

## **CAPÍTULO I.- GENERALIDADES**

### **1.1 Introducción**

Con el paso del tiempo, los nuevos avances tecnológicos nos permiten mejorar las técnicas ya existentes o mejorar las técnicas de modelación, construcción o control.

Conocer con mayor exactitud el comportamiento del hormigón armado a los diferentes esfuerzos a los que es sometido, aparte de la optimizar el cálculo estructural, ayudará a mejorar el confort y durabilidad de las estructuras; minimizando la aparición de patologías a mediano y largo plazo.

La aplicación de los métodos no destructivos del hormigón mejora el control de las obras y proporciona un método no dañino para el hormigón de una obra, de tal manera que con el pasar de los años van mejorando en su precisión para la correcta determinación de la resistencia del hormigón.

### **1.2 El problema**

#### **1.2.1 Planteamiento**

El carácter heterogéneo del concreto y el hecho de que las estructuras con este material sean, la mayoría de las veces, construidas sin estricto control industrial, provocan gran variabilidad en sus propiedades físicas. En elementos de concreto, las fisuras se originan en los puntos más débiles, ya que la heterogeneidad del material hace que la resistencia de cada sección sea distinta, por esta razón, la progresiva microfisuración se debe a concentraciones de esfuerzos normales de tensión, lo cual lleva a que hormigón a fisurarse y reducir su área efectiva.

#### **1.2.2 Formulación**

Por lo cual surge la pregunta: ¿Cómo podemos evaluar el grado de fisuración en una viga de hormigón sometida a flexión? Al plantearnos esta pregunta podemos aplicar el equipo del Ultrasonido que nos servirá para ver el grado de fisuración de una viga sometida a flexión. Esto nos llevara a tener un mayor control en la evaluación de obras civiles, se obtendrán mejores resultados en la durabilidad de las mismas, de la misma forma, se podrá

conocer de una mejor manera el comportamiento del hormigón para ver el valor de carga máxima que puede soportar antes que se produzca la microfisuración o fisuración. A la vez que tener el equipo del ultrasonido calibrado, llevará a más usos de aplicación del mismo.

### **1.3 Justificación**

Conocer mejor el comportamiento a flexión del hormigón armado ayudará a mejorar el entendimiento del mismo, precisando mejor el cálculo de diseño tomando en cuenta factores como su fisuración. De la misma manera la importancia de tener un equipo como el ultrasonido calibrado, será de utilidad para posteriores investigaciones, ya que, el alcance de este equipo es amplio y puede ser usado para la determinación de otros valores característicos del hormigón, como así también en otros materiales constructivos, como ser acero, madera, cerámicos, etc.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 General**

- Determinar el proceso de fisuración en vigas sometidas a flexión pura, cuando existe una variación de la carga; mediante el uso del ultrasonido, relacionando los valores obtenidos con este, con las fisuras dadas en los elementos ensayados.

#### **1.4.2 Específico**

- Calibrar el equipo del ultrasonido, para la determinación de la resistencia mecánica mediante la elaboración de probetas para su posterior rotura en prensa.
- Establecer el inicio del proceso de microfisuración en el hormigón dado en las vigas sometidas a flexión pura.
- Calcular el momento de fisuración y el máximo momento flector en la viga producido por las cargas.
- Calcular la carga máxima que resisten las vigas sometidas a flexión.
- Trazar las isovelocidades en las vigas para cada estado de carga.

### **1.5 Hipótesis**

La primera fisuración en vigas de hormigón armado sometida a flexión con resistencia de 21 MPa, tanto para fierro de 10 mm y 12 mm, ocurren en  $L/2$  de la longitud total, con una carga aplicada del 40% de la carga máxima total; mientras que las vigas de hormigón armado con resistencia de 25 MPa, tanto para fierro de 10 mm y 12 mm, la primera fisuración ocurre en  $L/2$  de la longitud total, con una carga aplicada del 60% de la carga máxima total.

### **1.6 Limitantes**

La investigación se basará netamente en la evaluación de una viga de hormigón armado con las dimensiones dadas por la norma ASTM C78 (15 cm x 15 cm x 50 cm), sometida a flexión pura con una resistencia característica de 21 y 25 MPa. Utilizando fierros de 10 y 12 mm.

## CAPÍTULO II.- MARCO TEÓRICO

### 2.1 Generalidades del hormigón

#### 2.1.1 Definición de hormigón

El hormigón es un material compuesto empleado en el ámbito de la construcción y la ingeniería civil.

Se elabora con una mezcla de cemento, grava, arena y agua en determinadas proporciones. Cuando se seca y fragua, el hormigón se endurece y gana resistencia.

A continuación, se detallarán los componentes del mismo.

#### 2.1.2 Cemento Portland

##### 2.1.2.1 Definición

El cemento es un conglomerante hidráulico constituido a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que posee la cualidad de endurecerse después de ponerse en contacto con el agua. De tal manera que el cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para componer una masa compacta. (Neville,1999).

##### 2.1.2.2 Composición química

En la composición química del cemento Portland se suele considerar cuatro compuestos como los componentes principales del cemento, cuyos porcentajes varían dependiendo de los diferentes tipos de cementos Portland, se muestran en la tabla 2.1 (Neville,1999):

Tabla 2.1

*Compuestos principales del cemento portland*

Nombre del compuesto	Composición de óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico	2CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminato tricálcico	3CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Aluminoferrita tetracálcica	4CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Cada compuesto principal contribuye en el comportamiento del cemento, cuando este pasa del estado plástico al endurecido una vez que es hidratado. El silicato tricálcico da alta resistencia inicial al cemento Portland; el silicato dicálcico, es el que aporta la resistencia del hormigón a largo plazo; el aluminato tricálcico controla el tiempo de fraguado y el aluminoferrita tetracálcica se hidrata con rapidez y solo desarrolla baja resistencia.

### **2.1.2.3 Características físicas y mecánicas del cemento Portland**

Las más importantes son: fraguado, expansión, finura de molido y resistencia a compresión. (García, Morán y Arroyo,2011).

#### **2.1.2.3.1 Fraguado**

El fraguado es la pérdida de plasticidad que sufre la pasta de cemento. El fraguado inicial, comienza en un periodo relativamente corto (>45 a 60 min.) y ocurre cuando la pasta de cemento deja de ser deformable y se convierte en un bloque rígido (generalmente a 12 horas).

#### **2.1.2.3.2 Expansión**

Es esencial que la pasta de cemento, una vez que ha fraguado, no sufra grandes cambios en su volumen. Particularmente, no debe haber una expansión apreciable, la cual, en condiciones de restricción, podría ocasionar un rompimiento de la pasta de cemento endurecida.

#### **2.1.2.3.3 Finura de molido**

Es una característica íntimamente relacionada al valor hidráulico del cemento, ya que esta influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado y primer endurecimiento. Si los granos poseen una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos, lo que generalmente resulta perjudicial; por el contrario, si los granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño, al queda en su interior un núcleo prácticamente inerte.

#### **2.1.2.3.4 Resistencia mecánica a la comprensión.**

La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que posiblemente resulte más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales.

La resistencia del cemento influye decisivamente en la resistencia del concreto, por lo que, cuanto mayor sea la resistencia de éste, tanto mayor será la del hormigón. Esta característica no es la única que debe buscarse, ya que por sí sola no garantiza otras igualmente necesarias, o incluso más, por ejemplo, la durabilidad.

#### **2.1.3 Agregados**

Como áridos o agregados para la confección de hormigones pueden emplearse arenas y gravas naturales o procedentes de machaqueo, que reúnan en igual o superior grado las características de resistencia y durabilidad que se le exijan al hormigón. (García, Morán y Arroyo,2011).

Al menos tres cuartas partes del volumen del concreto están ocupadas por agregado, por lo cual la calidad de los mismos es de vital importancia.

Los áridos pueden ser rodados o machacados. Los primeros proporcionan hormigones más dóciles y trabajables, requiriendo menos cantidad de agua que los segundos. Los machacados confieren al hormigón fresco cierta actitud que dificulta su puesta en obra. En ambos efectos influye más la arena que la grava. En cambio, los áridos de machaqueo proporcionan una mayor trabazón que se refleja en una mayor resistencia del hormigón, especialmente a tracción, y en general en una mayor resistencia química.

##### **2.1.3.1 Grava**

Se denomina grava o árido grueso a la fracción mayor de 5 mm.

La resistencia de la grava viene ligada a su dureza, densidad y módulo de elasticidad. Se aprecia en la limpieza y agudeza de los cantos vivos resultantes del machaqueo. Las buenas no son rayadas por la navaja, la cual deja tan solo un ligero trazo sobre su superficie (densidad mayor de 2,6 y resistencia mayor de 100 N/mm<sup>2</sup>). Las que son rayadas por el latón (densidad menor de 2,3 y resistencia menor de 50 N/mm<sup>2</sup>) caen fuera de lo admisible. Entre ambas se colocan las que no son rayadas por el bronce. En todos los casos deben

realizarse la prueba sobre una superficie plana y con el material totalmente seco. (García, Morán y Arroyo,2011).

### **2.1.3.2 Arena**

Se denomina arena o árido fino a la fracción menor de 5 mm.

Es el árido de mayor responsabilidad. A diferencia de la grava, el agua e incluso el cemento, puede decirse que no es posible hacer un buen hormigón sin una buena arena.

La humedad de la arena tiene gran importancia en la dosificación de los hormigones. Por ello, es siempre necesario tenerla en cuenta. (García, Morán y Arroyo,2011).

### **2.1.4 Agua**

El agua es un elemento fundamental en la elaboración del concreto, estando relacionado con la resistencia, trabajabilidad y propiedades del concreto endurecido; por lo que se debe tener en cuenta la procedencia y calidad del mismo.

El agua es utilizada para el amasado y el curado del hormigón.

El agua de amasado juega un doble papel; participa en las reacciones de hidratación del cemento y en la trabajabilidad necesaria del hormigón.

El agua del curado tiene por objeto evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento e impedir una retracción prematura.

## **2.2 Generalidades del hormigón armado**

### **2.2.1 Definición del hormigón armado**

El hormigón en masa presenta una buena resistencia a compresión, como les ocurre a las piedras naturales, pero ofrece muy escasa resistencia a tracción, por lo que resulta inadecuado para piezas que hayan de trabajar a flexión o tracción. Pero si se refuerza el hormigón en masa disponiendo barras de acero en las zonas de tracción, el material resultante, llamado hormigón armado, está en condiciones de resistir los distintos esfuerzos que se presentan en las construcciones. (García, Morán y Arroyo,2011).

El hormigón armado es en la actualidad uno de los materiales más empleados en las construcciones, debido a su capacidad de adaptarse a la forma del encofrado que lo contiene, y a la facilidad de obtención de sus componentes.

## **2.2.2 Ventajas y desventajas del hormigón armado**

### **2.2.2.1 Ventajas**

- Su resistencia a la compresión, flexión, corte y tracción.
- Su larga durabilidad, manteniendo sus propiedades intactas.
- Es resistente al fuego, dando un carácter protector al hormigón a la armadura.
- Es un material muy dúctil.

### **2.2.2.2 Desventajas**

- Necesita ser de grandes dimensiones para soportar el peso de las grandes edificaciones, lo que incrementa su coste.
- Es muy pesado y voluminoso.
- Su aplicación en diseños modernos con formas diversas reduce su capacidad para soportar movimientos sísmicos. (Estructuras civiles Antonio Míguez, 2014).

## **2.2.3 Comportamiento del hormigón armado a la flexión**

El hormigón simple solo soporta esfuerzos a compresión, para que soporte esfuerzos de flexión, corte y tracción, el hormigón necesita reforzarse con armadura.

La capacidad del hormigón armado para soportar esfuerzos de flexión depende de su geometría y de la cantidad de armadura.

Para la determinación del esfuerzo en vigas sometidas a flexión pura y a posterior la deducción de la fórmula de la flexión, se deben hacer las siguientes hipótesis (Pytel, Singer, 2004):

- Las secciones planas de la viga, inicialmente planas, permanecen planas.
- El material es homogéneo y obedece la ley de Hooke.
- El módulo elástico es igual a tensión que a compresión.
- La viga es inicialmente recta y de sección constante.

- El plano en que actúan las fuerzas contiene a uno de los ejes principales de la sección recta de la viga y las cargas actúan perpendicularmente al eje longitudinal de aquella.

### 2.2.3.1 Deducción de la fórmula de la flexión

La figura 2.1 y 2.2 muestran dos secciones adyacentes  $ab$  y  $cd$  separadas una distancia  $dx$ . Debido a la flexión producida por la carga  $P$ , las secciones  $ab$  y  $cd$  giran una con respecto a la otra un pequeño ángulo  $d\theta$ , como se ve en la figura 2. (Pytel, Singer, 2004).

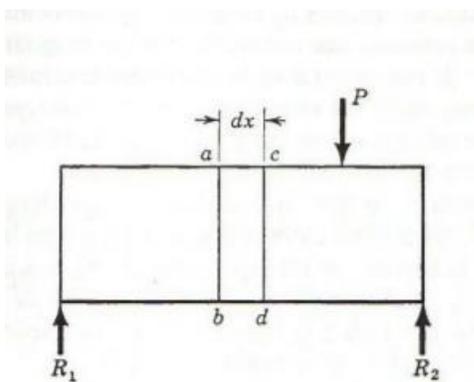


Figura 2.1. Viga en estado inicial

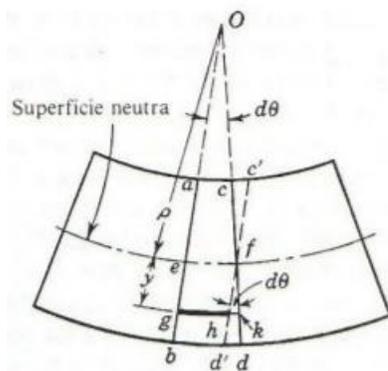


Figura 2.2. Deformación en viga

La fibra  $ac$  de la parte superior se acorta y la fibra  $bd$  se alarga. En algún punto entre ellas existe una fibra, tal como  $ef$ , cuya longitud no varía. Trazando la línea  $c'd'$  por  $f$ , paralela a  $ab$ , se observa que la fibra  $ac$  se ha acortado una longitud  $cc'$  y esta, pues, comprimida, mientras que la fibra  $bd$  se ha alargado la longitud  $d'd$  y está sometida a tensión.

El plano que contiene todas las fibras como la  $ef$  se llama superficie neutra, ya que tales fibras no varían de longitud, y, por tanto, no están sujetas a esfuerzo alguno. En seguida veremos que la superficie neutra pasa los centros de gravedad de las secciones transversales de la viga.

Consideremos ahora la deformación de una fibra cualquiera  $gh$  situada a una distancia  $y$  de la superficie neutra. Su alargamiento  $hk$  es el arco de circunferencia de radio  $y$  y ángulo  $d\theta$  y viene dado por (Pytel, Singer,2004):

$$\delta = hk = yd\theta$$

La deformación se obtiene dividiendo el alargamiento entre la longitud inicial  $ef$  de la fibra:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{yd\theta}{ef}$$

Llamando  $p$  al radio de curvatura de la superficie neutra, la longitud  $ef$  es igual a  $pd\theta$ , por lo que la deformación unitaria vale:

$$\varepsilon = \frac{yd\theta}{pd\theta} = \frac{y}{p}$$

Suponiendo que el material es homogéneo y obedece a la ley de Hooke, el esfuerzo en la fibra  $gh$  viene dado por:

$$\sigma = E\varepsilon = \left(\frac{E}{p}\right)y$$

Esta expresión indica que el esfuerzo en cualquier fibra es directamente proporcional a su distancia  $y$  a la superficie neutra, ya que se ha supuesto que el módulo elástico es igual a tensión que a compresión, y el radio de curvatura  $p$  de la superficie neutra es independiente de la ordenada  $y$  de la fibra. Ahora bien, los esfuerzos no deben sobrepasar el límite de proporcionalidad (Pytel, Singer,2004). Para completar la deducción de la fórmula de la flexión se deben aplicar las condiciones de equilibrio.

Consideramos ahora la condición  $\Sigma My=0$ . Las fuerzas exteriores no producen momento con respecto al eje Y, ni tampoco las fuerzas cortantes interiores, por lo tanto:

$$\Sigma My = 0 \quad \int z(\sigma_x dA) = 0$$

Sustituyendo  $\sigma_x$  por  $Ey/p$ , resulta:

$$\frac{E}{p} = \int zy dA = 0$$

La integral es el producto de inercia  $P_{zy}$ , que es nulo solamente si Y y Z son ejes de simetría o ejes principales de la sección. (Pytel, Singer,2004).

La condición de equilibrio  $\Sigma M_x=0$  requiere que el momento flexionante sea equilibrado por el momento resistente, es decir,  $M=Mr$ . El momento resistente con respecto a E.N. de un elemento cualquiera es  $y(\sigma_x dA)$  y, por lo tanto:

$$M = \int y(\sigma_x dA)$$

Sustituyendo  $\sigma_x$  por  $Ey/p$ , resulta:

$$M = \frac{E}{p} \int y^2 dA$$

Puesto que  $\int y^2 dA$  es el momento de inercia I del área con respecto al eje de referencia, que en este caso es E.N., que pasa por el centro de gravedad, se obtiene finalmente:

$$M = \frac{EI}{p}$$

Ahora se deduce porque en la sección era necesario considerar el eje que pasa por el centroide de la sección de exploración, como eje con respecto al cual se calcula el momento flexionante, de esta manera se tiene un eje común para calcular e igualar M y Mr.

La forma más común de escribir la ecuación anterior es:

$$\frac{1}{p} = \frac{M}{EI}$$

Igualando la relación  $E/p$  deducida con el valor de la ecuación se obtiene:

$$\frac{E}{p} = \frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y}$$

Que conduce directamente a la fórmula de la flexión pura: (Pytel, Singer,2004).

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

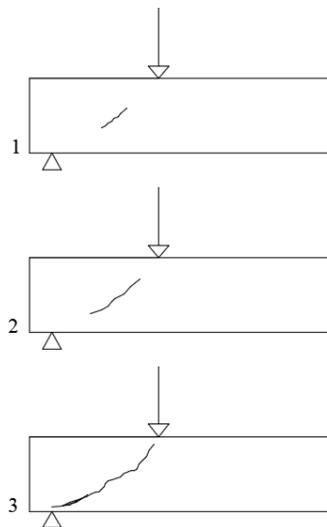
Con esta fórmula se procederá a calcular el momento máximo resistente y posteriormente se sacará la carga máxima resistente. Datos que nos servirán para determinar los valores de variación de la carga.

## 2.2.4 Tipología de daños

### 2.2.4.1 Fisuras

Las fisuras producidas por flexión son las conocidas y visualmente fáciles de reconocer, pudiendo estas corresponder a flexión pura o combinada con esfuerzo cortante.

Como se puede observar en la figura 2.3, la fisura se inicia en la armadura, progresa en vertical hacia la fibra neutra y se incurva al final, buscando el punto de aplicación de la carga y deteniéndose al alcanzar la cabeza de compresión. (García, Morán y Arroyo,2011).



*Figura 2.3. Fisuras de flexión*

Estas fisuras, en las estructuras, avisan con mucho tiempo, por lo cual se puede llegar a reparar oportunamente.

Algunas de las características principales de las fisuras de flexión son:

- No afectan a todo el canto, sino que se detienen en la fibra neutra, sin embargo, si la fibra neutra sube y la zona de hormigón comprimido va disminuyendo, el hormigón rompe por aplastamiento.
- Aparecen varias y bastantes juntas.
- Aparecen bajo carga y desaparecen al retirarla.
- Son perpendiculares al eje de la pieza y se inclinan luego más o menos según el valor del esfuerzo cortante. (Zenteno, s.f.).

### **2.2.5 El estado límite de fisuración**

La fisuración de las estructuras de hormigón es un fenómeno inevitable pero controlable y que ha ido cobrando importancia con los años, a medida que se han ido incrementando las resistencias de los aceros empleados como armaduras. Los efectos de la fisuración son:

- Pérdida de protección de las armaduras, por lo que afecta negativamente a la durabilidad.
- Afecta negativamente al aspecto estético de las construcciones.
- Produce temor en los usuarios de la construcción. (riesgo psicológico).
- Gastos extraordinarios en mantenimiento y reparación.

La fisuración no supone un riesgo para la integridad física de los usuarios de las estructuras, al menos de manera inmediata. Sin embargo, si no es controlada puede comprometer la funcionalidad para la que haya sido proyectada la estructura y poner en riesgo su buen comportamiento a lo largo de la vida útil de la misma. (Borja, López, Bañon, 2012.)

#### **2.2.5.1 Momento de fisuración**

El momento de fisuración de una sección de hormigón se define como:

$$M_f = \frac{I * f_{ct,m,fl}}{y}$$

$$f_{ct,m,fl} = \left(1,6 - \frac{h}{1000}\right) f_{ct,m}$$

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{\frac{2}{3}}$$

Donde:

$F_{ct,m,fl}$  es la resistencia media del hormigón a flexotracción.

$F_{ck}$  es la resistencia característica del hormigón a compresión.

$F_{ct,m}$  es la resistencia del hormigón a tracción.

### 2.2.5.2 Determinación de armadura

La cuantía mínima para flexión viene dada por la fórmula: (García, Morán y Arroyo, 2011).

$$A_s f_{yd} \geq 0,25 \frac{W}{h} f_{cd}$$

Donde:

$F_{cd}$  es la resistencia de cálculo del hormigón en compresión.

### 2.2.5.3 Determinación de la carga máxima

La carga máxima se sacará de la fórmula:

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

Despejando de M:

$$M = \frac{\sigma I}{y}$$

Donde M es igual a F\*d:

$$F = \frac{\sigma I}{dy}$$

### 2.3 Aplicación del ensayo y normas usadas

Para proceder a la aplicación del ensayo tomaremos en cuenta la norma ASTM C78, (método estándar de ensayo para resistencia a la flexión del concreto con carga a los tercios del claro), la norma ASTM C597, (método de ensayo estándar para la velocidad de pulso a través del concreto) y la norma española UNE 83-308-86 (método estándar de ensayos ultrasónicos).

La elaboración de las vigas se llevó a cabo de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM C192 (práctica estándar para elaboración y curado en el laboratorio de especímenes de concreto para ensayo).

Normas en las cuales nos basaremos para la elaboración y curado de las vigas de 15 cm x 15 cm x 50 cm, en la colocación y posición de la armadura, en la aplicación del ensayo y en el manejo y uso del ultrasonido.

En la aplicación de la carga se procederá a aumentar gradualmente, en porcentajes de 20%, 40%, 60% y 80% respecto a la carga máxima, el ensayo nos permite obtener flexión pura en el tercio central por lo cual los cálculos se basarán en fórmula de la flexión pura. Una viga se dice que trabaja a flexión pura cuando en cualquier sección de ese trozo solo existe momento flector.



*Figura 2.4. Ensayo de flexion pura*



Figura 2.5. Aparato para realizar el ensayo en dos puntos, en el tercio central

El concepto de Flexión Pura se refiere a la flexión de una viga bajo un momento flector constante. Así, la flexión pura ocurre solo en regiones donde la fuerza cortante es cero. Además, el par de momentos debe ser aplicado sobre un plano de simetría de la viga en cuestión.

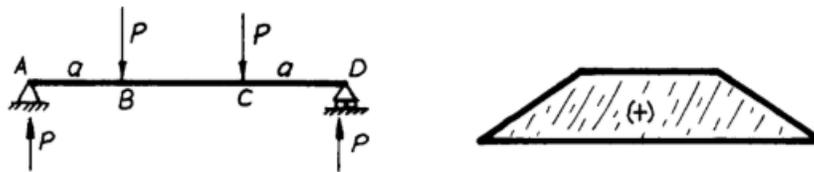


Figura 2.6. y 2.7. Condiciones para formar flexión pura

La viga de la figura, cargada de forma simétrica por dos cargas  $P$ , es un ejemplo de flexión pura, como se puede ver en su diagrama de momento flector. La región central de la viga está sometida a flexión pura, ya que la fuerza cortante es cero, y el momento flector es constante. Las regiones extremas de la viga están sometidas a flexión no-uniforme, ya que existen fuerzas cortantes y el momento flector varía.

Para el tema de investigación en cuestión se irá aumentando gradualmente la carga máxima que puede resistir el elemento en su rango elástico, siguiendo la ley de Hooke. Se irá aumentando gradualmente cada 20% de la carga máxima.

Los puntos de apoyo de la carga se encuentran en el tercio central, separados entre sí 15 cm, de la misma forma la distancia, la distancia del apoyo al punto de apoyo de la carga es de 15 cm; habiendo una separación de 45 cm entre apoyos.

## 2.4 El método de ultrasonido

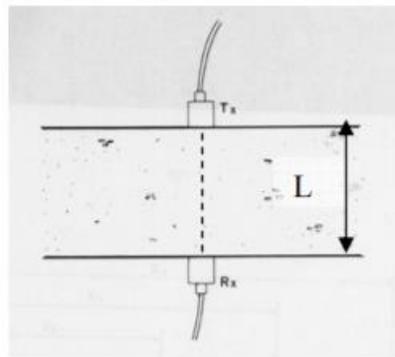
El método ultrasonido se basa en un fenómeno físico bien conocido: la propagación de ondas en un medio material. Es un método que se utiliza frecuentemente cuando se trata de determinar la uniformidad de un elemento, su espesor, su módulo elástico de Young o de Coulomb. Sin embargo, el fenómeno es complejo cuando el medio de propagación (en nuestro caso el hormigón) es heterogéneo, y que las diferentes fases que le componen tienen diferentes propiedades elásticas relativas a la propagación de ondas. Esta heterogeneidad provoca un mal conocimiento de la forma del frente de onda y luego del camino seguido por la onda.

Pero cualquier sea el medio de propagación de las ondas, este método tiene como principales ventajas de necesitar una única medida para obtener un valor representativo, es decir que la dispersión de este ensayo está muy baja. Es un ensayo no destructivo, lo que permite conservar intacta la estructura que se ensaya. Aunque no permita evaluar directamente la resistencia del hormigón, este método combinado a una de calibración en laboratorio (que correlaciona las medidas ultrasónicas con la resistencia) puede dar una estimación de la resistencia característica del hormigón ensayado con una precisión de  $\pm 20\%$ . Por último, los ensayos solo necesitan de un equipo de fácil utilización. (Tobio, 1967).

Las frecuencias normalmente utilizadas en las técnicas de ensayo ultrasónico van de los 45-54 kHz para hormigones. A estas frecuencias las ondas se transmiten razonablemente bien en líquidos y sólidos, sin embargo, no se transmiten en el aire. Por esta razón una onda ultrasónica que se mueve en el interior de un material a verificar se moverá siempre dentro de este, ya que no puede abandonar la pieza al reflejarse en la interfase formada por la pieza y el aire que la rodea. (Huete, Rubio, Rodríguez, 1993).

### 2.4.1 Fundamento y descripción del método

El método de control del hormigón con emisión de impulsos generados mecánicamente apareció en los Estados Unidos en los años 1940. El principio básico es que la velocidad de la onda a través del hormigón depende al mínimo de las propiedades elásticas, y que es casi independiente de la geometría de la estructura estudiada. Canadá y Reino Unido han desarrollado algunos años después este método utilizando transductores electroacústicos, que permiten un control mejor del tipo y de la frecuencia de los impulsos emitidos. El método moderno consiste en la medición del tiempo que emplea un impulso ultrasónico al recorrer la distancia entre un transductor emisor Tx y un transductor receptor Rx, ambos acoplados al hormigón que se está estudiando (cf. figura 3.1, sacada de la norma UNE 83-308-86).



*Figura 2.8. Esquema de principio de ensayo del método ultrasónico*

*Mediante un transductor electroacústico se genera un impulso de vibración longitudinal; después de recorrer una determinada distancia  $L$ , un segundo transductor recibe la señal y, por medio de un circuito electrónico se mide el tiempo de tránsito o de propagación del impulso a través el material (cf. figura 3.2, sacada del libro de J.H.Bungey y S.G. Millard).*

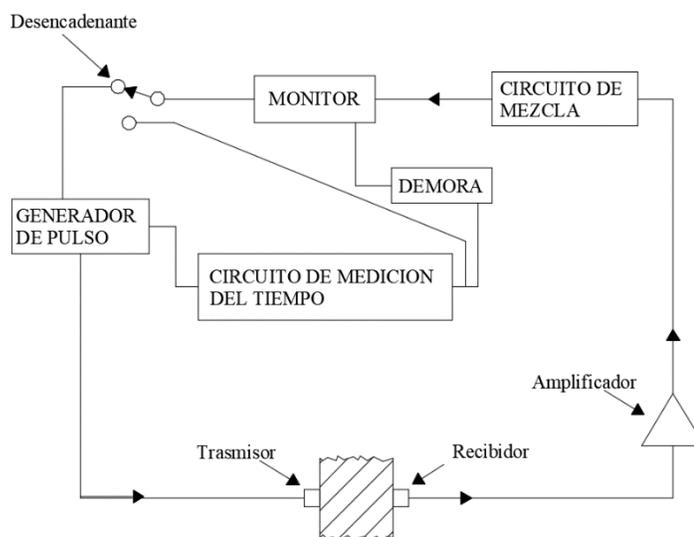


Figura 2.9. Principio de funcionamiento del aparato de ensayo

La velocidad de transmisión o velocidad de propagación se determina en cada caso por el cociente entre la distancia o separación  $L$  entre los transductores y el tiempo de tránsito  $t$  para esta distancia.

$$V = \frac{L}{t}$$

La velocidad de las ondas en el material permite obtener informaciones sobre las propiedades elásticas. Las frecuencias de las ondas generadas varían entre 20 y 150 kHz, y por el hormigón se utilizan las frecuencias comprendidas entre 54 y 82 kHz. Las velocidades de propagación de las ondas en estos casos varían entre 3,2 km y 4,8 km/s, lo que impone un cuidado espacial durante los ensayos in situ, siendo el intervalo de velocidades posibles reducido. (Huete, Rubio, Rodríguez, 1993).

#### 2.4.1.1 Definición de la onda emitida

Una onda ultrasónica como todas las ondas de tipo mecánico necesita para propagarse de un medio físico, cuyas partículas permiten la transmisión de la dicha onda. En efecto la propagación es dada a los choques sucesivos de las partículas de este medio unas contra otras. Cada onda se caracteriza por su frente de onda, su polarización, la energía llevada  $E$ , lo cual se relaciona con la capacidad de la onda a propagarse en un dicho material. El

estudio de estas características es casi indispensable para entender de una manera eficaz los resultados de los ensayos ultrasónicos, y la influencia de algunos factores como la humedad del hormigón ó la presencia de armadura de acero (Tobio, 1968).

#### 2.4.1.1.1 Teoría de la onda ultrasónica

La propagación de una onda en un medio físico depende mucho de las propiedades de este medio. En los medios homogéneos e infinitivos, se puede plantear una onda continua longitudinal, monocromática (es decir de una sola frecuencia), y de velocidad igual a la velocidad de fase de la onda, con dirección de propagación normal a la dirección de oscilación (onda transversal o de corte), y de misma dirección que la de oscilación (onda longitudinal). En un medio homogéneo e infinitivo, la forma del frente de onda  $U$  es la solución de la ecuación de propagación a lo largo del eje  $x$ .

$$(\lambda^* + 2G) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$

$$\lambda^* = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)}$$

$$G = \frac{E}{2(1+v)}$$

Donde:

$\lambda^*$  es el coeficiente de Lamé

$\rho$  es la densidad del medio de propagación

$G$  es el módulo de rigidez de Coulomb

$E$  es el módulo elástico de Young

De una manera más general, se puede plantear otra ecuación de propagación espacial, y utilizando como parámetro la velocidad de propagación  $V$  en un medio homogéneo e isótropo.

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - V^2 \Delta U = 0$$

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$

Por analogía entre las dos ecuaciones de propagación, nos sale una velocidad de propagación de la onda en un medio heterogéneo.

$$V_c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$$

La función de amplitud  $A(z)$  debe cumplir la ecuación de propagación, de donde:

$$A(z) \left( K^2 - \frac{w^2}{V^2} \right) = \frac{\partial^2 A}{\partial z^2}$$

$$q = \left( K^2 - \frac{w^2}{V^2} \right)$$

Si  $q$  es positivo, la amplitud de la onda crece con la profundidad  $z$ , lo que es físicamente absurdo. Por eso haciendo la hipótesis que  $q$  es negativo, se obtiene:

$$A(z) = A_o \exp(-qz)$$

Lo que nos indica que la amplitud de la onda decrece con la profundidad.

#### **2.4.1.1.2 Energía de la onda**

La propagación de la onda es alterada por fenómenos como la difracción a la interfase entre la pasta de cemento y los áridos, la divergencia del haz, los fenómenos absorptivos y dispersivos. Estos fenómenos reducen la energía de la onda y por eso alteran la cualidad de las medidas de velocidad de impulsos. (Tobio, 1967).

#### **2.4.1.1.3 Profundidad efectiva $Z$ de penetración de las ondas**

Es necesario estimar la profundidad efectiva  $Z$  de penetración de las ondas ultrasónicas, especialmente para saber si la armadura pueda influir sobre la medición del tiempo recorrido del impulso. En efecto si esta profundidad  $Z$  es superior al recubrimiento de las armaduras, al hacer una medida de tiempo de propagación de la onda con transmisión superficial (o indirecta), obtendremos un valor inferior porque la onda se propagará a través el acero. Es importante estimar esta profundidad con sólo dos parámetros: La longitud de onda  $\lambda$  que caracteriza la onda y el coeficiente de Poisson  $\nu$  que caracteriza el material a través el que se propaga la onda.

Utilizando una transmisión de onda superficial ente los dos transductores, se debe considerar una propagación transversal de la onda. Esta onda superficial esta polarizada elípticamente y su amplitud decrece exponencialmente con la profundidad de penetración  $z$ . El 96% de la energía de esta onda transversal superficial está concentrada en una profundidad  $Z_0$  del orden de la longitud de onda  $\lambda$ , y la onda camina sin mucha atenuación en dirección de propagación. Sin embargo, la mayor atenuación se encuentra en la dirección del eje normal a la superficie (el eje  $z$ ); por eso la profundidad  $Z$  es un parámetro de valor finito. Por razón de confiabilidad en la detección del primer impulso por el transductor receptor, se estima que la profundidad efectiva de propagación  $Z$  corresponde a una energía igual al 0,95% de la energía inicial de la señal en la interfase transductor hormigón ( $z=0$ ). (Tobio, 1967).

#### **2.4.1.1.4 Características de un haz ultrasónico**

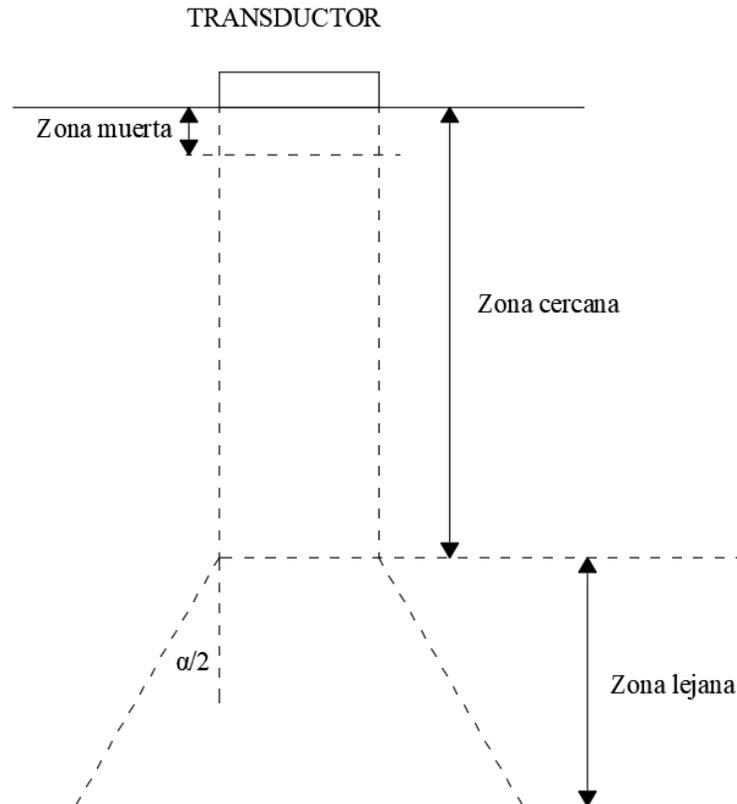
El haz ultrasónico emitido por un transductor circular tiene al principio la forma de un cilindro perfecto. La propagación de la onda, en el material se crea una divergencia  $\alpha$  de este haz, relacionada con la frecuencia  $f=V/\lambda$  de la dicha onda, y con el diámetro  $d$  del palpador emisor.

$$\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1,12\lambda}{d}$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda.

Si la frecuencia de la onda disminuye, es decir si la longitud de onda se aproxima de las dimensiones del cristal piezo eléctrico, las ondas son generadas en todas las direcciones, y no hay un haz definido.

Un haz ultrasónico puede ser subdividido en tres zonas: La zona muerta, la zona próxima, y la zona lejana (cf. figura 3.3 sacada del libro de Barry Hull y Vernon John):



*Figura 2.10. Haz ultrasónico; definición de las diferentes zonas*

**a) La zona muerta** (dead zone) Corresponde a la zona superficial en la cual no se puede detectar un defecto. El objeto vibra porque se le impone una excitación eléctrica durante un tiempo muy corto, con el objeto de generar un impulso ultrasónico corto. La pieza eléctrica no vibra instantáneamente al parar la excitación, sino resuena durante un tiempo corto. No es posible entonces detectar un defecto superficial durante este tiempo de resonancia. Si el cristal piezo eléctrico está colocado en un bloque de plexiglás correctamente dimensionado, la zona sorda puede ser contenida en el propio transductor.

**b) La zona cercana** (near zone) Es la zona en la cual el haz ultrasónico es casi cilíndrico. La resolución de detección de defectos es constante en esta zona, y se mejora con la profundidad.

c) **La zona lejana** (far zone) Es la zona debajo la zona próxima, en la cual ocurre el fenómeno de divergencia del haz. La posibilidad de detectar defectos disminuye.

Por ultimo una frecuencia de emisión alta mejorará la resolución, el ruido disminuirá cuando las dimensiones de la fuente aumentan. (Huete, Rubio, Rodríguez, 1993).

#### **2.4.1.1.5 Elección de la frecuencia de emisión**

Para la ocultación del hormigón con el método de impulsos, es preferible utilizar ondas ultrasónicas, es decir de mayor frecuencia con respecto a las ondas sónicas, porque permiten obtener un frente de onda nítido y bien definido, y generar la máxima energía en la dirección longitudinal de propagación (perpendicular a la cara emisor del transductor). Sin embargo, se busca un compromiso entre la calidad del frente de onda y la amortiguación de la señal por el material. En efecto la energía de la onda emitida disminuye con la frecuencia de la dicha onda, es decir que a menor frecuencia, menor energía y menor amortiguación de la señal.

#### **2.4.1.2 Diferentes tipos de onda**

Existen cuatro tipos de ondas generadas por un impulso ultrasónico aplicado a un sólido como es el caso con el hormigón:

- Las ondas longitudinales.
- Las ondas transversales.
- Las ondas superficiales o de Rayleigh.
- Las ondas de Lamb.

Cada tipo de onda se caracteriza por su dirección, su velocidad y la energía transportada (ligadas con la dirección de oscilación de las partículas con relación a la dirección de propagación de la onda). Las diferentes velocidades de estas ondas se relacionan y dependen de los parámetros intrínsecos al material como su módulo dinámico elástico E, su coeficiente de Poisson, su módulo dinámico de cizalladura o de Coulomb G, y de su densidad. (Tobio, 1967).

A continuación, se explicarán las dos ondas más importantes, las ondas longitudinales y las ondas transversales:

#### **2.4.1.2.1 La onda longitudinal**

La onda longitudinal o de compresión se propaga perpendicularmente al plano del transductor emisor. Las oscilaciones de las partículas ocurren en la dirección de propagación de la onda. Se denomina también una onda de presión o de densidad. La energía transportada por esta onda es la más importante con respecto a los otros tipos de ondas. En efecto eso es dado al hecho que son las ondas más rápidas y que dan lo mas de informaciones sobre la estructura del hormigón.

#### **2.4.1.2.2 La onda transversal**

En la onda transversal o de cortante, las partículas oscilan en una dirección transversal a la dirección de propagación de la onda, por eso se denomina también onda de cizalladura.

En ultrasonidos digitales ambos tipos de ondas ya arrojan directamente la velocidad de la onda.

#### **2.4.1.3 Posición relativa de los dos transductores**

En el método de los ultrasonidos existen tres tipos de ensayos que corresponden a la posición relativa de los transductores uno con relación a otro: medidas de velocidad con transmisión de las ondas acústicas directa, semi indirecta e indirecta (cf. figura 3.8 sacada de la norma UNE 83-308-86). En la transmisión directa los transductores se posicionan en caras opuestas del hormigón, mientras que en la semidirecta los transductores están situados en dos caras adyacentes, las cuales forman en general un ángulo recto. En la transmisión indirecta o superficial los transductores se disponen en la misma cara del elemento que se ensaya. En cualquier de estos tres casos es común adoptar como medida de tiempo de recorrido del impulso ultrasónico el valor medio de dos determinaciones, correspondientes a un intercambio de la posición relativa del emisor y del receptor. En efecto en la medición in situ, al estar la superficie de hormigón rugosa e irregular, puede variar el espesor de acoplamiento entre los dos transductores; esta diferencia puede generar cambios fenómenos de difracción, o reflexión entre las dos determinaciones.

De una manera teórica, solo se conoce bien la transmisión directa, en la cual la trayectoria de las ondas es recta entre los dos transductores con una mayor energía. Así se mide de manera precisa la longitud de recorrido de la onda Este ensayo da resultados muy fiables

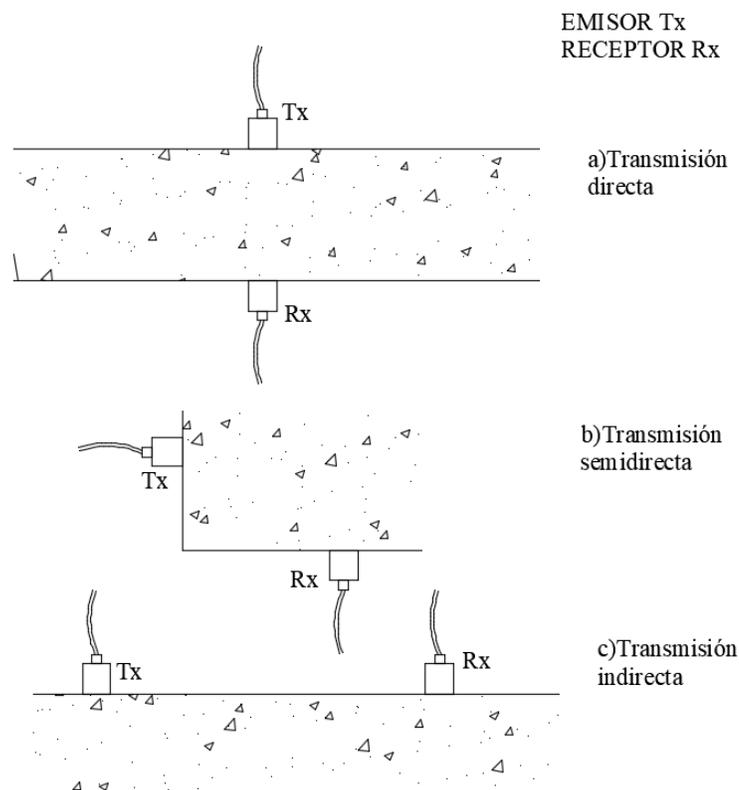
y precisos, y debe ser utilizada cada vez que es posible. Desgraciadamente por razones de accesibilidad a las dos caras opuestas, o de dimensiones del elemento que se ensaya, se debe recurrir a los dos otros tipos de transmisiones.

El método semi directo puede ser a veces satisfactorio, si el ángulo entre los dos transductores no es superior a  $90^\circ$ , o si la longitud de recorrido no es demasiada larga. La sensibilidad de los transductores será menor y puede ocurrir que la señal recibida no sea clara a causa de la atenuación del impulso ultrasónico. La longitud de recorrido no se define bien dado al tamaño finito del transductor, pero es usual medir esta longitud desde el centro del emisor hasta el centro del receptor.

Con la transmisión indirecta, se debe hacer hipótesis en cuanto a la trayectoria de las ondas, es decir cuanto a la longitud de recorrido. Además, sólo el 3 % de la amplitud de la señal es transmitido: existe una dispersión de las ondas y atenuación de su amplitud a causa de las discontinuidades en el hormigón, y esos fenómenos reducen la calidad del impulso recibido. Estas medidas dependen mucho del estado superficial (grietas, heterogeneidad, coqueras) de la probeta o del elemento estructural de hormigón a ensayar. Se puede que las propiedades de la capa superficial no sean representativas del corazón del elemento de hormigón, porque el fraguado y el curado de esta capa dependen de las condiciones climáticas externas. Por eso este método es considerada como poco fiable; una ejecución buena permite evitar una heterogeneidad demasiada grande de la capa superficial, y puede contribuir a la elección de este método.

Como existen diferentes tipos de ondas con varias velocidades, el tiempo de transito depende del tipo de la onda que se propaga entre los dos transductores. Por una misma longitud de recorrido planteada, las posiciones relativas en la probeta del emisor y del receptor cambiaran el valor del tiempo de tránsito.

Por eso, al comparar velocidades de transmisión de onda, es necesario identificar el tipo de onda que se propaga para que el análisis de los resultados no sea equivocado. El tipo de onda se relaciona con las posiciones relativas de los dos transductores: Por una transmisión directa se trata de una onda longitudinal o de compresión, por una transmisión indirecta es una onda transversal de cortante, y por una transmisión indirecta es una onda de Rayleig. (Santos, Cancino, Yenque, Ramirez, Palomino, 2005).



*Figura 2.11. Diferentes posiciones de los transductores*

Todas las mediciones realizadas en este proyecto de ingeniería civil son mediciones directas.

#### **2.4.2 Factores de influencia de las medidas**

El hormigón es un material heterogéneo, compuesto de cemento, agua y áridos, y cuyas propiedades evolucionan con el tiempo. El método ultrasónico se adapta muy bien a materiales homogéneos en los cuales es fácil determinar la trayectoria y el frente de onda. En estos materiales, como el acero, el frente de onda es nítido y luego bien detectado por el transductor receptor. Por consecuencia la eficacia de este método aplicado al hormigón depende de nuestra capacidad a evaluar el nivel de influencia de algunos factores como la presencia de armadura, o la humedad del hormigón. Una enumeración de los factores más importantes que influyen los resultados de los ensayos con ultrasonidos se desarrolla a continuación

#### **2.4.2.1 Compuestos del hormigón.**

El hormigón es un material compuesto de cemento áridos y agua, y por eso es heterogéneo. El tiempo de recorrido es entonces la suma de los tiempos de tránsito a través cada una de sus componentes, dándole una velocidad total del elemento. (Huete, Rubio, Rodríguez, 1993).

La velocidad del impulso, pues el inverso del tiempo de recorrido, se relaciona con las propiedades elásticas del material que se ensaya. Por consecuencia, el tiempo medido a través el hormigón será función de las propiedades y proporciones de los diferentes componentes del hormigón. Este fenómeno muestra la influencia de los diferentes componentes, teniendo cambios mínimos en la velocidad de impulso dependiendo del tipo de agregado, ya sea chanchado o rodado; e incluyéndose su origen geológico; y del tipo de cemento que se usa, teniendo en cuenta esto. Por lo cual se recomienda usar los mismos componentes para no tener en cuenta esta influencia.

Para tener la influencia de este valor, es necesario hacer una caracterización de muchos materiales del área local.

#### **2.4.2.2 Tipo y dimensiones del elemento que se ensaya**

La norma española UNE 83-308-86 especifica que la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos es independiente de la forma y tamaño de los elementos a ensayar.

Pero se pueden observar velocidades menores en elementos de dimensiones muy pequeñas, del tamaño menor a 10 cm.

#### **2.4.2.3 Temperatura del hormigón**

La temperatura del aire ambiente como la del hormigón propio no tiene una influencia en la velocidad de los impulsos ultrasónicos. La norma española UNE 83-308-86 especifica en su párrafo 7.3 que las variaciones de temperatura del hormigón entre 5°C y 40°C no producen cambios significativos en las velocidades. Fuera de este intervalo de temperaturas, los resultados obtenidos cambian mínimamente sin que necesariamente se hayan producido cambios paralelos en las propiedades del hormigón ensayado.

Efectos de congelamientos y descongelamientos sí que producen cambios en la velocidad, al producirse fisuraciones internas por culpa de este fenómeno.

#### **2.4.2.4 Estado tensional del hormigón.**

Es común aceptar que la velocidad del impulso ultrasónico sea modificada por el estado tensional de la probeta. Eso fue confirmado por J.H. Bungey en su trabajo publicado en el libro NDT International en diciembre 1980. Con un estado tensional mayor, aparece una disminución de la velocidad del impulso, dada a la aparición de microfisuras internas que influyen la longitud de recorrido. Por eso, aunque no produzcan tensiones muy altas, se debe tener en cuenta la influencia de las cargas de ejecución (almacén de barras de armadura, encofrados, máquinas pesadas) durante los ensayos in situ, sobre todo cuando se tratan de transmisión superficial. Estas cargas pueden generar una pequeña bajada de la velocidad.

#### **2.4.2.5 Edad del hormigón.**

De una manera general se asocia a velocidades altas de impulso ultrasónicos, alta calidad de hormigones, es decir alta resistencia. El hormigón es un material cuyas propiedades resistentes aumentan de una forma clara con la edad del dicho hormigón, por eso el método de los ultrasonidos permite detectar los cambios que se producen en un elemento de hormigón durante las primeras horas y días después de su fabricación, cuando el proceso de hidratación del cemento es más significativo y predominante. Sin embargo, a medida que se desarrolla este fenómeno, pequeñas variaciones de velocidades pueden significar diferencias importantes en la resistencia a compresión del hormigón. Por este motivo, la aplicación de este método para estimar la resistencia a compresión de hormigones de edades muy superiores a 28 días sigue siendo tangible. Con hormigones fabricados con cementó Portland, la velocidad del impulso ultrasónico aumenta de una manera muy lenta a partir de los 28 días, siguiendo la curva de endurecimiento del hormigón.

Para edades más jóvenes, es imprescindible establecer en laboratorio correlaciones fiables entre la velocidad del impulso ultrasónico y la resistencia a compresión del hormigón.

#### **2.4.2.6 Longitud de recorrido**

De una manera general, la velocidad de los impulsos ultrasónicos no es influida por la longitud de recorrido de la onda, a condición de que esta longitud no sea demasiado pequeña. Limitaciones físicas del aparato de medición pueden también introducir restricciones cuanto a longitudes de recorrido pequeñas (como ya se mencionó anteriormente, dimensiones menores a 10 cm, sufren alteraciones en la velocidad). La norma inglesa BS 1881 Parte 203 recomienda longitudes mínimas a 100 mm para hormigones con áridos máximos de 20 mm. Para superficies rugosas, se aconseja una longitud mínima de 100 mm para medidas directas, y de 400 mm para medidas indirectas. Existen limitaciones máximas para la longitud con respecto al tema de la energía de la onda. El valor de la velocidad del impulso ultrasónico disminuye al aumentar la longitud de recorrido, y por ejemplo se puede notar una disminución del 5% al incrementar la distancia de 3 m a 6 m. Eso es dado a la atenuación de los componentes de alta frecuencia de la onda (es decir de mayor energía), que genera un impulso menos bien definido.

#### **2.4.2.7 Contenido de humedad**

La velocidad de un impulso en un hormigón totalmente saturado puede ser el 5% mayor que la velocidad en el mismo hormigón en condiciones secas, aunque la diferencia es menor cuando el hormigón es de alta resistencia.

$$V_{humedad} = V_{seco} + 5\%$$

El efecto de la humedad, tanto en la velocidad del impulso como en la resistencia del hormigón, es uno de los factores que genera dificultades de calibración, puesto que la humedad claramente disminuye con la edad del hormigón. Un elemento húmedo presentara una velocidad de impulso más grande, pero una resistencia más pequeña que el mismo tipo de elemento seco.

Para la medición de datos en este proyecto de ingeniería civil, las vigas se encontraban secas.

#### **2.4.2.8 Acoplamiento superficie de ensayo**

Como ya ha sido dicho, es esencial asegurar un buen acoplamiento acústico entre los transductores y el hormigón ensayado para obtener una medición fiable. La norma

española UNE 83-308-86 especifica que la superficie de ensayo debe ser lo más lisa posible para facilitar este contacto. Por ello, se elegirán preferiblemente zonas que hayan sido encofradas. Si a pesar de todo, es preciso trabajar sobre superficies no encofradas o muy rugosas, como en el caso de losas, es conveniente realizar la medida sobre longitudes de recorrido mayores que las normalmente utilizadas, para disminuir la influencia del espesor de acoplamiento sobre recorrido total de la onda. El espesor de este material de acoplamiento será siempre la misma cualquier sea el material elegido, pero las propiedades acústicas, es decir la capacidad de este material a transmitir la onda ultrasónica será diferente. Por eso, es preferible utilizar el mismo acoplamiento a lo largo de las campañas experimentales, tan in situ como en laboratorio, para que la influencia del material de acoplamiento en la medición del tiempo de recorrido, sea constante. Cuando no es posible aumentar la longitud de medición, y si la superficie es excesivamente rugosa, deberá ser tratada con piedra abrasiva o relleno con un mínimo espesor de material adecuado (yeso, mortero de cemento, resina epoxi), hasta conseguir una superficie plana. (Tobio, 1967).

De la misma manera para asegurar un contacto pleno de los transductores con el elemento, se coloca un gel de contacto, que sirve para eliminar los posibles vacíos.

#### **2.4.2.9 Presencia de armadura**

La presencia de armadura puede influir las medidas de tiempo de recorrido del impulso ultrasónico, al saber que este impulso se propaga con una velocidad mayor en el acero que en el hormigón.

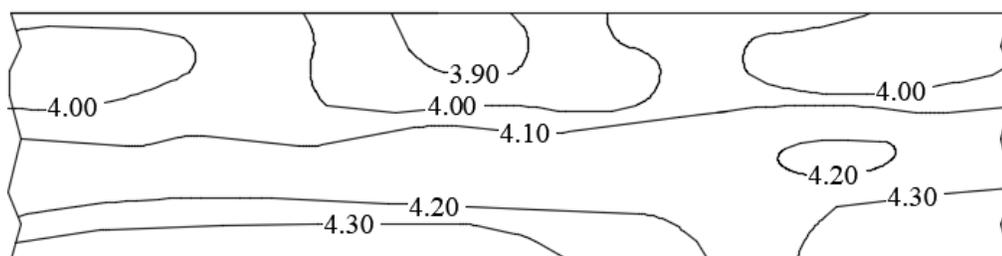
El estado microestructural a la interfase entre el acero y el hormigón influye el valor de la velocidad del impulso. Por eso la velocidad del impulso a través de un hormigón armado depende de la proximidad de las armaduras con respecto a las caras que se ensayan, del diámetro y del número de barras, y de la orientación de estas barras con relación a la dirección de propagación de la onda.

Se distinguen dos casos: Barras paralelas a la dirección de propagación, y barras transversales a esta dirección. (Huete, Rubio, Rodríguez, 1993).

### 2.4.3 Usos del ultrasonido como método de ensayo no destructivo

#### 2.4.3.1 Evaluación de la uniformidad y microfisuración del hormigón

Eso es seguramente la aplicación más fiable en el sector del hormigón. El análisis probabilístico de los resultados, asociado a la elaboración de curvas de nivel de velocidad de impulsos de un elemento estructural de hormigón, puede dar información relativa a la uniformidad del material y de la calidad de ejecución. Se debe por eso establecer una rejilla regular que define diferentes zonas del elemento a ensayar. El parámetro de esta rejilla depende del tamaño de este elemento, y puede variar desde 1 m para anchas losas hasta algunos centímetros para pequeñas vigas.



*Figura 2.12. Curvas de isovelocidad (km/s) en una viga de hormigón.*

La microfisuración empieza en el momento que el elemento es sometido a una fuerza externa y este aumenta al incrementarse dicha fuerza externa, teniendo un cambio notable de microfisuración cuando la fuerza externa esta entre los porcentajes comprendidos del 30% hasta el 60 % del total de la carga que resiste el elemento, siendo una manera óptima analizar el elemento al menos con 3 diferentes porcentajes de carga del total, para formar una curva de fisuración del elemento.

El uso del equipo del ultrasonido puede detectar la microfisuración del elemento, a través de la medición de su velocidad, observando que, si la velocidad va cambiando, esto notara que internamente están ocurriendo cambios, y a través de la observación, ver si ocurren fallas internas o posibles zonas débiles dentro del hormigón, para una oportuna intervención para el refuerzo o reparación del mismo; ya que las fisuras internas son tan importantes como las fisuras observables.

Posteriormente con la ayuda de las velocidades sacadas en puntos específicos de la viga, se podrá realizar un trazado de isoclinas de velocidad dentro del elemento de hormigón armado. Las cuales nos mostrarán como se va comportando la viga conforme va aumentando la carga.

La determinación de la uniformidad del hormigón y del hormigón armado es importante para la detección de microfisuras, fisuras, coqueas, etc. También para cualquier posible detección de algún problema en el hormigón o como uso preventivo o para la supervisión de puesta en obra.

#### **2.4.3.2 Estimación de la resistencia**

A menos de que pueda ser establecida una curva de calibración fiable, no se puede establecer con certeza un valor exacto de la resistencia de un elemento de hormigón in situ utilizando mediciones ultrasónicas, ya que estas pueden variar un  $\pm 20\%$ . Sin embargo, es posible obtener correlaciones fiables con ensayos de rotura a compresión a flexión en laboratorio, y así se determina la resistencia efectiva con una precisión de  $\pm 5\%$ .

J.H.Bungey y Millard sugieren en su libro que, con una calibración adecuada en laboratorio y con buenas condiciones de medición in situ, es posible llegar a una probabilidad de confianza igual a 95% en una estimación de la resistencia a  $\pm 5\%$ .

Aunque no sea perfecta esta estimación, puede en algunos casos ser la única aplicable in situ, y los resultados dependerán mucho de la atención llevada a las diferencias de condiciones de humedad durante la calibración en laboratorio y los ensayos in situ. Este método combinado con ensayos esclerométricos puede mejorarse, y llevar resultados fiables.

Sin embargo, varios trabajos se hicieron para obtener fórmulas que correlacionan la resistencia a compresión  $R$  con el módulo dinámico de Young  $E$ . Se puede notar las de L'Hermite, y la de Chefdeville

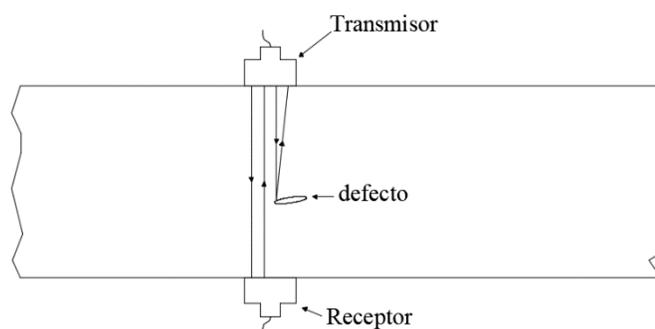
$$E = KR^{1/2}$$

$$E = K'R^{1/3}$$

Dónde:  $K$  y  $K'$  son constantes que dependen del tipo de hormigón que se ensaya.

### 2.4.3.3 Detección de coqueras

La detección de coqueras con el método ultrasónico no requiere correlaciones de la velocidad del impulso con ninguna de las propiedades del material. En efecto la existencia de tales defectos puede detectarse midiendo el tiempo de propagación de la onda cuando los transductores están colocados de tal forma que la trayectoria de la onda pasa por el defecto. El impulso no puede propagarse a través el aire, pues la presencia del defecto obliga la onda a rodearlo, eso aumentando la longitud de recorrido de la dicha onda en el material que se ensaya (cf. figura 3.9 sacada del libro de Barry Hull y John Vernon). Un tiempo de recorrido mayor que en el hormigón sano será registrado, y luego la velocidad estimada será menor. Como las ondas de compresión longitudinal se propagan a través el agua, este método será solo aplicable para coqueras secas y también si están llenas de agua. La velocidad del impulso a través una coquera llena de agua es menor que la velocidad a través la misma coquera seca. Como consecuencia se observará también una atenuación de la velocidad en las coqueras llenas de agua.



*Figura 2.13. Detección de una coquera mediante una medida directa*

La variación de la velocidad dada sólo a errores experimentales es al menos 2%, considerando un hormigón homogéneo, cuyas propiedades no varían. Por eso, el tamaño de la coquera debe generar una aumentación de la longitud de recorrido superior o igual al 2% de la longitud nominal; para detectar esta coquera. Así es más difícil detectar una coquera dada si la longitud de recorrido aumenta; pero el tamaño mínimo del defecto detectable es fijado por el diámetro del transductor usado. (Huete, Rubio, Rodríguez, 1993).

Además, se puede detectar coqueras si la velocidad de propagación de la onda en el hormigón sano es conocida, y si el hormigón alrededor de la cavidad tiene una densidad uniforme.

La figura se muestra los varios defectos que se pueden detectar y como se traduce el efecto del defecto sobre la señal eléctrica correspondiente al impulso ultrasónico.

#### **2.4.3.4 Estimación de la profundidad de fisuras superficiales**

Puede ser necesario obtener la profundidad de una grieta superficial, visible en un elemento de hormigón. Una estimación de la profundidad es obtenida utilizando una medida indirecta obteniendo el tiempo de propagación a través de la grieta para dos posiciones distintas de los transductores colocados en la superficie alterada.

La posición de los transductores respecto a la grieta se muestra en la figura sacada de la norma UNE 83-308-86; los dos palpadores son colocados a ambos lados de la grieta y equidistantes ( $x$ ) de ella. Es común utilizar como valores de  $x$  150 mm y 300 mm.

Este método supone que el plano de la grieta es perpendicular a la superficie y que el hormigón alrededor de la grieta es razonablemente homogéneo. Previamente debe realizarse una medida para asegurarse que la grieta cumple esta condición. El método a seguir será colocar los dos palpadores muy próximos a la grieta y mover alternativamente cada uno de ellos alejándolo de la grieta y repitiendo los tiempos de paso correspondientes a cada posición. Si se produce una disminución del tiempo medido, eso indicara que la grieta se inclina en la dirección en la que el transductor se mueve.

Si se conoce el tiempo de recorrido del impulso en el hormigón sano sin grietas, es posible hacer una sola medida eligiendo un valor de  $x$ .

Por último, una precisión de  $\pm 15\%$  es cumplida en general con este método.

#### **2.4.3.5 Estimación del espesor de una capa de hormigón de inferior calidad**

Si se sospecha la existencia de una capa superficial de hormigón de menor calidad debida a un proceso de fabricación, como consecuencia del acción del fuego, helada o ataque de

sulfatos, se puede estimar el espesor de esta, midiendo el tiempo de propagación de los impulsos ultrasónicos por el método de transmisión superficial.

Este análisis tiene por base el hecho que un impulso se propaga a una profundidad mayor si se aumenta la longitud de recorrido. Por eso este método se aplica muy bien al caso de losas. El proceso experimental se parece mucho al de la estimación de la profundidad de una grieta superficial; para distancias pequeñas entre los transductores, la onda solo se propaga en la capa superficial. A partir de una cierta distancia, el primer impulso pasa la capa superficial de menor calidad, y llega al hormigón de mejor calidad. La pendiente del gráfico velocidad – distancia entre palpadores cambia y queda constante a pesar de aumentar la distancia entre los transductores.

La distancia  $x_0$  en la que cambia la pendiente, junto con las velocidades medidas de impulsos en las dos capas de hormigón, hace posible estimar el espesor  $t$  de la capa superficial.

El método puede ser fiable si la capa de hormigón dañado tiene un espesor apreciablemente uniforme. Además, la profundidad de penetración de las medidas indirectas, y considerando la debilidad de la señal recibida, puede limitar esta aplicación.

#### **2.4.3.6 Estimación del módulo elástico**

El módulo elástico  $E$  es la propiedad que puede ser estimada con más precisión numérica. Los valores del módulo elástico se calculan de una manera teórica con una precisión de  $\pm 10\%$  utilizando un valor asumido del coeficiente de Poisson. La fiabilidad de la determinación de este parámetro es mejor con el método de transmisión directa porque no se hace una hipótesis suplementaria cuanto a la trayectoria y a su longitud. Es más común estimar el módulo dinámico elástico utilizando las expresiones que correlacionan este módulo con las diferentes frecuencias de resonancias de vigas.

Sin embargo, este último método supone medios experimentales adecuados y el establecimiento de un modelo efectivo de cálculo teórico. La aplicación de este método es limitada in situ, aunque permita estimar el módulo elástico estático para ensayos de cargamento.

#### **2.4.4 Uso del ultrasonido para detectar la fisuración**

Como se mencionó en el subtítulo de los usos del ultrasonido como ensayo no destructivo, se puede usar el equipo para la detección de la microfisuración, a través de la medición de su velocidad, observando que, si la velocidad va cambiando, esto notara que internamente están ocurriendo cambios.

Posteriormente con la ayuda de las velocidades sacadas en puntos específicos de la viga, se podrá realizar un trazado de isocurvas de velocidad dentro del elemento de hormigón armado. Las cuales nos mostraran como se va comportando la viga conforme va aumentando la carga.

El ultrasonido marcara diferentes velocidades dentro del material, las cuales irán variando conforme se vaya incrementando la carga, mostrando la microfisuración que sufre el elemento, siendo esta imperceptible a simple vista.

### **2.5 Calibración del equipo del ultrasonido**

#### **2.5.1 Comparación con la prensa universal**

Previamente a la aplicación del ultrasonido en la determinación de la microfisuración de las vigas; se realizó la calibración del mismo con ayuda de la prensa universal, calibrando la misma con de 21, 25 y 30 MPa. Trabajo que se realizó en conjunto con los tesisistas: Iriarte Alberto, y Romero Agustín. Trabajo que sirve de apoyo para los respectivos proyectos de ingeniería civil de los involucrados.

La calibración consistió en la realización de 12 probetas para cada uno de los días establecidos previamente para el armado de la curva de la resistencia a la compresión. Los días establecidos fueron: 3,5,7,10,14,21 y 28.

Este mismo proceso se repitió para las resistencias de 21, 25 y 30 MPa.

La calibración consiste en comparar las mediciones de la velocidad realizadas con el ultrasonido, para a continuación realizar la rotura de la probeta de la probeta cilíndrica (15 cm x 30 cm). Realizando una comparación de la velocidad dada con el valor de la resistencia dada por la prensa hidráulica.

El autor de este presente trabajo dejará los resultados obtenidos en una manual que será entregado al encargado del laboratorio de hormigones y resistencia de materiales.

El proceso para realizar las mediciones con el equipo del ultrasonido, tanto para la calibración de las probetas como para la evaluación del proceso de fisuración de las vigas, es similar, los mismos que son enunciados a continuación:

- Armar el equipo, procedimiento el cual se une los transductores al equipo del ultrasonido.
- Para todas las mediciones que se realicen se debe colocar un gel acuoso en los transductores, tanto en el emisor como en el receptor.
- Se debe calibrar el equipo con un material dado con el equipo, el cual se realiza solo al comienzo de las mediciones o después de un par de horas de uso del equipo.
- Se realizarán mediciones directas, manteniendo los transductores alineados.
- Realizadas las mediciones se anotan los valores dados, procedimiento de la misma forma con las demás mediciones.

Se tomará en cuenta ciertas recomendaciones sobre la medición de los datos, para el proceso del mismo se tiene que tener en cuenta lo siguiente:

- El emisor y el receptor tiene que estar en contacto total con la superficie a ensayar, evitando el contacto con el aire o el agua, que podrían perjudicar en la lecturación del equipo.
- Para evitar el punto anterior, se tiene que aplicar un gel acusoso (su función principal es evitar el contacto con el aire), este aparte de eliminar los vacíos, ayuda que el emisor y el receptor hagan un contacto total con la superficie, se recomienda usar generosamente el mismo.
- El emisor y el receptor tienen que hacer una lecturación directa, lo cual implica tener bien alineados los mismos entre sí.
- El elemento a hacer analizado tiene que estar en lo posible completamente seco, para evitar variaciones en los resultados.
- Se tiene que esperar a que se estabilice la señal, proceso en el cual no se deben mover ni el emisor ni el receptor.

- Tener en lo posible una superficie totalmente lisa, para cual se recomienda limar las asperezas con una piedra pómez, o similar.



*Figura 2.14. Equipo del ultrasonido*

## CAPÍTULO III.- MARCO PRÁCTICO

### 3.1 Cálculo de la armadura

Para el cálculo de la armadura tenemos los siguientes datos:

Datos:

$f_{ck}=21 \text{ Mpa}$

$H= 15 \text{ cm}$

$B= 15 \text{ cm}$

$F_{yk}= 500 \text{ Mpa}$

$\varnothing= 10 \text{ mm}$

$E_a= 210000 \text{ MPa}$

$E_h=15200\sqrt{f_{ck}}$

$$A_s f_{yd} \geq 0,25 \frac{W}{h} f_{cd}$$

$$W = \frac{I}{y}$$

$$y_{cg} = \frac{\sum y_i A_i}{\sum A_i}$$

$$n = \frac{E_a}{E_h}$$

Donde:

$$n = \frac{2100000 \text{ kg/cm}^2}{15200 \sqrt{210 \text{ kg/cm}^2}}$$

$$\mathbf{n = 9,534}$$

$$y_{cg} = \frac{\sum y_i A_i}{\sum A_i}$$

$$y_{cg} = \frac{(7,5 * 15 * 15) + 2 * 9,534 * \left(\frac{\pi * 1^2}{4}\right) * 2,5}{(15 * 15) + 2 * 9,534 * \left(\frac{\pi * 1^2}{4}\right)}$$

$$y_{cg} = 7,188 \text{ cm}$$

$$I_t = I_o + A * d^2$$

$$I_t = \left(\frac{15 * 15^3}{12} + 15 * 15 * (7.5 - 7.188)^2\right) + \left(\frac{\pi * 0.5^4}{4} + 2 * 9,534 * \left(\frac{\pi * 1^2}{4}\right) * (7.188 - 2.5)^2\right)$$

$$I_t = 4569,827 \text{ cm}^4$$

$$W = \frac{I}{y}$$

$$W = \frac{4569,827 \text{ cm}^4}{7,188 \text{ cm}}$$

$$W = 635,757 \text{ cm}^3$$

$$F_{cd} = \frac{21 \text{ MPa}}{1,5}$$

$$F_{cd} = 14 \text{ MPa}$$

$$F_{yd} = \frac{500 \text{ MPa}}{1,15}$$

$$F_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$A_s f_{yd} \geq 0,25 \frac{W}{h} f_{cd}$$

$$A_s \geq \frac{0,25 \frac{W}{h} f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s \geq \frac{0,25 * \frac{635,757 \text{ cm}^3}{15 \text{ cm}} * 14 \text{ MPa}}{434,78 \text{ MPa}}$$

$$A_{smin} = 0,341 \text{ cm}^2$$

Y el área de acero de Ø10 mm de 2 fierros es de:

$$A_{s\phi 10} = 2 * \left(\frac{\pi * 1^2}{4}\right)$$

$$\mathbf{A_{s\phi 10} = 1,57 \text{ cm}^2}$$

Por lo cual se cubre la armadura mínima requerida.

### 3.2 Momento de fisuración

La fórmula para el cálculo del momento de fisuración es la siguiente:

$$M_f = \frac{bh^2 f_{ctfl}}{6}$$

Donde:

$$f_{ctfl} = \left(1.6 - \frac{h}{1000}\right) f_{ctm}$$

$$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3}$$

Para 21 MPa:

$$f_{ctm} = 0.3 * 21^{2/3}$$

$$f_{ctm} = 2.28 \text{ Mpa}$$

$$f_{ctfl} = \left(1.6 - \frac{150}{1000}\right) 2.28$$

$$f_{ctfl} = 3.3 \text{ MPa}$$

$$M_f = \frac{0.15 * 0.15^2 * 3.3}{6}$$

$$\mathbf{M_f = 1.86 \text{ KN} * \text{m}}$$

$$\mathbf{Carga = 12.4 \text{ KN}}$$

Para 25 MPa:

$$f_{ctm} = 0.3 * 25^{2/3}$$

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ Mpa}$$

$$f_{ctfl} = \left(1.6 - \frac{150}{1000}\right) 2.56$$

$$f_{ctfl} = 3.71 \text{ MPa}$$

$$M_f = \frac{0.15 * 0.15^2 * 3.71}{6}$$

$$M_f = 2.09 \text{ KN} * m$$

$$\text{Carga} = 13.93 \text{ KN}$$

### 3.3 Determinación de la carga máxima

$$F = \frac{\sigma I}{dy}$$

Para 21 MPa y fierro de 10 mm

$$P = \frac{\sigma I}{dy}$$

$$P = \frac{210 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 4569.827 \text{ cm}^4}{15 \text{ cm} * 7.188 \text{ cm}}$$

$$P = 8900.61 \text{ kg}$$

$$P = 89 \text{ KN}$$

La determinación de la carga máxima de las respectivas vigas de 21 y 25 MPa con fierro de 10 y de 12 mm son dados en la siguiente tabla:

Tabla 3.1

#### Valores determinados para la carga

21 MPa	Porcentaje de carga (%)	0	20	40	60	80	100
10 mm	Valor de la carga (KN)	0	17,80	35,60	53,40	71,21	89,01
21 MPa	Porcentaje de carga (%)	0	20	40	60	80	100
12 mm	Valor de la carga (KN)	0	18,18	36,35	54,53	72,70	90,88
25 MPa	Porcentaje de carga (%)	0	20	40	60	80	100
10 mm	Valor de la carga (KN)	0	20,06	40,12	60,18	80,24	100,29
25 MPa	Porcentaje de carga (%)	0	20	40	60	80	100
12 mm	Valor de la carga (KN)	0	20,43	40,86	61,28	81,71	102,14

Los valores dados en la anterior tabla se procederán a un redondeo para un uso práctico para la prensa:

Tabla 3.2

**Valores optados para la carga**

21 MPa	Porcentaje de carga (%)	0	20	40	60	80
10 mm	Valor de la carga (KN)	0	18,00	36,00	54,00	72,00
21 MPa	Porcentaje de carga (%)	0	20	40	60	80
12 mm	Valor de la carga (KN)	0	18,00	36,00	54,00	72,00
25 MPa	Porcentaje de carga (%)	0	20	40	60	80
10 mm	Valor de la carga (KN)	0	20,00	40,00	60,00	80,00
25 MPa	Porcentaje de carga (%)	0	20	40	60	80
12 mm	Valor de la carga (KN)	0	20,00	40,00	60,00	80,00

A continuación, se muestran los puntos donde se realizaron las mediciones de todas las vigas analizadas para su posterior tabulación, los puntos interiores son en el tercio central de la luz de la viga.

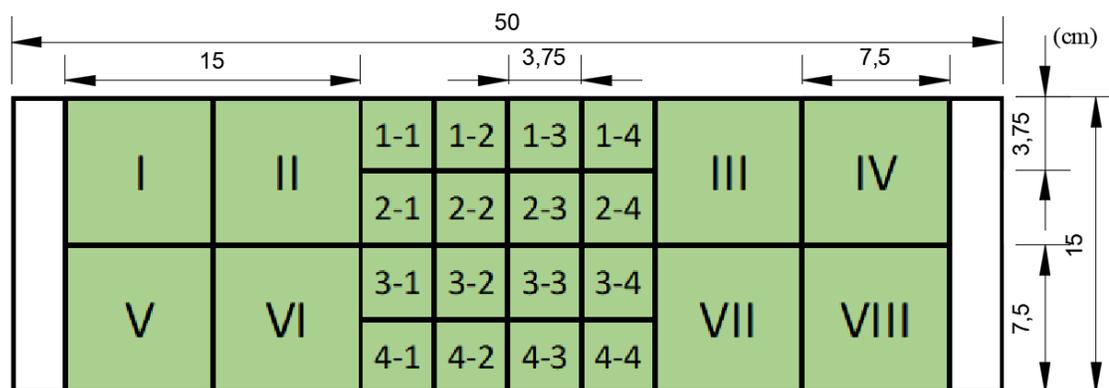
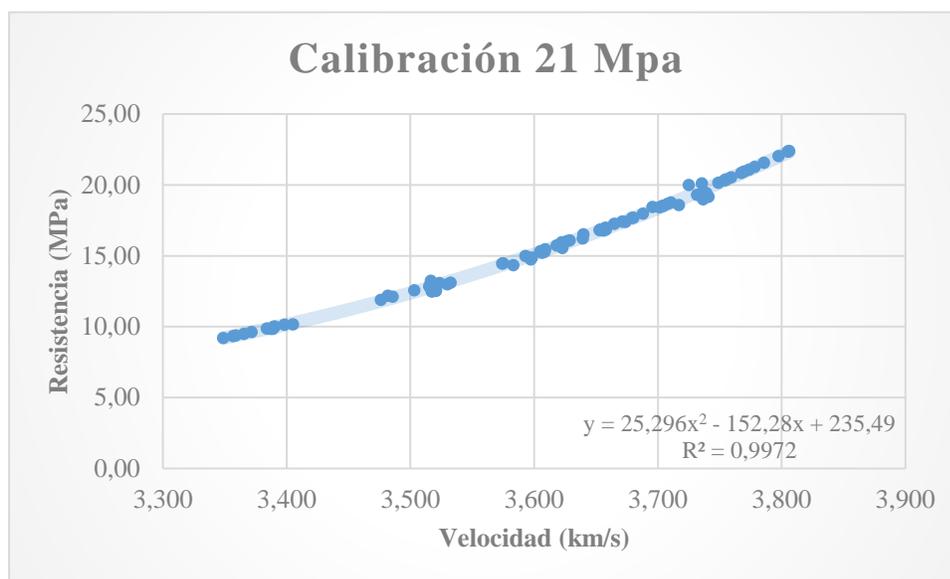


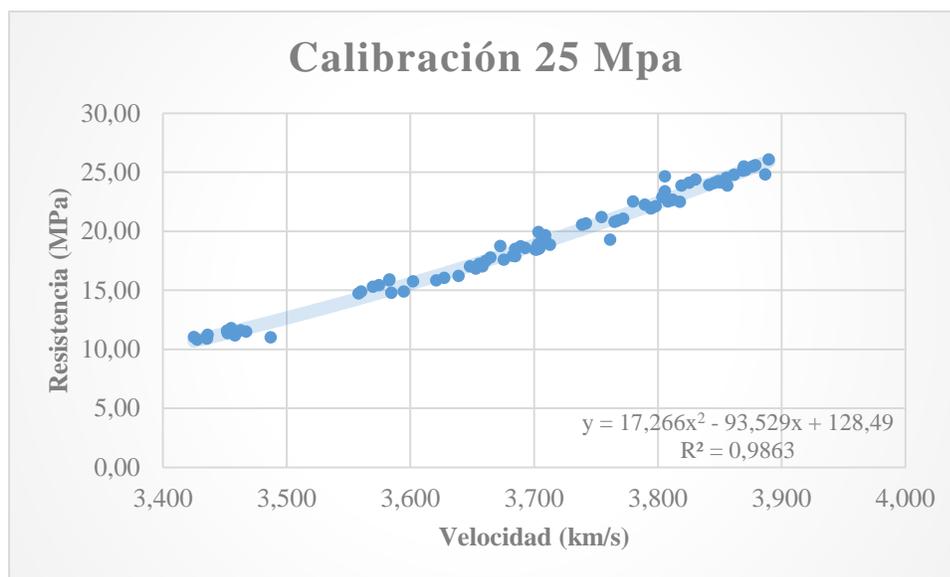
Figura 3.1. Puntos analizados (longitudinal), distancias en cm.

### 3.4 Calibración de equipo

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la calibración del equipo del ultrasonido para 21 y 25 MPa. Los datos obtenidos fueron tabulados en la sección de anexos. Los valores fueron obtenidos al calibrar probetas de 21 y 25 MPa, en los días 3,5,7,10,14,21,28 de elaboración de las probetas. Comparando los valores arrojados por la prensa hidráulica de la resistencia con la velocidad que da el ultrasonido en la probeta.



*Figura 3.2. Curva de calibración 21 MPa. Elaboración conjunta*



*Figura 3.3. Curva de calibración 25 MPa. Elaboración conjunta*

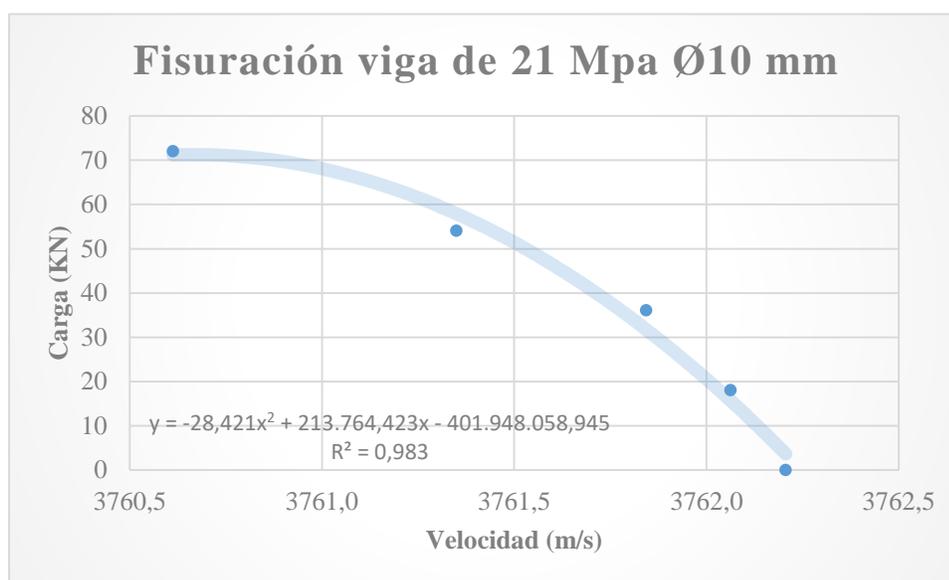
### 3.5 Análisis de resultados

#### 3.5.1 Análisis de fisuración en la viga

Tabla 3.3

*Microfisuración de la viga de 21 MPa con fierro de 10 mm*

Carga (KN)	0	18,03	36,12	54,05	72,06
Velocidad (m/s)	3762,2	3762,1	3761,8	3761,4	3760,6
Resistencia (MPa)	21,00	21,00	20,99	20,97	20,94



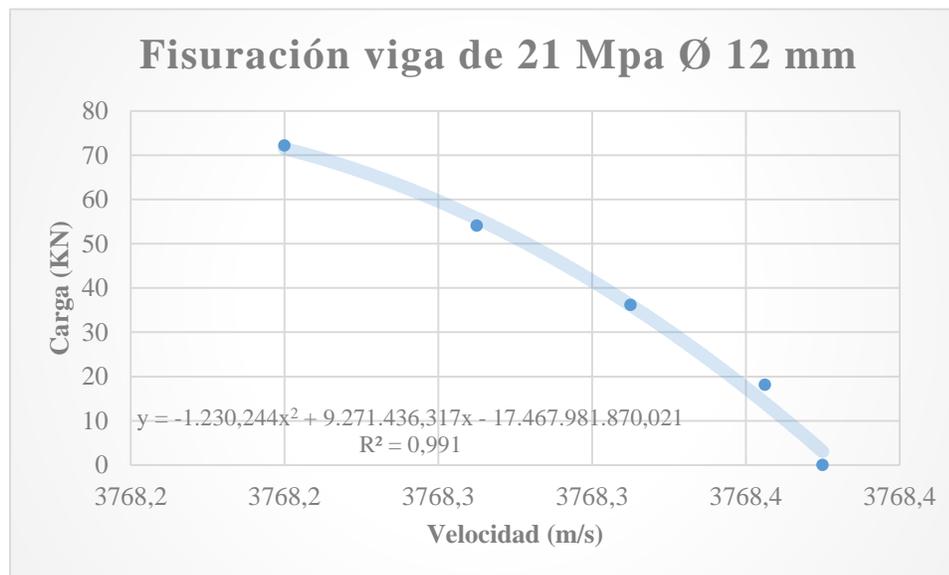
*Figura 3.4. Fisuración viga de 21 MPa Ø10 mm*

Los datos obtenidos de la tabla 3.3 y figura 3.4, corresponden a las vigas de 21 MPa con fierro de Ø10 mm, sacando el promedio de los datos de las 10 vigas echas, el promedio es sacado de los todos los puntos hechos en las mediciones, en función de la variación de la carga, que va incrementándose cada 18 KN. Se puede observar que el valor inicial con carga 0 KN, la resistencia ( $\sigma$ ) empieza con 21 MPa, disminuyendo el valor hasta 20,94 MPa. Existe un cambio significativo de caída de velocidad a partir del 40 % de la carga máxima resistente, es decir a partir de 36.12 KN.

Tabla 3.4

**Microfisuración de la viga de 21 MPa con fierro de 12 mm**

Carga (KN)	0	18,10	36,14	54,00	72,15
Velocidad (m/s)	3768,4	3768,4	3768,3	3768,3	3768,2
Resistencia (MPa)	21,23	21,23	21,22	21,22	21,22



*Figura 3.5. Fisuración viga de 21 MPa Ø12 mm*

Los datos obtenidos de la tabla 3.4 y figura 3.5, corresponden a las vigas de 21 MPa con fierro de Ø12 mm, sacando el promedio de los datos de las 10 vigas echas, el promedio es sacado de los todos los puntos hechos en las mediciones, en función de la variación de la carga, que va incrementándose cada 18 KN. Se puede observar que el valor inicial con carga 0 KN, la resistencia ( $\sigma$ ) empieza con 21,23 MPa, disminuyendo el valor hasta 21,22 MPa. Existe un cambio significativo de caída de velocidad a partir del 40 % de la carga máxima resistente, es decir a partir de 36.14 KN.

De la misma forma ya notamos una diferencia notable con el Ø10 mm, en general la viga de Ø12 mm tiene a fisurar menos que la de Ø10 mm, esto se debe al aumento del fierro dentro de la viga pasando de 10 mm a 12 mm.

Tabla 3.5

**Microfisuración de la viga de 25 MPa con fierro de 10 mm**

Carga (KN)	0	20,60	39,66	60,48	80,29
Velocidad (m/s)	3864,3	3863,9	3863,5	3863,1	3862,4
Resistencia (MPa)	24,90	24,88	24,86	24,85	24,82

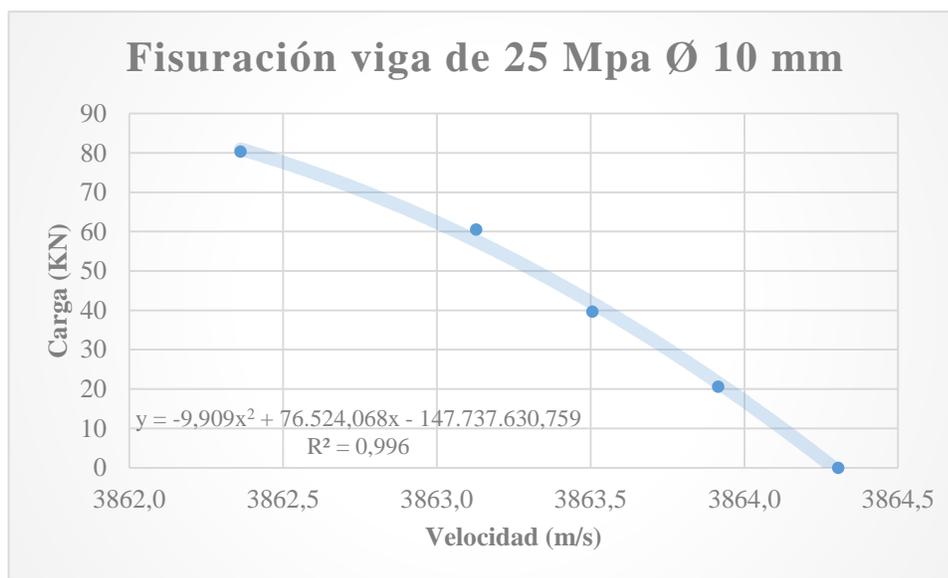


Figura 3.6. Fisuración viga de 25 MPa Ø10 mm

Los datos obtenidos de la tabla 3.5 y figura 3.6, corresponden a las vigas de 25 MPa con fierro de Ø10 mm, sacando el promedio de los datos de las 10 vigas echas, el promedio es sacado de los todos los puntos hechos en las mediciones, en función de la variación de la carga, que va incrementándose cada 20 KN. Se puede observar que el valor inicial con carga 0 KN, la resistencia ( $\sigma$ ) empieza con 24,90 MPa, disminuyendo el valor hasta 24,82 MPa. Los cambios de velocidad ocurren paulatinamente dentro del elemento.

Ya se puede observar semejanzas con la viga de 21 Mpa de Ø10 mm bajando sus valores de velocidad de forma similar, sin embargo, las vigas de 25 MPa lo hacen de una manera más paulatina.

Tabla 3.6

**Microfisuración de la viga de 25 MPa con fierro de 12 mm**

Carga (KN)	0	20,13	40,16	60,24	80,32
Velocidad (m/s)	3869,70	3869,69	3869,67	3869,66	3869,63
Resistencia (MPa)	25,112	25,111	25,111	25,110	25,109

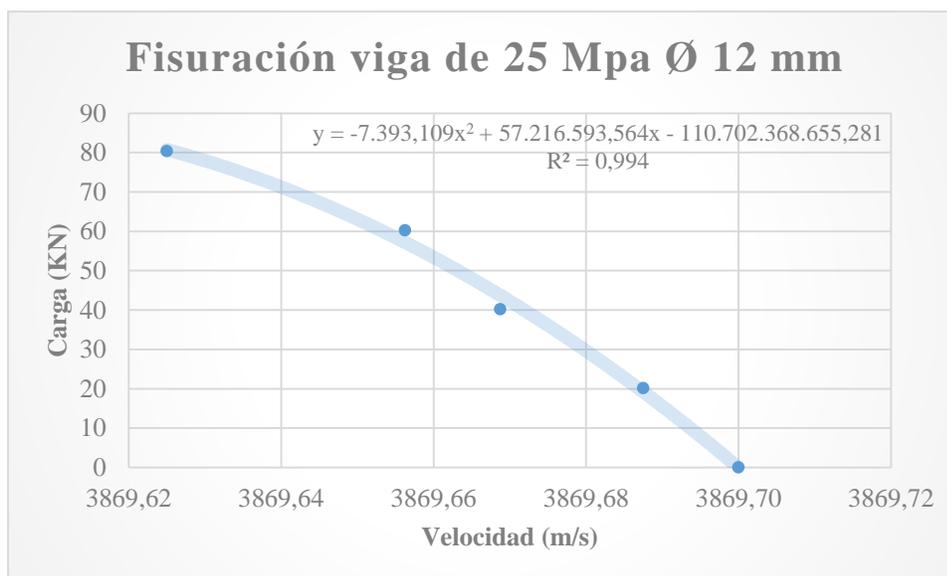


Figura 3.7. Fisuración viga de 25 MPa Ø12 mm

Los datos obtenidos de la tabla 3.6 y figura 3.7, corresponden a las vigas de 25 MPa con fierro de Ø12 mm, sacando el promedio de los datos de las 10 vigas echas, el promedio es sacado de los todos los puntos hechos en las mediciones, en función de la variación de la carga, que va incrementándose cada 20 KN. Se puede observar que el valor inicial con carga 0 KN, la resistencia ( $\sigma$ ) empieza con 25,112 MPa, disminuyendo el valor hasta 25,109 MPa. Existe un cambio significativo de caída de velocidad a partir del 40 % de la carga máxima resistente, es decir a partir de 40.16 KN.

De la misma forma ya notamos una diferencia notable con el Ø10 mm, en general la viga de Ø12 mm tiene a fisurar menos que la de Ø10 mm, esto se debe al aumento del fierro dentro de la viga pasando de 10 mm a 12 mm.

Estos datos son en manera general dentro de la viga, en el punto siguiente se detallará el proceso interno por el que pasan las vigas.

### 3.5.2 Análisis de fisuración en la parte de contacto de la armadura-hormigón

Tabla 3.7

*Microfisuración de la viga de 21 MPa con fierro de 10 mm en la parte de contacto de la armadura con el hormigón*

Carga (KN)	0	18,03	36,12	54,05	72,06
Velocidad (m/s)	3798,98	3797,23	3794,30	3790,05	3784,80
Resistencia (MPa)	22,36	22,30	22,19	22,03	21,83

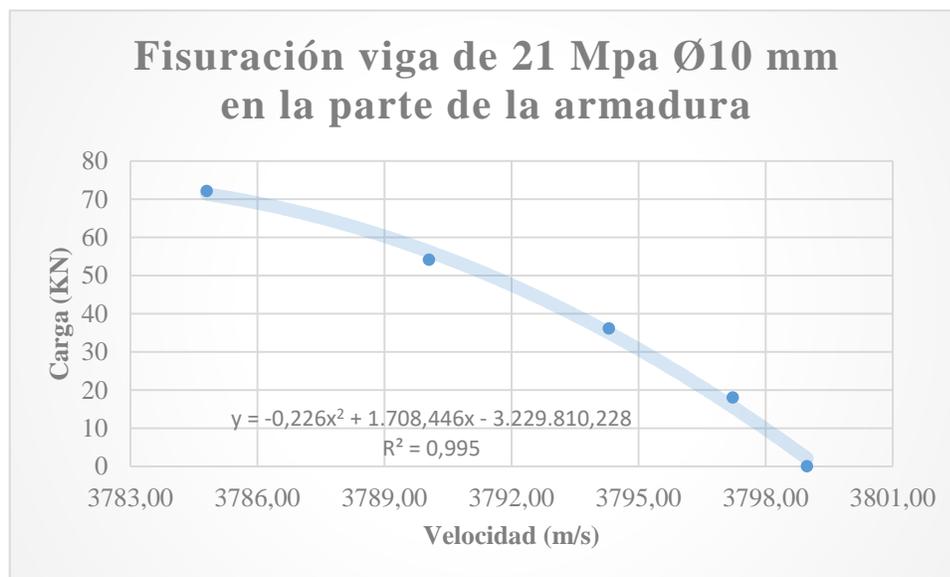


Figura 3.8. Fisuración viga de 21 MPa Ø10 mm en la parte de la armadura

Los valores obtenidos en la tabla 3.7 nos muestran los datos en la parte inferior de la viga, donde está la armadura, la figura 3.8 nos muestra la curva de fisuración interna que ocurre en la parte inferior de la viga en la parte de la armadura, el valor de la velocidad en esa zona, con el valor inicial de la carga de 0 KN es de 3798,98 m/s, lo que da una resistencia de 22,36 MPa; y este valor va descendiendo conforme aumenta la carga, al final con un valor de carga de 72,06 KN, la velocidad es de 3784,80 m/s, que da una resistencia de 21,83 MPa.

Tabla 3.8

**Microfisuración de la viga de 21 MPa con fierro de 12 mm en la parte de contacto de la armadura con el hormigón**

Carga (KN)	0	18,10	36,14	54,00	72,15
Velocidad (m/s)	3804,03	3802,88	3801,03	3798,85	3795,85
Resistencia (MPa)	22,55	22,51	22,44	22,36	22,24

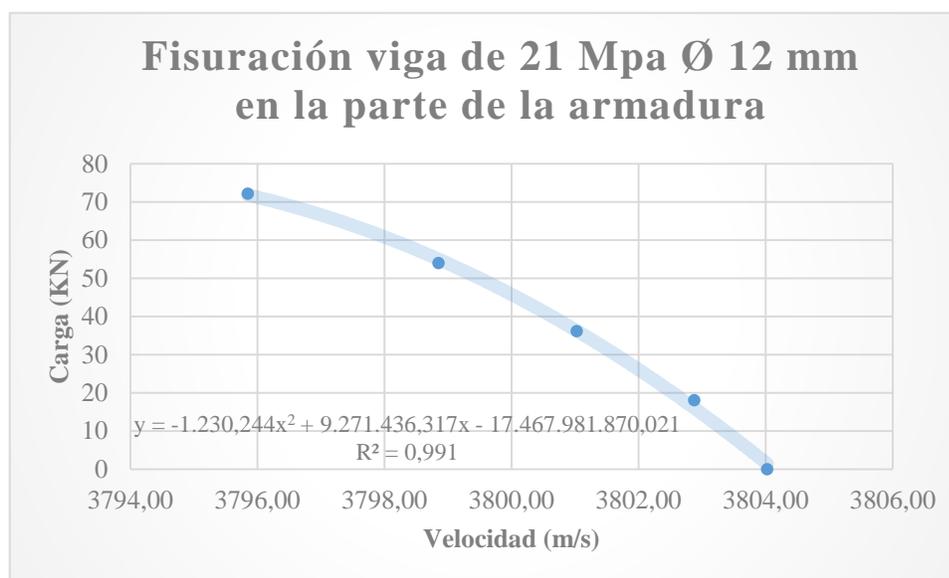


Figura 3.9. Fisuración viga de 21 MPa Ø12 mm en la parte de la armadura

Los valores obtenidos en la tabla 3.8 nos muestran los datos en la parte inferior de la viga de 21 MPa donde está la armadura de 12 mm, la figura 3.9 nos muestra la curva de fisuración interna que ocurre en la parte inferior de la viga en la parte de la armadura, el valor de la velocidad en esa zona, con el valor inicial de la carga de 0 KN es de 3804,03 m/s, lo que da una resistencia de 22,55 MPa; y este valor va descendiendo conforme aumenta la carga, al final con un valor de carga de 72,15 KN, la velocidad es de 3795,85 m/s, que da una resistencia de 22,24 MPa, se puede notar que la armadura de 12 mm contrarresto de mejor manera la bajada de resistencia de la viga.

Tabla 3.9

**Microfisuración de la viga de 25 MPa con fierro de 10 mm en la parte de contacto de la armadura con el hormigón**

Carga (KN)	0	20,60	39,66	60,48	80,29
Velocidad (m/s)	3882,63	3879,85	3876,53	3871,40	3865,95
Resistencia (MPa)	25,63	25,52	25,39	25,18	24,96

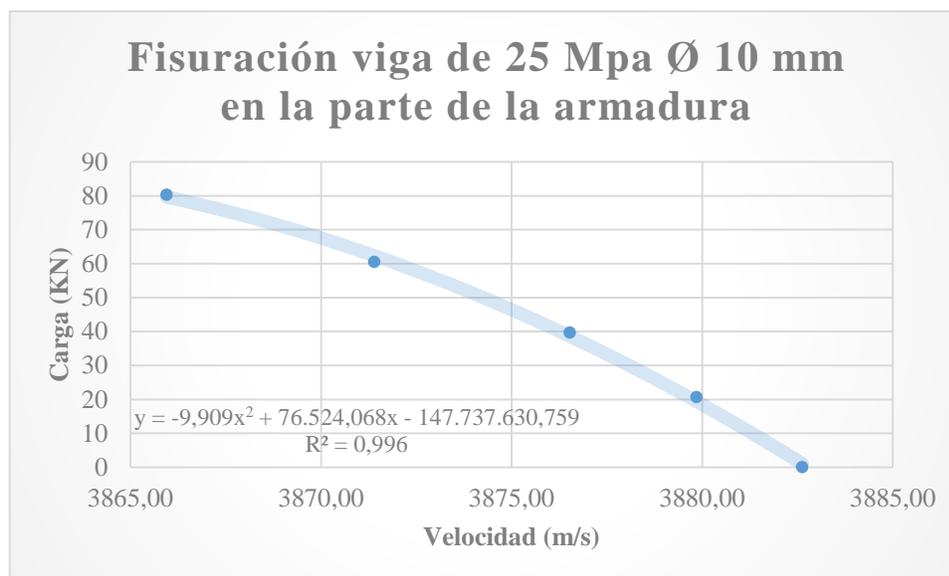


Figura 3.10. Fisuración viga de 25 MPa Ø10 mm en la parte de la armadura

Los valores obtenidos en la tabla 3.9 nos muestran los datos en la parte inferior de la viga de 25 MPa, donde está la armadura de 10 mm, la figura 3.10 nos muestra la curva de fisuración interna que ocurre en la parte inferior de la viga en la parte de la armadura, el valor de la velocidad en esa zona, con el valor inicial de la carga de 0 KN es de 3882.63 m/s, lo que da una resistencia de 25,63 MPa; y este valor va descendiendo conforme aumenta la carga, al final con un valor de carga de 80,29 KN, la velocidad es de 3865,95 m/s, que da una resistencia de 24,96 MPa.

Tabla 3.10

**Microfisuración de la viga de 25 MPa con fierro de 12 mm en la parte de contacto de la armadura con el hormigón**

Carga (KN)	0	20,13	40,16	60,24	80,32
Velocidad (m/s)	3883,35	3882,20	3880,50	3878,88	3876,20
Resistencia (MPa)	25,66	25,62	25,55	25,48	25,37

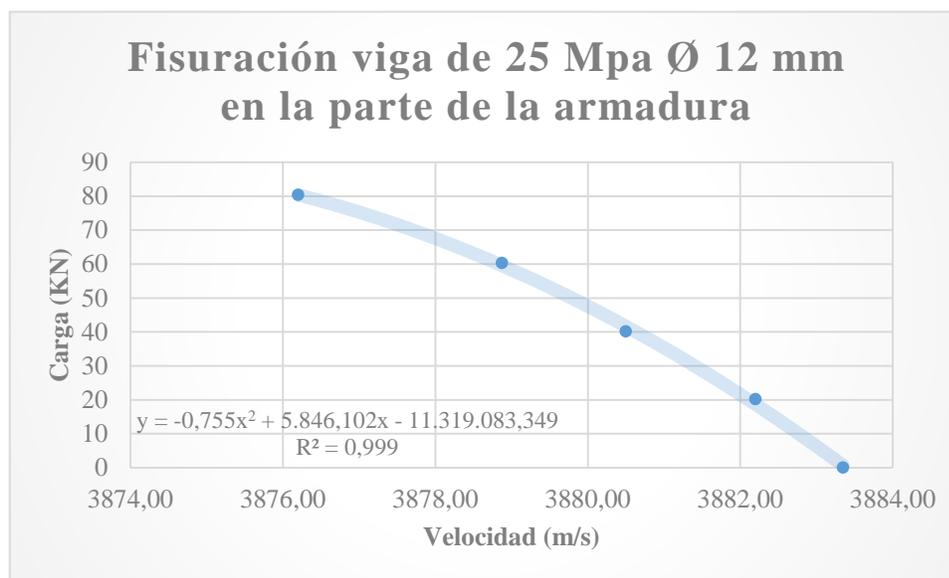


Figura 3.11. Fisuración viga de 25 MPa Ø10 mm en la parte de la armadura

Los valores obtenidos en la tabla 3.10 nos muestran los datos en la parte inferior de la viga donde está la armadura de 12 mm, la figura 3.11 nos muestra la curva de fisuración interna que ocurre en la parte inferior de la viga en la parte de la armadura, el valor de la velocidad en esa zona, con el valor inicial de la carga de 0 KN es de 3883,35 m/s, lo que da una resistencia de 25,66 MPa; y este valor va descendiendo conforme aumenta la carga, al final con un valor de carga de 80,30 KN, la velocidad es de 3876,20 m/s, que da una resistencia de 25,37 MPa, se puede notar que la armadura de 12 mm contrarresto de mejor manera la bajada de resistencia de la viga.

### 3.6 Mapa de fisuración

Se mostrará a continuación la progresión en la viga conforme se aumenta la carga empezando con la viga de 21 MPa con  $\varnothing 10$  mm, sacando el promedio de las 10 vigas realizadas.

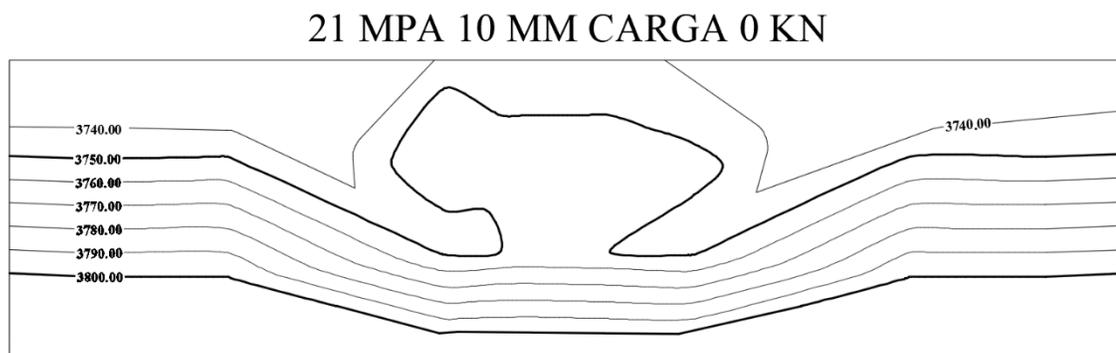


Figura 3.12. Isocronías en viga de 21 MPa  $\varnothing 10$  mm sin carga

Tabla 3.11

**Valores de 21 MPa 10 mm sin carga**

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3740	20,20
3750	20,56
3760	20,92
3770	21,29
3780	21,65
3790	22,03
3800	22,40

En la figura 3.12 se puede observar el estado inicial de la viga de 21 MPa con  $\varnothing 10$  mm, en la parte superior existen velocidades de 3740 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 20.20 MPa., de la misma forma en la parte inferior esta una velocidad de 3800 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 22,40 MPa, este valor tan elevado se debe a la presencia de armadura de 10 mm. Debido al carácter heterogéneo

del hormigón se observa al centro en la parte superior un bulbo de 3750 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 20.56 MPa. En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal predominan velocidades entre 3750 m/s a 3770 m/s (21,29 MPa). La resistencia es variable a lo largo del elemento, esto se debe al carácter heterogéneo del hormigón.

## 21 MPa 10 MM CARGA 18.03 KN

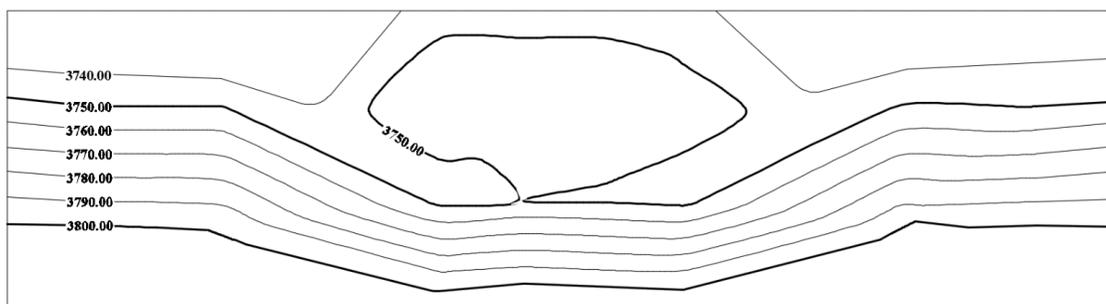


Figura 3.13. Isolineas en viga de 21 MPa Ø 10 mm primera carga

Tabla 3.12

**Valores de 21 Mpa 10 mm primera carga**

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3740	20,20
3750	20,56
3760	20,92
3770	21,29
3780	21,65
3790	22,03
3800	22,40

En la figura 3.13 se puede observar el inicio de la carga con un valor promedio de 18.03 KN en la viga de 21 MPa con Ø10 mm, en la parte superior ya se puede observar un aumento de la velocidad pasando esta de 3740 m/s (20.20 MPa.) a 3750 m/s (20.56 MPa), esto es debido a que estos valores están encima del eje neutro, por lo cual sus fibras pasan a comprimirse,

aumentando el valor de la velocidad y por ende su resistencia.

En la parte inferior se mantiene la velocidad de 3800 m/s (22,40 MPa), aunque la isocronía de velocidad ya empieza a sufrir variaciones, al no sufrir variación de la velocidad se debe deber al hecho de la presencia de la armadura, que empieza a trabajar en conjunto con el hormigón.

El bulbo que está en el centro en la parte superior, mantiene su valor 3750 m/s (20.56 MPa). Pero este empieza a cerrarse.

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal siguen predominando las velocidades entre 3750 m/s (20.56 MPa) a 3770 m/s (21,29 MPa). Pero con ligera variación en sus isocronías, aunque fuera del tercio central, no se notan cambios significativos.

### 21 MPA 10 MM CARGA 36.12 KN

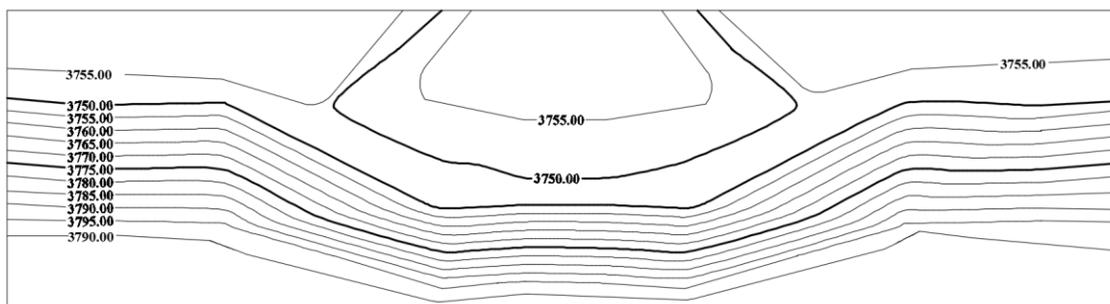


Figura 3.14. Isocronías en viga de 21 MPa Ø 10 mm segunda carga

Tabla 3.13

Valores de 21 Mpa 10 mm segunda carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3750	20,56
3755	20,74
3760	20,92
3765	21,10
3770	21,29
3775	21,47
3780	21,65
3785	21,84
3790	22,03

su resistencia.

En la parte inferior empieza a notarse una bajada de velocidad, pasando esta de 3800 m/s (22,40 MPa), a una velocidad de 3790 m/s -3785 m/s (22.03 MPa -21.84 MPa) mostrándose estos valores cada vez más abajo en el tercio central de la viga. Bajando levemente en los costados del tercio central respecto a la anterior carga.

El bulbo que está en el centro en la parte superior, mantiene su valor 3750 m/s (20.56 MPa). Pero este empieza a hacerse más grande y tiende a abrirse, mostrando un pequeño bulbo dentro con una velocidad de 3755 m/s (20.74 MPa).

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal siguen predominando las velocidades entre 3750 m/s (20.56 MPa) a 3770 m/s (21,29 MPa). Ya que estos están cercanos al eje neutro, pero las velocidades empiezan a distanciarse conforme se alejan del eje neutro.

En la figura 3.14 se puede observar el segundo valor de la carga; con un valor promedio de 36.12 KN en la viga de 21 MPa con Ø10 mm, en la parte superior siguen aumentando el valor de la velocidad pasando de 3750 m/s (20.56 MPa), a 3755 m/s (20.74 MPa), esto es debido a que estos valores están encima del eje neutro, por lo cual sus fibras pasan a comprimirse, aumentando el valor de la velocidad y por ende

## 21 MPa 10 MM CARGA 54.05 KN

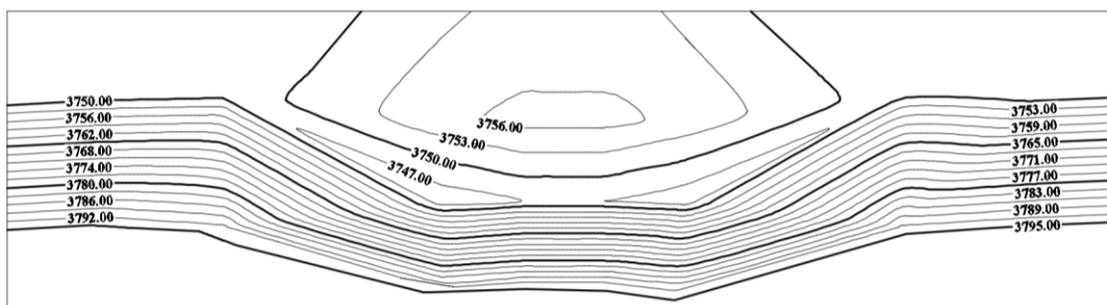


Figura 3.15. Isolineas en viga de 21 MPa Ø 10 mm tercera carga

Tabla 3.14

Valores de 21 Mpa 10 mm tercera carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3747	20,45
3750	20,56
3753	20,67
3756	20,78
3759	20,88
3762	20,99
3765	21,10
3768	21,21
3771	21,32
3774	21,43
3777	21,54
3780	21,65
3783	21,77
3786	21,88
3789	21,99
3792	22,10
3795	22,21

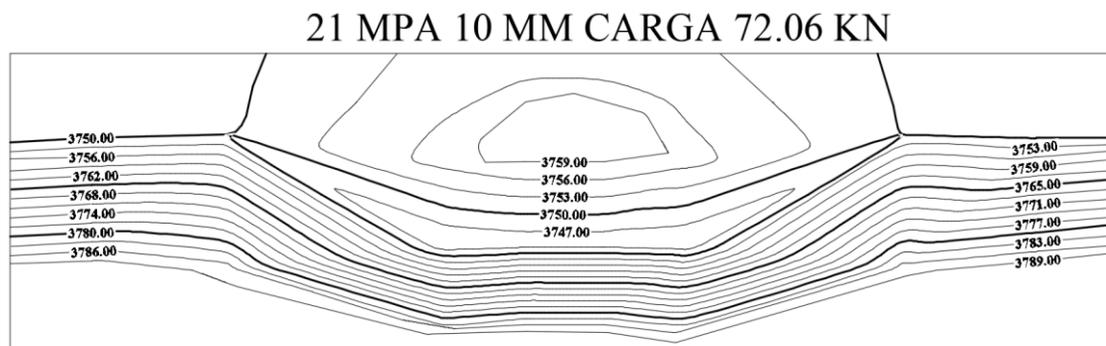
En la figura 3.15 se puede observar el tercer valor de la carga; con un valor promedio de 54.05 KN en la viga de 21 MPa con Ø10 mm, en la parte superior siguen aumentando el valor de la velocidad pasando de 3755 m/s (20.74 MPa), a 3756 m/s (20.78 MPa), Siendo todo esto más notable en el tercio central, aumentando ligeramente en los costados del tercio central.

En la parte inferior la atenuación de la velocidad es cada vez mayor en el tercio central, disminuyendo ligeramente en el costado del tercio central.

El bulbo que está en el centro en la parte superior, mantiene su valor 3750 m/s (20.56

MPa). Pero este empieza a hacerse más grande y tiende a abrirse, de la misma forma el bulbo de 3755 m/s (20.74 MPa) empieza abrirse hacia la parte superior; mostrando un pequeño bulbo dentro con una velocidad de 3756 m/s (20.78 MPa).

Los valores cercanos al eje neutro se mantienen constantes en los costados del tercio central y en el tercio central, respecto a la anterior carga, aunque cada vez aparece más isolneas debido al hecho de alejamiento de las velocidades tanto en la parte superior como inferior.



*Figura 3.16. Isolineas en viga de 21 MPa Ø 10 mm cuarta carga*

Tabla 3.15

**Valores de 21 Mpa 10 mm cuarta carga**

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3747	20,45
3750	20,56
3753	20,67
3756	20,78
3759	20,88
3762	20,99
3765	21,10
3768	21,21
3771	21,32
3774	21,43
3777	21,54
3780	21,65
3783	21,77
3786	21,88
3789	21,99

En la figura 3.16 se puede observar el cuarto y último valor usado de la carga; con un valor promedio de 72.06 KN en la viga de 21 MPa con Ø10 mm. En todo el proceso de aumento de la carga se puede evidenciar que la velocidad en la parte superior del eje neutro tiende a incrementarse, esto se debe que las fibras superiores empiezan a comprimirse, aumentando el valor de la velocidad.

Por el otro lado las velocidades en la parte inferior del eje neutro tienden a disminuir, esto se debe que las fibras inferiores empiezan a traccionarse, disminuyendo el valor de la

velocidad, mostrando el proceso de microfisuración interna que ocurre dentro de la viga.

Todas las consideraciones dichas en los anteriores valores de las cargas, siguen aumentándose, creándose más bulbos en la parte central superior del elemento, bajando la velocidad en la parte inferior del elemento e incrementándose en la parte superior

Los valores cercanos al eje neutro se mantienen constantes en los costados del tercio central y en el tercio central, respecto a la anterior carga, aunque cada vez aparece más isolneas debido al hecho de alejamiento de las velocidades tanto en la parte superior como inferior. Debido a que es flexión pura, el máximo momento ocurre en el tercio central de la viga, el mismo que puede ser observado en los mapas de fisuración.

## 21 MPa 12 MM CARGA 0 KN

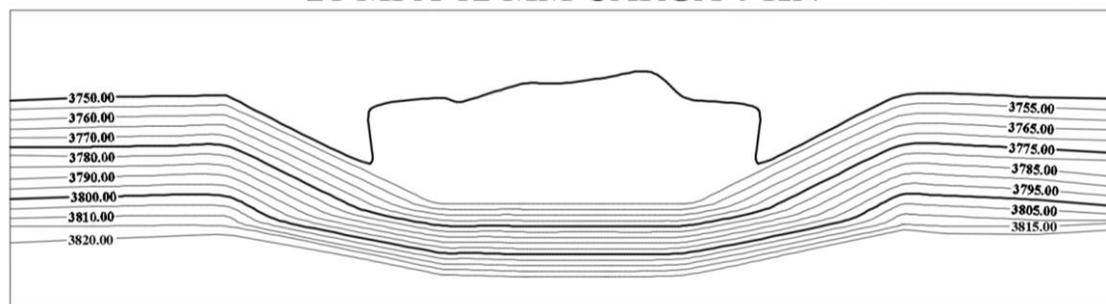


Figura 3.17. Isolineas en viga de 21 MPa Ø 12 mm sin carga

Tabla 3.16

**Valores de 21 MPa 12 mm sin carga**

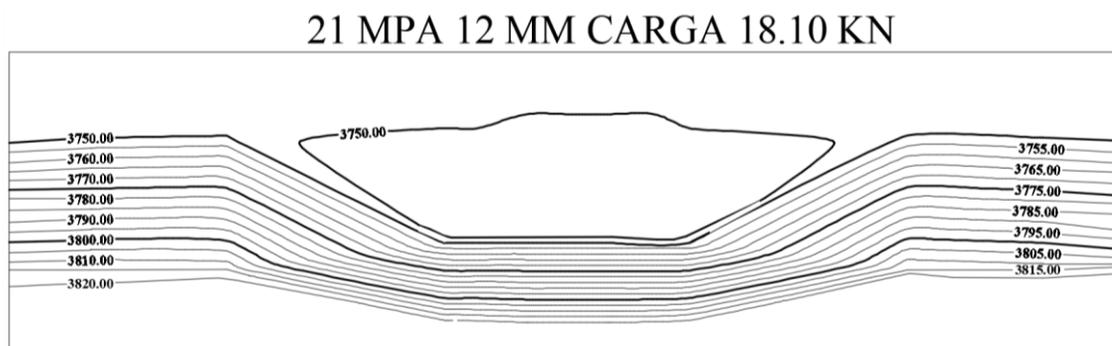
Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3750	20,56
3755	20,74
3760	20,92
3765	21,10
3770	21,29
3775	21,47
3780	21,65
3785	21,84
3790	22,03
3795	22,21
3800	22,40
3805	22,59
3810	22,78
3815	22,97
3820	23,16

En la figura 3.17 se puede observar el estado inicial de la viga de 21 MPa con Ø12 mm, en la parte superior existen velocidades de 3750 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 20.56 MPa., de la misma forma en la parte inferior esta una velocidad de 3815 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 22,97 MPa, este valor tan elevado se debe a la presencia de armadura de 12 mm. Debido al carácter heterogéneo del hormigón se observa al centro en la parte superior una velocidad de 3750 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 20.56 MPa. En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal predominan velocidades entre 3770 m/s (21.29 MPa) a 3780 m/s

(21,65 MPa).

La resistencia es variable a lo largo del elemento, esto se debe al carácter heterogéneo del hormigón.

El mapa de fisuración es muy parecido al de 21 MPa con Ø10 mm, aunque este no posee un bulbo en el centro de la viga.



*Figura 3.18. Isoclasas en viga de 21 MPa Ø 12 mm primera carga*

Tabla 3.17

**Valores de 21 Mpa 12 mm primera carga**

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3750	20,56
3755	20,74
3760	20,92
3765	21,10
3770	21,29
3775	21,47
3780	21,65
3785	21,84
3790	22,03
3795	22,21
3800	22,40
3805	22,59
3810	22,78
3815	22,97
3820	23,16

En la figura 3.18 se puede observar el inicio de la carga con un valor promedio de 18.10 KN en la viga de 21 MPa con Ø12 mm, en la parte superior se mantiene el valor de velocidad de 3750 m/s (20.56 MPa). Aunque las isoclasas de velocidad empiezan a incrementarse.

En la parte inferior se mantiene la velocidad de 3815 m/s (22,97 MPa), al no sufrir variación de la velocidad se debe deber al hecho de la presencia de la armadura, que empieza a trabajar en conjunto con el hormigón.

El único cambio notable en esta variación de la carga respecto al anterior es el incremento de la isoclasa de 3750 m/s presente en la parte superior central de la viga, haciéndose esta más grande y se expande a los costados.

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal siguen predominando las velocidades entre 3770 m/s (21.29 MPa) a 3780 m/s (21,65 MPa). Pero con ligera variación en sus isoclasas, aunque fuera del tercio central, no se notan cambios significativos.

### 21 MPA 12 MM CARGA 36.14 KN

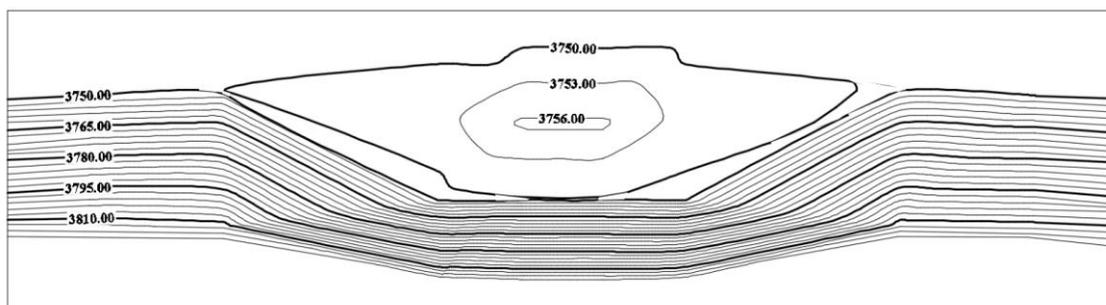


Figura 3.19. Isolineas en viga de 21 MPa Ø 12 mm segunda carga

Tabla 3.18

#### Valores de 21 Mpa 12 mm segunda carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3750	20,56
3753	20,67
3756	20,78
3759	20,88
3762	20,99
3765	21,10
3768	21,21
3771	21,32
3774	21,43
3777	21,54
3780	21,65
3783	21,77
3786	21,88
3789	21,99
3792	22,10
3795	22,21
3798	22,33
3801	22,44
3804	22,55
3807	22,67
3810	22,78
3813	22,89
3816	23,01
3819	23,12

En la figura 3.19 se puede observar el segundo valor de la carga; con un valor promedio de 36.14 KN en la viga de 21 MPa con Ø12 mm, en la parte superior recién empieza a incrementarse el valor de la velocidad pasando de 3750 m/s (20.56 MPa), a 3756 m/s (20.78 MPa), Pero este cambio solo es más notable en el tercio central de la viga, y no tanto así en los costados del tercio central.

En la parte inferior empieza a notarse una bajada de velocidad, pasando esta de 3815 m/s (22,97 MPa), a una velocidad de 3813 m/s - 3810 m/s (22.89 MPa - 22.78 MPa) mostrándose estos valores cada vez más abajo en el tercio central de la viga. Bajando levemente en los costados del tercio central respecto a la anterior carga.

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal siguen predominando las velocidades entre 3770 m/s (21.29 MPa) a 3780 m/s (21,65 MPa). Ya que estos están cercanos al eje neutro, pero las velocidades empiezan a distanciarse conforme se alejan del eje neutro.

### 21 MPa 12 MM CARGA 53.99 KN

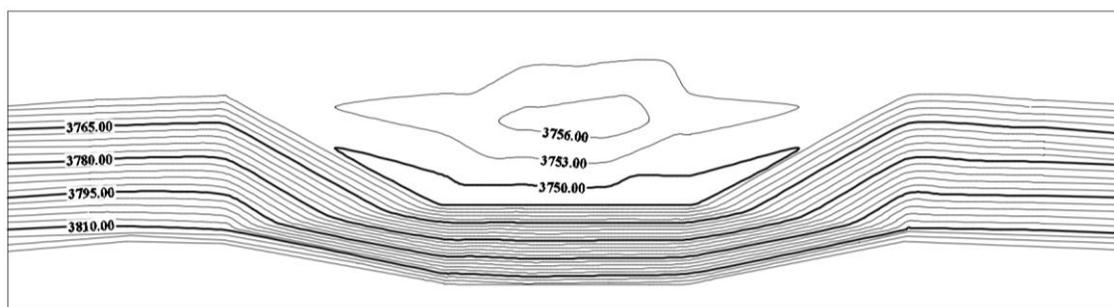


Figura 3.20. Isolineas en viga de 21 MPa Ø 12 mm tercera carga

Tabla 3.19

#### Valores de 21 Mpa 12 mm tercera carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3750	20,56
3753	20,67
3756	20,78
3759	20,88
3762	20,99
3765	21,10
3768	21,21
3771	21,32
3774	21,43
3777	21,54
3780	21,65
3783	21,77
3786	21,88
3789	21,99
3792	22,10
3795	22,21
3798	22,33
3801	22,44
3804	22,55
3807	22,67
3810	22,78
3813	22,89
3816	23,01
3819	23,12

En la figura 3.20 se puede observar el tercer valor de la carga; con un valor promedio de 54 KN en la viga de 21 MPa con Ø12 mm, en la parte superior se mantienen los valores de velocidad comprendidos entre 3750 m/s (20.56 MPa), a 3756 m/s (20.78 MPa). Pero estos empiezan a acentuarse más y más en el tercio central, empezando a concentrarse aún más en esa zona, aumentando ligeramente en los costados del tercio central.

En la parte inferior los valores de velocidad comprendidos entre 3813 m/s -3810 m/s (22.89 MPa -22.78 MPa) se mantienen, pero como ocurre en la parte superior, estos empiezan a acentuarse más en el tercio central, disminuyendo ligeramente en el costado del tercio central.

Los valores cercanos al eje neutro se mantienen constantes en los costados del tercio central y en

el tercio central, respecto a la anterior carga, aunque cada vez aparece más isolineas debido al hecho de alejamiento de las velocidades tanto en la parte superior como inferior.

## 21 MPA 12 MM CARGA 72.15 KN

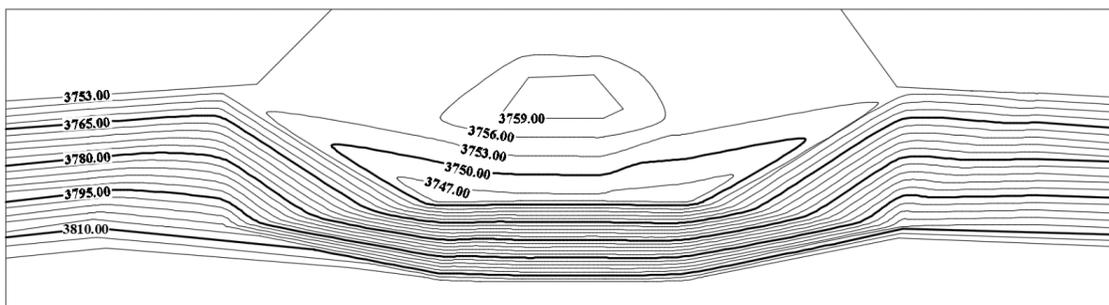


Figura 3.21. Isolineas en viga de 21 MPa Ø 12 mm cuarta carga

Tabla 3.20

### Valores de 21 Mpa 12 mm cuarta carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3747	20,45
3750	20,56
3753	20,67
3756	20,78
3759	20,88
3762	20,99
3765	21,10
3768	21,21
3771	21,32
3774	21,43
3777	21,54
3780	21,65
3783	21,77
3786	21,88
3789	21,99
3792	22,10
3795	22,21
3798	22,33
3801	22,44
3804	22,55
3807	22,67
3810	22,78
3813	22,89
3816	23,01

En la figura 3.21 se puede observar el cuarto y último valor usado de la carga; con un valor promedio de 72.15 KN en la viga de 21 MPa con Ø12 mm.

En todo el proceso de aumento de la carga se puede evidenciar que la velocidad en la parte superior del eje neutro tiende a incrementarse, esto se debe que las fibras superiores empiezan a comprimirse, aumentando el valor de la velocidad.

Por el otro lado las velocidades en la parte inferior del eje neutro tienden a disminuir, esto se debe que las fibras inferiores empiezan a traccionarse, disminuyendo el valor de la velocidad, mostrando el proceso de microfisuración interna que ocurre dentro de la viga.

Todas las consideraciones dichas en los anteriores valores de las cargas, siguen

aumentándose, creándose más bulbos en la parte central superior del elemento, bajando la velocidad en la parte inferior del elemento e incrementándose en la parte superior. Los valores cercanos al eje neutro se mantienen constantes en los costados del tercio central y

en el tercio central, respecto a la anterior carga, aunque cada vez aparece más isolinneas debido al hecho de alejamiento de las velocidades tanto en la parte superior como inferior.

Debido a que es flexión pura, el máximo momento ocurre en el tercio central de la viga, el mismo que puede ser observado en los mapas de fisuración.

Sin embargo, los aumentos/disminuciones de velocidad no son tan grandes como en las vigas de 21 MPa con  $\varnothing 10$  mm. Esto es debido al aumento de la armadura.

### 25 MPa 10 MM CARGA 0 KN



Figura 3.22. Isolinneas en viga de 25 MPa  $\varnothing 10$  mm sin carga

Tabla 3.21

#### Valores de 25 MPa 10 mm sin carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3852	24,41
3855	24,53
3858	24,65
3861	24,76
3864	24,88
3867	25,00
3870	25,12
3873	25,24
3876	25,37
3879	25,49
3882	25,61
3885	25,73

En la figura 3.22 se puede observar el estado inicial de la viga de 25 MPa con  $\varnothing 10$  mm, en la parte superior existen velocidades de 3855 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 24.53 MPa., de la misma forma en la parte inferior esta una velocidad de 3855 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 25,73 MPa, este valor tan elevado se debe a la presencia de armadura de 10 mm. Debido al carácter heterogéneo del hormigón se observa al centro en la parte superior una velocidad de 3858 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 24.65 MPa. En el centro de

la viga a lo largo de su parte longitudinal predominan velocidades entre 3861 m/s (24.76 MPa) a 3864 m/s (24.88 MPa).

La resistencia es variable a lo largo del elemento, esto se debe al carácter heterogéneo del hormigón.

El mapa de fisuración es más lineal, con variaciones de forma en la parte superior del elemento.

### 25 MPa 10 MM CARGA 20,60 KN

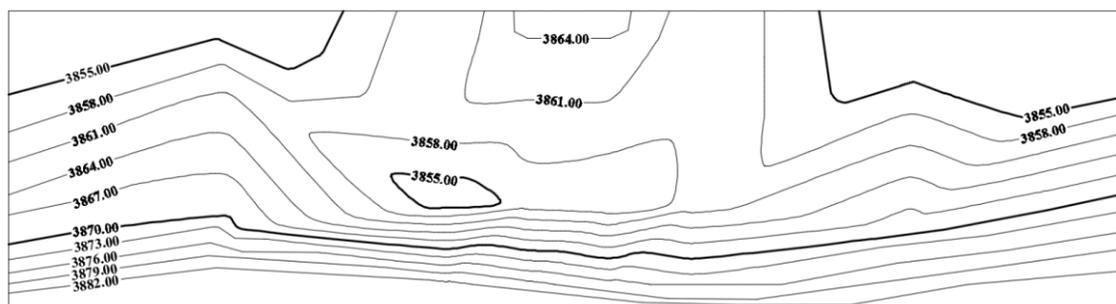


Figura 3.23. Isolineas en viga de 25 MPa Ø 10 mm primera carga

Tabla 3.22

Valores de 25 Mpa 10 mm primera carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3855	24,53
3858	24,65
3861	24,76
3864	24,88
3867	25,00
3870	25,12
3873	25,24
3876	25,37
3879	25,49
3882	25,61

En la figura 3.23 se puede observar el inicio de la carga con un valor promedio de 20.60 KN en la viga de 25 MPa con Ø10 mm, en la parte superior empiezan a incrementar las velocidades pasando de 3855 m/s (24.53 MPa), a valores de 3858 m/s – 3864 m/s (24.65 MPa-24.88 MPa.)

En la parte inferior la velocidad bajo de 3885 m/s (25.73 MPa), a 3882 m/s (25.61 MPa),

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal siguen predominando las velocidades entre 3861 m/s (24.76 MPa) a 3867 m/s (25 MPa).

En todos los casos se nota la variación de las isolineas a lo largo del elemento.

Una cosa relevante es la forma circular de velocidades que se va adoptando al centro del elemento.

### 25 MPA 10 MM CARGA 39.66 KN

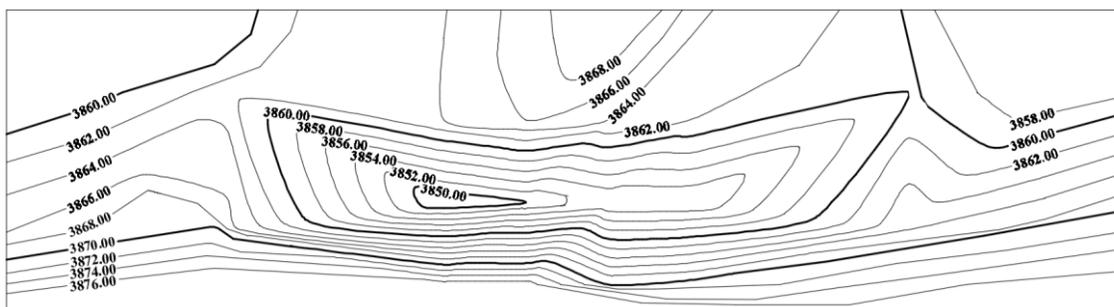


Figura 3.24. Isolineas en viga de 25 MPa Ø 10 mm segunda carga

Tabla 3.23

#### Valores de 25 Mpa 10 mm segunda carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3850	24,33
3852	24,41
3854	24,49
3856	24,57
3858	24,65
3860	24,72
3862	24,80
3864	24,88
3866	24,96
3868	25,04
3870	25,12
3872	25,20
3874	25,28
3876	25,37

En la figura 3.24 se puede observar el segundo valor de la carga; con un valor promedio de 39.66 KN en la viga de 25 MPa con Ø10 mm.

En la parte superior sigue incrementándose el valor de la velocidad obteniendo valores en los costados del tercio central con velocidades de 3862 m/s (24.80 MPa), Siendo aún más en el tercio central, con velocidades de hasta 3868 m/s (25.04 MPa)

En la parte inferior empieza a notarse una bajada de velocidad notable, pasando esta de 3882 m/s (25,61 MPa), a una velocidad de 3876

m/s -3874 m/s (25.37 MPa -25.28 MPa) mostrándose estos valores más acentuado cada vez más abajo en el tercio central de la viga. Bajando también en los costados del tercio central respecto a la anterior carga.

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal se empieza a acentuar cada vez más y más círculos concéntricos variando la velocidad desde 3850 m/s a 3862 m/s (24.33 MPa – 24,80 MPa.) Manteniéndose el valor de 3862 m/s cerca al eje neutro.

### 25 MPA 10 MM CARGA 60.48 KN

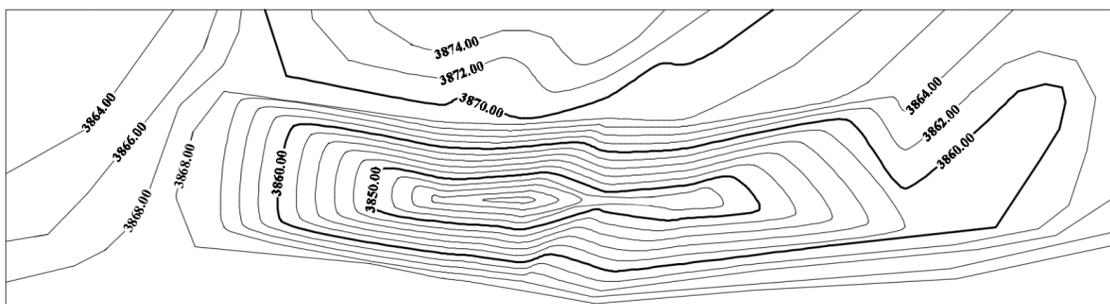


Figura 3.25. Isolneas en viga de 25 MPa Ø 10 mm tercera carga

Tabla 3.24

#### Valores de 25 Mpa 10 mm tercera carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3842	24,01
3844	24,09
3846	24,17
3848	24,25
3850	24,33
3852	24,41
3854	24,49
3856	24,57
3858	24,65
3860	24,72
3862	24,80
3864	24,88
3866	24,96
3868	25,04
3870	25,12
3872	25,20
3874	25,28

En la figura 3.25 se puede observar el tercer valor de la carga; con un valor promedio de 60.48 KN en la viga de 25 MPa con Ø10 mm.

En la parte superior sigue incrementándose el valor de la velocidad obteniendo valores en los costados del tercio central con velocidades de 3864 m/s (24.88 MPa), Siendo aún más en el tercio central, con velocidades de hasta 3874 m/s (25.28 MPa)

En la parte inferior empieza a notarse una bajada de velocidad notable, pasando esta de 3874 m/s (25,28 MPa), a una velocidad de 3868 m/s (25.04 MPa) mostrándose estos valores más acentuado cada vez más abajo en el tercio central

de la viga. Empezando a cerrarse en los costados.

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal se empieza a acentuar cada vez más y más círculos concéntricos variando la velocidad desde 3842 m/s a 3862 m/s (24.01 MPa – 24,80 MPa.) Manteniéndose el valor de 3860 m/s (24.72 MPa) cerca al eje neutro.

De una manera más acentuada que en las vigas de 21 MPa. La parte superior aumenta más mientras que la parte inferior baja más su valor de velocidad.

### 25 MPA 10 MM CARGA 80.29 KN

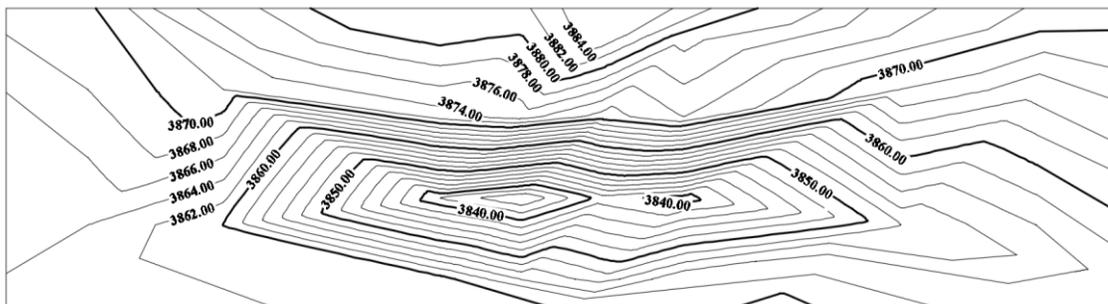


Figura 3.26. Isolineas en viga de 25 MPa  $\varnothing$  10 mm cuarta carga

Tabla 3.25

Valores de 25 Mpa 10 mm cuarta carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3836	23,78
3838	23,86
3840	23,94
3842	24,01
3844	24,09
3846	24,17
3848	24,25
3850	24,33
3852	24,41
3854	24,49
3856	24,57
3858	24,65
3860	24,72
3862	24,80
3864	24,88
3866	24,96
3868	25,04
3870	25,12
3872	25,20
3874	25,28
3876	25,37
3878	25,45
3880	25,53
3882	25,61
3884	25,69

En la figura 3.26 se puede observar el cuarto y último valor usado de la carga; con un valor promedio de 80.29 KN en la viga de 25 MPa con  $\varnothing$ 10 mm.

En todo el proceso de aumento de la carga se puede evidenciar que la velocidad en la parte superior del eje neutro tiende a incrementarse, esto se debe que las fibras superiores empiezan a comprimirse, aumentando el valor de la velocidad.

Por el otro lado las velocidades en la parte inferior del eje neutro tienden a disminuir, esto se debe que las fibras inferiores empiezan a traccionarse, disminuyendo el valor de la velocidad, mostrando el proceso de microfisuración interna que ocurre dentro de la viga.

Todas las consideraciones dichas en los anteriores valores de las cargas, siguen aumentándose. Los círculos concéntricos se hacen cada vez muchos más, especialmente en la zona del tercio central. Debido a que es flexión pura, el máximo momento ocurre en

el tercio central de la viga, el mismo que puede ser observado en los mapas de fisuración. Los valores son más acentuados que en las vigas de 21 MPa.

### 25 MPa 12 MM CARGA 0 KN

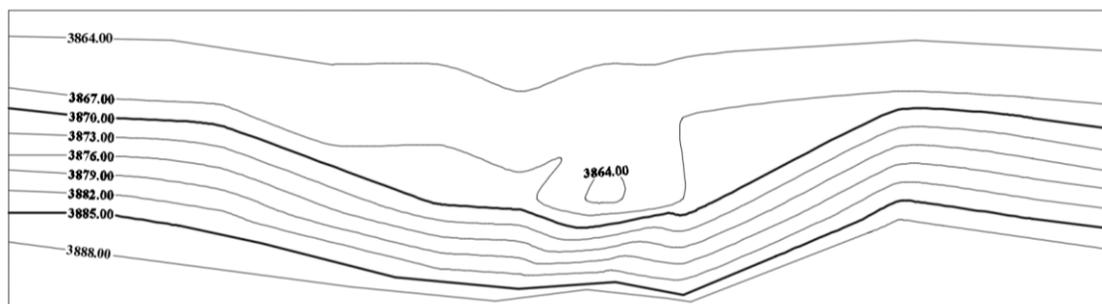


Figura 3.27. Isolinesas en viga de 25 MPa Ø 12 mm sin carga

Tabla 3.26

#### Valores de 25 MPa 12 mm sin carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3864	24,88
3867	25,00
3870	25,12
3873	25,24
3876	25,37
3879	25,49
3882	25,61
3885	25,73
3888	25,85

En la figura 3.27 se puede observar el estado inicial de la viga de 25 MPa con Ø12 mm, en la parte superior existen velocidades de 3864 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 24.88 MPa., de la misma forma en la parte inferior esta una velocidad de 3888 m/s, que daría una la resistencia ( $\sigma$ ) de 25,85 MPa, este valor tan elevado se debe a la presencia de armadura de 12 mm.

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal predominan velocidades entre 3876 m/s (25.37 MPa) a 3879 m/s (25.49 MPa).

La resistencia es variable a lo largo del elemento, esto se debe al carácter heterogéneo del hormigón.

El mapa de fisuración es más lineal, con variaciones de forma en la parte superior del elemento, y un pequeño círculo en el centro de la viga.

### 25 MPA 12 MM CARGA 20,13 KN

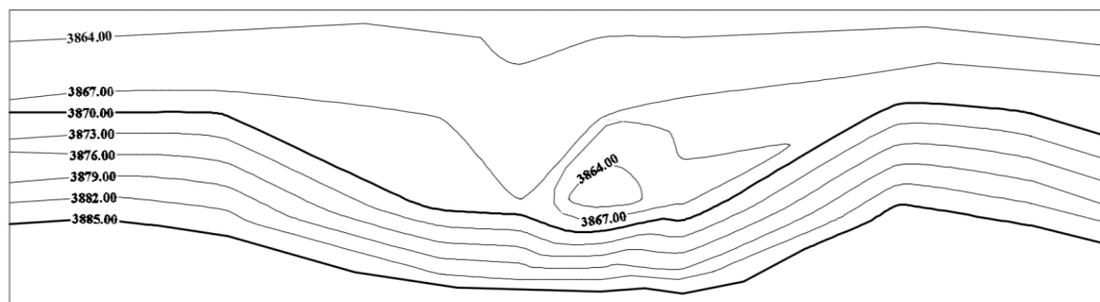


Figura 3.28. Isolineas en viga de 25 MPa Ø 12 mm primera carga

Tabla 3.27

#### Valores de 25 Mpa 12 mm primera carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3864	24,88
3867	25,00
3870	25,12
3873	25,24
3876	25,37
3879	25,49
3882	25,61
3885	25,73

En la figura 3.28 se puede observar el inicio de la carga con un valor promedio de 20.13 KN en la viga de 25 MPa con Ø12 mm.

En la parte superior la velocidad de 3864 m/s (24.88 MPa), empieza a ubicarse más arriba al igual que la velocidad de 3867 m/s (25 MPa)

En la parte inferior la velocidad bajo de 3888 m/s (25.85 MPa), a 3885 m/s (25.73 MPa),

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal siguen predominando las velocidades entre 3876 m/s (25.37 MPa) a 3879 m/s (25.49 MPa).

En todos los casos se nota la variación de las isolineas a lo largo del elemento.

El mapa de fisuración empieza a acentuarse en el tercio central de la viga, con variaciones de forma en la parte superior del elemento, y los círculos del centro aparecen más.

## 25 MPA 12 MM CARGA 40,16 KN

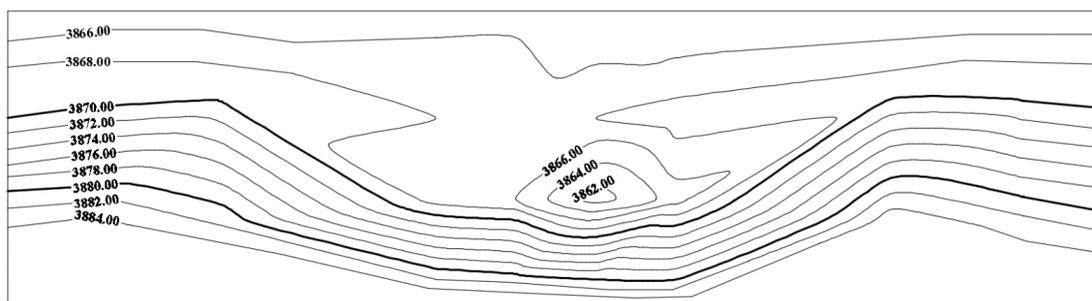


Figura 3.29. Isolineas en viga de 25 MPa Ø 12 mm segunda carga

Tabla 3.28

### Valores de 25 Mpa 12 mm segunda carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3862	24,80
3864	24,88
3866	24,96
3868	25,04
3870	25,12
3872	25,20
3874	25,28
3876	25,37
3878	25,45
3880	25,53
3882	25,61
3884	25,69

En la figura 3.29 se puede observar el segundo valor de la carga; con un valor promedio de 40.16 KN en la viga de 25 MPa con Ø12 mm.

En la parte superior sigue incrementándose el valor de la velocidad obteniendo valores con velocidades de 3866 m/s (24.96 MPa).

En la parte inferior la velocidad bajo de 3885 m/s (25.73 MPa), a 3884 m/s (25.69 MPa), mostrándose estos valores más acentuados cada vez más abajo en el tercio central de la viga. Bajando también en los costados del tercio

central respecto a la anterior carga.

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal siguen predominando las velocidades entre 3876 m/s (25.37 MPa) a 3879 m/s (25.49 MPa).

En todos los casos se nota la variación de las isolineas a lo largo del elemento.

El mapa de fisuración empieza a tomar forma, acentuándose en el tercio central de la viga, con variaciones de forma en la parte superior del elemento, y los círculos del centro aparecen más.

### 25 MPA 12 MM CARGA 60,24 KN

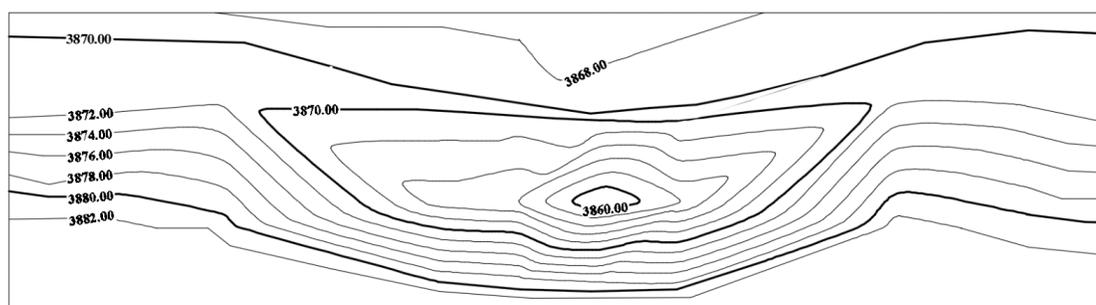


Figura 3.30. Isolineas en viga de 25 MPa Ø 12 mm tercera carga

Tabla 3.29

Valores de 25 Mpa 12 mm tercera carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3860	24,72
3862	24,80
3864	24,88
3866	24,96
3868	25,04
3870	25,12
3872	25,20
3874	25,28
3876	25,37
3878	25,45
3880	25,53
3882	25,61

En la figura 3.30 se puede observar el tercer valor de la carga; con un valor promedio de 60.24 KN en la viga de 25 MPa con Ø12 mm.

En la parte superior sigue incrementándose el valor de la velocidad obteniendo valores con velocidades de 3868 m/s (25.04 MPa).

En la parte inferior la velocidad bajo de 3884 m/s (25.69 MPa), a 3882 m/s (25.61 MPa), mostrándose estos valores más acentuados cada vez más abajo en el tercio central de la viga. Bajando también en los costados del tercio

central respecto a la anterior carga.

En el centro de la viga a lo largo de su parte longitudinal siguen predominando las velocidades entre 3876 m/s (25.37 MPa) a 3879 m/s (25.49 MPa).

Los círculos cada vez son más en el centro de la viga, variando entre 3860 m/s a 3868 m/s (24.72 MPa – 25.04 MPa).

### 25 MPA 12 MM CARGA 80,32 KN

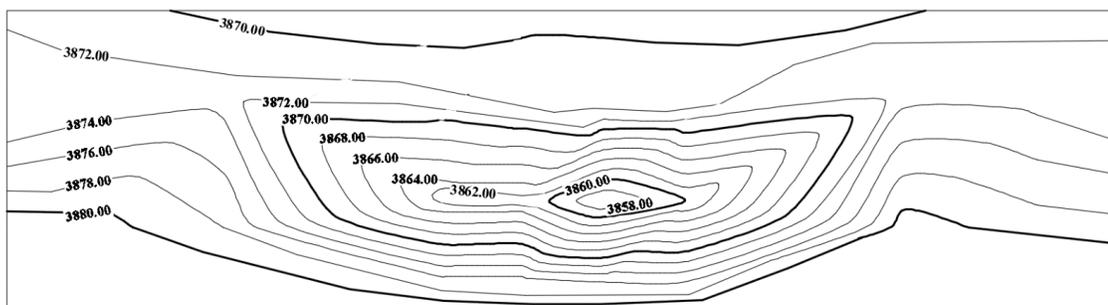


Figura 3.31. Isolneas en viga de 25 MPa Ø 12 mm cuarta carga

Tabla 3.30

#### Valores de 25 Mpa 12 mm cuarta carga

Velocidad (m/s)	Resistencia (MPa)
3858	24,65
3860	24,72
3862	24,80
3864	24,88
3866	24,96
3868	25,04
3870	25,12
3872	25,20
3874	25,28
3876	25,37
3878	25,45
3880	25,53

En la figura 3.31 se puede observar el cuarto y último valor usado de la carga; con un valor promedio de 80.32 KN en la viga de 25 MPa con Ø12 mm.

En todo el proceso de aumento de la carga se puede evidenciar que la velocidad en la parte superior del eje neutro tiende a incrementarse, esto se debe que las fibras superiores empiezan a comprimirse, aumentando el valor de la velocidad.

Por el otro lado las velocidades en la parte inferior del eje neutro tienden a disminuir, esto se debe que las fibras inferiores empiezan a traccionarse, disminuyendo el valor de la velocidad, mostrando el proceso de microfisuración interna que ocurre dentro de la viga. Todas las consideraciones dichas en los anteriores valores de las cargas, siguen aumentándose.

Los círculos siguen incrementándose en el centro de la viga, parecido a lo que ocurre en las vigas de 25 MPa con Ø10 mm, pero el proceso inicio más lento, esto se debió al aumento de la armadura. Debido a que es flexión pura, el máximo momento ocurre en el tercio central de la viga, el mismo que puede ser observado en los mapas de fisuración.

### **3.7 Contrastaciones**

#### **3.7.1 Contrastación de hipótesis**

Como se pudo comprobar una vez realizado este trabajo, la hipótesis planteado al inicio de este trabajo, contiene inexactitudes, la fisuración en vigas sometidas a flexión tiene mayor incidencia en el tercio central de la viga, abarcando mas zona que la dicha en la hipótesis; y las primeras fisuraciones en las vigas de 21 MPa no ocurren en el 40% de la carga máxima sino con un valor de 12,4 KN, aproximadamente un 13,78% de la carga máxima, y en las vigas de 25 MPa, las primeras fisuraciones no ocurren en el 60% de la carga máxima sino con un valor de 13,93 KN, aproximadamente un 13,93% de la carga máxima.

#### **3.7.2 Contrastación de los momentos aplicados y fisuración**

Una vez realizado los cálculos de los momentos de fisuración, los cuales nos dieron 1,86 KN\*m, para las vigas de 21 MPa y 2,09 KN\*m para las vigas de 25 MPa, los cuales llevados a carga nos dan 12,4 KN para las vigas de 21 MPa y 13,93 KN para las vigas de 25 MPa, son valores inferiores a los establecidos previamente a la realización de los ensayos, ya que el 20% de la carga da 18 KN para las vigas de 21 MPa y 20 KN para las vigas de 25 MPa, lo cual son valores superiores al de la carga de la fisuración, lo cual ya nos indica que la fisuración del elemento ya ocurrió anticipadamente.

## CONCLUSIONES

- Se pudo realizar la evaluación y determinación de la microfisuración que ocurre internamente dentro del elemento que trabaja a flexión pura, pudiendo evidenciar la microfisuración en toda la viga y ocurriendo la mayor microfisuración en la parte inferior de la viga, en el tercio central, en la zona de adherencia del hormigón con la armadura.
- Contrastando la hipótesis planteada al inicio de este trabajo con respecto a los resultados obtenidos, esta llega a ser inexacta, por un lado, se cumple que las primeras fisuraciones tienen mayor incidencia en el tercio central de la viga, pero los porcentajes de carga dados en la hipótesis, que fueron de 40 % para las de 21 MPa y 60 % para las de 25 MPa, resultaron ser mayores a los calculados, siendo los calculados igual a 13,78 % y 13,93% respectivamente.

Los primeros porcentajes de carga planteados resultaron ser elevados, sin embargo las fisuras exteriores se vuelven visibles recién cuando estos porcentajes de carga son aplicados, pero una vez realizado los cálculos del momento de fisuración y con ayuda del equipo del ultrasonido, se pudo comprobar que los valores son menores a los establecidos en la hipótesis, presentándose estas primeras fisuraciones de manera interna dentro de los elementos ensayados cercanos a los porcentajes de carga calculados con el momento de fisuración.

- Las fisuraciones ocurren el primer estado de carga, al 20% de la carga máxima, al sacar el momento de fisuración de las vigas de 21 y 25 Mpa y al ser llevadas a carga, nos dan valores de 12,4 KN y 13,93 KN respectivamente, y el 20% calculado es de 18 KN y 20 KN respectivamente, lo cual nos confirma que la viga ya está empezando a fisurarse; y tal como nos indica la parte teórica estas microfisuraciones ya ocurren en el momento de aplicarse una fuerza exterior, ocurriendo las mismas en todo el elemento, y con más relevancia en el tercio central de la viga, tomando un enfoque más grande en el 40% de la carga máxima, pudiendo evidenciar que a partir de este punto ocurre un cambio de tendencia importante de microfisuración dentro del elemento, corroborando con la parte

teórica que nos indica que la microfisuración toma más relevancia a partir de este porcentaje de carga.

- En las vigas de 21 MPa con el fierro de 10 mm, inicialmente en la parte inferior del tercio central, la resistencia es 22,40 MPa por la presencia de armadura y al aumentar la carga, la resistencia baja hasta 21,99 MPa; con el fierro de 12 mm, la parte inferior del tercio central, la resistencia es de 23,16 MPa, llegando a 23,01 MPa con el aumento de la carga; mientras que en la vigas de 25 MPa con el fierro de 10 mm, en su estado inicial en parte inferior del tercio central, la resistencia es de 25,73 MPa y baja hasta 24,80 MPa al aumentar la carga, en las vigas de 25 MPa con fierro de 12 mm, en su estado inicial, la parte inferior del tercio central, la resistencia es de 25,85 MPa, y al aumentar la carga, la resistencia baja a 25,53 MPa; lo que demuestra que el fierro de 12 mm ayuda más a contrarrestar la fisuración que el fierro de 10 mm.
- Se realizó una calibración satisfactoria del equipo del ultrasonido comparándola con la prensa hidráulica, comparando la velocidad que proporciona el ultrasonido con la resistencia mecánica dada por la prensa, para las curvas de 21 MPa y 25 MPa.
- Se calculó el valor máximo de carga que resiste el elemento a través de la fórmula  $\sigma = My/I$  y de la misma manera se calculó el momento de fisuración a flexión tanto para las vigas de 21 MPa y las 25 MPa.
- Tanto en las vigas de 21 y 25 MPa, usando fierro de 12 mm, se puede observar que valor de microfisuración es menor que el que se da en las mismas vigas con el fierro de 10, pudiendo esto darse al echo que la armadura de 12 mm ayuda más a resistir el momento flector, otorgándole más rigidez a los elementos en cuestión, también se puede apreciar que la viga de 21 MPa con fierro de 10 mm es la que sufre mucho más la microfisuración interna, esto debido a que es la viga con valores menores, tanto en el hormigón como en la armadura.
- Según se indica en la teoría y bibliografía, se puede evidenciar que la fibra superior al eje neutro, logra aumentar su valor de velocidad y por ende su resistencia; ya que esta trabaja a compresión, observando lo contrario en la fibra inferior ya que

baja el valor de la velocidad y por consiguiente su resistencia, ya que estas fibras trabajan a tracción.

- Se puede profundizar el estudio aplicando diferentes tipos de situaciones de carga a las vigas, de la misma manera aplicándolo en flexión simple.