

## COMPORTAMIENTO DE HORMIGONES REFORZADOS CON Y SIN FIBRAS

Marcelo Cadima Pino, Jorge Rosas Rodríguez y Francisco Aguirre Torrico

Universidad Privada Boliviana

jrosas@upb.edu

(Recibido el 24 de enero 2005, aceptado para publicación el 10 de julio 2005)

### RESUMEN

Se presenta el estudio de propiedades físicas y mecánicas de hormigones normales y reforzados con fibras sintéticas y de acero en mezclas de hormigón con resistencias de 21 y 28 N/mm<sup>2</sup>, así como la influencia de las cuantías de fibras en la resistencia a la compresión y a la tracción; y el análisis estadístico de los resultados obtenidos. Los ensayos con métodos y procedimientos de la Norma ASTM, muestran que la cuantía de fibras más apta es la de 1,00 a 1,35 kg/m<sup>3</sup> y se observa un incremento en un 5% en el módulo de rotura. Por otro lado, se comprobó estadísticamente que el incremento en la resistencia a la compresión de hormigones reforzados con fibra no es significativa, por lo que la adición de fibras no afecta la resistencia a la compresión del hormigón. Comparando los espesores calculados, se puede afirmar que la introducción de una cuantía media de 1,0 kg/m<sup>3</sup> de fibras de plástico reduce el espesor de la losa en 15,0 mm, con respecto al hormigón sin fibras. Esta reducción del espesor disminuye el volumen de hormigón a ser utilizado. Por tanto, el costo total del hormigón con fibras es menor en un 2,2 % para el hormigón de 21 N/mm<sup>2</sup> y 2,96 % para el hormigón 28 N/mm<sup>2</sup>.

**Palabras Claves:** Hormigón Reforzado con Fibras, Cuantías de Fibras, Asentamiento, Resistencia a la Compresión, Resistencia a la Tracción, Módulo de Elasticidad, Módulo de Rotura y Análisis Estadístico.

### 1. INTRODUCCIÓN

Se sabe, desde hace cientos de años, que se ha utilizado la paja, el yute, el pelo de caballo, el bambú y otras fibras naturales para mejorar la calidad y resistencia de los bloques y otros productos de arcilla, mortero y hormigón. Según Hop [22], desde hace tres décadas, la investigación sobre el funcionamiento del uso de fibras en el hormigón se ha incrementado para resolver varios problemas del hormigón, entre los cuales, los que presentan mayores beneficios son el incremento de su resistencia a la tracción y la disminución en la formación y propagación de fisuras, debido principalmente a la retracción de éste.

La aplicación de fibras en los hormigones ha ido creciendo con el tiempo, no sólo por su capacidad de resistir mayores cargas, sino también por el incremento significativo de su vida útil de servicio.

El incremento en la resistencia conduce a un comportamiento más frágil del hormigón. Entonces, la introducción de fibras en el hormigón es una forma de mejorar sus características, ya que éstas dotan de ductilidad al material y su ruptura deja de ser brusca. Un hormigón reforzado con fibras (HRF) puede tener una deformación última de hasta 10 veces mayor que la de un hormigón sin fibras, Hop [22].

Existen diferentes tipos de fibras que son utilizadas como refuerzo del hormigón, entre las más comunes se puede mencionar a las *fibras de metal, las sintéticas y las naturales*. Las fibras de metal y sintéticas son más utilizadas, por ser más compatibles con el hormigón, que las fibras naturales.

Las fibras ofrecen muchos beneficios al hormigón. A pocos años de utilización de las fibras en el país, un gran número de constructores, diseñadores, ingenieros y arquitectos ya están incorporando en sus especificaciones este tipo de refuerzo. Los resultados presentados en este artículo es un resumen parcial de Cadima [28].

### 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1. Propiedades Mecánicas

##### A. Resistencia a la compresión especificada del hormigón

La principal medida de la calidad estructural del hormigón es su resistencia a la compresión. Los ensayos para medir esta propiedad, deben seguir el procedimiento especificado por las normas ASTM C 172 (1991) [15] y la ASTM C 31 (1991) [6]. La resistencia a la compresión obtenida de estos ensayos se conoce como la resistencia del cilindro  $f_c$ . Considerando los resultados obtenidos de todas las muestras, se realiza un procedimiento estadístico para obtener un

valor característico del lote de cilindros  $f_c$ , que es la principal propiedad estipulada para propósitos de diseño y se determina por medio de ensayos de cilindros estándar de 150 x 300 mm fabricados y ensayados de acuerdo con las especificaciones ASTM C 39 (1991) [8] y ASTM C 192 – 90a (1991) [16].

### B. Módulo de elasticidad del hormigón

El módulo de elasticidad  $E_c$ , es la relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria asociada a los esfuerzos por tracción o por compresión, menores al límite de proporcionalidad del material, ACI 318-02 [4].  $E_c$  puede calcularse con la expresión dada por ACI 318-02 en  $N/mm^2$ ,  $w_c^{1.5} 0,043 \sqrt{f_c}$ , donde la resistencia característica del hormigón debe ser expresada en  $N/mm^2$  y la densidad del hormigón,  $w_c$ , en  $kg/m^3$ .

### C. Resistencia a la tracción por flexión

La formación y propagación de las grietas de los elementos de hormigón sometidos a flexión, dependen notablemente de su resistencia a la tracción. Asimismo, ocurren esfuerzos de tracción en el hormigón como resultados de cortante, torsión y otras acciones.

La resistencia a la tracción del hormigón sujeto a flexión, llamada módulo de rotura, es una propiedad más variable que la resistencia a la compresión y es aproximadamente del 10 al 15 % de la resistencia a la compresión, ACI 318-02 [4].

En este trabajo de investigación, la resistencia a la tracción ha sido determinada por flexotracción. Para este efecto, la Norma ASTM C 78 [10] establece los procedimientos para efectuar el ensayo de tracción por flexión de probetas prismáticas de hormigón simplemente apoyadas con cargas a un tercio de la luz, los ensayos fueron realizados según la ASTM C 192 – 90a [16].

### 2.2. Dosificación de la Mezcla

La estimación de las mezclas de hormigón requeridas implica una secuencia de pasos lógicos y directos que, de hecho, ajustan las características de los materiales disponibles a una mezcla adecuada para el trabajo, ACI 318-02 [4]. El aspecto de adaptabilidad no siempre permite a la persona seleccionar las proporciones. En la Tabla 1, se presentan las proporciones de los componentes para resistencias de hormigón de 21 y 28  $N/mm^2$ .

## 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

En esta sección, se documenta el trabajo de investigación para la determinación de propiedades físicas y mecánicas de hormigones normales y reforzados con fibras, para su aplicación en la construcción de pavimentos rígidos.

**TABLA 1 – RESUMEN DE COMPONENTES DE LOS DOS TIPOS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN**

Componentes del hormigón	Masa (kg) de las componentes por $m^3$ de hormigón.	
	$f_c' = 21 N/mm^2$	$f_c' = 28 N/mm^2$
Cemento	313	379
Agua	178	178
Grava	1241	1241
Arena	689	581

La utilización de hormigones reforzados con fibras (HRF) para la construcción de pavimentos rígidos, requiere tener un previo conocimiento de las propiedades del hormigón a ser usado. El propósito de esta investigación es determinar, comparativamente, el hormigón reforzado con fibras que resulte más apto, de acuerdo con sus propiedades, para la construcción de pavimentos rígidos. Para esto se recurrirá a ensayos de acuerdo con los métodos y procedimientos dados en la norma ASTM.

Entre los principales equipos utilizados se puede mencionar: el equipo para ensayos de compresión ELE Internacional, INC., modelo ACCU-TEK 250 con su accesorio para ensayos de módulo de ruptura o flexión. Asimismo, se utilizó un equipo para ensayos de compresión SOILTEST Incorporate CT – 776.

### 3.1. Tipos de Fibras

El tipo de fibras fue seleccionado de acuerdo con sus propiedades físicas, químicas y la disponibilidad en el mercado. Se dispuso de dos tipos de fibras sintéticas y una muestra de fibra de metal que cumplieran con las especificaciones de la ASTM C 1116 [21]. Las fibras sintéticas son la Stealth e Inforce; y la fibra de metal es la Novomesh.

#### A. Fibras sintéticas Stealth

Según las especificaciones del fabricante, este tipo de fibras es 100% de homopolímero de polipropileno virgen, fibras en multifilamentos gradados y fabricadas con los procesos de la ISO 9002, y son certificadas para uso como refuerzo secundario de hormigones. La Figura 1a muestra un acercamiento de las fibras Stealth. En la Tabla 2 se resume las propiedades físicas y químicas.

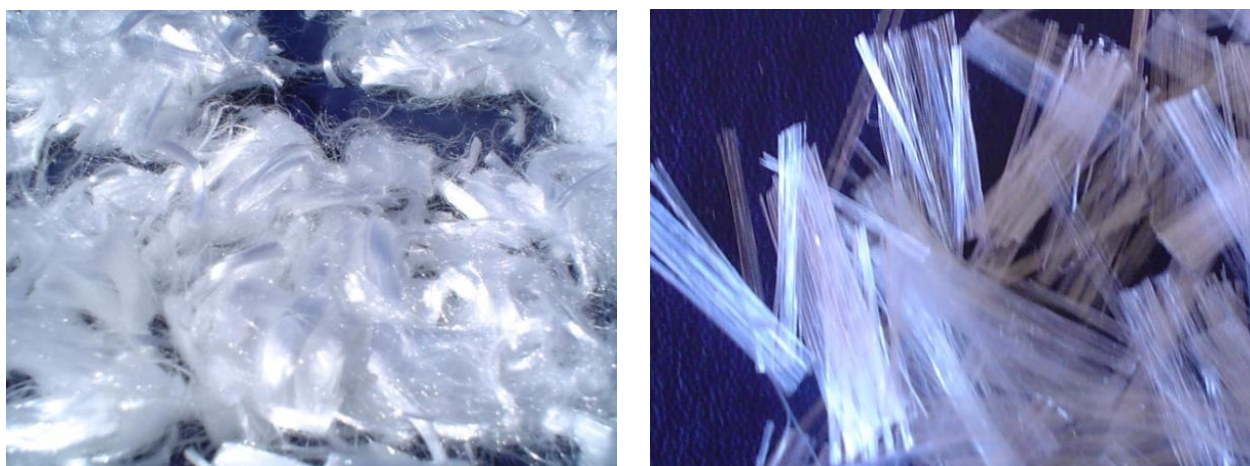


Figura 1 – Muestras de fibras: a) Stealth y b) Inforce.

#### B. Fibras sintéticas Inforce

Al igual que las fibras sintéticas Stealth, también son 100 % de homopolímero de polipropileno virgen, fibras en multifilamentos gradados y fabricadas según las normas de la ISO 9002. La Figura 1b muestra un acercamiento de las fibras Inforce. En la Tabla 2 se presenta en forma resumida las propiedades físicas y químicas.

**TABLA 2 – PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS FIBRAS STEALTH E INFORCE**

Propiedades	Fibras Stealth	Fibras Inforce
Absorción	Detectar	Detectar
Gravedad específica	0,91	0,91
Longitud de fibra	$\frac{1}{4}$ - $\frac{3}{4}$ “	Gradada
Conductividad eléctrica	Baja	Baja
Resistencia a ácidos y sales	Alta	Alta
Punto de derretimiento	324 °F	324 °F
Punto de ignición	680 °F	680 °F
Conductividad térmica	Baja	Baja
Resistencia al álcali	Aprueba de álcali	Aprueba de álcali

#### C. Fibras metálicas Novomesh

Este tipo de fibras es una mezcla de fibras sintéticas y fibras de metal. Sin embargo, las fibras vienen totalmente separadas para su uso individual. Cuando se requiere el uso de la mezcla de ambas fibras, éstas se unen durante el proceso de mezclado. La Figura 2 muestra un acercamiento de las fibras Novomesh. En la Tabla 3 se resume las propiedades físicas y químicas de las fibras metálicas.



Figura 2 – Muestras de fibras Novomesh.

**TABLA 3 – PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS FIBRAS METÁLICAS NOVOMESH.**

Propiedades	Estado
Esfuerzo a tensión	966 – 1 242 N/mm <sup>2</sup>
Longitud de la fibra	1,5'' ± 5%
Espesor promedio	0,025'' ± 0,05''
Anchura promedio	0,092'' ± 0,009
Relación de aspecto	34 ± 5
Deformación	@0,250'' en el centro

### 3.2. Designación de los Hormigones

La asignación de nombres codificados a los hormigones se realizó en función de la resistencia, el tipo y cuantía de fibra que se utilizó. En las Tablas 4 y 5 se muestra un resumen de la designación para hormigones con resistencia de 21 y 28 N/mm<sup>2</sup>, respectivamente. Se ensayaron 304 especímenes a compresión y 220 a flexión, los mismos que contemplan los diferentes tipos de hormigones ensayados, con y sin fibra.

**TABLA 4 – RESUMEN DE DESIGNACIONES PARA HORMIGONES CON RESISTENCIA DE 21 N/MM<sup>2</sup>.**

Designación	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )	Tipo de fibra	Cuantía y porcentaje de fibras
HRF <sub>21</sub> – A1	21	Stealth	0,60 kg/m <sup>3</sup>
HRF <sub>21</sub> – A2	21	Stealth	1,00 kg/m <sup>3</sup>
HRF <sub>21</sub> – A3	21	Stealth	1,80 kg/m <sup>3</sup>
HRF <sub>21</sub> – B1	21	Inforce	0,90 kg/m <sup>3</sup>
HRF <sub>21</sub> – B2	21	Inforce	1,35 kg/m <sup>3</sup>
HRF <sub>21</sub> – B3	21	Inforce	1,80 kg/m <sup>3</sup>
HRFM <sub>21</sub> – C1	21	Novomesh	0,20 %
HRFM <sub>21</sub> – C2	21	Novomesh	0,25 %
HRFM <sub>21</sub> – C3	21	Novomesh	0,50 %
HRFM <sub>21</sub> – C4	21	Novomesh	0,75 %

**TABLA 5 – RESUMEN DE DESIGNACIONES PARA HORMIGONES CON RESISTENCIA DE 28 N/MM<sup>2</sup>**

Designación	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )	Tipo de fibra	Cuantía de fibras (kg/m <sup>3</sup> )
-------------	----------------------------------	---------------	--

HRF <sub>28</sub> – A1	28	Stealth	0,60
HRF <sub>28</sub> – A2	28	Stealth	1,00
HRF <sub>28</sub> – A3	28	Stealth	1,80
HRF <sub>28</sub> – B1	28	Inforce	0,90
HRF <sub>28</sub> – B2	28	Inforce	1,35
HRF <sub>28</sub> – B3	28	Inforce	1,80

#### 4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN INFLUENCIADAS POR LA ADICIÓN DE FIBRAS

Se consideró las siguientes propiedades afectadas por la adición de fibras: Asentamiento de las mezclas como parámetro de la trabajabilidad, resistencia a compresión, resistencia a la tracción por flexión y los módulos de elasticidad.

##### 4.1. Asentamiento de las Mezclas con Diferentes Cuantías de Fibra

Este ensayo fue ideado por el investigador norteamericano Abrams. Su ejecución esta regulada por la norma ASTM C 143 [13] y consiste básicamente en rellenar un molde metálico troncocónico de dimensiones normalizadas, en tres capas apisonadas con 25 golpes de varilla – pisón, retirar el molde y medir el asentamiento que experimenta la masa de hormigón colocada en su interior. De esta manera, la medida del asentamiento permite determinar principalmente la fluidez y la forma de derrumbamiento para apreciar la consistencia del hormigón. Dada su simplicidad de ejecución, el ensayo de asentamiento se ha generalizado como medición de la trabajabilidad del hormigón.

La Tabla 6 muestra un resumen del asentamiento medido durante el proceso de preparación de la mezcla con la adición de cuantías mínimas de fibras de plástico. La dosificación fue hecha para 80 mm de asentamiento, la adición de las fibras provocó una pérdida de 15 – 20 mm. Esto indica que la mezcla sigue siendo plástica y, por lo tanto, no pierde su trabajabilidad para su colocado y compactado.

**TABLA 6 – RESUMEN DEL ASENTAMIENTO CON CUANTÍAS MÍNIMAS DE FIBRA DE PLÁSTICO**

Designación	Cuantía media (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio del asentamiento (mm)
H – 21	0,00	80
HRF <sub>21</sub> – A1 HRF <sub>28</sub> – A1	0,60	60
HRF <sub>21</sub> – B1 HRF <sub>28</sub> – B1	0,90	65

En la Tabla 7 se presenta un resumen del asentamiento medido durante el proceso de preparación de la mezcla con la adición de cuantías medias de fibras de plástico, se observa claramente que el asentamiento es mayor en comparación con la mezcla de cuantía mínima. Estas mezclas sufrieron una pérdida de 25–35 mm en el asentamiento, pero esto no significa que las mezclas estén fuera del rango de ser plásticas ya que siguen siendo trabajables.

**TABLA 7 – RESUMEN DEL ASENTAMIENTO CON CUANTÍAS MEDIAS DE FIBRA DE PLÁSTICO**

Designación	Cuantía media (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio del asentamiento (mm)
H – 21	0,00	80
HRF <sub>21</sub> – A2 HRF <sub>28</sub> – A2	1,00	45
HRF <sub>21</sub> – B2 HRF <sub>28</sub> – B2	1,35	55

Para el tercer tipo de dosificación de las fibras de plástico, en la Tabla 8 se presenta el resumen de los asentamientos. Haciendo una comparación de los promedios obtenidos del asentamiento con cuantías máximas de fibras de plástico, su reducción es considerable. Las mezclas sufrieron una pérdida de 40–45 mm en el asentamiento, lo que demuestra que las mezclas son secas y que, por lo tanto, han perdido considerablemente su trabajabilidad para su utilización en obra.

**TABLA 8 – RESUMEN DEL ASENTAMIENTO CON CUANTÍAS MÁXIMAS DE FIBRA DE PLÁSTICO**

Designación	Cuantía máxima (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio del asentamiento (mm)
H – 21	0,00	80
HRF <sub>21</sub> – A3 HRF <sub>28</sub> – A3	1,80	35
HRF <sub>21</sub> – B3 HRF <sub>28</sub> – B3	1,80	35

En la Tabla 9 se presenta un resumen de los asentamientos medidos durante el proceso de preparación de mezclas con la adición de diferentes porcentajes de fibras de metal en el hormigón. Se observa una reducción del asentamiento que es proporcional a la concentración de fibras de metal. Es evidente que conviene elegir un porcentaje de fibras entre 0,2% (15,81 kg/m<sup>3</sup>) y 0,25% (19,76 kg/m<sup>3</sup>), ya que el rango del asentamiento de estos porcentajes está en la clasificación de una mezcla plástica. Los porcentajes de 0,5 y 0,75% provocan asentamientos menores, lo que demuestra que estas mezclas son secas y poco recomendadas para su colocado en pavimento rígido por la dificultad de su compactado.

**TABLA 9 – RESUMEN DE LOS ASENTAMIENTOS PARA LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE FIBRAS DE METAL**

Designación	Cuantía (kg/m <sup>3</sup> ) y porcentajes de fibra	Promedio del asentamiento (mm)
H – 21	0,00	80
HRFM <sub>21</sub> – C1	15,81 (0,2 %)	63
HRFM <sub>21</sub> – C2	19,76 (0,25 %)	45
HRFM <sub>21</sub> – C3	39,57 (0,5 %)	37
HRFM <sub>21</sub> – C4	59,39 (0,75 %)	36

#### 4.2. Resistencia a la Compresión

Es la principal medida de la calidad estructural del hormigón. En las Tablas 10 y 11 se resumen los resultados obtenidos en laboratorio de la resistencia a la compresión de hormigones de 21 N/mm<sup>2</sup> y 28 N/mm<sup>2</sup> con y sin fibras. Se observa que la contribución del refuerzo de fibras no afecta la resistencia a la compresión

**TABLA 10 – RESUMEN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA HORMIGONES DE 21 N/MM<sup>2</sup>**

Designación	Resistencia a 28 días promedio (N/mm <sup>2</sup> )	% de incremento de la resistencia
H – 21	35,13	0,00
HRF <sub>21</sub> – A1	37,12	5,66
HRF <sub>21</sub> – A2	32,64	-7,09
HRF <sub>21</sub> – A3	37,63	7,12
HRF <sub>21</sub> – B1	36,00	2,48
HRF <sub>21</sub> – B2	33,80	-3,79
HRF <sub>21</sub> – B3	34,70	-1,22
HRFM <sub>21</sub> – C1	33,12	-5,72
HRFM <sub>21</sub> – C2	34,78	-1,00
HRFM <sub>21</sub> – C3	34,11	-2,90
HRFM <sub>21</sub> – C4	34,56	-1,62

**TABLA 11 – RESUMEN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA HORMIGONES DE 28 N/MM<sup>2</sup>**

Designación	Resistencia a 28 días promedio (N/ mm <sup>2</sup> )	% de incremento de la resistencia
H – 28	48,70	0,00
HRF <sub>28</sub> – A1	48,52	-0,37
HRF <sub>28</sub> – A2	50,02	2,71
HRF <sub>28</sub> – A3	48,74	0,08
HRF <sub>28</sub> – B1	52,18	7,15
HRF <sub>28</sub> – B2	55,71	14,39
HRF <sub>28</sub> – B3	57,22	17,49

La Figura 3 muestra las características físicas de los cilindros de hormigón sin fibra y con fibras plásticas después de la rotura. En el caso de los hormigones de mayor resistencia sin fibras, la rotura es casi explosiva, como puede apreciarse en la figura, lo que no ocurre en los hormigones con fibras, las cuales evitan este tipo de rotura. Las fibras convierten al hormigón en un material dúctil, cociendo sus fisuras.

Como se indicó en el primer párrafo de este apartado, hay una pequeña variación no significativa en la resistencia debido al incremento de fibras, por lo que se puede concluir que las fibras no afectan la resistencia a compresión del hormigón. Sin embargo, dependiendo de la resistencia del hormigón, existe un incremento en la ductilidad.



**Figura 3** – Rotura de cilindros de hormigón simple y con fibra después del ensayo a compresión.

#### 4.3. Módulo de Elasticidad Teórico y Experimental

En las Tablas 12 y 13 se presenta el resumen de los resultados calculados con expresión dada por el ACI 318-02 mencionada anteriormente en el apartado 2.1.B.

Los resultados de la Tabla 12 muestran que el módulo de elasticidad teórico del hormigón H-21 es mayor de 2 a 4 % a los módulos de los hormigones con fibras sintéticas y de 3% a los que tienen las fibras de metal. Para los hormigones de 28 N/mm<sup>2</sup> de la Tabla 13, el módulo de elasticidad del H-28 es ligeramente menor con respecto a los hormigones con fibras, aunque para el hormigón HRF<sub>28</sub> – A1 es menor al resto de los módulos de elasticidad teóricos calculados con la resistencia a la compresión promedio obtenida en laboratorio.

El módulo de elasticidad es la relación entre la tensión y la deformación (considerando el hormigón en sus primeras etapas de carga como un material elástico). Es decir, a mayor resistencia mayor es su rigidez y menor su deformación. Los resultados reflejan que la introducción de fibras disminuye el módulo de elasticidad disminuyendo su rigidez y aumentando su deformación.

**TABLA 12 – RESULTADOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD TEÓRICO PARA HORMIGONES DE 21 N/MM<sup>2</sup>**

Tipo de hormigón	Resistencia promedio	$E_c$ teórico (N/mm <sup>2</sup> )
H – 21	35,13	28301,92
HRF <sub>21</sub> – A1	37,12	29092,49
HRF <sub>21</sub> – A2	32,64	27280,48
HRF <sub>21</sub> – A3	37,63	29291,66
HRF <sub>21</sub> – B1	35,99	28647,71
HRF <sub>21</sub> – B2	33,80	27762,09
HRFM <sub>21</sub> – C1	33,11	27479,28

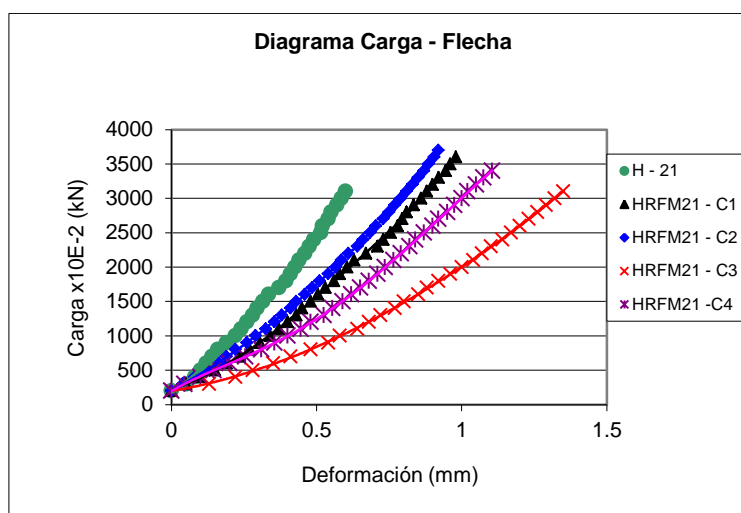
**TABLA 13 – RESULTADOS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD TEÓRICO PARA HORMIGONES DE 28 N/MM<sup>2</sup>**

Tipo de hormigón	Resistencia promedio	$E_c$ teórico (N/mm <sup>2</sup> )
H – 28	48,70	33324,06
HRF <sub>28</sub> – A1	48,51	33260,52
HRF <sub>28</sub> – A2	50,01	33770,22
HRF <sub>28</sub> – A3	48,74	33337,02

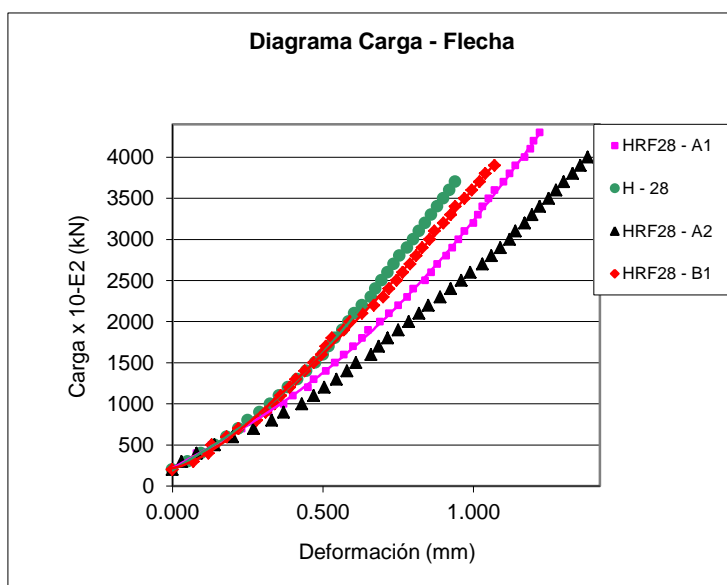
**4.4 Resistencia a la Tracción por Flexión**

La Figura 4 presenta los resultados obtenidos durante la medición de la flecha en el ensayo a flexión para hormigones con resistencia de 21 N/mm<sup>2</sup> con y sin fibras metálicas. En forma similar, la Figura 5 presenta los resultados para hormigones de 28 N/mm<sup>2</sup> con y sin fibras sintéticas. Se observa que los hormigones sin fibras tienen una deformación menor que los hormigones con fibras sintéticas y de metal.

En la resistencia a la tracción por flexión puede notarse un mejor comportamiento del hormigón debido a la contribución de las fibras, ya que éstas mejoran la ductilidad de los hormigones aumentando su flecha correspondiente a la rotura. No obstante, la mejora depende del porcentaje de fibras incluida en la mezcla. Puede concluirse que a mayor cantidad de fibras, la resistencia a la tracción y la ductilidad incrementan significativamente.



**Figura 4** – Curva carga–flecha para hormigones con y sin fibras metálicas.



**Figura 5** – Curva carga–flecha para hormigones H-28 con y sin fibras sintéticas.



Las Tablas 14 y 15 presentan de manera resumida los resultados obtenidos experimentalmente del módulo de rotura de los hormigones H-21 y H-28, con y sin fibras. Se observa que la presencia de las fibras provoca un incremento en la resistencia y ductilidad hasta un cierto porcentaje de fibras, que sería el máximo admisible. A mayor adición de porcentaje de fibras la resistencia del hormigón disminuye.

**TABLA 14 – RESUMEN DEL MÓDULO DE ROTURA PARA RESISTENCIAS DE 28 N/MM<sup>2</sup>**

Designación	Módulo de ruptura promedio a los 28 días (N/mm <sup>2</sup> )	% de incremento del módulo de rotura
H – 28	5,65	0,00
HRF <sub>28</sub> – A1	5,71	1,06
HRF <sub>28</sub> – A2	5,92	4,78
HRF <sub>28</sub> – A3	5,82	3,01
HRF <sub>28</sub> – B1	5,87	3,89
HRF <sub>28</sub> – B2	5,77	2,12
HRF <sub>28</sub> – B3	5,74	1,59

**TABLA 15 – RESUMEN DEL MÓDULO DE ROTURA PARA RESISTENCIAS DE 21 N/MM<sup>2</sup>**

Designación	Módulo de ruptura promedio a 28 días (N/mm <sup>2</sup> )	% de incremento del módulo de rotura
H – 21	4,99	0,00
HRF <sub>21</sub> – A1	5,05	1,20
HRF <sub>21</sub> – A2	5,20	4,21
HRF <sub>21</sub> – A3	5,15	3,21
HRF <sub>21</sub> – B1	5,01	0,40
HRF <sub>21</sub> – B2	5,05	1,20
HRF <sub>21</sub> – B3	5,02	0,60
HRFM <sub>21</sub> – C1	5,12	2,61
HRFM <sub>21</sub> – C2	5,31	6,41
HRFM <sub>21</sub> – C3	5,07	1,60
HRFM <sub>21</sub> – C4	5,06	1,40

En las Figuras 6a y 6b se observa la forma de rotura que sufren las vigas de hormigón sin y con fibras durante el ensayo a flexión, respectivamente. Se puede notar un incremento en la ductilidad para la viga de hormigón con fibras, pero en ambos casos, la rotura fue brusca. En el hormigón con fibras la fisura no progresó bruscamente hacia arriba, existiendo aún una pequeña región sin fisurarse. En los hormigones reforzados con fibras plásticas, las regiones que presentan fisuras disminuyen a medida que la cuantía de fibras aumenta ya que éstas aumentan la capacidad de las vigas a deformarse.



**Figura 6 – Rotura de viga después del ensayo a flexión: a) sin fibra y b) con fibra, respectivamente.**

## 5. FACTOR DE PROYECCIÓN PARA EL MÓDULO DE ROTURA

Debido a la falta de estudios, no existe un factor de proyección del módulo de rotura de materiales disponibles en nuestro medio. Por esta razón, uno de los objetivos de este trabajo fue encontrar el factor de proyección utilizando los resultados obtenidos experimentalmente. Este factor permite proyectar el módulo de rotura de 14 a 28 días.

La Figura 7 muestra la curva de proyección obtenida para hormigones con una resistencia de 21 N/mm<sup>2</sup>. Mediante análisis de regresión se obtuvo la expresión indicada en la Ecuación 1,

$$Y = 20,13 + 0,65X \quad (1)$$

donde Y es el módulo de rotura a 28 días y X el módulo de rotura a 14 días.

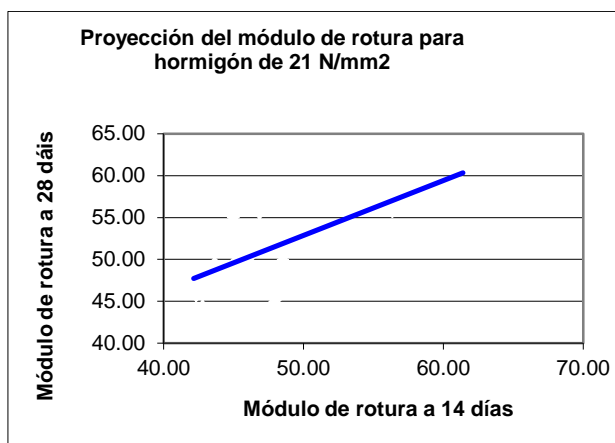


Figura 7 – Curva de proyección para resistencias de 21 N/mm<sup>2</sup>.

La Figura 8 muestra la curva de proyección para el hormigón de 28 N/mm<sup>2</sup> y al igual que para el hormigón de resistencia de 21 N/mm<sup>2</sup>, para 28 N/mm<sup>2</sup> se obtuvo la expresión indicada en la Ecuación 2.

$$Y = 22,96 + 0,67X \quad (2)$$

donde Y es el módulo de rotura a 28 días y X el módulo de rotura a 14 días.

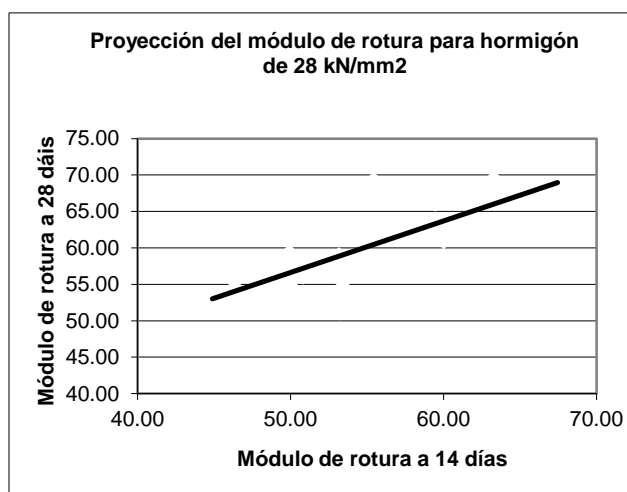


Figura 8 – Curva de proyección para resistencias de 28 N/mm<sup>2</sup>.

### 5.1. Correlación entre la Resistencia a la Compresión y la Resistencia a la Tracción

No fue fácil determinar las correlaciones generales entre la resistencia a la compresión y la tracción, debido a que la dispersión de los datos fue mayor de lo que se esperaba. Por este motivo, se decidió encontrar estas correlaciones para cada tipo de hormigón; sin embargo, aún así, el coeficiente de correlación de las ecuaciones era todavía insatisfactorio.

Después de una depuración de los datos, se pudo encontrar las mejores correlaciones posibles, eliminando los valores máximos y mínimos que se salían del rango del promedio de los valores. La Tabla 16 resume las correlaciones determinadas para hormigones con resistencias de 21 N/mm<sup>2</sup>; las correspondientes correlaciones para el hormigón de 28 N/mm<sup>2</sup> se muestran en la Tabla 17.

**TABLA 16 – RESUMEN DE LAS CORRELACIONES PARA RESISTENCIAS DE 21 N/MM<sup>2</sup>**

Designación	Correlación tracción-compresión	R <sup>2</sup>
H - 21	Y = 0,154*x <sup>0,9903</sup>	0,5900
HRF <sub>21</sub> - A1	Y = -0,0074*x <sup>2</sup> + 5,767*x - 1067,7	0,8576
HRF <sub>21</sub> - A2	Y = -0,0058*x <sup>2</sup> + 4,4344*x - 795,25	0,5303
HRF <sub>21</sub> - A3	Y = -0,0134*x <sup>2</sup> + 10,214*x - 1898,7	0,3095
HRF <sub>21</sub> - B1	Y = 0,0016*x <sup>2</sup> + 1,1575*x - 262,37	0,2247
HRF <sub>21</sub> - B2	Y = 39,785*x <sup>0,0331</sup>	0,3994
HRF <sub>21</sub> - B3	Y = 191,03*x <sup>-0,2411</sup>	0,3749
HRFM <sub>21</sub> - C1	Y = 15,736*x <sup>0,1987</sup>	0,2216
HRFM <sub>21</sub> - C2	Y = 1,4807*x <sup>0,6051</sup>	0,3349
HRFM <sub>21</sub> - C3	Y = 695284*x <sup>-1,628</sup>	0,4063
HRFM <sub>21</sub> - C4	Y = 1E+06*x <sup>-1,7549</sup>	0,5242

**TABLA 17 – RESUMEN DE LAS CORRELACIONES PARA RESISTENCIAS DE 28 N/MM<sup>2</sup>**

Designación	Correlación tracción - compresión	R <sup>2</sup>
H - 28	Y = 1,8802*x <sup>0,5539</sup>	0,4073
HRF <sub>28</sub> - A1	Y = 583704*x <sup>-1,4819</sup>	0,2675
HRF <sub>28</sub> - A2	Y = 748,82*x <sup>-0,4121</sup>	0,4495
HRF <sub>28</sub> - A3	Y = -0,0009*x <sup>2</sup> + 0,916*x - 163,14	0,6779
HRF <sub>28</sub> - B1	Y = -0,0058*x <sup>2</sup> + 5,8575*x - 143,2	0,9208
HRF <sub>28</sub> - B2	Y = 7,7169*x <sup>0,3224</sup>	0,3583
HRF <sub>28</sub> - B3	Y = 0,9745*x <sup>0,6341</sup>	0,2177

## 6. COMPARACIÓN ENTRE ESPESORES DE LOSAS DE HORMIGÓN CON Y SIN FIBRAS

Se realizó una comparación de espesores de losas utilizando el método AASHTO. Para ello se tomó todos los datos necesarios del Trabajo Final de Grado de N. Blacud [29]. Este proyecto caminero está comprendido entre Villamontes y La Vertiente, tiene una longitud de 20 Km y un ancho de calzada de 7,3 metros.

El cálculo del espesor de la losa, D, fue calculado con la siguiente expresión:

$$\log W_{18} = Z_r \times S_o + 7,35 \times \log(D + 1) - 0,06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5}\right)}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(D + 1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 p_t) \log \left[ \frac{S_c \times Cd (D^{0,75} - 1,132)}{215,63 J \left( D^{0,75} - \frac{18,42}{\left(\frac{Ec}{k}\right)^{0,25}} \right)} \right]$$

siendo W<sub>18</sub> el número de cargas de 18 kips (80 kN) previstas, Z<sub>r</sub> la abscisa correspondiente a un área igual a la confiabilidad R en una curva de distribución normalizada, S<sub>o</sub> la desviación estándar de todas las variables, D el espesor de la losa (pulg), p<sub>0</sub> la serviciabilidad inicial, p<sub>t</sub> la serviciabilidad final, ΔPSI la pérdida de serviciabilidad, S<sub>c</sub> el módulo de rotura del hormigón (lb/pulg<sup>2</sup>), J el coeficiente de transferencia de cargas, Cd el coeficiente de drenaje, Ec el módulo de elasticidad del hormigón (lb/pulg<sup>2</sup>) y K el módulo de reacción de la subrasante (lb/pulg<sup>3</sup>).

Para calcular el espesor de la losa, D, se utilizaron los siguientes datos:

$W_{18} = 3441029$  ESALs;  $R = 80 \%$ ;  $Z_r = 0,84$ ;  $S_o = 0,35$ ;  $p_o = 4,5$ ;  $p_t = 2$ ;  $\Delta PSI = 2,5$ ;  $J = 3,2$ ;  $C_d = 1$  y  $K = 1991,56$  lb/pulg<sup>3</sup>

La Tabla 19 presenta los valores del módulo de rotura del hormigón ( $S_c'$ ) y de módulo de elasticidad del hormigón ( $E_c$ ), utilizados para calcular el espesor de la losa para cada tipo de hormigón.

**TABLA 19 – RESUMEN DE LOS MÓDULO DE ROTURA Y ELASTICIDAD DE CADA TIPO DE HORMIGÓN**

Tipo de H°	Módulo de rotura (lb/pulg <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (lb/pulg <sup>2</sup> )
H - 21	724	4,01 x 10 <sup>6</sup>
HRF <sub>21</sub> - A2	754	3,87 x 10 <sup>6</sup>
H - 28	819,25	4,72 x 10 <sup>6</sup>
HRF <sub>28</sub> - A2	858,4	4,79 x 10 <sup>6</sup>

En la Tabla 20 se presenta los espesores de la losa calculados utilizando hormigones reforzados con fibra sintética y su comparación con hormigones sin fibras. Comparando los espesores calculados, puede deducirse que la introducción de una cuantía media de fibras de plástico (1,0 kg/m<sup>3</sup>), reduce el espesor de la losa en 15 mm. Esta reducción del espesor disminuye el volumen de hormigón a ser utilizado, por tanto, el costo total del hormigón con fibras es menor en un 2,2 % para el hormigón de 21 N/mm<sup>2</sup> y 2,96 % para el hormigón de 28 N/mm<sup>2</sup>, con respecto a hormigones normales.

**TABLA 20 – RESUMEN DE ESPESORES DE LOSA QUE CONTIENEN FIBRA SINTÉTICA Y SU COMPARACIÓN**

Tipo de H°	Espesor (mm)	Vol. de H° (m3)	Costo de H° (\$us)	Fibras (Kg)	Costo de fibras (\$us)	Total (\$us)	Diferencia (\$us)
H - 21	184,7	26966,2	1806735,4	0	0,0	1806735,4	0,0
HRF <sub>21</sub> - A2	169,4	24732,4	1657070,8	24732	110801,2	1767872,0	38863,4
H - 28	168,5	24601,0	1648267,0	0	0,0	1648267,0	0,0
HRF <sub>28</sub> - A2	153,4	22396,4	1500558,8	22396	100335,9	1600894,7	47372,3

## 7. CONCLUSIONES

Para los hormigones sin fibras, en el ensayo de vigas se verifica una rotura brusca y explosiva después del inicio de la fisuración. La presencia de fibras controla la fisuración y permite un incremento significativo en su resistencia a la tracción.

En relación a la trabajabilidad, la incorporación de fibras de plástico, para una cuantía de 1,00 a 1,35 kg/m<sup>3</sup>, es la mejor dosificación para el control de fisuras y para obtener un asentamiento que permita que la mezcla pueda ser colocada y compactada de forma convencional.

Considerando el modulo de rotura, se verificó que los hormigones confeccionados con 0,6 y 1,0 kg/m<sup>3</sup> de fibras Stealth, presentan un incremento de 1,20 a 4,21 % para hormigón de 21 N/mm<sup>2</sup> y de 1,06 a 4,78 % para hormigón de 28 N/mm<sup>2</sup> en comparación a los hormigones normales.

Con la utilización de cuantías mínimas de las fibras plásticas (Stealth e Inforce) de 0,60 y 0,90 kg/m<sup>3</sup> respectivamente, se evitó la fisuración por retracción del hormigón. Las fibras también muestran ser eficientes en la prevención de fisuras en forma de mapa, lo que proporciona ventajas económicas, evitando gastos posteriores de mantenimiento.

La comparación de las gráficas tensión-deformación demuestra que los hormigones reforzados con fibra poseen una mayor deformación. Por tanto, la adición de fibras a una mezcla de hormigón la hace más dúctil.

La trabajabilidad, que es una propiedad del hormigón que determina su capacidad de ser colocado y compactado apropiadamente, se ve reducida por la adición de cualquier tipo de fibras ya que éstas absorben el agua, haciendo del hormigón una mezcla seca.

Las fibras de plástico tienen un comportamiento parecido a las fibras de metal, pero las fibras de metal permiten soportar mayores esfuerzos y deformaciones debido a que el metal tiene propiedades físicas y mecánicas mejores que el plástico. Esto no significa que las fibras de plástico no sean adecuadas para ser utilizadas en la construcción de un pavimento rígido. Se demostró que las fibras de plástico ayudan a aumentar la ductilidad y a prevenir fisuras producidas por la retracción del hormigón.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a COBOCE HORMIGÓN, al Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (IBCH) y a la importadora VEZLA S.R.L., quienes colaboraron con equipos de laboratorio, información bibliográfica y materiales para la realización de la presente investigación.

## 9. REFERENCIAS

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. *Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimento*, 444 Nort Capitol Street, Washington, D.C., USA, 1997.
- [2] Aashto-Agc-Artba Joint Committee. *The Use and State-of-the-Practice of Fiber Reinforced Concrete USA*, v 1, s/e, Aug. 2001, pp. 1-50.
- [3] H. Abrishami and D. Mitchell. *Influencia de las Fibras de Metal en el Refuerzo a Tensión*. ACI Structural Journal USA, v 1, s/n, Nov.-Dic. 1997, pp. 769-776.
- [4] *American Concrete Institute*. ACI 318. Ed. Arq. Heraclio Esqueda, México, 2002, pp. 349.
- [5] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 29/C 29M. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 1-4.
- [6] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 31. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 5-9.
- [7] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 33. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 10-16.
- [8] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 39. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 20-24.
- [9] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 40. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 25-26.
- [10] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 78. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 33-35.
- [11] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 127. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 65-69.
- [12] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 128. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 70-73.
- [13] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 143. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 87-89.
- [14] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 150. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 92-96.
- [15] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 172. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 109-110.
- [16] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 192-90a. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 115-121.
- [17] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 330. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 193-195.
- [18] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 470. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 246-249.
- [19] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 595. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 291-295.
- [20] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 617. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 299-302.
- [21] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 1116. Ed. Roberta a. Storer, Philadelphia, 1991, pp. 578-585.
- [22] J. Hop and P. C. Tatnal. (Jan. 2003). *Mitos y Realidades sobre el Concreto Reforzado con Fibras de Metálicas*. [On-line] México (Netscape Hypertext Document). Disponible en internet: <http://www.imcyc.com/cyt/agosto03/metalicas.htm>.
- [23] P. Jimenez Montoya et al. *Hormigón Armado*. España: ed. Gustavo Gili, 1991, pp. 710.
- [24] A. H. Nilson and G. Winter. *Diseño de Estructuras de Concreto*. Undécima edición. Colombia: Ed. Martha Edna Suárez R., 1993, pp. 770.
- [25] Oliveira, de Pinto Júnior, Newto. *Relatos de Ensayos Tecnológicos*. Zeferino Vaz: s/e, Junio 2001, pp. 1-47.
- [26] F. Rocha et al. *Concreto de Alto Desempeño Reforzado con Fibras*, Ingeniería Estudio e Investigación. Ed. Juiz de Fora, vol. 3, 2000, pp. 87-98.
- [27] C. Valdivieso et al. *Estadística para Ciencias Empresariales*, Bolivia, 2003, pp. 272.
- [28] M. Cadima. *Características Mecánicas de Hormigones Reforzados con Fibras*, TFG No. UPB-LIC-009/2004, Cochabamba - Bolivia, 2004.
- [29] N. Blacud. *Estudio de Factibilidad Asfaltado Tramo Vial Villamontes – IBIBOBO – HITO BR94*. TFG No. UPB-LIC-004/2002, Cochabamba - Bolivia, 2002.