



# **ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Construcción, pruebas de carga y análisis de vigas pre-esforzadas utilizando Hormigón de Alto Desempeño y comparación con vigas pre-esforzadas construidas con hormigones convencionales sometidas a las mismas condiciones de carga”.

## **TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

## **INGENIERO CIVIL**

Presentada por:

Carlos Raúl Rodríguez Díaz

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2009

## **AGRADECIMIENTO**

Al Ing. José Camposano, gran profesor y Director de la presente Tesis de Graduación. A las empresas HOLCIM y MAVISA y a su equipo humano que prestó su colaboración para el desarrollo de esta investigación. Agradecimiento especial a aquellos profesores de mi Facultad cuya vocación a la enseñanza y excelencia profesional nos ha permitido ser sus alumnos más allá de las aulas.

## **DEDICATORIA**

A Dios por llenarme siempre de Fe, a mis padres por su paciencia, apoyo y guía y a todos mis familiares y amigos que siempre han estado pendientes de mi desarrollo personal y profesional.

## TRIBUNAL DE GRADUACION

---

Ing. Gastón Proaño Cadena

Presidente del Tribunal

---

Ing. José Camposano Luque

Director de Tesis

---

Ing. Pedro Rojas C., Ph.D.

Vocal del Tribunal

---

Ing. Alex Villacrés S., M.Sc

Vocal Alterno

## **DECLARACION EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Carlos Raúl Rodríguez Díaz

## RESUMEN

Cada día en el mundo de la construcción se exige la fabricación de elementos estructurales que sean capaces de salvar grandes luces, lo que obliga a utilizar elementos de grandes secciones para soportar las cargas actuantes, para lo cual al usar materiales y métodos tradicionales se encarece la obra haciéndola económicamente no viable y arquitectónicamente poco atractiva.

Los últimos estudios en el desarrollo de hormigones de alta resistencia han tenido éxito en la obtención de resultados en los ensayos a la compresión simple obteniéndose resistencia hasta 150 MPa y el mejoramiento notable de las características de desempeño, esto en conjunto con el desarrollo de su aplicación en estructuras, ya se han podido construir proyectos de puentes vehiculares en Francia y puentes peatonales en Canadá, los cuales contemplan grandes luces y cargas considerables, que al utilizar elementos de hormigón pre-esforzado junto con el empleo de hormigón de ultra alta resistencia han resultado en diseños más económicos debido a la reducción considerable en la sección de las vigas.

El desarrollo de este tipo de investigaciones en nuestro país es algo nuevo, recientemente, se han desarrollado estudios para obtener hormigones de

ultra alta resistencia en laboratorio con materiales locales y utilizando dosificaciones probadas en investigaciones previas en otros países, producto de estas investigaciones se ha podido caracterizar los materiales a emplearse y comprobar las resistencias esperadas.

El siguiente paso consiste en analizar la posibilidad de elaborar elementos estructurales utilizando Hormigón de Alta Resistencia a gran escala en nuestro medio, analizar sus posibles aplicaciones y sus repercusiones en el diseño y la economía de los proyectos.

## INDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	II
DEDICATORIA.....	III
TRIBUNAL DE GRADUACION.....	IV
DECLARACION EXPRESA.....	V
RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VII
ABREVIATURAS.....	XI
SIMBOLOGIAS.....	XII
INDICE DE FIGURAS.....	XV
INDICE DE TABLAS.....	XVI
INDICE DE GRAFICOS.....	XVII

### **CAPITULO I**

#### **Generalidades**

1.1 Objetivos y Justificación.....	1
1.2 Hormigón Pre-esforzado.....	3
1.3 Hormigón de Alto Desempeño.....	4
1.4 Hormigón de Ultra Alto Desempeño.....	8
1.5 Bases de diseño de vigas pre-esforzadas.....	12
1.6 Diseño a flexión de vigas pre-esforzadas.....	25
1.7 Pruebas de carga.....	34

### **CAPITULO II**

#### **Análisis de vigas pre-esforzadas construidas utilizando HAD**

2.1 Descripción de las condiciones físicas, geométricas y de carga.....	37
--	----

2.2 Resistencia a la flexión.....	41
2.3 Calculo de cargas y deflexiones.....	45
2.4 Resultados obtenidos.....	47

### **CAPITULO III**

#### **Análisis de vigas pre-esforzadas construidas utilizando hormigones convencionales.**

3.1 Descripción de las condiciones físicas, geométricas y de carga.....	49
3.2 Resistencia a la flexión.....	52
3.3 Calculo de cargas y deflexiones.....	56
3.4 Resultados obtenidos .....	58

### **CAPITULO IV**

#### **Construcción de vigas pre-esforzadas utilizando HUAD**

4.1 Memorias técnicas.....	59
4.2 Dosificación.....	60
4.3 Procedimientos técnicos constructivos.....	61
4.4 Características técnicas de los materiales.....	73

### **CAPITULO V**

#### **Pruebas de carga de vigas pre-esforzadas construidas con HAD y de vigas pre-esforzadas construidas con hormigones convencionales.**

5.1 Ensayos de control de calidad.....	83
5.2 Pruebas de carga dinámica con carga puntual en vigas simplemente apoyadas.....	86
5.3 Resultados obtenidos.....	91

### **CAPITULO VI**

#### **Análisis y comparación de resultados de las pruebas de carga de vigas pre-esforzadas construidas con HAD y de vigas pre-esforzadas construidas con hormigones convencionales.**

6.1 Análisis y comparación de resultados obtenidos del análisis teórico de deflexiones de vigas pre-esforzadas construidas con HAD versus resultados obtenidos de la prueba de carga.....	95
6.2 Análisis y comparación de resultados obtenidos del análisis teórico de deflexiones de vigas pre-esforzadas construidas con hormigón convencional versus resultados obtenidos de la prueba de carga.....	98
6.3 Análisis y comparación de resultados obtenidos de las pruebas de carga de vigas pre-esforzadas construidas con HAD versus vigas construidas con hormigón convencional.....	102
CONCLUSIONES.....	105
RECOMENDACIONES.....	107
ANEXOS.....	109
ANEXO A Archivos de datos de pruebas de carga.....	110
ANEXO B Archivos de datos de pruebas de carga.....	115
ANEXO C Viguetas pretensadas MAVISA.....	123
ANEXO D Glenium 3000 NS.....	124
ANEXO E Sika Fume.....	126
BIBLIOGRAFIA.....	128

## **ABREVIATURAS**

HAD: Hormigón de Alto Desempeño

HC: Hormigón Convencional

ACI: American Concrete Institute

ASCE: American Society of Civil Engineers

IBC: International Building Code

HRWR: Reductor de agua de alto rango

CEINVES: Centro de Investigaciones en Ingeniería Estructural y  
Sismoresistente

## SIMBOLOGIAS

$b$  = ancho de la cara en compresión del elemento

$d$  = distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción

$d'$  = distancia desde la fibra extrema en compresión al centroide del refuerzo longitudinal en compresión

$E_c$  = módulo de elasticidad del concreto

$E_p$  = módulo de elasticidad del acero de preesfuerzo

$f'_c$  = resistencia especificada a la compresión del concreto, MPa

$f_{ce}$  = resistencia efectiva a la compresión del concreto en un puntal o zona de nodo, MPa

$f'_{ci}$  = resistencia especificada a la compresión del concreto al momento del preesforzado inicial, MPa

$f_{pc}$  = *esfuerzo de compresión en el concreto (después de que han ocurrido todas las pérdidas de preesforzado) en el centroide de la sección transversal que resiste las cargas aplicadas externamente, o en la unión del alma y el ala cuando el centroide está localizado dentro del ala, MPa*

$f_{pe}$  = esfuerzo de compresión en el concreto debido únicamente a las fuerzas efectivas del preesforzado (después de que han ocurrido todas las pérdidas de preesforzado) en la fibra extrema de una sección en la cual los esfuerzos de tracción han sido producidos por la cargas aplicadas externamente, MPa,

$f_{ps}$  = esfuerzo en el acero de preesfuerzo en el estado de resistencia nominal a la flexión, MPa

$f_{pu}$  = resistencia especificada a la tracción del acero de preesforzado, MPa,

$f_{py}$  = resistencia especificada a la fluencia del acero de preesforzado, MPa

$f_t$  = esfuerzo en la fibra extrema por tracción en la zona de tracción precomprimida, calculado para las cargas de servicio usando las propiedades de la sección bruta, MPa

$f_y$  = resistencia especificada a la fluencia del refuerzo, MPa

$I$  = momento de inercia de la sección con respecto al eje que pasa por el centroide, mm<sup>4</sup>

$I_b$  = momento de inercia de la sección bruta de una viga con respecto al eje que pasa por el centroide, mm<sup>4</sup>

$I_{cr}$  = momento de inercia de la sección fisurada transformada a concreto, mm<sup>4</sup>

$I_e$  = momento de inercia efectivo para el cálculo de las deflexiones, mm<sup>4</sup>

$I_g$  = momento de inercia de la sección bruta del elemento con respecto al eje que pasa por el centroide, sin tener en cuenta el refuerzo, mm<sup>4</sup>

$l$  = luz de la viga o losa en una dirección; proyección libre del voladizo, mm

$M$  = máximo momento no mayorado debido a cargas de servicio, incluyendo los efectos  $P\Delta$ , N·mm

$M_{cr}$  = momento de fisuración, N·mm

$P_c$  = carga crítica a pandeo

$w_c$  = densidad del concreto, kg/m<sup>3</sup>

$\beta_1$  = factor que relaciona la profundidad de bloque rectangular equivalente de esfuerzos de compresión con la profundidad del eje neutro.

$\gamma_p$  = factor por tipo de acero de preesforzado,

$\Delta f_{ps}$  = esfuerzo en el acero de preesforzado bajo cargas de servicio menos el esfuerzo de descompresión, MPa

## INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.	Two Prudential Plaza Chicago, Hormigón 82 MPa.....	7
Figura 2.	Puente Bourg-les-Valence primer puente vehicular con HUAD del mundo, Francia. Vigas principales pre-esforzadas.....	9
Figura 3.	Puente Bourg-les-Valence primer puente vehicular con HUAD del mundo, Francia. Vigas principales pre-esforzadas.....	9
Figura 4.	Componentes del Hormigón de Alto Desempeño.....	11
Figura 5.	Viga simplemente apoyada de hormigón sin refuerzo.....	13
Figura 6.	Viga simplemente apoyada de hormigón con pre-esfuerzo.....	14
Figura 7.	Viga simplemente apoyada de hormigón con pre-esfuerzo a una excentricidad constante.....	15
Figura 8.	Viga simplemente apoyada de hormigón con pre-esfuerzo a excentricidad variable.....	17
Figura 9.	Viga simplemente apoyada de hormigón con pre-esfuerzo a excentricidad variable.....	18
Figura 10.	Cargas equivalentes y momentos producidos por los tendones de pre-esfuerzo.....	20
Figura 11.	Viga de concreto pre-esforzado sometido a una carga cercana a la que produciría la falla por flexión.....	24
Figura 12.	Descripción de las características físicas y geométricas de la viga.....	38
Figura 13.	Ubicación del centroide y excentricidad de la viga.....	39
Figura 14.	Descripción de las condiciones de carga de la viga. Una sola carga puntual.....	41
Figura 15.	Viga sometida a una carga puntual.....	45
Figura 16.	Descripción de las características físicas y geométricas de la viga.....	50

Figura 17.	Descripción de las condiciones de carga de la viga. Una sola carga puntual.....	52
Figura 18.	Viga sometida a una carga puntual.....	56
Figura 19.	Dosificación de los materiales. Pesado de el cuarzo molido....	63
Figura 20.	Dosificación de los materiales. Pesado de las fibras metálicas.....	64
Figura 21.	Dosificación de los materiales. Pesado de las fibras metálicas.....	65
Figura 22.	Dosificadora – Mezcladora. Capacidad aproximada 0.25 metros cúbicos.....	67
Figura 23.	Mezclado dentro del tambor.....	67
Figura 24.	Vertido de la mezcla en un montacargas adaptado para transportar hormigón.....	69
Figura 25.	Vertido del hormigón de alto desempeño en los moldes de las viguetas pretensadas.....	70
Figura 26.	Desmolde de las viguetas. Izquierda, HAD. Derecha hormigón convencional.....	72
Figura 27.	Obtención del polvo reactivo producto de la molienda de la arena cuarzosa.....	77
Figura 28.	Fibra metálica Bekaert OL13 0.16.....	80
Figura 29.	Cilindro de HAD ensayado a la compresión simple a los 21 días.....	85
Figura 30.	Gato hidráulico <i>Enerpac</i> 5 ton.....	87
Figura 31.	Data Logger TDM model TDS-303.....	88
Figura 32.	Detalle de montaje de la instrumentación.....	89
Figura 33.	Detalle de fisura en la zona de falla de la viga construida con hormigón convencional (vista frontal).....	91
Figura 34.	Detalle de fisura en la zona de falla de la viga construida con hormigón convencional (vista posterior).....	91

Figura 35. Fisura en la zona de falla de la viga construida con HAD (vista frontal).....	93
Figura 36. Detalle ubicación de fisura en la zona de falla de la viga construida con HAD (vista posterior).....	93
Figura 37. Detalle de fisura en la zona de falla de la viga construida con HAD (vista posterior).....	94

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estimativo de las pérdidas de pre-esfuerzo (AASHTO).....	34
Tabla 2. Cálculo de centroide de la sección.....	39
Tabla 3. Cálculo del momento de inercia de la sección.....	40
Tabla 4. Resultado del análisis teórico vigas construidas con Hormigón de Alto Desempeño $f'c= 98.26$ MPa.....	48
Tabla 5. Resultado del análisis teórico vigas construidas con Hormigón Convencional $f'c = 44.14$ MPa.....	58
Tabla 6. Dosificación de vigas construidas con hormigón de alto desempeño.....	61
Tabla 7. Composición química del cemento tipo I.....	75
Tabla 8. Composición química de las fibras metálicas.....	82

## INDICE DE GRAFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Resistencia a la compresión simple muestras de Hormigón de Alto Desempeño.....	84
Gráfico 2. Curva Carga versus Deflexión viga pretensada construida con hormigón convencional. Luz 2.60 m.....	90
Gráfico 3. Curva Carga versus Deflexión viga pretensada construida con Hormigón de Alto Desempeño. Luz 2.60 m.....	92
Gráfico 4. Comparación de las deflexiones medidas y las deflexiones calculadas en vigas pretensadas construidas con HAD .....	97
Gráfico 5. Comparación de las deflexiones medidas y las deflexiones calculadas en vigas pretensadas construidas con HAD .....	100
Gráfico 6. Comparación de la respuesta estructural de vigas pretensadas construidas con HAD y Hormigones Convencionales.....	102

# **CAPITULO I**

## **GENERALIDADES**

### **1.1. Objetivos y justificación**

Los objetivos generales del presente trabajo de investigación consisten en: Evaluar la posibilidad de construir en nuestro medio, elementos estructurales utilizando Hormigón de Alto Desempeño (HAD). Construir vigas pre-esforzadas utilizando HAD y vigas pre-esforzadas utilizando hormigones convencionales para luego someterlas a pruebas de carga bajo las mismas condiciones. Comparar desde el punto de vista de respuesta estructural y económico, las ventajas y desventajas de la utilización del Hormigón de Alta Resistencia producido localmente.

Como objetivos específicos la propuesta de esta investigación es aplicar el diseño de vigas empleando Hormigón de Alto Desempeño empleando materiales y tecnología locales, comparar la respuesta estructural entre vigas construidas con HAD y vigas construidas con hormigón convencional de las mismas características geométricas y de carga.

La creciente demanda de infraestructura de gran escala en nuestro medio como es la construcción de edificaciones que requieren elementos estructurales que salven grandes luces como vigas para puentes vehiculares, peatonales y vigas para edificios, exige el empleo de vigas de hormigón de gran sección transversal o vigas metálicas. Vigas de hormigón de gran sección transversal añaden a las estructuras cargas adicionales originadas por el peso propio además de constituir elementos con peraltes incómodos e indeseables; mientras que los costos del acero hacen que los proyectos sean económicamente inviables.

La investigación desarrollada en el campo de la tecnología del hormigón ha permitido perfeccionar el diseño de elementos de concreto, el Hormigón de Ultra Alto Desempeño desarrollado a finales del siglo XX ha permitido obtener resistencias a la

compresión simple en el hormigón superiores a los 100 MPa. Constituyendo una alternativa para el diseño, y en nuestro medio, un desafío para el constructor, la utilización de Hormigones de Alto Desempeño en elementos pre-esforzados ha dado como resultado la obtención de elementos de secciones transversales pequeñas, reduciendo cargas producidas por peso propio de los elementos, capaces de soportar grandes cargas. Lograr estos objetivos justifica la utilización de Hormigones de Alto Desempeño para lograr estructuras más económicas y arquitectónicamente más atractivas.

## **1.2. Hormigón pre-esforzado.**

En términos generales el pre-esfuerzo se define como el pre-cargado de una estructura, antes de la aplicación de las cargas de diseño requeridas, aplicado de una forma tal que mejore el comportamiento general de la estructura.

El concreto pre-esforzado se define como aquel concreto en el cual han sido introducidos esfuerzos internos de tal magnitud y distribución que los esfuerzos resultantes debido a cargas externas son contrarrestados a un grado deseado. El pre-esforzado del concreto implica la aplicación de una carga compresiva, previo la

aplicación de las cargas consideradas en el diseño, ocasionando que se reduzcan o eliminan los esfuerzos de tracción que de tal forma ocurrirían.

Inicialmente el empleo del pre-esfuerzo en el concreto era utilizado para eliminar en el miembro sujeto a las cargas de diseño, todos los efectos de los esfuerzos de tracción que se producen. Sin embargo la práctica actual de diseño permite que existan esfuerzos de tracción limitados en el concreto así como agrietamientos mínimos.

De acuerdo desde el punto de vista del que se lo analice, existen tres conceptos o características que se emplean para explicar y definir el comportamiento básico del concreto pre-esforzado: como un método para lograr el control de los esfuerzos en el concreto, como un medio para introducir cargas equivalente en el concreto y como una variación de el concreto reforzado. Es importante considerar en todas las etapas de diseño estos tres conceptos para obtener diseños seguros y eficientes.

### **1.3. Hormigón de alto desempeño.**

La definición exacta de este tipo de hormigón ha sido y sigue siendo tema de debate para la comunidad de científicos y profesionales. Durante los años setentas, cuando la resistencia a la compresión de concretos usados en las columnas de edificios altos, comenzó a fabricarse con resistencias superiores a las usuales, el termino hormigones de alta resistencia se utilizó para reconocer este tipo de hormigón, sin embargo para estándares actuales, estos constituían hormigones usuales, con la particularidad que eran fabricados utilizando cementos, arena y piedras cuidadosamente seleccionadas y procesos controlados, pero por lo general disponible Sin embargo cuando los Reductores de Agua de Alto Rango, conocidos comúnmente como Superplastificantes, se comenzaron a utilizar para reducir la relación agua/cemento y no solo para mejorar la trabajabilidad del hormigón, junto con la adición de cenizas volantes y microsílica, se demostró que hormigones con bajas relaciones agua/cemento, resultaron en mejoras importantes en las características del hormigón como son, mejor trabajabilidad, elevado modulo de elasticidad, elevada resistencia a la flexión, baja permeabilidad, mejorada resistencia a la abrasión y mayor durabilidad. Lo que ha llevado a la utilización generalizada de Hormigones de Alto Desempeño.

Existen dos puntos de vista, relacionados entre sí, desde el cual se puede diferenciar entre hormigones convencionales y hormigones de alto desempeño. Desde el punto de vista de resistencia a la compresión, el ACI determina que los hormigones convencionales son aquellos cuya resistencia a la compresión no excede los 80 MPa. Todos los demás son considerados hormigones de alta resistencia. Otra aproximación hacia la diferenciación entre estos hormigones, se la puede hacer desde el punto de vista de la relación agua/cemento. Para hormigones convencionales se está utilizando en el intervalo de 0.40 a 0.60 en peso, en tanto que para hormigones de alto desempeño pueden ser tan bajas como 0.25 o aún menor. Con el fin de permitir un vaciado adecuado que de otra manera sería un mezcla con cero asentamiento, resultan esenciales los aditivos reductores de agua de amplio rango o “superplastificantes” que pueden aumentar los asentamientos hasta valores de 15 a 20cm. Otros aditivos incluyen usualmente cenizas volantes y microsíllica.

En años recientes se ha presentado un interés creciente por los hormigones de alta resistencia. Concretos con resistencias de 140 MPa está siendo actualmente utilizado en edificios de gran altura en Estados Unidos y en Europa. La aplicación más común del

hormigón de alta resistencia ha sido en las columnas de edificaciones altos donde el hormigón normal o convencional resultaría en secciones transversales inaceptablemente grandes, con la pérdida de espacio valioso de piso útil. Se ha demostrado que la utilización de mezclas de hormigón de alto desempeño, aunque más costosas, no solamente aumenta el área de piso utilizable, sino que también resulta más económico que aumentar la cantidad de acero de refuerzo.



**FIGURA. 1.** Two Prudential Plaza Chicago: Hormigón 82 MPa

Para el caso de puentes también se presentan ventajas significativas mediante la utilización de secciones transversales menores, con la reducción resultante en carga muerta lo cual permite mayores luces. El mayor módulo elástico y el menor coeficiente de flujo plástico resulta en deflexiones instantáneas y a largo plazo reducidas, y en el caso de puentes pre-esforzados se logran menores pérdidas en la fuerza de pre-esfuerzo tanto inicial como en el tiempo.

Otras aplicaciones recientes de hormigón de alto desempeño incluyen estructuras costas afuera para explotación de petróleo, edificios para parqueo, realce de tableros para puentes, rebosaderos de presas, bodegas y losas industriales pesadas. Un requisito esencial para el hormigón de ultra alto desempeño es una baja relación de agua cemento.

#### **1.4. Hormigón de ultra alto desempeño.**

Se define hormigones de ultra alto desempeño (HUAD), aquellos con altos contenidos de cemento y baja relaciones agua/material cementicio, y que su resistencia a la compresión simple se encuentre en el rango entre 200 y 800 MPa, siendo el menor de estos valores utilizado actualmente en la construcción de elementos

estructurales debido a su gran ductilidad, mayores valores de resistencia a la compresión simple han sido utilizados en aplicaciones no estructurales como losas para pisos en galpones industriales y depósitos de desechos nucleares.



**FIGURAS 2 Y 3.** Puente Bourg-les-Valence primer puente vehicular con HUAD del mundo, Francia. Vigas principales pre-esforzadas.

Una de las principales características de este hormigón es el uso de un polvo en el concreto, en el cual los agregados y la arena comúnmente utilizados son reemplazados por un polvo de arena cuarzosa, de menos de 300  $\mu\text{m}$  de tamaño, por esto el hormigón de ultra alta resistencia es también llamado hormigón de polvo reactivo. La relación agua/cemento en este tipo de hormigones es mucho menor que en el hormigón de alta resistencia, estando en el rango entre 0.10 y 0.20 para poder lograr la mayor densidad posible en el producto endurecido. Otra propiedad importante de los hormigones de ultra alto desempeño es el aumento en el módulo de Young por un factor de casi 3 veces, es así que este valor puede alcanzar valores de entre 55 hasta 75 GPa. Varios autores han desarrollado las siguientes características para el hormigón de polvo reactivo.



**FIGURA 4.** Componentes del Hormigón de Ultra Alto Desempeño. De izquierda a derecha: Cemento tipo I, fibra metálica, polvo reactivo, arena silicia y humo de sílice. Detrás: Superplastificante.

Estos hormigones se consideran los hormigones del futuro, de los próximos 30 o 50 años, pues permiten a los diseñadores secciones más esbeltas, edificios más altos, puentes más largos, estructuras más durables. Debido a su composición, a diferencia de los hormigones convencionales o de Alto Desempeño, el comportamiento de estos hormigones no solo exhibe una alta resistencia a la tracción, sino que cuenta con una alta capacidad de deformación a tracción a un esfuerzo sostenido que le permite contar con un comportamiento dúctil sin necesidad de contar con algún tipo de confinamiento por medio de estribos. Esta propiedad de alta ductilidad intrínseca del material, sumada a la posibilidad de

contar con estructuras más livianas, permiten el considerar a los hormigones de ultra alto desempeño (HUAD) como un material apto, ventajosos y prometedor para aplicaciones en zonas sísmicas.

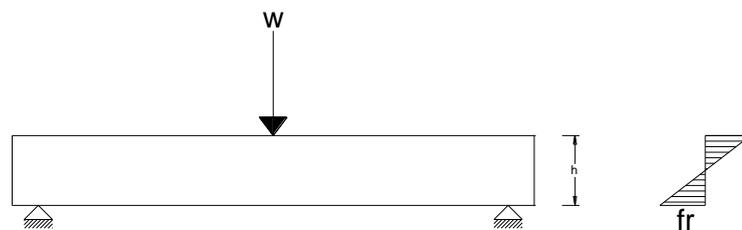
### **1.5. Bases de diseño de vigas pre-esforzadas.**

Existen al menos tres maneras alternas de mirar el preesfuerzo del concreto: (a) como un método para lograr el control de los esfuerzos en el concreto, mediante el cual el concreto se precomprime de modo que la tracción producida normalmente por las cargas aplicadas se reduce o se elimina; (b) como un medio para introducir cargas equivalentes en un elemento de concreto, de forma que los efectos de las cargas aplicadas se contrarresten hasta el grado deseado; y (c) como una variación especial del concreto reforzado en la cual se utiliza acero predeformado de alta resistencia, por lo general en combinación con concreto de alta resistencia. Cada uno de estos puntos de vista es útil en el análisis y diseño de estructuras de concreto preesforzado y se ilustrarán en los siguientes párrafos.

#### **1.5.1. Control de esfuerzos en el concreto mediante preesfuerzo**

Muchas de las características importantes del concreto preesforzado pueden demostrarse con ejemplos sencillos.

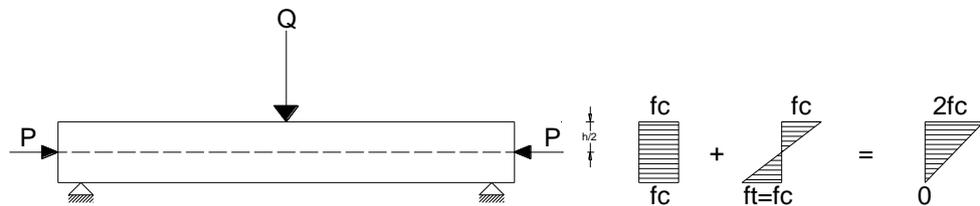
Considere inicialmente la viga simple de concreto sin refuerzo que aparece en la figura; ésta soporta una carga concentrada única en el centro de la luz (el peso propio del elemento se despreciará en este caso). A medida que se aplica gradualmente la carga  $W$ , se inducen esfuerzos longitudinales de flexión. Si el concreto se somete a esfuerzos sólo dentro de su rango elástico, la distribución de esfuerzos de flexión en el centro de la luz será lineal, como se ilustra en la figura 5.



**FIGURA 5.** Viga simplemente apoyada de hormigón sin refuerzo.

Con una carga relativamente baja, el esfuerzo de tracción en el concreto en la parte inferior de la viga alcanzará la resistencia a tracción  $f_r$ , y se formará una grieta. Puesto que no se suministra ninguna restricción con respecto a la propagación hacia arriba de la grieta, la viga presentará colapso sin un incremento adicional de la carga.

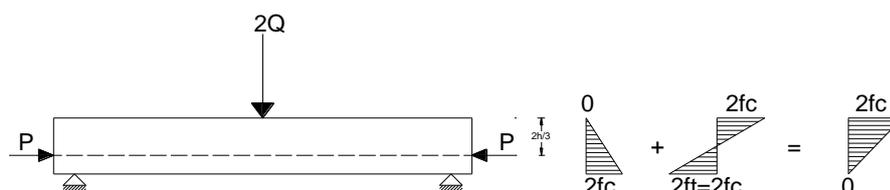
Considere ahora otra viga idéntica, expuesta en la figura 6, en la cual se introduce una fuerza axial longitudinal  $P$  antes de la aplicación de la carga vertical. La fuerza de preesfuerzo longitudinal producirá una compresión axial uniforme  $f_c = P/A_c$ , donde  $A_c$  es el área de la sección transversal de concreto. La fuerza puede ajustarse en magnitud de manera que, al aplicar la carga transversal  $Q$ , la superposición de los esfuerzos que generan  $P$  y  $Q$  produzca un esfuerzo de tracción nulo en la parte inferior de la viga, como se presenta. Los esfuerzos de tracción en el concreto pueden eliminarse de esta manera o reducirse hasta una magnitud especificada.



**FIGURA 6.** Viga simplemente apoyada de hormigón con pre-esfuerzo.

Sería más lógico aplicar la fuerza de preesfuerzo en la parte inferior de la viga, para compensar en forma más efectiva la tracción inducida por dicha fuerza. Por ejemplo, una posible especificación

de diseño podría consistir en introducir la máxima compresión en la parte inferior de la viga, sin producir tracción en la parte superior, cuando la fuerza de preesfuerzo actúa sola. Para lograr esto se puede demostrar fácilmente que para una viga con una sección transversal rectangular, el punto de aplicación de la fuerza de preesfuerzo debe estar en un punto ubicado a un tercio de la altura de la sección medido desde la cara inferior. La fuerza  $P$ , con el mismo valor que antes, pero aplicada con una excentricidad  $e = h/6$  con respecto al centroide del concreto, producirá una distribución de esfuerzos longitudinales de compresión que varía linealmente desde cero en la superficie superior a un máximo de  $2/c = P/AC + Pec/2I_c$  en la parte inferior, donde  $f_c$  es el esfuerzo en el concreto en su centroide,  $c_2$  es la distancia desde el centroide del concreto hasta la parte inferior de la viga e  $I_c$  es el momento de inercia de la sección transversal; esto se ilustra en la figura 7. El esfuerzo en la parte inferior será exactamente igual al doble del valor producido anteriormente por el preesfuerzo axial.



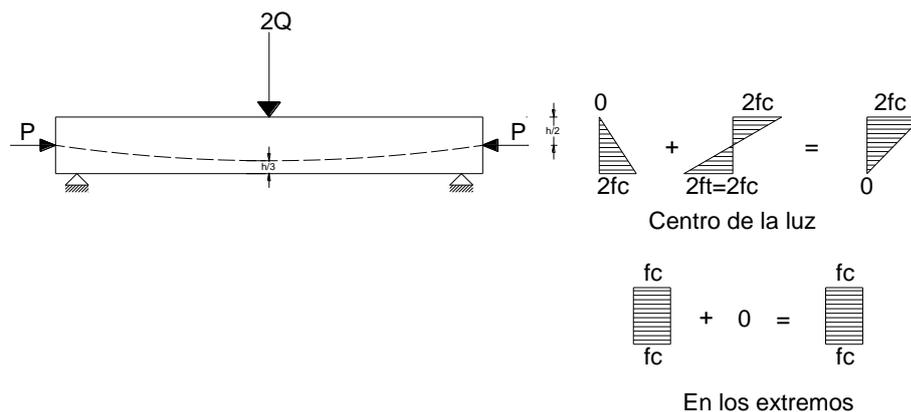
**FIGURA 7.** Viga simplemente apoyada de hormigón con pre-esfuerzo a una excentricidad constante.

En consecuencia, la carga transversal puede ahora tener el doble de magnitud que antes, o sea  $2Q$ , sin que se produzcan aún esfuerzos de tracción. De hecho, la distribución final de esfuerzos que resulta de la superposición de la carga y de la fuerza de preesfuerzo en la figura es idéntica a la de la figura anterior, con la misma fuerza de preesfuerzo, aunque la carga es el doble en magnitud. La ventaja del preesfuerzo excéntrico es obvia.

Por el momento, es suficiente saber que uno de los métodos prácticos de preesfuerzo utiliza tendones de acero de alta resistencia que pasan a través de un conducto embebido en la viga de concreto. El tendón, sometido a una tracción considerable, se ancla en los dos extremos de la viga, produciendo de esta manera un esfuerzo de compresión longitudinal en el concreto. Las fuerzas de preesfuerzo de las figuras podrían haberse aplicado de este modo.

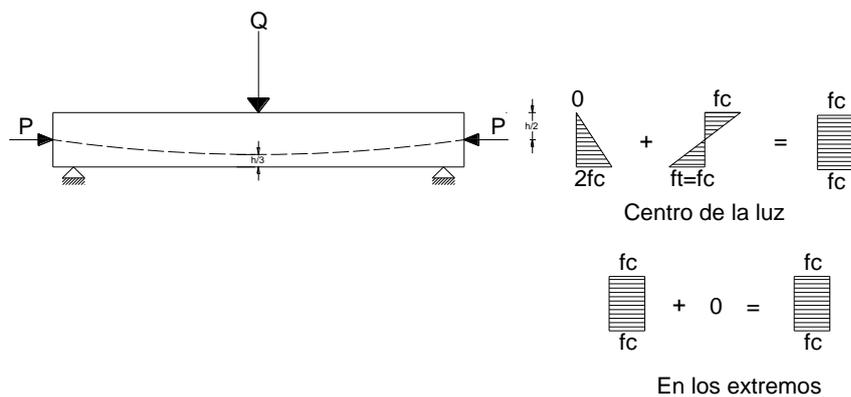
Sin embargo, puede lograrse un mejoramiento significativo utilizando un tendón de preesfuerzo con excentricidad variable con

respecto al centroide del concreto, como en la figura. La carga  $2Q$  produce un momento flector que varía linealmente a lo largo de la luz, desde cero en los apoyos hasta un máximo en el centro de la luz. Intuitivamente se esperaría que la mejor distribución del preesfuerzo es la que produce un contramomento que actúe en el sentido opuesto al momento inducido por la carga y que varía de la misma manera; esto se logra si se da al tendón una excentricidad que varíe linealmente, desde cero en los apoyos hasta un máximo en el centro de la luz, como aparece en la figura 8. Los esfuerzos en el centro de la luz son los mismos que los de la figura 7, para la viga con y sin la carga de  $2Q$ . En los apoyos, donde solamente actúa la fuerza de preesfuerzo con una excentricidad nula, se obtiene un esfuerzo de compresión uniforme  $f_c$ , como se indica.



**FIGURA 8.** Viga simplemente apoyada de hormigón con pre-esfuerzo a excentricidad variable.

Para cada distribución característica de carga existe el mejor perfil del tendón que produce un diagrama de momentos de pre-esfuerzo que corresponde al de la carga aplicada. Si el contramomento de pre-esfuerzo se hace exactamente igual y opuesto al producido por la carga, el resultado es una viga sometida sólo a un esfuerzo de compresión axial uniforme en el concreto a todo lo largo de la luz. Esta viga estaría totalmente libre de grietas por flexión y, en teoría, no se deflectaría hacia arriba ni hacia abajo ante la aplicación de la carga particular, con respecto a la posición original de vaciado. Este resultado se obtendría por ejemplo para una carga de  $j \times 2Q = Q$  como aparece en la figura 9.



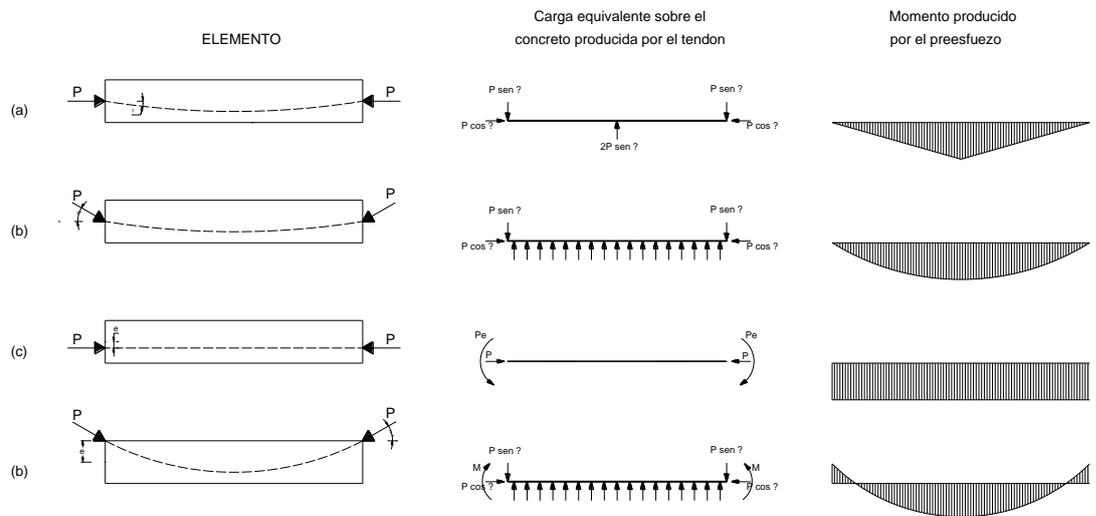
**FIGURA 9.** Viga simplemente apoyada de hormigón con pre-esfuerzo a excentricidad variable.

A partir de estos sencillos ejemplos se pueden sacar algunas conclusiones importantes:

- 1) El preesfuerzo puede controlar, e incluso eliminar, los esfuerzos de tracción en el concreto para un tipo de carga especificada.
- 2) El preesfuerzo excéntrico es mucho más eficiente que el preesfuerzo concéntrico.
- 3) En general, la excentricidad variable es preferible a la excentricidad constante, tanto desde el punto de vista de control de esfuerzos como del de deflexiones.

### **1.5.2. Cargas equivalentes**

El efecto de un cambio en el alineamiento vertical de un tendón de preesfuerzo consiste en producir una fuerza vertical en la viga de concreto. Esta fuerza, junto con la fuerza de preesfuerzo que actúa en los extremos de la viga a través de los anclajes del tendón, se puede analizar como un sistema de cargas externas.



**FIGURA 10.** Cargas equivalentes y momentos producidos por los tendones de pre-esfuerzo.

Por ejemplo, en la figura, un tendón que aplica una fuerza  $P$  en el centroide de la sección de concreto en los extremos de una viga y que tiene una pendiente uniforme con un ángulo entre los extremos y el centro de la luz, introduce una fuerza transversal  $2P \sin \theta$  en el punto de cambio de la pendiente en el centro de la luz. En los anclajes, la componente vertical de la fuerza de preesfuerzo es  $P \sin \theta$  y la componente horizontal es  $P \cos \theta$ . La componente horizontal es casi igual a  $P$  puesto que los ángulos de las pendientes son usualmente muy pequeños. El diagrama de momento para la viga de la figura 19.2a tiene la misma forma que el de cualquier luz sencilla cargada en el centro.

La viga de la figura, con un tendón curvo, está sometida a una carga vertical hacia arriba producida por el tendón, al igual que a las fuerzas  $P$  en cada extremo. La distribución exacta de la carga depende del perfil del tendón; por ejemplo, un tendón con un perfil parabólico producirá una carga uniformemente distribuida, en cuyo caso el diagrama de momentos será parabólico, al igual que para una luz sencilla con carga uniforme.

Si se utiliza un tendón recto con una excentricidad constante, como aparece en la figura, no se presentan fuerzas verticales en el concreto pero la viga se somete a un momento  $P_e$  en cada extremo, al igual que a la fuerza axial  $P$  y se obtiene un diagrama de momentos constante.

El momento en el extremo también debe tenerse en cuenta en la viga de la figura, en la cual se utiliza un tendón parabólico que no pasa por el centroide del concreto en los extremos de la luz. En este caso, se produce una carga uniformemente distribuida hacia arriba más las fuerzas de los anclajes en los extremos, como se observa en la figura, pero además se deben tener en cuenta los momentos en los extremos  $M = P_e \cos \alpha$ .

Es evidente que, para cualquier distribución de cargas aplicadas, es posible seleccionar un perfil del tendón de manera que las cargas equivalentes que actúan sobre la viga a causa del tendón sean exactamente iguales y opuestas a las cargas aplicadas. El resultado sería un estado de esfuerzos de compresión puro en el concreto como se analizó en términos un poco diferentes con referencia al control de los esfuerzos y a la figura. Una ventaja del concepto de la carga equivalente consiste en que lleva al diseñador a seleccionar lo que probablemente es el mejor perfil del tendón para una distribución particular de cargas.

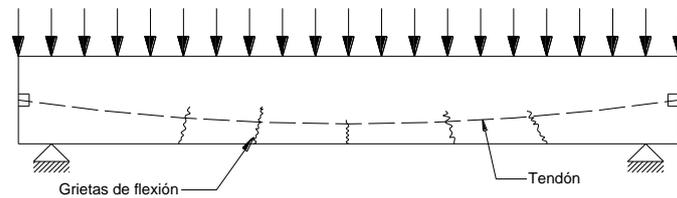
### **1.5.3. Concreto preesforzado como variación del concreto reforzado**

En las descripciones de los efectos del preesfuerzo en los párrafos anteriores era implícito que la fuerza de preesfuerzo permanecía constante a medida que se aplicaba la carga vertical, que el concreto respondía elásticamente y que no se presentaba agrietamiento del concreto. Estas condiciones pueden prevalecer hasta cerca del nivel de las cargas de servicio, pero si las cargas se incrementan mucho más allá de este punto, los esfuerzos de tracción por flexión excederán de manera eventual el módulo de rotura y se formarán grietas. En vigas preesforzadas bien

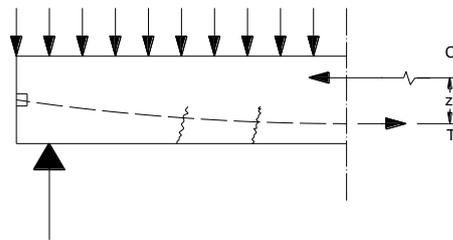
diseñadas, las cargas pueden aumentarse por lo general mucho más allá de la carga de agrietamiento.

Con el tiempo, tanto el acero como el concreto en la sección fisurada se someterán a esfuerzos en el rango inelástico. La condición para falla incipiente se presenta en la figura, donde se ilustra una viga que soporta una carga mayorada igual a algún múltiplo de la carga de servicio esperada. La viga estará sin duda en un estado de agrietamiento parcial; en la figura (a) aparece un posible patrón de agrietamiento por flexión.

### Viga con carga mayorada aplicada



### Equilibrio de fuerzas en la mitad izquierda de la viga



**FIGURA 11A. Y 11B.** Viga de concreto pre-esforzado sometido a una carga cercana a la que produciría la falla por flexión.

En la sección de momento máximo, sólo el concreto a compresión es efectivo y el acero toma toda la tracción. El momento externo generado por las cargas aplicadas lo resiste el par que forman las fuerzas internas  $C_z = T_z$ . El comportamiento en este estado es casi idéntico al de una viga de concreto reforzado corriente sometida a una sobrecarga. La principal diferencia consiste en que el acero de muy alta resistencia utilizado debe predeformarse antes de aplicar

las cargas a las vigas; de otro modo, los grandes esfuerzos en el acero producirían un agrietamiento excesivo en el concreto y grandes deflexiones en la viga.

Cada uno de los tres puntos de vista descritos anteriormente (el control de esfuerzos en el concreto, las cargas equivalentes y el concreto reforzado utilizando acero predeformado) resultan útiles en el análisis y diseño de vigas de concreto preesforzado pero ninguno de los tres es suficiente por sí mismo. Ni un análisis elástico de esfuerzos, ni un análisis de carga equivalente proporcionan información con respecto a la resistencia o al margen de seguridad. Sin embargo, el análisis de esfuerzos es útil para estimar la magnitud del agrietamiento y el análisis de la carga equivalente es, a menudo, la mejor manera de calcular las deflexiones. El análisis de la resistencia última es esencial para evaluar la seguridad contra el colapso, pero no da información sobre el agrietamiento o las deflexiones de la viga en condiciones de servicio.

#### **1.6. Diseño a flexión de vigas pre-esforzadas**

La práctica actual para el diseño elástico a flexión consiste en dimensionar los elementos de manera que los esfuerzos en el concreto y en el acero bajo las cargas reales de servicio estén

dentro de los límites permitidos. Los requisitos para cargas de servicio controlan a menudo la cantidad de fuerza de pre-esfuerzo que se utiliza.

Independientemente del punto de partida seleccionado para el diseño, un elemento estructural debe comportarse de manera satisfactoria en todos los estados de su historial de cargas, de esta manera los elementos pre-esforzados dimensionados en base a los esfuerzos admisibles se deben revisar para verificar si disponen de resistencia suficiente en caso de que ocurran sobrecargas y deben investigarse en lo que a deflexiones y agrietamiento ante las cargas de servicio se refiere.

#### **1.6.1. Resistencia a la flexión**

En una viga corriente de concreto reforzado, el esfuerzo en el acero a tracción y la fuerza de compresión en el concreto aumentan en proporción al momento aplicado hasta un valor un poco superior a la carga de servicio, y la distancia entre las dos resultantes de esfuerzos internos permanece constante. En contraste con este comportamiento en una viga pre-esforzada el incremento en el momento es resistido por un aumento proporcional en la distancia entre las resultantes de las fuerzas a compresión y a tracción, con

la resultante de compresión desplazándose hacia arriba a medida que se aumenta la carga. La magnitud de las fuerzas internas permanece casi constante hasta un poco más allá de las cargas de servicio, por lo general.

Una vez que ocurre el agrietamiento a tracción por flexión de la viga pre-esforzada, esta situación cambia notablemente. Cuando el concreto se fisura, se presenta un aumento súbito en el esfuerzo en el acero, puesto que la tracción que inicialmente resistía el concreto se transfiere al acero. Después del agrietamiento, la viga pre-esforzada se comporta como una viga usual de concreto reforzado. La resultante de compresión no puede seguir moviéndose hacia arriba en forma indefinida y el aumento en el momento debe estar acompañado por un incremento casi proporcional en los esfuerzos en el acero y en la fuerza de compresión.

Por consiguiente, es posible estimar la resistencia de una viga pre-esforzada mediante los mismos métodos desarrollados para las vigas de concreto reforzado, siguiendo ciertas modificaciones que se deben tener en cuenta:

- a) La forma diferente de la curva esfuerzo-deformación unitaria para el acero de pre-esfuerzo, en comparación con las barras corrientes de refuerzo.
  
- b) La deformación de tracción ya presente en el acero de pre-esfuerzo antes de cargar la viga.

En base a un análisis de compatibilidad de deformaciones que tenga en cuenta estos factores, puede adelantarse un estimativo bastante preciso de la resistencia a la flexión de vigas pre-esforzadas. Para efectos de diseño corriente se han desarrollado relaciones aproximadas. La sección 18.7 del código ACI 318 y el comentario que lo acompaña, incluyen ecuaciones aproximadas para estimar la resistencia a la flexión, las cuales se detallaran a continuación:

#### **1.6.2. Esfuerzo en el acero de pre-esfuerzo para la falla a flexión**

Cuando una viga de concreto pre-esforzado falla a flexión, el acero de pre-esfuerzo se encuentra sometido a un esfuerzo  $f_{ps}$  que es mayor que el esfuerzo efectivo  $f_{se}$ , pero menor que la resistencia última a tracción  $f_{pu}$ . Si el pre-esfuerzo efectivo, dado por  $f_{se} = P_e / A_{ps}$ ,

no es menor que  $0.50 f_{pu}$ , la sección 18.7.2 del código ACI 318 permite la utilización de ciertas ecuaciones aproximadas para estimar  $f_{ps}$ . Estas ecuaciones parecen bastante complejas, principalmente porque están formuladas de modo general para tener en cuenta las diferencias en los tipos de acero de pre-esfuerzo y aplicarlas a vigas donde pueden incluirse barras de pre-esfuerzo no reforzadas en la zona de tracción por flexión, o en la región de compresión, o en ambas.

Se presentan ecuaciones independientes para elementos con tendones adheridos y con tendones no adheridos porque, en este último caso, el aumento del esfuerzo en el acero, en la sección de máximo momento, a medida que la viga se sobrecarga, es mucho menor que si el acero se adhiere en toda su longitud.

Para el caso básico en el cual el acero de pre-esfuerzo proporciona todo el refuerzo a la flexión, las ecuaciones del Código ACI pueden plantearse de la siguiente manera simplificada:

- 1) Para elementos con tendones adheridos (caso de estudio):

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \frac{\rho_p f_{pu}}{f'_c} \right)$$

en la cual

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot d_p}$$

$d_p$  = altura efectiva hasta el centroide del acero de pre-esfuerzo.

$b$  = ancho de la cara a compresión.

$\beta_1$  = relaciones familiares entre la altura del bloque de esfuerzos y la distancia al eje neutro.

$\gamma_p$  : es un factor que depende del tipo de acero de pre-esfuerzo utilizado:

$\gamma_p = 0.55$  para  $f_{ps}/f_{pu}$  no menor que 0.80 (barras de alta resistencia típicas)

$\gamma_p = 0.40$  para  $f_{ps}/f_{pu}$  no menor que 0.85 (torón corriente típico)

$\gamma_p = 0.28$  para  $f_{ps}/f_{pu}$  no menor que 0.90 (torón de baja relajación típico)

- 2) Para elementos con tendones no adheridos y con una relación luz-altura de 35 o menos.

$$f_{ps} = f_{se} + 70 + \frac{f'_c}{100\rho_p}$$

pero no mayor que  $f_{py}$  y no mayor que  $f_{se} + 420$

- 3) Para elementos con tendones no adheridos y con una relación luz-altura mayor que 35.

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f'_c}{300\rho_p}$$

pero no mayor que  $f_{py}$  y no mayor que  $f_{pe} + 210$

### 1.6.3. Resistencia nominal a la flexión y resistencia de diseño

Una vez determinado el esfuerzo en el acero de pre-esfuerzo a tracción cuando el elemento falla a la flexión utilizando las ecuaciones anteriores, puede calcularse la resistencia nominal a la flexión con métodos y ecuaciones que corresponden en forma directa a los utilizados para vigas de concreto reforzado.

Para secciones transversales rectangulares o para secciones con aletas, como las de las vigas I o T, donde la altura del bloque de esfuerzos es igual o menor que el espesor promedio del ala, la resistencia nominal a la flexión es:

$$M_n = \rho_p \cdot f_{ps} \cdot b \cdot d_p^2 \left( 1 - 0.588 \frac{\rho_p \cdot f_{ps}}{f'_c} \right)$$

En todos los casos, la resistencia de diseño a la flexión se debe tomar igual a  $\Phi M_n$ , donde  $\Phi=0.90$ , como es usual para la flexión.

#### **1.6.4. Pérdidas de Preesfuerzo**

La magnitud de la fuerza de pre-esfuerzo no es constante. La fuerza del gato se reduce a una fuerza de pre-esfuerzo inicial a causa de:

- a) Acortamiento elástico del concreto luego de la transferencia.
- b) Deslizamiento del tendón a medida que la fuerza se transfiere de los gatos a los extremos de la viga.
- c) Pérdidas que ocasiona la fricción entre el tendón y el concreto.

La fuerza se reduce aún más después de un periodo de varios meses o aún de años, por los cambios que resultan de:

- d) La retracción por fraguado.
- e) El flujo plástico del concreto

f) La relajación del acero sometido a altos esfuerzos.

Con el tiempo esta fuerza alcanza su valor efectivo. En la mayor parte de los casos, para el diseño práctico no es necesario adelantar cálculos detallados de las pérdidas, y es suficiente estimar un valor en base a la experiencia. Para casos en que se requiere mayor precisión, resulta necesario estimar las pérdidas por separado, teniendo en cuenta las condiciones especiales de geometría del elemento, propiedades del material y los métodos de construcción. Inicialmente la pérdida de la fuerza de tensado decrece rápidamente, alcanzando gradualmente una condición estable, que se asume permanente. La magnitud de la pérdida de pre-esfuerzo no afecta significativamente la capacidad última de miembros estructurales, los errores en la estimación de la pérdida de pre-esfuerzo se ven reflejados en la carga de agrietamiento y el pandeo.

Desde los albores del desarrollo del concreto pre-esforzado se reconoció la necesidad de contar con expresiones para poder determinar la pérdida de pre-esfuerzo estimada en diseños preliminares. Miles de exitosas estructuras pre-esforzadas se han construido en base en estos estimativos y cuando los elementos,

las luces, los materiales, los procedimientos de construcción, la cantidad de la fuerza de pre-esfuerzo y las condiciones ambientales no están por fuera de lo corriente, este métodos es satisfactorio. Para estas condiciones, la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) recomienda los valores de la tabla siguiente:

**TABLA 1.** Estimativo de las pérdidas de pre-esfuerzo (AASHTO).

	<b>f'c = 27.46 MPa</b>	<b>f'c = 34.32 MPa</b>
<b>Tipo de acero de pre-esfuerzo</b>	<b>Pérdida total, kg/cm<sup>2</sup></b>	
Torón de pre-tensado	—	3,163.81
Alambre o torón de postensado	2,249.82	2,320.13
Barras de postensado	1,546.75	1,617.06

Las perdidas recomendadas por la AASHTO incluyen perdidas por acortamiento elástico, flujo plástico, retracción por fraguado, y relajación. Las perdidas por fricción no se incluyen y deben ser calculadas por separado para elementos postensados.

## **1.7. Pruebas de carga.**

Una prueba de carga, es el proceso mediante el cual se le proporciona una demanda a un sistema o dispositivo y se mide su respuesta. Son vastamente utilizadas en el campo de la investigación para observar la respuesta de materiales, sistemas o diseños no probados. Los emplean la mayoría de los organismos reguladores para determinar los parámetros en los cuales se regirán códigos y reglamentaciones. También son utilizados en obras para determinar la respuesta en sitio y la integridad de elementos estructurales importantes bajo ciertas situaciones determinadas.

En el caso del presente trabajo se someterá a una prueba de carga dinámica a dos vigas pre-tensadas, una construida utilizando Hormigón de Alto Desempeño y otra construida utilizando hormigón convencional. Las vigas estarán simplemente apoyadas y se les aplicará una carga puntual con incrementos definidos y medibles en el centro de la luz mediante un gato hidráulico, a su vez se medirá la deflexión máxima en el centro de la luz por medio de deformímetros digitales. Los datos serán transmitidos por medio de un *Data Logger* hacia un computador personal que por medio de un software se encargara de ordenar y almacenar los datos de las pruebas. Esto nos servirá para poder hacer las comparaciones correspondientes y podremos obtener conclusiones.

Posteriormente, en el capítulo 5, se detallarán las características de la instrumentación utilizada y el procedimiento de calibración y puesta a punto del equipo.

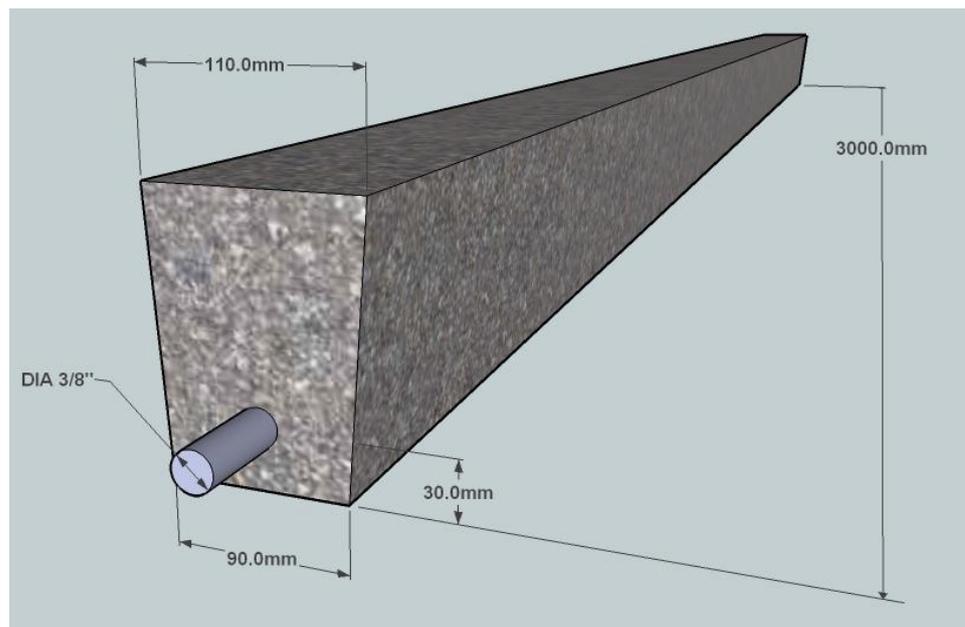
## **CAPITULO 2**

### **ANALISIS DE VIGAS PRE-ESFORZADAS CONSTRUIDAS CON HORMIGON DE ALTO DESEMPEÑO**

#### **2.1. Descripción de las condiciones físicas, geométricas y de carga.**

Las facilidades que se brindaron por parte de la planta de prefabricados, permitieron construir 5 viguetas de hormigón pretensado utilizando Hormigón de Alta Resistencia en el banco de fabricación de viguetas R-14, de acuerdo a la clasificación de los elementos pre-fabricados de la empresa. Este banco es capaz de producir viguetas de sección trapezoidal con dimensiones de 9 cm en la base menor, 11 cm en la base mayor, 14 cm de altura y de longitudes variables (Ver figura 12). La longitud de las viguetas a ser ensayadas, tuvo como limitante las dimensiones máximas del banco de pruebas de carga del laboratorio del CEINVES (Centro de

Investigaciones En Ingeniería Estructural y Sismoresistente), siendo esta de 3m de largo como máximo. El pre-esfuerzo en las viguetas fue aplicado por medio de un torón grado 270K conformado por 7 alambres y de un diámetro nominal de 3/8 de pulgada, con su centroide ubicado a 3 cm medidos desde la base de la vigueta, es decir a una excentricidad de 4.23 cm. La fuerza de pre-esfuerzo inicial fue de 7.7 toneladas aplicadas por medio de un gato hidráulico.



**FIGURA 12.** Descripción de las características físicas y geométricas de la viga.

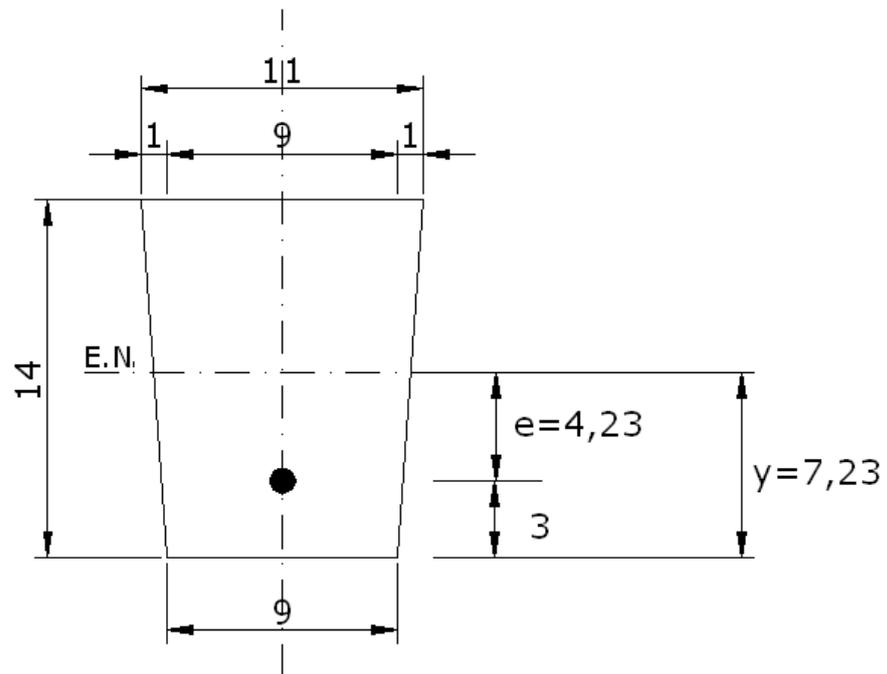


FIGURA 13. Ubicación del centroide y excentricidad de la viga

TABLA 2. Calculo de centroide de la sección.

	Area	Distancia centroide area	Momento de Area
	A	y	Ay
1	7.00	9.33	65.33
2	126.00	7.00	882.00
3	7.00	9.33	65.33
$\Sigma$	140.00		1012.67

$y = 7.23 \text{ cm}$
-----------------------

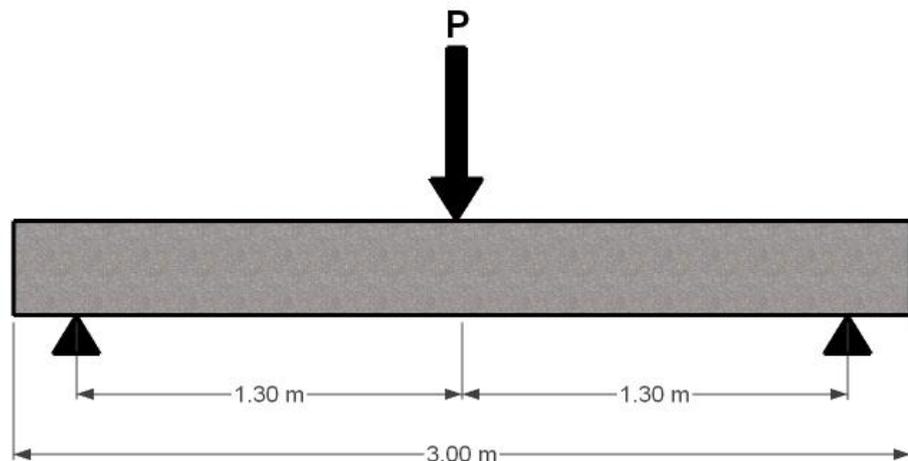
TABLA 3. Calculo del momento de inercia de la seccion.

	<b>A (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>I<sub>o</sub>(cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ay<sup>2</sup></b>	<b>I<sub>x</sub> (cm<sup>3</sup>)</b>
1	7.00	2.10	76.22	30.87	107.09
2	126.00	0.23	2058.00	6.67	2064.67
3	7.00	2.10	76.22	30.87	107.09
				<b>Σ</b>	<b>2278.85</b>

Las vigas pre-tensadas serán sometidas posteriormente a pruebas de carga en un marco de pruebas, en el cual se le podrá aplicar a la viga ensayada una carga puntual.

Dadas las dimensiones del elemento y las condiciones de carga, y conocida la resistencia a la compresión simple del hormigón  $f'_c$ , la fuerza de pre-esfuerzo inicial y las características del torón de pre-esfuerzo; se procederá a analizar el elemento a flexión en base a un análisis de compatibilidad de deformaciones y a comprobar la sección por cortante. El propósito será de encontrar la carga máxima en la viga que produzca el momento nominal, a continuación se calculará la deflexión máxima inducida por esa carga. De esta manera podremos comparar los resultados obtenidos por medio de un análisis teórico con los resultados que se produzcan de las pruebas de carga realizadas a los elementos pre-tensados fabricados. Además podremos contrastar los resultados de tanto las pruebas teóricas como prácticas de la viga

construida con Hormigón de Alta Resistencia con la viga construida con Hormigón Convencional.



**FIGURA 14.** Descripción de las condiciones de carga de la viga. Una sola carga puntual.

## 2.2. Resistencia a la flexión

Siguiendo las especificaciones del Reglamento para Concreto Estructural ACI 318 y sus recomendaciones de el capítulo 18, es posible estimar la resistencia a la flexión de una viga pre-esforzada mediante los mismos métodos desarrollados para las vigas corrientes de concreto reforzado.

### 2.2.1. Esfuerzo en el acero de pre-esfuerzo para la falla a flexión.

Si el pre-esfuerzo efectivo  $f_{pe}$  no es menor que  $0.50 f_{pu}$ , el Código ACI 18.7.2 permite la utilización de ciertas ecuaciones aproximadas para estimar  $f_{ps}$ .

$$\text{Si } f_{se} \geq 0.50 f_{pu}$$

$$f_{se} = \frac{P_e}{A_{ps}}$$

$$P_e = 0.85 \times P_i$$

$$P_e = 0.85 \times 7.7 \text{ ton} = 6.545 \text{ ton} = 6,545 \text{ kg}$$

$$A_{ps} = 0.548 \text{ cm}^2 \text{ (Torón de siete alambres grado 270k 3/8")}$$

$$f_{se} = \frac{P_e}{A_{ps}} = \frac{6,545 \text{ kg}}{0.548 \text{ cm}^2} = 11,935.02 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{pu} = 18,982 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Torón grado 270k)}$$

$$11,935.02 \text{ kg/cm}^2 \geq 0.50 \times 18,982 \text{ kg/cm}^2$$

$$11,935.02 \text{ kg/cm}^2 \geq 9,491 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{se} \geq 0.50 f_{pu}$$

Podemos utilizar la ecuación 18-3 (ACI 318) para calcular el esfuerzo en el acero de pre-esfuerzo para la falla a flexión para elementos con tendones adheridos:

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \frac{\rho_p f_{pu}}{f'_c} \right)$$

Donde:

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot d_p}$$

$$\rho_p = \frac{0.548 \text{ cm}^2}{9 \text{ cm} \cdot 11 \text{ cm}}$$

$$\rho_p = 0.005535$$

$$\gamma_p = 0.40 \text{ para } f_{py}/f_{pu} \text{ no menor a } 0.85 \text{ (torón de baja}$$

relajación)

Para valores de  $f'_c$  entre 18 y 30 MPa, el factor  $\beta_1$  se debe tomar como 0.85. Para resistencias superiores a 30 MPa,  $\beta_1$  se debe disminuir linealmente a razón de 0.008 por cada MPa de aumento sobre 30 MPa. Sin embargo no debe ser menor a 0.65.

$$\beta_1 = 0.65$$

$$f'_c = 1,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{pu} = 270 \text{ ksi} = 18,982 \text{ kg/cm}^2$$

Entonces:

$$f_{ps} = 18,982 \left( 1 - \frac{0.40}{0.65} \cdot \frac{0.005535 \times 17,754.63}{1,000} \right)$$

$$f_{ps} = 17,754.63 \text{ kg/cm}^2$$

### 2.2.2. Resistencia nominal a la flexión y resistencia de diseño.

Una vez determinado el esfuerzo en el acero de pre-esfuerzo a tracción cuando el elemento falla a flexión, puede calcularse la resistencia nominal a la flexión con métodos y ecuaciones que corresponden en forma directa a los utilizados para vigas corrientes de concreto reforzado.

De esta manera:

$$M_n = \rho_p \times f_{ps} \times b \times d^2 \left( 1 - 0.588 \frac{\rho_p \times f_{ps}}{f'_c} \right)$$

$$M_n = 0.005535 \times 17,754.63 \times 9 \times 11^2 \left( 1 - 0.588 \frac{0.005535 \times 17,754.63}{1,000} \right)$$

$$M_n = 100,840.20 \text{ Kg} - \text{cm} = 1.01 \text{ T.m}$$

### 2.3. Cálculo de cargas y deflexiones.

Obtenido el momento nominal de la viga se procederá a determinar la carga máxima y la deflexión inducida por esta carga de acuerdo a las condiciones de carga a las que se someterá la viga en el laboratorio.

#### 2.3.1. Una carga puntual en el centro de la luz

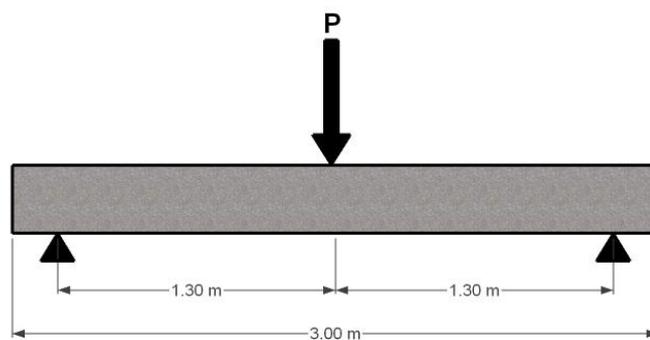


FIGURA 15. Viga sometida a una carga puntual

Para esta condición de carga el momento máximo será igual a:

$$M_{\max} = \frac{PL}{4}$$

De donde podemos obtener la carga máxima:

$$P = \frac{4M_{\max}}{L} = \frac{4 \times 100,840.20 \text{ kg} \cdot \text{cm}}{2600} = 1,551.39 \text{ kg}$$

$$P = 1.55 \text{ ton}$$

La deflexión máxima será

$$\Delta_{\max} = \frac{Pl^3}{EI}$$

Para hormigón de alta resistencia con un peso medido de

$W_c = 2,250 \text{ kg/m}^3$  ACI 18-05 Sección 8.5.1

$$E_c = W_c 0.043 \sqrt{f'_c}$$

$$E_c = 2,270 \cdot 0.0043 \cdot \sqrt{98}$$

$$E_c = 46,258.62 \text{ MPa}$$

Para la sección de la viga R-14:

$$I = 2,278.85cm^4$$

$$\Delta_{\max} = \frac{1,551.39kg \times (260cm)^3}{48 \times 474,341.65 kg/cm^2 \times 2,278.85cm^4}$$

$$\Delta_{\max} = 0,54cm$$

#### 2.4. Resultados obtenidos

Basados en un análisis de compatibilidad de deformaciones se pudo determinar la resistencia a la flexión por medio de las ecuaciones y recomendaciones de los Requisitos del Reglamento para Concreto Estructural ACI 318 y su comentario, dadas las condiciones físicas, geométricas y de carga para las vigas construidas se determinó la carga máxima y la deflexión inducida por dicha carga. Posteriormente estos resultados serán comparados con las mediciones que se tomen durante los ensayos de pruebas de carga de las vigas. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

**TABLA 4.** Resultados del análisis teórico vigas construidas con Hormigón de Alto Desempeño  $f'c=100$  MPa.

Condición de Carga	Carga puntal en el centro de la luz
Momento máx.	1.01 Tm
Carga Máxima P	1,551.39 kg
Deflexión $\Delta$	0.54 cm

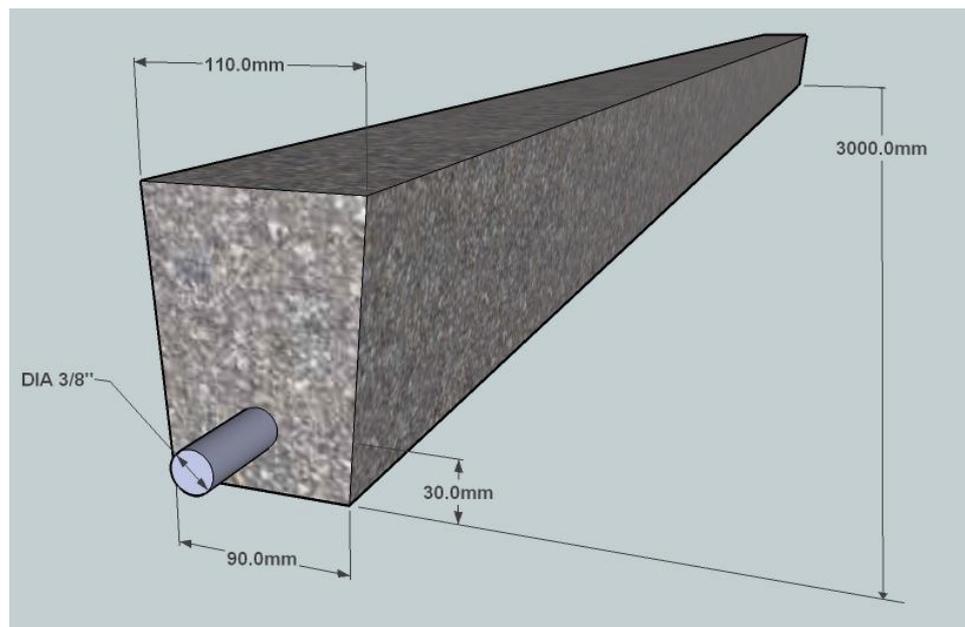
## **CAPITULO 3**

### **ANALISIS DE VIGAS PRE-ESFORZADAS CONSTRUIDAS CON HORMIGON CONVENCIONAL.**

#### **3.1. Descripción de las condiciones físicas, geométricas y de carga.**

Las facilidades que se brindaron por parte de la planta de prefabricados, permitieron construir 2 viguetas de hormigón pretensado utilizando Hormigón Convencional en el banco de fabricación de viguetas R-14, de acuerdo a la clasificación de los elementos pre-fabricados de la empresa, la resistencia a la compresión simple de diseño para estas viguetas fue de 34.32 MPa. Este banco es capaz de producir viguetas de sección trapezoidal con dimensiones de 9 cm en la base menor, 11 cm en la base mayor, 14 cm de altura y de longitudes variables (Ver figura 16). La longitud de las viguetas a ser ensayadas, tuvo como limitante las dimensiones máximas del banco de pruebas de carga

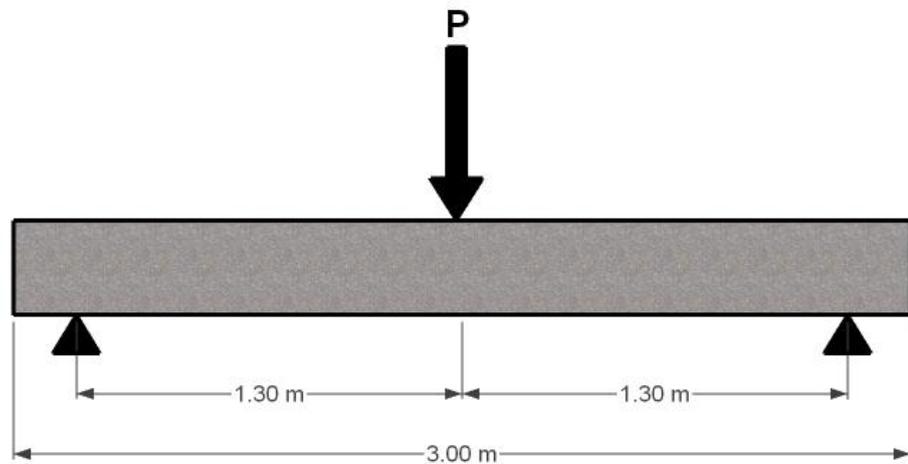
del laboratorio del CEINVES (Centro de Investigaciones En Ingeniería Estructural y Sismoresistente), siendo esta de 3m de largo como máximo. El pre-esfuerzo en las viguetas fue aplicado por medio de un torón grado 270K conformado por 7 alambres y de un diámetro nominal de 3/8 de pulgada, con su centroide ubicado a 3 cm medidos desde la base de la vigueta, es decir a una excentricidad de 4.23 cm. La fuerza de pre-esfuerzo inicial fue de 7.7 toneladas aplicadas por medio de un gato hidráulico.



**FIGURA 16.** Descripción de las características físicas y geométricas de la viga.

Las vigas pre-tensadas serán sometidas posteriormente a pruebas de carga en un marco de pruebas, en el cual se le podrá aplicar a la viga ensayada una carga puntual en el centro del vano.

Dadas las dimensiones del elemento y las condiciones de carga, y conocida la resistencia a la compresión simple del hormigón  $f'_c$ , la fuerza de pre-esfuerzo inicial y las características del torón de pre-esfuerzo; se procederá a analizar el elemento a flexión en base a un análisis de compatibilidad de deformaciones y a comprobar la sección por cortante. El propósito será de encontrar la carga máxima en la viga que produzca el momento nominal, a continuación se calculará la deflexión máxima inducida por esa carga. De esta manera podremos comparar los resultados obtenidos por medio de un análisis teórico con los resultados que se produzcan de las pruebas de carga realizadas a los elementos pre-tensados fabricados. Además podremos contrastar los resultados de tanto las pruebas teóricas como prácticas de la viga construida con Hormigón de Alta Resistencia con la viga construida con Hormigón Convencional.



**FIGURA 17.** Descripción de las condiciones de carga de la viga. Una sola carga puntual.

### 3.2. Resistencia a la flexión

Siguiendo las especificaciones del Reglamento para Concreto Estructural ACI 318 y sus recomendaciones de el capítulo 18, es posible estimar la resistencia a la flexión de una viga pre-esforzada mediante los mismos métodos desarrollados para las vigas corrientes de concreto reforzado.

#### 3.2.1. Esfuerzo en el acero de pre-esfuerzo para la falla a flexión.

Si el pre-esfuerzo efectivo  $f_{pe}$  no es menor que  $0.50 f_{pu}$ , el Código ACI 18.7.2 permite la utilización de ciertas ecuaciones aproximadas para estimar  $f_{ps}$ .

$$\text{Si } f_{se} \geq 0.50 f_{pu}$$

$$f_{se} = \frac{P_e}{A_{ps}}$$

$$P_e = 0.85 \times P_i$$

$$P_e = 0.85 \times 7.7 \text{ ton} = 6.545 \text{ ton} = 6,545 \text{ kg}$$

$$A_{ps} = 0.548 \text{ cm}^2 \text{ (Torón de siete alambres grado 270k } \\ \text{3/8")}$$

$$f_{se} = \frac{P_e}{A_{ps}} = \frac{6,545 \text{ kg}}{0.548 \text{ cm}^2} = 11,935.02 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{pu} = 18,982 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Torón grado 270k)}$$

$$11,935.02 \text{ kg/cm}^2 \geq 0.50 \times 18,982 \text{ kg/cm}^2$$

$$11,935.02 \text{ kg/cm}^2 \geq 9,491 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{se} \geq 0.50 f_{pu}$$

Podemos utilizar la ecuación 18-3 (ACI 318) para calcular el esfuerzo en el acero de pre-esfuerzo para la falla a flexión para elementos con tendones adheridos:

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \frac{\rho_p f_{pu}}{f'_c} \right)$$

Donde:

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot d_p}$$

$$\rho_p = \frac{0.548 \text{ cm}^2}{9 \text{ cm} \cdot 11 \text{ cm}}$$

$$\rho_p = 0.005535$$

$$\gamma_p = 0.40 \text{ para } f_{py}/f_{pu} \text{ no menor a } 0.85 \text{ (torón de baja}$$

relajación)

Para valores de  $f'_c$  entre 18 y 30 MPa, el factor  $\beta_1$  se debe tomar como 0.85. Para resistencias superiores a 30 MPa,  $\beta_1$  se debe disminuir linealmente a razón de 0.008 por cada MPa de aumento sobre 30 MPa. Sin embargo no debe ser menor a 0.65.

$$\beta_1 = 0.738$$

$$f'_c = 450 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{pu} = 270 \text{ ksi} = 18,982 \text{ kg/cm}^2$$

Entonces:

$$f_{ps} = 18,982 \left( 1 - \frac{0.40}{0.738} \cdot \frac{0.005535 \times 18,982}{450} \right)$$

$$f_{ps} = 16,579.74 \text{ kg/cm}^2$$

### 3.2.2. Resistencia nominal a la flexión y resistencia de diseño.

Una vez determinado el esfuerzo en el acero de pre-esfuerzo a tracción cuando el elemento falla a flexión, puede calcularse la resistencia nominal a la flexión con métodos y ecuaciones que corresponden en forma directa a los utilizados para vigas corrientes de concreto reforzado.

De esta manera:

$$M_n = \rho_p \times f_{ps} \times b \times d^2 \left( 1 - 0.588 \frac{\rho_p \times f_{ps}}{f'_c} \right)$$

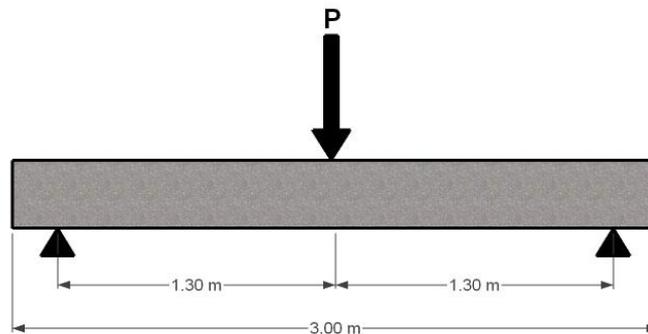
$$M_n = 0.005535 \times 16,579.74 \times 90 \times 11^2 \left( 1 - 0.588 \frac{0.005535 \times 18,247.89}{450} \right)$$

$$M_n = 87.957.64 \text{ Kg} \cdot \text{cm} = 0.88 \text{ T} \cdot \text{m}$$

### 3.3. Cálculo de cargas y deflexiones

Obtenido el momento nominal de la viga se procederá a determinar la carga máxima y la deflexión inducida por esta carga de acuerdo a las condiciones de carga a las que se someterá la viga en el laboratorio.

#### 3.3.1. Una carga puntual en el centro de la luz



**FIGURA 18.** Viga sometida a una carga puntual

Para esta condición de carga el momento máximo será igual a:

$$M_{\max} = \frac{PL}{4}$$

De donde podemos obtener la carga máxima:

$$P = \frac{4M_{\max}}{L} = \frac{4 \times 87,957.64 \text{ kg} \cdot \text{cm}}{2600} = 1,353.19 \text{ kg}$$

$$P = 1.35 \text{ ton}$$

La deflexión máxima será

$$\Delta_{\max} = \frac{Pl^3}{EI}$$

Para hormigón convencional

$$Ec = 5,700\sqrt{f'c}$$

$$Ec = 15,000\sqrt{44.13}$$

$$Ec = 31,360.97 \text{ MPa}$$

Para la sección de la viga R-14:

$$I = 2,278.85 \text{ cm}^4$$

$$\Delta_{\max} = \frac{1,551.39 \text{ kg} \times (260 \text{ cm})^3}{48 \times 474,341.65 \text{ kg/cm}^2 \times 2,272.18 \text{ cm}^4}$$

$$\Delta_{\max} = 0,6819\text{cm}$$

### 3.4. Resultados obtenidos

Basados en un análisis de compatibilidad de deformaciones se pudo determinar la resistencia a la flexión por medio de las ecuaciones y recomendaciones de los Requisitos del Reglamento para Concreto Estructural ACI 318 y su comentario, dadas las condiciones físicas, geométricas y de carga para las vigas construidas se determino la carga máxima y la deflexión inducida por dicha carga. Posteriormente estos resultados serán comparados con las mediciones que se tomen durante los ensayos de pruebas de carga de las vigas. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

**TABLA 5.** Resultados del análisis teórico vigas construidas con Hormigón Convencional  $f'c=44.13$  MPa.

Condición de Carga	Carga puntal en la mitad de la luz
Momento máx.	0.88 T.m
Carga Máxima P	1,353.19 kg
Deflexión $\Delta$	0.68 cm

## **CAPITULO 4**

### **CONSTRUCCION DE VIGAS PRE-ESFORZADAS**

#### **UTILIZANDO HUAD**

#### **4.1. Memorias Técnicas**

Para la construcción de las vigas pre-esforzadas se escogió a la empresa MAVISA S.A. debido principalmente a que esta se mostro interesada en ayudar con la investigación, además de contar con la infraestructura y prestigio necesario para el desarrollo del proyecto y el contacto que ha existido entre sus principales y colaboradores con la ESPOL.

Debido a que MAVISA S.A. prestó sus instalaciones para la construcción de las vigas pre-tensadas, ciertas condiciones fueron adaptadas a las facilidades que podía brindar al momento la empresa. Se utilizo un banco de pretensado para viguetas R-14, de acuerdo a la clasificación que maneja la empresa, este banco es capaz de producir viguetas de sección trapezoidal con dimensiones de 9 cm en la base menor, 11 cm en la base mayor, 14 cm de altura y de longitudes variables. La longitud de las viguetas a ser

ensayadas, tuvo como limitante las dimensiones máximas del banco de pruebas del laboratorio, siendo esta de 3m de largo como máximo. De esta manera se procedió a fundir 5 viguetas de 3m de largo con Hormigón de Ultra Alto Desempeño y se completo la capacidad del banco de fundir 7 viguetas simultáneamente, con 2 viguetas empleando hormigón de la producción convencional de MAVISA S.A. con una resistencia de diseño de 34.32 MPa.

#### **4.2. Dosificación**

La dosificación utilizada es el producto de una investigación previa en la cual se logro caracterizar los materiales y obtener resistencia en laboratorio de hasta 104.98 MPa en cilindros de 10 x 20 cm (Ver Bibliografía 9).

**TABLA 6.** Dosificación de vigas de hormigón de alto desempeño.

Cemento Tipo I	712.00 Kg/m <sup>3</sup>
Arena silicia	1020.00 Kg/m <sup>3</sup>
Humo de silice	231.00 Kg/m <sup>3</sup>
Quarzo mólido	211.00 Kg/m <sup>3</sup>
Superplastificante	30.70 Kg/m <sup>3</sup>
Fibras	156.00 Kg/m <sup>3</sup>
Agua	218.64 Kg/m <sup>3</sup>

### 4.3. Procedimientos técnicos constructivos

El proceso constructivo para concretos convencionales difiere de aquel utilizado para el Hormigón de Ultra Alto Desempeño. La diferencia fundamental radica en la selección de los agregados y la experiencia necesaria para la dosificación de la mezcla, ensayos de mezclas de prueba, y el proceso de mezclado y vertido en sitio. Las dosificaciones de Hormigones de Alto Desempeño, poseen un margen de error considerablemente más pequeño que para los hormigones convencionales. Pequeñas variaciones en el proporcionamiento de la mezcla y modificaciones en las prácticas constructivas y de ensayos, pueden tener una mayor influencia en los Hormigones de Ultra Alto Desempeño que en hormigones convencionales. Sin embargo, en ambos casos, es esencial mantener una medida precisa de cada uno de los constituyentes de de la mezcla, en concordancia estricta con la dosificación seleccionada.

Una vez que hemos efectuado mezclas de prueba, se ha establecido la dosificación y se ha comprobado la resistencia, la principal preocupación para el constructor esta en el procedimiento de vertido y colocación en sitio. A continuación se detallan los pasos constructivos sugeridos, en base al desarrollo experimental de el presente trabajo:

1. Reunión antes de la construcción. Varios días antes de la fabricación de los elementos, es necesario llevar a cabo una reunión con el personal operativo involucrado. Es esencial determinar el equipo a ser utilizado, las facilidades con las que se va a contar para la dosificación, el mezclado y vertido, el criterio para aceptación de la mezcla y los efectos que tendría el cambio de estas condiciones. Cuando se está empezando a utilizar una dosificación en la que están involucrados constituyentes diferentes a los usados usualmente, es importante revisar la documentación técnica del fabricante para cada uno de los componentes, solicitar información escrita de las características de los aditivos, micro sílice y fibras es muy importante, así como también realizar consultas sobre experiencias previas con mezclas similares.

2. Selección y procesamiento de materiales. Los procedimientos establecidos para la construcción de hormigones convencionales puede ser adecuado también para Hormigones de Ultra Alto Desempeño, sin embargo no siempre puede ser el más preciso. Alcanzar la combinación óptima de agregados, cemento, puzolanas, adiciones químicas y reductores de agua de alto rango y su interacción, se convierte en un proceso de ajuste de prueba y error, hasta conseguir la dosificación deseada.



**FIGURA 19.** Dosificación de los materiales. Pesado de el cuarzo molido



**FIGURA 20.** Dosificación de los materiales. Pesado de las fibras metálicas.



**FIGURA 21.** Dosificación de los materiales. Pesado de el aditivo superplastificante.

3. Mezclado. El factor más importante en el mezclado es la combinación de todos los materiales constitutivos en una mezcla homogénea. Esto es afectado en gran parte por la secuencia usada para cargar los materiales en la mezcladora y la eficiencia de la mezcladora para poder combinarlos. Es muy importante que la fibra sea distribuida homogéneamente y en direcciones aleatorias dentro de la mezcla. La automatización del proceso de producción y vertido de la mezcla, mejora notablemente la calidad del hormigón producido. Es recomendable introducir primero en la mezcladora los constituyentes secos de la mezcla, los agregados, la fibra, puzolana y cemento; y mezclarlos a una velocidad normal de carga entre 12 y 18 revoluciones por minuto, esto ayuda a que la fibra se distribuya uniformemente entre los agregados. Luego de que todos los agregados han sido añadidos se recomienda mezclar a velocidades más altas de 4 a 5 minutos. El agua puede ser introducida a continuación, las adiciones químicas, en este caso el superplastificante, suele ser más efectivo al agregarse lentamente luego de la hidratación de la mezcla. El tiempo recomendable de mezclado es  $1\text{min}/0,75\text{m}^3$  y adicionar

$\frac{1}{4}$  de minuto por cada  $1\text{m}^3$  adicional. Se debe tener cuidado que la temperatura del concreto al ser vertido no exceda  $42^\circ\text{C}$ , debido a que temperaturas más altas demandaran más agua. En caso de que la demanda de agua sea excesiva o que el revenimiento baje, la dosificación de aditivos químicos debe ser incrementada.



**FIGURA 22.** Dosificadora – Mezcladora. Capacidad aproximada 0.25 metros cubicos.



**FIGURA 23.** Mezclado dentro del tambor.

4. Transporte. El transporte del concreto desde el mezclador hasta el sitio de fundición debe ser realizado sin ningún cambio significativo en el revenimiento, relación agua/material cementicio, contenido de aire, consistencia y temperatura. Personal de control de calidad debe tener cuidado de no extender el tiempo de mezclado lo que ocasiona pérdidas en el revenimiento y consecuentemente, poca trabajabilidad. Adicionalmente, es esencial que el agua utilizada para limpiar la mezcladora entre cada cargada, sea vaciada completamente antes de comenzar la siguiente cargada. Para transportar la mezcla de hormigón a ser empleada para la fabricación de las

viguetas pretensadas, se utilizó una cargadora frontal equipada en su balde con una tina metálica con una capacidad aproximada de un cuarto de metro cubico, por lo que fue necesario realizar una sola cargada para fundir las viguetas.



**FIGURA 24.** Vertido de la mezcla en un montacargas adaptado para transportar hormigón.

5. Colocación y vertido. El Hormigón de Ultra Alto Desempeño posee gran a fluidez, lo cual permite una trabajabilidad adecuada, sin embargo la mezcla requiere una consolidación completa que debe ser lograda rápidamente. El uso de vibradores internos no es necesario para la fabricación de elementos con secciones pequeñas, una de las propiedades de

los Hormigones de Alto Desempeño es su capacidad auto nivelante. Sin embargo para ayudar a la consolidación de la mezcla se sugiere golpear el encofrado con martillo de goma o un varillado constante.



**FIGURA 25.** Vertido del hormigón de alto desempeño en los moldes de las viguetas pretensadas.

6. Acabado. Las operaciones de acabado deben ser tales que la superficie deseada de concreto sea lograda con mínimas manipulaciones. La manipulación excesiva de la superficie del concreto, puede resultar en la reducción del contenido de aire de la superficie, lo que provocaría un incremento en la

susceptibilidad del hormigón a los efectos de cambios de temperatura. La adición de agua en la superficie para ayudar en el proceso de curado no es recomendable, debido a que se incrementa la relación agua/material cementicio en la superficie del hormigón, por ende, una reducción considerable en la resistencia a la compresión, durabilidad y desempeño a largo plazo de la capa superior.

7. Curado. Solamente un curado apropiado puede permitir el desarrollo total de las propiedades a largo plazo de desempeño y durabilidad en el hormigón. Esto se aplica de manera similar para los hormigones convencionales y los Hormigones de Alto Desempeño. Debido a la alta densidad y baja permeabilidad de los Hormigones de Ultra Alto Desempeño, se deben elegir previamente métodos apropiados, y en ocasiones diferentes, para el curado de los distintos elementos estructurales que se elaboren. Es notable que el Hormigón de Ultra Alto Desempeño no presenta mayor sangrado. Sin la debida protección para la pérdida de humedad superficial, ciertas grietas debido a la contracción plástica del concreto se pueden presentar en las superficies expuestas de los elementos. Por esto la utilización

de aspersores de rocío, cobertores que retarden la pérdida de humedad, saturación con agua, y otros métodos que impidan la pérdida de humedad, es necesaria para prevenir el deterioro de las superficies en contacto con el ambiente. Para la fabricación de las viguetas pre-tensadas se utilizó arena común humidificada para evitar la pérdida de humedad en la superficie expuesta, durante tres días desde su fundición la vigueta permaneció en el banco de tensado cubierta con arena húmeda, posterior al destensado y al ser desencofrada, estas permanecieron a la sombra. Se ha demostrado que un curado dentro de piscinas con agua a elevadas temperaturas mejoran la resistencia inicial del hormigón.



**FIGURA 26.** Desmolde de las viguetas. Izquierda, HAD. Derecha hormigón convencional.

En resumen, las recomendaciones constructivas y los procesos expuestos en esta sección son esenciales para lograr durabilidades a largo plazo y alto desempeño, sin importar si se está utilizando hormigones convencionales o de alto desempeño. El control y aseguramiento de la calidad de estos procesos tienen un impacto directo en la consecución de los objetivos de resistencia y desempeño en los Hormigones de Ultra Alto Desempeño.

#### **4.4. Características técnicas de los materiales**

Los Hormigones de Alto Desempeño requieren una selección cuidadosa de todos los materiales que lo constituyen. El desempeño y calidad de cada constituyente, se torna crítico en cierto punto a medida que la resistencia final deseada se incrementa, siendo algunos de ellos más sensibles que otros. Ciertas propiedades de los materiales tienen un mayor impacto en la economía del Hormigón de Alto Desempeño, y determinaran su potencial ventaja económica, no solo frente a elementos metálicos, si no también comparado con concretos convencionales.

#### **4.4.1. Selección del cemento**

Usualmente la primera decisión que se debe hacer para preparar hormigones de alto desempeño, es sobre la selección del cemento, debido a que esta es crucial a medida que la resistencia final deseada aumenta. Es por eso que se le debe brindar a sus características y propiedades la mayor atención antes y durante la construcción de las estructuras.

Cuando se revisan las propiedades relevantes de los componentes básicos del hormigón de alto desempeño, se ha observado que el contenido de silicatos juega un papel importante en el desarrollo de la resistencia, sin embargo es la fase intersticial la que tiene un rol clave en determinar las características de fluidez de mezclas que poseen una baja relación agua/material cementicio. Es por esto que el desempeño final del cemento, al preparar mezclas de hormigón de alto desempeño, dependerá de la manera en que las características de fluidez y de desarrollo de resistencia pueden ser simultáneamente optimizadas. Comenzando por el modulo de finura, existen características que se contraponen, desde el punto de vista de resistencia, mientras más fino sea el cemento será mejor, debido a que el cemento se combinara con el agua de una

manera más rápida y uniforme, pero desde el punto de vista de fluidez, mientras más fino sea el cemento, más reactiva la mezcla será, endureciendo rápidamente.

En nuestro caso, el cemento escogido fue el cemento portland tipo I, por ser este el cemento más apropiado para obtener las características requeridas.

**TABLA 7.** Composición química del cemento tipo I.

Oxido de Calcio (CaO)	60 – 70 %
Dióxido de Silicio (incluyendo 5% de sílice libre)	19 – 24 %
Trióxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4 – 7 %
Oxido Férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2 – 6 %
Oxido de Magnesio (MgO)	< 5 %

#### 4.4.2. Aditivos

La selección de un superplastificante bueno y eficiente es crucial al elaborar concretos de alto desempeño, debido a que no todos los tipos y marcas de superplastificantes reaccionan de la misma manera con un cemento en particular. La experiencia ha demostrado, que no todos los superplastificantes comerciales tienen la misma eficiencia para dispersar las partículas de cemento en la mezcla, reducir la cantidad de agua de mezclado y en controlar la fluidez de hormigones con baja relación agua/material

cementicio. El aditivo que se escogió fue el Glenium 3000 NS que es un reductor de agua de alto rango listo para usarse, el mismo que es de una nueva generación de aditivos basados en la tecnología del policarboxilato. GLENIUM 3000 NS es un aditivo muy efectivo para producir hormigón con diferentes niveles de trabajabilidad, incluyendo aplicaciones que requieran el uso de concreto autocompactante. GLENIUM 3000 NS cumple la norma ASTM C 494 para requerimientos Tipo A, reductores de agua, y Tipo F, aditivos reductores de agua de alto rango.

#### **4.4.3. Agregados**

Como se ha mencionado anteriormente, la selección de los agregados debe hacerse cuidadosamente, debido a que mientras la resistencia deseada se incrementa, el agregado puede convertirse en el vínculo más débil, en donde la falla comenzara a producirse bajo grandes esfuerzos. Comparado con concretos usuales, un control más minucioso de la calidad de los agregados con respecto a su granulometría y tamaño máximo es necesario, debido a que una consideración primaria es de mantener los requerimientos de agua lo más bajo posible.

Para elaborar el Hormigón de Alto Desempeño u Hormigón de Polvo Reactivo se utilizó arena fina de cuarzo y cuarzo molido. La arena proviene del oriente ecuatoriano es originaria de la formación Hollín. La arena fina contribuye con las partículas de mayor tamaño en la matriz, el tamaño de la arena es seleccionado dependiendo del grado de homogeneidad que se desea. En el Hormigón de Polvo Reactivo el tamaño de las partículas de arena utilizada está limitado a 600um, pero no menor a 150um. El polvo de cuarzo molido proviene de la molienda de la arena fina de cuarzo y es el componente reactivo de la mezcla, el beneficio que este brinda al hormigón es realmente su bajo costo y además, junto con el cemento, conforma una excelente pasta de gran dureza. El diámetro de las partículas de polvo de cuarzo es del orden de 10-15um.



**FIGURA 27.** Obtención del polvo reactivo producto de la molienda de la arena cuarzosa.

#### **4.4.4. Adiciones**

La adición de humo de sílice a la mezcla es importante para poder alcanzar los objetivos de fluidez y resistencia. El humo de sílice es un subproducto que resulta de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en calderos de arco eléctrico en la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio. El humo, consiste de partículas esféricas muy finas y cuyo contenido de sílice amorfo es muy elevado. Este material, a causa de su extrema finura y su alto contenido de sílice, cumple un papel muy importante en la estructura de la pasta de cemento. Actúa como relleno físico o filler,

aumentando la compacidad de la mezcla. Reduce considerablemente la exudación en el hormigón fresco debido a su gran superficie específica y mejora la capacidad para retener el agua.

Para el presente proyecto se utilizó SikaFume, por ser un humo de sílice disponible localmente. SikaFume, es una adición en polvo fino, color gris, con base en microsíllica, que permite aumentar las resistencias mecánicas y químicas de hormigones y morteros endurecidos. Su doble efecto puzolánico y granular, mejora las características de la matriz del hormigón o mortero, disminuyendo la porosidad y creando mediante su reacción con la cal libre, una estructura densa y resistente al ataque de aguas y ambientes agresivos. No contiene cloruros. SikaFume cumple con los requerimientos de la Norma ASTM C-1240.

#### **4.4.5. Fibras metálicas**

El uso de fibras para reforzar materiales quebradizos se remonta a tiempos inmemoriales, desde la era Egipcia y Babilónica, las espigas eran usadas para reforzar ladrillos secados al sol y paredes de adobe, el pelo de caballo era usado para reforzar yeso y las fibras de asbesto han sido usadas para reforzar morteros hechos a

base de cementos portland. Estudios hechos a finales de los años 1950 y principios de los años 1960, principalmente relacionados a fibras metálicas, impulsaron el desarrollo del uso de hormigones reforzados con fibras como se lo conoce ahora. Para el año 1960, el uso de fibras metálicas se comenzó a usar en concretos para pavimentos en particular. Desde el año 1970 hasta la actualidad, el uso de fibras metálicas ha sido reconocido como un refuerzo complementario en el hormigón para incrementar la resistencia a las fisuras, a la flexión, a cortante y de impacto para elementos de concreto reforzado tanto para elementos prefabricados como fundidos en sitio.

La adición de fibras distribuidas de manera aleatoria y homogénea en el hormigón, contribuye a disminuir la propagación de microfisuras, que aparecen cuando este alcanza del 10% al 15% de la carga última. Generalmente las fibras hechas de acero varían en longitudes que van desde 12.7 a 63.5 mm. Pueden ser redondeadas, producidas de cortar pequeños alambres o planas, con una sección transversal típica de entre 0.12 y 0.41 mm de grosor y 0.24 a 0.90 mm de altura.



**FIGURA 28.** Fibra metálica Bekaert OL13 0.16.

La superior ductilidad de los Hormigones de Alta Resistencia es obtenida a través de la incorporación de microfibras de acero. Sin la adición de las fibras el concreto presenta un comportamiento completamente frágil. Debido a que las fibras refuerzan la mezcla a nivel micro se elimina la necesidad de colocar refuerzo por temperatura y retracción y a la vez permite la reducción y en algunos casos la eliminación por completo del acero para cortante. El tamaño de las fibras integradas en la mezcla es muy importante, tanto el grado de ductilidad como al resistencia a la tracción obtenidos dependen no solo del tamaño de fibras sino también del porcentaje de fibras usado por metro cubico. Las fibras de acero que se emplearon en el presente trabajo fueron las fibras Dramix

OL 13 0.16, fabricadas por la empresa Bekaert. Las fibras tienen un diámetro nominal de 0,2 mm (0,008 pulgadas) y una longitud nominal de 12,7 mm (0,5 pulgadas). La composición química de las fibras se muestra en la Tabla. Previamente se utilizó otra marca de fibras disponible localmente, pero debido a su mayor tamaño y peso, y puesto que el hormigón que se preparó no posee agregados gruesos, esta fibra se segregaba en la mezcla, sin distribuirse uniformemente en toda la mezcla, es por esto que se decidió utilizar esta fibra más pequeña de mayor calidad y menor peso.

**TABLA 8.** Composición química de las fibras metálicas.

<b>Element</b>	<b>Composition (percent)</b>
Carbon	0.69-0.76
Silicon	0.15-0.30
Manganese	0.40-0.60
Phosphorus	0.025
Sulfur	0.025
Chromium	0.08
Aluminum	0.003

#### **4.4.6. Agua**

La calidad de agua desempeña un papel importante, las impurezas del agua pueden interferir con el fraguado del cemento, pueden

afectar adversamente la resistencia del hormigón o causar manchas en su superficie, y también pueden conducir a la corrosión del refuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por estas razones, se debería tomar en cuenta la conveniencia del agua para mezclado y los propósitos del curado. El agua de mezclado no deberá contener cantidades indeseables de sustancias orgánicas ni constituyentes inorgánicos en proporciones excesivas. No obstante, no existen normas que prescriban explícitamente la calidad del agua de mezclado.

## **CAPITULO 5**

### **PRUEBAS DE CARGA DE VIGAS PRE-ESFORZADAS CONSTRUIDAS CON HAD Y DE VIGAS PRE-ESFORZADAS CONSTRUIDAS CON HORMIGONES CONVENCIONALES**

#### **5.1. Ensayos de control de calidad**

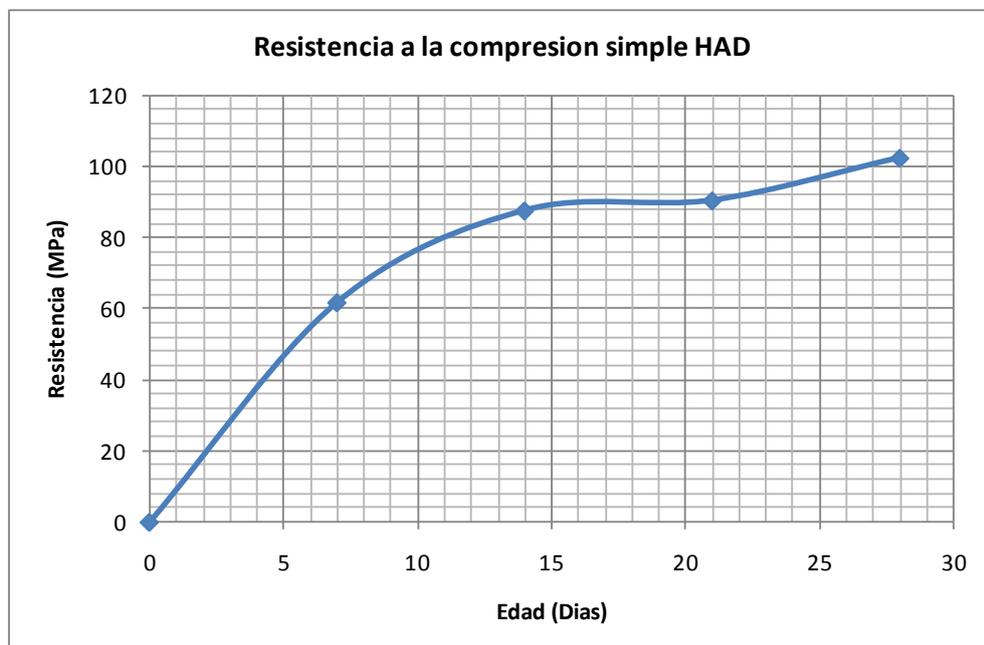
##### **5.1.1. Ensayo de compresión simple del hormigón**

De la mezcla de Hormigón de Alto Desempeño que se utilizo para fundir las vigas pretensadas se tomaron 4 cilindros de 20 cm de alto y 10 cm de diámetro nominal, para comprobar la resistencia de diseño. Posteriormente se procedió a romper los cilindros a distintas edades para observar la tendencia de crecimiento de resistencia. A continuación se muestran tabuladas las resistencias obtenidas a los 7, 14, 21 y 28 días.

**TABLA 9.** Resistencia a la compresión simple de muestras de HAD.

Días	Resistencia (MPa)	Porcentaje
7	61.75	60.31%
14	87.56	85.52%
21	90.39	88.28%
28	102.39	100%

**GRAFICO 1.** Resistencia a la compresión simple de muestras de HAD.



**FIGURA 29.** Cilindro de HAD ensayado a la compresión simple a los 21 días



La resistencia a la compresión simple a los 28 días de esta muestra de hormigón tomada en el sitio de la fundición fue de 102 MPa, siendo la resistencia, de la misma dosificación probada en laboratorio alrededor de 140 MPa para la misma edad. Esta diferencia entre la resistencia obtenida de la mezcla producida en los ensayos de laboratorio y la mezcla producida en obra muestra la gran sensibilidad que poseen los Hormigones de Alto Desempeño a pequeñas variaciones en los parámetros de medición y ambientales. Uno de los factores que más afecta es el incremento en la temperatura del hormigón al producirlo fuera de condiciones

controladas del laboratorio, otros factores que pueden afectar es la precisión de las balanzas y el sistema de dosificación de agua, siendo estos de una precisión menor que aquellos utilizados para pequeñas muestras en laboratorio. Sin embargo estos sistemas pueden ser perfeccionados y ajustados para obtener resistencias todavía más cercanas a aquellas probadas en mezclas de laboratorio.

## **5.2. Pruebas de carga dinámica con carga puntual en vigas simplemente apoyadas**

Las pruebas de carga para las vigas se las realizó en el Centro de Investigaciones en Ingeniería Estructural y Sismoresistente, se utilizo un gato hidráulico con una capacidad de 5 ton. de marca Enerpac, el cual se dimensiono previamente con los resultados teóricos del análisis de compatibilidad de deformaciones de vigas pre-esforzadas, el cual dio como resultado para la carga máxima de falla valores menores a la capacidad del gato y se considero un factor de seguridad de 3.

Se empleo dos deformímetros, colocados en el centro de la luz de la viga, dispuestos uno en cada lado de la viga y sujetos por torres para poder colocarlos de manera vertical con su respectivo aplomo,

ambos deformímetros tomaran mediciones independientes y servirán para obtener una deformación promedio para elaborar el grafico carga versus deflexión.

La celda de carga que se utilizo para registrar los incrementos posee una capacidad de 5 toneladas acorde con la capacidad del gato.

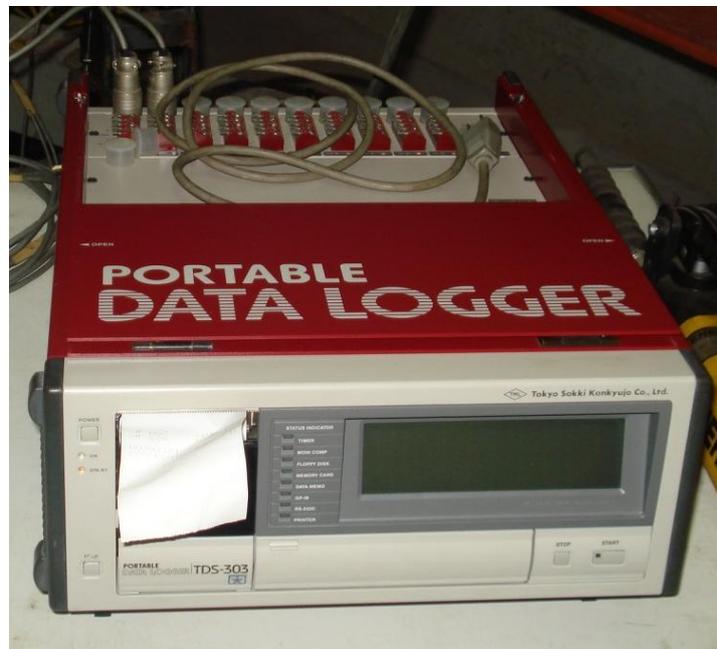
**FIGURA 30.** Gato hidráulico *Enerpac* capacidad 5 ton.



Toda la instrumentación se conecta a un Data Logger del fabricante japonés TML modelo TDS-303, se conecto la celda de carga en los canales 001 y 002; y los deformímetros en los canales 003 y 004, el

Data Logger a su vez se conecta a un ordenador personal el cual por medio del software Visual LOG, almacena los datos obtenidos en tiempo real y sirve para configurar la prueba y programar los gráficos y tablas de los ensayos.

**FIGURA 31.** Data Logger TDM model TDS-303



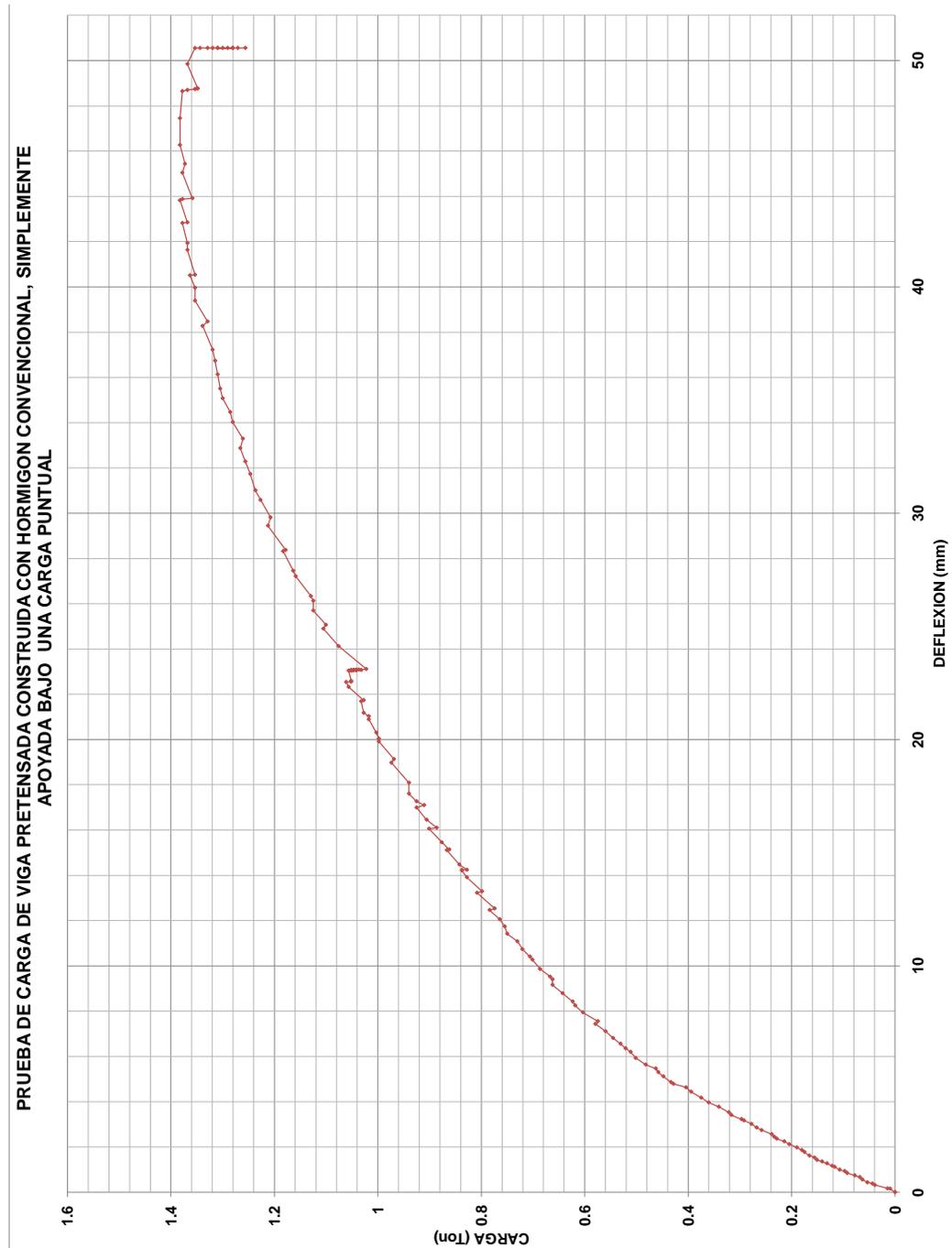
**FIGURA 32.** Detalle de montaje de la instrumentación se observan el gato hidráulico y celda de carga, a los costados los deformímetros.



Una vez montada la instrumentación, calibrado y encerado el equipo se procedió a comenzar con la prueba de carga primero con la viga construida con hormigón convencional, se le iba agregando carga y se almacenaban los incrementos de carga y deflexión en intervalos de 1 segundo, el archivo de datos generado de las pruebas se pueden ver en el Anexo 6, los gráficos Carga versus Deflexión de cada uno de los ensayos se muestra a continuación, las tablas generadas se encuentran en el Anexo A.

### 5.3. Resultados obtenidos

**GRAFICO 2.** Curva Carga versus Deflexión viga pretensada construida con hormigón convencional. Luz 2.60 m.



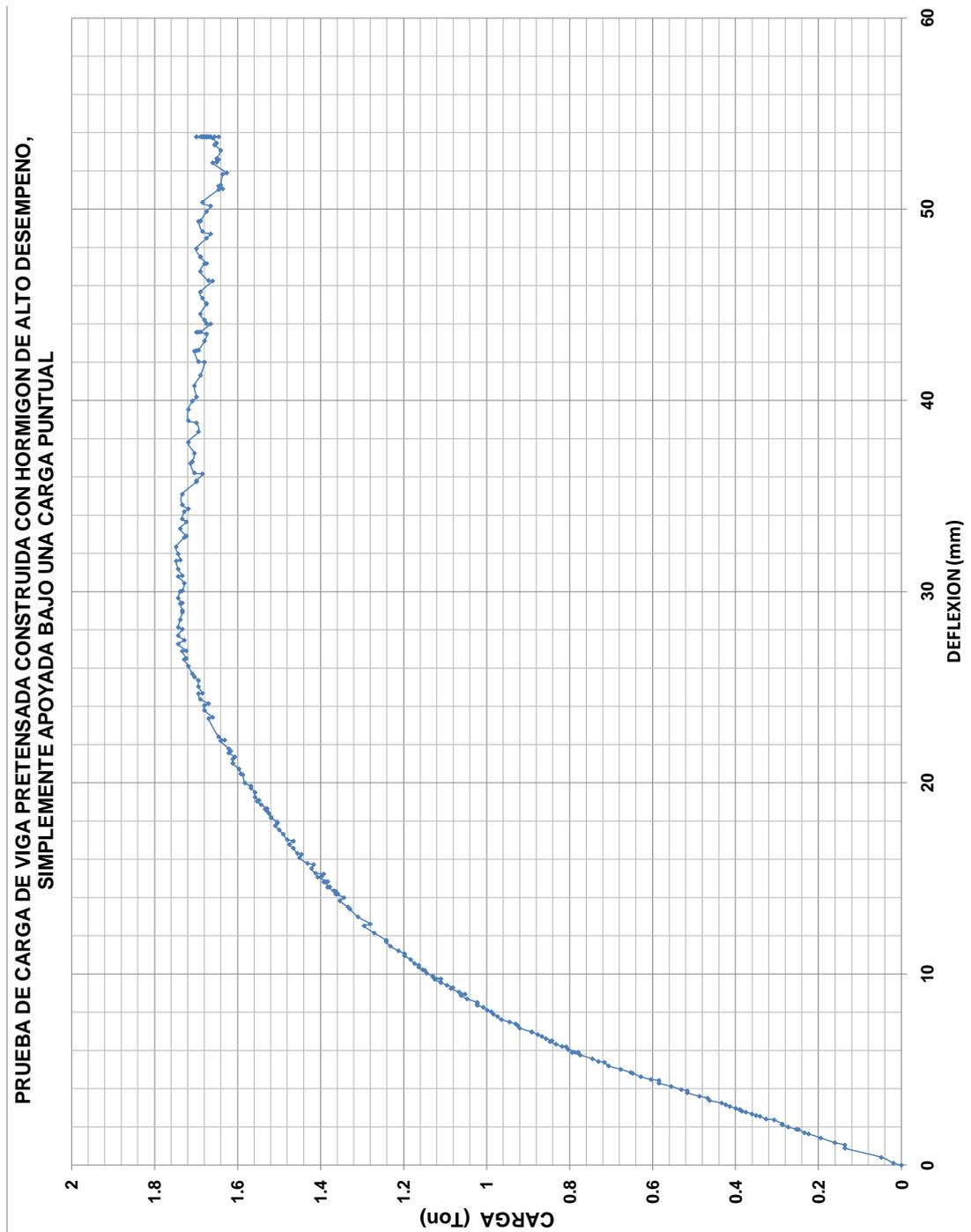
**FIGURA 33.** Detalle de fisura en la zona de falla de la viga construida con hormigón convencional (vista frontal).



**FIGURA 34.** Detalle de fisura en la zona de falla de la viga construida con hormigón convencional (vista posterior).



**GRAFICO 3.** Curva Carga versus Deflexión viga pretensada construida con Hormigón de Alto Desempeño. Luz 2.60 m.



**FIGURA 35.** Fisura en la zona de falla de la viga construida con HAD (vista frontal).



**FIGURA 36.** Detalle ubicación de fisura en la zona de falla de la viga construida con HAD (vista posterior).



**FIGURA 37.** Detalle de fisura en la zona de falla de la viga construida con HAD (vista posterior).



## **CAPITULO 6**

### **ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CARGA DE VIGAS PRE-ESFORZADAS CONSTRUIDAS CON HAD Y DE VIGAS PRE-ESFORZADAS CONSTRUIDAS CON HORMIGONES CONVENCIONALES**

#### **6.1. Análisis y comparación de resultados obtenidos del análisis teórico de deflexiones de vigas pre-esforzadas construidas con HAD versus resultados obtenidos de la prueba de carga**

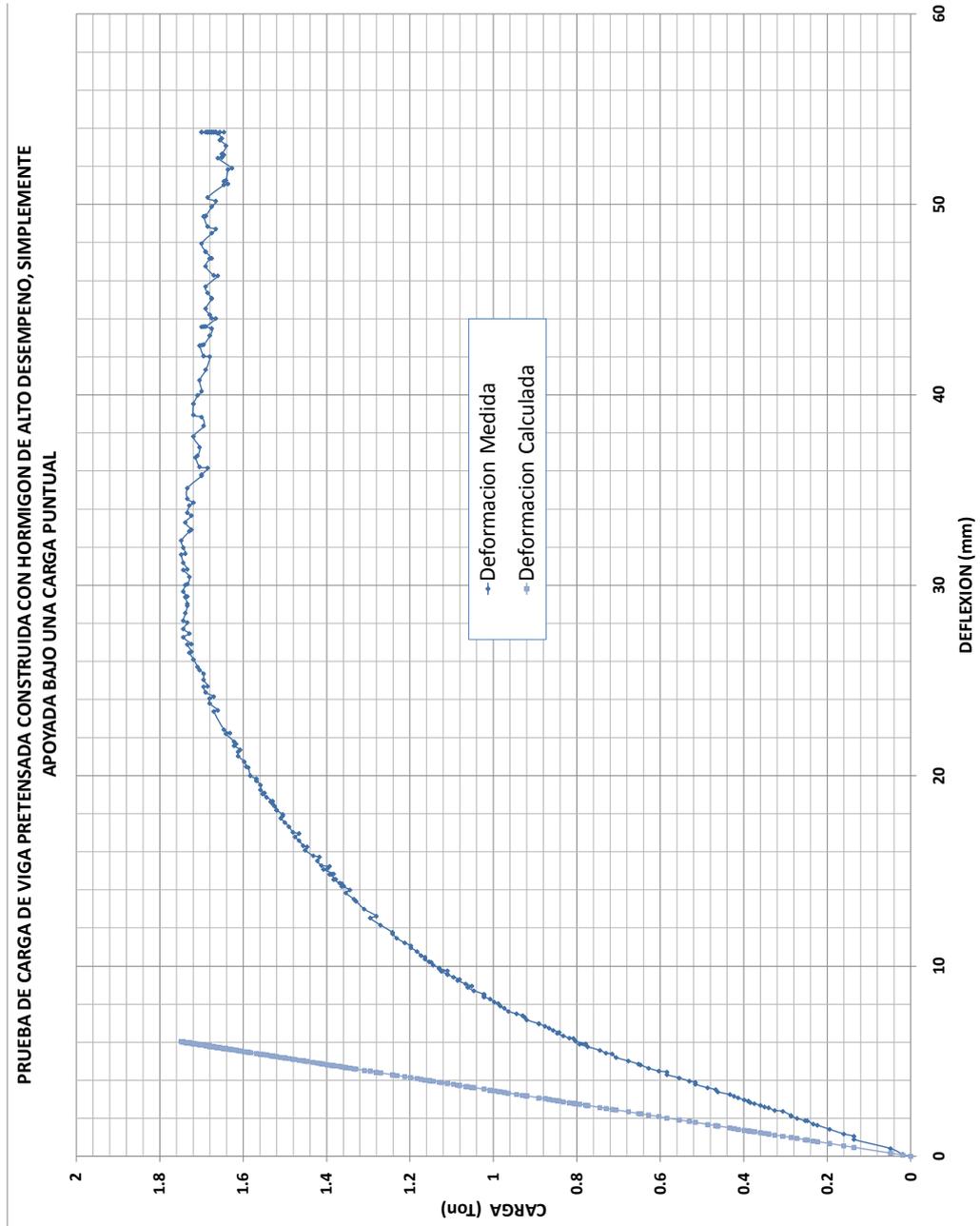
A continuación se presenta un gráfico comparativo entre los valores calculados y los valores medidos de la variación en la deflexión de la viga construida con Hormigón de Alto Desempeño.

El análisis de deflexión calculado está basado en un análisis teórico de compatibilidad de deformaciones, detallado previamente en el Capítulo 2, para el elemento a flexión calculado en base al Capítulo

18 del las especificaciones ACI318-05, en el cual se han usado para el cálculo de las deflexiones formulas usuales para deformaciones elásticas según lo permite el código.

Debido a esto podemos observar que la carga calculada que provoca la falla siendo igual a 1.41 Ton es cercana a la obtenida producto de la prueba de carga igual a 1.3 Ton, sin embargo las deflexiones obtenidas del análisis teórico son inferiores a las obtenidas experimentalmente, esto se debe principalmente a que el cálculo teórico está basado en un análisis de compatibilidad de deformaciones utilizando los mismos métodos desarrollados para vigas corrientes de concreto reforzado y siguiendo las recomendaciones de la especificaciones del código ACI en la sección 18.7. Obteniendo deflexiones teóricas para deformaciones elásticas.

**GRAFICO 4.** Comparación de las deflexiones medidas y las deflexiones calculadas en vigas pretensadas construidas con HAD



## **6.2. Análisis y comparación de resultados obtenidos del análisis teórico de deflexiones de vigas pre-esforzadas construidas con hormigón convencional versus resultados obtenidos de la prueba de carga**

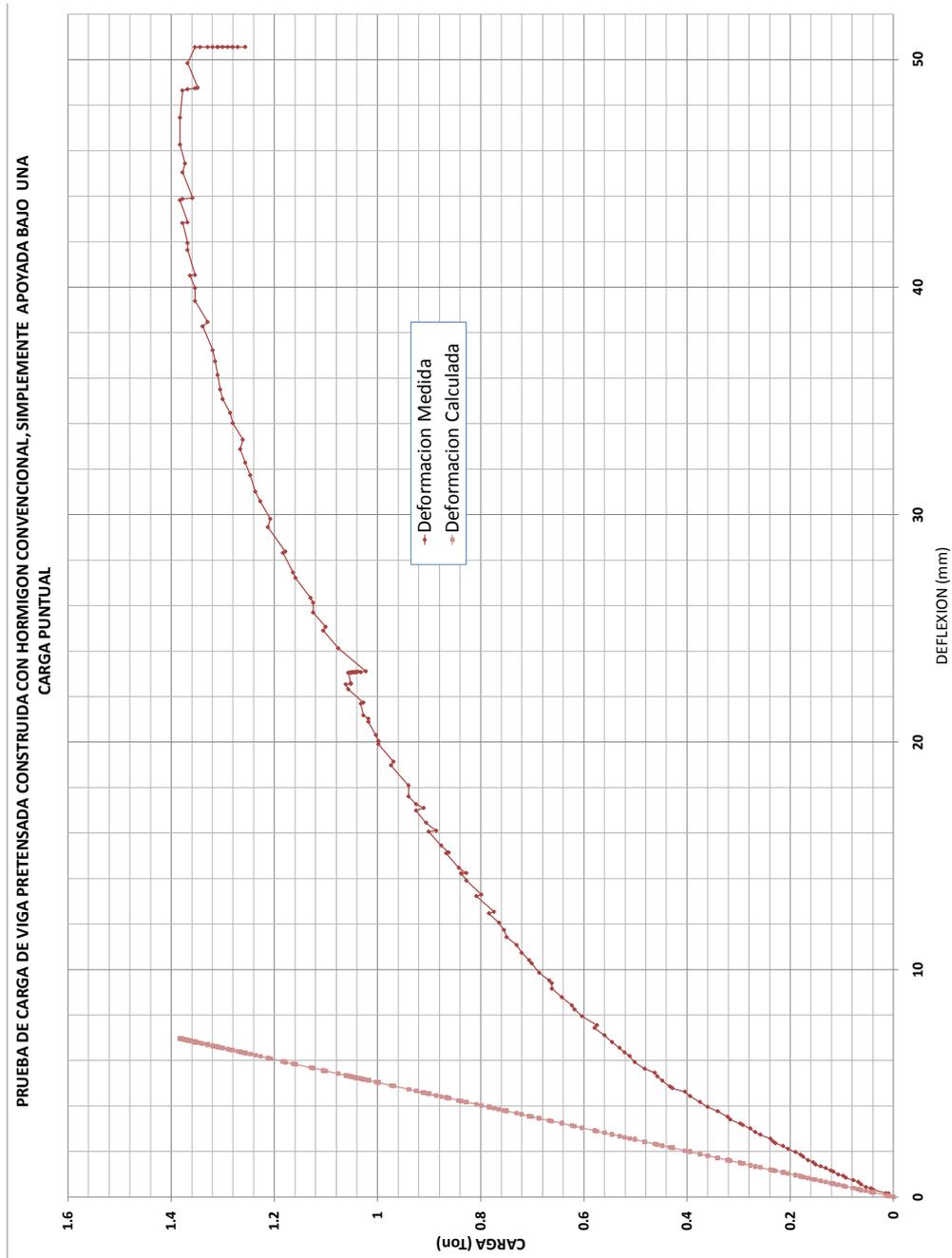
De la misma manera se presenta un grafico comparativo entre los valores calculados y los valores medidos de la variación en la deflexión de la viga construida con hormigón convencional.

El análisis de deflexión calculado está basado en un análisis teórico de compatibilidad de deformaciones, detallado previamente en el Capitulo 3, para el elemento a flexión calculado en base al Capítulo 18 del las especificaciones ACI318-05, en el cual se han usado para el cálculo de las deflexiones formulas usuales para deformaciones elásticas según lo permite el código.

Debido a esto podemos observar que la carga calculada que provoca la falla siendo igual a 1.59 Ton es cercana a la obtenida producto de la prueba de carga igual a 1.7 Ton, sin embargo las deflexiones obtenidas del análisis teórico son inferiores a las obtenidas experimentalmente, esto se debe principalmente a que el cálculo teórico está basado en un análisis de compatibilidad de deformaciones utilizando los mismos métodos desarrollados para

vigas corrientes de concreto reforzado y siguiendo las recomendaciones de la especificaciones del código ACI en la sección 18.7. Obteniendo deflexiones teóricas para deformaciones elásticas. Cabe recalcar que la fibra metálica incorporada en el hormigón de alto desempeño le añade a la viga capacidad de fluencia, logrando que la viga se deforme en el rango inelástico bajo mayores cargas

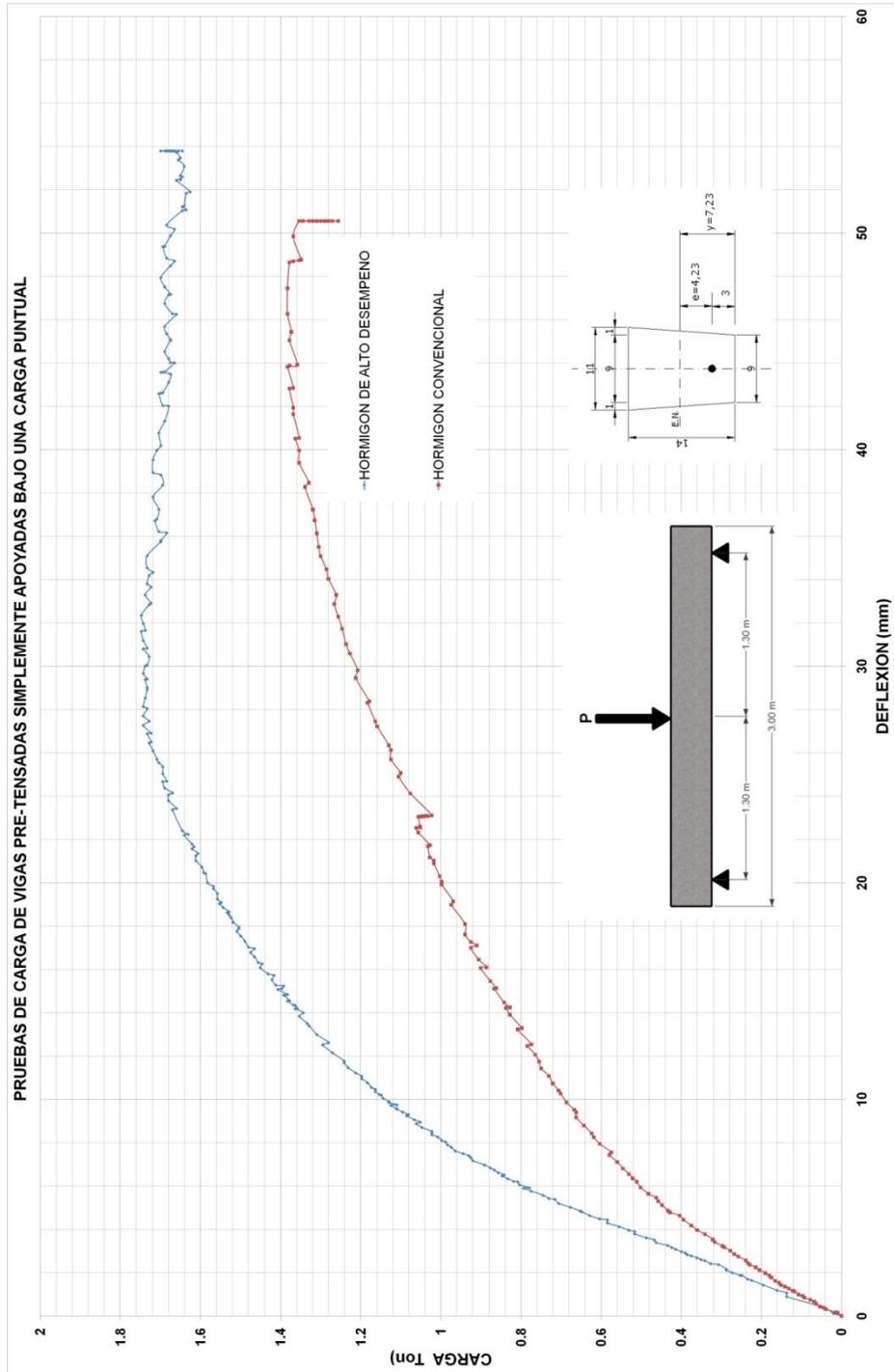
**GRAFICO 5.** Comparación de las deflexiones medidas y las deflexiones calculadas en vigas pretensadas construidas con hormigones convencionales.



### **6.3. Análisis y comparación de resultados obtenidos de las pruebas de carga de vigas pre-esforzadas construidas con HAD versus vigas construidas con hormigón convencional.**

Para poder comparar la respuesta estructural de las vigas construidas con hormigones convencionales y Hormigones de Alto Desempeño se procedió a colocar en un mismo grafico las curvas Carga – Deflexión resultantes de las pruebas de carga respectivas. De esta manera podremos contrastar la respuesta que presentaron las vigas bajo las mismas condiciones de carga. A continuación se presenta la grafica comparativa, posteriormente se hará un análisis que permitirá obtener conclusiones con respecto a las hipótesis inicialmente planteadas.

**GRAFICO 6.** Comparación de la respuesta estructural de vigas pretensadas construidas con HAD y Hormigones Convencionales.



Esta grafica resume las propiedades del Hormigón de Alto Desempeño y sus ventajas de aplicación frente a hormigones convencionales. La combinación del pre-esfuerzo con la utilización de un hormigón de alta resistencia al cual se le han añadido fibras mejoran notablemente las características de desempeño, la viga construida con Hormigón de Alto Desempeño muestra un mayor comportamiento elástico esto debido a su mayor modulo de elasticidad y se pudo comprobar durante la prueba de carga que la fibra metálica contribuye a un comportamiento más dúctil que para la viga construida con hormigón convencional. La viga de HAD alcanza mayores cargas a menores deformaciones, y el proceso de falla es muy lento sin presentar fisuras súbitas y menos aun comportamientos explosivos.

Para la viga de hormigón convencional el rango de comportamiento elástico fue mucho menor al de la viga de HAD se observaron las primeras fisuras, al alcanzar una carga  $P_{cr} = 1$  Ton bajo una deformación de aproximadamente 2cm y posterior a esta carga las deformaciones fueron aumentando considerablemente bajo pequeños incrementos de carga, es así como a tan solo 1.4 Ton la viga ya alcanzaba 5cm de deformación.

Por el contrario la viga construida con HAD alcanza una carga de cerca de 0.8 ton al final del rango elástico, con una deformación de un 0.6 cm, siendo el rango elástico mucho mayor que el de la viga de concreto convencional en la cual a una carga de 0.4 Ton se obtiene una deflexión aproximada de 0.45cm. Se puede observar que el amplio rango inelástico en el cual trabaja la viga de HAD brinda una mayor seguridad prolongando la falla. Luego de la carga de falla de 1.4 ton la viga de HAD pudo soportar un incremento de carga hasta de 1.7 ton aproximadamente en la cual las deformaciones aumentaron considerablemente bajo pequeños incrementos de carga.

## **CONCLUSIONES**

1. Por medio de la presente investigación, podemos concluir que es técnicamente viable construir en nuestro país elementos estructurales con Hormigones de Alto Desempeño.
2. Las propiedades de mezclas de Hormigón de Alto Desempeño son muy sensibles a pequeños cambios en parámetros ambientales y en procedimientos. Es por esto que se muestran diferencias entre las resistencias obtenidas en laboratorio y las obtenidas en obra.

3. Resulta primordial seguir los procedimientos técnicos recomendados en esta investigación para la etapa de construcción de elementos de Hormigón de Alto Desempeño para poder alcanzar los objetivos de resistencia y desempeño deseados en las estructuras.
4. La combinación de las características del hormigón pretensado con las propiedades de los Hormigones de Alto Desempeño resultan en un incremento notable en las propiedades estructurales de vigas sometidas a flexión, incrementando la capacidad de carga y disminuyendo las deformaciones.
5. El uso de fibra metálica de alta resistencia añade al hormigón capacidad de deformarse elásticamente, retrasan la aparición de fisuras haciendo de las estructuras más seguras.
6. Las ventajas económicas que han sido ampliamente demostradas para el uso de Hormigones de Alto Desempeño en obras a gran escala (Ver Bibliografía 10) abren la posibilidad de introducir en nuestro medio la fabricación de elementos estructurales con este hormigón.

## **RECOMENDACIONES**

1. En la etapa de construcción se recomienda planificar detalladamente los procedimientos de dosificación, mezclado, vertido y acabado de elementos estructurales construidos con Hormigones de Alto Desempeño, debido a que pequeñas variaciones en estos procedimientos pueden mostrar grandes cambios en los resultados deseados.
2. Es esencial lograr una distribución uniforme de la fibra metálica en la mezcla para aprovechar las propiedades de la misma en los Hormigones de Alto Desempeño.

3. Es una buena práctica, consultar información sobre obras realizadas anteriormente en campos en los que se está incursionando en nuestro medio.
4. Es importante realizar mezclas de prueba en laboratorio antes de utilizar una dosificación nueva para elementos estructurales.
5. Es conveniente obtener todo el tipo de información impresa del fabricante sobre los aditivos y adiciones que se incluyen en una dosificación de prueba, junto con instrucciones de primera mano de su utilización.
6. Se recomienda realizar una reunión previa a la fundición con Hormigones de Alta Resistencia en la que estén involucrados representantes de aditivos, adiciones o fibras a probar, el productor del hormigón y los encargados de la parte operativa del proceso.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

### ARCHIVOS DE DATOS DE PRUEBAS DE CARGA VIGA HORMIGON

#### CONVENCIONAL

	Carga 1	Carga 2	def 1	def 2	Carga prom	def prom
	kN	kN	(25 mm)	(50 mm)		
	CH. 000	CH. 001	CH. 002	CH. 003	CH.@000	CH.@001
7/29/2009 14:26	-7.5445	-61.12	27.060012	50.3763332	34.33225	-38.7181726
7/29/2009 14:26	0.191	0.0955	-0.001286	0	-0.14325	0.000643
7/29/2009 14:26	0.0955	0.0955	0.002572	-0.00203796	-0.0955	-0.00026702
7/29/2009 14:26	0.0955	0.0955	0	0	-0.0955	0
7/29/2009 14:26	0.191	0.191	-0.001286	0	-0.191	0.000643
7/29/2009 14:26	0.2865	-0.4775	-0.101594	-0.15080904	0.0955	0.12620152
7/29/2009 14:26	0.2865	-0.573	-0.171038	-0.1630368	0.14325	0.1670374
7/29/2009 14:26	0.382	-1.146	-0.354936	-0.31180788	0.382	0.33337194
7/29/2009 14:26	0.4775	-1.337	-0.438526	-0.3770226	0.42975	0.4077743
7/29/2009 14:26	0.573	-1.6235	-0.524688	-0.43000956	0.52525	0.47734878
7/29/2009 14:26	0.764	-2.0055	-0.612136	-0.55636308	0.62075	0.58424954
7/29/2009 14:26	0.955	-2.292	-0.783174	-0.66029904	0.6685	0.72173652
7/29/2009 14:26	1.0505	-2.5785	-0.775458	-0.73774152	0.764	0.75659976
7/29/2009 14:26	1.146	-2.9605	-0.949068	-0.84371544	0.90725	0.89639172
7/29/2009 14:26	1.337	-3.247	-0.961928	-0.9272718	0.955	0.9445999
7/29/2009 14:27	1.337	-3.438	-1.04166	-0.9884106	1.0505	1.0150353
7/29/2009 14:27	1.528	-3.82	-1.122678	-1.11680208	1.146	1.11974004
7/29/2009 14:27	1.528	-3.9155	-1.20884	-1.1616372	1.19375	1.1852386
7/29/2009 14:27	1.719	-4.2975	-1.302718	-1.26964908	1.28925	1.28618354
7/29/2009 14:27	1.719	-4.4885	-1.386951	-1.35116748	1.38475	1.36905924
7/29/2009 14:27	1.8145	-4.775	-1.466683	-1.42249608	1.48025	1.44458954
7/29/2009 14:27	1.91	-4.966	-1.559275	-1.52643204	1.528	1.54285352
7/29/2009 14:27	2.0055	-5.2525	-1.637078	-1.61406432	1.6235	1.62557116
7/29/2009 14:27	2.1965	-5.6345	-1.721311	-1.77506316	1.719	1.74818708
7/29/2009 14:27	2.3875	-5.921	-1.838337	-1.85861952	1.76675	1.84847826
7/29/2009 14:27	2.483	-6.2075	-1.983012	-1.97274528	1.86225	1.97787864
7/29/2009 14:27	2.5785	-6.5895	-2.145048	-2.11540248	2.0055	2.13022524
7/29/2009 14:27	2.7695	-6.9715	-2.23764	-2.241756	2.101	2.239698
7/29/2009 14:27	2.865	-7.3535	-2.324445	-2.3640336	2.24425	2.3442393
7/29/2009 14:27	2.865	-7.449	-2.410607	-2.44351404	2.292	2.42706052

7/29/2009 14:27	3.056	-7.7355	-2.495483	-2.55967776	2.33975	2.52758038
7/29/2009 14:27	3.247	-8.3085	-2.667164	-2.73901824	2.53075	2.70309112
7/29/2009 14:27	3.3425	-8.595	-2.762328	-2.853144	2.62625	2.807736
7/29/2009 14:27	3.5335	-8.977	-2.924364	-3.01006692	2.72175	2.96721546
7/29/2009 14:27	3.7245	-9.4545	-3.095402	-3.16495188	2.865	3.13017694
7/29/2009 14:27	3.629	-9.4545	-3.096688	-3.22609068	2.91275	3.16138934
7/29/2009 14:27	3.82	-10.0275	-3.267083	-3.40746912	3.10375	3.33727606
7/29/2009 14:27	4.011	-10.314	-3.355174	-3.5256708	3.1515	3.4404224
7/29/2009 14:27	4.2975	-10.9825	-3.611731	-3.770226	3.3425	3.6909785
7/29/2009 14:27	4.393	-11.46	-3.784055	-3.95975628	3.5335	3.87190564
7/29/2009 14:27	4.584	-11.9375	-3.953807	-4.17170412	3.67675	4.06275556
7/29/2009 14:27	4.775	-12.5105	-4.211007	-4.43460096	3.86775	4.32280398
7/29/2009 14:27	4.966	-12.8925	-4.383331	-4.62820716	3.96325	4.50576908
7/29/2009 14:27	4.966	-13.37	-4.555655	-4.78309212	4.202	4.66937356
7/29/2009 14:27	4.966	-13.4655	-4.640531	-4.85849664	4.24975	4.74951382
7/29/2009 14:27	5.2525	-14.0385	-4.812212	-5.1152796	4.393	4.9637458
7/29/2009 14:27	5.348	-14.325	-4.985179	-5.30073396	4.4885	5.14295648
7/29/2009 14:27	5.4435	-14.516	-5.152359	-5.45969484	4.53625	5.30602692
7/29/2009 14:27	5.4435	-14.898	-5.323397	-5.63699736	4.72725	5.48019718
7/29/2009 14:27	5.539	-15.3755	-5.579954	-5.92638768	4.91825	5.75317084
7/29/2009 14:27	5.73	-15.7575	-5.835868	-6.19336044	5.01375	6.01461422
7/29/2009 14:27	5.8255	-16.044	-6.091782	-6.35435928	5.10925	6.22307064
7/29/2009 14:27	5.921	-16.3305	-6.262177	-6.55407936	5.20475	6.40812818
7/29/2009 14:27	6.0165	-16.7125	-6.433215	-6.80882436	5.348	6.62101968
7/29/2009 14:27	6.2075	-17.19	-6.714849	-7.10840448	5.49125	6.91162674
7/29/2009 14:27	6.303	-17.6675	-7.115438	-7.43244012	5.68225	7.27393906
7/29/2009 14:27	6.303	-17.572	-7.114795	-7.5506418	5.6345	7.3327184
7/29/2009 14:27	6.3985	-18.2405	-7.539818	-7.948044	5.921	7.743931
7/29/2009 14:27	6.5895	-18.718	-7.796375	-8.24762412	6.06425	8.02199956
7/29/2009 14:27	6.5895	-18.8135	-7.96677	-8.41881276	6.112	8.19279138
7/29/2009 14:27	6.7805	-19.3865	-8.306917	-8.7836076	6.303	8.5452623
7/29/2009 14:27	6.9715	-19.9595	-8.64835	-9.1606302	6.494	8.9044901
7/29/2009 14:27	7.067	-20.055	-8.903621	-9.40110948	6.494	9.15236524
7/29/2009 14:27	6.9715	-20.055	-8.98914	-9.51931116	6.54175	9.25422558
7/29/2009 14:27	7.1625	-20.628	-9.329287	-9.85761252	6.73275	9.59344976
7/29/2009 14:27	7.3535	-21.1055	-9.754953	-10.2692804	6.876	10.0121167
7/29/2009 14:27	7.3535	-21.201	-9.840472	-10.4078617	6.92375	10.1241669
7/29/2009 14:27	7.449	-21.583	-10.180619	-10.7318974	7.067	10.4562582
7/29/2009 14:27	7.64	-21.965	-10.436533	-11.0773316	7.1625	10.7569323

7/29/2009 14:27	7.7355	-22.4425	-10.862199	-11.4207278	7.3535	11.1414634
7/29/2009 14:28	7.831	-22.6335	-11.118113	-11.7386496	7.40125	11.4283813
7/29/2009 14:28	7.9265	-22.92	-11.453116	-12.0575903	7.49675	11.7553532
7/29/2009 14:28	8.1175	-23.493	-11.885212	-12.4662013	7.68775	12.1757067
7/29/2009 14:28	8.213	-23.3975	-11.970731	-12.535492	7.59225	12.2531115
7/29/2009 14:28	8.4995	-24.3525	-12.568078	-13.2243224	7.9265	12.8962002
7/29/2009 14:28	8.595	-24.257	-12.65424	-13.2905561	7.831	12.9723981
7/29/2009 14:28	8.786	-25.021	-13.248372	-13.909077	8.1175	13.5787245
7/29/2009 14:28	8.977	-25.403	-13.592377	-14.213752	8.213	13.9030645
7/29/2009 14:28	8.8815	-25.3075	-13.591734	-14.2310747	8.213	13.9114043
7/29/2009 14:28	8.8815	-25.1165	-13.592377	-14.2402455	8.1175	13.9163113
7/29/2009 14:28	8.977	-25.4985	-13.762772	-14.470535	8.26075	14.1166535
7/29/2009 14:28	9.4545	-26.4535	-14.446281	-15.1114734	8.4995	14.7788772
7/29/2009 14:28	9.359	-26.2625	-14.531157	-15.1420428	8.45175	14.8365999
7/29/2009 14:28	9.55	-26.74	-14.786428	-15.4538507	8.595	15.1201393
7/29/2009 14:28	9.8365	-27.504	-15.383132	-16.0581058	8.83375	15.7206189
7/29/2009 14:28	9.8365	-27.2175	-15.383775	-16.100903	8.6905	15.742339
7/29/2009 14:28	10.0275	-27.7905	-15.724565	-16.4524511	8.8815	16.088508
7/29/2009 14:28	10.314	-28.459	-16.236393	-16.9914915	9.0725	16.6139423
7/29/2009 14:28	10.4095	-28.268	-16.321912	-17.0984844	8.92925	16.7101982
7/29/2009 14:28	10.4095	-28.5545	-16.492307	-17.2676351	9.0725	16.879971
7/29/2009 14:28	10.505	-28.9365	-16.833097	-17.6059364	9.21575	17.2195167
7/29/2009 14:28	10.696	-29.1275	-17.25812	-18.0899519	9.21575	17.674036
7/29/2009 14:28	10.9825	-30.0825	-18.111381	-18.9764645	9.55	18.5439228
7/29/2009 14:28	10.9825	-29.987	-18.1969	-19.1333875	9.50225	18.6651437
7/29/2009 14:28	11.078	-30.6555	-18.96207	-19.9129072	9.78875	19.4374886
7/29/2009 14:28	10.9825	-30.56	-19.132465	-20.0433366	9.78875	19.5879008
7/29/2009 14:28	11.078	-30.751	-19.389022	-20.3021575	9.8365	19.8455898
7/29/2009 14:28	11.1735	-31.133	-19.899564	-20.891128	9.97975	20.395346
7/29/2009 14:28	11.078	-31.0375	-20.070602	-21.0276713	9.97975	20.5491366
7/29/2009 14:28	11.078	-31.2285	-20.240997	-21.1754234	10.07525	20.7082102
7/29/2009 14:28	11.1735	-31.4195	-20.667949	-21.6869513	10.123	21.1774502
7/29/2009 14:28	11.078	-31.2285	-20.753468	-21.7338244	10.07525	21.2436462
7/29/2009 14:28	11.078	-31.8015	-21.266582	-22.3238138	10.36175	21.7951979
7/29/2009 14:28	10.9825	-31.8015	-21.523782	-22.5377996	10.4095	22.0307908
7/29/2009 14:28	10.887	-31.515	-21.524425	-22.5530843	10.314	22.0387547
7/29/2009 14:28	10.9825	-31.6105	-21.524425	-22.5918056	10.314	22.0581153
7/29/2009 14:28	10.7915	-31.515	-22.036253	-23.0432137	10.36175	22.5397334
7/29/2009 14:28	10.887	-31.515	-22.036896	-23.0483086	10.314	22.5426023

7/29/2009 14:28	10.887	-31.515	-22.037539	-23.0503466	10.314	22.5439428
7/29/2009 14:28	10.7915	-31.4195	-22.037539	-23.0544225	10.314	22.5459808
7/29/2009 14:28	10.7915	-31.4195	-22.037539	-23.0564605	10.314	22.5469997
7/29/2009 14:28	10.7915	-31.324	-22.036253	-23.0574794	10.26625	22.5468662
7/29/2009 14:29	10.696	-31.324	-22.037539	-23.0595174	10.314	22.5485282
7/29/2009 14:29	10.696	-31.324	-22.036896	-23.0625743	10.314	22.5497352
7/29/2009 14:29	10.696	-31.133	-22.6979	-23.0656313	10.2185	22.8817656
7/29/2009 14:29	10.696	-31.133	-22.604665	-23.0676692	10.2185	22.8361671
7/29/2009 14:29	10.696	-31.2285	-22.952528	-23.0707262	10.26625	23.0116271
7/29/2009 14:29	10.6005	-31.133	-23.893237	-23.0707262	10.26625	23.4819816
7/29/2009 14:29	10.696	-31.133	-23.894523	-23.0707262	10.2185	23.4826246
7/29/2009 14:29	10.6005	-31.0375	-23.892594	-23.0717452	10.2185	23.4821696
7/29/2009 14:29	10.696	-30.942	-23.895166	-23.0737831	10.123	23.4844746
7/29/2009 14:29	10.6005	-31.0375	-23.904168	-23.0748021	10.2185	23.4894851
7/29/2009 14:29	10.6005	-31.0375	-23.904811	-23.0768401	10.2185	23.4908255
7/29/2009 14:29	10.6005	-30.942	-23.904811	-23.0880488	10.17075	23.4964299
7/29/2009 14:31	10.505	-30.56	0.348506	-23.1114854	10.0275	11.3814897
7/29/2009 14:31	10.505	-31.6105	0.086162	-24.1223135	10.55275	12.0180758
7/29/2009 14:31	10.505	-32.1835	-0.695726	-24.8977573	10.83925	12.7967417
7/29/2009 14:31	10.505	-32.088	-0.869336	-25.067927	10.7915	12.9686315
7/29/2009 14:31	10.4095	-32.47	-1.385022	-25.6976566	11.03025	13.5413393
7/29/2009 14:31	10.314	-32.3745	-1.900708	-26.1266472	11.03025	14.0136776
7/29/2009 14:31	10.2185	-32.3745	-2.071746	-26.3355381	11.078	14.2036421
7/29/2009 14:31	10.0275	-32.7565	-2.953942	-27.2159368	11.3645	15.0849394
7/29/2009 14:31	9.932	-32.7565	-3.100546	-27.4553971	11.41225	15.2779716
7/29/2009 14:31	9.8365	-33.043	-4.041255	-28.3184732	11.60325	16.1798641
7/29/2009 14:31	9.741	-32.852	-4.041255	-28.3734981	11.5555	16.2073766
7/29/2009 14:31	9.6455	-33.425	-5.066197	-29.447503	11.88975	17.25685
7/29/2009 14:31	9.741	-33.425	-5.321468	-29.8102599	11.842	17.565864
7/29/2009 14:31	9.932	-33.998	-6.176015	-30.5821373	12.033	18.3790761
7/29/2009 14:31	9.8365	-34.0935	-6.431286	-31.0095994	12.1285	18.7204427
7/29/2009 14:31	10.123	-34.571	-7.284547	-31.7305277	12.224	19.5075374
7/29/2009 14:31	10.123	-34.762	-7.655558	-32.2853623	12.3195	19.9704602
7/29/2009 14:31	10.314	-35.144	-8.308203	-32.8728043	12.415	20.5905036
7/29/2009 14:31	10.4095	-35.144	-8.562831	-33.2905861	12.36725	20.9267085
7/29/2009 14:31	10.505	-35.6215	-9.415449	-34.0242517	12.55825	21.7198503
7/29/2009 14:31	10.505	-35.717	-9.67072	-34.4680175	12.606	22.0693687
7/29/2009 14:31	10.6005	-36.099	-10.437819	-35.0758391	12.74925	22.756829
7/29/2009 14:32	10.6005	-36.1945	-10.69309	-35.5022822	12.797	23.0976861

7/29/2009 14:32	10.696	-36.3855	-11.460189	-36.1304834	12.84475	23.7953362
7/29/2009 14:32	10.696	-36.481	-11.887141	-36.7367765	12.8925	24.3119587
7/29/2009 14:32	10.696	-36.5765	-12.484488	-37.2263963	12.94025	24.8554422
7/29/2009 14:32	10.696	-36.9585	-13.422625	-38.2749268	13.13125	25.8487759
7/29/2009 14:32	10.696	-36.7675	-13.546724	-38.4680235	13.03575	26.0073737
7/29/2009 14:32	10.696	-37.245	-14.533086	-39.3886719	13.2745	26.960879
7/29/2009 14:32	10.696	-37.245	-14.90474	-39.9603197	13.2745	27.4325298
7/29/2009 14:32	10.696	-37.436	-15.556099	-40.5095499	13.37	28.0328245
7/29/2009 14:32	10.696	-37.245	-15.640975	-40.5340054	13.2745	28.0874902
7/29/2009 14:32	10.696	-37.5315	-16.663988	-41.6339943	13.41775	29.1489912
7/29/2009 14:32	10.696	-37.5315	-16.834383	-41.9381599	13.41775	29.3862714
7/29/2009 14:32	10.6005	-37.627	-17.771877	-42.8180491	13.51325	30.294963
7/29/2009 14:32	10.6005	-37.436	-17.856753	-42.8486185	13.41775	30.3526857
7/29/2009 14:32	10.6005	-37.7225	-18.792961	-43.8227634	13.561	31.3078622
7/29/2009 14:32	10.505	-37.5315	-18.792961	-43.8772788	13.51325	31.3351199
7/29/2009 14:32	10.6005	-37.245	-18.877837	-43.9175285	13.32225	31.3976828
7/29/2009 14:32	10.6005	-37.627	-19.90085	-45.0429919	13.51325	32.471921
7/29/2009 14:32	10.505	-37.436	-20.09375	-45.4342802	13.4655	32.7640151
7/29/2009 14:32	10.505	-37.627	-21.096187	-46.2672964	13.561	33.6817417
7/29/2009 14:32	10.505	-37.627	-22.293453	-47.4508417	13.561	34.8721473
7/29/2009 14:32	10.4095	-37.436	-23.404557	-48.6455957	13.51325	36.0250764
7/29/2009 14:32	10.314	-37.1495	-23.489433	-48.6990922	13.41775	36.0942626
7/29/2009 14:32	10.314	-36.863	-23.490076	-48.7403609	13.2745	36.1152184
7/29/2009 14:32	10.314	-36.7675	-23.489433	-48.7597215	13.22675	36.1245772
7/29/2009 14:32	10.2185	-36.672	-23.574309	-48.7755157	13.22675	36.1749123
7/29/2009 14:32	10.123	-36.9585	-23.904811	-49.8490111	13.41775	36.876911
7/29/2009 14:32	10.0275	-36.5765	-23.90674	-50.5515978	13.2745	37.2291689
7/29/2009 14:32	9.8365	-36.1945	-23.907383	-50.5541453	13.179	37.2307641
7/29/2009 14:32	9.55	-35.6215	-23.907383	-50.5551642	13.03575	37.2312736
7/29/2009 14:32	9.4545	-35.335	-23.907383	-50.5566927	12.94025	37.2320379
7/29/2009 14:32	9.4545	-35.144	-23.907383	-50.5561832	12.84475	37.2317831
7/29/2009 14:32	9.4545	-34.571	-23.906097	-50.5561832	12.55825	37.2311401
7/29/2009 14:32	9.4545	-34.571	-23.90674	-50.5566927	12.55825	37.2317164
7/29/2009 14:33	9.2635	-34.953	-23.90674	-50.5566927	12.84475	37.2317164
7/29/2009 14:33	8.786	-34.2845	-23.907383	-50.5572022	12.74925	37.2322926
7/29/2009 14:33	8.3085	-33.616	-23.908026	-50.5566927	12.65375	37.2323594
7/29/2009 14:33	7.831	-32.7565	-23.907383	-50.5566927	12.46275	37.2320379
7/29/2009 14:33	7.7355	-32.3745	-23.907383	-50.5572022	12.3195	37.2322926

## ANEXO B

### ARCHIVOS DE DATOS DE PRUEBAS DE CARGA VIGA HORMIGON ALTO

#### DESEMPENO

	Carga 1	Carga 2	def 1 (25mm)	def 2 (50mm)	Carga prom,	Def. Prom.
	kN	kN	mm	mm	kN	mm
	CH. 000	CH. 001	CH. 002	CH. 003	CH.@000	CH.@001
7/30/2009 13:57	-7.1625	-60.643	29.379956	53.5881582	33.9025	-41.4840571
7/30/2009 13:57	0.0955	0	-0.001286	0.00203796	-0.04775	-0.00037598
7/30/2009 13:57	0	-0.191	-0.001286	0.00203796	0.0955	-0.00037598
7/30/2009 13:57	0	0	-0.002572	0	0	0.001286
7/30/2009 13:57	-0.0955	-0.2865	-0.054012	-0.10801188	0.191	0.08101194
7/30/2009 13:57	-0.573	-0.382	-0.316356	-0.40962996	0.4775	0.36299298
7/30/2009 13:57	-2.0055	-0.6685	-0.767742	-0.8865126	1.337	0.8271273
7/30/2009 13:57	-2.101	-0.573	-0.92592	-1.05362532	1.337	0.98977266
7/30/2009 13:57	-2.483	-0.6685	-1.09953	-1.17386496	1.57575	1.13669748
7/30/2009 13:57	-3.1515	-0.6685	-1.280856	-1.42249608	1.91	1.35167604
7/30/2009 13:57	-3.7245	-0.6685	-1.53677	-1.63444392	2.1965	1.58560696
7/30/2009 13:57	-3.82	-0.764	-1.622932	-1.69354476	2.292	1.65823838
7/30/2009 13:57	-4.202	-0.6685	-1.797828	-1.86880932	2.43525	1.83331866
7/30/2009 13:57	-4.202	-0.764	-1.796542	-1.87288524	2.483	1.83471362
7/30/2009 13:57	-4.584	-0.764	-1.88399	-1.99312488	2.674	1.93855744
7/30/2009 13:57	-4.8705	-0.764	-1.971438	-2.11132656	2.81725	2.04138228
7/30/2009 13:57	-4.8705	-0.764	-2.058886	-2.1500478	2.81725	2.1044669
7/30/2009 13:57	-5.157	-0.8595	-2.232496	-2.3640336	3.00825	2.2982648
7/30/2009 13:57	-5.4435	-0.955	-2.319944	-2.41090668	3.19925	2.36542534
7/30/2009 13:57	-5.73	-0.955	-2.406106	-2.54948796	3.3425	2.47779698
7/30/2009 13:58	-5.921	-0.955	-2.493554	-2.59432308	3.438	2.54393854
7/30/2009 13:58	-6.0165	-1.0505	-2.579716	-2.67584148	3.5335	2.62777874
7/30/2009 13:58	-6.2075	-1.146	-2.667164	-2.76958764	3.67675	2.71837582
7/30/2009 13:58	-6.3985	-1.146	-2.665878	-2.82053664	3.77225	2.74320732
7/30/2009 13:58	-6.494	-1.146	-2.753326	-2.89797912	3.82	2.82565256
7/30/2009 13:58	-6.494	-1.146	-2.753326	-2.90205504	3.82	2.82769052
7/30/2009 13:58	-6.5895	-1.2415	-2.839488	-2.9652318	3.9155	2.9023599
7/30/2009 13:58	-6.876	-1.2415	-2.92565	-3.07324368	4.05875	2.99944684
7/30/2009 13:58	-6.9715	-1.337	-3.013098	-3.15680004	4.15425	3.08494902
7/30/2009 13:58	-7.1625	-1.337	-3.09926	-3.24850824	4.24975	3.17388412

7/30/2009 13:58	-7.5445	-1.528	-3.271584	-3.3830136	4.53625	3.3272988
7/30/2009 13:58	-7.64	-1.528	-3.357746	-3.5052912	4.584	3.4315186
7/30/2009 13:58	-7.831	-1.719	-3.443908	-3.60107532	4.775	3.52249166
7/30/2009 13:58	-8.213	-1.91	-3.616232	-3.78449172	5.0615	3.70036186
7/30/2009 13:58	-8.213	-1.91	-3.701108	-3.88842768	5.0615	3.79476784
7/30/2009 13:58	-8.3085	-2.101	-3.78727	-3.95160444	5.20475	3.86943722
7/30/2009 13:58	-8.6905	-2.1965	-3.959594	-4.1166792	5.4435	4.0381366
7/30/2009 13:58	-9.0725	-2.3875	-4.130632	-4.2899058	5.73	4.2102689
7/30/2009 13:58	-9.0725	-2.3875	-4.216151	-4.42848708	5.73	4.32231904
7/30/2009 13:58	-9.359	-2.483	-4.302313	-4.47943608	5.921	4.39087454
7/30/2009 13:58	-9.6455	-2.674	-4.473351	-4.6261692	6.15975	4.5497601
7/30/2009 13:58	-9.932	-2.7695	-4.645032	-4.80143376	6.35075	4.72323288
7/30/2009 13:58	-9.932	-2.865	-4.645675	-4.84626888	6.3985	4.74597194
7/30/2009 13:58	-10.219	-3.056	-4.816713	-5.00930568	6.63725	4.91300934
7/30/2009 13:58	-10.601	-3.247	-4.988394	-5.19068412	6.92375	5.08953906
7/30/2009 13:58	-10.696	-3.3425	-5.160075	-5.37817644	7.01925	5.26912572
7/30/2009 13:58	-10.887	-3.438	-5.159432	-5.4209736	7.1625	5.2902028
7/30/2009 13:58	-11.078	-3.5335	-5.331113	-5.56566876	7.30575	5.44839088
7/30/2009 13:58	-11.46	-3.7245	-5.502151	-5.75316108	7.59225	5.62765604
7/30/2009 13:58	-11.747	-3.82	-5.673189	-5.89174236	7.78325	5.78246568
7/30/2009 13:58	-11.46	-3.82	-5.673189	-5.90804604	7.64	5.79061752
7/30/2009 13:58	-11.747	-4.011	-5.844227	-6.04866528	7.87875	5.94644614
7/30/2009 13:58	-11.747	-4.1065	-5.929746	-6.18928452	7.9265	6.05951526
7/30/2009 13:58	-11.842	-4.202	-5.929746	-6.20762616	8.022	6.06868608
7/30/2009 13:58	-12.033	-4.2975	-6.099498	-6.32582784	8.16525	6.21266292
7/30/2009 13:58	-12.224	-4.393	-6.184374	-6.4603332	8.3085	6.3223536
7/30/2009 13:58	-12.129	-4.393	-6.214595	-6.50924424	8.26075	6.36191962
7/30/2009 13:58	-12.415	-4.393	-6.270536	-6.61521816	8.404	6.44287708
7/30/2009 13:58	-12.606	-4.393	-6.440931	-6.73138188	8.4995	6.58615644
7/30/2009 13:58	-12.702	-4.4885	-6.527093	-6.82920396	8.595	6.67814848
7/30/2009 13:58	-12.893	-4.584	-6.697488	-6.96167136	8.73825	6.82957968
7/30/2009 13:58	-12.893	-4.584	-6.698131	-6.9698232	8.73825	6.8339771
7/30/2009 13:58	-13.275	-4.775	-6.869169	-7.1634294	9.02475	7.0162992
7/30/2009 13:58	-13.37	-4.775	-7.039564	-7.3060866	9.0725	7.1728253
7/30/2009 13:58	-13.37	-4.8705	-7.046637	-7.38964296	9.12025	7.21813998
7/30/2009 13:58	-13.561	-4.966	-7.210602	-7.489503	9.2635	7.3500525
7/30/2009 13:58	-13.848	-5.0615	-7.296121	-7.6117806	9.4545	7.4539508
7/30/2009 13:58	-14.039	-5.0615	-7.466516	-7.77889332	9.55	7.62270466
7/30/2009 13:58	-14.039	-5.2525	-7.552035	-7.89505704	9.6455	7.72354602

7/30/2009 13:58	-14.039	-5.348	-7.72243	-8.02548648	9.69325	7.87395824
7/30/2009 13:58	-14.23	-5.348	-7.807949	-8.100891	9.78875	7.95442
7/30/2009 13:58	-14.325	-5.4435	-7.893468	-8.25985188	9.88425	8.07665994
7/30/2009 13:58	-14.516	-5.539	-7.978987	-8.36174988	10.0275	8.17036844
7/30/2009 13:58	-14.516	-5.539	-8.065149	-8.44530624	10.0275	8.25522762
7/30/2009 13:58	-14.612	-5.4435	-8.150025	-8.51663484	10.0275	8.33332992
7/30/2009 13:58	-14.898	-5.6345	-8.32042	-8.69393736	10.26625	8.50717868
7/30/2009 13:58	-15.089	-5.73	-8.491458	-8.8753158	10.4095	8.6833869
7/30/2009 13:59	-15.089	-5.539	-8.576334	-8.94256848	10.314	8.75945124
7/30/2009 13:59	-15.28	-5.6345	-8.663782	-9.05261832	10.45725	8.85820016
7/30/2009 13:59	-15.567	-5.73	-8.834177	-9.24011064	10.64825	9.03714382
7/30/2009 13:59	-15.567	-5.6345	-8.919696	-9.29105964	10.6005	9.10537782
7/30/2009 13:59	-15.758	-5.73	-9.004572	-9.40722336	10.74375	9.20589768
7/30/2009 13:59	-16.044	-5.73	-9.176253	-9.5478426	10.887	9.3620478
7/30/2009 13:59	-15.949	-5.8255	-9.176253	-9.56414628	10.887	9.37019964
7/30/2009 13:59	-16.235	-5.8255	-9.347291	-9.71699328	11.03025	9.53214214
7/30/2009 13:59	-16.044	-5.73	-9.346648	-9.74348676	10.887	9.54506738
7/30/2009 13:59	-16.331	-5.8255	-9.432167	-9.84946068	11.078	9.64081384
7/30/2009 13:59	-16.235	-5.921	-9.432167	-9.89225784	11.078	9.66221242
7/30/2009 13:59	-16.426	-6.0165	-9.602562	-10.04102892	11.22125	9.82179546
7/30/2009 13:59	-16.522	-6.0165	-9.772957	-10.19591388	11.269	9.98443544
7/30/2009 13:59	-16.426	-6.2075	-9.772957	-10.21833144	11.31675	9.99564422
7/30/2009 13:59	-16.617	-6.2075	-9.943995	-10.35691272	11.41225	10.15045386
7/30/2009 13:59	-16.617	-6.2075	-10.029514	-10.45881072	11.41225	10.24416236
7/30/2009 13:59	-16.808	-6.2075	-10.11439	-10.54440504	11.50775	10.32939752
7/30/2009 13:59	-17.095	-6.112	-10.284785	-10.75839084	11.60325	10.52158792
7/30/2009 13:59	-17.381	-6.112	-10.455823	-10.95199704	11.7465	10.70391002
7/30/2009 13:59	-17.381	-6.112	-10.540699	-11.05797096	11.7465	10.79933498
7/30/2009 13:59	-17.572	-6.2075	-10.711094	-11.21081796	11.88975	10.96095598
7/30/2009 13:59	-17.859	-6.303	-10.966365	-11.45741112	12.08075	11.21188806
7/30/2009 13:59	-17.954	-6.3985	-11.137403	-11.6877006	12.17625	11.4125518
7/30/2009 13:59	-17.763	-6.5895	-11.307798	-11.76514308	12.17625	11.53647054
7/30/2009 13:59	-18.241	-6.685	-11.648588	-12.14420364	12.46275	11.89639582
7/30/2009 13:59	-18.623	-6.7805	-11.904502	-12.51715032	12.7015	12.21082616
7/30/2009 13:59	-18.527	-6.5895	-12.074897	-12.6149724	12.55825	12.3449347
7/30/2009 13:59	-19.005	-6.685	-12.415687	-12.98588112	12.84475	12.70078406
7/30/2009 13:59	-19.387	-6.685	-12.756477	-13.39551108	13.03575	13.07599404
7/30/2009 13:59	-19.578	-6.5895	-12.926872	-13.5065799	13.0835	13.21672595
7/30/2009 13:59	-19.96	-6.5895	-13.267662	-13.8326535	13.2745	13.55015775

7/30/2009 13:59	-19.578	-6.7805	-13.353824	-13.99263336	13.179	13.67322868
7/30/2009 13:59	-19.864	-6.876	-13.609095	-14.17604976	13.37	13.89257238
7/30/2009 13:59	-19.864	-6.7805	-13.609738	-14.19541038	13.32225	13.90257419
7/30/2009 13:59	-19.96	-6.7805	-13.77949	-14.32583982	13.37	14.05266491
7/30/2009 13:59	-20.055	-6.7805	-13.780133	-14.35131432	13.41775	14.06572366
7/30/2009 13:59	-20.437	-6.685	-13.950528	-14.53269276	13.561	14.24161038
7/30/2009 13:59	-20.342	-6.685	-13.950528	-14.55307236	13.51325	14.25180018
7/30/2009 13:59	-20.724	-6.5895	-14.205799	-14.80883634	13.6565	14.50731767
7/30/2009 13:59	-20.724	-6.494	-14.206442	-14.82514002	13.60875	14.51579101
7/30/2009 13:59	-20.628	-6.494	-14.206442	-14.83431084	13.561	14.52037642
7/30/2009 13:59	-21.01	-6.5895	-14.462356	-15.06969522	13.79975	14.76602561
7/30/2009 13:59	-20.724	-6.685	-14.461713	-15.11453034	13.70425	14.78812167
7/30/2009 13:59	-20.628	-6.685	-14.547232	-15.23171304	13.6565	14.88947252
7/30/2009 13:59	-20.915	-6.7805	-14.633394	-15.27145326	13.8475	14.95242363
7/30/2009 13:59	-21.201	-6.685	-14.889308	-15.51804642	13.943	15.20367721
7/30/2009 13:59	-21.201	-6.5895	-14.976113	-15.7228614	13.89525	15.3494872
7/30/2009 13:59	-21.488	-6.5895	-15.144579	-15.78603816	14.0385	15.46530858
7/30/2009 13:59	-21.965	-6.494	-15.401136	-16.07644746	14.2295	15.73879173
7/30/2009 13:59	-21.965	-6.3985	-15.572174	-16.25578794	14.18175	15.91398097
7/30/2009 13:59	-22.156	-6.3985	-15.65705	-16.30979388	14.27725	15.98342194
7/30/2009 13:59	-22.443	-6.303	-15.913607	-16.5788046	14.37275	16.2462058
7/30/2009 13:59	-22.729	-6.2075	-16.084002	-16.77648672	14.46825	16.43024436
7/30/2009 13:59	-22.825	-5.921	-16.169521	-16.95378924	14.37275	16.56165512
7/30/2009 13:59	-23.111	-5.921	-16.340559	-17.02002294	14.516	16.68029097
7/30/2009 13:59	-23.589	-5.6345	-16.597116	-17.30941326	14.6115	16.95326463
7/30/2009 13:59	-23.78	-5.6345	-16.809949	-17.53256988	14.707	17.17125944
7/30/2009 13:59	-24.066	-5.539	-17.022782	-17.75470752	14.8025	17.38874476
7/30/2009 13:59	-23.971	-5.539	-17.108301	-17.883099	14.75475	17.4957
7/30/2009 13:59	-23.971	-5.539	-17.19382	-17.95238964	14.75475	17.57310482
7/30/2009 13:59	-24.353	-5.4435	-17.450377	-18.16637544	14.898	17.80837622
7/30/2009 13:59	-24.353	-5.4435	-17.449734	-18.19083096	14.898	17.82028248
7/30/2009 13:59	-24.544	-5.348	-17.619486	-18.38443716	14.94575	18.00196158
7/30/2009 13:59	-24.639	-5.348	-17.704362	-18.51079068	14.9935	18.10757634
7/30/2009 13:59	-24.735	-5.348	-17.874757	-18.6218595	15.04125	18.24830825
7/30/2009 13:59	-24.83	-5.157	-17.876043	-18.65140992	14.9935	18.26372646
7/30/2009 13:59	-25.117	-5.157	-18.044509	-18.85418694	15.13675	18.44934797
7/30/2009 13:59	-25.403	-5.0615	-18.215547	-19.03250844	15.23225	18.62402772
7/30/2009 13:59	-25.403	-4.966	-18.302352	-19.08447642	15.1845	18.69341421
7/30/2009 13:59	-25.69	-4.8705	-18.47339	-19.24751322	15.28	18.86045161

7/30/2009 14:00	-25.881	-4.6795	-18.726732	-19.4981823	15.28	19.11245715
7/30/2009 14:00	-26.358	-4.393	-18.89777	-19.72031994	15.3755	19.30904497
7/30/2009 14:00	-26.454	-4.2975	-18.983289	-19.83138876	15.3755	19.40733888
7/30/2009 14:00	-26.836	-4.202	-19.153684	-19.9923876	15.51875	19.5730358
7/30/2009 14:00	-27.313	-3.82	-19.580636	-20.42239716	15.5665	20.00151658
7/30/2009 14:00	-27.504	-3.7245	-19.579993	-20.46417534	15.61425	20.02208417
7/30/2009 14:00	-27.791	-3.5335	-19.921426	-20.72707218	15.662	20.32424909
7/30/2009 14:00	-28.173	-3.438	-20.17734	-21.01748148	15.80525	20.59741074
7/30/2009 14:00	-28.268	-3.3425	-20.347735	-21.24369504	15.80525	20.79571502
7/30/2009 14:00	-28.459	-3.056	-20.518773	-21.35170692	15.7575	20.93523996
7/30/2009 14:00	-28.841	-2.9605	-20.687882	-21.5616168	15.90075	21.1247494
7/30/2009 14:00	-28.841	-2.865	-20.687882	-21.65740092	15.853	21.17264146
7/30/2009 14:00	-29.128	-2.674	-20.943153	-21.77967852	15.90075	21.36141576
7/30/2009 14:00	-29.605	-2.5785	-21.284586	-22.19236542	16.09175	21.73847571
7/30/2009 14:00	-29.605	-2.3875	-21.369462	-22.2290487	15.99625	21.79925535
7/30/2009 14:00	-29.987	-2.292	-21.539857	-22.40533224	16.1395	21.97259462
7/30/2009 14:00	-32.088	-0.6685	-22.393761	-23.36419242	16.37825	22.87897671
7/30/2009 14:00	-32.184	-0.382	-22.393118	-23.42329326	16.28275	22.90820563
7/30/2009 14:00	-32.852	-0.0955	-22.82007	-23.78706912	16.47375	23.30356956
7/30/2009 14:00	-33.043	0.0955	-23.075984	-24.05098494	16.47375	23.56348447
7/30/2009 14:00	-33.234	0.4775	-23.076627	-24.14371212	16.37825	23.61016956
7/30/2009 14:00	-33.807	0.6685	-23.332541	-24.36788772	16.56925	23.85021436
7/30/2009 14:00	-34.285	1.0505	-23.627678	-24.66237294	16.617	24.14502547
7/30/2009 14:00	-34.189	1.146	-23.673331	-24.6847905	16.5215	24.17906075
7/30/2009 14:00	-34.858	1.6235	-24.014764	-25.03022472	16.617	24.52249436
7/30/2009 14:00	-35.24	2.0055	-24.271321	-25.3471275	16.617	24.80922425
7/30/2009 14:00	-35.717	2.292	-24.354911	-25.5407337	16.7125	24.94782235
7/30/2009 14:00	-36.29	2.7695	-24.614683	-25.70173254	16.76025	25.15820777
7/30/2009 14:00	-36.959	3.247	-24.983122	-26.09403984	16.85575	25.53858092
7/30/2009 14:00	-37.723	3.82	-25.298835	-26.44864488	16.95125	25.87373994
7/30/2009 14:00	-37.723	3.9155	-25.382425	-26.5036698	16.9035	25.9430474
7/30/2009 14:00	-38.487	4.4885	-25.727073	-26.88273036	16.999	26.30490168
7/30/2009 14:00	-38.391	4.584	-25.811949	-26.90209098	16.9035	26.35701999
7/30/2009 14:00	-39.346	5.157	-25.898111	-27.26179092	17.0945	26.57995096
7/30/2009 14:00	-39.251	5.348	-25.897468	-27.45539712	16.95125	26.67643256
7/30/2009 14:00	-40.11	5.921	-25.897468	-27.69689538	17.0945	26.79718169
7/30/2009 14:00	-40.301	6.303	-25.897468	-28.03519674	16.999	26.96633237
7/30/2009 14:00	-40.874	6.685	-25.897468	-28.1340378	17.0945	27.0157529
7/30/2009 14:00	-41.829	7.7355	-25.897468	-28.53144	17.04675	27.214454

7/30/2009 14:00	-42.88	8.8815	-25.896825	-28.91559546	16.999	27.40621023
7/30/2009 14:00	-42.975	8.977	-25.897468	-29.0154555	16.999	27.45646175
7/30/2009 14:00	-43.835	9.741	-25.897468	-29.37311748	17.04675	27.63529274
7/30/2009 14:00	-43.835	9.8365	-25.897468	-29.40368688	16.999	27.65057744
7/30/2009 14:00	-44.599	10.41	-25.897468	-29.6625078	17.0945	27.7799879
7/30/2009 14:00	-45.267	11.174	-25.897468	-30.00284712	17.04675	27.95015756
7/30/2009 14:00	-45.267	11.269	-25.897468	-30.05073918	16.999	27.97410359
7/30/2009 14:00	-46.127	12.224	-25.896825	-30.43387566	16.95125	28.16535033
7/30/2009 14:00	-46.986	12.797	-25.896825	-30.79459458	17.0945	28.34570979
7/30/2009 14:00	-46.795	12.797	-25.897468	-30.8292399	16.999	28.36335395
7/30/2009 14:00	-47.368	13.179	-25.896825	-31.17467412	17.0945	28.53574956
7/30/2009 14:00	-48.228	13.943	-25.896825	-31.60264572	17.14225	28.74973536
7/30/2009 14:00	-48.037	13.943	-25.896825	-31.65053778	17.04675	28.77368139
7/30/2009 14:00	-48.61	14.421	-25.896825	-31.96642158	17.0945	28.93162329
7/30/2009 14:00	-49.278	14.994	-25.897468	-32.34140622	17.14225	29.11943711
7/30/2009 14:00	-49.183	15.28	-25.896825	-32.83051662	16.95125	29.36367081
7/30/2009 14:00	-49.947	16.14	-25.896825	-32.90999706	16.9035	29.40341103
7/30/2009 14:00	-50.615	16.522	-25.896825	-33.28956711	17.04675	29.59319606
7/30/2009 14:00	-50.52	16.713	-25.897468	-33.64824807	16.9035	29.77285804
7/30/2009 14:00	-51.188	17.19	-25.896825	-33.7995666	16.999	29.8481958
7/30/2009 14:00	-51.666	17.763	-25.896825	-34.18219359	16.95125	30.0395093
7/30/2009 14:00	-51.475	17.763	-25.896825	-34.33045518	16.85575	30.11364009
7/30/2009 14:00	-52.048	18.05	-25.897468	-34.53577965	16.999	30.21662383
7/30/2009 14:00	-52.812	18.814	-25.896825	-35.09163324	16.999	30.49422912
7/30/2009 14:00	-52.621	19.291	-25.896825	-35.74225197	16.66475	30.81953849
7/30/2009 14:00	-52.907	19.578	-25.896825	-35.80237179	16.66475	30.8495984
7/30/2009 14:00	-52.812	19.769	-25.896825	-36.15239142	16.5215	31.02460821
7/30/2009 14:00	-53.289	19.864	-25.896825	-36.20894481	16.7125	31.05288491
7/30/2009 14:01	-54.053	20.437	-25.897468	-36.70315011	16.808	31.30030906
7/30/2009 14:01	-53.862	20.342	-25.896825	-36.79485831	16.76025	31.34584166
7/30/2009 14:01	-54.149	20.724	-25.896825	-37.23811461	16.7125	31.56746981
7/30/2009 14:01	-54.722	21.01	-25.896825	-37.8092529	16.85575	31.85303895
7/30/2009 14:01	-54.435	21.201	-25.896825	-38.36204955	16.617	32.12943728
7/30/2009 14:01	-54.626	21.297	-25.896825	-38.82160953	16.66475	32.35921727
7/30/2009 14:01	-55.104	21.392	-25.896825	-38.93879223	16.85575	32.41780862
7/30/2009 14:01	-55.677	21.965	-25.896825	-39.51910134	16.85575	32.70796317
7/30/2009 14:01	-55.486	21.965	-25.896825	-39.96592407	16.76025	32.93137454
7/30/2009 14:01	-55.677	22.347	-25.896825	-40.17990987	16.66475	33.03836744
7/30/2009 14:01	-56.25	22.825	-25.896825	-40.75869051	16.7125	33.32775776

7/30/2009 14:01	-56.25	23.111	-25.896825	-41.30995869	16.56925	33.60339185
7/30/2009 14:01	-56.441	23.493	-25.897468	-41.99624172	16.47375	33.94685486
7/30/2009 14:01	-56.632	23.398	-25.896825	-42.03139653	16.617	33.96411077
7/30/2009 14:01	-57.205	23.78	-25.896825	-42.57553185	16.7125	34.23617843
7/30/2009 14:01	-57.109	23.78	-25.896825	-42.60202533	16.66475	34.24942517
7/30/2009 14:01	-57.014	23.78	-25.896825	-42.62546187	16.617	34.26114344
7/30/2009 14:01	-56.918	23.971	-25.896825	-43.10336349	16.47375	34.50009425
7/30/2009 14:01	-56.918	24.066	-25.896825	-43.47529119	16.426	34.6860581
7/30/2009 14:01	-57.491	24.162	-25.896825	-43.56292347	16.66475	34.72987424
7/30/2009 14:01	-57.396	24.162	-25.897468	-43.57464174	16.617	34.73605487
7/30/2009 14:01	-57.3	24.162	-25.896825	-43.58330307	16.56925	34.74006404
7/30/2009 14:01	-56.918	24.257	-25.896825	-44.00159436	16.3305	34.94920968
7/30/2009 14:01	-57.014	24.162	-25.896825	-44.01382212	16.426	34.95532356
7/30/2009 14:01	-57.396	24.448	-25.895539	-44.19927648	16.47375	35.04740774
7/30/2009 14:01	-57.682	24.544	-25.896182	-44.52025518	16.56925	35.20821859
7/30/2009 14:01	-57.396	24.544	-25.896825	-45.03942549	16.426	35.46812525
7/30/2009 14:01	-57.491	24.639	-25.894896	-45.06846642	16.426	35.48168121
7/30/2009 14:01	-57.778	24.735	-25.896825	-45.34613847	16.5215	35.62148174
7/30/2009 14:01	-58.16	25.021	-25.894896	-45.67679748	16.56925	35.78584674
7/30/2009 14:01	-57.396	24.83	-25.895539	-46.24436934	16.28275	36.06995417
7/30/2009 14:01	-57.587	24.83	-25.896825	-46.26627741	16.37825	36.08155121
7/30/2009 14:01	-58.351	25.212	-25.895539	-46.74316005	16.56925	36.31934953
7/30/2009 14:01	-58.255	25.308	-25.894896	-47.14769511	16.47375	36.52129556
7/30/2009 14:01	-58.16	25.308	-25.894896	-47.16145134	16.426	36.52817367
7/30/2009 14:01	-58.637	25.499	-25.894896	-47.49822423	16.56925	36.69656012
7/30/2009 14:01	-58.637	25.499	-25.894896	-47.51401842	16.56925	36.70445721
7/30/2009 14:01	-59.019	25.69	-25.894896	-47.93740461	16.66475	36.91615031
7/30/2009 14:01	-58.16	25.308	-25.895539	-48.48561585	16.426	37.19057743
7/30/2009 14:01	-58.064	25.403	-25.894896	-48.70316808	16.3305	37.29903204
7/30/2009 14:01	-58.637	25.594	-25.894896	-48.83359752	16.5215	37.36424676
7/30/2009 14:01	-59.115	25.881	-25.894896	-49.36041018	16.617	37.62765309
7/30/2009 14:01	-58.924	25.785	-25.894896	-49.37722335	16.56925	37.63605968
7/30/2009 14:01	-58.924	25.785	-25.894896	-49.38945111	16.56925	37.64217356
7/30/2009 14:01	-58.542	25.69	-25.894896	-49.87601406	16.426	37.88545503
7/30/2009 14:01	-58.542	25.881	-25.894896	-50.16744234	16.3305	38.03116917
7/30/2009 14:01	-59.115	26.072	-25.894896	-50.36155803	16.5215	38.12822702
7/30/2009 14:01	-58.542	26.263	-25.894896	-51.02185707	16.1395	38.45837654
7/30/2009 14:01	-58.351	26.263	-25.894896	-51.06923964	16.044	38.48206782
7/30/2009 14:01	-58.542	26.263	-25.894896	-51.20527347	16.1395	38.55008474

7/30/2009 14:01	-58.446	26.263	-25.894896	-51.25876992	16.09175	38.57683296
7/30/2009 14:01	-58.064	25.976	-25.894896	-51.82685127	16.044	38.86087364
7/30/2009 14:01	-57.873	25.976	-25.894896	-51.89410395	15.9485	38.89449998
7/30/2009 14:01	-58.924	26.358	-25.895539	-52.42397355	16.28275	39.15975628
7/30/2009 14:01	-58.637	26.263	-25.894896	-52.45607142	16.18725	39.17548371
7/30/2009 14:01	-58.542	26.167	-25.894896	-52.47950796	16.18725	39.18720198
7/30/2009 14:01	-58.446	26.167	-25.895539	-52.59261474	16.1395	39.24407687
7/30/2009 14:01	-58.637	26.263	-25.895539	-52.64305425	16.18725	39.26929663
7/30/2009 14:01	-58.255	26.072	-25.894896	-53.07153534	16.09175	39.48321567
7/30/2009 14:01	-58.828	26.358	-25.894896	-53.36703954	16.235	39.63096777
7/30/2009 14:01	-58.637	26.263	-25.894896	-53.46027621	16.18725	39.67758611
7/30/2009 14:01	-59.019	26.454	-25.894896	-53.72113509	16.28275	39.80801555
7/30/2009 14:01	-59.306	26.549	-25.895539	-53.7817644	16.37825	39.8386517
7/30/2009 14:01	-59.401	26.072	-25.894896	-53.78482134	16.66475	39.83985867
7/30/2009 14:01	-58.446	26.167	-25.894896	-53.78482134	16.1395	39.83985867
7/30/2009 14:01	-59.306	26.454	-25.894896	-53.78533083	16.426	39.84011342
7/30/2009 14:01	-59.497	26.645	-25.894896	-53.78584032	16.426	39.84036816
7/30/2009 14:01	-59.592	26.645	-25.894896	-53.78584032	16.47375	39.84036816
7/30/2009 14:01	-59.401	26.549	-25.894896	-53.78634981	16.426	39.84062291
7/30/2009 14:01	-60.07	26.74	-25.896825	-53.78634981	16.66475	39.84158741
7/30/2009 14:01	-59.783	26.645	-25.895539	-53.78787828	16.56925	39.84170864
7/30/2009 14:01	-59.306	26.263	-25.894896	-53.7868593	16.5215	39.84087765
7/30/2009 14:01	-59.115	26.263	-25.896825	-53.78736879	16.426	39.8420969
7/30/2009 14:02	-59.688	26.645	-25.896825	-53.78736879	16.5215	39.8420969
7/30/2009 14:02	-59.592	26.549	-25.896825	-53.78838777	16.5215	39.84260639
7/30/2009 14:02	-58.924	26.167	-25.896825	-53.78787828	16.37825	39.84235164
7/30/2009 14:02	-59.401	26.358	-25.896825	-53.78838777	16.5215	39.84260639
7/30/2009 14:02	-59.21	26.263	-25.896825	-53.78736879	16.47375	39.8420969
7/30/2009 14:02	-59.21	26.263	-25.897468	-53.78838777	16.47375	39.84292789
7/30/2009 14:02	-58.542	25.881	-25.895539	-53.78940675	16.3305	39.84247288
7/30/2009 14:02	-58.542	25.881	-25.896182	-53.78991624	16.3305	39.84304912
7/30/2009 14:02	-58.446	25.976	-25.896825	-53.78940675	16.235	39.84311588

## ANEXO C



## ➤ Inicio

## ➤ Historia

## ➤ Mavinews

## ➤ Nuestros productos

➤ Adoquines de Hormigón

➤ Bloques de Hormigón

➤ Bolardos

➤ Bordillos

➤ Camaras de Hormigón y Cajas Domociliarias

➤ Columnas Prefabricados

➤ Ductos de Hormigón Armado

➤ Escaleras Prefabricadas

➤ Estribos de Hormigón Armado

➤ Letreros Prefabricados

➤ Loseta de Hormigón Pretensado

➤ Pilaretes para Cerramientos

➤ Pilotes de Hormigón Pretensado

➤ Postes de Alumbrados y Teléfonos

➤ Sumideros

➤ Tapas AA.SS-AA.LL

➤ Tuberías de Hormigón

➤ Vigas de Hormigón Pretensado

➤ Viguetas Pretensadas

## ➤ Proyectos realizados

## ➤ Proyectos en ejecución

## ➤ Obras

## ➤ Calidad

## ➤ Pedidos en línea

## ➤ Contáctenos

## ➤ Artículos varios

## VIGUETAS PRETENSADAS

Las viguetas R- 10, R- 14 Y R- 17 son elementos prefabricados de hormigón pretensado de sección trapezoidal. Las viguetas son autoportantes y son unidas mediante una capa de compresión que se funde en sitio, que es de 5 cms de espesor.

Las dimensiones y pesos por metro lineal de estas viguetas se muestran en las Figuras 1, 2 Y 3; sinembargo, se menciona que MAVISA S.A. puede diseñar otro tipo de viguetas con el fin de satisfacer las necesidades y exigencias del constructor, tanto en secciones como en longitud y espaciamiento.

Las viguetas pueden ser utilizadas en cualquier tipo de losas y pueden apoyarse sobre elementos tales como vigas fundidas en sitio o prefabricadas, o metálicas. Las viguetas son construídas con hormigones de alta resistencia ( $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ ) y aceros de baja relajación de Grado 270k

**Datos técnicos:****Estructura:**

Hormigón pretensado.-

**Resistencia:** $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ .**Medidas:**

- Tipo R10: 10x10-hasta 3.10 metros de longitud.
- Tipo R14: 10x40-hasta 4.40 metros de longitud.
- Tipo R17: 11x17-hasta 5.20 metros de longitud.
- Tipo R17R: 11x17-hasta 6.00 metros de longitud.
- Tipo R19: 11x19-hasta 7.00 metros de longitud.
- Tipo R19R: 11x19-hasta 8.00 metros de longitud

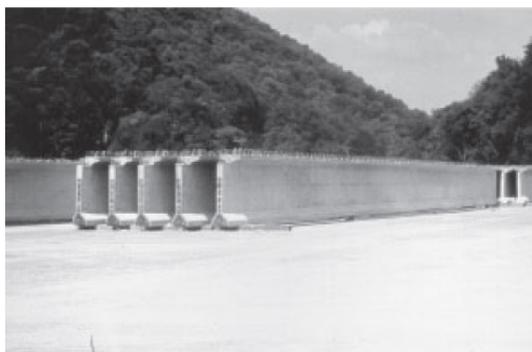


## ANEXO D



# GLENIUM™ 3000 NS

Aditivo reductor de agua de alto rango



## DESCRIPCION

GLENIUM 3000 NS es aditivo reductor de agua de alto rango listo para usarse es una nueva generación de aditivos basados en la tecnología del policarboxilato. GLENIUM 3000 NS es un aditivo muy efectivo produciendo concreto con diferentes niveles de trabajabilidad, incluyendo aplicaciones que requieran el uso de concreto autocompactante o concreto RHEODYNAMIC™. GLENIUM 3000 NS cumple la norma ASTM C 494 para requerimientos Tipo A, reductores de agua, y Tipo F, aditivos reductores de agua de alto rango.

## RECOMENDADA PARA

- Concreto con características de fraguado rápido, mejor apariencia superficial y desarrollo de resistencias acelerado
- Concreto donde el control de trabajabilidad y el tiempo de fraguado son críticos
- Concreto donde sea necesaria una reducción de agua de alto rango (12 a 40%)
- Concreto donde se requieran altas resistencias tempranas y últimas y un incremento en la durabilidad
- Producción de mezclas de concreto autocompactante y de concreto RHEODYNAMIC. El concreto RHEODYNAMIC es producido usando el aditivo reductor de agua de alto rango GLENIUM que promueve la fluidez, y del RHEOMAC® VMA aditivo modificador de viscosidad, lo que otorga estabilidad a la mezcla de concreto.

## CARACTERISTICAS/BENEFICIOS

- Reducción de agua
- Proporciona una reducción de agua lineal dentro del rango de dosificación recomendado
- Produce una mezcla de concreto cohesiva que no segrega
- Tiempos de fraguado y desarrollo de resistencias más rápidos
- Incremento en el desarrollo de resistencias a compresión y a flexión a todas las edades
- Resulta en menores costos de producción debido al rápido vaciado, mejor acabado, y reducción de costos de curado

## DATOS TECNICOS

### Diseño de Mezcla

390 Kg de cemento Tipo III por metro cúbico (658 lb/yard<sup>3</sup>), asentamiento de 15 mm (6 in.); Contenido de aire, 5-6%; temperatura del concreto, 18 °C (65 °F); temperatura de curado, 18 °C (65 °F).

### Desempeño de Resistencias a Compresión

	8 h		12 h	
	MPa	psi	MPa	psi
Superplastificante				
Convencional	2.7	390	21.2	3090
GLENIUM 3000 NS	8.5	1230	28.2	4100

### Diseño de Mezcla

390 Kg de cemento Tipo III por metro cúbico (658 lb/yard<sup>3</sup>), asentamiento de 200 a 225 mm (8-9 in.); sin aire incluido; temperatura del concreto, 21 °C (70 °F); rango de dosificación de los aditivos se ajusta para obtener 30% de reducción de agua.

### Desempeño de tiempos de fraguado

Mezcla	Tiempo de fraguado inicial		Diferencia H:min
	H:min		
Concreto Normal	3:58		-
Superplastificante			
Convencional	7:15		+3:17
GLENIUM 3000 NS	4:42		+0:44

*Nota: Los datos mostrados se basan en pruebas de laboratorio controladas. Se podrán encontrar variaciones razonables de los resultados mostrados como resultado de diferencias en los materiales del concreto y las condiciones de la obra.*

## CANTIDAD A USAR

El rango de dosificación recomendada del aditivo reductor de agua de alto rango GLENIUM 3000 NS es de 260 a 780 mL por 100 Kg de cemento (4 a 12 fl oz por 100 lb) para la mayoría de las mezclas. El rango de dosificación se aplica a la mayoría de las mezclas que utilizan ingredientes promedio. Sin embargo, las variaciones en las condiciones de la obra y materiales del concreto, como microsilíce, pueden requerir dosificaciones fuera del rango recomendado. En esos casos, contacte a su representante local MBT.

*Nota: No use GLENIUM 3000 NS con aditivos conteniendo naftaleno.*

## ANEXO D



### ENDURECIMIENTO

GLENIUM 3000 NS está formulado para producir concreto con características de fraguado de normales a aceleradas dentro del rango de dosificación recomendado proporciona una retención mejorada de trabajabilidad.

El tiempo de fraguado del concreto está influenciado por la composición química y física de los ingredientes básicos del concreto, la temperatura del concreto, y las condiciones climáticas. Se deberán hacer mezclas de prueba para determinar la dosificación requerida para el tiempo de fraguado especificado y los requisitos de resistencia proporcionados

### INSTRUCCIONES DE USO

A diferencia de los superplastificantes convencionales, el aditivo GLENIUM 3000 NS puede añadirse en el agua de mezcla inicial o con el agua de mezcla final.

*Nota: Contacte a su representante local MBT para obtener instrucciones para la evaluación adecuada del aditivo GLENIUM 3000 NS en aplicaciones específicas.*

### EMPAQUE

El aditivo GLENIUM 3000 NS se suministra en tambores de 208 litros (55 gal), bolsas de 1040 L (275 gal), y a granel.

### PRECAUCION DE TEMPERATURA

Si el aditivo GLENIUM 3000 NS se congela, descongele a 7°C (45°F) o más y reconstituya completamente agitando mecánicamente. No agite con aire a presión.

### SIN CLORURO, NO CORROSIVO

El aditivo GLENIUM 3000 NS no iniciará ni promoverá la corrosión del acero de refuerzo del concreto, concreto presforzado o concreto vaciado sobre un piso de acero galvanizado ni sistema de techos. No se ha utilizado cloruro de calcio ni otros ingredientes con base cloruros en la fabricación del aditivo GLENIUM 3000 NS. El aditivo GLENIUM 3000 NS cumple con los estándares y prácticas más estrictos de la industria de la construcción, para todas las aplicaciones de concreto.

Para mayores informaciones consulte la hoja de seguridad del producto.

---

Para mayor información sobre GLENIUM 3000 NS contacte a su representante MBT

---

**MBT Latin America**  
23700 Chagrin Blvd  
Cleveland, OH 44122  
Tel: (216) 831-5500  
Fax: (216) 831-0342

**MBT Argentina**  
España 1651  
Ruta Panamericana Km 47.5  
Buenos Aires (1625), Argentina  
Tel. 54-34-8843-3000  
Fax. 54-34-8843-2828

**MBT Brasil**  
Av. Firestone 581  
Santo André, SP  
CEP 09290-550, Brasil  
Tel. 55-11-4478-3118  
Fax. 55-11-4479-0338

**MBT Chile**  
Rio Palena 9665  
Santiago, Chile  
Tel. 56-2-444-9760  
Fax. 56-2-444-9761

**MBT Colombia**  
Calle 76 No. 13-27  
Bogotá, Colombia  
Tel. 57-1- 321 7210  
Fax. 57-1-321 7513

**MBT Concretesa**  
Sosaya 133 y Ave América  
Quito, Ecuador  
Tel: 593-256-6011  
Fax: 593-256-9272

**MBT México**  
Bvd. Manuel Avila Camacho 80  
53390 Naucalpan  
Estado de México, Mexico  
Tel. 52 21 22 22 00  
Fax. 52 21 22 22 01

**MBT Puerto Rico**  
Calle Sierra Morena 178  
San Juan, Puerto Rico 00926  
Tel. (787) 731-8080  
Fax. (787) 731-8040

**MBT Unicon**  
Plácido Jiménez 958  
Lima, Peru  
Tel: 511-385-0109  
Fax: 511-385-2065

**MBT Venezuela**  
Centro Comercial Liberador, PH-3  
Caracas 1050, Venezuela  
Tel. 58-212-762-5471/75  
Fax. 58-212-761-7001

---

## ANEXO E

Hoja Técnica  
Edición N°3 01-2007  
Identificación n° 1072  
Versión - 01  
SikaFume

**SikaFume®**

Aditivo en polvo con base a silica-fume

Construcción

<b>Descripción</b>	SikaFume, es una adición en polvo fino, color gris, con base en microsilica, que permite aumentar las resistencias mecánicas y químicas de hormigones y morteros endurecidos. Su doble efecto puzolánico y granular, mejora las características de la matriz del hormigón o mortero, disminuyendo la porosidad y creando mediante su reacción con la cal libre, una estructura densa y resistente al ataque de aguas y ambientes agresivos. No contiene cloruros. SikaFume cumple con los requerimientos de la Norma ASTM C-1240
<b>Usos</b>	SikaFume es de gran utilidad cuando se requiere: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Colocar hormigón bajo agua.</li> <li>■ Reducir la exudación y la segregación del hormigón.</li> <li>■ Mejorar la aptitud para el bombeo de hormigones y morteros.</li> <li>■ Elaborar hormigones resistentes al ataque de sulfatos.</li> <li>■ Dotar al hormigón de resistencia al ataque químico de aguas y suelos agresivos.</li> <li>■ Reducir la permeabilidad del hormigón.</li> <li>■ Mejorar la cohesión y la adherencia al soporte de hormigones y morteros proyectados</li> </ul>
<b>Ventajas</b>	SikaFume imparte a la mezcla las siguientes propiedades: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ En el hormigón fresco <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evita la segregación, mejora la cohesión y la bombeabilidad de hormigones y morteros, en especial cuando se trabaja con diseños de mezcla carentes de finos.</li> <li>- Reduce el rebote, permite disminuir la cantidad de acelerante y se logran capas de mayor espesor cuando se adiciona a hormigones y morteros proyectados.</li> <li>- Reduce la energía necesaria para bombear hormigones y morteros.</li> <li>- Aumenta la adherencia del hormigón con el acero de refuerzo.</li> </ul> </li> <li>■ En el hormigón endurecido <ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminuye los picos de temperatura de las mezclas cuando se usa como reemplazo parcial de cemento.</li> <li>- Disminuye la permeabilidad, densifica la matriz de hormigones y morteros y aumenta la compacidad.</li> <li>- Reduce la permeabilidad a gases como el CO<sub>2</sub> y el SO<sub>2</sub> que carbonatan y disgregan el hormigón.</li> <li>- Disminuye apreciablemente la penetración de aguas con cloruros y otras sales.</li> <li>- Reduce notablemente la expansión de hormigón y morteros sometidos a fuerte ataque de sulfatos.</li> </ul> </li> </ul>



## ANEXO E

## Construcción

<b>Datos Técnicos</b>	
Contenido de SiO <sub>2</sub>	mayor al 95%
Superficie especificada	mayor a 30 m <sup>2</sup> /g
Humedad	3 - 5 % aprox. La humedad del producto, debido a su altísima superficie especificada, puede aumentar, en caso de un inadecuado almacenamiento o de alta humedad relativa en la zona de trabajo. Las normas especifican la humedad sólo en razón a que el producto se utiliza como materia prima para elaborar morteros predosificados, que incorporan cemento y una alta humedad los haría endurecer
<b>Modo de empleo</b>	SikaFume viene listo para ser empleado. Se adiciona a la mezcla con los agregados o con el cemento. Para garantizar la distribución homogénea de la microsilica en la mezcla, debe incrementarse el tiempo de mezclado. Este es el siguiente esquema de mezcla tanto en planta como en la obra: • Colocar en la mezcladora los agregados. • Adicionar la cantidad de SikaFume requerida y mezclar por 1 minuto. • Adicionar el cemento y continuar el mezclado hasta los 2 minutos. • Adicionar el agua de amasado con el superplastificante Sikament disuelto en ella, en la dosis requerida para lograr la consistencia deseada de la mezcla. Mezclar por 2 minutos adicionales.
<b>Dosificación</b>	SikaFume se dosifica entre el 3 y el 10% del peso del cemento de la mezcla de acuerdo con los resultados deseados. Debido a que la microsilica es una adición en polvo, muy fina, por su gran superficie específica se genera una mayor demanda de agua, para igual consistencia de la mezcla, por lo tanto debe acompañarse SikaFume con la dosis adecuada de superplastificante Sikament, evitando así elevar la relación agua/cemento. Se recomienda realizar ensayos previos para determinar el diseño óptimo de la mezcla y las dosis requeridas de adiciones y aditivos.
<b>Limitaciones</b>	Proteger el producto de la humedad. Debido a las bajas relaciones a/c característica de los hormigones con microsilica es recomendado el uso de superplastificantes. Para obtener superficies con un acabado eficiente es necesario usar curadores. Se recomienda usar Antisol como curador.
<b>Precauciones</b>	Se debe preveer un excelente curado al momento de utilizar microsilice o SikaFume en los hormigones y morteros. Curar por lo menos durante 7 días, ya que se pueden presentar microfisuras en caso de defectuoso curado. Contiene sílice y óxido de hierro. Evite respirar el polvo. Use solamente con ventilación adecuada. Puede causar irritación en la piel, ojos y vías respiratorias. Use gafas de seguridad, guantes de caucho y mascarillas para polvos. En caso de contacto con la piel, lavar la parte afectada con abundante agua y jabón. Para contacto con los ojos lavar con abundante agua durante 15 minutos y consultar un especialista. En caso de derrames accidentales recoger en recipientes adecuados y desecharlos de acuerdo a las regulaciones locales.
<b>Presentación</b>	Fundas de 15 kg.
<b>Almacenamiento</b>	El tiempo de almacenamiento es de 60 meses, protegido de la humedad. Condiciones de almacenamiento: lugar seco y bajo techo.

## Códigos R/S

R: 20/36 S: 2/24/25

La información y, en particular, las recomendaciones sobre la aplicación y uso final de los productos Sika son proporcionados de buena fe, basados en el conocimiento y experiencia actuales de Sika, respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados y manipulados, así como aplicados en condiciones normales de acuerdo a las recomendaciones de Sika. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra son tan particulares que de ésta información, cualquier recomendación escrita o cualquier otro consejo no se puede deducir garantía alguna respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad en particular, así como responsabilidad alguna que surja de cualquier relación legal. El usuario del producto debe probar la conveniencia del mismo para un determinado propósito. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de sus productos. Se deben respetar los derechos de propiedad de terceros. Todas las órdenes de compra son aceptadas de acuerdo con nuestras actuales condiciones de venta y despacho. Los usuarios deben referirse siempre a la edición más reciente de la Hoja Técnica local, cuyas copias serán facilitadas a solicitud del cliente.



Sika Ecuatoriana S.A.  
www.sika.com.ec  
Guayaquil - km 3 1/2 vía Durán - Tambo PBX 2812700 Fax 2801229  
Quito - Panamericana Norte km. 71/2. Telefax 2800419 - 2800420  
Cuenca - Av. de las Américas y 1º de Mayo Telf. 2856754 Fax 2821122



## BIBLIOGRAFIA

1. Aitcin, P. –C., High-Performance Concrete, A & FN Spon, New York, 1998, págs. 162 - 214, 546 – 568.
2. Fundamentals of High-Performance Concrete, Nawy, Edward G., Segunda Edición, New York, 2001, págs, 115 – 120, 290 – 309, 382 – 386.
3. Nilson, Arthur H., Diseño de Estructuras de Concreto, Mc. Graw Hill, Duodécima Edición, Bogotá, 2001, págs. 62 – 102, 241 – 273. 584 – 644.
4. Nilson, Arthur H.,. Diseno de Estrucutras de Concreto Presforzado, Segunda Edición, New York, 1987.
5. American Concrete Institute, Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318R-05), EE.UU., 2005.

6. Voo, J Y L., Foster, S. J., Gilbert, R. I., Shear Strength of Fibre Reinforced Reactive Powder Concrete Girders Without Stirrups, The University of South Wales, Sydney, 2003.
7. Fernández, Carlos, Concretos de Ultra Alto Desempeño Tecnología y Aplicaciones, HOLCIM, Costa Rica, 2005.
8. Helmink, Heidi., Schibley, James E., Batching, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber-Reinforced Floors, ACI Concrete International, EE.UU., Julio 2009.
9. Ordóñez, Ángel., Egüez, Hugo., Comportamiento de Hormigón Simple Mezclado con Polvo Reactivo, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2009
10. Cantos, Mario., Pena, Carlos., Velasco, Cecilia., Análisis, diseño de elementos estructurales utilizando Hormigón de Alto Desempeño (HAD) y comparación con elementos estructurales diseñados con Hormigones Convencionales para soportar las mismas condiciones de carga, ESPOL, Ecuador, 2009.