



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

## **“Determinación de la correlación entre el ensayo de doble punzonamiento y de flexión de viga para hormigones reforzados con fibra”**

*Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil*

Autores:

Dennis Fernando Inga Bacuilima

CI: 0104830153

Celia Cristina Paredes León

CI: 0105336937

Director:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco. PhD.

CI: 0301500476

Cuenca - Ecuador

2019



## RESUMEN

Los ensayos empleados para caracterizar a los hormigones reforzados con fibras, HRF, son: ensayo de flexo tracción de vigas, ensayo de paneles EFNARC, ensayo de placa circulares y el ensayo de Barcelona de doble punzonamiento. En el presente trabajo, se muestra las correlaciones existentes entre el ensayo de flexo tracción de vigas (ASTM C1609) y el ensayo de doble punzonamiento (UNE 83515). Para ello se empleó material que se obtuvo en canteras aledañas a la ciudad.

Con el fin de encontrar una correlación entre ambos ensayos, se estableció una serie hipótesis de ensayo, planteadas por (Aire, Molins, Aguado, & Zárata, 2014), definiendo las variables que se evaluarán en cada ensayo. Estas variables son la tenacidad medida desde la carga máxima para el ensayo de doble punzonamiento y la absorción de energía para el ensayo de vigas.

En términos de tenacidad se obtuvo un coeficiente de variación promedio de 12% y 16% para el ensayo de flexo tracción en vigas para resistencias de 350 kg/cm<sup>2</sup> y 500 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. En cambio para el ensayo de doble punzonamiento, los coeficientes de variación promedio fueron de 6% y 14% para las resistencias antes mencionadas. Además, se encontraron buenas correlaciones existentes entre la tenacidad del ensayo de doble punzonamiento, y la tenacidad del ensayo a flexo tracción de vigas. Las correlaciones encontradas tienen un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> comprendido entre el rango de 0.899 a 0.998, por lo que se infiere que los ensayos están cumpliendo con las hipótesis planteadas.

**Palabras clave:** *Hormigón reforzado con fibras (HRF). Ensayo de flexo-tracción. Ensayo de doble punzonamiento (EDP).*



## ABSTRACT

The tests used to characterize the fiber reinforced concretes, HRF, are: beam tensile flexure test, EFNARC panel test, circular plate test and the Barcelona double punching test. In the present work, the existing correlations between the bending beam tensile test (ASTM C1609) and the double punching test (UNE 83515) are shown. For this propose, material that was found in quarries near the city was used.

In order to find a correlation between both trials, a series of test hypotheses was established, raised by (Aire, Molins, Aguado, & Zárata, 2014), defining the variables that will be evaluated in each trial. These variables are the tenacity measured from the maximum load for the double punching test and the energy absorption for the beam test.

In terms of tenacity, an average coefficient of variation of 12% and 16% was obtained for the flexo tensile test in beams for resistances of 350 kg/cm<sup>2</sup> and 500 kg/cm<sup>2</sup> correspondingly. In contrast, for the double punching test, the coefficients of average variation were 6% and 14% for the resistances mentioned above. In addition, good correlations were found between the tenacity of the double punching test, and the tenacity of the flexo tensile test of beams. The correlations found have a coefficient of determination R<sup>2</sup> comprised between a range of 0.899 to 0.998, so it is inferred that the tests are fulfilling the hypotheses proposed.

**Keywords:** *Concrete reinforced with fibers (HRF). Flexo-tensile test. Double punching test (EDP).*



## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
ÍNDICE DE TABLAS .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
AGRADECIMIENTO .....	12
DEDICATORIA .....	13
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 ANTECEDENTES .....	14
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	15
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	15
1.4 OBJETIVOS .....	16
1.4.1 Objetivo General.....	16
1.4.2 Objetivos Específicos.....	16
1.5 ALCANCE.....	16
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	18
2.1.1 Áridos.....	18
2.1.2 Cemento Hidráulico.....	22
2.1.3 Aditivos .....	22
2.1.4 Fibras de acero.....	22
2.2 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE HRF.....	23
2.2.1 Diseño de la mezcla por el método del ACI.....	24
2.2.2 Proceso empleado para la fabricación del HRF .....	29
2.2.3 Moldeo y curado de las muestras de HRF .....	29
2.3 ENSAYOS DE HRF .....	31
2.3.1 Ensayo para determinar la trabajabilidad .....	31
2.3.2 Ensayo de resistencia a flexo-tracción .....	32
2.3.3 Ensayo de doble punzonamiento, EDP.....	33
2.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión .....	36
2.3.5 Ensayo de módulo de elasticidad dinámico.....	36
2.4 ANÁLISIS COMPARATIVO .....	37
2.4.1 Ensayo de doble punzonamiento vs ensayo a flexo tracción de vigas.....	37
2.4.2 Análisis de Covarianza ANCOVA .....	41
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	42



3.1.1 Áridos.....	42
3.1.2 Cemento Hidráulico.....	44
3.1.3 Aditivos .....	45
3.1.4 Fibras de Acero .....	46
3.2.1 Diseño de la mezcla por el método del ACI.....	47
3.2.2 Proceso empleado para la fabricación del HRF .....	48
3.2.3 Moldeo y curado de las muestras de HRF .....	49
3.3 ENSAYOS DE HRF .....	51
3.3.1 Ensayo para determinar la trabajabilidad .....	51
3.3.2 Ensayo de resistencia a flexo-tracción .....	51
3.3.3 Ensayo de doble punzonamiento.....	53
3.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión .....	54
3.3.5 Ensayo de módulo de elasticidad dinámico.....	55
3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO .....	55
3.4.1 Ensayo de doble punzonamiento vs ensayo a flexo tracción de viga.....	55
3.4.2 Análisis de Covarianza, ANCOVA .....	56
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	57
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	57
4.1.1 Áridos.....	57
4.2 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE HRF.....	60
4.2.1 Diseño de la mezcla por el método del ACI.....	60
4.3 ENSAYOS DE HRF .....	61
4.3.1 Ensayo para determinar la trabajabilidad .....	61
4.3.2 Ensayo de resistencia a la flexión.....	62
4.3.3 Ensayo de doble punzonamiento.....	66
4.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión .....	70
4.3.5 Ensayo de módulo de elasticidad dinámico.....	71
4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO .....	72
4.4.1 Ensayo de doble punzonamiento vs ensayo a flexo tracción de vigas.....	72
4.4.2 Análisis de Covarianza, ANCOVA. ....	75
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	77
5.1 CONCLUSIONES .....	77
5.1.1 Diseño y fabricación de las mezclas de HRF. ....	77
5.1.2 Ensayo a flexo tracción en vigas. ....	77
5.1.3 Ensayo de doble punzonamiento en cilindros. ....	78
5.1.4 Análisis comparativo entre el ensayo de flexo tracción y el ensayo de doble punzonamiento. ....	79
5.2 RECOMENDACIONES.....	79



BIBLIOGRAFÍA.....	81
ANEXOS .....	84
ANEXO 1. TENACIDAD EN VIGAS. ....	84
ANEXO 2. RESISTENCIA A FLEXIÓN MÁXIMA. ....	85
ANEXO 3. TENACIDAD EN EDP. ....	86
ANEXO 4. RESISTENCIA MÁXIMA DE FISURACIÓN .....	87
ANEXO 5. GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS.....	88
ANEXO 6. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE. ....	88
ANEXO 7: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICA.....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Ecuaciones para determinar absorción y densidad de áridos y agregados. ....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2. Ecuaciones para determinar la masa unitaria. ....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 3. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos de agregados. ....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 5. Factores de seguridad para resistencia promedio requerida. ....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 6. Correspondencia entre relación A/C y la resistencia a la compresión. ....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 7. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 8. Método de compactación para diferentes asentamientos. ....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 9. Geometría de la varilla de compactación. ....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 10. Método de moldeo de especímenes cilíndricos. ....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 11 Método de moldeo de especímenes prismáticos. ....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 12. Requerimientos físicos del cemento .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 13. Características físicas y mecánicas de las fibras.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 14. Análisis Granulométrico árido fino.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 15. Análisis granulométrico agregado grueso. ....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 16. Densidad y absorción árido fino. ....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 17. Densidad y absorción agregado grueso.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 18.Masa unitaria árido fino.....</i>	<i>60</i>



Tabla 19. Masa unitaria agregado grueso.....	60
Tabla 20. Dosificación de HRF para $f'c$ de 350 kg/cm <sup>2</sup> .....	61
Tabla 21. Dosificación de HRF para $f'c$ de 500 kg/cm <sup>2</sup> .....	61
Tabla 22. Resultados de trabajabilidad de HRF.....	62
Tabla 23. Tenacidad en vigas ( $f'c$ 350 kg/cm <sup>2</sup> ) para los puntos de flecha de interés. ....	64
Tabla 24. Tenacidad en vigas ( $f'c$ 500 kg/cm <sup>2</sup> ) para los puntos de flecha de interés. ....	65
Tabla 25. Resistencia a flexión máxima.....	65
Tabla 26. Tenacidad en probetas ( $f'c$ 350 kg/cm <sup>2</sup> ) para los puntos de apertura de interés. ....	68
Tabla 27. Tenacidad en probetas ( $f'c$ 500 kg/cm <sup>2</sup> ) para los puntos de apertura de interés. ....	69
Tabla 28. Resistencia máxima de fisuración.....	69
Tabla 29. Densidad del hormigón. ....	70
Tabla 30. Resultados del ensayo a compresión simple. ....	71
Tabla 31. Resultados del ensayo de ultrasonido .....	72
Tabla 32. Resumen de los ajustes lineal y polinómico de la relación entre la tenacidad del ensayo a flexión y el EDP.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de ensayo a flexo tracción en vigas.....	32
Figura 2. Curva carga vs flecha típica esperada para el ensayo a flexo-tracción. ....	33
Figura 3. Esquema del ensayo de doble punzonamiento. ....	34
Figura 4. Modo de falla típico esperado en las probetas cilíndricas.....	34
Figura 5. Curva carga vs deformación circunferencial esperada para el EDP.....	36
Figura 6. Modo de rotura idealizado para el ensayo ASTM C1609.....	38
Figura 7. Modo de rotura asumido para el EDP.....	39
Figura 8. Cemento Holcim Fuerte.....	44
Figura 9. Aditivo Sika HE 200. ....	45
Figura 10. Fibras de acero DRAMIX. ....	46
Figura 11. Esquema de los especímenes elaborados. ....	47
Figura 12. Proceso de mezclado. ....	49
Figura 13. Especímenes cilíndricos elaborados.....	50



*Figura 14. Especímenes prismáticos elaborados. .... 50*

*Figura 15. Ensayo de trabajabilidad..... 51*

*Figura 16 Ensayo a flexión de vigas ..... 52*

*Figura 17. Extensómetro radial ..... 54*

*Figura 18. Ensayo de doble punzonamiento..... 54*

*Figura 19. Ensayo del ultrasonido..... 55*

*Figura 20. Granulometría árido fino. .... 57*

*Figura 21. Granulometría agregado grueso..... 58*

*Figura 22. Curvas fuerza y tenacidad vs flecha del ensayo a flexión de vigas. .... 63*

*Figura 23. Modo de fallas encontradas en el ensayo de doble punzonamiento..... 66*

*Figura 24 Curva fuerza y tenacidad vs desplazamiento circunferencial del EDP. .... 67*

*Figura 25. Relación entre la tenacidad del ensayo a flexión y el EDP. .... 74*

*Figura 26 Correlaciones..... 75*





Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

---

Yo, Dennis Fernando Inga Bacuilima en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación de la correlación entre el ensayo de doble punzonamiento y de flexión de viga para Hormigones reforzados con fibra", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 3 de abril de 2019

Dennis Fernando Inga Bacuilima

C.I: 0104830153



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo Dennis Fernando Inga Bacuilima, autor del trabajo de titulación "Determinación de la correlación entre el ensayo de doble punzonamiento y de flexión de viga para Hormigones reforzados con fibra", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 3 de abril de 2019

Dennis Fernando Inga Bacuilima

C.I: 0104830153



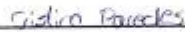
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo, Celia Cristina Paredes León en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación de la correlación entre el ensayo de doble punzonamiento y de flexión de viga para Hormigones reforzados con fibra", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 3 de abril de 2019



Celia Cristina Paredes León

C.I: 0105336937



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Celia Cristina Paredes León, autora del trabajo de titulación "Determinación de la correlación entre el ensayo de doble punzonamiento y de flexión de viga para Hormigones reforzados con fibra", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 3 de abril de 2019

Cristina Paredes

Celia Cristina Paredes León.

C.I: 0105336937



## AGRADECIMIENTO

Tras varios años de estudio, me he encontrado con personas que de alguna manera me han impulsado a concluir una etapa más en mi vida; las palabras quedan cortas para poder expresar gratitud.

De manera muy especial quiero agradecer a mi familia, por estar siempre presente, motivándome y enseñándome lo valioso de la vida.

También quiero agradecer a todos los docentes, que a lo largo de mi vida estudiantil me han compartido su conocimiento y experiencia; pero sobre todo al Ing. Daniel Mogrovejo, quien confió en nosotros y nos ayudó con esta investigación.

A Santiago, quien me acompañó a lo largo de toda mi vida universitaria, brindándome su apoyo y aliento.

A mis amigos, quienes constituyeron un pilar fundamental para la obtención de este gran logro, de quienes me llevo las mejores experiencias y recuerdos.

*Cristina*

A Dios, mi principal fuerza y aliento. A mi familia y amigos, quienes siempre me han apoyado. A mis maestros y profesores, quienes me han formado y ayudado.

*Dennis*



## DEDICATORIA

A Dios y a María Auxiliadora, por ser mi luz y guía en los momentos de oscuridad.

A mis padres, Eloy y Julia, porque gracias a todo su esfuerzo, dedicación, paciencia y amor me han guiado a ser la persona en la que me he convertido; siendo además mi mayor ejemplo de lucha y perseverancia.

A mi hermana, Pamela, por su cariño, su apoyo incondicional, pero sobre todo por su infinita alegría, que me contagia y me anima a seguir adelante.

A mi tía, Ana, por su sabiduría, cariño y sobre todo por su ayuda incondicional.

*Cristina*

A Dios, porque antes que me formare en el vientre, me eligió; antes que naciera, ya me había apartado; y había nombrado lo que hoy soy, y lo que mañana seré; por darme a los mejores padres, a la mejor hermana y hermanos, a la mejor compañera de vida y por supuesto, a mi familia y amigos quienes me apoyaron y creyeron en mí.

*Dennis*



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Los hormigones reforzados con fibras, HRF, se han empleado en los últimos años en pavimentos, recubrimientos de taludes y túneles, por las ventajas que este presenta frente al hormigón convencional. Las fibras le confieren al hormigón mejores propiedades referentes a ductilidad, tenacidad, control de fisuras, resistencia a flexo tracción y durabilidad (Aire, Molins, Aguado, & Zárate, 2014). Las fibras más empleadas son las de acero, pues poseen un módulo de elasticidad diez veces superior al del hormigón y además exhibe una buena adherencia a la pasta del hormigón (Fernández Cánovas, 1982)

Los ensayos empleados para caracterizar al HRF se basan en vigas en los que se prueba la resistencia a primera fisura y la resistencia máxima que soporta la viga después de la fisura, regulados bajo la normativa ASTM C1609, 2012: *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third Point Loading)*. Sin embargo existen otros procedimientos para caracterizar al HRF, como: ensayo de paneles EFNARC, ensayo de placa circulares y el ensayo de Barcelona de doble punzonamiento, EDP (Mármol Salazar, 2010). Para la elaboración del último ensayo mencionado, se requiere de elementos de HRF de menores dimensiones comparadas con los requeridos para los otros ensayos, lo que supone de una mayor facilidad de trabajo en laboratorio y ahorros en la economía al requerir menos material.

El ensayo de doble punzonamiento, determina la resistencia a tracción indirecta, la resistencia residual y la tenacidad del HRF (Figuroa Andrade, 2013). Se encuentra normado bajo la Aenor, UNE 83515, 2008: *Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual atracción. Método Barcelona*.



Investigaciones realizadas por (Aire, Molins, Aguado, & Zárata, 2014) han demostrado que el ensayo de doble punzonamiento es un método adecuado para determinar las propiedades del HRF comparandolo con el ensayo a flexión de vigas. La resistencia a tracción y tenacidad del EDP, tiene un coeficiente de variación inferior a 6%, y máxima de 17.8% respectivamente. Sin embargo, la variación de la resistencia a flexión y tenacidad obtenida del ensayo de vigas fueron considerablemente mayor, alcanzando casi 28 y 36%, respectivamente.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La falta de uniformidad en la distribución de las fibras en la masa de hormigón y el poco de control en la posición de las grietas en las vigas al momento de ensayarlas, constituyen las principales fuentes de variación al momento de caracterizar un HRF (Dupont, 2005). Además el volumen de material empleado en el ensayo de Barcelona es mucho menor al volumen de material empleado para el ensayo a flexo tracción, que refleja en el ahorro del tiempo de preparación y menor costo del ensayo, además de que permite usar testigos extraídos de estructuras ya existentes. Por lo que no es posible un adecuado control de calidad de los HRF (Bernard & Brühwiler, 2002).

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El interés en esta investigación radica en encontrar una correspondencia matemática, estadísticamente aceptable y valida entre el ensayo de flexo tracción de viga y el ensayo de doble punzonamiento, de acuerdo a las normas ASTM C1609 y UNE 83515 respectivamente, para que sea posible el empleo del EDP como alternativa técnica, económica y sostenible al ensayo de viga a flexotracción.





## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo General

Encontrar una correspondencia estadísticamente significativa y valida entre el ensayo de flexo tracción (ASTM C1609) y el ensayo de doble punzonamiento (UNE 83515).

### 1.4.2 Objetivos Específicos.

- Diseñar 12 diferentes mezclas de HRF fabricándolas, con dos diseños (diferente resistencia del hormigón) con tres diferentes tipos de fibra (diferente longitud) en diferentes porcentajes cada una.
- Realizar y ensayar probetas prismáticas para utilizarlas en los ensayos a flexión, de acuerdo con la norma ASTM C1609.
- Realizar y ensayar probetas cilíndricas de para utilizarlas en los ensayos de doble punzonamiento, de acuerdo con la norma UNE 83515.
- Determinar la tenacidad del HRF, medida como la absorción de energía (integral de la curva carga vs deformación), para el ensayo de flexión tracción.
- Determinar la tenacidad del HRF, medida como la carga máxima, para el EDP.
- Encontrar la correlación buscada entre estos dos ensayos y validarla de manera estadística.

## 1.5 ALCANCE

En el estudio que se plantea se elaboraron 12 mezclas de HRF, variando únicamente tres variables: a) La resistencia del hormigón ( $350 \text{ kg/cm}^2$  y  $500 \text{ kg/cm}^2$ ). b) El tipo de fibras a utilizar (DRAMIX 4D 60 mm, DRAMIX 3D 60 mm y DRAMIX 3D 35 mm). c) La cantidad de fibras por unidad de volumen de hormigón que se va a emplear ( $20 \text{ kg/m}^3$  y  $60 \text{ kg/m}^3$ ).



Las demás variables se mantendrán constantes para cada una de las dosificaciones. Por cada mezcla se elaboraron: tres vigas (15 cm de base, 15 cm de altura y 60 cm de largo) para el ensayo a flexo tracción y seis probetas cilíndricas: tres probetas (10 cm de diámetro y 20 cm de altura) para el ensayo a compresión simple y tres probetas (10 cm de diámetro y 10 cm de altura) para el ensayo de doble punzonamiento.

Se analizó la variación existente en los resultados obtenidos por el método del doble punzonamiento y el ensayo a flexión de vigas. Se buscó un factor o ecuación que relacione los valores de tenacidad del ensayo a flexión con su valor correspondiente de tenacidad del EDP, o viceversa. La comparación entre los dos ensayos se realiza gracias a las relaciones geométricas existentes entre el modo de rotura de cada uno de los ensayos, lo que proporciona un enfoque físico a esta correlación.



## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

#### 2.1.1 Áridos

Los áridos constituyen aproximadamente el 70% del Hormigón Reforzado con Fibras, HRF, por ello deben cumplir con todos los requerimientos especificados en las normativas: NTE INEN 874, 2012: *Áridos para hormigón. Requisitos* y NTE INEN 2874, 2015: *Hormigón reforzado con fibra. Requisitos y métodos de ensayo*.

La literatura sugiere que se empleen áridos finos rodados, con un porcentaje de absorción menor al 1%, pues con ellos se obtienen mezclas más dóciles; además, incorporar a la mezcla una mayor cantidad de finos a la pasta para disminuir la segregación (Moreno & Fernández, 1997). En lo referente al agregado grueso (Mármol Salazar, 2010) sugiere que este tenga como tamaño máximo de 10 mm ya que con esta gradación se garantiza la trabajabilidad del concreto especialmente en hormigones estructurales; en cambio, la sociedad de ingeniería civil del Japón recomienda que el valor óptimo de tamaño máximo sea inferior a la mitad de la longitud de la fibra. (ACI committee 544, 2008) Recomienda que el tamaño máximo del agregado grueso sea:

- 2/3 de la longitud máxima de la fibra.
- 1/5 del lado menor del elemento.
- 3/4 de la distancia libre entre las barras de armado.

##### 2.1.1.1 Granulometría

La granulometría indica la distribución de los tamaños de las partículas del árido. Para establecer la gradación del árido se emplea una serie de tamices, ordenados de manera



descendente, que retienen todas las partículas que sean más grandes al tamaño de sus aperturas y dejan pasar a las partículas más pequeñas. La normativa que rige a este ensayo es NTE INEN 696, 2011: *Áridos, análisis granulométrico en los áridos fino y grueso*.

El módulo de finura, parámetro necesario para el diseño del hormigón, es igual a la centésima parte de la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices: No. 100, No. 50, No. 30, No.16, No. 8 y No. 4; (Mamlouk & Zaniewski, 2009) recomiendan que el módulo de finura debe estar comprendido en el rango de 2.30 a 3.10 para hormigones convencionales.

La diferencia entre la masa empleada antes del ensayo y la masa después del ensayo debe tener un error menor al 0.5%; si existe una diferencia mayor, el ensayo debe ser desechado.

#### ***2.1.1.2 Absorción y Densidad relativa***

La absorción de un árido está definida como la humedad contenida en la condición saturada con superficie seca, SSS (Mamlouk & Zaniewski, 2009). La densidad relativa (gravedad específica) está definida como la masa de un material dividida entre la masa de un volumen igual de agua destilada y depende directamente de la roca original (Niño Hernandez, 2010).

Conocer el valor de absorción de los áridos resulta imperante al momento de determinar la cantidad de agua necesaria para la mezcla de hormigón, pues el agua captada por los poros del árido no aportará en la trabajabilidad del concreto en estado plástico y peor aún contribuirá para la hidratación del cemento. También resulta importante conocer la densidad de los áridos pues en el diseño de la mezcla serán la que no indique el volumen necesario de áridos. Las normativas que gobiernan este ensayo son: NTE INEN 856, 2010: *Áridos. Determinación de la*



densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino, y la NTE INEN 857, 2010: Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso. En la Tabla 1, se presentan las ecuaciones empleadas para calcular los parámetros antes descritos tanto para el árido fino como para el agregado grueso.

Tabla 1. Ecuaciones para determinar absorción y densidad de áridos y agregados.

PARÁMETRO	ÁRIDO FINO	AGREGADO GRUESO
Densidad relativa SH	$\frac{A}{B + S - C}$	$\frac{A}{B - C}$
Densidad relativa SSS	$\frac{S}{B + S - C}$	$\frac{B}{B - C}$
Densidad relativa aparente	$\frac{A}{B + A - C}$	$\frac{A}{A - C}$
Densidad SH	$\frac{997.5 * A}{B + S - C} [kg/m^3]$	$\frac{997.5 * A}{B - C} [kg/m^3]$
Densidad SSS	$\frac{997.5 * S}{B + S - C} [kg/m^3]$	$\frac{997.5 * B}{B - C} [kg/m^3]$
Densidad aparente	$\frac{997.5 * A}{B + A - C} [kg/m^3]$	$\frac{997.5 * A}{A - C} [kg/m^3]$
Absorción	$\frac{S - A}{A} * 100 [\%]$	$\frac{B - A}{A} * 100 [\%]$

Fuente: NTE INEN 856 y NTE INEN 857.

Donde:

Para el árido fino:



- $S$ : Masa de material en condición SSS.
- $A$ : Masa del material seca al horno.
- $B$ : Masa del picnómetro más agua hasta la marca de calibración.
- $C$ : Masa del picnómetro más material más agua hasta la marca de calibración.

Para el agregado grueso:

- $A$ : Masa del material seca al horno.
- $B$ : Masa del material en condición SSS.
- $C$ : Masa aparente sumergida.

### 2.1.1.3 Masa unitaria

La masa unitaria del árido se define como masa de una unidad de volumen correspondiente al árido total, en el cual se incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de los vacíos entre las partículas. La norma que rige este ensayo es la NTE INEN 858, 2010: *Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos*. Para determinar el volumen del molde y la masa unitaria se emplearon las ecuaciones presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Ecuaciones para determinar la masa unitaria.

<b>Volumen del molde</b>	$\frac{B - A}{\rho} [m^3]$
<b>Masa unitaria</b>	$\frac{G - (B - A)}{V} [kg/m^3]$

Fuente: NTE INEN 858.

Donde:



- $A$ : Masa del molde más placa de vidrio.
- $B$ : Masa del molde más placa de vidrio más agua.
- $G$ : Masa del molde más agregado.
- $V$ : Volumen del molde.
- $\rho$ : Densidad del agua.

### 2.1.2 Cemento Hidráulico

El cemento es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua (Niño Hernandez, 2010). Mezclado con agregados pétreos y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece, adquiriendo consistencia pétreo, denominada hormigón o concreto. No existe ninguna restricción específica en lo que concierne al cemento para elaborar hormigones reforzados con fibras.

### 2.1.3 Aditivos

Material diferente a: fibras de refuerzo, material hidráulico cementante, áridos o agua, que se utiliza como ingrediente de una mezcla cementante para modificar algunas de las propiedades de la mezcla fresca, su fraguado o endurecimiento y que se añade a la amasada, antes o durante su mezcla (NTE INEN 694, 2010). Al adicionar fibras al hormigón, este sufre una pérdida en su trabajabilidad, para ello se recomienda la adición de aditivos superplastificantes ya que a la mezcla original no se afecta la resistencia.

### 2.1.4 Fibras de acero

Las fibras de acero son filamentos delgados, de materiales naturales o fabricados, que se pueden distribuir de manera uniforme en toda la mezcla fresca cementante con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas al hormigón (NTE INEN 694, 2010). Dentro del



hormigón se las emplea como un refuerzo secundario, y se dosifica siguiendo la normativa ASTM 1116, (Sika, 2014).

## 2.2 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE HRF

El hormigón reforzado con fibras, HRF, es aquel hormigón en el que se han incluido fibras en una proporción adecuada. Las fibras actúan mejorando algunas de las características de los hormigones convencionales, siendo fundamentales los aspectos de tenacidad, control de proceso de fisuración y resistencia a flexo tracción. La transmisión de esfuerzos fibras-matriz se produce por adherencia, superponiendo acciones que involucran fenómenos de adhesión, fricción y entrecruzamiento mecánico (Espinoza Torres, 2017).

La adición de fibras en un material frágil como el hormigón, intenta convertirlo en un material dúctil y actuar sobre la fisuración de la matriz, de forma que mediante su acción de “cosido” entre las fisuras, se reduzca el ancho de las mismas (Jovelles, 2015). La adición de fibras de acero al hormigón proporciona las siguientes características:

- Incremento de la resistencia a la abrasión.
- Excelente resistencia a la corrosión.
- Mejora la resistencia a tracción, flexión y corte, produciendo un aumento de la capacidad portante.
- Proporciona una capacidad adicional de resistencia, debido a la redistribución del momento plástico en caso de solicitaciones localizadas.
- Logra alta resiliencia y resistencia al impacto para solicitaciones dinámicas.

Sin embargo el HRF en estado fresco reduce la trabajabilidad, efecto parcialmente controlado por los aditivos químicos. Otros aspectos negativos a considerar son: la posible alteración de las fibras durante el mezclado, la orientación final, conseguir una adecuada





compacidad y el acabado de las superficies. (Mármol Salazar, 2010). Las principales aplicaciones del HRF de acero son las siguientes:

- Pavimentos de carreteras, aeropuertos e industriales: La resistencia a la propagación de fisuras, combinada con su resistencia al impacto y a atmósferas agresivas.
- Hormigón proyectado: Se evita la malla electro soldada con el consiguiente beneficio económico, técnico y temporal.
- Tubos para saneamiento: Proporciona a los tubos una muy buena resistencia al impacto, abrasión y cavitación.
- Prefabricación: La fibra de acero se utiliza en este caso para controlar la fisuración como armadura complementaria a la armadura principal de la estructura pretensada. Con esto se logra obtener la mayor ventaja de la industria del pre modelado, se aceleran los tiempos de construcción.

### **2.2.1 Diseño de la mezcla por el método del ACI**

Para el diseño la mezcla de hormigón con fibras se empleó el método del ACI 211.1, para hormigones de peso normal. Este es un método de diseño empírico cuyos resultados han sido confirmados por una amplia información experimental (Orlando Giraldo, 1987). El documento del ACI 211.1 resume el procedimiento de diseño de mezclas de hormigón en 9 pasos, que se detallan a continuación:

#### **1. Elección del asentamiento.**

El asentamiento o revenimiento hace referencia a la trabajabilidad que va a tener el hormigón en fresco. En la Tabla 3, se muestra los revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.

Tabla 3. *Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.*

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	REVENIMIENTO (cm)	
	Máximo	Mínimo
Muros de subestructura sencillos, zapatas, muros y cajones de cimentación.	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados.	10	2.5
Columnas para edificios.	10	2.5
Pavimentos y losas.	7.5	2.5
Concreto masivo.	7.5	2.5

El revenimiento se puede incrementar cuando se emplea aditivos químicos. Se debe considerar que el concreto tratado con aditivos tiene una relación agua/cemento igual o menor sin que potencialmente se tenga segregación excesiva.

Se puede incrementar en 2.5 cm cuando los métodos de compactación no sean mediante vibrado.

Fuente: ACI 211.1

## 2. Tamaño máximo de agregado.

El tamaño máximo del agregado grueso guarda relación con la geometría de la estructura, en el ACI 318 se señala que el tamaño máximo del agregado no debe exceder:

- 1/5 de la separación menor entre los lados de la cimbra.
- 1/3 del peralte de la losa.
- 3/4 del espaciamiento mínimo libre entre varillas individuales de refuerzo.

## 3. Agua de mezclado ( $W_w$ ) y contenido de aire

La cantidad necesaria de agua está en función del tamaño máximo de los agregados, de su granulometría y de la trabajabilidad en obra, tal como se muestra en la Tabla 4.



Tabla 4. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos de agregados.

TAMAÑO MÁXIMO DE LA GRAVA (mm)								
REVENIMIENTO (cm)	9.5	12.5	19.0	25.0	38.0	50.0	75.0	150.0
<i>Concreto sin aire incluido</i>								
2.5 - 5	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 - 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 - 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Aire atrapado (%)	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
<i>Concreto con aire incluido</i>								
2.5 - 5	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 - 10	202	193	184	175	165	157	133	119
15 - 17.5	216	205	197	174	174	166	154	---
<i>Promedio recomendado de aire a incluir según el tipo de exposición (%)</i>								
Liguera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Fuente: ACI 211.1

#### 4. Relación agua/cemento (A/C).

Se debe conocer la resistencia a la compresión a la que se debe diseñar ( $f'c$ ). Se emplean ciertos factores de seguridad para incrementar el valor de la resistencia, este valor se lo conoce como la resistencia promedio requerida ( $f'cr$ ) y se determina mediante una de las siguientes relaciones presentadas en la Tabla 5:

Tabla 5. Factores de seguridad para resistencia promedio requerida.

RESIST. A COMPRESIÓN ESPECIFICADA ( $f'c$ )	RESIST. PROMEDIO REQUERIDA ( $f'cr$ )
Menor a 210 kg/cm <sup>2</sup>	$f'c + 70$
De 210 kg/cm <sup>2</sup> a 350 kg/cm <sup>2</sup>	$f'c + 85$
Mayor a 350 kg/cm <sup>2</sup>	$1.10 f'c + 50$

Fuente: ACI 211.1

Con ese valor de resistencia a la compresión requerida se determina la relación agua/cemento, Tabla 6. Si el valor buscado no es el exacto a lo mostrado en la tabla se puede realizar una interpolación lineal.



Tabla 6. Correspondencia entre relación A/C y la resistencia a la compresión.

RESIST. COMPRESIÓN 28 DÍAS	SIN AIRE	CON AIRE
420	0.41	---
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: ACI 211.1

### 5. Contenido de cemento ( $W_C$ ).

Para determinar el contenido de cemento hacemos uso de la siguiente ecuación:

$$W_C = \frac{W_W}{A/C} \quad (\text{Ecu. 1})$$

### 6. Estimación del contenido de agregado grueso ( $W_G$ ).

Para determinar el volumen de grava necesario ( $V_G$ ) por volumen unitario de concreto se emplea la Tabla 7. Si el valor no se encuentra reflejado en la tabla es necesario realizar una interpolación lineal.

Tabla 7. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

TAMAÑO MÁX DE AGREGADO		VOLÚMEN DE AGREGADO POR VOLÚMEN UNITARIO DE CONCRETO			
Módulo de	Finura	2.4	2.6	2.8	3.0
3/8 "	9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	19.0	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	25.0	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
2"	50.0	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	75.0	0.82	0.80	0.78	0.76
6"	150.0	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: ACI 211.1

Pero este volumen es compactado por ello para obtener el peso real de grava empleamos el peso volumétrico seco compactado de la grava ( $PVSC_G$ ) mediante la siguiente ecuación:



$$W_G = PVSC_G * V_G \quad (Ecu. 2)$$

### 7. Estimación del contenido de agregado fino ( $W_A$ ).

Se determina mediante la diferencia de volúmenes absolutos. Para ello se determina el volumen de cada material y cada uno de estos volúmenes se los resta al volumen total de la mezcla, que es de  $1 \text{ m}^3$ .

Para determinar el volumen absoluto de cualquier material a partir de un peso empleamos la siguiente ecuación:

$$V_{material} = \frac{W_{material}}{GE_{material} * \gamma_W} \quad (Ecu. 3)$$

Para determinar el volumen de la arena empleamos:

$$V_A = 1 - V_C - V_W - V_G - V_{AIRE} \quad (Ecu. 4)$$

De la Ecuación 3 despejamos el valor del peso del material y obtenemos el valor en peso de la arena necesaria.

### 8. Ajuste por humedad del agregado.

Se debe tener en cuenta que los agregados ya contienen agua, misma que debe ser restada del valor de la absorción de la siguiente manera:

$$W_{W\ corr} = W_W + \left[ W_A * \frac{\% Abs}{100} + W_G * \frac{\% Abs}{100} \right] - \left[ W_A * \frac{\% H}{100} + W_G * \frac{\% H}{100} \right] \quad (Ecu. 5)$$

### 9. Cálculo de proporciones en base al peso

Finalmente se determina la proporción de los 3 materiales empleados, cemento, arena y grava. Las proporciones se calculan tomando como referencia al peso del cemento, así:



$$\frac{W_C}{W_C} ; \frac{W_A}{W_C} ; \frac{W_G}{W_C} \quad (\text{Ecu. 6})$$

La cantidad de fibras incluidas en el hormigón es determinada mediante las recomendaciones de la hoja técnica de las fibras normalizadas (DRAMIX, 2017). En la hoja técnica se establece un valor mínimo de 15 kg de fibra por m<sup>3</sup> de hormigón.

### 2.2.2 Proceso empleado para la fabricación del HRF

El proceso del amasado del hormigón tiene como finalidad conseguir una masa uniforme de hormigón, para ello se debe mezclar bien cada uno de sus componentes hasta lograr una homogeneidad en la masa, pues junto con una correcta dosificación y una correcta manipulación del hormigón en estado fresco se logrará elaborar estructuras resistentes y duraderas (Mamlouk & Zaniewski, 2009). El proceso de mezclado para hormigón convencional se encuentra normado en la ASTM C 192, 2016: *Práctica estándar para elaborar y curar muestras de concreto en el laboratorio*.

### 2.2.3 Moldeo y curado de las muestras de HRF

El moldeo y curado de especímenes está normado en la NTE INEN 1576, 2011: *Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado de especímenes para ensayo*. Se requiere de moldes completamente lisos, en los que sus caras o paredes sean perpendiculares entre sí y que no exista ninguna deformación en su superficie. El método de compactación de los especímenes está en función de la trabajabilidad del hormigón, Tabla 8.

Tabla 8. Método de compactación para diferentes asentamientos.

ASENTAMIENTO (mm)	MÉTODO DE COMPACTACIÓN
≥ 25	Varillado o vibración
< 25	Vibración

Fuente: NTE INEN 1576



Para la compactación por el método de varillado se requiere de una varilla de acero completamente lisa, con punta de sección circular. Su longitud debe ser de por lo menos 10 cm mayor que la profundidad del molde en el cual se está realizando la compactación, pero no mayor de 60 cm de longitud total. El diámetro de la varilla está relacionado con las dimensiones de los moldes, Tabla 9.

Tabla 9. Geometría de la varilla de compactación.

DIAMETRO DEL CILINDRO O ANCHO DE LA VIGA (mm)	DIÁMETRO DE LA VARILLA (mm)
$\geq 150$	$16 \pm 2$
$< 150$	$10 \pm 2$

Fuente: NTE INEN 1576

Los golpes deben distribuirse uniformemente sobre la superficie del espécimen. La capa del fondo se debe compactar penetrando la varilla en toda su profundidad, las siguientes capas se deben compactar garantizando que la varilla penetre la capa inferior aproximadamente 2.50 cm.

Para el curado inicial, los especímenes deben ser almacenado por un período de hasta 48 horas a una temperatura entre 16 °C y 27 °C, en un ambiente que prevenga la pérdida de humedad de los especímenes.

### 2.2.3.1 Especímenes cilíndricos

Los moldes cilíndricos deben cumplir los requisitos de la norma ASTM C 470. En función de las dimensiones de los moldes se selecciona el método de moldeo, Tabla 10.

Tabla 10. Método de moldeo de especímenes cilíndricos.

DIAMETRO (mm)	NO. CAPAS	NO. GOLPES POR CAPA
100	2	25
150	3	25
225	4	50

Fuente: NTE INEN 1576



Se debe garantizar que luego de la compactación el molde quede completamente lleno.

Luego con un bailejo se enraza la superficie libre del molde.

### 2.2.3.2 Especímenes prismáticos

De igual manera que para los especímenes cilíndricos, las especificaciones para el moldeado están en función de las dimensiones del molde, Tabla 11.

Tabla 11 *Método de moldeado de especímenes prismáticos.*

ANCHO (mm)	NO. CAPAS
150 – 200	2
200	3 o más

Fuente: NTE INEN 1576

Se debe dar un golpe con la varilla de compactación por cada 14 cm<sup>2</sup> de área superficial de la viga. A la última capa se debe adicionar más cantidad de hormigón para garantizar que luego de la compactación el molde quede lleno.

## 2.3 ENSAYOS DE HRF

### 2.3.1 Ensayo para determinar la trabajabilidad

La trabajabilidad es una propiedad del hormigón en estado fresco, relacionada con la facilidad de colocación y compactación del concreto en las formaletas, sin que se produzca ninguna segregación. La trabajabilidad está representada por el grado de compacidad, cohesividad, plasticidad y la consistencia (Niño Hernandez, 2010). En este trabajo se ha seleccionado como parámetro para medir la trabajabilidad, a la consistencia del hormigón, es decir se evaluará el grado de fluidez de la mezcla en estado plástico; para ello empleamos la normativa NTE INEN 1578, 2010: *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.*



### 2.3.2 Ensayo de resistencia a flexo-tracción

Es una medida de la resistencia a la tracción del concreto y se expresa como el módulo de rotura, muy empleado para caracterizar los HRF. Una de los aspectos a considerar en este ensayo es que se toman medidas de deflexión más allá del pico de carga, pues el uso de esta variable como control no siempre conduce a un ensayo estable. (Saludes, Aguado, & Molins, 2007). Para evaluar el comportamiento a flexión de una viga con fibras de acero se emplea la normativa ASTM C 1609,2012 : *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*.

La prueba evalúa el comportamiento a flexión del concreto usando parámetros derivados de la curva carga vs flecha (Aire, Molins, Aguado, & Zárate, 2014). En la Figura 1 se presenta un esquema del espécimen colocado para el ensayo.

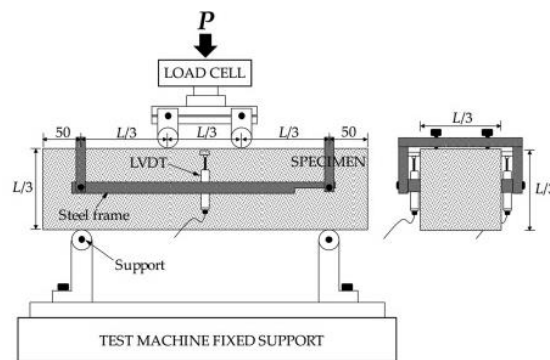


Figura 1. Esquema de ensayo a flexo tracción en vigas

Fuente: Park, J.J, et al, 2017

Para determinar la resistencia máxima se emplea la siguiente expresión:

$$f_{ct} = \frac{P * l}{b * d^2} \quad (\text{Ecu. 7})$$

Donde:

- $P$ : Carga máxima de rotura
- $l$ : Luz entre los apoyos.



- $b$ : Ancho de la viga.
- $d$ : Altura de la viga.

Un comportamiento típico encontrado en las vigas ensayadas a flexo-tracción se presenta en la Figura 2.

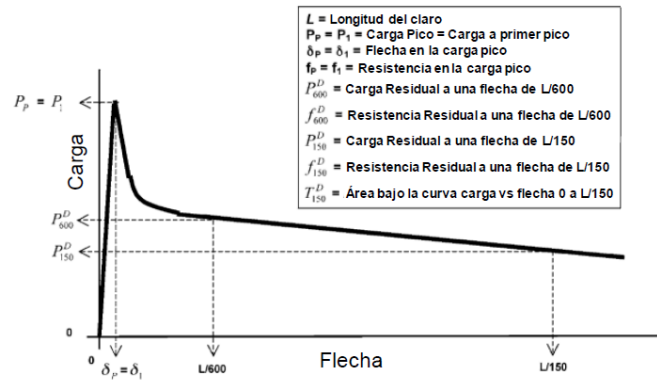


Figura 2. Curva carga vs flecha típica esperada para el ensayo a flexo-tracción.

Fuente: Aire et al, 2014

### 2.3.3 Ensayo de doble punzonamiento, EDP.

El ensayo de doble punzonamiento presentado por (Chen, 1970) fue diseñado inicialmente para evaluar la resistencia a tracción indirecta de hormigón tradicional como alternativa al ensayo brasileño. Actualmente se lo emplea para caracterizar a los HRF y tiene como objetivo determinar la resistencia del concreto a la fisuración, la tenacidad y la resistencia residual a tracción; está normado bajo la norma europea UNE 83515, 2010: *Hormigones con fibras: Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.*

Para este ensayo, se necesita de dos discos de carga, elaborados de acero, de diámetro igual a 1/4 del diámetro de la probeta y de altura igual al mayor de 1/5 la altura de la probeta o 15 mm en la Figura 3 se muestra un esquema del espécimen a ensayar.

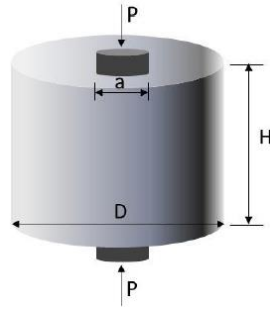


Figura 3. Esquema del ensayo de doble punzonamiento.

Fuente: (Aire et al, 2014)

También se emplea un extensómetro radial digital, que se coloca en la mitad de la altura del cilindro con el fin de registrar la apertura circunferencial del espécimen. Este ensayo se puede realizar en una prensa convencional de rotura de cilindros a compresión. Al realizar este tipo de ensayo, el modo de falla típico que se presenta son tres planos de falla radial, aunque en algunos casos es posible encontrar dos o cuatro planos de falla.

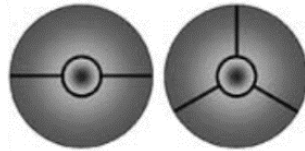


Figura 4. Modo de falla típico esperado en las probetas cilíndricas.

Fuente: (Mármol Salazar, 2010)

Estudios realizados por (Mármol Salazar, 2010), han demostrado que el EDP tiene múltiples ventajas como:

- Menor cantidad de hormigón, lo que significa un ahorro de material.
- Menor peso de la probeta, lo cual le hace más manejable en el laboratorio.
- Requiere de una prensa de menor capacidad, pues las cargas de rotura son de reducida magnitud
- El EDP es el ensayo más eficiente en comparación a otros ensayos, ya que tiene una superficie de rotura mayor, lo cual implica que la cantidad de material útil para el ensayo es mayor.



- El coeficiente de Variación, en el EDP, es menor que al obtenido en los ensayos de vigas.

Para determinar la resistencia a tracción del HRF se emplea la expresión propuesta por (Saludes, Aguado, & Molins, 2007).

$$f_{ct} = \frac{4P_f}{9\pi * a * H} \left[ N/mm^2 \right] \quad (Ecu. 8)$$

Donde:

- $f_{ct}$ : Resistencia a tracción.
- $P_f$ : Carga de rotura.
- $H$ : Altura del cilindro.
- $a$ : Diámetro del punzón.

La ventaja de emplear esta ecuación es que se acepta la fisuración de la probeta, no depende del número de fisuras y se puede usar para el análisis en el rango post fisuración de los HRF (Mora, 2008).

De la curva carga vs deformación circunferencial se puede determinar la resistencia a fisuración, la resistencia residual y la tenacidad del HRF; esta última hace referencia a la energía que se debe transmitir a la probeta para que ésta alcance una deformación circunferencial total de R, y se determina mediante en área bajo esta curva.

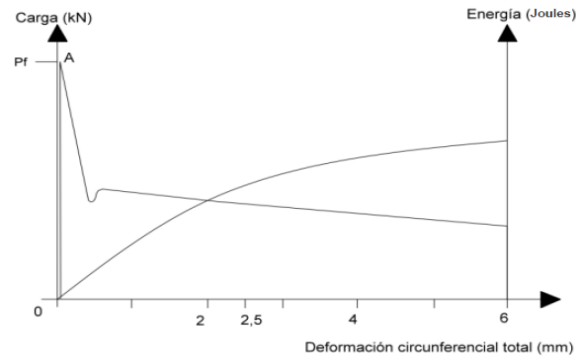


Figura 5. Curva carga vs deformación circunferencial esperada para el EDP.

Fuente: (Aire et al, 2014)

### 2.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión determina el esfuerzo máximo que puede soportar un espécimen bajo una determinada carga de aplastamiento. Está directamente relacionada con la relación agua/cemento. Para el ensayo de compresión simple se ha tomado como referencia la normativa NTE INEN 1573, 2010: *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.*

La resistencia a la compresión se obtiene dividiendo la máxima carga entre el área del cilindro. Los especímenes deben ser ensayados en condición húmeda. La máxima resistencia a la compresión se alcanza a los 28 días de curado.

### 2.3.5 Ensayo de módulo de elasticidad dinámico

El módulo de elasticidad influye de manera determinante en las deflexiones, las distorsiones de entrepiso y en rigidez de una estructura; asimismo, el uso masivo de concreto como principal material de construcción hace indispensable conocer todas sus propiedades mecánicas para tener diseños acertados.

El ensayo de ultrasonido es un ensayo indirecto, no destructivo que se realiza el hormigón para detectar fisuras, discontinuidades y deterioros internos en la estructura de hormigón. En esta prueba se mide la velocidad de onda ultrasónica que atraviesa el hormigón;



la distancia entre los transductores se divide entre el tiempo que tarda la onda en desplazarse entre ellos, lo que determina la velocidad media de propagación de onda. El ensayo está normado bajo la ASTM C 597, 2016: *Método de prueba estándar para la velocidad del pulso a través del concreto*.

El módulo de elasticidad dinámico se determina a partir de la velocidad de onda ultrasónica. (Casali, y otros, 2007) Establecen la ecuación para determinar el módulo de elasticidad dinámico, dada por:

$$E_D = v_p^2 * \frac{\gamma}{g} * \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (\text{Ecu. 9})$$

Donde:

- $E_D$ : Módulo de elasticidad dinámico. [ $kg/m^2$ ]
- $v_p^2$ : Velocidad longitudinal de onda ultrasónica. [ $m/s$ ]
- $\gamma$ : Densidad del hormigón. [ $kg/m^3$ ]
- $g$ : Aceleración de gravedad. [ $m/s^2$ ]
- $\nu$ : Coeficiente de Poisson.

## 2.4 ANÁLISIS COMPARATIVO

### 2.4.1 Ensayo de doble punzonamiento vs ensayo a flexo tracción de vigas

Con el fin de determinar la correlación existente entre el EDP y el ensayo a flexión de vigas se debe plantear ciertas hipótesis para cada tipo de ensayo.

En este trabajo, como se mencionó con anterioridad, las variables de interés son la tenacidad medida desde la carga máxima para el ensayo de doble punzonamiento y la absorción de energía para el caso del ensayo de viga. Luego, tras someter a pruebas los especímenes, se

debe de definir el valor de apertura de fisura total para la probeta cilíndrica y el valor de la flecha para la probeta prismática que proporciona la misma apertura de fisura media. Para lograr este fin se debe realizar una serie de aproximaciones planteadas por (Aire, Molins, Aguado, & Zárate, 2014), explicadas a continuación.

*HIPÓTESIS 1: La probeta prismática se fisura en toda su sección transversal menos en un punto.* Esto quiere decir que la viga tuviera una resistencia a compresión infinita, girando la probeta por dicho punto. Se asume como válida esta hipótesis.

En la Figura 6 (a), que se presenta a continuación se muestra un esquema idealizado del modo de falla de los especímenes prismáticos; donde  $\delta$  representa la flecha de la viga y  $\omega$  representa la apertura circunferencial de los especímenes cilíndricos. Como se puede observar la rotura de la probeta prismática tiene lugar en el centro de su longitud.

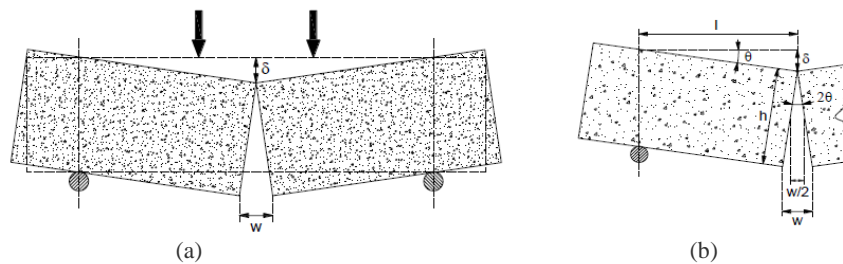


Figura 6. Modo de rotura idealizado para el ensayo ASTM C1609

Fuente: (Aire et al, 2014)

En la Figura 6 (b), se presenta a mayor detalle del modo de fisura asumido, donde  $h$  representa la altura de la viga,  $l$  es la luz media libre entre los apoyos y  $\theta$  es el ángulo girado por la probeta respecto a la horizontal, por lo tanto la fisura media que se alcanza es  $W_{NBN} = \omega/2$ .

*HIPÓTESIS 2: Los ángulos de falla son pequeños* A partir de lo expuesto anteriormente se derivan las siguientes relaciones geométricas.



$$\theta = \frac{\delta}{l} \quad \theta = \frac{\omega/2}{h} \quad \theta = \frac{W_{NBN}}{h} \quad (\text{Ecu. 10})$$

Por lo tanto, la relación entre flecha ( $\delta$ ) y fisura media ( $\omega/2$ ) queda establecido de la siguiente manera:

$$\frac{\delta}{l} = \frac{\omega/2}{h} = \frac{W_{NBN}}{h} \quad (\text{Ecu. 11})$$

*HIPÓTESIS 3: El modo de rotura basada en 3 planos de fisura radial van desde el final del plato de carga hasta la parte extrema de la probeta cilíndrica, mientras que para 2 o 4 planos de fisuración radial son obviados. Esto es debido a que la mayor parte de la experimentación realizada respecto al tema mostraron que este es el comportamiento de la mayoría de los especímenes.*

*HIPÓTESIS 4: Los tres planos de fisura radial tienen el mismo ancho de fisura entre ellos. Al ser las caras de las probetas paralelas entre sí, sus planos de fisura también lo van a ser, por ello se produce un modo de rotura cinemáticamente admisible, en el que el ancho de fisura medio ( $\omega_m$ ) es igual al ancho de fisura medido cada plano de fisura ( $W_{BCN}$ ). A continuación, se ilustra el modo de falla ideal.*

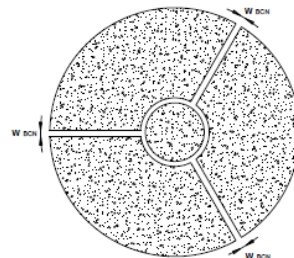


Figura 7. Modo de rotura asumido para el EDP.

Fuente: (Aire et al, 2014).

A partir de lo expuesto se llega a la siguiente relación:

$$\Delta\phi = 3 * W_{BCN} \quad (\text{Ecu. 12})$$





Donde:

- $\Delta\phi$ : Apertura de fisura total (apertura circunferencial).
- $W_{BCN}$ : Ancho de fisura de un plano de fisura radial.

La correlación entre el ensayo de doble punzonamiento y el ensayo a flexión se realiza a partir de las ecuaciones discutidas con anterioridad (Ecuación 11 y Ecuación 12). La relación se plantea a partir de la igualdad del ancho de fisura de un plano radial ( $W_{BCN}$ ) en el ensayo de doble punzonamiento con el ancho de fisura medio ( $W_{NBN}$ ) del ensayo de flexión de vigas, resultando:

$$W_{BCN} = \frac{\Delta\phi}{3} = W_{NBN} = \frac{\delta}{4} \quad (Ecu. 13)$$

La correlación planteada no produce ningún error en el resultado final ya que para el ensayo de flexión de viga, la carga máxima, y por ende la rotura de la probeta, sucede para flechas muy pequeñas, con lo que equivale a medir la energía desde la carga máxima.

Para determinar el área bajo la curva se emplea el método de Simpson 1/3. Para determinar el valor del área se parte de una función inicial y el intervalo en el que se lo va a evaluar.

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x)dx \quad (Ecu. 14)$$

A continuación, se presenta su formulación.

$$\int_a^b f(x)dx \approx (b - a) \left[ \frac{f(a) + 4f(x_m) + f(b)}{6} \right] \quad (Ecu. 15)$$



## 2.4.2 Análisis de Covarianza ANCOVA

El análisis de covarianza (ANCOVA) se utiliza para examinar las diferencias en los valores medios de las variables dependientes que están relacionadas con el efecto de las variables independientes controladas, teniendo en cuenta la influencia de las variables independientes no controladas. (Statistic Solution, 2018)

El análisis de covarianza es apropiado para lograr dos objetivos específicos: a) eliminar cualquier error sistemático fuera del control del investigador que puede sesgar los resultados, y b) tener en cuenta las diferencias en las respuestas debidas a las características propias de la muestra (Badii, M. H., Castillo, J., & Wong, A, 2017).

El ANCOVA se realiza mediante el uso de regresión lineal. Esto significa que se asume una relación lineal entre la variable independiente y la variable dependiente. El ANCOVA se aplica cuando una variable independiente tiene una fuerte correlación con la variable dependiente. Pero, es importante recordar que las variables independientes en el ANCOVA no interactúan con otras variables independientes mientras predicen el valor de la variable dependiente. (Zaiontz, 2013)



## **CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

#### **3.1.1 Áridos**

Los áridos empleados para la elaboración de este trabajo provienen de mineras localizadas en las zonas periféricas de la ciudad. El agregado grueso se lo obtuvo gracias a la empresa VIPESA CONSTRUCCIONES Cia. Ltda., ubicada en la Panamericana Norte Km 17.5. El árido fino se compró en una minería localizada en el sector del Control Sur. Ambos materiales han sido sometidos a un proceso de lavado y secado; el material fue reservado en fundas plásticas con el fin de los materiales no absorban humedad.

Los instrumentos empleados para la elaboración de la mayoría de ensayos fueron los localizados en el laboratorio de materiales y suelos de la Facultad de Ingeniería.

##### ***3.1.1.1 Granulometría***

Para la elaboración de este ensayo se seleccionó una muestra seca de 300 gr. de árido fino y 5000 gr. de agregado grueso. Se emplearon los tamices: 1 1/2", 1/2", 3/8" y No. 4 para la serie grueso; y los tamices: No. 4, No.8, No. 16, No. 30, No. 40, No. 50, No. 100 y No. 200 para la serie fina. Posterior a ello se colocó las cribas en la tamizadora mecánica por un tiempo de 5 minutos.

##### ***3.1.1.2 Absorción y densidad relativa***

Para determinar la absorción y la densidad relativa del árido fino se empleó el procedimiento gravimétrico. Para la realización del ensayo se requiere que la muestra esté en condición saturada superficialmente seca. Para llegar a este estado, se realizaron dos tratamientos previos hasta que el árido se desmorona ligeramente al levantar el molde. Para



eliminar las burbujas de aire, se agitó el picnómetro y con un papel se retiró la espuma que se formó. Los datos tomados en laboratorio fueron:

- Masa del árido en condiciones SSS:  $S = 500 \text{ gr.}$
- Masa del árido seca al horno:  $A = 480 \text{ gr.}$
- Masa del picnómetro más agua:  $B = 660 \text{ gr.}$
- Masa del picnómetro más agua más árido:  $C = 961.10 \text{ gr.}$

Para determinar la absorción y densidad del agregado grueso se utilizó material limpio de gradación mayor o igual a 4.75 mm (Malla No. 4). Se seleccionó una muestra de 4 kg previamente secada. Se empleó una toalla para secar superficialmente la grava. Los datos tomados en laboratorio fueron:

- Masa del agregado seca al horno:  $A = 3903.2 \text{ g.}$
- Masa del agregado en condiciones SSS:  $B = 4074.9 \text{ g.}$
- Masa sumergida del agregado:  $C = 2472.8 \text{ g.}$

### **3.1.1.3 Masa Unitaria**

Para determinar la masa unitaria del agregado se siguió el procedimiento por varillado, que consiste en llenar un molde de acero, con tres capas de árido, compactando cada capa con 25 golpes. Los datos tomados en laboratorio para el árido fino fueron:

- Masa del molde más placa de vidrio:  $A = 1.24 \text{ kg.}$
- Masa del molde más placa de vidrio más agua:  $B = 3.68 \text{ kg.}$
- Masa del molde más árido compactado:  $G_c = 6.23 \text{ kg.}$
- Masa del molde más árido suelto:  $G_s = 6.04 \text{ kg.}$
- Densidad del agua:  $\rho = 999.19 \text{ kg/m}^3$



En cambio los datos tomados en laboratorio para el agregado grueso fueron:

- Masa del molde más placa de vidrio:  $A = 1.24 \text{ kg}$ .
- Masa del molde más placa de vidrio más agua:  $B = 3.68 \text{ kg}$ .
- Masa del molde más agregado compactado:  $G_c = 6.23 \text{ kg}$ .
- Masa del molde más agregado suelto:  $G_s = 6.04 \text{ kg}$ .
- Densidad del agua:  $\rho = 999.19 \text{ kg/m}^3$

### 3.1.2 Cemento Hidráulico



Figura 8. Cemento Holcim Fuerte

Fuente: Ficha técnica Cemento Holcim Fuerte, 2015.

Se seleccionó el cemento hidráulico Holcim Fuerte tipo GU por ser el más empleado en cualquier tipo de estructuras de hormigón convencionales, pues debido a su formulación permite elaborar hormigones con resistencias superiores a las especificadas en las normas NTE INEN 152, NTE INEN 490, y NTE INEN 2380, para cementos de uso general. El material cementante se lo obtuvo gracias a la empresa HOLCIM ECUADOR.

Los requerimientos físicos que el cemento debe cumplir se resumen en la Tabla 12.



Tabla 12. Requerimientos físicos del cemento

	INEN 2380	VALOR REFERENCIAL
<b>Cambio de longitud por autoclave (% máximo)</b>	0.8	-0.06
<i>Tiempo de fraguado inicial, método de Vicat</i>		
<b>No menos de (minutos)</b>	45	190
<b>No más de (minutos)</b>	420	3
<b>Contenido de aire del mortero (% Volumen)</b>	A	
<i>Resistencia a la compresión mínimo (MPa)</i>		
<b>1 día</b>	A	9
<b>3 días</b>	13	17
<b>7 días</b>	20	22
<b>28 días</b>	28	31
<b>Expansión en barras de mortero 14 días (% máximo)</b>	0.02	0.002

Fuente: Ficha técnica Cemento Holcim Fuerte, 2015.

### 3.1.3 Aditivos



Figura 9. Aditivo Sika HE 200.

Fuente: Hoja técnica Sika, 2014.

Para la elaboración de este ensayo se empleó el aditivo SIKAMENT HE 200, obtenido gracias a la empresa SIKA S.A. Este es un aditivo líquido, superplastificante, reductor de agua de alto poder, con poder acelerante sobre el endurecimiento del hormigón. Promueve la rápida ganancia de resistencia del hormigón a edades tempranas sin influencia negativa sobre la resistencia final. No contiene cloruros, motivo por el cual no corroe las fibras de acero. Diseñado para cumplir la norma ASTM C 494, Tipo A, F y E.

Este aditivo tiene un color ámbar oscuro, con una densidad de 1.20 kg/l. Para elaboración de hormigón de buena plasticidad y alta resistencia inicial se recomienda dosificar Sikament HE 200 entre 0,5% y el 2,5% del peso del cemento. (Sika, 2014)

### 3.1.4 Fibras de Acero

Las fibras seleccionadas para la elaboración de este trabajo son fibras de acero DRAMIX 3D 65/35 BG, DRAMIX 3D 65/60 BG y DRAMIX 4D 65/60 BG, que cumplen con la normativa ASTM A 820. Las fibras fueron compradas al proveedor local.





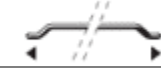

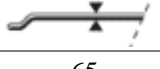
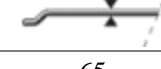
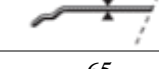


Figura 10. Fibras de acero DRAMIX.

Fuente: Ficha técnica Dramix, 2017.

Las características geométricas de las fibras se obtuvieron de sus respectivas fichas técnicas, brindadas por el proveedor. En la Tabla 13 se presenta un cuadro comparativo de las características de las fibras a emplearse para la elaboración de este trabajo.

Tabla 13. Características físicas y mecánicas de las fibras.

CARACTERÍSTICAS	DRAMIX 3D 65/35	DRAMIX 3D 65/60	DRAMIX 4D 65/60
<b>Resistencia a tracción</b>	1345 N/mm <sup>2</sup>	1160N/mm <sup>2</sup>	1600N/mm <sup>2</sup>
<b>Módulo de Young</b>	200000 N/mm <sup>2</sup>	210000 N/mm <sup>2</sup>	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Gama de fibra</b>	3D 	3D 	4D 
<b>Longitud (l)</b>	35 mm 	60 mm 	60 mm 
<b>Diámetro (d)</b>	0.55 mm 	0.90 mm 	0.90 mm 
<b>Proporción (l/d)</b>	65	65	65

Fuente: Ficha técnica Dramix, 2017.3.2 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE HRF



### 3.2.1 Diseño de la mezcla por el método del ACI

El procedimiento empleado para el diseño de la mezcla de HRF fue el expuesto en la sección 2.2.1 de este documento. Se estableció que el revenimiento del hormigón debe estar en un rango de 8 cm a 12 cm, debido a que en este rango el concreto posee un buen grado de trabajabilidad. Luego se estableció el valor de resistencia a compresión ( $f'c$ ) a diseñar; para el caso de estudio se planteó el diseño de un hormigón de  $350 \text{ kg/cm}^2$  y otro de  $500 \text{ kg/cm}^2$ . A cada una de las mezclas de hormigón se añadió dos proporciones de fibras,  $20 \text{ kg/m}^3$  de hormigón y  $60 \text{ kg/m}^3$  de hormigón. Como se mencionó en la sección 3.1.4 de este documento se trabajó con 3 tipos distintos de fibras.

En el diagrama de flujo que se presenta a continuación se expondrá de una manera más gráfica las mezclas que se fabricaron en el desarrollo de este trabajo de titulación; como se puede observar en total se elaboraron doce mezclas distintas. Para cada mezcla se elaboraron tres especímenes prismáticos para el ensayo a flexión de viga y seis especímenes cilíndricos: tres para el ensayo de doble punzonamiento y tres para el ensayo a compresión.

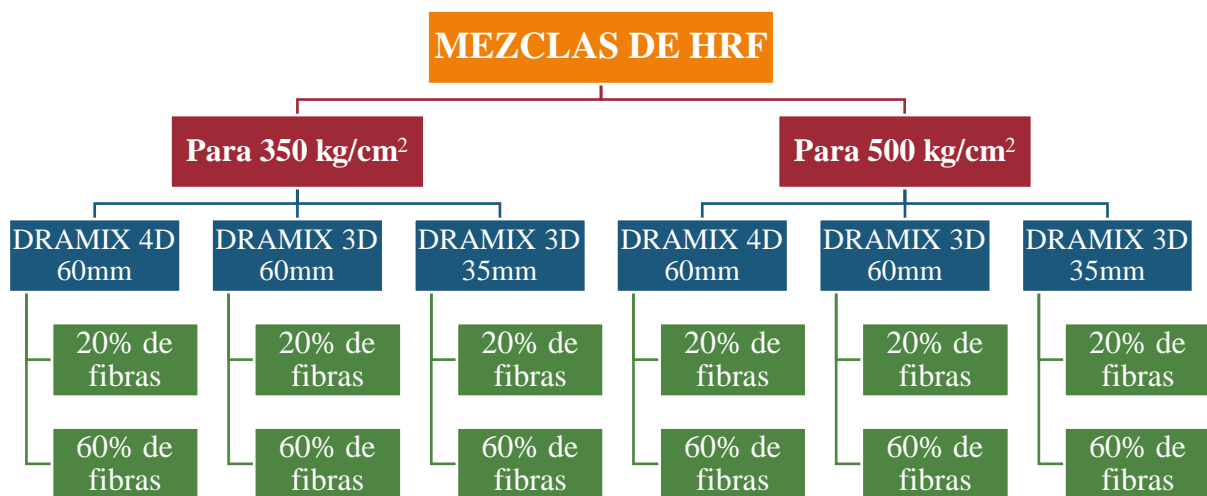


Figura 11. Esquema de los especímenes elaborados.

Fuente: Elaboración propia.





El manejo del aditivo se lo realizó de acuerdo a las especificaciones descritas en la hoja técnica del producto. Se incorporó aditivo, al 1% del peso de cemento. Debido a que el aditivo es reductor de agua, se redujo la cantidad de agua de mezclado en un 18% para la mezcla de  $350 \text{ kg/cm}^2$  y del 7% para la de  $500 \text{ kg/cm}^2$ , con el fin de garantizar la trabajabilidad deseada, es decir que el rango de asentamiento de la mezcla esté entre los 8 cm a 12 cm. Para obtener los valores de que porcentaje de agua se debe reducir con la incorporación del 1% de aditivo, se hicieron ensayos previos de los cuales se fueron afinando estos valores hasta obtener una dosificación óptima del aditivo.

Los diferentes especímenes elaborados en el laboratorio se etiquetaron de la siguiente manera: **Resistencia a compresión del hormigón – Tipo de fibra (longitud) – Peso por  $\text{m}^3$  de fibra en el hormigón**. Así por ejemplo para el espécimen etiquetado como  $350 \text{ kg/cm}^2$  – Dramix 4D (60 mm) –  $20 \text{ kg/m}^3$ , corresponde a un hormigón elaborado con una resistencia a compresión de  $350 \text{ kg/cm}^2$ , con fibra Dramix 4D, de 60 mm de longitud, con un proporcionamiento de 20 kg por  $\text{m}^3$  de hormigón.

### 3.2.2 Proceso empleado para la fabricación del HRF

Para la fabricación del HRF se hizo modificaciones al procedimiento expuesto en la ASTM C 192, 2016, pues para hormigones con fibras se especifica en el ACI committee 544, 2008, que las fibras deben mezclarse aproximadamente por 5 minutos. A continuación, se expone el procedimiento empleado para la realización del hormigón.

En la mezcladora mecánica, previamente humedecida, se colocó el agregado grueso con aproximadamente  $2/3$  de agua, se mezcló el material por un minuto; luego se colocó la arena y se mezcló por un minuto; inmediatamente se colocó el cemento con el resto del agua, en la cual previamente fue diluido el aditivo, y se mezcló por tres minutos; se retiró el material que quedó pegado en las paredes de la máquina, procurando que esta acción se logre completamente en



un periodo de un minuto; en seguida se colocó las fibras y se dejó que los materiales se mezclen completamente bien por unos 5 minutos. Finalizado el proceso de mezclado, se colocó el hormigón en bandejas previamente humedecidas y se transportó este material al interior del laboratorio de suelos de la facultad, donde se procedió a colocar en los respectivos moldes.



Figura 12. Proceso de mezclado.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3 Moldeo y curado de las muestras de HRF

Para nuestro caso de estudio el método de compactación seleccionado corresponde al método por varillado, Tabla 8. Para el moldeo de los especímenes cilíndricos se requiere de una varilla de diámetro 1 cm, y para los especímenes prismáticos se requiere de una varilla de diámetro de 1.6 cm, Tabla 9, pero debido a la disponibilidad de varillas en el laboratorio se usó una varilla de 1.27 cm para el moldeo de ambos tipos de especímenes.

Para el curado inicial, los especímenes reposaron a temperatura ambiente por un periodo de 24 horas además, se cubrieron los moldes con un plástico para evitar la pérdida de humedad del hormigón. Luego de las 24 horas de fundido el hormigón se procedió a desmoldar los especímenes y colocarlos en la piscina de curado, llena de agua potable a temperatura ambiente.

#### 3.2.3.1 Especímenes cilíndricos

Se emplearon moldes cilíndricos de 10 cm de diámetro y de 20 cm de altura. El proceso de colocación de material consistió en lo siguiente: Se colocó el hormigón en cada uno de los moldes, aproximadamente hasta un poco más arriba que la mitad, luego se compactó 25 golpes,



en seguida con un combo de goma se dio 12 golpes distribuidos en la cara exterior del molde. Se siguió el mismo procedimiento para la segunda capa. Posteriormente se enrasó la superficie del molde con la ayuda de un bailejo.



Figura 13. Especímenes cilíndricos elaborados.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3.2 Especímenes prismáticos

Se empleó moldes prismáticos de acero, con dimensiones de 15 cm de base, 15 cm de altura y 60 cm de largo. El vertido del material se lo realizó de la siguiente manera: Se colocó la primera capa de hormigón en cada uno de los tres moldes, luego se procedió a compactar con 60 golpes, distribuidos uniformemente en la superficie del molde, posterior a ello se dio con el mazo de goma 30 golpes sobre las caras del molde con el fin de rellenar todos los posibles huecos que pudieron haber quedado tras la compactación. Se hecho la segunda capa y se repitió el mismo proceso de varillado y los golpes con el combo de goma. Una vez terminado ello, se procedió a enrasar la superficie y se colocó los moldes en un lugar seguro para su periodo de fraguado inicial. Para evitar la pérdida de agua, se taparon a los especímenes con un plástico.



Figura 14. Especímenes prismáticos elaborados.

Fuente: Elaboración propia.



### 3.3 ENSAYOS DE HRF

#### 3.3.1 Ensayo para determinar la trabajabilidad

En términos generales el proceso utilizado para determinar el asentamiento consistió en lo siguiente: Se colocó el cono de Abrams humedecido, sobre una superficie horizontal, plana y no absorbente, presionando firmemente con los pies en las agarraderas del molde. Se llenó el molde, se enrasó la superficie rodando la varilla de compactación sobre el borde superior del cono de Abrams. Se retiró el molde, levantándolo cuidadosamente en dirección vertical. Inmediatamente se midió el asentamiento determinando como la diferencia vertical entre la altura del molde y la altura medida sobre el centro de la base superior del espécimen.



Figura 15. Ensayo de trabajabilidad

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.3.2 Ensayo de resistencia a flexo-tracción

En primer lugar se marcó cada viga a las 3, 9, 15 y 21 pulgadas, con el fin de precisar los puntos de apoyo y de carga del elemento. Luego de ello, se colocó los aditamentos necesarios para el ensayo a flexión en la prensa hidráulica. Se procedió a colocar la viga sobre cada uno de los apoyos, verificando que se encuentre centrada, para evitar efectos de torsión en el elemento. Se configuró el método de ensayo, así la velocidad de ensayo fue de 50 mm/min y se programó para que la máquina pare el ensayo cuando se ha llegado a una carga inferior al 90% de la carga de rotura.



Figura 16 Ensayo a flexión de vigas

Los datos brutos de la máquina, nos dan valores de fuerza vs flecha en los puntos de aplicación de la carga, es decir se tiene datos de la flecha en el tercio de la viga. Para determinar la flecha media al centro de la viga, se realizó un ajuste lineal y uno polinómico. A continuación, se ilustra el procedimiento seguido para ambos casos.

### *Ajuste lineal*

La ecuación que define una recta, tiene la forma  $y = ax + b$ ; donde, en este caso,  $x$  representa una abscisa y  $y$  representa la flecha en un punto  $x$ . Como se conoce el valor de la flecha ( $\delta$ ) en el punto de aplicación de la carga y además se conoce que en el apoyo no se produce ninguna flecha, se evalúa la ecuación en los siguientes puntos.

- Para  $x = 3, y = 0$
- Para  $x = 9, y = \delta$
- Reemplazando en la forma de la ecuación lineal se tiene un sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas.
- Resolviendo el sistema se obtuvo una ecuación de la forma

$$y = \frac{\delta}{6}x - \frac{\delta}{2}$$

- Como el punto de interés se localiza en la mitad de la viga ( $x = 12$ ), se tiene que:



$$y = \frac{3}{2} \delta \quad (\text{Ecu. 16})$$

### ***Ajuste no lineal***

La ecuación que define a un polinomio de segundo grado tiene la forma  $y = ax^2 + bx + c$ . De la misma manera expuesta para el caso del ajuste lineal, se conocen ciertos valores, para los puntos de análisis, así:

- Para  $x = 3, y = 0$
- Para  $x = 9, y = \delta$
- Para  $x = 21, y = 0$
- Reemplazando en la forma de la ecuación polinómica de grado 2 se tiene un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas.
- Resolviendo el sistema se obtuvo una ecuación de la forma

$$y = -\frac{1}{72} \delta * x^2 + \frac{1}{4} \delta * x$$

- Como el punto de interés se localiza en la mitad de la viga ( $x = 12$ ), se tiene que:

$$y = \frac{9}{8} \delta \quad (\text{Ecu. 17})$$

Para determinar el área bajo la curva flecha vs carga (tenacidad), se empleó la regla de Simpson, descrita en el numeral 2.4.2 de este documento.

### **3.3.3 Ensayo de doble punzonamiento**

Para el ensayo de doble punzonamiento se cortaron las probetas cilíndricas a la mitad para obtener los especímenes de igual diámetro y altura (10 cm de diámetro y 10 cm de altura), para ello se empleó la amoladora ubicada en el laboratorio de materiales de la Facultad de



Arquitectura. En las probetas ya cortadas, se señaló la mitad de la altura y el centro de la base circular. Se pegaron los punzones, de 2.5 cm de diámetro y 2 cm de altura, en ambas caras del cilindro. Se pusieron soportes alrededor de la probeta para poder colocar extensómetro radial, pues el aparato que existen en el laboratorio de suelos de la facultad de Ingeniería consiste en un set de 3 anillos, en los cuales los dos anillos exteriores corresponden a los extensómetros longitudinales y el anillo de la mitad, que se soporta gracias a los anillos exteriores, corresponde al extensómetro radial, necesitado para la realización del ensayo.



Figura 17. Extensómetro radial

Fuente: Elaboración propia.

Una vez instalado el equipo con los sensores respectivos se colocó el espécimen junto con los punzones de acero en la máquina, y se dio carga hasta alcanzar los 10 mm de apertura.



Figura 18. Ensayo de doble punzonamiento.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión

Este se realizó con la ayuda de una prensa hidráulica, se aplicó una velocidad de 0.30 MPa/seg al ser la máxima velocidad permitida por la normativa y se procedió a dar carga hasta que la probeta alcanzó su máxima resistencia. En la mayoría de los casos se ensayaron 3



especímenes cilíndricos por cada mezcla, pues se sacrificaron probetas cilíndricas del ensayo de compresión simple para corregir errores en el ensayo de doble punzonamiento

### 3.3.5 Ensayo de módulo de elasticidad dinámico

Para determinar el módulo de elasticidad dinámico de los cilindros de hormigón se empleó el equipo PROCQ TICO. En primer lugar se colocó gel en los transductores, luego cada transductor se colocó sobre las caras de la probeta, garantizando que sean paralelas entre sí. Se inicia al equipo y se registran sus lecturas de velocidad y tiempo de recorrido de onda. Por cada probeta ensayada se realizaron 2 tomas de datos para evitar errores de cálculo.



Figura 19. Ensayo del ultrasonido

Fuente: Elaboración propia.

## 3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO

### 3.4.1 Ensayo de doble punzonamiento vs ensayo a flexo tracción de viga

Para determinar la correspondencia del ensayo a flexión de vigas y el EDP se partió de la relación expuesta en la teoría, sección 2.4.1, misma que relaciona las flechas y apertura circunferenciales para los ensayos en discusión. Así, se establece una equivalencia, de que para una apertura circunferencial de  $x$  mm en las probetas circulares corresponde a una flecha de  $0.5x$  en las vigas.

Para ello, con los datos que se obtuvo al realizar cada ensayo, se emparejaron los puntos que cumplían exactamente con esta equivalencia, con sus respectivas tenacidades. En este





contexto se afrontó el problema de que la máquina de ensayo no tomaba datos al mismo rango de deformaciones y/o flechas sino más bien cada cierto tiempo, por este motivo se descartaron algunos valores. Una vez emparejados, se procedió a graficar la tenacidad del ensayo de viga vs la tenacidad del ensayo a doble punzonamiento. Posterior a ello se determinó la correspondencia entre ambos ensayos, mediante un ajuste lineal y uno polinómico y se determinó su coeficiente de Variación.

### **3.4.2 Análisis de Covarianza, ANCOVA**

Para el análisis de covarianza se tomaron como variables dependientes la tenacidad del ensayo a flexo tracción y la tenacidad del ensayo de doble punzonamiento. Las variables independientes fueron la resistencia, el tipo de fibra, el tamaño de fibra y la proporción de fibra por cada m<sup>3</sup> de hormigón.



## CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

#### 4.1.1 Áridos

##### 4.1.1.1 Granulometría

El árido fino presenta una granulometría uniforme, con un módulo de finura de 3.37, y un error de cálculo del 0.06%, motivo por el cual se considera válido en ensayo. Como se puede observar en la figura, la granulometría cumple con la gradación establecida en la NTE INEN 872, 2012; sin embargo el valor del módulo de finura que limita la normativa está en un rango de 2.3 a 3.1, motivo por el cual para el diseño de la mezcla de hormigón se tomó como valor de módulo de finura de la arena a 3.1. A pesar de que en el sentido de módulo de finura no cumple con los límites establecidos, se decidió trabajar con esta arena por la cantidad de finos que presenta.

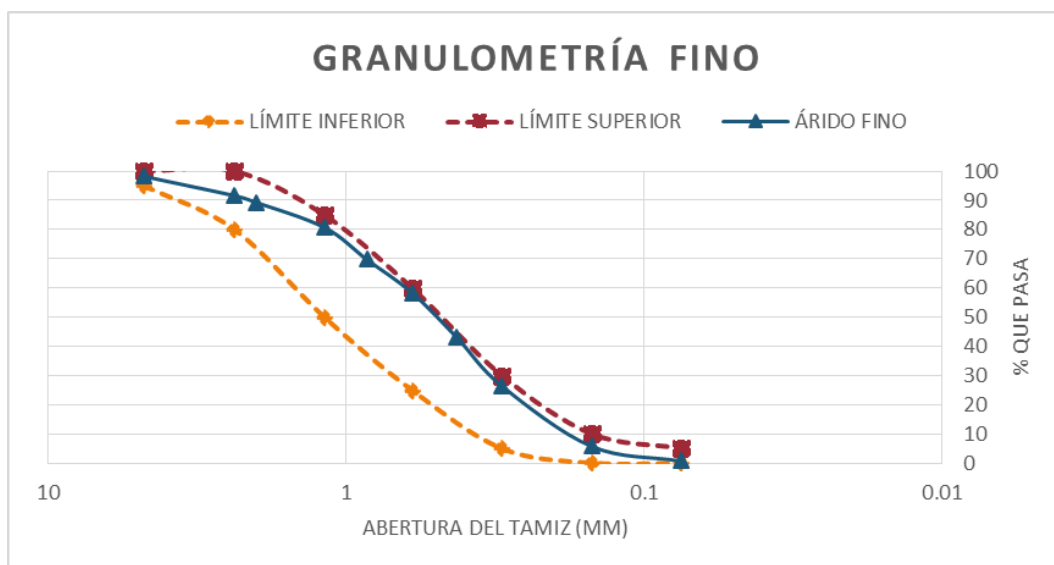


Figura 20. Granulometría árido fino.

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 14. Análisis Granulométrico árido fino.

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
No. 4	4.750	9.10	1.82	1.82	98.18
No. 8	2.360	33.10	6.62	8.45	91.55
No. 10	2.000	11.30	2.26	10.71	89.29
No. 16	1.180	42.80	8.57	19.27	80.73
No. 20	0.850	54.90	10.99	30.26	69.74
No. 30	0.600	56.80	11.37	41.62	58.38
No. 40	0.425	76.20	15.25	56.87	43.13
No. 50	0.300	82.90	16.59	73.46	26.54
No. 100	0.150	103.30	20.67	94.14	5.86
No. 200	0.075	25.30	5.06	99.20	0.80
<b>FONDO</b>		4.00	0.80	100.00	0.00
<b>TOTAL</b>		499.70			

Fuente: Elaboración propia.

El agregado grueso, al igual que el árido fino, presenta una gradación uniforme, tal como se observa en la Figura 21. El tamaño máximo nominal (TMN) del agregado fue de 3/8”, con un error en la realización del ensayo de 0.02%. Como se puede apreciar en la gráfica presentada a continuación, este agregado se encuentra dentro de los límites de gradación expuestos en la NTE INEN 872, 2012, motivo por el cual se puede utilizar directamente el material en la elaboración del hormigón, sin la necesidad de combinarlo con otro.

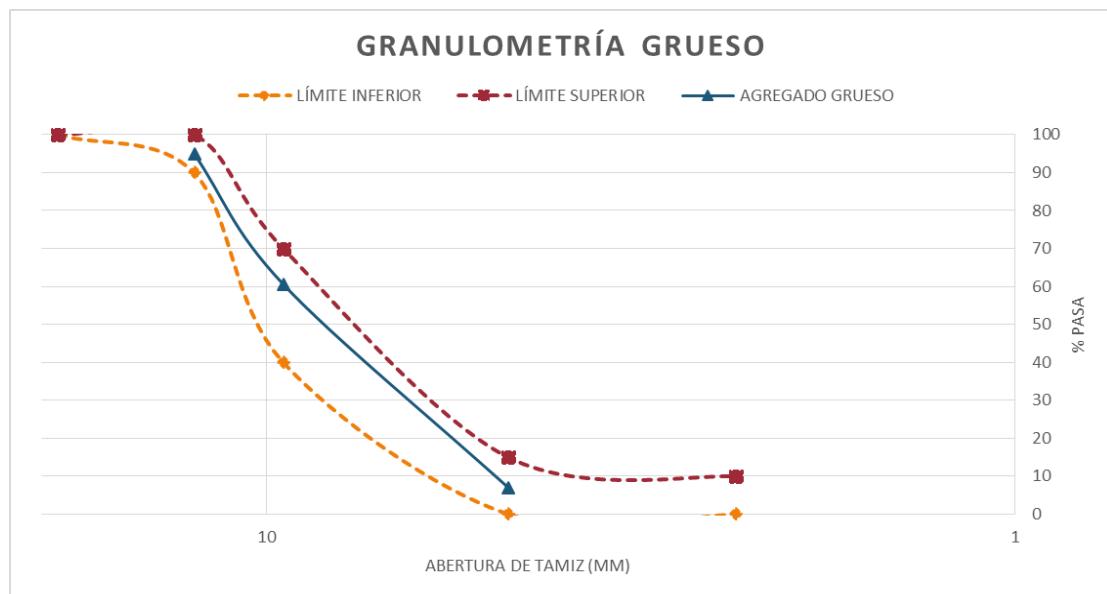


Figura 21. Granulometría agregado grueso.

Fuente: Elaboración propia



Tabla 15. Análisis granulométrico agregado grueso.

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
1/2"	12.50	76.50	5.10	5.10	94.90
3/8"	9.50	515.60	34.38	39.48	60.52
No. 4	4.75	803.80	53.60	93.08	6.92
<b>FONDO</b>		103.80	6.92	100.00	0.00
<b>TOTAL</b>		1499.70			

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.2 Absorción y Densidad relativa

Los resultados obtenidos para el árido fino se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Densidad y absorción árido fino.

<b>Densidad relativa SH</b>	2.41
<b>Densidad relativa SSS</b>	2.51
<b>Densidad relativa aparente</b>	2.68
<b>Densidad SH</b>	2407 kg/m <sup>3</sup>
<b>Densidad SSS</b>	2508 kg/m <sup>3</sup>
<b>Densidad aparente SSS</b>	2676 kg/m <sup>3</sup>
<b>Absorción</b>	4.20%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados referentes al agregado grueso se exponen en la Tabla 17.

Tabla 17. Densidad y absorción agregado grueso.

<b>Densidad relativa SH</b>	2.44
<b>Densidad relativa SSS</b>	2.54
<b>Densidad relativa aparente</b>	2.73
<b>Densidad SH</b>	2430 kg/m <sup>3</sup>
<b>Densidad SSS</b>	2537 kg/m <sup>3</sup>
<b>Densidad aparente SSS</b>	2722 kg/m <sup>3</sup>
<b>Absorción</b>	4.40%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos tanto para el agregado grueso como para el árido fino reflejan que los materiales empleados para la elaboración del hormigón presentan una densidad normal, pues (Quiroz & Salamanca, 2006), establecen que la densidad debería estar en un rango de 2.5 a 2.75.



En lo referente a la absorción, (Guzman, 2008) sugiere limitar el valor de la absorción al 5% en peso cuando se trata de hormigones que no estarán en contacto con agua, para el caso de hormigones que deben ser impermeables se limita en el 3% y se permite hasta el 10% en hormigones pobres o de menor importancia, por ello se concluye que los materiales empleados para la elaboración del hormigón son de buena calidad.

#### 4.1.1.3 Masa Unitaria

Los resultados referentes al ensayo de masa unitaria para el árido y el agregado se presentan a continuación, en las Tablas 18 y 19 respectivamente.

Tabla 18. Masa unitaria árido fino.

<b>Masa unitaria compactada</b>	1548.40
<b>Masa unitaria suelta</b>	1471.95

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Masa unitaria agregado grueso.

<b>Masa unitaria compactada</b>	1505.70
<b>Masa unitaria suelta</b>	1435.90

Fuente: Elaboración propia.

Steven H. Kosmatka (2004), indica valores de masa unitaria para áridos de peso normal están entre 1200 a 1750 kg/m<sup>3</sup>.

## 4.2 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE HRF

### 4.2.1 Diseño de la mezcla por el método del ACI

Luego de verificar que los agregados y demás materiales cumplen con los requerimientos para la elaboración de HRF, se procedió a diseñar dos mezclas patrón: la primera para una resistencia de 350 kg/cm<sup>2</sup>, con una relación agua/cemento de 0.50, Tabla 20, y la segunda para 500 kg/cm<sup>2</sup>, con una relación agua/cemento de 0.33, Tabla 21.



Como se mencionó en la sección 3.2.1, por cada mezcla se elaborarán tres vigas y seis probetas cilíndricas, que corresponde a un volumen de mezcla de  $0.06 \text{ m}^3$ , incluyendo un porcentaje de desperdicio del 30%. A continuación se muestran las dosificaciones empleadas, en las que se irá variando únicamente el tipo de fibra.

Tabla 20. Dosificación de HRF para  $f'c$  de  $350 \text{ kg/cm}^2$ .

MATERIALES	Para $20 \text{ kg/m}^3$ de fibra (kg)		Para $60 \text{ kg/m}^3$ de fibra (kg)	
	$1 \text{ m}^3$	$0.06 \text{ m}^3$	$1 \text{ m}^3$	$0.06 \text{ m}^3$
<b>Agua</b>	280.80	13.73	280.80	13.73
<b>Cemento</b>	432.62	25.80	432.62	25.80
<b>Grava</b>	797.69	47.57	797.69	47.57
<b>Arena</b>	707.08	42.17	707.08	42.17
<b>Fibras</b>	20.00	1.19	60.00	3.58
<b>Aditivo</b>	4.33	0.26	4.33	0.26

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Dosificación de HRF para  $f'c$  de  $500 \text{ kg/cm}^2$ .

MATERIALES	Para $20 \text{ kg/m}^3$ de fibra (kg)		Para $60 \text{ kg/m}^3$ de fibra (kg)	
	$1 \text{ m}^3$	$0.06 \text{ m}^3$	$1 \text{ m}^3$	$0.06 \text{ m}^3$
<b>Agua</b>	273.89	15.19	273.89	15.19
<b>Cemento</b>	647.46	38.61	647.46	38.61
<b>Grava</b>	797.69	47.57	797.69	47.57
<b>Arena</b>	542.71	32.37	542.71	32.37
<b>Fibras</b>	20.00	1.19	60.00	3.58
<b>Aditivo</b>	6.47	0.39	6.47	0.39

Fuente: Elaboración propia.

## 4.3 ENSAYOS DE HRF

### 4.3.1 Ensayo para determinar la trabajabilidad

En la Tabla 22, se presentan los resultados correspondientes al ensayo de trabajabilidad del HRF. Según (Niño Hernandez, 2010) las mezclas con un asentamiento entre 10 cm y 15 cm, son consideradas mezclas húmedas.



Tabla 22. Resultados de trabajabilidad de HRF.

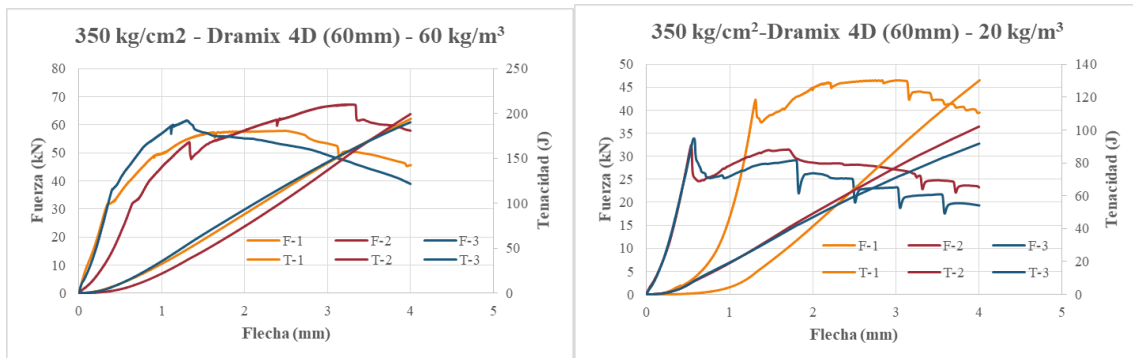
NOMBRE	ASENTAMIENTO (cm)	PROMEDIO
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	10	10.50
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	13	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	8	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	12	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	10	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	10	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	15	12.17
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	11	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	9	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	10	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	15	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	13	

Fuente: Elaboración propia.

La desviación estándar encontrada para las mezclas de 350 kg/cm<sup>2</sup> fue de 1.76%, en cambio la desviación estándar encontrada para las mezclas de 500 kg/cm<sup>2</sup> fue de 2.56%.

### 4.3.2 Ensayo de resistencia a la flexión

En la figura 22 se presentan las curvas de fuerza y tenacidad vs la flecha para los distintos especímenes ensayados. En estas gráficas se verifica que efectivamente el hormigón cumple con la condición de no ser un material homogéneo, pues a pesar de que en cada gráfica se muestran resultados para una misma mezcla, estas presentan cierta Variación entre sí.



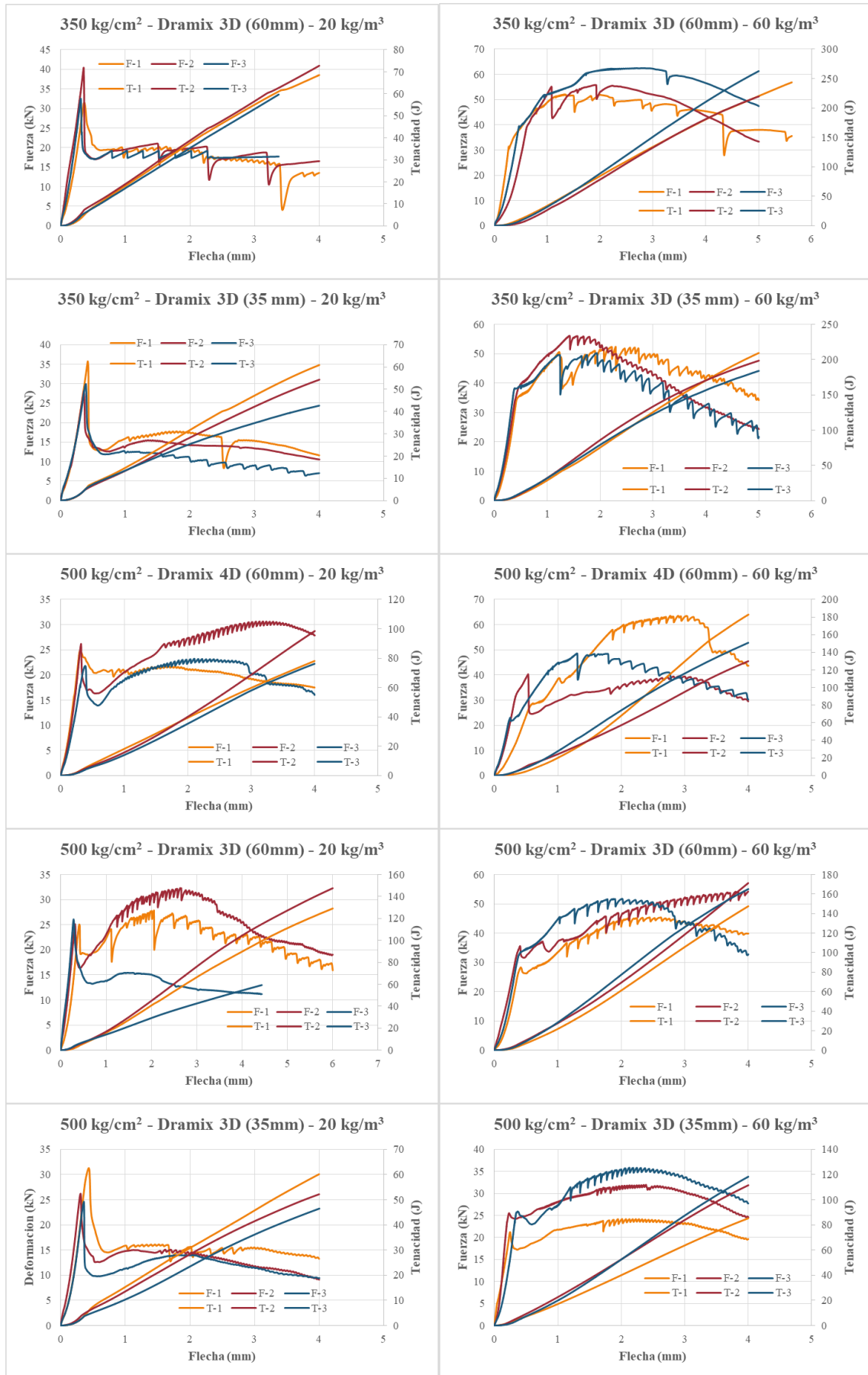


Figura 22. Curvas fuerza y tenacidad vs flecha del ensayo a flexión de vigas. /Fuente: Elaboración propia.





De las gráficas en discusión, se puede observar un tramo inicial donde el trabajo de la fibra es mínimo, pero luego de que empiezan a aparecer las primeras fisuras, las fibras empiezan a actuar absorbiendo la carga. Efectivamente se comprobó que la mayor grieta ocurre en la parte media de la viga, que de acuerdo a la (ASTM C1609, 2012), califica como prueba exitosa.

Se presentan únicamente resultados respecto al ajuste no lineal por el simple hecho de que este ajuste explica de mejor manera el fenómeno, es decir se ajusta de una mejor manera al universo de datos existente.

A continuación se presenta un resumen de las tenacidades de las diferentes muestras ensayadas, correspondientes a flechas de 0.5, 0.75, 1.5 y 3 mm. Los resultados de la tenacidad de vigas para cada muestra se presentan en el Anexo 1.

Tabla 23. Tenacidad en vigas ( $f'c$  350 kg/cm<sup>2</sup>) para los puntos de flecha de interés.

$\delta$		0.5	0.75	1.5	3
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	<i>Tenacidad</i>	5.911	12.748	33.751	74.236
	<i>Coef Variación</i>	0.28%	4.48%	1.96%	5.86%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	<i>Tenacidad</i>	10.627	18.184	57.290	142.761
	<i>Coef Variación</i>	42.59%	31.17%	16.67%	3.34%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	<i>Tenacidad</i>	8.821	13.416	27.833	55.896
	<i>Coef Variación</i>	9.80%	5.97%	5.40%	4.09%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	<i>Tenacidad</i>	9.564	19.038	56.880	139.549
	<i>Coef Variación</i>	46.72%	19.86%	8.00%	7.34%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	<i>Tenacidad</i>	7.323	10.544	21.228	41.413
	<i>Coef Variación</i>	6.61%	4.57%	7.67%	14.97%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	<i>Tenacidad</i>	9.807	19.736	55.059	127.335
	<i>Coef Variación</i>	12.18%	7.88%	6.62%	4.53%

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de variación para los ensayos diseñados para 350 kg/cm<sup>2</sup> están en un rango de 0.28% al 46.72%, resultando la media ser del 12%.

Tabla 24. Tenacidad en vigas ( $f'c$  500 kg/cm<sup>2</sup>) para los puntos de flecha de interés.

	$\delta$	0.5	0.75	1.5	3
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	6.871	11.233	26.670	62.261
	Coef Variación	14.24%	16.00%	8.33%	9.45%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	8.017	15.459	43.948	113.725
	Coef Variación	36.50%	20.63%	13.08%	15.33%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	6.850	11.148	26.532	61.892
	Coef Variación	11.09%	3.95%	16.25%	27.99%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	8.862	17.104	46.507	116.911
	Coef Variación	18.20%	15.33%	12.82%	8.84%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	6.528	9.763	20.309	41.139
	Coef Variación	18.66%	19.95%	16.83%	11.70%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	7.997	13.694	33.632	79.085
	Coef Variación	14.26%	14.16%	13.84%	14.62%

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de variación para los ensayos diseñados para 500 kg/cm<sup>2</sup> están en un rango de 3.95% al 36.50%, resultando la media ser del 15.50%.

Para determinar la resistencia a flexión máxima se empleó la ecuación 7. En la Tabla 25 se presentan los resultados obtenidos para cada mezcla. Los resultados para cada muestra se presentan en el Anexo 2.

Tabla 25. Resistencia a flexión máxima.

	P <sub>f</sub>	f <sub>ct</sub>	Coef. Variación
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	36.22	4.68	14.71%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	35.36	4.57	7.28%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	34.79	4.49	14.15%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	38.61	4.99	4.60%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	31.27	4.04	12.70%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	38.37	4.96	6.06%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	24.72	3.19	5.96%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	31.32	4.05	8.38%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	25.42	3.28	2.26%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	32.38	4.18	10.42%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	27.36	3.53	12.76%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	24.51	3.17	8.65%

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.3 Ensayo de doble punzonamiento

Los resultados obtenidos de este ensayo fueron valores referentes a cargas con su respectiva apertura circunferencial. Se observó que las grietas principales aparecen en la cara superior del espécimen, y atraviesan toda la altura de la probeta. Los modos de falla que aparecieron en los especímenes ensayados concuerdan con la teoría; en la mayoría de especímenes se formaron 3 grietas radiales, sin embargo en pocas probetas se formaron 4 grietas radiales. A continuación se presentan imágenes donde se puede apreciar distintos modos de falla que ocurrieron en los especímenes ensayados.

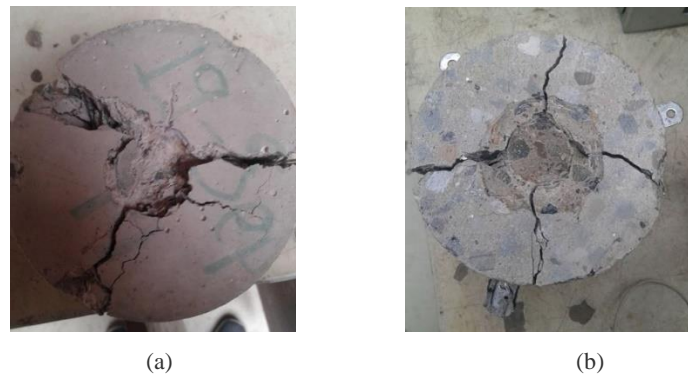
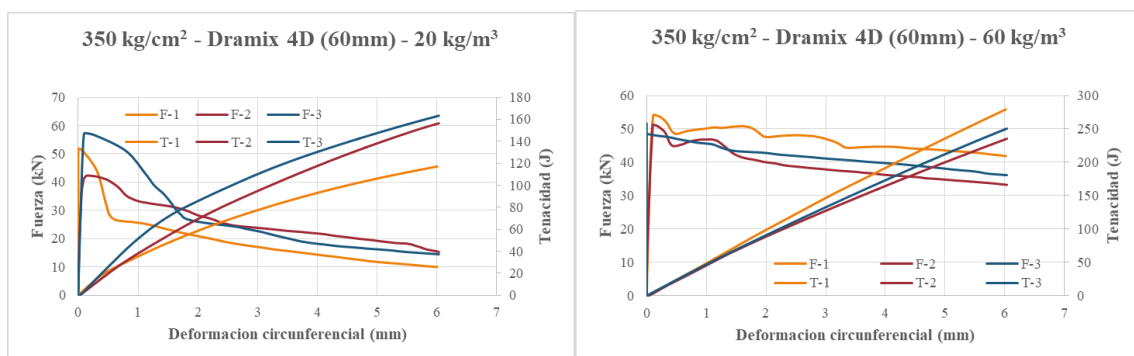


Figura 23. Modo de fallas encontradas en el ensayo de doble punzonamiento. (a) 3 grietas radiales. (b) 4 grietas radiales.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados referentes a las curvas fuerza y tenacidad vs deformación circunferencial se presenta en la Figura 24.



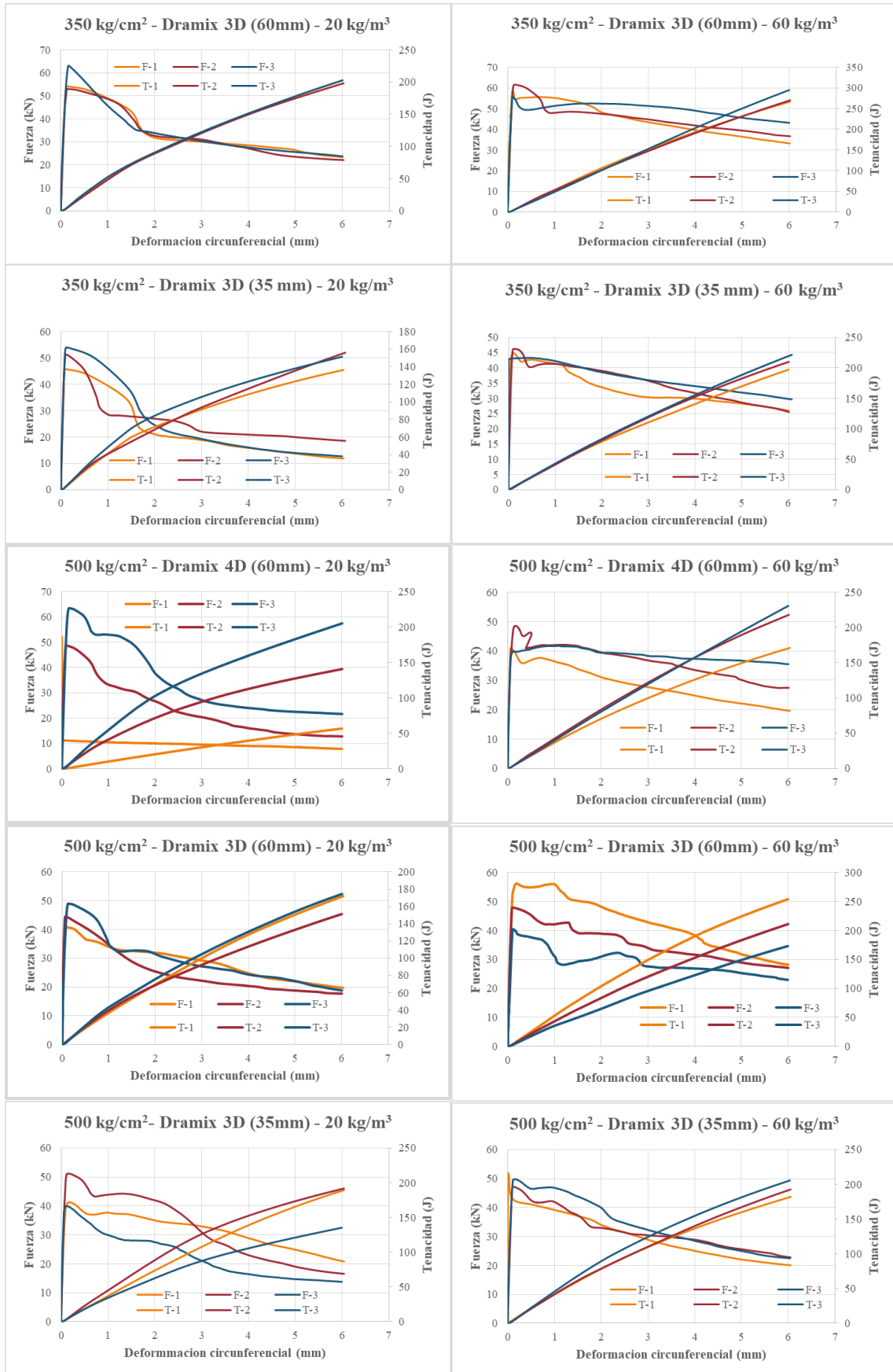


Figura 24 Curva fuerza y tenacidad vs desplazamiento circunferencial del ensayo de doble punzonamiento.

Fuente: Elaboración propia.



En general, las curvas fuerza vs deformación circunferencial presentan un comportamiento similar, independientemente del tipo de fibra y su proporcionamiento. Como se aprecia en cada figura, se puede observar que los especímenes no sufrieron deformación sino hasta alcanzar la carga máxima de rotura; inmediatamente superada la carga, las grietas empezaron a aparecer y se distribuyeron a lo largo de los especímenes. Al disminuir la carga, las grietas aumentan, y es allí donde empieza a trabajar las fibras.

A continuación se presta un resumen de las tenacidades de las diferentes muestras ensayadas, correspondientes a aperturas circunferenciales de, 1, 1.5, 3 y 6 mm. Los resultados de la tenacidad para el EDP, para cada muestra se presentan en el Anexo 3.

Tabla 26. Tenacidad en probetas ( $f'c$  350 kg/cm<sup>2</sup>) para los puntos de apertura de interés.

	$\Delta\Phi$	1	1.5	3	6
<b>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Tenacidad</b>	40.203	61.742	102.671	159.890
	<b>Coef Variación</b>	5.60%	16.51%	10.13%	3.06%
<b>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Tenacidad</b>	47.346	70.940	136.085	254.667
	<b>Coef Variación</b>	3.36%	3.25%	7.93%	8.97%
<b>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Tenacidad</b>	50.146	73.677	121.603	201.219
	<b>Coef Variación</b>	3.25%	1.54%	0.47%	1.32%
<b>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Tenacidad</b>	52.159	78.017	151.249	277.397
	<b>Coef Variación</b>	4.72%	4.19%	2.04%	5.54%
<b>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Tenacidad</b>	43.075	62.178	96.991	147.659
	<b>Coef Variación</b>	10.06%	11.91%	8.21%	7.11%
<b>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Tenacidad</b>	42.382	62.047	117.537	208.690
	<b>Coef Variación</b>	3.13%	2.20%	5.15%	5.32%

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de variación para los ensayos diseñados para 350 kg/cm<sup>2</sup> están en un rango de 0.47% al 16.51%, resultando la media ser del 5.62%.

Tabla 27. Tenacidad en probetas ( $f'c$  500 kg/cm<sup>2</sup>) para los puntos de apertura de interés.

	$\Delta\Phi$	1	1.5	3	6
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	48.539	70.584	114.932	173.012
	Coef Variación	20.81%	25.89%	24.65%	26.36%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	39.514	59.815	114.567	206.580
	Coef Variación	6.81%	7.31%	10.04%	15.23%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	39.569	55.593	99.111	165.901
	Coef Variación	10.73%	5.39%	6.06%	7.69%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	44.175	64.875	122.641	212.858
	Coef Variación	19.55%	22.24%	21.82%	19.07%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	39.247	57.515	107.834	172.158
	Coef Variación	13.76%	16.70%	18.39%	18.55%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	Tenacidad	43.313	63.993	115.174	192.981
	Coef Variación	5.53%	7.68%	7.54%	6.47%

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de variación para los ensayos diseñados para 500 kg/cm<sup>2</sup> están en un rango de 5.39% al 26.36%, resultando la media ser del 14.34%.

Con los valores de las cargas máximas, se empleó la Ecuación 8 para determinar la resistencia máxima de fisuración del hormigón. Donde se observa que independientemente del tipo de fibra y proporcionamiento, los resultados son similares. Dichos resultados se presentan en la Tabla 28. Los resultados para cada muestra se presentan en el Anexo 4.

Tabla 28. Resistencia máxima de fisuración.

	P <sub>f</sub>	f <sub>ct</sub>	Coef Variación
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	50.55	2.86	15.03%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	52.40	2.97	3.09%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	56.77	3.21	9.77%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	58.75	3.32	4.91%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	50.34	2.85	8.31%
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	44.75	2.53	3.28%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	54.83	3.10	13.93%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	43.78	2.48	9.48%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	44.73	2.53	9.27%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	48.20	2.73	16.37%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	44.13	2.50	13.93%
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	49.63	2.81	4.75%

Fuente: Elaboración propia.



El coeficiente de variación para los ensayos diseñados para  $500 \text{ kg/cm}^2$  están en un rango de 5.39% al 26.36%, resultando la media ser del 14.34%.

#### 4.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión

La información referente a la geometría de las probetas cilíndricas elaboradas se presenta en la Tabla 29. Con dicha información se pudo determinar que la densidad del HRF para la resistencia de  $350 \text{ kg/cm}^2$  fue de  $2341 \text{ kg/m}^3$  y la densidad dl HRF para la resistencia de  $500 \text{ kg/cm}^2$  fue de  $2323 \text{ kg/m}^3$ . Más información referente a la geometría de los cilindros se encuentra en el Anexo 5.

Tabla 29. Densidad del hormigón.

	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	PESO (kg)	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )
$350 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	10.010	19.969	3.698	2353.18
$350 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	9.988	20.014	3.662	2335.06
$350 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	10.008	19.977	3.569	2270.75
$350 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	9.995	20.001	3.696	2354.92
$350 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	10.035	20.046	3.711	2340.92
$350 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	10.043	20.051	3.800	2391.90
$500 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	10.053	19.989	3.677	2317.16
$500 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	10.043	19.988	3.717	2347.37
$500 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	10.040	20.021	3.726	2350.70
$500 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	10.090	20.028	3.732	2330.23
$500 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	10.080	20.012	3.696	2314.54
$500 \text{ kg/cm}^2$ - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	10.188	19.982	3.710	2277.58

Fuente: Elaboración propia.

La desviación estándar para la densidad del HRF fue de 39.75% para la resistencia de  $350 \text{ kg/cm}^2$  y para la resistencia de  $500 \text{ kg/cm}^2$  fue de 26.77%, por lo que se puede inferir que existieron anomalías en el proceso de fundición del hormigón en términos del número de golpes que se dio por cada capa.



En la Tabla 30 se presenta los resultados del ensayo de compresión simple. Se observa que la dosificación elaborada estuvo correcta, pues la media de resistencia de las mezclas es bastante similar a la resistencia para la cual fue diseñada.

Tabla 30. Resultados del ensayo a compresión simple.

	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{PROM}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	374	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	342	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	371	366
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	364	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	365	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	378	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	465	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	480	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	538	498
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	513	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	500	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	492	

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo 6, se presentan los resultados de resistencia a compresión de cada muestra elaborada. La desviación estándar para las probetas diseñadas con resistencia de 350 kg/cm<sup>2</sup> resultó ser de 12.66%, en cambio para las probetas diseñadas para la resistencia de 500 kg/cm<sup>2</sup> la desviación estándar fue de 25.79.

#### 4.3.5 Ensayo de módulo de elasticidad dinámico

En la Tabla 31, se presentan los resultados obtenidos para el ensayo del módulo de elasticidad dinámico del HRF, por el ultrasonido. Para ello, se empleó la ecuación 9, tomando como coeficiente de Poisson el valor de 0.20 (Steven H. Kosmatka, 2004).





Tabla 31. Resultados del ensayo de ultrasonido

	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD (m/s)	TIEMPO (μs)	MOD ELAST DINAMICO (kg/cm <sup>2</sup> )
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	2353	46.42	4285	465186
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	2335	48.48	4105	503583
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	2271	47.35	4155	467168
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	2355	45.97	4337	456514
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	2341	47.13	4243	477139
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	2392	46.63	4287	477214
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	2317	46.60	4275	461960
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	2347	46.18	4312	459483
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	2351	46.92	4298	474708
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	2330	45.83	4383	449202
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	2315	45.98	4350	449149
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	2278	47.92	4205	479764

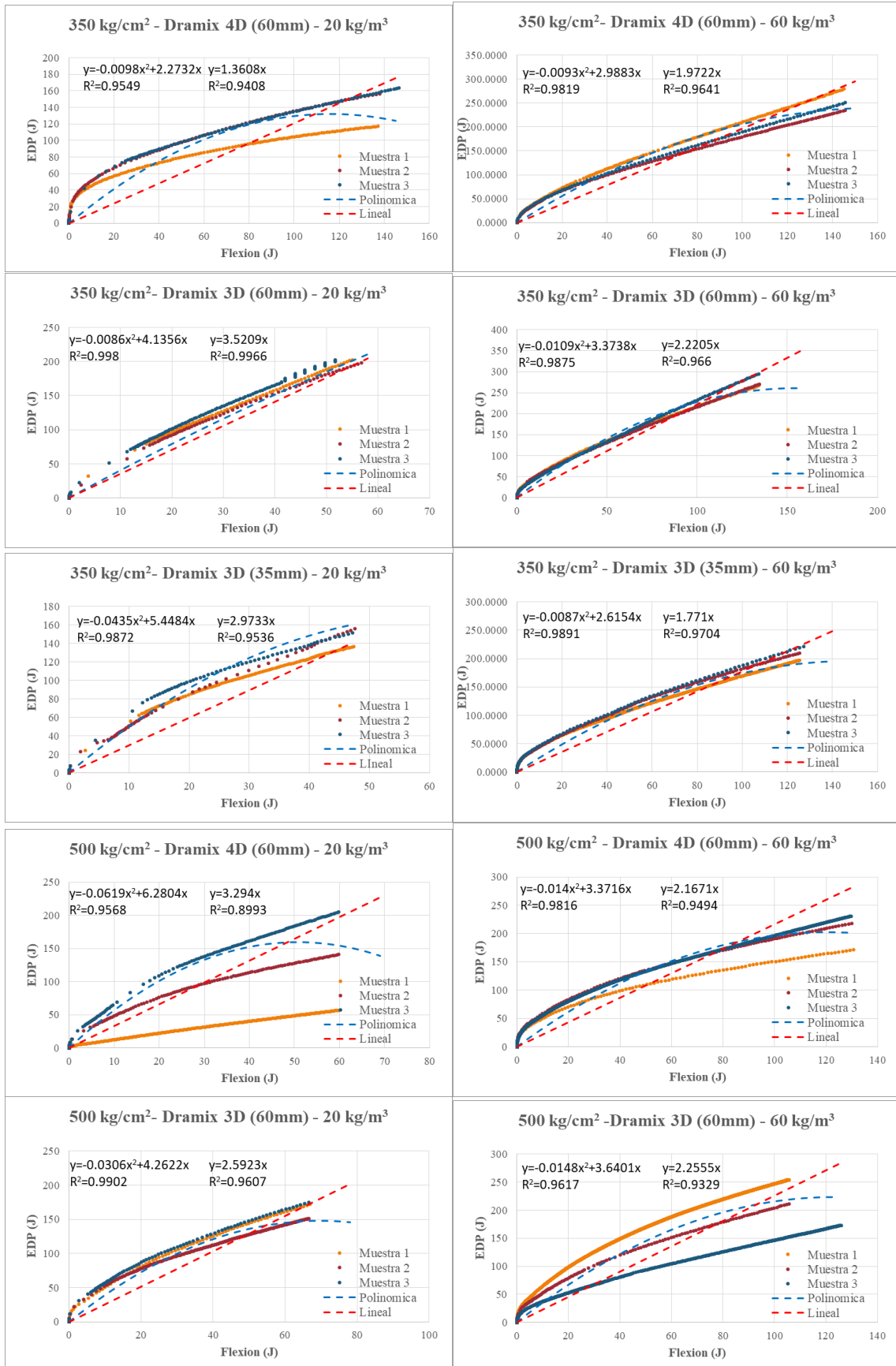
Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo 7, se presentan los resultados de este ensayo para cada muestra elaborada.

## 4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO

### 4.4.1 Ensayo de doble punzonamiento vs ensayo a flexo tracción de vigas

Para ello se debe tener muy claro cuáles son las variables de interés resultantes de cada ensayo para establecer la correspondencia entre sí. En este trabajo, como se mencionó con anterioridad las variables de interés son la tenacidad medida desde la carga máxima para el ensayo de doble punzonamiento y la absorción de energía para el caso del ensayo a flexión. Las tenacidades se relacionan de forma que igualando la flecha y la deformación circunferencial mediante la Ecuación 12, se relacionen a su vez las tenacidades correspondientes a estas deformaciones, representándolas en el eje x e y respectivamente. En la figura 25, se presentan los resultados y las gráficas obtenidas, con sus respectivos análisis de regresión lineal y polinómica.



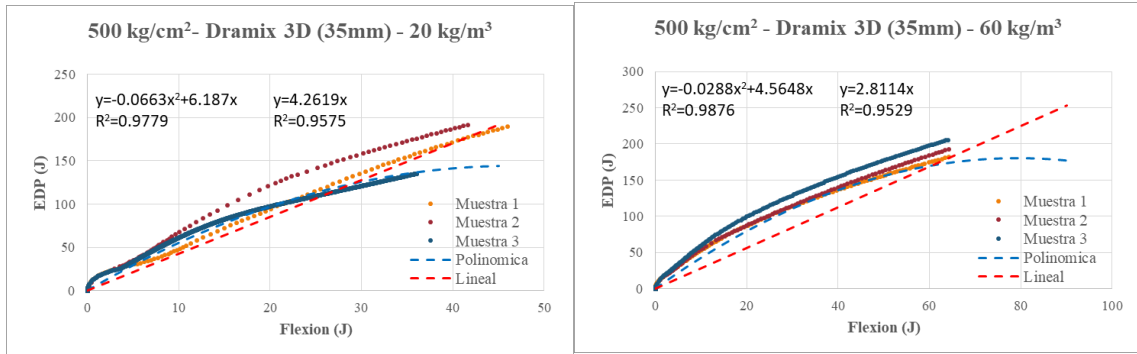


Figura 25. Relación entre la tenacidad del ensayo a flexión y el EDP.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Resumen de los ajustes lineal y polinómico de la relación entre la tenacidad del ensayo a flexión y el EDP

AJUSTE	POLINOMICO			LINEAL	
	NOMBRE	a	b	R <sup>2</sup>	m
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	-0.0098	2.2732	0.9549	1.3608	0.9408
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	-0.0093	2.9883	0.9819	1.9722	0.9641
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	-0.0086	4.1356	0.998	3.5209	0.9966
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	-0.0109	3.3738	0.9875	2.2205	0.966
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	-0.0435	5.4484	0.9872	2.9733	0.9536
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	-0.0087	2.6154	0.9891	1.771	0.9704
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	-0.0619	6.2804	0.9568	3.294	0.8993
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	-0.014	3.3716	0.9816	2.1671	0.9494
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	-0.0306	4.2622	0.9902	2.5923	0.9607
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	-0.0148	3.6401	0.9617	2.2555	0.9329
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	-0.0663	6.187	0.9779	4.2619	0.9575
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	-0.0288	4.5648	0.9876	2.8114	0.9529

Fuente: Elaboración propia.

De las gráficas se puede observar que los valores se ajustan mejor a una tendencia polinómica de segundo orden, pues al compararla con la lineal, esta tiene un valor R<sup>2</sup> mínimo de 0.8993 en comparación con el R<sup>2</sup> del ajuste polinómico, cuyo valor mínimo es de 0.9549. Para ambas regresiones, estos valores mínimos de R<sup>2</sup> corresponden a una resistencia de diseño alta (500 kg/cm<sup>2</sup>); de allí se concluye que para valores de resistencia mayores, existe mayor dispersión en los valores de tenacidad para los diferentes especímenes de una misma mezcla, por lo tanto el valor de R<sup>2</sup> disminuye. Siendo así que el R<sup>2</sup> promedio para una resistencia de 350 kg/cm<sup>2</sup> es de 0.9831 y para una resistencia de 500 kg/cm<sup>2</sup>, el valor de R<sup>2</sup> es de 0.976.



A continuación, se presenta graficas que en las que cada línea representa las regresiones tanto lineal como polinómica que se obtuvieron de la nube de puntos procedentes de la relación planteada entre los ensayos de doble punzonamiento y de flexión para cada dosificación.

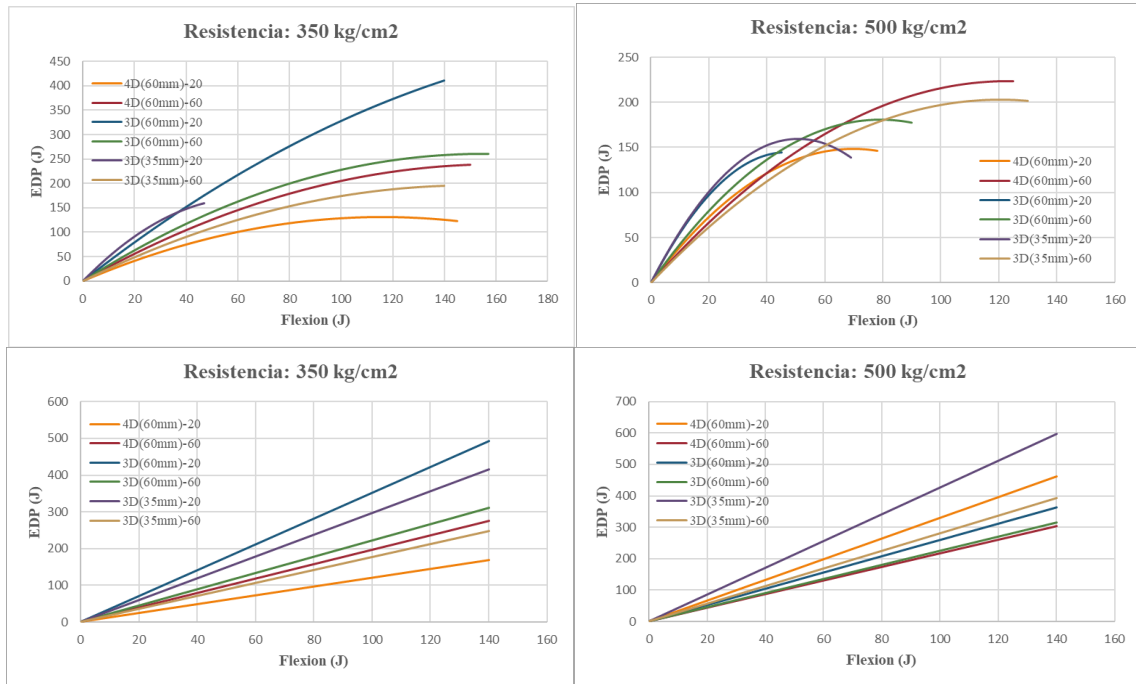


Figura 26 Correlaciones

Si bien no existe una clara relación entre las regresiones correspondientes a cada dosificación, se puede calcular unos coeficientes promedio.

#### 4.4.2 Análisis de Covarianza, ANCOVA.

Con el análisis de covarianza se puede diferenciar las variables más influyentes en la tenacidad para el ensayo a flexión y tenacidad para el EDP.

Para el ensayo a flexión de viga se puede notar que el porcentaje de fibras es de mayor influencia mientras que para el EDP la variable más influyente es la resistencia del hormigón.

Tabla 33. *Análisis de covarianza para la tenacidad de la viga.*

	<i>T<sub>VIGA</sub></i>	<i>f'c</i>	<i>Longitud</i>	<i>%</i>
<i>T<sub>VIGA</sub></i>	356.3221	0	0	0
<i>f'c</i>	54.4435	5532.5108	0	0
<i>Longitud</i>	24.9044	52.2991	154.9193	0
<i>%</i>	90.3173	-62.4898	12.6736	379.5871

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. *Análisis de covarianza para la tenacidad del cilindro*

	<i>T<sub>EDP</sub></i>	<i>f'c</i>	<i>Longitud</i>	<i>%</i>
<i>T<sub>EDP</sub></i>	2183.5348	0	0	0
<i>f'c</i>	519.2205	5620.1635	0	0
<i>Longitud</i>	20.62165	-122.4813	148.6534	0
<i>%</i>	165.8436	201.0168	-10.7890	395.2557

Fuente: Elaboración propia.



## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

#### 5.1.1 Diseño y fabricación de las mezclas de HRF.

Se determinó que la clase de fibra y la proporción que se añade a la mezcla de hormigón, no influyen significativamente en la resistencia a la compresión. Ya que se verificó que para resistencias mayores ( $500 \text{ kg/cm}^2$ ), la desviación estándar es menor (26.77%) comparándolo con una resistencia menor ( $350 \text{ kg/cm}^2$ ).

Se observó que existen variaciones en la densidad del concreto; esto debe principalmente a la cantidad de fibras por  $\text{m}^3$  de hormigón y a la energía de compactación utilizada en los procesos de varillado, resultando más denso el hormigón con un proporcionamiento de  $60 \text{ kg/m}^3$  de fibras.

#### 5.1.2 Ensayo a flexo tracción en vigas.

La fuerza a la que ocurre la primera fisura en la viga, depende de la proporción de fibras en la dosificación del hormigón. En 8 de los 12 ensayos realizados se verificó que para mayores proporciones de fibra en la mezcla, la fuerza a primera fisura resultó ser mayor, sin embargo se determinó que para mayor resistencia de diseño, la fuerza absorbida es menor, es decir, para las resistencias de  $350 \text{ kg/cm}^2$  y  $500 \text{ kg/cm}^2$ , las muestras de cada grupo se fisuraron alrededor de 35.77 kN y 27.62 kN respectivamente.

En las curvas fuerza vs flecha, se notó que la fuerza a flexo tracción luego del punto de primera fisura, decrece cuando el hormigón tiene una proporción de  $20 \text{ kg/m}^3$  de fibras, por el contrario, para dosificaciones de  $60 \text{ kg/m}^3$  no existe una caída de fuerza sino más bien crece,



con una menor pendiente, denotando así que para el primer caso la viga presenta una falla frágil y para el segundo presenta una falla dúctil.

La tenacidad del hormigón, definida como la capacidad de absorción de energía del hormigón, se vio influenciada principalmente por el proporcionamiento y longitud de fibra, pues a mayor proporcionamiento ( $60 \text{ kg/m}^3$ ) y longitud de fibra (60 mm), el hormigón absorbía más energía comparándolo con una proporción ( $20 \text{ kg/m}^3$ ) y una longitud (35 mm) menor. También se verificó que para una resistencia de hormigón de  $350 \text{ kg/cm}^2$  el coeficiente de variación fue de 12%, mientras que para una resistencia de  $500 \text{ kg/cm}^2$  el coeficiente de variación fue de 16%.

### **5.1.3 Ensayo de doble punzonamiento en cilindros.**

La fuerza pico a la que ocurre la primera fisura está influenciada por la cantidad de fibra por  $\text{m}^3$  de hormigón. Igual que para el caso de vigas, se encontró, que para 8 de 12 ensayos realizados, las mayores proporciones de fibra en la mezcla confieren una fuerza a primera fisura mayor. En particular se demostró que la fuerza pico para las dos dosificaciones de  $350 \text{ kg/cm}^2$  y  $500 \text{ kg/cm}^2$ , están alrededor de 52.26 kN y 47.55 kN, la pequeña diferencia de las fuerzas pico se debe a que el área del punzón, con 2.5 cm de diámetro, es significativamente menor en comparación con el área del cilindro. Además, tanto para el caso del ensayo a flexión y el ensayo de doble punzonamiento las cargas pico, correspondientes a la resistencia más alta, son menores; esto indica la fragilidad del hormigón cuando este es más resistente.

En las curvas de fuerza vs deformación circunferencia, se determinó que el pico a primera fisura, no depende del tipo ni la cantidad de fibras, sino más bien del tamaño de la fibra y de la resistencia a compresión, pues las fibras hasta este punto no realizan ningún trabajo.



El ensayo de doble punzonamiento, tiene una baja dispersión entre sus resultados, en términos de tenacidad. Este ensayo tiene un coeficiente de variación más bajo comparado con el ensayo a flexo tracción. Su coeficiente de variación está entre el 6% y 14% para resistencias de diseño de  $350 \text{ kg/cm}^2$  y  $500 \text{ kg/cm}^2$ , respectivamente.

#### **5.1.4 Análisis comparativo entre el ensayo de flexo tracción y el ensayo de doble punzonamiento.**

Con las ecuaciones derivadas de las regresiones tanto lineal como polinómica, se pudo relacionar con alto grado de confianza el ensayo de Doble Punzonamiento con el ensayo de Flexión de Viga con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) que están en el rango de 0.899 a 0.998, los cuales se consideran excelentes. Las relaciones encontradas corresponden exclusivamente a cada dosificación de hormigón reforzado con fibras ensayadas, por lo que se encontró 12 diferentes ecuaciones que relacionan ambos ensayos mencionados.

Para encontrar estadísticamente que variable es más significativa para el cálculo de la tenacidad del hormigón, se utilizó la metodología de análisis de covarianza ANCOVA. Se encontró que para el caso del ensayo a flexión la variable estadísticamente más significativa es el porcentaje de fibra que se encuentra en la matriz del hormigón, mientras que para el ensayo de doble punzonamiento, la variable estadísticamente más significativa es la resistencia del hormigón. Esto se da debido a las singularidades de cada ensayo.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

En la actualidad gran parte de los dispositivos usados los ensayos de materiales, cuentan con una alta resolución en la toma de datos, esto representa ventajas e inconvenientes a la vez. Por lo que, para un mejor manejo de datos para estos tipos de ensayos se recomienda configurar el software de ensayo para que tome datos cada cierta unidad de deformación y no cada





intervalo de tiempo, como se lo configuro en el presente trabajo. Además, se debería programar el software para que automáticamente arroje datos de fuerza, carga, tenacidad, etc., para que sobre la marcha ir corrigiendo errores, descartando o aprobando las probetas que se utilicen.

En cuanto a los implementos necesarios, se recomienda el uso de un extensómetro longitudinal para medir la flecha real en el centro de la viga, para no aproximarla como se lo hizo en este caso.

Para los ensayos de doble punzonamiento, se recomienda realizar los ensayos con un extensómetro perimetral o de cadena, ya que los usos de extensómetros radiales dan una medida indirecta de la apertura de las fisuras en los cilindros.

Para posteriores ensayos, sería útil verificar la variación de las tenacidades de un tipo de fibra, para varias resistencias de hormigón, así poder aproximar el comportamiento que pudiese tener el material con las diferentes condiciones. Eso también se podría realizar manteniendo constante la resistencia del hormigón y variando el proporcionamiento de fibras, para que de la misma manera poder calcular un aproximado cuando esta variable se cambie.



## BIBLIOGRAFÍA

- ACI committee 544, 3R. (2008). *Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete*. Farmington Hills.
- ASTM C1116. (2015). *Standard specification for fiber reinforced concrete and chorcrete*. West Conshohocken.
- ASTM C1602. (2012). *Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete*.
- ASTM C1609. (2012). *Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading)*.
- ASTM C192. (2016). *Práctica normalizada para preparación y curado de espécimene de concreto para ensayo en laboratorio*.
- ASTM C211. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight and Mass Concerete*.
- ASTM C470. (2015). *Standard Specification for molds for forming concrete test cylinders vertically*.
- ASTM C494. (2008). *Especificación normalizada de aditivos químicos para concreto*.
- ASTM C597. (2016). *Standard test method for pulse velocity through concrete*.
- ASTM A820. (2016). *Standard specification for steel fibers for fiber reinforced concrete*.
- NTE INEN 1108. (2011). *Agua potable. Requisitos*. Quito.
- NTE INEN 152. (2012). *Cemento portland. Requisitos*. Quito.
- NTE INEN 1573. (2010). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*. Quito.
- NTE INEN 1576. (2011). *Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo*. Quito.
- NTE INEN 1578. (2010). *Hormigón de cemento hidraulico. Determinación del asentamiento*. Quito.
- 1NTE INEN 58. (2009). *Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat*. Quito.
- NTE INEN 2380. (2011). *Cementos hidráulicos. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*. Quito.
- NTE INEN 2518. (2010). *Morteros para unidades de mampostería. Requisitos*. Quito.
- ACI 318. (2014). *Requisitos de reglamento para concreto estructural*. Farmington Hills.



- NTE INEN 490. (2011). *Cementos hidráulicos compuestos. Requisitos*. Quito.
- NTE INEN 694. (2010). *Hormigón y áridos para elaborar hormigón. Terminología*. Quito.
- UNE 83515. (2010). *Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona*. Barcelona.
- NTE INEN 857. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Quito.
- NTE INEN 858. (2010). *Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos*. Quito.
- Aire, C., Molins, C., Aguado, A., & Zárata, G. (2014). *Nuevo método de prueba para determinar la resistencia a tracción indirecta de concreto reforzado con fibra empelleando el ensayo de doble punzonamiento*. Puerto Vallarta, Jalisco: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Bernard, O., & Brühwiler, E. (2002). Influence of autogenous shrinkage on early age behaviour of structural elements consisting of concretes of different ages. *Materials and structures*, 550-556.
- Casali, R., Carava, M., Acevedo, C., Miño, J., Bizzoto, M., & Torra, R. (2007). Predicción de la resistencia a la compresión y determinación de propiedades estructurales a partir de ensayos no destructivos. *Asociación argentina de ensayos no destructivos y estructurales*.
- Chen, W. (1970). Double punch test and tensile strength of concrete. *ACI Material Journal*, 993-995.
- DRAMIX. (2017). *Ficha Técnica de fibras Dramix*.
- Dupont, D., & Vandewalle, L. (2015). Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites*, 391-398.
- Espinoza Torres, V. (2017). *Equivalencia entre ensayo de panel EFNARC y el ensayo de tracción indirecta por doble punzonamiento*. Valparaiso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Fernández Cánovas, M. (1982). Hormigones reforzados con fibras de acero. *Informes de la Construcción*, 5-17.
- Guzman, L. (2008). *Guía de laboratorio de materiales*. Santiago: Universidad de Santiago de Chile.
- Jovelles, D. (2015). *Estudio técnico experimental de hormigones con fibras de polipropileno, fibras metálicas y áridos reciclados para su utilización en pavimentos de baja intensidad de tráfico*. Valencia: Universidad Pontificia de Valencia.
- Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2009). *Materiales para ingeniería civil*. Madrid: Pearson Education.
- Mármol Salazar, C. (2010). *Hormigones con fibras de acero. Características mecánicas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Mora, F. (2008). *Distribución y orientación de fibras en dovelas, aplicando el Ensayo Barcelona*. España: Universidad Politécnica de Cataluña.



- Moreno, E., & Fernández, M. (1997). Dosificación de hormigón reforzado con fibras de acero. *Materiales de Construcción*, 10-26.
- Niño Hernandez, J. (2010). *Tecnología de Concreto. Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas* (Tercera ed.). Bogora: ASOCRETO.
- NTE INEN, 2. (2015). *Hormigón reforzado con fibra. Requisitos y métodos de ensayo*. Quito.
- NTE INEN, 6. (2011). *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos fino y grueso*. Quito.
- NTE INEN, 8. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino*. Quito.
- NTE INEN, 8. (2012). *Áridos para hormigón. Requisitos*. Quito.
- NTE, I. . (2012). *Áridos para hormigón. Requisitos*. Quito.
- Orlando Giraldo, B. (1987). *Gui practica para el diseño de mezclas de hormigón*. Medellín.
- Quiroz, M., & Salamanca, L. (2006). *Apoyo para la enseñana y aprendizade en la asignatura de "Tecnología del Hormigón"*. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón.
- Saludes, S., Aguado, A., & Molins, C. (2007). *Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (ensayo Barcelona)*. Barcelona.
- Sánchez, J., Cobo, A., Díaz, B., & Mateos, I. (2015). Estudio experimental del comportamiento a compresión de hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero. *ANALES de Edificación*, 1-11.
- Sika. (2014). *Hoja técnica de Producto Sikament HE 200*.
- Solution, S. (2018). *Statistics Solutions*. From [www.statisticssolutions.com](http://www.statisticssolutions.com)
- Zaiontz, C. (2013). *Real Statistics Using Excel*. From <http://www.real-statistics.com>



ANEXOS

ANEXO 1. TENACIDAD EN VIGAS.

	$\delta$	0.5	0.75	1.5	3		$\delta$	0.5	0.75	1.5	3
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	0.425	1.569	7.616	87.490	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	7.880	13.140	28.681	59.814
	M2	5.899	12.344	34.218	77.312		M2	6.805	10.988	27.043	68.974
	M3	5.923	13.152	33.284	71.159		M3	5.927	9.571	24.286	57.994
	PROM	5.911	12.748	33.751	74.236		PROM	6.871	11.233	26.670	62.261
	CV	0.003	0.045	0.020	0.059		CV	0.142	0.160	0.083	0.095
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	10.669	20.753	59.521	145.000	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	4.763	11.777	40.895	129.813
	M2	4.335	11.686	46.822	137.281		M2	10.433	17.336	40.370	95.210
	M3	10.586	22.112	65.528	146.004		M3	8.855	17.264	50.577	116.152
	PROM	10.627	18.184	57.290	142.761		PROM	8.017	15.459	43.948	113.725
	CV	0.426	0.312	0.167	0.033		CV	0.365	0.206	0.131	0.153
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	8.486	13.359	27.976	55.067	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	6.026	10.859	27.670	66.794
	M2	9.802	14.245	29.258	56.725		M2	7.002	11.655	30.159	76.235
	M3	8.173	12.645	26.265	59.685		M3	7.522	10.930	21.766	42.648
	PROM	8.821	13.416	27.833	55.896		PROM	6.850	11.148	26.532	61.892
	CV	0.098	0.060	0.054	0.041		CV	0.111	0.040	0.162	0.280
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	14.244	22.376	59.780	134.282	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	7.120	14.113	40.263	105.844
	M2	5.343	14.933	51.633	133.005		M2	10.302	19.014	47.119	118.576
	M3	9.106	19.804	59.228	151.359		M3	9.164	18.184	52.140	126.313
	PROM	9.564	19.038	56.880	139.549		PROM	8.862	17.104	46.507	116.911
	CV	0.467	0.199	0.080	0.073		CV	0.182	0.153	0.128	0.088
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	7.793	11.057	22.979	47.167	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	7.580	11.572	23.334	45.758
	M2	6.826	10.102	20.945	42.226		M2	6.810	10.016	20.990	41.504
	M3	7.350	10.472	19.758	34.846		M3	5.193	7.701	16.602	36.155
	PROM	7.323	10.544	21.228	41.413		PROM	6.528	9.763	20.309	41.139
	CV	0.066	0.046	0.077	0.150		CV	0.187	0.199	0.168	0.117
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	8.577	17.969	51.370	125.883	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	7.219	11.938	28.356	65.895
	M2	9.882	20.344	58.663	133.688		M2	9.307	15.775	37.160	83.904
	M3	10.961	20.895	55.145	122.434		M3	7.467	13.370	35.378	87.455
	PROM	9.807	19.736	55.059	127.335		PROM	7.997	13.694	33.632	79.085
	CV	0.122	0.079	0.066	0.045		CV	0.143	0.142	0.138	0.146



**ANEXO 2. RESISTENCIA A FLEXIÓN MÁXIMA.**

	Muestra	P <sub>f</sub>	f <sub>ct</sub>		Muestra	P <sub>f</sub>	f <sub>ct</sub>
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	42.32	5.47	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	24.76	3.20
	M2	32.45	4.19		M2	26.17	3.38
	M3	33.90	4.38		M3	23.23	3.00
	<b>PROM</b>	4.68			<b>PROM</b>	3.19	
	<b>CV</b>	15%			<b>CV</b>	6%	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	33.74	4.36	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	30.91	3.99
	M2	34.01	4.39		M2	28.93	3.74
	M3	38.33	4.95		M3	34.13	4.41
	<b>PROM</b>	4.57			<b>PROM</b>	4.05	
	<b>CV</b>	7%			<b>CV</b>	8%	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	31.40	4.06	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	25.06	3.24
	M2	40.44	5.22		M2	25.11	3.24
	M3	32.54	4.20		M3	26.08	3.37
	<b>PROM</b>	4.49			<b>PROM</b>	3.28	
	<b>CV</b>	14%			<b>CV</b>	2%	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	36.56	4.72	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	28.71	3.71
	M2	39.58	5.11		M2	35.35	4.57
	M3	39.69	5.13		M3	33.07	4.27
	<b>PROM</b>	4.99			<b>PROM</b>	4.18	
	<b>CV</b>	5%			<b>CV</b>	10%	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	35.74	4.62	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	31.28	4.04
	M2	28.15	3.64		M2	26.20	3.38
	M3	29.92	3.86		M3	24.59	3.18
	<b>PROM</b>	4.04			<b>PROM</b>	3.53	
	<b>CV</b>	13%			<b>CV</b>	13%	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	35.81	4.63	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	22.09	2.85
	M2	38.93	5.03		M2	25.42	3.28
	M3	40.36	5.21		M3	26.03	3.36
	<b>PROM</b>	4.96			<b>PROM</b>	3.17	
	<b>CV</b>	6%			<b>CV</b>	9%	



**ANEXO 3. TENACIDAD EN EDP.**

	$\Delta\Phi$	1	1.5	3	6		$\Delta\Phi$	1	1.5	3	6
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	34.981	47.451	77.138	117.099	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	10.335	15.651	30.390	56.795
	M2	38.612	54.533	95.316	156.428		M2	41.396	57.663	94.896	140.769
	M3	41.794	68.951	110.026	163.352		M3	55.683	83.505	134.969	205.256
	PROM	40.203	61.742	102.671	159.890		PROM	48.539	70.584	114.932	173.012
	CV	0.056	0.165	0.101	0.031		CV	0.208	0.259	0.247	0.264
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	48.528	73.546	148.241	279.269	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	36.763	55.126	101.389	171.010
	M2	45.538	69.178	127.662	234.135		M2	42.142	63.785	122.613	217.986
	M3	47.972	70.096	132.352	250.596		M3	39.637	60.535	119.698	230.744
	PROM	47.346	70.940	136.085	254.667		PROM	39.514	59.815	114.567	206.580
	CV	0.034	0.032	0.079	0.090		CV	0.068	0.073	0.100	0.152
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	51.101	74.984	121.396	202.701	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	35.021	53.364	100.265	171.957
	M2	48.261	72.984	121.168	198.155		M2	40.263	54.417	92.607	151.251
	M3	51.075	73.063	122.244	202.801		M3	43.423	58.998	104.459	174.497
	PROM	50.146	73.677	121.603	201.219		PROM	39.569	55.593	99.111	165.901
	CV	0.033	0.015	0.005	0.013		CV	0.107	0.054	0.061	0.077
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	53.523	81.006	153.467	266.878	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	52.958	79.009	149.347	254.227
	M2	53.638	78.518	147.726	270.291		M2	43.873	65.450	122.750	211.240
	M3	49.318	74.528	152.554	295.022		M3	35.694	50.166	95.827	173.106
	PROM	52.159	78.017	151.249	277.397		PROM	44.175	64.875	122.641	212.858
	CV	0.047	0.042	0.020	0.055		CV	0.196	0.222	0.218	0.191
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	40.211	62.423	91.075	135.826	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	38.023	55.833	108.732	189.368
	M2	40.957	54.651	93.850	155.887		M2	45.154	67.851	127.197	191.804
	M3	48.058	69.459	106.049	151.264		M3	34.563	48.861	87.573	135.301
	PROM	43.075	62.178	96.991	147.659		PROM	39.247	57.515	107.834	172.158
	CV	0.101	0.119	0.082	0.071		CV	0.138	0.167	0.184	0.186
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	41.793	61.106	110.789	197.042	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	41.024	59.804	109.143	180.682
	M2	41.452	61.425	119.314	209.885		M2	43.115	62.776	111.250	192.606
	M3	43.901	63.610	122.508	219.143		M3	45.799	69.401	125.131	205.655
	PROM	42.382	62.047	117.537	208.690		PROM	43.313	63.993	115.174	192.981
	CV	0.031	0.022	0.052	0.053		CV	0.055	0.077	0.075	0.065



**ANEXO 4. RESISTENCIA MÁXIMA DE FISURACIÓN**

	Muestra	P <sub>f</sub>	f <sub>ct</sub>		Muestra	P <sub>f</sub>	f <sub>ct</sub>
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	51.94	2.94	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	52.10	2.95
	M2	42.35	2.40		M2	48.94	2.77
	M3	57.35	3.25		M3	63.46	3.59
	<b>PROM</b>		2.86		<b>PROM</b>		3.10
	<b>CV</b>		15%		<b>CV</b>		14%
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	54.26	3.07	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	41.03	2.32
	M2	51.27	2.90		M2	48.55	2.75
	M3	51.67	2.92		M3	41.75	2.36
	<b>PROM</b>		2.97		<b>PROM</b>		2.48
	<b>CV</b>		3%		<b>CV</b>		9%
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	54.15	3.06	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	40.71	2.30
	M2	53.02	3.00		M2	44.48	2.52
	M3	63.14	3.57		M3	48.99	2.77
	<b>PROM</b>		3.21		<b>PROM</b>		2.53
	<b>CV</b>		10%		<b>CV</b>		9%
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	58.76	3.32	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	56.23	3.18
	M2	61.66	3.49		M2	47.92	2.71
	M3	55.82	3.16		M3	40.45	2.29
	<b>PROM</b>		3.32		<b>PROM</b>		2.73
	<b>CV</b>		5%		<b>CV</b>		16%
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	45.75	2.59	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	41.28	2.34
	M2	51.32	2.90		M2	51.19	2.90
	M3	53.95	3.05		M3	39.93	2.26
	<b>PROM</b>		2.85		<b>PROM</b>		2.50
	<b>CV</b>		8%		<b>CV</b>		14%
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	44.80	2.54	<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	51.90	2.94
	M2	46.20	2.61		M2	47.19	2.67
	M3	43.26	2.45		M3	49.79	2.82
	<b>PROM</b>		2.53		<b>PROM</b>		2.81
	<b>CV</b>		3%		<b>CV</b>		5%





**ANEXO 5. GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS**

		DIAMETRO (cm)	DIAMETRO PROMEDIO	ALTURA (cm)	ALTURA PROMEDIO	PESO (g)	PESO PROMEDIO	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	M1	10.02	10.01	19.96	19.97	3698.00	3698.00	2353.18
	M2	9.99		19.92		-		
	M3	10.03		20.02		-		
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	M1	9.96	9.99	20.01	20.01	3669.00	3662.00	2335.06
	M2	10.00		20.05		3683.00		
	M3	10.01		19.98		3634.00		
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	M1	10.04	10.01	19.99	19.98	3556.00	3568.67	2270.75
	M2	9.99		19.97		3569.00		
	M3	10.00		19.97		3581.00		
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	M1	10.00	10.00	20.00	20.00	3692.20	3695.60	2354.92
	M2	9.98		19.98		3726.90		
	M3	10.01		20.02		3667.70		
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	M1	9.99	10.04	20.01	20.05	3718.00	3711.33	2340.92
	M2	10.07		20.04		3719.00		
	M3	10.05		20.09		3697.00		
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	M1	10.06	10.04	20.17	20.05	3805.00	3799.50	2391.90
	M2	10.08		20.00		3794.00		
	M3	10.00		19.99		3794.00		
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	M1	10.07	10.05	20.00	19.99	3663.00	3676.67	2317.16
	M2	10.05		19.98		3672.00		
	M3	10.04		19.99		3695.00		
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	M1	10.06	10.04	19.98	19.99	3721.00	3717.00	2347.37
	M2	10.08		20.00		3706.00		
	M3	10.00		19.99		3724.00		
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	M1	9.97	10.04	20.00	20.02	3734.00	3726.00	2350.70
	M2	10.08		20.03		3720.00		
	M3	10.07		20.03		3724.00		
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	M1	10.10	10.09	20.06	20.03	3726.00	3731.67	2330.23
	M2	10.10		20.03		3712.00		
	M3	10.08		20.00		3757.00		

**ANEXO 6. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE.**

	f'c M1 (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c M2 (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c M3 (kg/cm <sup>2</sup> )	PROM. UNIT	PROM. GEN
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	376	371	-	374	366
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	339	346	342	342	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	349	381	383	371	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	368	351	373	364	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	374	361	361	365	
350 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	386	371	-	378	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	440	489	-	465	498
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	509	508	422	480	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	528	543	543	538	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	498	543	499	513	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m <sup>3</sup>	507	498	494	500	
500 kg/cm <sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m <sup>3</sup>	486	498	491	492	



**ANEXO 7: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICA.**

		DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD (m/s)	TIEMPO (μs)	MOD ELAST DINAMICO (kg/cm <sup>2</sup> )	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2353.18	46.95	4235	475882.424	465186
	M2		46.55	4270	467808.214	
	M3		45.75	4350	451867.045	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2335.06	48.4	4110	501837.475	503583
	M2		48.2	4130	497698.627	
	M3		48.85	4075	511212.545	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2270.75	48.25	4080	484995.484	467168
	M2		46.6	4230	452391.975	
	M3		47.2	4155	464116.551	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2354.92	45.6	4360	449240.131	456514
	M2		45.95	4335	456162.827	
	M3		46.35	4315	464139.293	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2340.92	46.75	4275	469379.332	477139
	M2		47.65	4195	487625.65	
	M3		47	4260	474412.855	
<i>350 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2391.90	46.65	4285	477550.351	477214
	M2		46.8	4270	480626.351	
	M3		46.45	4305	473464.377	
<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2317.16	48.2	4130	493881.929	461960
	M2		46.4	4295	457683.252	
	M3		45.2	4400	434316.1	
<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 4D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2347.37	45	4425	436094.835	459483
	M2		46.85	4250	472688.576	
	M3		46.7	4260	469666.6	
<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2350.70	46.95	4345	475381.266	474708
	M2		47	4340	476394.332	
	M3		46.8	4210	472348.539	
<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (60mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2330.23	46.85	4320	469235.172	449202
	M2		45.4	4405	440639.142	
	M3		45.25	4425	437732.24	
<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 20 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2314.54	44.8	4460	426181.307	449149
	M2		46.8	4275	465082.582	
	M3		46.35	4315	456181.685	
<i>500 kg/cm<sup>2</sup> - Dramix 3D (35mm) - 60 kg/m<sup>3</sup></i>	M1	2277.58	47.7	4170	475426.332	479764
	M2		48.2	4290	485445.579	
	M3		47.85	4155	478421.136	