós | 65,2    | 1,18          | 0,62   | 0,38   | 0,25   | 0,21   | 0,19   | 0,16   |
|                      |        | A11-2   | Intradós | 69,1    | 1,25          | 0,34   | 0,23   | 0,18   | 0,16   | 0,14   | 0,13   |
|                      |        |         | Extradós | 58,1    | 1,15          | 0,84   | 0,62   | 0,44   | 0,34   | 0,27   | 0,22   |
|                      | 3      | A10-3   | Intradós | 45,6    | 1,11          | 0,70   | 0,47   | 0,35   | 0,29   | 0,26   | 0,23   |
|                      |        |         | Extradós | 46,3    | 0,73          | 0,71   | 0,54   | 0,37   | 0,30   | 0,29   | 0,25   |
|                      |        | A11-3   | Intradós | 40,6    | 1,16          | 0,56   | 0,25   | 0,22   | 0,20   | 0,18   | 0,16   |
|                      |        |         | Extradós | 46,8    | 1,15          | 0,55   | 0,43   | 0,22   | 0,13   | 0,10   | 0,08   |

**Tabla 4-B:** Datos de resistencia residual por cada mm de deformación para cada carga asignada a las probetas extraídas y separadas por estrato Radialmente de la zona central de las dovelas. Además de la resistencia residual para la Carga máxima obtenida en los testigos.

| TESTIGOS HRF Ø150 mm |           |         |          |                      | fctRx (N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|-----------|---------|----------|----------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Extracción           | N° Dovela | Testigo | Posición | Cuantía              | Qmax                       | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   | P6   |
|                      |           |         |          | (kg/m <sup>3</sup> ) | (kN)                       | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) |
| Radial Esquina       | 1         | A2-1    | Extradós | 56,9                 | 1,08                       | 0,57 | 0,36 | 0,25 | 0,18 | 0,14 | 0,12 |
|                      |           |         | Intradós | 89,8                 | 1,07                       | 0,59 | 0,39 | 0,30 | 0,25 | 0,21 | 0,19 |
|                      |           | A4-1    | Extradós | 62,8                 | 1,08                       | 0,62 | 0,41 | 0,29 | 0,23 | 0,20 | 0,16 |
|                      |           |         | Intradós | 75,6                 | 1,16                       | 0,46 | 0,30 | 0,21 | 0,16 | 0,14 | 0,11 |
|                      |           | A6-1    | Extradós | 61,2                 | 1,09                       | 0,44 | 0,24 | 0,20 | 0,15 | 0,13 | 0,12 |
|                      |           |         | Intradós | 71,3                 | 1,03                       | 0,34 | 0,13 | 0,09 | 0,07 | 0,06 | 0,06 |
|                      |           | A8-1    | Extradós | 65,2                 | S/D                        | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  |
|                      |           |         | Intradós | 70,6                 | S/D                        | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  |
|                      | 2         | A2-2    | Extradós | 52,6                 | 1,22                       | 0,52 | 0,33 | 0,20 | 0,15 | 0,13 | 0,11 |
|                      |           |         | Intradós | 76,3                 | 1,10                       | 0,55 | 0,29 | 0,21 | 0,18 | 0,16 | 0,15 |
|                      |           | A4-2    | Extradós | 63,3                 | 1,14                       | 0,53 | 0,32 | 0,22 | 0,17 | 0,13 | 0,11 |
|                      |           |         | Intradós | 73,5                 | 1,10                       | 0,43 | 0,25 | 0,18 | 0,13 | 0,11 | 0,09 |
|                      |           | A6-2    | Extradós | 58,5                 | 1,15                       | 0,11 | 0,11 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,03 |
|                      |           |         | Intradós | 75,8                 | 0,85                       | 0,40 | 0,26 | 0,28 | 0,13 | 0,10 | 0,09 |
|                      |           | A8-2    | Extradós | 58,6                 | 1,20                       | 0,26 | 0,24 | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 0,10 |
|                      |           |         | Intradós | 63,7                 | 1,13                       | 0,56 | 0,38 | 0,29 | 0,21 | 0,17 | 0,15 |
|                      | 3         | A2-3    | Extradós | 96,1                 | 1,07                       | 0,91 | 0,66 | 0,40 | 0,31 | 0,26 | 0,22 |
|                      |           |         | Intradós | 66,4                 | 1,27                       | 0,55 | 0,34 | 0,15 | 0,12 | 0,10 | 0,09 |
|                      |           | A4-3    | Extradós | 60,3                 | 1,17                       | 0,73 | 0,70 | 0,57 | 0,32 | 0,23 | 0,20 |
|                      |           |         | Intradós | 60,6                 | 1,18                       | 0,61 | 0,26 | 0,18 | 0,15 | 0,13 | 0,12 |
|                      |           | A6-3    | Extradós | 66,9                 | 1,06                       | 0,48 | 0,32 | 0,14 | 0,09 | 0,08 | 0,07 |
|                      |           |         | Intradós | 60,6                 | 1,19                       | 0,22 | 0,18 | 0,11 | 0,07 | 0,06 | 0,05 |
|                      |           | A8-3    | Extradós | 66,4                 | 1,12                       | 0,67 | 0,45 | 0,30 | 0,22 | 0,19 | 0,16 |
|                      |           |         | Intradós | 64,0                 | 1,22                       | 0,50 | 0,31 | 0,22 | 0,17 | 0,15 | 0,12 |

**Tabla 5-B:** Datos de resistencia residual por cada mm de deformación para cada carga asignada a las probetas extraídas y separadas por estrato Radialmente de la zona esquina de las dovelas. Además de la resistencia residual para la Carga máxima obtenida en los testigos.

| TESTIGOS HRF Ø150 mm |           |         |          |                      | fctRx (N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|-----------|---------|----------|----------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Extracción           | Nº Dovela | Testigo | Posición | Cuantía              | Qmax                       | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   | P6   |
|                      |           |         |          | (kg/m <sup>3</sup> ) | (kN)                       | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) |
| Radial Intermedia    | 1         | A9-1    | Extradós | 73,2                 | S/D                        | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  |
|                      |           |         | Intradós | 59,30                | S/D                        | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  | S/D  |
|                      | 2         | A9-2    | Extradós | 58,30                | 1,13                       | 0,54 | 0,26 | 0,17 | 0,14 | 0,11 | 0,09 |
|                      |           |         | Intradós | 63,10                | 0,90                       | 0,64 | 0,35 | 0,23 | 0,19 | 0,15 | 0,14 |
|                      | 3         | A9-3    | Extradós | 52,90                | 1,08                       | 0,80 | 0,49 | 0,34 | 0,25 | 0,20 | 0,17 |
|                      |           |         | Intradós | 59,40                | 1,14                       | 0,75 | 0,56 | 0,48 | 0,40 | 0,37 | 0,35 |

**Tabla 6-B:** Datos de resistencia residual por cada mm de deformación para cada carga asignada a las probetas extraídas y separadas por estrato Radialmente de la zona intermedia de las dovelas. Además de la resistencia residual para la Carga máxima obtenida en los testigos.