

**UTILIZACION DE AGREGADO GRUESO DE CONCRETO RECICLADO EN  
ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CONCRETO REFORZADO**

**Ing. LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA “JULIO GARAVITO”  
CENTRO DE ESTUDIOS DE ESTRUCTURAS, MATERIALES Y  
CONSTRUCCIÓN  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
ÉNFASIS EN ESTRUCTURAS  
2013**

**UTILIZACION DE AGREGADO GRUESO DE CONCRETO RECICLADO EN  
ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CONCRETO REFORZADO**

**TRABAJO DE GRADO  
PRESENTADO POR**

**Ing. LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT**

**Directores**

**Ing. NANCY TORRES C. MSc.  
Ing. PEDRO NEL QUIROGA S. PhD.**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA "JULIO GARAVITO"  
CENTRO DE ESTUDIOS DE ESTRUCTURAS, MATERIALES Y  
CONSTRUCCIÓN  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
ÉNFASIS EN ESTRUCTURAS  
2013**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

**MSc. NANCY TORRES C.**  
**Directora Trabajo de Grado**

---

**Dr. PEDRO NEL QUIROGA**  
**Director Énfasis en Estructuras**

---

**Dr. GERMÁN SANTOS**  
**Director Maestría en Ingeniería**  
**Civil**

**BOGOTÁ D.C., Noviembre de 2013**

## FICHA TÉCNICA DEL PROYECTO

<p>Título de Proyecto:</p>	<p>UTILIZACION DE AGREGADO GRUESO DE CONCRETO RECICLADO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CONCRETO REFORZADO</p>
<p>Línea de Investigación:</p>	<p>TECNOLOGÍA DEL CONCRETO</p>
<p>Nombre del investigador principal:</p>	<p>Ing. LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT</p>
<p>Nombre de los Directores del Proyecto:</p>	<p>MSc. NANCY TORRES C. PhD. PEDRO NEL QUIROGA S.</p>
<p>Estado de desarrollo del proyecto:</p>	<p>TERMINADO</p>
<p>Duración del proyecto:</p>	<p>AGOSTO DE 2010 – NOVIEMBRE DE 2013</p>
<p>Objetivos:</p>	<p>Estudiar el comportamiento estructural de elementos de concreto reforzado con agregado grueso de concreto reciclado y realizar las respectivas comparaciones frente a concretos de control o convencionales.</p>
<p>Resultados esperados o logrados:</p>	<p>Formulación de observaciones, conclusiones y recomendaciones al caso de estudio.</p>
<p>Productos generados del desarrollo del proyecto:</p>	<p>DOCUMENTO TRABAJO DE GRADO ARTICULO REVISTA ECI</p>

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. JUSTIFICACION</b> .....	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1- OBJETIVO GENERAL .....	13
2.2- OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	13
<b>3. MARCO TEORICO</b> .....	<b>14</b>
3.1- INTRODUCCION .....	14
3.2- ESTADO DEL ARTE .....	16
3.2-1. NACIONAL .....	16
3.2-2. INTERNACIONAL.....	18
3.3- GENERALIDADES.....	19
3.3-1. DEFINICION Y TIPOS DE AGREGADOS.....	19
3.3-2. FUENTES DE RESIDUOS Y PRODUCCION DE AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO .....	20
3.3-3. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO.....	23
3.3-3.1. GRANULOMETRIA.....	23
3.3-3.2. FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL.....	24
3.3-3.3. DENSIDAD Y ABSORCION.....	25
3.3-3.4. DESGASTE EN MÁQUINA DE LOS ANGELES .....	26
3.3-3.5. PROPIEDADES QUIMICAS Y DURABILIDAD .....	26
3.3-3.6. MORTERO ADHERIDO.....	28
3.3-4. CONSIDERACIONES SOBRE LA FABRICACION Y EJECUCION DE LAS OBRAS DE CONCRETO CON AGREGADO GRUESO RECICLADO .....	28
3.3-4.1. DOSIFICACION .....	28
3.3-4.2. MEZCLADO .....	30
3.3-4.3. PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO.....	31
3.3-4.4. EJECUCION DE LAS OBRAS .....	32
3.4- PROPIEDADES DEL CONCRETO CON AGREGADO GRUESO DE CONCRETO RECICLADO .....	32
3.5- DURABILIDAD .....	37

3.6- CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	41
3.7- ENSAYOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	42
<b>4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>47</b>
<b>5. CÁLCULOS, ENSAYOS Y RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
5.1- VIGAS CONTINUAS.....	51
5.1-1. GENERALIDADES DE LOS ENSAYOS.....	51
5.1-2. CÁLCULO TEÓRICO DE LAS CARGAS DE FALLA.....	55
5.1-3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	66
5.1-4. COMPARACIONES DE CARGAS DE FALLA.....	70
5.1-5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
5.2- PLACAS APOYADAS EN TRES BORDES.....	73
5.2-1. GENERALIDADES DE LOS ENSAYOS.....	73
5.2-2. CÁLCULO TEÓRICO DE LAS CARGAS DE FALLA.....	77
5.2-3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	84
5.2-4. COMPARACIONES DE CARGAS DE FALLA.....	88
5.2-5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
5.3- VIGAS ALTAS.....	90
5.3-1. GENERALIDADES DE LOS ENSAYOS.....	90
5.3-2. CÁLCULO TEÓRICO DE LAS CARGAS DE FALLA.....	93
5.3-3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	96
5.3-4. COMPARACIONES DE CARGAS DE FALLA.....	99
5.3-5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
5.4- MÉNSULAS.....	101
5.4-1. GENERALIDADES DE LOS ENSAYOS.....	101
5.4-2. CÁLCULO TEÓRICO DE LAS CARGAS DE FALLA.....	105
5.4-3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	110
5.4-4. COMPARACIONES DE CARGAS DE FALLA.....	113
5.4-5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	114
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....</b>	<b>117</b>
<b>7. REFERENCIAS.....</b>	<b>119</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>121</b>

<b>9. ANEXOS VIGAS CONTINUAS.....</b>	<b>122</b>
ANEXO 1 – Ensayos cilindros de concreto .....	122
ANEXO 2 – Ensayos refuerzo.....	127
ANEXO 3 – Registro fotográfico.....	130
ANEXO 4 – Calibración celdas .....	147
ANEXO 5 – Esquemas de refuerzo.....	148
ANEXO 6 – Datos ensayos .....	149
ANEXO 7 – Cálculo para cargas de trabajo.....	155
ANEXO 8 – Diseños de mezclas y propiedades de los agregados.....	156
ANEXO 9 – Ductilidades .....	164
<b>10. ANEXOS PLACAS APOYADAS EN TRES BORDES .....</b>	<b>165</b>
ANEXO 1 – Ensayos cilindros de concreto .....	165
ANEXO 2 – Ensayos refuerzo.....	169
ANEXO 3 – Registro fotográfico.....	171
ANEXO 4 – Datos ensayos .....	185
ANEXO 5 – Diseños de mezclas y propiedades de los agregados.....	191
ANEXO 6 – Ductilidades .....	200
<b>11. ANEXOS VIGAS ALTAS .....</b>	<b>201</b>
ANEXO 1 – Ensayos cilindros de concreto .....	201
ANEXO 2 – Ensayos refuerzo.....	208
ANEXO 3 – Datos ensayos .....	211
ANEXO 4 – Registro fotográfico.....	216
ANEXO 5 – Diseños de mezclas y propiedades de los agregados.....	226
<b>12. ANEXOS MÉNSULAS .....</b>	<b>234</b>
ANEXO 1 – Ensayos cilindros de concreto .....	234
ANEXO 2 – Ensayos refuerzo.....	241
ANEXO 3 – Datos ensayos .....	243
ANEXO 4 – Registro fotográfico.....	245
ANEXO 5 – Diseños de mezclas y propiedades de los agregados.....	257
<b>13. ANEXOS GENERALES.....</b>	<b>265</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Cargas teóricas de falla CC – vigas continuas .....	65
<b>Tabla 2.</b> Cargas teóricas de falla CR – vigas continuas .....	66
<b>Tabla 3.</b> Diferencias teóricas CC vs. CR – vigas continuas.....	66
<b>Tabla 4.</b> Comparación cargas de falla CC – vigas continuas .....	70
<b>Tabla 5.</b> Comparación cargas de falla CR – vigas continuas .....	70
<b>Tabla 6.</b> Cargas teóricas de falla – placas.....	83
<b>Tabla 7.</b> Diferencias teóricas CC vs. CR – placas .....	83
<b>Tabla 8.</b> Análisis de sensibilidad variación altura efectiva – placas.....	84
<b>Tabla 9.</b> Comparación cargas de falla CC – placas.....	88
<b>Tabla 10.</b> Comparación cargas de falla CR – placas.....	88
<b>Tabla 11.</b> Diferencias teóricas y experimentales CC vs. CR – placas .....	88
<b>Tabla 12.</b> Cargas teóricas de falla – vigas altas .....	96
<b>Tabla 13.</b> Comparación cargas de falla CC – vigas altas .....	99
<b>Tabla 14.</b> Comparación cargas de falla CR – vigas altas .....	99
<b>Tabla 15.</b> Diferencias teóricas y experimentales CC vs. CR – vigas altas .....	100
<b>Tabla 16.</b> Cargas teóricas de falla – ménsulas.....	110
<b>Tabla 17.</b> Comparación cargas de falla CC – ménsulas.....	113
<b>Tabla 18.</b> Comparación cargas de falla CR – ménsulas.....	113
<b>Tabla 19.</b> Diferencias teóricas y experimentales CC vs. CR – ménsulas .....	114



## LISTA DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Esquema vigas continuas.....	51
<b>Gráfica 2.</b> Refuerzo vigas continuas Tipo 1 .....	53
<b>Gráfica 3.</b> Refuerzo vigas continuas Tipo 2 .....	53
<b>Gráfica 4.</b> Refuerzo vigas continuas Tipo 3 .....	53
<b>Gráfica 5.</b> Montaje ensayo vigas continuas.....	54
<b>Gráfica 6.</b> Esquema método del trabajo virtual .....	55
<b>Gráfica 7.</b> Solicitación a cortante vigas continuas CC.....	58
<b>Gráfica 8.</b> Solicitación a cortante vigas continuas CR.....	63
<b>Gráfica 9.</b> Carga vs. Deformación – vigas continuas CC – cargas puntuales .....	67
<b>Gráfica 10.</b> Carga vs. Deformación - vigas continuas CC – apoyos.....	67
<b>Gráfica 11.</b> Carga vs. Deformación – vigas continuas CR – cargas puntuales .....	68
<b>Gráfica 12.</b> Carga vs. Deformación – vigas continuas CR – apoyos.....	68
<b>Gráfica 13.</b> Comparación vigas continuas Tipo 1.....	69
<b>Gráfica 14.</b> Comparación vigas continuas Tipo 2.....	69
<b>Gráfica 15.</b> Comparación vigas continuas Tipo 3.....	70
<b>Gráfica 16.</b> Curva de resistencia a la compresión en función del tiempo.....	71
<b>Gráfica 17.</b> Esquema placas apoyadas en tres bordes.....	73
<b>Gráfica 18.</b> Tipos de refuerzo placas apoyadas en tres bordes .....	76
<b>Gráfica 19.</b> Mecanismo de falla CR refuerzo tipo 1 – placas .....	77
<b>Gráfica 20.</b> Mecanismo de falla CR refuerzo tipo 2 – placas .....	78
<b>Gráfica 21.</b> Mecanismo de falla CC refuerzo tipo 1 – placas .....	80
<b>Gráfica 22.</b> Mecanismo de falla CC refuerzo tipo 2 – placas .....	81
<b>Gráfica 23.</b> Carga distribuida vs. Deformación – placas CC .....	85
<b>Gráfica 24.</b> Carga distribuida vs. Deformación – placas CR .....	85
<b>Gráfica 25.</b> Comparación placas Tipo 1 .....	86
<b>Gráfica 26.</b> Comparación placas Tipo 2.....	86
<b>Gráfica 27.</b> Comparación placas Tipo 1 y 2 .....	87
<b>Gráfica 28.</b> Comparación placas Tipo 1 y 2 – incluyendo peso propio.....	87

<b>Gráfica 29.</b> Esquema vigas altas.....	91
<b>Gráfica 30.</b> Montaje ensayo vigas altas .....	92
<b>Gráfica 31.</b> Modelo Puntal – Tensor.....	93
<b>Gráfica 32.</b> Carga puntual vs. Deformación – vigas altas CC .....	97
<b>Gráfica 33.</b> Carga puntual vs. Deformación – vigas altas CR .....	97
<b>Gráfica 34.</b> Comparación vigas altas Tipo 1 .....	98
<b>Gráfica 35.</b> Comparación vigas altas Tipo 2 .....	98
<b>Gráfica 36.</b> Comparación vigas altas Tipo 1 y 2.....	99
<b>Gráfica 37.</b> Esquema ménsulas .....	102
<b>Gráfica 38.</b> Montaje ensayo ménsulas .....	104
<b>Gráfica 39.</b> Carga puntual vs. Deformación – ménsulas CC.....	111
<b>Gráfica 40.</b> Carga puntual vs. Deformación – ménsulas CR.....	111
<b>Gráfica 41.</b> Comparación ménsulas Tipo 1 .....	112
<b>Gráfica 42.</b> Comparación ménsulas Tipo 2.....	112
<b>Gráfica 43.</b> Comparación ménsulas Tipo 1 y 2 .....	113

## 1. JUSTIFICACIÓN

Si bien es conocida la factibilidad del uso de agregados provenientes del reciclaje de concreto para la fabricación de concretos estructurales en diversos países tales como Bélgica, Países Bajos, Reino Unido, Alemania, Dinamarca, Australia, entre otros [Ref. 1]; en Colombia se carece de una reglamentación pertinente –aunque se cuenta con estudios y documentos al respecto- que permita incentivar su utilización en los proyectos que se desarrollan en el entorno; es necesario por tanto realizar más investigaciones que permitan conocer a cabalidad el comportamiento, desempeño y resistencia del concreto con agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado.

La utilización de agregado grueso proveniente del reciclado de concretos de demolición para la fabricación de concreto estructural nuevo se justifica plenamente con aspectos ambientales; en nuestro medio actualmente se generan cantidades significativas de escombros productos de la demolición de estructuras en concreto que ya cumplieron con su vida útil, se demuelen estructuras existentes para dar paso a edificaciones de mayor tamaño y como es sabido las principales ciudades no cuentan con la infraestructura necesaria para la adecuada disposición de residuos sólidos. Así mismo, se explotan cada vez más las canteras para la extracción de los agregados naturales para la elaboración de concretos, lo que atenta contra los recursos naturales no renovables. Entonces, la utilización del concreto con agregado grueso de concreto reciclado permite disminuir el volumen de residuos sólidos a disponer y adicionalmente disminuye la demanda de material de cantera; por tal motivo es evidente el beneficio en la conservación del medio ambiente.

Así mismo, la tendencia mundial va encaminada hacia la construcción sostenible, fundamentada en el concepto de desarrollo sostenible: “es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”<sup>1</sup> y a eso se debe apuntar en la sociedad Colombiana. Para alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible es necesario adoptar una serie de estrategias encaminadas a minimizar el impacto medio ambiental de las actividades propias de la construcción y a su vez favorecer la protección de los recursos naturales; estas estrategias consisten en potenciar el reciclaje de los materiales que han cumplido su vida útil, eliminar subproductos de desecho, aprovechamiento de estos residuos para obtener una nueva materia prima y por ende reducir la cantidad de recursos naturales primarios a extraer.<sup>2</sup>

Es claro que la utilización de agregados de concreto reciclado para la elaboración de concreto nuevo, contribuiría significativamente a la conservación del medio

---

<sup>1</sup> NACIONES UNIDAS. Informe de la Comisión Brundtland. 1987.

<sup>2</sup> ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL. Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. 2006. Pag. 13.

ambiente sin afectar el desarrollo ni las necesidades actuales de la comunidad; pero para esto es necesario adelantar estudios que garanticen seguridad a las personas y a su patrimonio como primera medida tendiente a la generación de una política que favorezca su utilización.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1- OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el comportamiento estructural de elementos de concreto reforzado con agregado grueso de concreto reciclado y realizar las respectivas comparaciones frente a concretos de control o convencionales.

### **2.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Determinar la resistencia a flexión y cortante de elementos estructurales de concreto reforzado con agregado grueso de concreto reciclado con sustitución del 20% del agregado natural.

Analizar e interpretar el comportamiento y desempeño de los elementos estructurales ensayados.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1- INTRODUCCIÓN

Como se comentó en la justificación cada día toma más fuerza el tema de la construcción sostenible y la necesidad de darle un uso adecuado y racional a los materiales de construcción; en algunos países ya hay avances significativos en cuanto a investigación, normatividad y aplicación del agregado de concreto reciclado para la elaboración de concreto estructural nuevo; pero lamentablemente en Colombia aún no se cuenta con un avance significativo al respecto.

Es claro que las edificaciones tienen un impacto ambiental muy importante en el mundo, para evidenciarlo a continuación se relacionan algunos datos de interés de diversas fuentes de información:

Las edificaciones consumen aproximadamente el 37% de la energía del mundo, el 40% de los recursos mundiales que se explotan son destinados para edificaciones y así mismo el 40% de los desechos son producto de las mismas.<sup>3</sup>

Los impactos de las edificaciones equivalen el 17% del consumo de agua potable, 25% del consumo de madera cultivada, 33% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, 30-40% del uso de energía y 40% del uso de materias primas – 3000 millones de toneladas.<sup>4</sup>

Las emisiones de CO<sub>2</sub> de las edificaciones son muy superiores a las de otros sectores productivos como el transporte y la industria y las brechas han ido aumentando con el paso del tiempo.<sup>5</sup>

Las edificaciones son el sector con mayor potencial de mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub> hacia 2030.<sup>6</sup>

Si bien los beneficios ambientales de utilizar concreto con agregado de concreto reciclado están plenamente justificados, así como los impactos negativos al medio ambiente identificados y cuantificados; existen barreras que afectan su aplicación como son el bajo precio de los materiales de construcción tradicionalmente empleados y del traslado de los residuos generados a los vertederos. Sin embargo, se presume que hacia un futuro tome fuerza el empleo de los residuos como productos sustitutivos de los convencionales, lo que propiciará la aparición de actividades que, haciendo posible el desarrollo sostenible, sean económicamente interesantes.<sup>7</sup>

---

<sup>3</sup> WBCSD. Energy Efficiency in Buildings – Facts and Trends, Summary Report. 2008.

<sup>4</sup> McGRAW HILL. WorldGBC.

<sup>5</sup> USGBC.

<sup>6</sup> UNEP. Green Economy Report. 2011.

<sup>7</sup> Op.cit. ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL. Pag. 7.

Como ventajas de los materiales que incorporan materiales de desecho se tienen que son más amigables con el medio ambiente, en general pueden resultar más económicos y permiten disminuir los espacios destinados a vertederos; en contraste como desventajas del concreto con agregado grueso de concreto reciclado se tiene que en el país no se conoce apropiadamente su comportamiento. Dentro de las desventajas y limitaciones, presenta un mayor contenido de finos (pasa tamiz #200) que el convencional lo cual puede comprometer la adherencia, en general su absorción es mayor entonces si no se hace corrección por humedad de la mezcla y no se satura previamente el agregado de concreto reciclado estos factores conducen a cambios importantes en la relación agua/cemento, el mayor contenido de partículas planas y alargadas como también una mayor rugosidad superficial tienden a disminuir su manejabilidad lo que conduce a que casi siempre sea imprescindible el empleo de aditivos plastificantes; así mismo es importante trabajar las mezclas con agregados saturados pues adicionalmente favorece el curado autógeno del concreto.<sup>8</sup>

Teniendo como base las ventajas, desventajas e investigaciones específicas que se han llevado a cabo, se establecen unas limitaciones al uso del agregado de concreto reciclado en concreto estructural en la bibliografía consultada y se recalcan a continuación:

- Su aplicación queda restringida a los casos de concreto en masa y reforzado, excluyendo el concreto pre-esforzado.
- Sólo se aconseja la utilización de agregado de concreto reciclado procedente de concreto convencional, excluyendo concretos especiales tales como concretos ligeros, con fibras o aquellos fabricados con cemento aluminoso, etc.
- Con carácter general se contempla la utilización de la fracción gruesa del agregado de concreto reciclado (tamaño mínimo superior a 4 mm), sustituyendo a una cantidad limitada del agregado natural que será fijada en el 20% de sustitución en peso para aplicaciones en concreto estructural sin mayores restricciones adicionales al concreto, para mayores porcentajes de sustitución se limita la resistencia a la compresión; cabe resaltar que en la práctica, los valores aconsejables de sustitución llegan hasta el 50% y únicamente se suele utilizar un 100% de agregado reciclado como agregado grueso en concretos no estructurales, por ejemplo como concreto de limpieza o pavimentos de tránsito reducido. [Ref. 1]
- La utilización del agregado de concreto reciclado en concretos que vayan a estar expuestos a ambientes agresivos, estará condicionada por la necesidad de tomar precauciones especiales que se deben precisar en cada caso particular y que pueden incluir, por ejemplo, recomendaciones de

---

<sup>8</sup>JOSE GABRIEL GOMEZ CORTES. Conferencia propiedades mecánicas y de permeabilidad de concretos con agregado grueso reciclado en la ciudad de Bogotá. 2011. Pag. 2-4.

utilizar una única fuente de agregado de concreto reciclado controlada, realización de ensayos complementarios, incremento en el contenido de cemento o disminución de la relación agua/cemento en la dosificación, etc.

La limitación al porcentaje de agregado de concreto que se recomienda utilizar, así como las especificaciones que se exijan en cuanto a su calidad y uniformidad, van a permitir garantizar un concreto con agregado de concreto reciclado cuyas propiedades no difieran sustancialmente de las de un concreto convencional.<sup>9</sup>

Así mismo, se deben tener en cuenta los requisitos que debe cumplir un agregado, tales como, ser químicamente estable, poseer adecuadas resistencias mecánicas y tener buena adherencia con la pasta.<sup>10</sup>

## **3.2- ESTADO DEL ARTE**

### **3.2-1. NACIONAL**

En el ámbito nacional se han realizado investigaciones dentro de las cuales se cuentan:

“Concreto sostenible como alternativa estructural, ambiental y económica en la construcción de obras civiles” [Ref. 2]

Ing. Nestor Raúl Bojacá Castañeda.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

“Propiedades del concreto reciclado como agregado” [Ref. 3]

Ing. Alvaro León Rodríguez.

Universidad Nacional de Colombia.

“Agregado reciclado para morteros” [Ref. 4]

Angela Hincapié – Elisa Aguja.

Universidad EAFIT.

“Estudio experimental de las propiedades mecánicas del concreto reciclado para uso en edificaciones convencionales” [Ref. 5]

Juan Pablo Robles – Juliana Vanegas.

Pontificia Universidad Javeriana.

“Abrasión y sortividad en concretos con agregado grueso reciclado” [Ref. 6]

Laura Agudelo.

Universidad Nacional de Colombia.

---

<sup>9</sup> Opcit. ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL. Pag.15.

<sup>10</sup> Opcit. JOSE GABRIEL GOMEZ CORTES. Pag. 15.



“Análisis de la permeabilidad en concretos con agregado grueso reciclado y adición de ceniza volante” [Ref. 7]

Diana Milena Herrera Rodríguez.

Universidad Nacional de Colombia.

“Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado” [Ref. 8]

Ing. Nestor Raúl Bojacá Castañeda.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Pese a que se cuenta con muy buenas investigaciones del tema en cuestión, en Colombia actualmente se carece de una normatividad técnica que incentive su uso y aplicación.

A manera de evaluación del panorama actual en Colombia se tiene que:

“El empleo del concreto reciclado como agregado para confeccionar un nuevo concreto es una técnica que es prometedora y ha sido avalada por experiencias, tanto nacionales como de otros países.

Si bien algunas propiedades pueden resultar desmejoradas, en general lo son en grado menor. De otro lado, algunas propiedades resultan claramente mejoradas.

Existen dispersiones relativamente amplias en los resultados de los ensayos realizados. Igualmente, existen resultados en ocasiones contradictorios entre diversos investigadores.

Es muy importante determinar mediante pruebas de laboratorio las propiedades de cada concreto con agregado reciclado, pues su comportamiento es específico.

Desde un punto de vista especialmente ambiental, como también económico, el país está en mora de implementar el empleo a escala industrial del concreto reciclado como nuevo agregado”<sup>11</sup>

En cuanto a la parte normativa, en la ley 99 de 1993 se define el desarrollo sostenible como el desarrollo que conduce al crecimiento económico, la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades.

Así mismo, existe actualmente una Propuesta de Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 en la cual se incluye:

---

<sup>11</sup> Ibid. Pag. 56.

- Estrategia de sostenibilidad Ambiental Urbana
- Definición de lineamientos de política sobre construcción y urbanismo sostenible (reglamentación de los proyectos integrales de desarrollo urbano – PIDUs)
- Desarrollo de incentivos
- Definición de estándares de diseño y construcción para el uso eficiente de los recursos
- Desarrollo del sello ambiental colombiano para edificaciones
- Implementación de hipotecas verdes<sup>12</sup>

Este se considera un gran avance en cuanto a legislación se refiere y es de esperar que a futuro sirva de base y sustento para continuar con la investigación y aplicación de técnicas y materiales de construcción sostenibles que repercutan en mayores beneficios para el medio ambiente.

### **3.2-2. INTERNACIONAL**

A nivel internacional está más difundido el uso del agregado de concreto reciclado y varios países Europeos cuentan con una reconocida experiencia en este tema e incluso su aplicación es frecuente; por ejemplo en los Países bajos desde 1991 – hace 22 años– se exige la utilización de agregados procedentes de concreto reciclado en un porcentaje del 20% de la fracción gruesa en todos los proyectos de concreto con excepción de las estructuras de concreto pre-esforzado. En otros países como Alemania, Reino Unido, Bélgica, Dinamarca y Australia también existen experiencias prácticas tanto en elementos estructurales como no estructurales.

Estas aplicaciones se presentan en varios tipos de obra, como:

Obras Portuarias, por ejemplo la esclusa del puerto de Amberes en Bélgica en 1987, en la cual por motivos de ampliación se demolieron varios muros del puerto para la posterior construcción de una esclusa mayor. Producto de la demolición se generaron 80.000 m<sup>3</sup> de escombros y por consideraciones ambientales y económicas se utilizaron estos escombros para la fabricación de concreto con agregado de concreto reciclado. Después de más de 20 años de servicio la estructura no ha presentado problemas de durabilidad.

Obras de Edificación, un ejemplo de aplicación es el bloque de oficinas en Watford (Reino Unido) y fue a su vez la primera experiencia práctica en la región, en esta se utilizó concreto triturado procedente de la demolición de un edificio de doce pisos situado en el centro de Londres para la posterior construcción de la

---

<sup>12</sup> CRISTINA GAMBOA. Conferencia Hacia una política de construcción y desarrollo urbano sostenible en Colombia. 2011. Pag. 45.

edificación en mención. Otros ejemplos son la Casa en Odenense (Dinamarca), Hong Kong Wetland Park (Hong Kong).

Puentes, un buen ejemplo es el viaducto de la carretera RW 32 cerca de Meppel (Países Bajos) en el cual se utilizaron 11.000 m<sup>3</sup> de concreto reciclado como agregado grueso en un porcentaje de sustitución del 20%.

También se encuentran numerosos casos de aplicaciones no estructurales, como por ejemplo los elementos decorativos para el centro de exposiciones de Magdeburg (Alemania), camino peatonal en Altona East Primary School, Bordillo y cuneta en Altona Boat Ramp, Carril para bicicletas en Rifle Range Estate, Williamstown todos estos enmarcados dentro de un proyecto para aplicaciones no estructurales en Australia.<sup>13</sup>

En cuanto a normatividad técnica también hay un gran avance en algunos países del mundo y se relacionan a continuación:

- RILEM, Especificaciones para agregados reciclados y concreto con agregado reciclado
- Propuesta norma Japonesa para agregados reciclados
- Especificaciones de los agregados reciclados para concreto en Bélgica
- Guía Australiana para la utilización de agregado reciclado (RCA) en concreto.
- Norma Alemana DIN 4226-100
- Norma Inglesa BS 8600:02 “*Specification for constituent Materials and Concrete*”
- Norma Holandesa NEN 5905:97<sup>14</sup>

### **3.3- GENERALIDADES**

#### **3.3-1. DEFINICIÓN Y TIPOS DE AGREGADOS**

Como definición general, se entiende por agregado reciclado aquél “agregado resultante del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción” (prEN 13242 “*Aggregates unbound and hydraulically bound for use in civil engineering Works and road construction*” en su versión de Mayo de 2002, prEN 12620 “*Aggregates for concrete*” de Abril de 2002).

Los residuos de concreto de cemento con clinker Portland y agregados naturales, triturados, cribados y procesados en plantas de reciclado dan lugar al material secundario “agregado de concreto reciclado”. Este deriva de un solo tipo de

---

<sup>13</sup> Opcit. ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL. Pag. 149-166.

<sup>14</sup> NESTOR RAUL BOJACÁ CASTAÑENA. Concreto sostenible como alternativa estructural, ambiental y económica en la construcción de obras civiles. 2008.

material primario, el concreto, cuya composición es heterogénea (cemento, agua, agregados, aditivos y adiciones). El material obtenido de la forma descrita no puede considerarse, por tanto, un material uniforme.

Los otros tipos de agregados reciclados son:

“Agregado reciclado cerámico”: El cual se obtiene por procesamiento de material predominantemente cerámico. El 85% de este agregado debe tener una densidad seca superior a  $1600 \text{ kg/m}^3$ .

“Agregados reciclados mixtos”: Definido en la norma holandesa como un agregado que deberá contener un porcentaje mayor del 50% de concreto con una densidad seca superior a  $2100 \text{ kg/m}^3$  y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el concreto, incluyendo los cerámicos con una densidad seca mayor de  $1600 \text{ kg/m}^3$ .

Muchas normativas no permiten el uso de estos dos últimos tipos en concreto estructural ya que su empleo aumenta el contenido de aire y obliga también a una relación agua/cemento mayor. Adicionalmente, la resistencia a compresión y módulo de elasticidad del concreto pueden verse afectados negativamente.

El único tipo de agregado reciclado que puede ser admisible para concreto estructural es el agregado de concreto reciclado y deben imponérsele valores límites para las impurezas que puedan tener efectos negativos sobre la resistencia y la durabilidad.

El uso de las fracciones finas del agregado de concreto reciclado implica, entre otros inconvenientes, un aumento muy notable de la retracción por secado y de la fluencia debido a la mayor cantidad de agua que precisan en su dosificación.

En general puede decirse que los agregados de concreto reciclado de tamaño mayor o igual a 4mm son potencialmente aptos para la fabricación de concreto.

Así mismo, si la sustitución de agregado grueso convencional es menor o igual al 20%, las propiedades mecánicas permanecen prácticamente constantes.<sup>15</sup>

### **3.3-2. FUENTES DE RESIDUOS Y PRODUCCIÓN DE AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO**

La obtención del agregado de concreto reciclado procede de dos fuentes u orígenes principales asociados, respectivamente, a los residuos fruto del propio proceso de construcción y a la demolición de estructuras existentes; este origen

---

<sup>15</sup> Opcit. ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL. Pag. 17-18.

induce distintas características en el agregado fundamentalmente vinculadas al envejecimiento y grado de hidratación del mortero adherido, el cual siempre está presente, en mayor o menor medida, en el agregado procedente del concreto reciclado.

La operación de demolición debe considerarse de forma que permita el máximo grado de reutilización de componentes y materiales; la demolición selectiva favorece el conocimiento del futuro agregado de concreto reciclado, permite una preselección según la calidad del concreto a demoler y, en definitiva, favorece la uniformidad de la calidad.

Como se acaba de mencionar, la manera de mejorar la calidad del residuo de demolición es la demolición selectiva pero su viabilidad está condicionada por factores tales como la accesibilidad, el tiempo disponible y costo global de la actuación. La demolición selectiva es más cara en comparación con los métodos tradicionales de demolición, por ello, la incidencia del costo de procesado puede ser muy importante respecto a la adopción de un sistema u otro. Queda claro, pues, que demolición y reciclado deben considerarse conjuntamente.

Los procesos de producción de agregados de concreto reciclado se realizan en plantas de tratamiento (fijas o móviles) que, en líneas generales, son similares a las empleadas en agregados naturales, si bien incorporan de forma específica elementos para la separación de impurezas y otros contaminantes.

Para la eliminación de impurezas, durante la demolición debe evitarse que los escombros de concreto se mezclen con tierras, y conseguir que se reduzca al máximo el contenido de otros materiales de construcción no deseables, lo cual redundará favorablemente en el sentido de reducir tratamientos posteriores.

Las impurezas y contaminantes pueden ser metales, madera, plásticos, yeso, que deben ser eliminados, lo cual puede lograrse utilizando distintas técnicas según sea la naturaleza de los mismos.

Los contaminantes de mayor tamaño pueden eliminarse manualmente, mientras que mediante el tamizado se eliminan las impurezas de menor tamaño, como puede ser la tierra, pudiéndose realizar en varias etapas para que resulte más efectivo.

Los residuos de demolición contienen importantes cantidades de acero que puede separarse magnéticamente.

Además, puede haber aluminio, cobre, plomo, zinc y aleaciones. Estos no son magnéticos y la forma más moderna de separación es por corrientes de Foucault produciendo la separación por repulsión de los metales no magnéticos y no ferrosos.

La separación de los materiales de baja densidad puede tener lugar en seco o por vía húmeda. En seco se utiliza la separación manual previa a la mecánica, y posteriormente, para la separación de los materiales ligeros se utilizan potentes corrientes de aire. Por otra parte, la separación por vía húmeda se efectúa en un baño de agua. Su inconveniente es la generación de barro.

Las impurezas producen en todos los casos un descenso de resistencia en el concreto, más pronunciado cuando son elementos como cal o arcilla, y en menor grado cuando se trata de asfalto o pinturas. Además dependiendo del tipo de impureza se pueden presentar otros problemas, como reacciones álcali-agregado (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desconchados superficiales (madera o papel), elevada retracción (tierras arcillosas) o mal comportamiento hielo-deshielo (ladrillos).

La presencia de impurezas depende en gran medida del tipo de agregado reciclado. El agregado procedente de escombros de concreto presenta generalmente un reducido contenido de impurezas, mientras que la incorporación incluso de pequeños porcentajes de escombros cerámicos aumenta generalmente la presencia de diferentes materiales como madera, yeso o vidrio. Además las fracciones más finas suelen incorporar un mayor contenido de impurezas.

El concreto que constituye la materia prima para la obtención del nuevo agregado de concreto reciclado debe ser examinado, si es posible, previamente a su procesado. En especial con respecto a la posibilidad de la presencia de agregados potencialmente reactivos frente a los alcalinos. Debe evitarse también el concreto de cemento aluminoso y determinarse los contenidos originales de sulfatos y cloruros.

La calidad del agregado obtenido depende de la calidad del material procesado y puede contener como principales contaminantes madera, yeso, arcilla, aluminio y plásticos, sin olvidar el vidrio que, según el tipo, puede acarrear una futura reacción álcali-sílice. Así mismo, en el caso de tener conocimiento de procesos patológicos en el concreto original, éste debe rechazarse como materia prima. En el caso de material procedente de la carretera, el principal problema puede ser el asfalto y algunos contaminantes orgánicos perjudiciales. Es preciso, por tanto, limitar los porcentajes máximos de contaminantes y analizar con la debida frecuencia los agregados obtenidos.

La presencia de yeso debe ser reducida a través de severos criterios de aceptación previa del residuo de demolición, rechazándose la partida que contenga cantidades importantes de tal naturaleza. Además, el material fino ya triturado puede eliminarse en el lavado. En cualquier caso el control de sulfatos en el agregado de concreto reciclado resultante debe ser sistemático.

Existen actualmente nuevas tendencias para la eliminación de impurezas, como la separación magnética por densidad. El principio de separación magnética en seco de materiales de mortero y cerámicos se basa en la susceptibilidad magnética de estos. Entonces, toda vez que la separación se basa en los contenidos de óxido de hierro y el del mortero y el concreto son sensiblemente iguales, el sistema puede aplicarse también para separar ladrillo y concreto.

También es importante tener ciertas consideraciones ambientales, previamente a la demolición debe determinarse la presencia de asbestos. En caso de detectar su presencia, los elementos deben ser eliminados rigurosamente de acuerdo con métodos específicos que suelen llevarse a cabo por empresas especializadas. Debe minimizarse el riesgo de mezclar asbestos con futuros agregados de concreto reciclado, así mismo, en residuos de concreto es conveniente revisar el contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos, aunque su presencia es poco probable dada la práctica desaparición de los alquitranes en las construcciones. Lo anterior buscando evitar la liberación de sustancias peligrosas que pueden contener compuestos identificados como carcinógenos, mutágenos y teratógenos.

Los agregados de concreto reciclado procedentes de residuos de construcción y demolición no suelen tener problemas de impacto ambiental por lixiviación de metales, ya que no suelen estar presentes en los materiales de origen. En cambio, las cantidades de sulfatos, que proceden casi siempre del yeso, pueden superar los límites establecidos en las aguas de lixiviación. Los sulfatos pueden ser reducidos significativamente por lavado. Los lixiviados orgánicos no son frecuentes, pero en todo caso suelen concentrarse más en las fracciones finas.<sup>16</sup>

### **3.3-3. PROPIEDADES DEL AGREGADO DE CONCRETO RECICLADO**

#### **3.3-3.1. GRANULOMETRÍA**

La granulometría de los agregados de concreto reciclado varía según el proceso de trituración que se realice, pudiéndose seleccionar mediante pequeños ajustes en la apertura de las trituradoras.

El porcentaje de agregado grueso que se obtiene puede variar entre 70% y 90% del agregado total producido. Este porcentaje depende además del tamaño máximo del agregado grueso de concreto reciclado producido y de la composición del concreto original.

La fracción gruesa posee una curva granulométrica adecuada, que se puede englobar dentro de los límites granulométricos que recomiendan algunas normas internacionales para el empleo de agregado grueso en concreto estructural (ASTM, prEN).

---

<sup>16</sup> Ibid. Pag. 19-29, 48.

En general, las granulometrías de los agregados de concreto reciclado se sitúan dentro de los límites que fijan las diferentes recomendaciones tanto para agregado natural como para agregado de concreto reciclado.

El módulo granulométrico del agregado de concreto reciclado, para un mismo tamaño máximo del agregado, presenta pequeñas variaciones dependiendo principalmente del sistema de trituración empleado y en menor medida de la calidad del concreto original.

En principio, el agregado de concreto reciclado genera finos durante su manipulación debido a la aparición de pequeñas partículas de mortero que se desprenden, la presencia de estas partículas en la superficie del agregado puede originar problemas de adherencia entre éste y la pasta de cemento, además de provocar un aumento de la cantidad de agua de amasado necesaria.

Por otra parte, después de obtener la fracción gruesa en el agregado de concreto reciclado, éste sigue presentando pequeños porcentajes de arena (partículas menores de 4mm) debido a la disgregación que sufre el agregado al manipularse. Los valores más frecuentes oscilan entre 0,5-2%.

Así, las recomendaciones de la Rilem y las especificaciones de Hong Kong para la utilización de agregado de concreto reciclado, establecen un límite del 5% para el contenido de partículas de tamaño inferior a 4mm en el agregado de concreto reciclado.<sup>17</sup>

### **3.3-3.2. FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL**

La presencia del mortero que queda adherido a los agregados del concreto original provoca que la textura de los agregados de concreto reciclado sea más rugosa y porosa que la de los agregados naturales como consecuencia del proceso de trituración. No obstante, el coeficiente de forma del agregado de concreto reciclado es similar al que puede presentar el agregado natural. En una investigación nacional se obtuvo un coeficiente de forma para el agregado grueso reciclado de 0,24 y de 0,31 para el agregado grueso natural. [Ref. 8]

En investigaciones nacionales se establecieron para agregado reciclado proveniente de cilindros de prueba desechados una forma piramidal y una textura rugosa. [Ref. 3]

Los estudios que han empleado el método del índice de partículas planas y alargadas ASTM D 4791 para determinar la forma del agregado grueso han encontrado sin embargo diferencias entre el agregado natural y el agregado de concreto reciclado, siendo menor el valor del índice en el caso del agregado de

---

<sup>17</sup> Ibid. Pag. 31-33.



concreto reciclado. Esto puede deberse a que el mortero que queda adherido en las caras planas que presentan las partículas tienden a aumentar el espesor de las partículas con forma plana y alargada, disminuyendo así el porcentaje de estas; otros estudios han empleado la microscopía óptica para evaluar la forma del agregado, observando que las partículas del agregado de concreto reciclado presentan una forma más redondeada. Sin embargo, otros estudios que han valorado la forma del agregado a través del índice de angulosidad, concluyen que las partículas del agregado de concreto reciclado son más angulosas. Esta disparidad en resultados y conclusiones de diferentes estudios puede deberse a la influencia de la calidad del concreto de origen sobre la forma, ya que los agregados de concreto reciclado tienden a ser más redondeados cuanto mayor es la relación agua/cemento del concreto original y por lo tanto menor la resistencia del mortero. Generalmente son las fracciones de menor tamaño del agregado grueso las que presentan una forma más desfavorable tanto utilizando como referencia el coeficiente de forma como el índice de partículas planas y alargadas.<sup>18</sup>

### **3.3-3.3. DENSIDAD Y ABSORCIÓN**

La densidad del agregado de concreto reciclado es inferior a la del agregado natural, debido a la pasta de cemento que queda adherida a los granos. La densidad del agregado de concreto reciclado suele oscilar entre 2100 y 2400 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2300 y 2500 kg/m<sup>3</sup>, por lo que en todos los casos se pueden considerar estos agregados de densidad normal (no livianos: con una densidad cuando están sueltos y secos de 1120 kg/m<sup>3</sup> o menos de acuerdo a ASTM C330/NTC 4045).

En las investigaciones nacionales se encuentran los siguientes valores:

Densidad aparente S entre 2070 kg/m<sup>3</sup> y 2130 kg/m<sup>3</sup>, densidad nominal entre 2520 kg/m<sup>3</sup> y 2590 kg/m<sup>3</sup> y densidad aparente S.S.S. entre 2270 kg/m<sup>3</sup> y 2280 kg/m<sup>3</sup>. [Ref. 2]

Densidad aparente S 2100 kg/m<sup>3</sup>. [Ref. 3]

Densidad aparente S 2120 kg/m<sup>3</sup>, densidad nominal 2540 kg/m<sup>3</sup> y densidad aparente S.S.S. 2290 kg/m<sup>3</sup>. [Ref. 8]

Absorción promedio entre 10 y 12% para el concreto con agregado reciclado equivalente a una mayor absorción frente al concreto con agregado natural del 24 al 47%. [Ref. 2]

---

<sup>18</sup> Ibid. Pag. 33-34, 37.

Absorción promedio del 10% para el concreto con agregado reciclado equivalente a una mayor absorción frente al concreto con agregado natural del 43%. [Ref. 3]

Humedad de absorción promedio 7,8% para el concreto con agregado reciclado equivalente a una mayor absorción frente al concreto con agregado natural del doble. [Ref. 8]

La absorción es una de las propiedades físicas del agregado de concreto reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al agregado natural, debido a la elevada absorción de la pasta que queda adherida a él. Los principales aspectos que influyen tanto en la densidad como en la absorción del agregado de concreto reciclado son: el tamaño de las partículas, la calidad del concreto original y las técnicas de procesado.<sup>19</sup>

### **3.3-3.4. DESGASTE EN MÁQUINA DE LOS ANGELES**

El agregado de concreto reciclado presenta un elevado desgaste en la máquina de los ángeles ya que en el ensayo se elimina todo el mortero que queda adherido al agregado, además de la pérdida de peso propia del agregado natural.

En una investigación nacional se encontró un desgaste promedio en la máquina de los ángeles del 45% frente a un 25% de la muestra patrón. [Ref. 2]

En otra similar, por su parte, se encontró un desgaste promedio en la máquina de los ángeles del 40,5% frente a un 30,3% de la muestra patrón. [Ref. 8]

El valor esperable del coeficiente de los ángeles del agregado de concreto reciclado puede situarse en un rango muy amplio de 25-42%, dependiendo entre otros factores del tamaño de las partículas y de la calidad del concreto original, así como del propio coeficiente de los ángeles del agregado natural que contenga.<sup>20</sup>

### **3.3-3.5. PROPIEDADES QUÍMICAS Y DURABILIDAD**

#### **Contenido de cloruros**

Los agregados de concreto reciclado pueden presentar un contenido apreciable de cloruros, en función de la procedencia del concreto usado como materia prima, especialmente en concretos procedentes de obras marítimas, puentes o pavimentos expuestos a las sales para el deshielo. Así mismo, los concretos en los que se haya utilizado aditivos acelerantes, pueden también contener una elevada cantidad de cloruros.

---

<sup>19</sup> Ibid. Pag. 37-38.

<sup>20</sup> Ibid. Pag. 42.

En el caso del agregado de concreto reciclado parece conveniente cuantificar además de los cloruros solubles en agua (como en los agregados naturales), los cloruros totales que contiene el agregado, ante la posibilidad de que haya cloruros combinados que en ciertas circunstancias puedan ser reactivos y atacar las armaduras. Este es el caso del cloro aluminato cálcico hidratado, ya que la presencia de iones sulfatos procedentes por ejemplo de ambientes marinos, puede llegar a liberar estos iones cloruros.

En general, cuando los hormigones no han estado expuestos a estas condiciones, los valores tanto de los cloruros solubles en agua como de los cloruros totales suelen oscilar entre 0,001-0,005%.

### **Contenido de sulfatos**

El agregado de concreto reciclado puede contener un elevado contenido de sulfatos, ya que al contenido propio del agregado natural, se le añaden los sulfatos que contiene la pasta adherida y la presencia de contaminantes como el yeso cuando el concreto procede de edificación. Los sulfatos combinados presentes en la pasta de cemento pueden producir problemas en el concreto nuevo, debido por ejemplo a la carbonatación que puede sufrir la ettringita que produce su descomposición en sulfatos.

Así mismo, será necesario evitar la presencia de impurezas como el yeso, que podrían producir expansiones en el concreto. Una de las posibles medidas para reducir el contenido de yeso es eliminar del agregado de concreto reciclado los tamaños más finos, ya que es en ellos donde se concentra una mayor cantidad de yeso.

### **Resistencia a la helada**

La resistencia a la helada de los agregados naturales se evalúa habitualmente mediante la pérdida de peso experimentada al someterlos a cinco ciclos con soluciones de sulfato magnésico. Se pueden emplear también métodos en los que se somete el agregado directamente a diez ciclos de hielo-deshielo en agua.

Algunos autores señalan que el ensayo de resistencia a la helada realizado con soluciones de sulfato no es adecuado para evaluar la durabilidad de los agregados de concreto reciclado, teniendo en cuenta que las soluciones tienen un efecto químico destructivo sobre la pasta de cemento, pudiendo dar resultados no representativos.

Al igual que en otras propiedades, la calidad del concreto de origen y el tipo de procesamiento aplicado influyen de forma importante en la calidad del agregado de concreto reciclado. Al realizar varias trituraciones consecutivas se pueden

conseguir agregados con un mejor comportamiento frente a la helada, próximo incluso al del agregado natural.

### **Reacción álcali-agregado**

Algunos tipos de agregados pueden reaccionar con los álcalis del cemento en ambiente húmedo cuando el contenido de alcalinos en el concreto es elevado, dando lugar a un compuesto gelatinoso que produce expansiones en el concreto. La utilización de agregado de concreto reciclado puede favorecer estas reacciones, ya que incorpora un mayor contenido de alcalinos debido a la pasta que lleva adherida. Adicionalmente, la diversidad de la naturaleza de los agregados de concreto reciclado hace muy difícil su control, para garantizar que no desencadenarán estas reacciones expansivas. Por este motivo, algunas recomendaciones de utilización de agregado de concreto reciclado lo consideran potencialmente reactivo.<sup>21</sup>

#### **3.3-3.6. MORTERO ADHERIDO**

El agregado grueso de concreto reciclado posee una cierta cantidad de mortero adherido, que lo diferencia de los agregados naturales. Este mortero es el causante de las diferencias que existen entre las propiedades de un agregado natural y un agregado de concreto reciclado antes mencionadas: menor densidad, mayor absorción, susceptibilidad a las heladas, reacción álcali agregado y ataque de sulfatos, entre otros. Estas propiedades afectan, a su vez, negativamente a las del concreto: módulo de elasticidad, retracción, flujo plástico y problemas asociados a la durabilidad. Cuanto mayor es el contenido de mortero adherido que presenta el agregado de concreto reciclado, más lo acusará el concreto fabricado con él.

Como se ha comentado anteriormente, elevadas cantidades de mortero en el agregado de concreto reciclado empeoran algunas de las propiedades del concreto, por lo que al concentrarse el mortero en las fracciones más finas, no es aconsejable la utilización del agregado fino de concreto reciclado.<sup>22</sup>

#### **3.3-4. CONSIDERACIONES SOBRE LA FABRICACIÓN Y EJECUCIÓN DE LAS OBRAS DE CONCRETO CON AGREGADO GRUESO DE CONCRETO RECICLADO**

##### **3.3-4.1. DOSIFICACIÓN**

Para la dosificación del concreto con agregado grueso reciclado, en principio se pueden emplear los métodos convencionales de dosificación, aunque se han

---

<sup>21</sup> Ibid. Pag. 43-46.

<sup>22</sup> Ibid. Pag. 47-48.

desarrollado algunas experiencias específicas respecto a la utilización de agregados de concreto reciclado.

### **Contenido de agua**

Para determinar el contenido de agua de la dosificación de concreto con agregado grueso de concreto reciclado, hay que tener en cuenta que la absorción de agua es mucho mayor en los agregados de concreto reciclado que en los convencionales, debido entre otros factores, al mortero adherido a los agregados originales. Para asumir este incremento en la demanda de agua se puede presaturar el agregado o incrementar el agua de mezclado; también es posible corregir este efecto mediante la utilización de aditivos.

### **Contenido de cemento**

En principio, los tipos de cemento utilizados serán los mismos que se emplearían en un concreto convencional para las mismas prestaciones. Debido a la menor calidad del agregado de concreto reciclado, para mantener la misma resistencia y consistencia, el concreto con agregado grueso de concreto reciclado necesitará un mayor contenido de cemento en su dosificación.

### **Relación agua/cemento**

Como punto de partida, para un porcentaje de agregado de concreto reciclado reducido se puede considerar inicialmente que la relación agua/cemento necesaria para alcanzar una categoría resistente será la misma para el concreto convencional y el concreto con agregado grueso de concreto reciclado; aunque en la práctica, para sustituciones por encima del 50%, se deberá ajustar la relación agua/cemento en el concreto preparado con agregados de concreto reciclado mediante los ensayos correspondientes.

En general, para una misma resistencia, y sustitución total, la relación agua/cemento necesaria en el concreto con agregado grueso de concreto reciclado es menor que la del concreto convencional. [Ref. 8]

### **Dosificación del agregado de concreto reciclado**

Las propiedades del concreto fabricado con agregados de concreto reciclado tienden a empeorar a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. En la práctica, los valores aconsejables de sustitución llegan hasta el 50%. Esto se recoge en diferentes normativas, estableciéndose limitaciones a su dosificación. Según RILEM, se puede emplear una proporción de hasta un 20% de agregado de concreto reciclado sin ninguna limitación en su resistencia y su aplicación, siempre que el contenido de material cerámico sea inferior al 10%. La normativa Belga describe parámetros parecidos a estos, estableciendo limitaciones a la absorción.

La norma Alemana DIN 1045, permite un empleo de hasta un 5% en peso de agregado reciclado sin establecer restricciones adicionales al concreto; según el ambiente de aplicación esta norma establece ciertas limitaciones en relación con los porcentajes de sustitución. [Ref. 1]

En la mayor parte de las experiencias realizadas, no se ha considerado el empleo de agregado fino de concreto reciclado por las deficientes prestaciones que suele proporcionar, debido a sus características, que difieren en gran medida de las que posee el correspondiente agregado natural: elevada presencia de contaminantes, dificultad en el control del agua libre, acusadas pérdidas de resistencia y elevada absorción de agua con consecuencias negativas para las características del nuevo concreto.

### **Adiciones**

Existen algunas experiencias en las que se han empleado adiciones como por ejemplo humo de sílice y cenizas volantes en concreto con agregado grueso de concreto reciclado, obteniendo efectos beneficiosos similares a los concretos convencionales.

### **Aditivos**

La utilización de aditivos plastificantes en las dosificaciones de concretos con agregado grueso de concreto reciclado, al igual que en los convencionales, permite conseguir adecuadas manejabilidades, siendo especialmente ventajosa la utilización de aditivos súper-plastificantes para mejorar los aspectos relativos a la demanda de agua, especialmente en los casos que se utilice agregado no presaturado.

### **Dispersión**

Es importante destacar que se pueden presentar diferencias entre unas partidas y otras de agregados de concreto reciclado, que repercutirán en la resistencia a compresión del concreto. De este modo es posible que los coeficientes de variación resultantes puedan ser elevados en el control de calidad.

Si se controla la uniformidad, y la calidad de las partidas de agregados, estos coeficientes de variación pueden verse sustancialmente reducidos.<sup>23</sup>

### **3.3-4.2. MEZCLADO**

Se encuentran distintas experiencias en las que se han empleado diferentes métodos de mezclado del concreto preparado con agregado grueso de concreto

---

<sup>23</sup> Ibid. Pag. 59, 62-65.

reciclado, distinguiéndose unos de otros en la necesidad de pre-saturar el agregado, o bien de su premezclado en seco, encontrándose ventajas e inconvenientes para cada uno de ellos. Estas alternativas son adecuadas para altos porcentajes de sustitución. En el caso de porcentajes reducidos de agregado de concreto reciclado, el procedimiento de fabricación puede ser el mismo que en un concreto convencional.

En lo relativo a la resistencia a la compresión del concreto endurecido, no hay diferencias apreciables entre los agregados secos y los saturados con superficie seca, siempre que la relación agua/cemento efectiva de los dos concretos sea la misma. Sin embargo, en los concretos fabricados con agregados de concreto reciclado previamente saturados disminuyen los valores de consistencia y las variaciones en la manejabilidad.<sup>24</sup>

### **3.3-4.3. PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO**

#### **Consistencia**

La incorporación total de agregado grueso de concreto reciclado seco en el concreto produce en general un aumento de la consistencia cuando se mantiene la misma relación agua/cemento. Debido a la elevada absorción que presenta el agregado de concreto reciclado, durante el proceso de mezclado una cierta cantidad de agua será retenida por los agregados, generando un aumento de consistencia en ocasiones importante y una reducción de la relación agua/cemento efectiva. Así, el aumento de la demanda de agua se debe principalmente a la mayor absorción y al cambio de granulometría del agregado, fundamentalmente por generación de finos durante el mezclado, aunque también pueden influir otros factores como su forma angular y su textura rugosa. Además, la pérdida de manejabilidad es más rápida, ya que después del mezclado el agregado continúa absorbiendo agua. Esto presenta un problema cuando se trata de un concreto fabricado en planta, para el que se produce un intervalo de tiempo entre la producción y la puesta en obra.

Para obtener la consistencia deseada son posibles distintas alternativas:

- Cuantificar la cantidad de agua adicional que se debe añadir al concreto durante el mezclado mediante ensayos previos.
- Utilizar el agregado saturado.
- Añadir súper-plastificante en el concreto.

#### **Contenido de aire**

El contenido de aire no experimenta aumentos apreciables en el concreto con agregado grueso de concreto reciclado.

---

<sup>24</sup> Ibid. Pag. 66-67.

## **Densidad en estado fresco**

La densidad del concreto con agregado reciclado en estado fresco es inferior a la de un concreto convencional debido a la menor densidad que presenta el agregado de concreto reciclado, por el mortero que permanece adherido al agregado natural. Los valores de densidad pueden oscilar entre 2130 y 2400 kg/m<sup>3</sup>. [Ref. 9]

## **Exudación**

La exudación del concreto con agregado de concreto reciclado será similar a la del concreto convencional si se utiliza el agregado saturado y muy inferior si se utiliza seco, ya que la elevada absorción de los agregados de concreto reciclado facilita la retención de agua.<sup>25</sup>

### **3.3-4.4. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS**

El comportamiento del concreto estructural con agregado de concreto reciclado está relacionado con la calidad del propio agregado de concreto reciclado y el porcentaje en que éste sustituye al agregado natural.

Cuando se sustituye parte de agregado grueso por agregado de concreto reciclado (el porcentaje de sustitución del agregado grueso natural por agregado de concreto reciclado es menor o igual al 20% en peso), y su calidad es correcta, entendiendo como tal que proviene de un concreto adecuado y que, tras el reciclaje, la absorción de agua es menor o igual al 7% en peso, dicho comportamiento es análogo al del concreto convencional. En estas condiciones, la ejecución de las obras utilizando concreto con agregado de concreto reciclado es similar a la correspondiente con concreto convencional. Cuando el porcentaje de sustitución del agregado grueso natural por agregado de concreto reciclado supera el 20% indicado, existen algunas características del concreto con agregado de concreto reciclado que varían en relación con las correspondientes del concreto convencional por lo que se debería ajustar el proceso constructivo.<sup>26</sup>

### **3.4- PROPIEDADES DEL CONCRETO CON AGREGADO GRUESO DE CONCRETO RECICLADO**

Las propiedades del concreto con agregado grueso de concreto reciclado pueden verse afectadas negativamente respecto a las de un concreto convencional con la misma dosificación.

---

<sup>25</sup> Ibid. Pag. 69-71.

<sup>26</sup> Ibid. Pag. 73



El módulo de elasticidad y las resistencias pueden reducirse, y la retracción y el flujo plástico pueden aumentar en comparación con concretos de similares resistencias que contienen únicamente agregados naturales. Estas variaciones, debidas fundamentalmente a la cantidad de mortero adherido al agregado, serán mayores a medida que se aumente el porcentaje de sustitución de agregado natural por agregado de concreto reciclado.

### **Resistencia a la compresión**

Las pérdidas de resistencia, cuando se sustituye el 100% del agregado grueso, suelen encontrarse alrededor del 20%, pudiendo alcanzar de forma puntual el 30%. Cuando la sustitución baja al 50%, las pérdidas de resistencia se sitúan en un 2-15%. La pérdida de resistencia suele ser inferior al 5% cuando la sustitución se limita al 20-30%. [Ref. 1 Tabla 6.1] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

A continuación se presentan los hallazgos en investigaciones nacionales:

Se encontró una disminución de la resistencia a la compresión del 15% para el concreto con agregado de concreto reciclado frente a la muestra patrón, acorde con las investigaciones internacionales. [Ref. 2]

Se presentaron diferencias considerables frente a las investigaciones internacionales: el concreto con agregado de concreto reciclado presentó mayores resistencias a la compresión que el concreto convencional, superiores del 12 al 64% (atípico); la resistencia especificada a los 28 días fue  $f'_c = 21$  MPa y la de diseño fue  $f'_{cr} = 28$  MPa, el concreto con agregado de concreto reciclado en promedio resistió 30 MPa mientras que el concreto convencional resistió en promedio 23 MPa. [Ref. 3]

Se encontraron disminuciones hasta del 12% en la resistencia a la compresión para concreto con agregado reciclado sin curado y 9% con curado. [Ref. 5]

A los 28 días se encontró que el concreto con agregado grueso de concreto reciclado con una sustitución del 20% tiene resistencias a la compresión superiores al concreto convencional del orden del 6%, mientras que para una sustitución del 40% se presenta el caso contrario 6% menos resistencia frente al concreto convencional. [Ref. 8]

### **Módulo de elasticidad**

Debido al mortero adherido (cuyo módulo de elasticidad es menor), el módulo de elasticidad de los concretos con agregado grueso de concreto reciclado es inferior al correspondiente a los concretos de control con agregados naturales. Diversos autores indican mayores disminuciones que las observadas en resistencia a compresión y a su vez crecientes al aumentar el porcentaje de sustitución.

A continuación se presentan los resultados de investigaciones nacionales:

Se encontró una disminución en el módulo de elasticidad del 35% para el concreto con agregado de concreto reciclado frente a la muestra patrón. [Ref. 2]

Se presentó una disminución hasta del 27% en el concreto con agregado de concreto reciclado comparado con una muestra testigo de concreto convencional. [Ref. 5]

A los 28 días se encontró que el concreto con agregado grueso de concreto reciclado con una sustitución del 20% tiene un módulo de elasticidad inferior al concreto convencional del orden del 6%, mientras que para una sustitución del 40% este porcentaje aumenta a 9%. [Ref. 8]

Como resumen a estos estudios se puede indicar que, sustituciones de hasta el 50% del agregado grueso pueden provocar caídas en el módulo de elasticidad del orden del 10%, aumentando esta reducción hasta un 20% (con casos puntuales del 50%) cuando la sustitución es del 100% del agregado grueso. Cabe destacar, como viene siendo habitual, que sustituciones de hasta el 20% afectan muy ligeramente el valor del módulo de elasticidad. Por último, cuando se sustituyen también las fracciones finas, las disminuciones del módulo de elasticidad son superiores pudiendo alcanzar un 80% (sustitución del 100% del agregado fino y 100% del agregado grueso). [Ref. 1 Tabla 6.9] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

### **Diagrama esfuerzo – deformación**

Aunque existen pocos estudios que han evaluado el diagrama esfuerzo – deformación del concreto con agregado reciclado, éstos parecen indicar que su comportamiento es similar al de un concreto convencional. De esta forma, las estructuras diseñadas con estos nuevos concretos pueden proyectarse, en situaciones correspondientes a estados límites últimos de sollicitaciones normales, de acuerdo a las teorías utilizadas para los convencionales.

### **Velocidad de ultrasonidos**

La velocidad de ondas ultrasónicas presenta sistemáticamente valores más reducidos en el concreto con agregado reciclado que en el concreto convencional, obteniéndose menores valores cuanto mayor es el porcentaje de agregado de concreto reciclado utilizado en la dosificación. Algunos estudios han relacionado la velocidad de las ondas longitudinales con la resistencia a compresión de los concretos con agregado de concreto reciclado con distintos porcentajes de sustitución. En todos los casos, la velocidad aumenta al aumentar la resistencia de los concretos.

En una investigación nacional se encontró a los 28 días que el concreto con agregado grueso de concreto reciclado con una sustitución del 20% tiene una velocidad de pulso ultrasónico inferior al concreto convencional del orden del 1,6%, mientras que para una sustitución del 40% este porcentaje aumenta a 1,7%; de acuerdo a los valores obtenidos lo clasifican como bueno. [Ref. 8]

### **Retracción por secado**

La utilización de agregado de concreto reciclado produce mayor retracción en el concreto que el agregado natural. Esto se puede deber, entre otros motivos, al menor módulo de elasticidad que presenta el agregado de concreto reciclado debido a su contenido de mortero, a los mayores contenidos de agua y cemento que se utilizan en el concreto con agregado de concreto reciclado y la mayor absorción del agregado de concreto reciclado.

El valor final que se alcance depende en gran medida del porcentaje de agregado de concreto reciclado presente en la dosificación. Sin embargo, al contrario de lo que sucede con otras propiedades antes estudiadas, incluso la presencia de reducidas cantidades de agregado de concreto reciclado puede tener un efecto importante en la retracción del concreto.

En una investigación nacional se encontraron aumentos en la retracción por secado desde 153% hasta 367% para muestras sin curado. [Ref. 5]

### **Flujo plástico**

Igual que en el caso de la retracción, debido al mayor contenido de mortero en los concretos con agregado de concreto reciclado, el flujo plástico de éstos es superior a la de los de control. El aumento, con respecto a un concreto convencional, está en el rango del 20-60% aumentando con el porcentaje de sustitución del 50% al 100%. Los escasos estudios que realizan sustituciones del 30% del agregado grueso indican que apenas se producen incrementos en los valores de flujo plástico. [Ref. 1 Tabla 6.13] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

### **Resistencia a tracción, flexión y cortante**

La resistencia a tracción es una de las propiedades que parece estar menos afectada por la sustitución de los agregados naturales por agregados de concreto reciclado, caso similar se presenta en la resistencia a flexión, mientras que la resistencia a cortante sí se ve afectada.

#### Resistencia a tracción:

Se observa que cuando la sustitución afecta al 100% del agregado grueso las pérdidas de resistencia a tracción oscilan en rangos del 6-20%, con casos

puntuales hasta del 30% mientras que, cuando la sustitución es inferior al 50% las diferencias pasan a ser inapreciables. [Ref. 1 Tabla 6.15] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

#### Resistencia a flexión:

Puede observarse que sustituciones que afectan únicamente a las fracciones gruesas suponen pérdidas de resistencia a flexión entre el 6% y el 20% (similares a las mencionadas para resistencia a tracción), aumentando cuando la sustitución afecta a ambas fracciones, hasta valores extremos del 30%. [Ref. 1 Tabla 6.16] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

A continuación se presentan los resultados de investigaciones nacionales:

Se encontraron disminuciones entre el 11 y el 18% para  $f'c = 28$  Mpa y 21 Mpa respectivamente. [Ref. 2]

Se presentó una disminución del 8% valores concordantes con las experiencias internacionales. [Ref. 5]

Se encontró que el concreto con agregado grueso de concreto reciclado con una sustitución del 20% tiene un módulo de rotura superior al concreto convencional del orden del 3%, mientras que para una sustitución del 40% es inferior del orden del 13%. [Ref. 8]

Resistencia a cortante: se observa que sustituciones que afectan únicamente a las fracciones gruesas suponen pérdidas de resistencia a cortante del 26%, aumentando dicho valor al 30-40% cuando las sustituciones afectan tanto a las fracciones finas como a las gruesas. Además, las relaciones entre la resistencia a la compresión y otro tipo de resistencias (tracción o cortante) son similares para concretos convencionales y concretos con agregados de concreto reciclado. [Ref. 1 Tabla 6.17] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

#### **Densidad**

La densidad del concreto es inferior a la de un concreto convencional debido a la menor densidad que presenta el agregado de concreto reciclado.

Estos valores suponen una reducción respecto al hormigón de control entre un 4% y un 15% cuando se utiliza un 100% de agregado de concreto reciclado, y entre un 1% y un 5% cuando el porcentaje de agregado es inferior al 50%.<sup>27</sup> [Ref. 1 Gráfica 6.23] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

---

<sup>27</sup> Ibid. Pag. 77, 88-90, 92-94, 98, 100-104.

### **3.5- DURABILIDAD**

La durabilidad del concreto convencional se explica en gran parte por la dificultad que los agentes agresivos tienen para penetrar la red de poros del concreto, por ello, la porosidad y la permeabilidad son propiedades fundamentales que condicionan la durabilidad. La utilización de agregados de concreto reciclado introduce un mayor volumen de poros en el concreto que afectará a todos los mecanismos de transporte facilitando la penetración de los agentes agresivos lo que puede traducirse en una disminución de la durabilidad.

Otra cuestión específica de los concretos con agregados de concreto reciclado es la presencia de una pasta de distinta naturaleza a la del nuevo concreto y que puede influir en la reacción álcali-agregado. Así, el concreto original puede no haber experimentado la reacción álcali-agregado a pesar de contener agregado reactivo, por falta de alcalinos y/o de agua, condiciones que sin embargo pueden darse en el nuevo concreto por el cemento empleado y por la permeabilidad del mismo. [Ref. 1]

#### **Porosidad, absorción y permeabilidad**

La presencia de agua es el principal factor en el deterioro del concreto, con excepción del deterioro mecánico. El transporte de agua a través del concreto viene determinado por el tipo, tamaño, distribución e interconexión de los poros y fisuras. Estos factores determinan la permeabilidad del concreto y a su vez, ésta condiciona decisivamente la durabilidad. Una vez producida la entrada del agua desde la superficie mojada, ésta circula por el concreto en función de su porosidad, transportando a su vez las sustancias agresivas disueltas.

La incorporación del agregado reciclado en el concreto representa un aumento de su porosidad, de su capacidad de absorción y de su permeabilidad, aunque el resultado final depende también de las características de la nueva matriz cementante.

Diferentes estudios que han evaluado esta propiedad en concretos con sustitución del agregado grueso natural por agregado grueso de concreto reciclado han obtenido un aumento del coeficiente de absorción; estos incrementos dependen de la porosidad del agregado de concreto reciclado y del porcentaje de sustitución, y pueden variar entre el 15% y el 70% respecto a la absorción del concreto convencional. [Ref. 1 Tabla 7.1] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

En una investigación nacional se evaluó mediante la metodología ISAT BS 1881 parte 208 la absorción superficial inicial a 46 y 58 días, se obtuvo para el primer caso a los 10 minutos un aumento del 8% para el concreto con agregado grueso de concreto reciclado con una sustitución del 20% y del 10% para una sustitución del 40%, a los 30 minutos no hubo variación para sustitución del 20% y se

presentó un aumento del 14% para una sustitución del 40% y a los 60 minutos se obtuvo una disminución del 13% para sustitución del 20% y un aumento del 6% para sustitución del 40%; para el segundo caso, se obtuvo a los 10 minutos un aumento del 13% para el concreto con agregado grueso de concreto reciclado con una sustitución del 20% y del 11% para una sustitución del 40%, a los 30 minutos se obtuvo un aumento del 14% para sustitución del 20% y un aumento del 100% para sustitución del 40% y a los 60 minutos no hubo variación para sustitución del 20% y se presentó un aumento del 25% para una sustitución del 40%, así se estableció una permeabilidad absorción media y por otra parte –mediante el ensayo de sortividad ASTM C 1585– una calidad buena; a los 28 días el índice de absorción se incrementó 2% para el concreto con agregado grueso de concreto reciclado con una sustitución del 20% y 10% para una sustitución del 40% y a los 56 días se obtuvo una disminución del 19% para sustitución del 20% y un aumento del 21% para sustitución del 40%. [Ref. 8]

Otros estudios han comprobado que la porosidad y la permeabilidad aumentan con la inclusión de agregado de concreto reciclado, siendo este efecto mucho más importante cuando se utilizan además las fracciones recicladas finas. El aumento de la porosidad en estos casos es de 1,5 a 2 veces mayor que la del concreto de control. La permeabilidad es de 2 a 3 veces mayor que la del concreto de control. [Ref. 1 Tabla 7.2] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

### **Resistencia a la helada**

Aunque se han encontrado grandes variaciones en los estudios realizados, la tendencia más generalizada es señalar que la introducción de agregado de concreto reciclado implica un descenso de la resistencia a la helada, aunque éste es poco importante para porcentajes bajos de sustitución. La resistencia a la helada puede mejorarse reduciendo la relación agua/cemento y utilizando aditivos inclusores de aire.

La mayor porosidad en el concreto con agregado de concreto reciclado implica, en caso de saturación, un mayor volumen de agua absorbida si se compara con un concreto convencional. Ello representará un mayor deterioro de los concretos con agregados de concreto reciclado frente a heladas.

Algunos autores utilizan el ensayo ASTM C-666(A) y concluyen a partir de los factores de durabilidad obtenidos, que los concretos con agregado de concreto reciclado tienen baja resistencia a la helada [Ref. 1 Tabla 7.3]. Esto se ve corroborado por el descenso del módulo dinámico con el número de ciclos hielo-deshielo [Ref. 1 Gráfica 7.1]. Ver Capítulo 13. Anexos generales.

## **Carbonatación**

En general no existe acuerdo entre los autores sobre cuál es el comportamiento de los concretos con agregados de concreto reciclado frente a la carbonatación y el consiguiente riesgo de corrosión. En este sentido algunos estudios encuentran que el proceso de carbonatación depende de los valores relativos de permeabilidad del mortero nuevo y del agregado de concreto reciclado, lo que explicaría las discrepancias entre los valores encontrados por distintos autores.

También hay que tener en cuenta que la reserva alcalina del concreto con agregado de concreto reciclado puede ser mayor al aumentar la cantidad de pasta presente, lo que provocaría una disminución de la velocidad de avance del frente de carbonatación. [Ref. 1 Gráfica 7.8] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

En una investigación nacional, se encontraron para 76 días frentes de carbonatación (cámara) de 16 mm para concreto convencional, 9 mm para concreto con agregado grueso reciclado con una sustitución del 20% y 11 mm para sustitución del 40%, es decir, 45% y 32% inferior respectivamente para concretos con agregado grueso reciclado frente a concretos convencionales; similarmente ocurre con los coeficientes de exposición acelerado y ambiente pero con porcentajes de 20% y 9% respectivamente. Lo anterior resultó en una clasificación regular para el concreto convencional y buena para los concretos con agregado grueso de concreto reciclado. [Ref. 8]

Los resultados parecen indicar que la utilización de agregados gruesos de concreto reciclado de calidad y en pequeña cantidad, mantienen profundidades de carbonatación similares a las de los concretos convencionales, mientras que para sustituciones elevadas se pueden alcanzar profundidades mayores. [Ref. 1 Tabla 7.6] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

## **Penetración de cloruros**

La penetración del ión cloruro en el concreto con agregado de concreto reciclado tiene lugar a través del mortero nuevo, la zona de transición entre pasta nueva – agregado de concreto reciclado y a través del mortero viejo. Es obvio que si se disminuye la permeabilidad de cualquiera de los tres medios disminuirá la facilidad de penetración de los cloruros.

En una investigación nacional se presentan los siguientes valores de penetración de cloruros (Coulombs): a 28 días 2474 para concreto convencional, 2361 para concreto con agregado grueso reciclado para una sustitución del 20% del agregado natural y 2403 para una sustitución del 40%; respectivamente a 56 días se presentan valores de 2988, 2377 y 2526 que resulta en una clasificación moderada. [Ref. 8]

Por otra parte, algunos autores e investigadores concluyen que la permeabilidad al ión cloruro en los hormigones con grava y arena de concreto reciclado es mucho mayor que la del concreto convencional, siendo aún mayor en los concretos con agregados de concreto reciclado fabricados con agregados de menor calidad. [Ref. 1 Gráfica 7.10] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

### **Corrosión de armaduras**

Tal y como ha quedado reflejado en los apartados anteriores, debido a la mayor permeabilidad, profundidad de carbonatación y velocidad de difusión de cloruros, la protección que da el concreto con agregado de concreto reciclado es inferior, especialmente para altos porcentajes de sustitución utilizando un agregado de concreto reciclado de baja calidad.

En principio la situación es peor que en un concreto convencional, pero ésta puede mitigarse con el empleo de porcentajes moderados de sustitución por agregado de concreto reciclado, controlando la calidad del mismo y/o disminuyendo la relación agua/cemento del concreto con agregado de concreto reciclado, así como garantizando el espesor del recubrimiento de la armadura.

### **Ataque por sulfatos**

La resistencia de los concretos con agregado de concreto reciclado al ataque por sulfatos depende sobre todo del tipo de cemento utilizado en el nuevo concreto así como del cemento presente en los agregados de concreto reciclado, de ahí la importancia de conocer el origen del concreto.

En una investigación nacional se presentan los siguientes porcentajes a 68 días en solución de sulfato: 2,4% para concreto convencional, 2,0% para concreto con agregado grueso reciclado para una sustitución del 20% del agregado natural y 1,7% para una sustitución del 40%. [Ref. 8]

Por otra parte, a nivel internacional concluyen que hasta un 30% de sustitución los resultados de resistencia a sulfatos son similares. Para sustituciones mayores el comportamiento del concreto con agregado de concreto reciclado es claramente inferior. [Ref. 1 Tabla 7.7] Ver Capítulo 13. Anexos generales.

### **Reactividad álcali – agregado**

El control de la reacción álcali – agregado en concretos con agregados de concreto reciclado es idéntico al de los concretos convencionales en el caso de una sola fuente de procedencia del agregado de concreto reciclado. En cambio es complejo en el caso de diversas fuentes de origen.



Según trabajos reportados por Gottfredsen y Thsogersen [Ref. 10], los agregados de concreto reciclado pueden presentar cuatro niveles de reacción álcali – agregado:

- 1) Agregado de concreto reciclado con mortero adherido sin ningún contenido de partículas reactivas.
- 2) Agregado de concreto reciclado con mortero adherido donde la reacción álcali – agregado se ha terminado en reacciones previas.
- 3) Agregado de concreto reciclado con mortero adherido con reacciones aún en proceso.
- 4) Agregado de concreto reciclado con mortero adherido con partículas donde no se ha presentado la reacción álcali – agregado por carencia de humedad o de álcalis.

Los niveles 3 y 4 son potencialmente peligrosos de presentar reacción álcali – agregado si son utilizados para fabricar concretos con agregados de concreto reciclado.

Estudios españoles [Ref. 11] han constatado en caso de aporte de álcalis por parte del cemento utilizado en el nuevo concreto (situación 4 de las descritas anteriormente). En el agregado de concreto reciclado eran reactivos tanto el agregado grueso original como el mortero adherido y, sin embargo, la reacción no se había dado en el concreto de origen. En cambio, en el nuevo concreto apareció el gel en una aureola formada alrededor de la zona de contacto entre el mortero del agregado de concreto reciclado y el mortero con el nuevo cemento.<sup>28</sup>

### **3.6- CONSIDERACIONES DE DISEÑO**

No son muchos los autores que incluyen en sus estudios el campo estructural de los concretos con agregados de concreto reciclado. Este es un ámbito en el que son necesarios más estudios experimentales que permitan conocer en profundidad el comportamiento de los nuevos concretos; ésta es una de las principales razones por las cuáles se acometieron -en el presente trabajo de grado- estudios tendientes a analizar elementos estructurales para posteriormente ser ensayados bajo cargas estáticas y analizar el comportamiento del concreto con agregado grueso de concreto reciclado (con una sustitución del 20% del agregado grueso natural) frente al concreto convencional (100% de agregado natural) o de control.

A manera de resumen del comportamiento estructural de experiencias previas para concreto con agregado de concreto reciclado se tiene que:

---

<sup>28</sup> Ibid. Pag. 111, 113, 119-124.

- La resistencia a flexión de las vigas fabricadas con concreto con agregado de concreto reciclado apenas varía con respecto al concreto convencional en cuanto a momento último. [Ref. 1 Tabla 8.5] Ver Capítulo 13. Anexos generales.
- La disminución de resistencia a cortante en piezas sin armadura transversal sólo es perceptible para porcentajes de sustitución superiores al 25%. Para mayores valores puede llegar a ser del 20%. En piezas con armadura transversal se manifiesta ya para bajos porcentajes, pero no supera el 10%. [Ref. 1 Tablas 8.7, 8.9 y 8.10] Ver Capítulo 13. Anexos generales.
- Son válidas las expresiones de cálculo para el concreto convencional, considerando un margen adicional del 10%, lo cual apenas influye en la cuantía de acero transversal.
- En cuanto a adherencia puede anotarse que en los concretos con agregados de concreto reciclado se produce una caída de las tensiones de adherencia en el momento de deslizamiento de la barra cuando ésta se encuentra en posición de buena adherencia. Esta pérdida de adherencia aumenta con la baja calidad del agregado de concreto reciclado y con el incremento del porcentaje de sustitución.<sup>29</sup>

### **3.7- ENSAYOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

#### **Ensayos a flexión**

Yagishita [Ref. 12] trabajó con cuatro tipos de concretos, un concreto convencional y tres reciclados (diferentes calidades) en los que se sustituyó el 100% del agregado grueso natural por agregado de concreto reciclado. Con estos concretos se fabricaron vigas reforzadas con armadura inferior y superior y estribos para determinar el comportamiento bajo flexión (estática y a fatiga).

Los resultados obtenidos en estos ensayos revelan que la resistencia última de las vigas con concreto con agregado grueso de concreto reciclado es aproximadamente un 12% inferior a la de las vigas fabricadas con concreto convencional. En cuanto a la deformación y fisuración no existen diferencias significativas entre los distintos tipos de vigas.

La curvatura de las secciones en la zona de momentos constantes, al alcanzarse los valores de cargas máximas, parece ser menor en las vigas de concreto con agregado grueso de concreto reciclado de menor calidad.

Los resultados obtenidos en los ensayos de flexión a fatiga muestran que la rigidez de las vigas se reduce con los ciclos de carga, no existiendo diferencias en las vigas de concreto con agregado grueso de concreto reciclado. Los estudios

---

<sup>29</sup> Ibid. Pag. 129, 147-148.

sobre la fisuración durante los ciclos sucesivos revelan que en las primeras etapas las vigas de concreto con agregado grueso de concreto reciclado presentan mayor número de pequeñas fisuras que las de concreto convencional, aunque para el último ciclo no existen apenas diferencias entre ellas.

Por otra parte, Mukai [Ref. 13] fabricó vigas para ensayar hasta rotura bajo flexión y flexión sostenida, para esto utilizó seis tipos de concretos en los que incluso se realizaron sustituciones del agregado fino.

Los resultados obtenidos mediante los ensayos de flexión revelan que el momento último previsto por las distintas normativas se ajusta, con carácter conservador, a los resultados experimentales obtenidos en las vigas de concreto con agregado de concreto reciclado. Este carácter se pierde cuando se analiza el momento de fisuración.

Los resultados obtenidos de los ensayos bajo carga sostenida muestran que las flechas de las vigas de concreto con agregado de concreto reciclado son superiores a las de concreto convencional. Además, mientras que en las vigas de concreto convencional los aumentos de deformación bajo carga sostenida se reducen mucho a partir de las 13 semanas, en las de concreto con agregado de concreto reciclado se mantienen incluso tras un año de carga.

De todo ello se concluye que el comportamiento a flexión de los concretos con agregado de concreto reciclado, incluso con el 100% de sustitución del agregado grueso, apenas difiere del de los concretos convencionales en lo que a momento último se refiere. Las normativas vigentes pueden utilizarse proporcionando valores conservadores.

En deformación y fisuración el comportamiento de los distintos concretos también es similar, detectando algunas diferencias, en detrimento de los concretos con agregado de concreto reciclado con el 100% de sustitución, cuando se aplican cargas sostenidas. Es de esperar, sin embargo, que estas diferencias sean inferiores cuando las sustituciones se realicen en porcentajes inferiores al 100%.<sup>30</sup>

McNeil [Ref. 16] hizo una revisión de ensayos de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión, en la cual encontró que las deflexiones en el centro de la luz bajo cargas de servicio son mayores en los concretos con agregado de concreto reciclado comparativamente con los concretos convencionales, lo anterior se justifica por la reducción en el módulo de elasticidad; no obstante, las deflexiones se encuentran por debajo de los límites establecidos en la normatividad por lo que no se descarta su utilización.

---

<sup>30</sup> Ibid. Pag. 130-133.

En cuanto a fisuración, las vigas de concreto con agregado de concreto reciclado presentan mayor ancho de fisuras y el espaciamiento de las mismas es menor frente a las vigas de concreto convencional; similar a lo expuesto para deflexiones, los valores obtenidos están por debajo de las especificaciones aplicables y las diferencias entre los tipos de concreto no son tan significativas como para impedir su utilización.

No hay mucha variación en el momento último, si las resistencias a la compresión del concreto con agregado de concreto reciclado y del concreto convencional son similares las diferencias son muy pequeñas y por lo tanto son aplicables los mismos métodos de diseño. Se observó que los momentos últimos experimentales son superiores –en todos los casos– que los teóricos, por lo que no hay razones que limiten las aplicaciones estructurales para momento último. Sin embargo, el momento de fisuración si es afectado por la utilización de agregado de concreto reciclado, por lo que se obtienen momentos de fisuración ligeramente menores, con respecto al concreto convencional, cuando se realizan sustituciones del agregado natural; no obstante, es totalmente viable la utilización de agregados de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado sometidos a flexión.

Por su parte, Tsujino [Ref. 17] llegó a conclusiones similares al estudio anterior, mediante el ensayo a flexión de vigas de concreto reforzado con utilización de agregado de concreto reciclado, con la particularidad que éstos agregados fueron tratados superficialmente con un agente de tipo aceitoso a fin de controlar la mayor absorción de los mismos por la presencia de concreto adherido.

Encontró que las deflexiones son mayores en los concretos con agregado de concreto reciclado frente a los concretos convencionales, pero las diferencias no son muy significativas y para el uso práctico se pueden mitigar utilizando una menor relación agua-cemento.

En cuanto a fisuración, las vigas de concreto con agregado de concreto reciclado presentan un espaciamiento de fisuras menor frente a las vigas de concreto convencional, pero los anchos de las mismas son significativamente menores a los especificados en los códigos, cumpliendo a cabalidad con los requerimientos, en especial en lo concerniente a durabilidad (ancho de fisuras menor a 0,3 mm).

Observó que no hay diferencias significativas en el momento de fluencia ni en el momento último, las curvas carga-deflexión son similares, hay similitud en las cargas de falla experimentales y teóricas; por lo tanto son aplicables los mismos métodos de diseño. Se obtuvieron momentos de fisuración ligeramente menores en los elementos de concreto con agregado de concreto reciclado frente a los de concreto convencional; sin embargo, el concreto con agregado de concreto reciclado es aplicable, sin limitaciones, en elementos estructurales de concreto reforzado sometidos a flexión.

## Ensayos a cortante

González Fonteoba [Ref. 14] utilizó un concreto convencional y un concreto con agregado de concreto reciclado en los que se sustituyó el 50% del agregado grueso natural por agregado de concreto reciclado. Además utilizó un concreto convencional con el 8% de humo de sílice añadido y ese mismo concreto con agregado de concreto reciclado. Con estos concretos se fabricaron dieciséis vigas que se ensayaron hasta rotura por cortante. Las vigas presentaban diferentes cuantías de armadura transversal.

En cuanto a la fisuración se observó que, independientemente del material, no hay relación entre el cortante de fisuración y la cuantía de armadura transversal dispuesta. Se constató que los fenómenos de desprendimiento tenían lugar, en especial, en aquellas vigas que incorporaban agregados de concreto reciclado, lo que se mitigaba con la inclusión de humo de sílice en la dosificación del concreto con agregado de concreto reciclado. Se observó además que no todas las vigas alcanzaron la plastificación, sólo el 25% de las vigas ensayadas la alcanzaron.

Se observó que a medida que aumenta la cuantía de armadura transversal (disminución de la separación entre estribos), aumenta el valor del cortante de plastificación. Sin embargo, un aumento de la cuantía conseguida a base de aumentar el diámetro de los estribos (igual separación entre ellos) produjo valores de carga de plastificación menores.

Por otra parte, Etxeberria Larrañaga [Ref. 11] ensayó doce vigas, agrupadas en cuatro series (concreto convencional, concreto con sustitución del agregado grueso natural por agregado de concreto reciclado en porcentajes de 25%, 50% y 100%) con tres diferentes cuantías de armadura transversal, que se ensayaron hasta rotura por cortante.

Los resultados obtenidos indican pequeñas diferencias de comportamiento entre los diferentes concretos, sobre todo en situación de rotura, diferencias que aumentan cuando se analiza la fisuración. En concretos con altos porcentajes de agregado de concreto reciclado la fisuración se origina a cargas inferiores.

La forma de rotura de las vigas con diferentes porcentajes de agregado de concreto reciclado y la misma cuantía de armadura transversal es similar.

Para las vigas sin armadura transversal, se puede decir que las de concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 25% tienen la misma resistencia a cortante que las de concreto convencional. Sin embargo las vigas con sustituciones del 50% y 100% tienen un 12% y 17% menos de resistencia a cortante respectivamente con respecto a las vigas de concreto convencional.

El comportamiento de vigas con armadura transversal y diferentes porcentajes de agregado de concreto reciclado es muy similar a las vigas de concreto convencional, con una reducción máxima de un 10% en la capacidad resistente a cortante.

Yagashita [Ref. 12] realizó dos tipos de ensayo a cortante: cortante estático y cortante a fatiga.

Los resultados obtenidos de los ensayos a cortante estático revelan que, aunque el cortante último es similar en todas las vigas, el cortante en el momento de aparición de la primera fisura es inferior en las vigas que incorporan agregado de concreto reciclado. Las deflexiones son muy similares en todas las vigas; sin embargo, los anchos de fisura en las vigas con concreto con agregado de concreto reciclado son mayores.

En cuanto a los ensayos a cortante con ciclos de carga se observa que en todas las vigas se produce una marcada reducción de rigidez en los primeros ciclos de carga y mientras que en las vigas con agregados convencionales el valor alcanzado se mantiene, en las que incorporan agregado de concreto reciclado las pérdidas continúan a medida que aumentan los ciclos. La fisuración por cortante en todas las vigas aparece mucho antes de llegar al último ciclo.

En los ensayos de Mukai [Ref. 13] los resultados obtenidos revelan que se ajustan bien a las expresiones de cálculo de la normativa japonesa. Al igual que en el caso de la flexión las predicciones normativas de cortante último pueden ser aplicadas a los nuevos concretos ya que proporcionan resultados que, en todos los casos, suponen una reserva de seguridad,

En cuanto a la fisuración, sin embargo, si se han encontrado diferencias de comportamiento, incluso para sustitución del 50% del agregado grueso. La fisuración en los concretos con agregado reciclado se produce para porcentajes de carga última menores que los de los concretos convencionales. Este efecto se manifiesta de forma más notable cuando se aplican ciclos de carga.

Del estudio de deflexiones se concluye que los concretos con agregado de concreto reciclado, incluso con el 100% de sustitución del agregado natural, presentan comportamientos similares a los convencionales.<sup>31</sup>

---

<sup>31</sup> Ibid. Pag. 130, 134-145.

#### **4. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

El trabajo de grado estuvo articulado con la asignatura y las prácticas de laboratorio de Comportamiento Plástico de Estructuras de Concreto del Posgrado en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por tal motivo las actividades se ejecutaron en total sincronía con la programación definida para la mencionada asignatura.

La mencionada articulación del presente trabajo de grado con una asignatura influyó en el programa experimental, por lo que se buscó tener para un mismo tipo de elemento estructural diferentes mecanismos de falla, de esta manera se favoreció el estudio amplio de elementos estructurales de concreto reforzado con agregado grueso de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado natural bajo diversas condiciones.

Este porcentaje de sustitución se definió una vez revisada la información pertinente, ya que las experiencias previas de otros países indican que para el mencionado porcentaje de sustitución se obtienen resultados satisfactorios sin afectar considerablemente las propiedades físico-mecánicas del concreto estructural. Adicionalmente, éste porcentaje de sustitución fue el valor óptimo resultante de una investigación previa de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito titulada “Concreto sostenible como alternativa estructural, ambiental y económica en la construcción de obras civiles” y desarrollada por el Ing. Nestor Raúl Bojacá Castañeda. [Ref. 2]

A fin de comparar resultados se planteó la elaboración de muestras similares de concreto con agregado de concreto reciclado y de concreto convencional o de control, para cada uno de los tipos de elementos estructurales, a saber, vigas continuas, placas apoyadas en tres bordes, vigas altas y ménsulas; se seleccionaron estos tipos de elementos estructurales por estar incluidos dentro del programa académico de la asignatura anteriormente citada: Comportamiento Plástico de Estructuras de Concreto.

En la totalidad de elementos estructurales se utilizaron el mismo tipo de agregados de concreto reciclado empleados en la investigación de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito titulada “Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado” desarrollada por el Ing. Nestor Raúl Bojacá Castañeda [Ref.8], los correspondientes diseños de mezclas y las propiedades físicas de los agregados empleados se encuentran en los anexos de cada tipo de elemento estructural ensayado.

#### **Ensayos de laboratorio realizados a elementos estructurales**

Se ensayaron los elementos estructurales que se mencionan a continuación a manera de resumen; para información más detallada es pertinente consultar los

capítulos particulares de cada elemento estructural, en los cuales se incluyen materiales, cantidad y tipo de muestras, esquemas geométricos y de refuerzo, montaje y procedimiento de ensayo, entre otros.

### Vigas continuas

Se ensayaron vigas con un apoyo intermedio y con luces entre apoyos de 2,50 m cargadas con dos cargas puntuales de igual magnitud cada una de estas localizada a 1,10 m del apoyo central buscando simetría en el montaje.

Esta configuración se eligió para permitir la formación de articulaciones plásticas y comprobar experimentalmente que con disposiciones diferentes del acero de refuerzo se pueden alcanzar resistencias similares; todo esto avalado por los conceptos de análisis plástico de estructuras.

Se ensayaron en total 6 vigas; tres de concreto convencional y tres de concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso. Se utilizaron los mismos tres tipos de refuerzo para cada tipo de concreto, los tipos de refuerzo se establecieron de la siguiente manera a fin de permitir la formación de diversos mecanismos de falla como se mencionó con anterioridad; en el tipo 1 se dispuso mayor refuerzo para momento negativo y un refuerzo mínimo para momento positivo, en el tipo 2 se dispuso mayor acero de refuerzo para momento positivo y un refuerzo mínimo para momento negativo y en el tipo 3 se planteó un acero de refuerzo similar al proporcionado por medio de la teoría elástica.

La sección planteada de acuerdo a las formaletas disponibles en el laboratorio de materiales correspondió a una base de 20 cm y una altura de 22 cm; el acero de refuerzo tuvo un recubrimiento de 4 cm medido desde el centro del acero de refuerzo longitudinal.

### Placas apoyadas en tres bordes

Se ensayaron placas de concreto reforzado apoyadas sobre tres bordes (los dos cortos y uno largo).

Las dimensiones planteadas fueron 2,00 x 0,90 x 0,03 m. y el ancho de los apoyos fue 6,35 cm.; de acuerdo a los soportes con los que cuenta el laboratorio de materiales.

Se ensayaron en total 4 placas (2 de concreto convencional y 2 de concreto con agregado reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso).

Se utilizaron los mismos dos tipos de refuerzo para cada tipo de concreto.



Refuerzo Tipo 1:

Grafiles  $\varnothing$  6 mm. en dirección del lado mayor. Separación de barras: 15 cm.

Refuerzo Tipo 2:

Malla  $\varnothing$  3 mm. cada 15 cm. en dos direcciones.

Estas configuraciones de refuerzo se adoptaron para propiciar la presentación de diferentes formas de falla correspondientes a armadura en una sola dirección y armadura en las dos direcciones.

### Vigas Altas

En total se ensayaron 4 Vigas prismáticas (dos de concreto convencional y dos de concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso) de 145 x 50 cm y espesor 6 cm. Todas con armadura longitudinal inferior de dos barras No. 3 y dos con armadura adicional, así:

Muestras Tipo 1: Sin armadura adicional

Muestras Tipo 2: Grafil  $\Phi$  5 mm. Cada 9 cm. Vertical.

Como ya es habitual, estas configuraciones de refuerzo se adoptaron para propiciar la presentación de diferentes formas de falla; en éste caso particular para analizar la incidencia de tener o no tener armadura vertical este tipo de elementos estructurales.

### Ménsulas

En total se ensayaron 4 ménsulas (dos de concreto convencional y dos de concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso).

Se utilizaron elementos en forma de T invertida (ménsula doble), formada por un travesaño de 80 x 30 cm y una columneta de 15 cm de longitud, espesor uniforme de 20 cm.

Armadura: en todos los casos, en el travesaño: tres barras inferiores, longitudinales, No. 5, y dos flejes paralelos a ellas, colocadas a distancia de 8.5 cm, en varilla No. 3. La diferencia de los dos tipos de ménsulas estriba en el anclaje de la armadura del travesaño. Esto para analizar la incidencia de los tipos de anclaje (soldadura y ganchos a 90°).

Adicionalmente, en todos los casos se ensayaron los cilindros de testigo para cada tipo de concreto en cuanto a resistencia a la compresión con módulo de elasticidad y asimismo se estimó el peso específico. Estos resultados se pueden consultar en los anexos de los capítulos correspondientes a cada tipo de elemento estructural.

Para la correcta realización de los ensayos fueron necesarios los equipos del laboratorio de materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y los materiales constitutivos de los elementos estructurales en concreto reforzado; la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito dentro de los recursos de la asignatura Comportamiento Plástico de Estructuras de Concreto contó con la disponibilidad de los mismos y la mano de obra adicional para la construcción de los elementos estructurales fue suministrada por el autor.

## 5. CÁLCULOS, ENSAYOS Y RESULTADOS

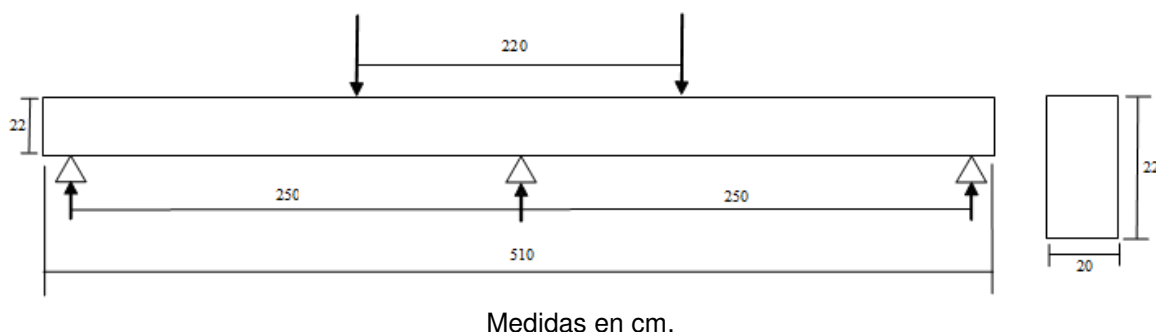
En éste capítulo se presentan los cálculos, ensayos y resultados obtenidos para cada uno de los elementos estructurales estudiados: vigas continuas, placas apoyadas en tres bordes, vigas altas y ménsulas; así mismo, se presentarán conclusiones y observaciones independientes para cada tipo de elemento estructural que posteriormente se sintetizarán y plasmarán como conclusiones y recomendaciones generales en el capítulo 6.

### 5.1- VIGAS CONTINUAS

#### 5.1-1. GENERALIDADES DE LOS ENSAYOS

Se ensayaron vigas con un apoyo intermedio y con luces entre apoyos de 2,50 m cargada con dos cargas puntuales de igual magnitud cada una de estas localizada a 1,10 m del apoyo central buscando simetría en el montaje.

A continuación se presenta un esquema del elemento estructural.



**Gráfica 1. Esquema vigas continuas**

### Materiales

Se utilizó concreto convencional para el concreto de control y concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso.

La resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y peso unitario se relacionan en seguida, estos valores corresponden al promedio del ensayo de tres (3) cilindros (ver anexo 1).

#### Concreto convencional (CC)

Fecha de fundida  
Fecha de ensayo

Agosto 28 de 2010  
Septiembre 22 de 2010

Edad concreto ensayado	25 días
Resistencia a la compresión promedio	33,4 MPa
Módulo de elasticidad	20754 MPa
Peso unitario	2288 kg/m <sup>3</sup>

#### Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

Fecha de fundida	Septiembre 6 de 2010
Fecha de ensayo	Septiembre 22 de 2010
Edad concreto ensayado	16 días
Resistencia a la compresión promedio	23,9 MPa
Módulo de elasticidad	20038 MPa
Peso unitario	2277 kg/m <sup>3</sup>

#### Acero de refuerzo

- Longitudinal

Acero PDR-60 Sismo resistente de fabricación nacional, se caracteriza por sus marcas que definen el fabricante, la resistencia y el diámetro de cada barra. Son barras corrugadas que tienen como distintivo dos nervios longitudinales unidos entre sí por resaltantes transversales, los que forman un ángulo de 75° con el eje de la barra. El acero PDR-60 cumple con los requisitos de la norma ASTM A706M y NTC 2289 que cubre barras corrugadas de acero de baja aleación, destinadas a aplicaciones donde se requieren propiedades controladas de tracción, de soldabilidad, o de ambas.

Límite de fluencia	$f_y = 443 \text{ MPa}$
Resistencia a la tracción	$F_u = 640 \text{ MPa}$

Alambre grafilado	$f_y = 643 \text{ MPa}$	$F_u = 718 \text{ MPa}$
-------------------	-------------------------	-------------------------

- Transversal

Alambre grafilado	$f_y = 643 \text{ MPa}$	$F_u = 718 \text{ MPa}$
-------------------	-------------------------	-------------------------

Los anteriores valores corresponden al promedio de los ensayos realizados al acero de refuerzo, a saber 2 muestras de grafiles y 3 de barras (ver anexo 2).

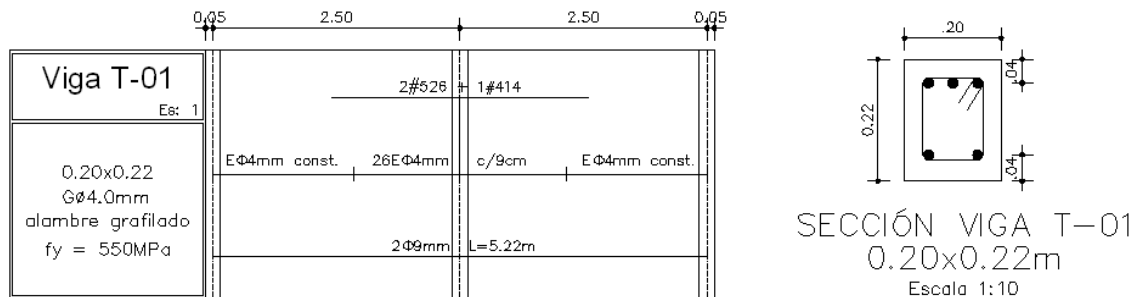
#### **Cantidad y tipo de muestras**

Se ensayaron en total 6 vigas; tres de concreto convencional y tres de concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado

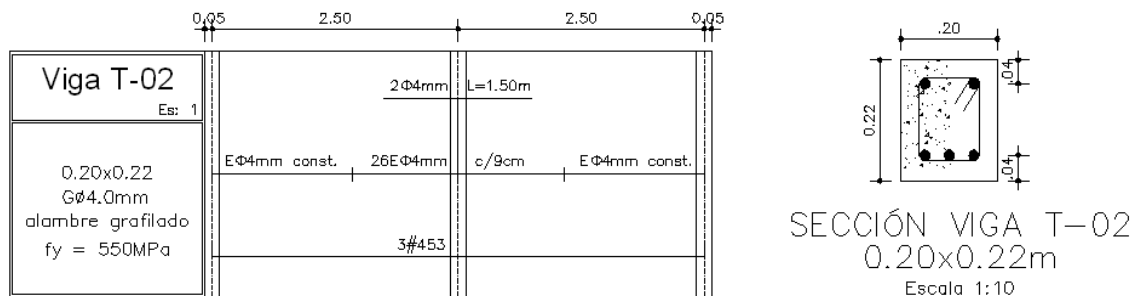
grueso, a fin de comparar los resultados de cada tipo de muestra. Se utilizaron los mismos tres tipos de refuerzo para cada tipo de concreto (ver anexo 5).

La sección planteada de acuerdo a las formaletas disponibles en el laboratorio de materiales correspondió a una base de 20 cm y una altura de 22 cm; el acero de refuerzo tuvo un recubrimiento de 4 cm medido desde el centro del acero de refuerzo longitudinal.

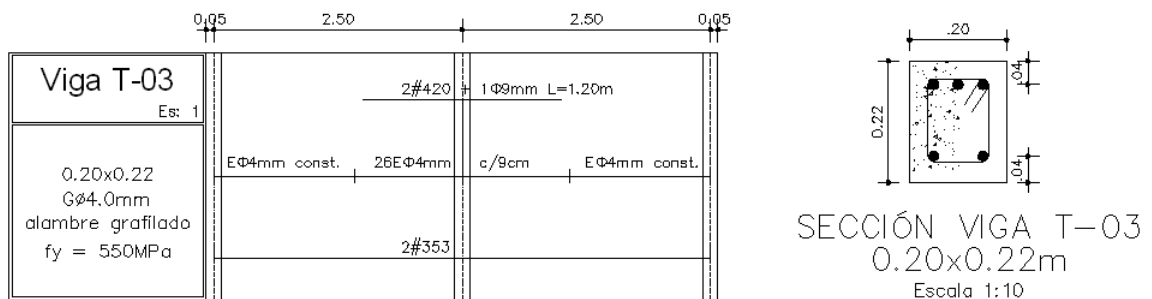
A continuación se presentan los esquemas de los tres tipos de disposición del acero de refuerzo:



**Gráfica 2. Refuerzo vigas continuas Tipo 1**



**Gráfica 3. Refuerzo vigas continuas Tipo 2**

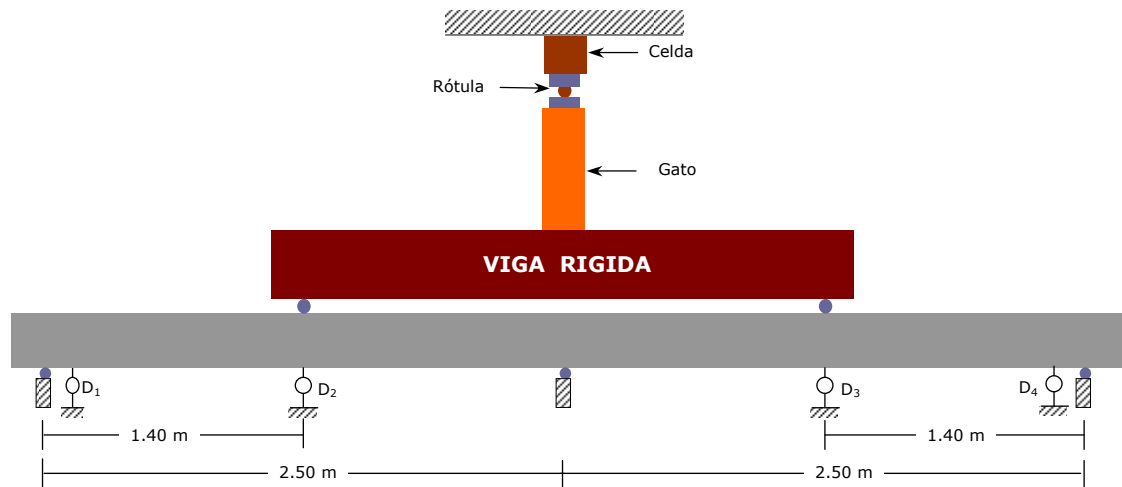


**Gráfica 4. Refuerzo vigas continuas Tipo 3**

Las anteriores disposiciones del acero de refuerzo se realizaron a fin de permitir la formación de diversos mecanismos de falla; en el tipo 1 se dispuso mayor refuerzo para momento negativo y un refuerzo mínimo para momento positivo, en el tipo 2 se dispuso mayor acero de refuerzo para momento positivo y un refuerzo mínimo para momento negativo y en el tipo 3 se planteó un acero de refuerzo similar al proporcionado por medio de la teoría elástica.

## Metodología

A continuación se muestra un esquema del montaje del ensayo.



**Gráfica 5. Montaje ensayo vigas continuas**

El montaje se realizó sobre soportes metálicos y la carga se transmitió a partir de un gato hidráulico mediante una viga metálica rígida.

Una vez realizado el montaje se inspeccionaron cuidadosamente las seis superficies de la muestra con el fin de detectar posibles defectos de construcción y agrietamientos.

Se instalaron dos deformímetros mecánicos debajo de las vigas en las zonas de carga y dos cercanos a los apoyos extremos.

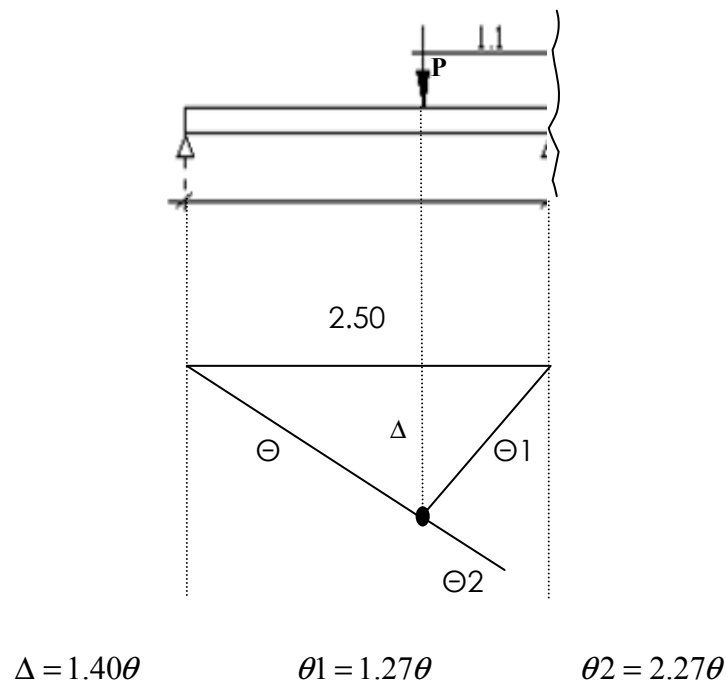
Se realizó un registro fotográfico del montaje y de cada una de las vigas ensayadas (ver anexo 3 incluye proceso constructivo).

Se pusieron en cero las carátulas de los deformímetros mecánicos y se aplicó lentamente una pequeña carga exclusivamente para comprobar el funcionamiento de los mismos. Luego se descargó totalmente y se devolvieron las carátulas a la indicación de cero.

En seguida se procedió a la aplicación de la carga mediante el gato hidráulico en incrementos de 10 unidades de carga en los que se midieron las respectivas deformaciones. Así mismo, se observó la aparición y avance de las grietas en las dos caras de la viga y se registraron las cargas en las que ocurrieron. La curva de calibración de la celda de carga de 100 Toneladas utilizada en el ensayo se muestra en el anexo 4. El anterior proceso se llevó a cabo hasta que las vigas fallaron por aplicación de carga.

### 5.1-2. CÁLCULO TEÓRICO DE LAS CARGAS DE FALLA

Como primera medida se evalúa la viga por el método del trabajo virtual, para tal fin se considera la mitad de la viga para hacer una simplificación por simetría



**Gráfica 6. Esquema método del trabajo virtual**

$$W_{ext} = P * \Delta = P * 1.40\theta$$

$$W_{int} = M_{Luz} * \theta_2 + M_{Apoyo} * \theta_1$$

$$W_{int} = M_{Luz} * 2.27\theta + M_{Apoyo} * 1.27\theta$$

Trabajo externo = Trabajo interno

$$P * 1.40\theta = M_{Luz} * 2.27\theta + M_{Apoyo} * 1.27\theta$$

$$P = 1.62 * M_{Luz} + 0.91 * M_{Apoyo}$$

En seguida se evalúa la resistencia para cada tipo de disposición de acero de refuerzo utilizando las ecuaciones deducidas con anterioridad; las diferencias dimensionales de las vigas y de los montajes se consideran despreciables por tanto se generalizan los cálculos, estos se realizan sin utilizar factores de carga ni de resistencia a fin de encontrar los valores correspondientes al estado de falla.

### **Concreto convencional (CC)**

#### **Viga Tipo 1 CC**

Momento resistente negativo

$$A_s = 2\#5 + 1\#4 = 2 * 198 + 127 = 523 \text{mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{523 * 443}{0.85 * 33.4 * 200} = 41 \text{mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 523 * 443 * \left(180 - \frac{41}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 36.98 \text{kN} - \text{m} = 3.77 \text{Ton} - \text{m}$$

Momento resistente positivo

$$A_s = 2\phi 9 \text{mm} = 2 * 64 = 128 \text{mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{128 * 443}{0.85 * 33.4 * 200} = 10 \text{mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 128 * 443 * \left(180 - \frac{10}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 9.92 \text{kN} - \text{m} = 1.01 \text{Ton} - \text{m}$$

Carga resistente estimada

$$P = 1.62 * M_{Luz} + 0.91 * M_{Apoyo}$$

$$P = 1.62 * (9.92 - 0.33) + 0.91 * (36.98 - 0.77) - 1.00$$

$$P = 47.49 \text{kN} = 4.84 \text{Ton}$$

*Nótese que se descontaron los momentos actuantes debidos al peso propio de la viga de concreto y por otra parte se descontó el peso de la viga metálica.*

Para dar claridad en el cálculo de los mencionados descuentos a continuación se detallan:



Analizando estructuralmente la viga para una carga uniformemente repartida unitaria por metro lineal se obtiene que el momento positivo situado en los puntos de aplicación de las cargas es 0,33 kN-m y el momento negativo ubicado sobre el apoyo intermedio es 0,78 kN-m

Así mismo el peso propio de la viga por metro lineal corresponde al peso específico del concreto multiplicado por el área de la sección transversal.

$$w = 22,45\text{kN/m}^3 \cdot 0,20\text{m} \cdot 0,22\text{m} = 0,988 \text{ kN/m}$$

Sabiendo que el momento máximo calculado para una carga unitaria es función de la magnitud de la misma basta con afectar dichos valores por la carga real calculada con anterioridad.

$$M_{Luz} = 0,33 \text{ kN-m} \cdot 0,988 = 0,33 \text{ kN-m}$$

$$M_{Apoyo} = 0,78 \text{ kN-m} \cdot 0,988 = 0,77 \text{ kN-m}$$

El peso de la viga metálica se estimó de acuerdo al tipo de perfil y a su longitud en 1 kN.

Como se puede observar los valores utilizados para el cálculo de la carga resistente estimada obedecen a los resultados anteriores.

Carga total estimada

$$P = 47,49 \cdot 2 = 94,98 \text{ kN} = 9,68 \text{ Ton}$$

Resistencia a cortante estimada

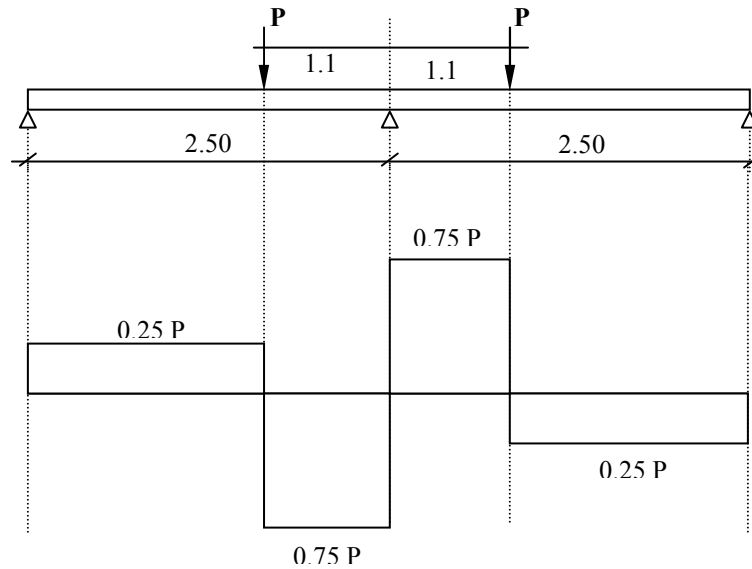
$$v_c = \frac{\sqrt{f'c}}{6} \quad v_s = \frac{Av \cdot fy}{b \cdot s}$$

Con base a la formulación de los esfuerzos anteriores se calcularon las siguientes Fuerzas Cortantes concordante con lo estipulado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

Utilizando EΦ4mm estribo cerrado (dos ramas) cada 9 cm

Vc (kN) =	34,68	3,53	Ton
Vs (kN) =	33,44	3,41	Ton
Vn (kN) =	68,11	6,94	Ton

A continuación se presenta la sollicitación a cortante de la viga:



**Gráfica 7. Sollicitación a cortante CC – vigas continuas**

$$V_{\max} = 0.75 * P$$

$$P = 68.11 \text{ kN} / 0.75$$

$$P = 90.81 \text{ kN} = 9.26 \text{ Ton}$$

Resistencia total estimada

$$P = 90.81 * 2 = 181.62 \text{ kN} = 18.51 \text{ Ton} > 9.68 \text{ Ton} \rightarrow \text{Se garantiza falla por flexión}$$

### Viga Tipo 2 CC

Momento resistente negativo

$$A_s = 2\phi 4 \text{ mm} = 2 * 13 = 26 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{26 * 643}{0.85 * 33.4 * 200} = 3 \text{ mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 26 * 643 * \left(180 - \frac{3}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 2.98 \text{ kN} - \text{m} = 0.30 \text{ Ton} - \text{m}$$

### Momento resistente positivo

$$A_s = 3\#4 = 3 * 127 = 381 \text{mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{381 * 443}{0.85 * 33,4 * 200} = 30 \text{mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 381 * 443 * \left(180 - \frac{30}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 27.87 \text{kN} - \text{m} = 2.84 \text{Ton} - \text{m}$$

### Carga resistente estimada

$$P = 1.62 * M_{Luz} + 0.91 * M_{Apoyo}$$

$$P = 1.62 * (27.87 - 0.33) + 0.91 * (2.98 - 0.77) - 1.00$$

$$P = 45.63 \text{kN} = 4.65 \text{Ton}$$

*Nótese que se descontaron los momentos actuantes debidos al peso propio de la viga de concreto y por otra parte se descontó el peso de la viga metálica; los valores descontados obedecen a los cálculos presentados con anterioridad.*

### Carga total estimada

$$**P = 45,63 * 2 = 91,26 \text{ kN} = 9,30 \text{ Ton}**$$

### Resistencia a cortante estimada

Idéntico al cálculo mostrado para la viga tipo 1 CC

### Resistencia total estimada

$$P = 90,81 * 2 = 181,62 \text{ kN} = 18,51 \text{ Ton} > 9,30 \text{ Ton} \rightarrow \text{Se garantiza falla por flexión}$$

## Viga Tipo 3 CC

### Momento resistente negativo

$$A_s = 2\#4 + 1\phi 9 \text{mm} = 2 * 127 + 64 = 318 \text{mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{318 * 443}{0.85 * 33,4 * 200} = 25 \text{mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 318 * 443 * \left(180 - \frac{25}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 23.61 \text{kN} - \text{m} = 2.41 \text{Ton} - \text{m}$$

Momento resistente positivo

$$A_s = 2\#3 = 2 * 71 = 142 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{142 * 443}{0.85 * 33,4 * 200} = 11 \text{ mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 142 * 443 * \left(180 - \frac{11}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 10.97 \text{ kN} - \text{m} = 1.12 \text{ Ton} - \text{m}$$

Carga resistente estimada

$$P = 1.62 * M_{Luz} + 0.91 * M_{Apoyo}$$

$$P = 1.62 * (10.97 - 0.33) + 0.91 * (23.61 - 0.77) - 1.00$$

$$P = 37.02 \text{ kN} = 3.77 \text{ Ton}$$

*Nótese que se descontaron los momentos actuantes debidos al peso propio de la viga de concreto y por otra parte se descontó el peso de la viga metálica; los valores descontados obedecen a los cálculos presentados con anterioridad.*

Carga total estimada

$$**P = 37,02*2 = 74,04 kN = 7,55 Ton**$$

Resistencia a cortante estimada

Idéntico al cálculo mostrado para la viga tipo 1 CC

Resistencia total estimada

$$P = 90,81*2 = 181,62 \text{ kN} = 18,51 \text{ Ton} > 7,55 \text{ Ton} \rightarrow \text{Se garantiza falla por flexión}$$

## Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

### Viga Tipo 1 CR

Momento resistente negativo

$$A_s = 2\#5 + 1\#4 = 2 * 198 + 127 = 523 \text{mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{523 * 443}{0.85 * 23,9 * 200} = 57 \text{mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 523 * 443 * \left(180 - \frac{57}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 35.10 \text{kN} - \text{m} = 3.58 \text{Ton} - \text{m}$$

Momento resistente positivo

$$A_s = 2\phi 9 \text{mm} = 2 * 64 = 128 \text{mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{128 * 443}{0.85 * 23,9 * 200} = 14 \text{mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 128 * 443 * \left(180 - \frac{14}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 9.81 \text{kN} - \text{m} = 1.00 \text{Ton} - \text{m}$$

Carga resistente estimada

$$P = 1.62 * M_{Luz} + 0.91 * M_{Apoyo}$$

$$P = 1.62 * (9.81 - 0.32) + 0.91 * (35.10 - 0.77) - 1.00$$

$$P = 45.61 \text{kN} = 4.65 \text{Ton}$$

*Nótese que se descontaron los momentos actuantes debidos al peso propio de la viga de concreto y por otra parte se descontó el peso de la viga metálica.*

Para dar claridad en el cálculo de los mencionados descuentos a continuación se detallan:

Analizando estructuralmente la viga para una carga uniformemente repartida unitaria por metro lineal se obtiene que el momento positivo situado en los puntos de aplicación de las cargas es 0,33 kN-m y el momento negativo ubicado sobre el apoyo intermedio es 0,78 kN-m

Así mismo el peso propio de la viga por metro lineal corresponde al peso específico del concreto multiplicado por el área de la sección transversal.

$$w = 22,34 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,20 \text{ m} \cdot 0,22 \text{ m} = 0,983 \text{ kN/m}$$

Sabiendo que el momento máximo calculado para una carga unitaria es función de la magnitud de la misma basta con afectar dichos valores por la carga real calculada con anterioridad.

$$M_{Luz} = 0,33 \text{ kN-m} \cdot 0,983 = 0,32 \text{ kN-m}$$

$$M_{Apoyo} = 0,78 \text{ kN-m} \cdot 0,983 = 0,77 \text{ kN-m}$$

El peso de la viga metálica se estimó de acuerdo al tipo de perfil y a su longitud en 1 kN.

Como se puede observar los valores utilizados para el cálculo de la carga resistente estimada obedecen a los resultados anteriores.

Carga total estimada

$$P = 45,61 \cdot 2 = 91,22 \text{ kN} = 9,30 \text{ Ton}$$

Resistencia a cortante estimada

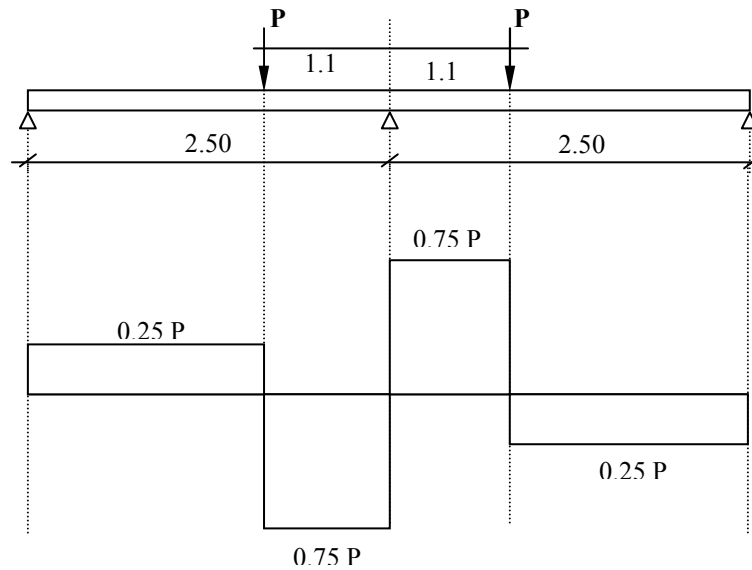
$$v_c = \frac{\sqrt{f'c}}{6} \quad v_s = \frac{A_v \cdot f_y}{b \cdot s}$$

Con base a la formulación de los esfuerzos anteriores se calcularon las siguientes Fuerzas Cortantes concordante con lo estipulado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

Utilizando EΦ4mm estribo cerrado (dos ramas) cada 9 cm

Vc (kN) =	29,33	2,99	Ton
Vs (kN) =	33,44	3,41	Ton
Vn (kN) =	62,77	6,40	Ton

A continuación se presenta la sollicitación a cortante de la viga:



**Gráfica 8. Sollicitación a cortante CR – vigas continuas**

$$V_{\max} = 0.75 * P$$

$$P = 62.77 \text{ kN} / 0.75$$

$$P = 83.69 \text{ kN} = 8.53 \text{ Ton}$$

Resistencia total estimada

$$P = 83,69 * 2 = 167,38 \text{ kN} = 17,06 \text{ Ton} > 9,30 \text{ Ton} \rightarrow \text{Se garantiza falla por flexión}$$

### Viga Tipo 2 CR

Momento resistente negativo

$$A_s = 2\phi 4 \text{ mm} = 2 * 13 = 26 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{26 * 643}{0.85 * 23,9 * 200} = 4 \text{ mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 26 * 643 * \left(180 - \frac{4}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 2.97 \text{ kN} - \text{m} = 0.30 \text{ Ton} - \text{m}$$

### Momento resistente positivo

$$A_s = 3\#4 = 3 * 127 = 381 \text{mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{381 * 443}{0.85 * 33,4 * 200} = 42 \text{mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 381 * 443 * \left(180 - \frac{42}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 26.88 \text{kN} - \text{m} = 2.74 \text{Ton} - \text{m}$$

### Carga resistente estimada

$$P = 1.62 * M_{Luz} + 0.91 * M_{Apoyo}$$

$$P = 1.62 * (26.88 - 0.32) + 0.91 * (2.97 - 0.77) - 1.00$$

$$P = 44.03 \text{kN} = 4.49 \text{Ton}$$

*Nótese que se descontaron los momentos actuantes debidos al peso propio de la viga de concreto y por otra parte se descontó el peso de la viga metálica; los valores descontados obedecen a los cálculos presentados con anterioridad.*

### Carga total estimada

$$**P = 44,03*2 = 88,06 kN = 8,98 Ton**$$

### Resistencia a cortante estimada

Idéntico al cálculo mostrado para la viga tipo 1 CR

### Resistencia total estimada

$$P = 83,69*2 = 167,38 \text{kN} = 17,06 \text{Ton} > 8,98 \text{Ton} \rightarrow \text{Se garantiza falla por flexión}$$

## Viga Tipo 3 CR

### Momento resistente negativo

$$A_s = 2\#4 + 1\phi 9 \text{mm} = 2 * 127 + 64 = 318 \text{mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{318 * 443}{0.85 * 23,9 * 200} = 35 \text{mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 318 * 443 * \left(180 - \frac{35}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 22.92 \text{kN} - \text{m} = 2.34 \text{Ton} - \text{m}$$



Momento resistente positivo

$$A_s = 2\#3 = 2 * 71 = 142 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{142 * 443}{0.85 * 23,9 * 200} = 15 \text{ mm}$$

$$M = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 142 * 443 * \left(180 - \frac{15}{2}\right) / 1000000$$

$$M = 10.84 \text{ kN} - \text{m} = 1.10 \text{ Ton} - \text{m}$$

Carga resistente estimada

$$P = 1.62 * M_{Luz} + 0.91 * M_{Apoyo}$$

$$P = 1.62 * (10.84 - 0.32) + 0.91 * (22.92 - 0.77) - 1.00$$

$$P = 36.20 \text{ kN} = 3.69 \text{ Ton}$$

*Nótese que se descontaron los momentos actuantes debidos al peso propio de la viga de concreto y por otra parte se descontó el peso de la viga metálica; los valores descontados obedecen a los cálculos presentados con anterioridad.*

Carga total estimada

$$P = 36,20 * 2 = 72,40 \text{ kN} = 7,38 \text{ Ton}$$

Resistencia a cortante estimada

Idéntico al cálculo mostrado para la viga tipo 1 CR

Resistencia total estimada

$$P = 83,69 * 2 = 167,38 \text{ kN} = 17,06 \text{ Ton} > 7,38 \text{ Ton} \rightarrow \text{Se garantiza falla por flexión}$$

## Resumen de cargas teóricas de falla estimadas

Concreto convencional (CC)

Refuerzo	P (kN)	P (Ton)	2P (kN)	2P (Ton)
Tipo 1	47,49	4,84	94,98	9,68
Tipo 2	45,63	4,65	91,26	9,30
Tipo 3	37,02	3,77	74,04	7,55

**Tabla 1. Cargas teóricas de falla CC – vigas continuas**

### Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

<b>Refuerzo</b>	<b>P (kN)</b>	<b>P (Ton)</b>	<b>2P (kN)</b>	<b>2P (Ton)</b>
Tipo 1	45,61	4,65	91,22	9,30
Tipo 2	44,03	4,49	88,06	8,98
Tipo 3	36,20	3,69	72,40	7,38

**Tabla 2. Cargas teóricas de falla CR – vigas continuas**

### Diferencias teóricas CC vs. CR

<b>Refuerzo</b>	<b>Dif. P (kN)</b>	<b>Dif. P (Ton)</b>	<b>Disminución</b>
Tipo 1	1,88	0,19	3,96%
Tipo 2	1,60	0,16	3,51%
Tipo 3	0,82	0,08	2,22%

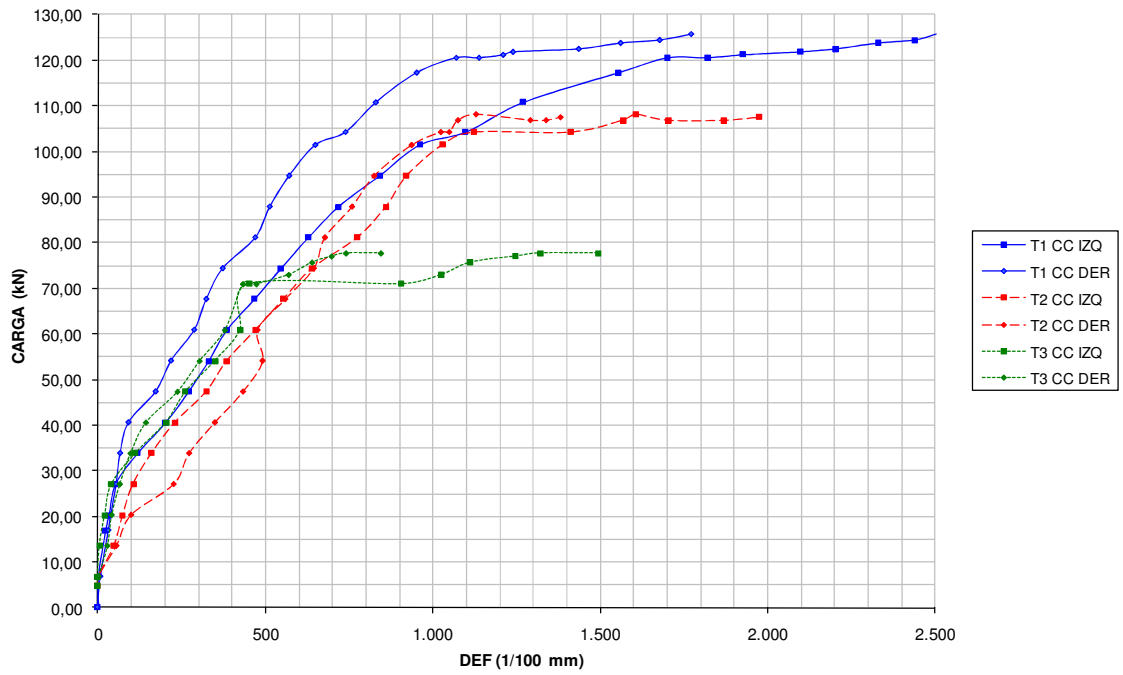
**Tabla 3. Diferencias teóricas CC vs. CR – vigas continuas**

La anterior tabla corresponde a la disminución teórica de la capacidad de carga del concreto con agregado de concreto reciclado frente al concreto convencional debida a la diferencia de resistencia a la compresión, ya que los elementos estructurales fueron fundidos en diferentes épocas (9 días de diferencia).

### **5.1-3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS**

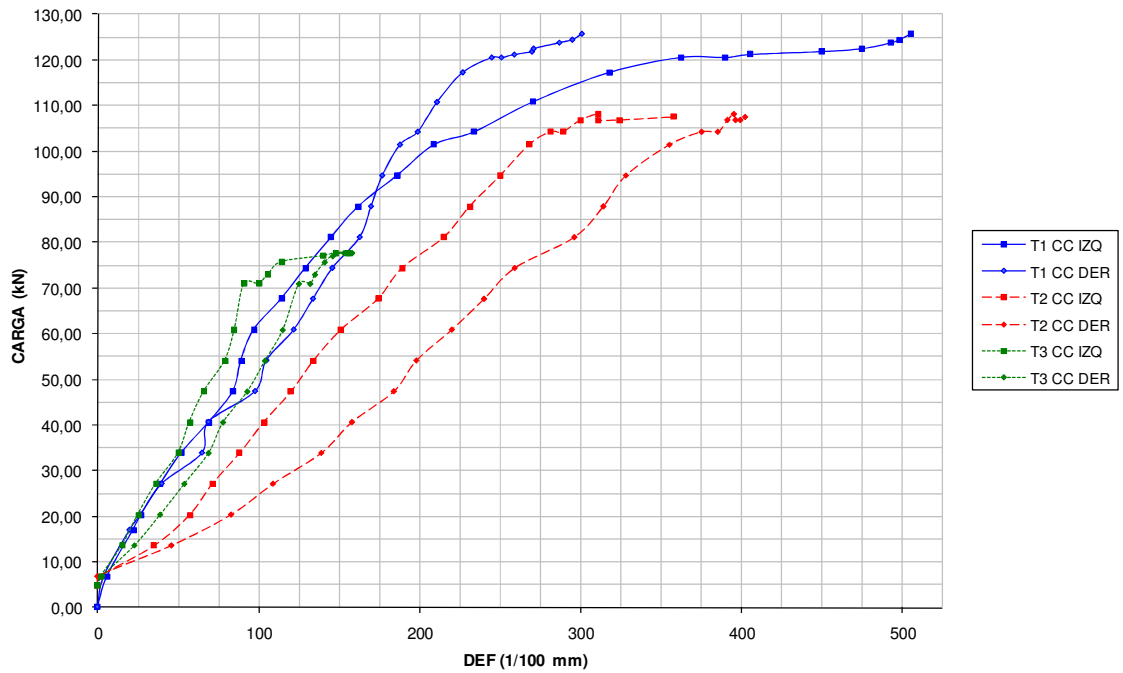
A continuación se presentan las gráficas Carga vs. Deformación de las vigas ensayadas y las comparaciones gráficas necesarias entre el concreto convencional (CC) y el concreto con agregado de concreto reciclado (CR). Los datos de los ensayos con los que se elaboraron las gráficas se encuentran detalladamente en el anexo 6.

CONCRETO CONVENCIONAL - DEFORMIMETROS BAJO CARGAS PUNTALES



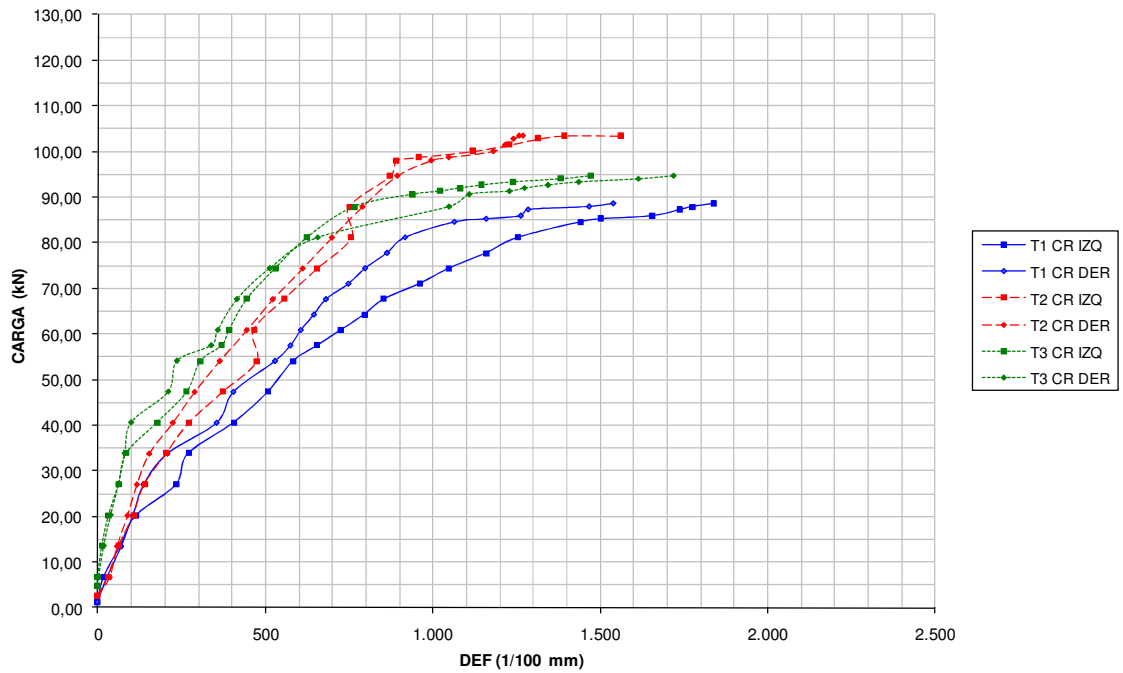
Gráfica 9. Carga vs. Deformación – vigas continuas CC – cargas puntuales

CONCRETO CONVENCIONAL - DEFORMIMETROS CERCANOS A LOS APOYOS



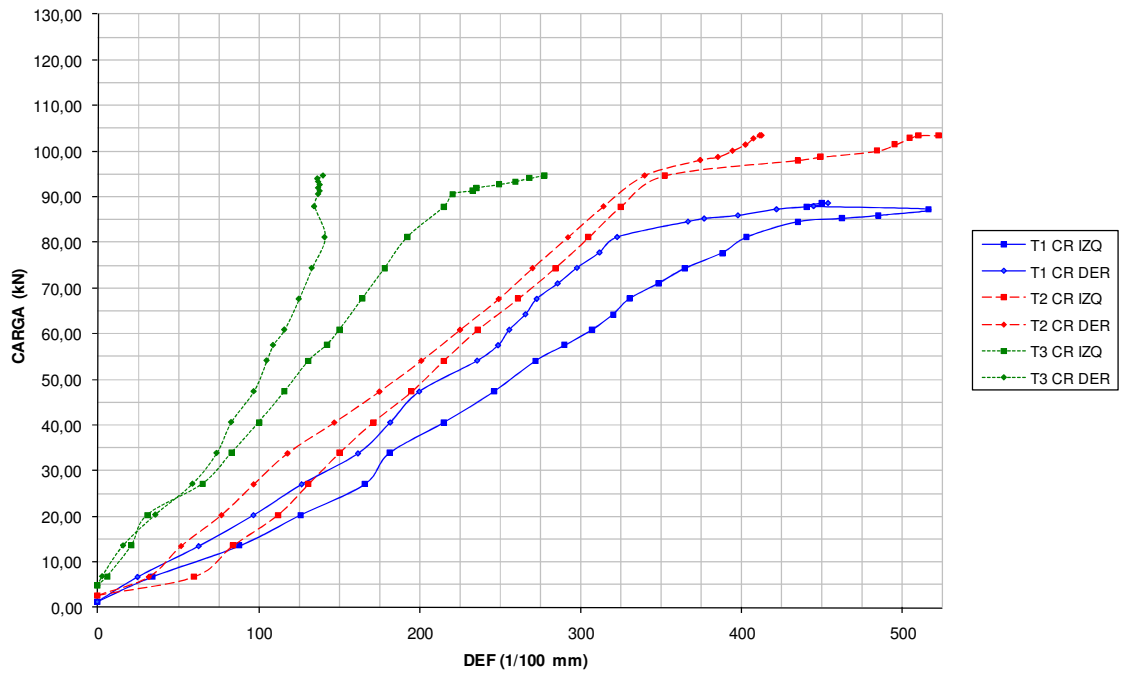
Gráfica 10. Carga vs. Deformación – vigas continuas CC – apoyos

CONCRETO RECICLADO - DEFORMIMETROS BAJO CARGAS PUNTALES



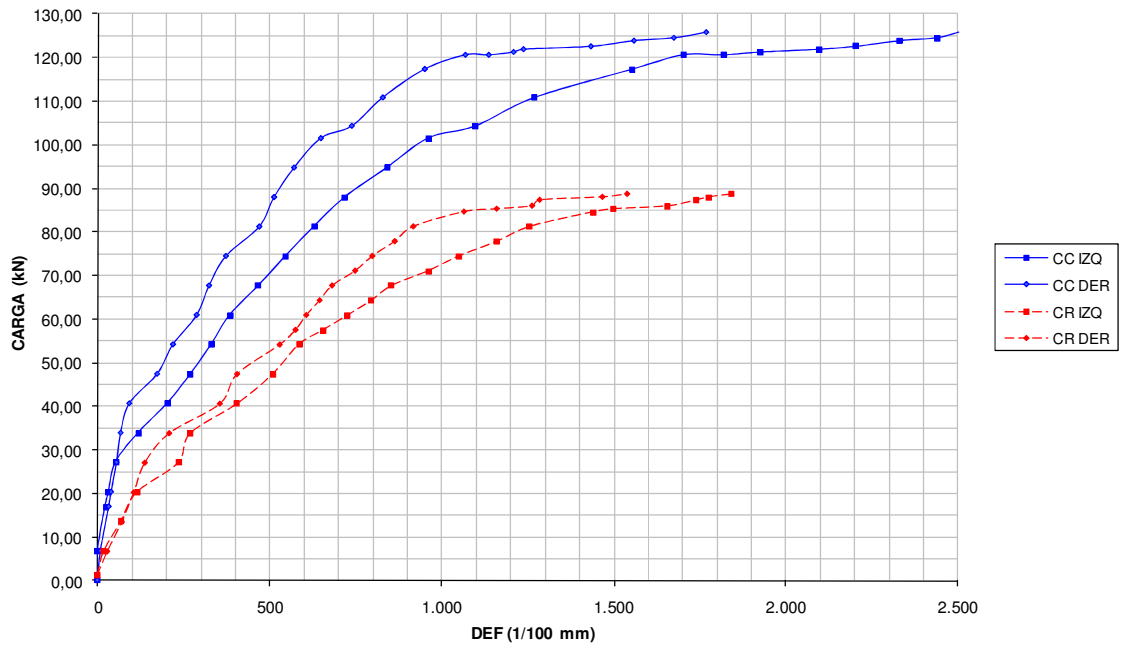
Gráfica 11. Carga vs. Deformación – vigas continuas CR – cargas puntuales

CONCRETO RECICLADO - DEFORMIMETROS CERCANOS A LOS APOYOS



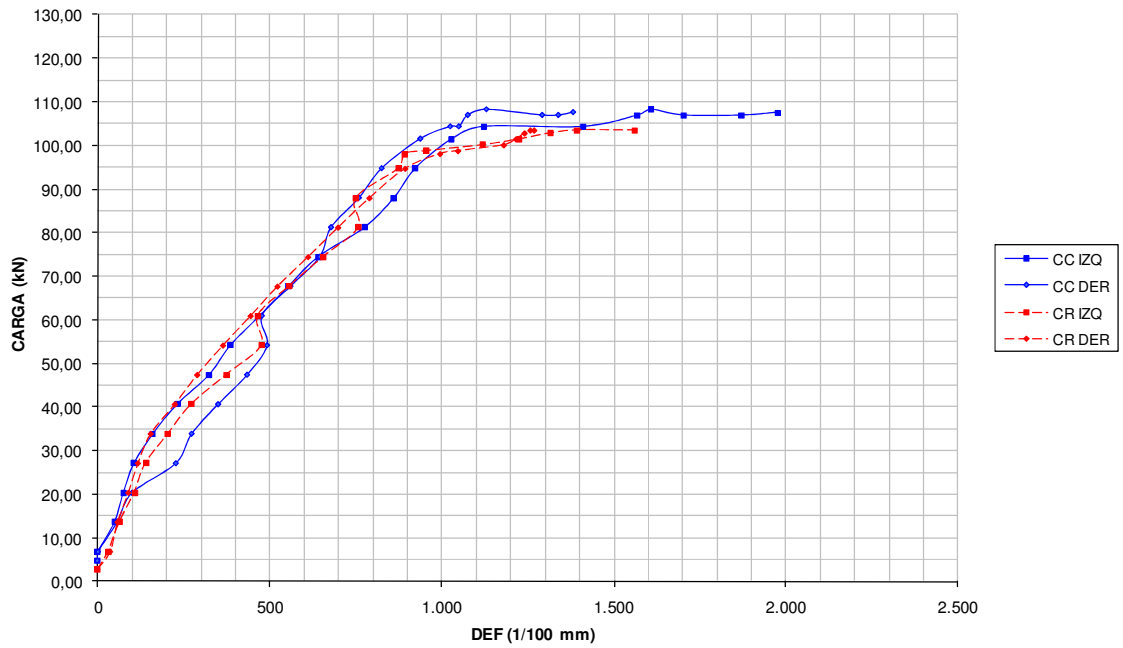
Gráfica 12. Carga vs. Deformación – vigas continuas CR – apoyos

**COMPARACIÓN CONCRETO CONVENCIONAL - CONCRETO RECICLADO VIGAS T1  
DEFORMIMETROS BAJO CARGAS PUNTUALES**



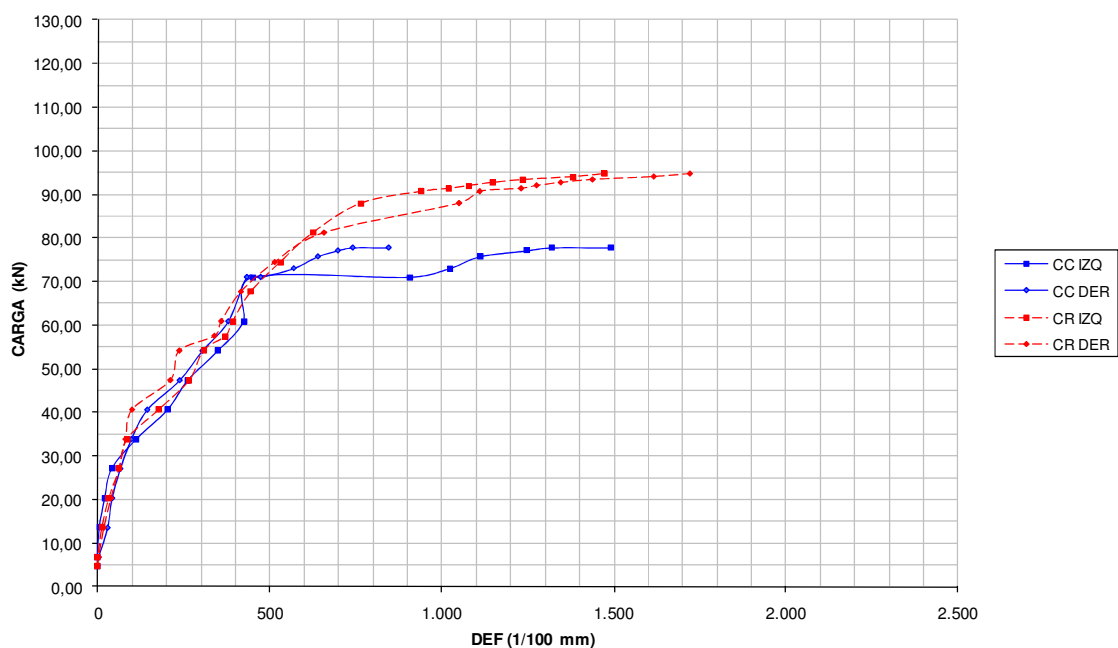
**Gráfica 13. Comparación vigas continuas Tipo 1**

**COMPARACIÓN CONCRETO CONVENCIONAL - CONCRETO RECICLADO VIGAS T2  
DEFORMIMETROS BAJO CARGAS PUNTUALES**



**Gráfica 14. Comparación vigas continuas Tipo 2**

**COMPARACIÓN CONCRETO CONVENCIONAL - CONCRETO RECICLADO VIGAS T3  
DEFORMIMETROS BAJO CARGAS PUNTUALES**



**Gráfica 15. Comparación vigas continuas Tipo 3**

**5.1-4. COMPARACIÓN CARGAS DE FALLA TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES**

Concreto convencional (CC)

<b>Refuerzo</b>	<b>Carga Teórica (kN)</b>	<b>Carga Experim. (kN)</b>	<b>Error (%)</b>
Tipo 1	94,98	128,39	35,18
Tipo 2	91,26	110,14	20,69
Tipo 3	74,04	81,83	10,52

**Tabla 4. Comparación cargas de falla CC – vigas continuas**

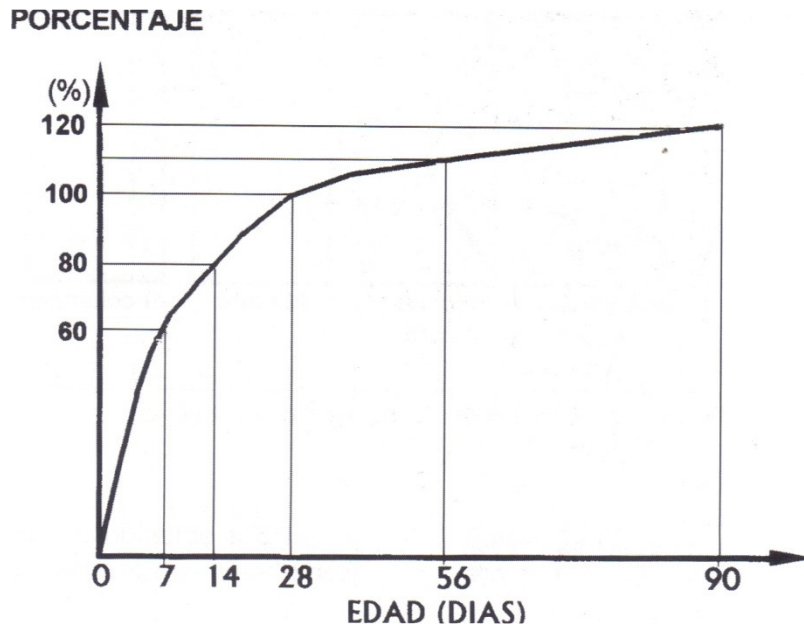
Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

<b>Refuerzo</b>	<b>Carga Teórica (kN)</b>	<b>Carga Experim. (kN)</b>	<b>Error (%)</b>
Tipo 1	91,22	91,98	0,83
Tipo 2	88,06	101,67	15,46
Tipo 3	72,4	98,07	35,46

**Tabla 5. Comparación cargas de falla CR – vigas continuas**

## Comparación CC vs. CR

No se pueden comparar cuantitativamente el concreto convencional y el concreto con agregado de concreto reciclado por tener edades diferentes (9 días de diferencia), las vigas no se pudieron fundir simultáneamente porque las formaleas disponibles eran insuficientes. Debido a la programación del laboratorio de materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito los elementos estructurales se debieron ensayar el mismo día; en ese momento las vigas de concreto convencional tenían 25 días de fundidas mientras que las de concreto con agregado de concreto reciclado tenían 16 días. A continuación se presenta una de tantas curvas de evolución de la resistencia a la compresión del concreto con el tiempo [Ref. 15 Figura 8.2] de la cual se puede inferir una diferencia en resistencias a la compresión, del orden del 13%, para el lapso de tiempo mencionado con anterioridad.



**Gráfica 16. Curva de resistencia a la compresión en función del tiempo**

Basados en la argumentación anterior se procederá a presentar una comparación en cuanto al comportamiento experimental de los elementos estructurales ensayados más no cuantitativo.

Comparando las vigas con refuerzo tipo 1 es evidente un mejor comportamiento del concreto convencional frente al concreto con agregado de concreto reciclado, para refuerzo tipo 2 el comportamiento es casi idéntico y para el refuerzo tipo 3 se presenta un comportamiento muy similar hasta una carga de 70 kN y a partir de

este punto el concreto con agregado de concreto reciclado manifiesta un mejor comportamiento.

Independientemente del tipo de concreto las vigas presentaron el mecanismo de falla previsto: rótulas debajo de las cargas y en el apoyo central.

En los dos tipos de concreto se presentan variaciones en las deformaciones obtenidas al lado izquierdo y derecho del apoyo central, esto se explica por las pequeñas diferencias dimensionales en los montajes que no permiten tener una simetría perfecta. Estas desviaciones son más notorias en las deformaciones cercanas a los apoyos extremos.

Se observan variaciones en comportamiento menos pronunciadas para el mismo concreto y diferente tipo de refuerzo en el concreto con agregado de concreto reciclado.

#### **5.1-5. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES**

- Se observó para todas las vigas –sin distinción entre concreto convencional y concreto con agregado de concreto reciclado– que las cargas experimentales de falla son mayores que las teóricas, esto se debe a que las formulaciones teóricas utilizadas se basan en que la falla ocurre cuando tanto la armadura para momento positivo como la de negativo alcanzan el límite de fluencia y en la práctica se pasaron estos límites obteniendo grandes deformaciones sosteniendo la carga (ductilidad) hasta que los elementos estructurales fallaron totalmente por aplicación de carga; probablemente se llegó a la zona de endurecimiento por deformación.
- Analizando detalladamente cada gráfico Carga vs. Deformación se observa que las curvas cambian significativamente de curvatura a cargas muy cercanas a las teóricas, esto indica que a partir de ese punto se sobrepasa el límite de fluencia utilizado en los cálculos teóricos por lo que se consideran satisfactorios.
- Por tratarse de un ensayo destructivo en el que se llevaron los elementos estructurales hasta la falla total se evidenciaron ciertas diferencias –ya mencionadas– en comportamiento entre el concreto convencional y el concreto con agregado de concreto reciclado, pero bajo cargas de trabajo o de funcionamiento normal en una estructura real serían prácticamente imperceptibles (ver anexo 7).
- El concreto con agregado de concreto reciclado aún con resistencia a la compresión y módulo de elasticidad inferiores a los del concreto



convencional presenta un comportamiento adecuado, inclusive desarrollando cargas de falla superiores a las teóricas, lo que hace pensar que para una sustitución del 20% del agregado grueso por concreto reciclado –que es el caso de estudio– las diferencias frente a un concreto convencional no son significativas.

## 5.2- PLACAS APOYADAS EN TRES BORDES

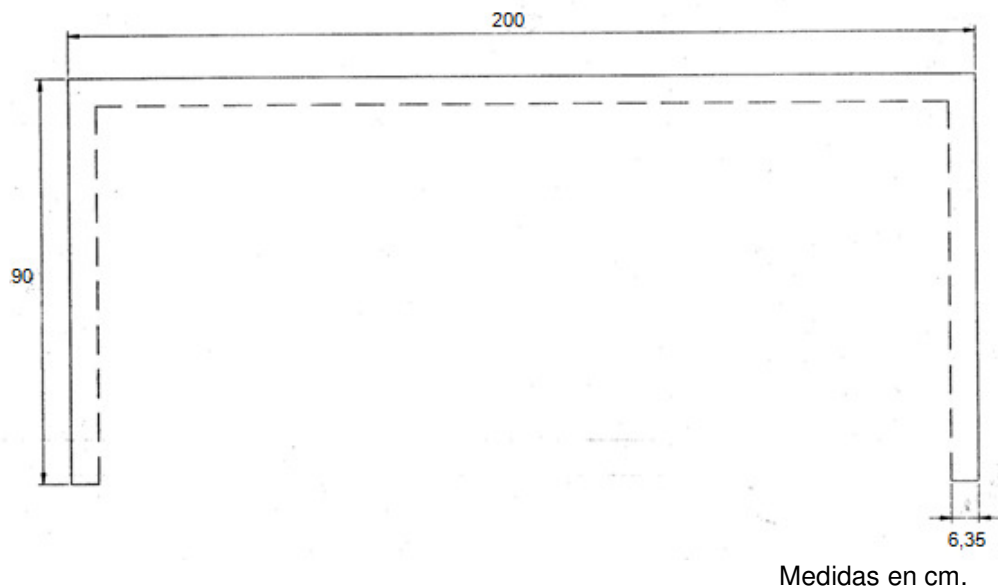
### 5.2-1. GENERALIDADES DE LOS ENSAYOS

Se ensayaron placas de concreto reforzado apoyadas sobre tres bordes (los dos cortos y uno largo).

Las dimensiones planteadas fueron 2,00 x 0,90 x 0,03 m.

El ancho de los apoyos fue 6,35 cm.

A continuación se presenta un esquema de los elementos estructurales.



**Gráfica 17. Esquema placas apoyadas en tres bordes**

### **Materiales**

Se utilizó concreto convencional para el concreto de control y concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso.

La resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y peso unitario se relacionan en seguida, estos valores corresponden al promedio del ensayo de cuatro (4) cilindros para cada tipo de concreto (ver anexo 1).

#### Concreto convencional (CC)

Fecha de fundida	Septiembre 24 de 2010
Fecha de ensayo	Octubre 6 de 2010
Edad concreto ensayado	12 días
Resistencia a la compresión promedio	18,4 MPa
Módulo de elasticidad	15103 MPa
Peso unitario	2213 kg/m <sup>3</sup>

#### Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

Fecha de fundida	Septiembre 23 de 2010
Fecha de ensayo	Octubre 6 de 2010
Edad concreto ensayado	13 días
Resistencia a la compresión promedio	19,9 MPa
Módulo de elasticidad	15608 MPa
Peso unitario	2190 kg/m <sup>3</sup>

#### Acero de refuerzo

Las resistencias que se relacionan a continuación corresponden al ensayo de dos muestras para el caso de los grafiles y de una muestra para el caso de la malla electrosoldada (ver anexo 2).

Alambre grafilado	$f_y = 592 \text{ MPa}$	$F_u = 662,5 \text{ MPa}$
Malla electrosoldada	$f_y = 614 \text{ MPa}$	$F_u = 672,0 \text{ MPa}$

#### **Metodología**

Se trazó una retícula sobre las placas, con el objeto de referir a ella la trayectoria de las líneas de rotura en la falla.

Se inspeccionaron cuidadosamente las placas en las superficies superior e inferior, en la inspección visual no se encontraron anomalías y se procedió a realizar registro fotográfico de esas dos superficies (ver anexo 3).

Se localizó el centro inferior del borde libre y se instaló un deformímetro mecánico bajo él.

Al cargar se leyeron deformaciones con incrementos de carga del orden de 20 kg., hasta la carga total.

Material de carga:

Agregado de concreto reciclado seco.

Procedimiento de carga:

Se usó un marco de madera para confinar lateralmente el agregado de concreto reciclado que cargó la placa.

Se llenaron recipientes con agregado de concreto reciclado y se determinó el peso del agregado de concreto reciclado que los llenaba, en seguida se esparció sobre la placa el agregado de concreto reciclado pesado para que formara capas de espesor uniforme y se anotaba el peso del agregado de concreto reciclado instalado; lo anterior para obtener una carga uniformemente distribuida por metro cuadrado.

Se leyeron deformaciones en el centro del borde libre cada vez que la carga total se incrementó en 20 kg. Durante el ensayo se observó que el apoyo del borde largo se estaba deflectando por lo que se procedió a instalar un deformímetro mecánico en el centro del mismo.

Cuando la carga total ocasionó deterioros notables en la placa (grietas y deflexiones importantes), se retiraron los deformímetros mecánicos y, en lo que siguió, se midieron con cinta métrica las deflexiones.

El proceso de carga se adelantó hasta cuando se produjo la falla.

Se anotó la carga de falla.

Se midió la posición real del acero de refuerzo (los valores se pueden consultar en el anexo 4) a fin de comprobar que estuviera ubicado en el centro de la placa, ya que por ser elementos de pequeño espesor era probable una desubicación de la armadura debida al proceso constructivo (en especial el vibrado del concreto); así mismo las mallas tienen tendencia a curvarse y era probable tener alturas efectivas menores a las proyectadas en ciertos puntos.

Una vez obtenida la falla, se recuperaron las fracciones de placa y se armaron, según la retícula inicial.

Se construyó un esquema de la forma de falla y se obtuvo registro fotográfico de la misma (ver anexo 3).

### Cantidad y tipo de muestras

Se ensayaron en total 4 placas (2 de concreto convencional y 2 de concreto con agregado reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso).

Se utilizaron los mismos dos tipos de refuerzo para cada tipo de concreto.

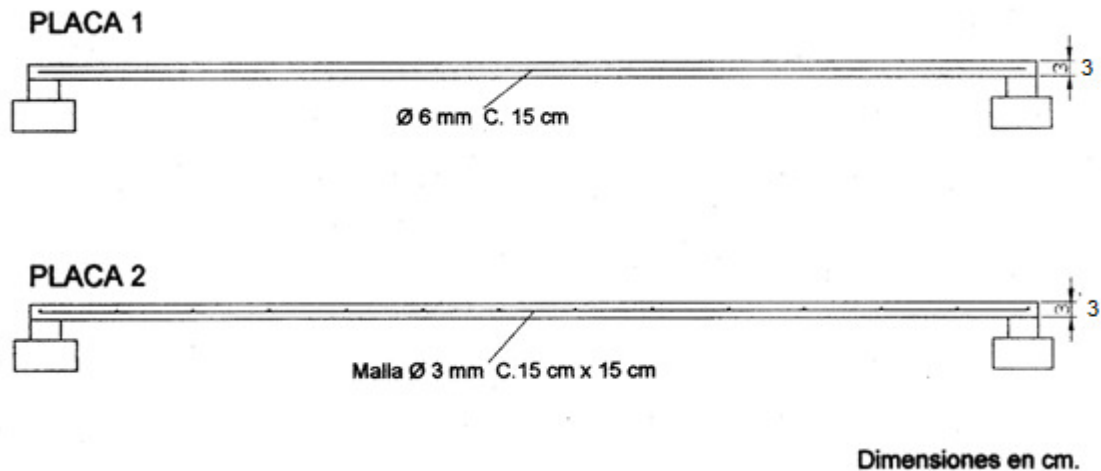
Refuerzo Tipo 1:

Grafiles  $\varnothing$  6 mm. en dirección del lado mayor. Separación de barras: 15 cm.

Refuerzo Tipo 2:

Malla  $\varnothing$  3 mm. cada 15 cm. en dos direcciones.

A continuación se presentan los esquemas de los dos tipos de disposición del acero de refuerzo:



**Gráfica 18. Tipos de refuerzo placas apoyadas en tres bordes**

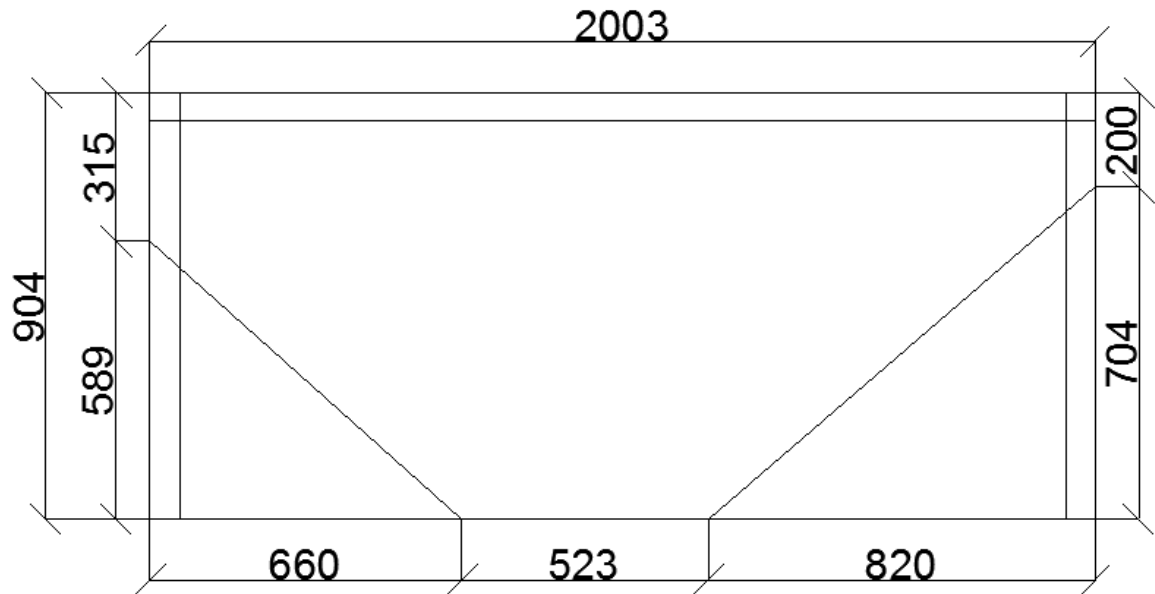
Las anteriores disposiciones se realizaron a fin de permitir la formación de diferentes mecanismos de falla.

## 5.2-2. CÁLCULO TEÓRICO DE LAS CARGAS DE FALLA

Como primera medida se evalúan las placas por el método del trabajo virtual, para tal fin se evalúan separadamente de acuerdo al mecanismo de falla presentado experimentalmente.

### Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

#### Refuerzo Tipo 1



**Gráfica 19. Mecanismo de falla CR refuerzo tipo 1 – placas**

Para el cálculo del trabajo externo, se considera una carga uniformemente repartida ( $w$ ), ya que así se pretendió hacer en la prueba:

Los siguientes valores difieren de los mostrados en el esquema anterior, ya que para los cálculos se toman las distancias libres (descontando el ancho de los apoyos) y fueron calculados mediante el programa AutoCAD 2009.

$$W_{ext} = \left( \frac{0.532 * 0.597}{2} * \frac{1}{3} * 2 + \frac{0.649 * 0.757}{2} * \frac{1}{3} * 2 + 0.523 * 0.844 / 2 + 0.312 * 0.597 / 2 + 0.195 * 0.757 / 2 \right) * w$$

$$W_{ext} = 0.657 * w$$

Para la determinación del trabajo interno, se considera un momento resistente ( $m$ ), el cual, para el caso en estudio es nulo en la dirección corta:

$$W_{int} = \left( 0.532 * \frac{1}{0.597} + 0.649 * \frac{1}{0.757} \right) * m$$

$$W_{int} = 1.748 * m$$

Trabajo Externo = Trabajo Interno

$$0.657 * w = 1.748 * m$$

$$w = 2.66 * m$$

Momento resistente

$$A_s = \phi 6 \text{ mm} / 0.15 \text{ m} = 188 \text{ mm}^2 / \text{ m}$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{188 * 592}{0.85 * 19.9 * 1000} = 7 \text{ mm}$$

$$m = A_s * f_y * \left( d - \frac{a}{2} \right) = 188 * 592 * \left( 14.8 - \frac{7}{2} \right) / 1000000$$

$$m = 1.26 \text{ kN} - \text{ m} / \text{ m} = 128.44 \text{ kg} - \text{ m} / \text{ m}$$

El valor de d corresponde al promedio de las alturas medidas (ver anexo 4)

Carga resistente estimada por metro cuadrado

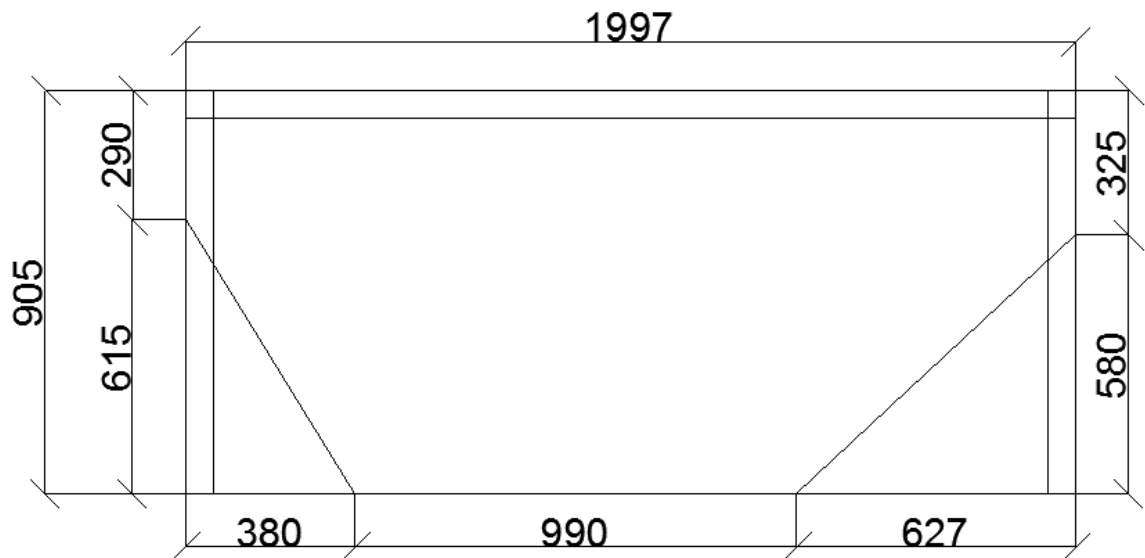
$$w = 2.66 * 128.44 = 341.65 \text{ kg/m}^2$$

Carga total estimada

$$W = 341.65 * 2.003 * 0.904 - 2190 * 0.031 * 2.003 * 0.904 = 496 \text{ kg}$$

*Nótese que se descontó la carga debida al peso propio de la placa de concreto.*

**Refuerzo Tipo 2**



**Gráfica 20. Mecanismo de falla CR refuerzo tipo 2 – placas**

Para el cálculo del trabajo externo, se considera una carga uniformemente repartida ( $w$ ), ya que así se pretendió hacer en la prueba:

Los siguientes valores difieren de los mostrados en el esquema anterior, ya que para los cálculos se toman las distancias libres (descontando el ancho de los apoyos) y fueron calculados mediante el programa AutoCAD 2009.

$$W_{ext} = \left( \frac{0.512 * 0.317}{2} * \frac{1}{3} * 2 + \frac{0.521 * 0.564}{2} * \frac{1}{3} * 2 + 0.990 * 0.842 / 2 + 0.330 * 0.317 / 2 + 0.321 * 0.564 / 2 \right) * w$$

$$W_{ext} = 0.712 * w$$

Para la determinación del trabajo interno, se considera un momento resistente ( $m$ ), el cual, para el caso en estudio es igual en ambas direcciones:

$$W_{int} = \left( 0.512 * \frac{1}{0.317} + 0.521 * \frac{1}{0.564} + \frac{0.317}{0.512} + \frac{0.564}{0.521} \right) * m$$

$$W_{int} = 4.24 * m$$

Trabajo Externo = Trabajo Interno

$$0.712 * w = 4.24 * m$$

$$w = 5.96 * m$$

Momento resistente

$$A_s = \phi 3mm / 0.15m = 47mm^2 / m$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{47 * 614}{0.85 * 19.9 * 1000} = 2mm$$

$$m = A_s * f_y * \left( d - \frac{a}{2} \right) = 47 * 614 * \left( 20.6 - \frac{2}{2} \right) / 1000000$$

$$m = 0.57kN - m / m = 58.10kg - m / m$$

El valor de  $d$  corresponde al promedio de las alturas medidas (ver anexo 4)

Carga resistente estimada por metro cuadrado

$$w = 5.96 * 58.10 = 346.28 \text{ kg/m}^2$$

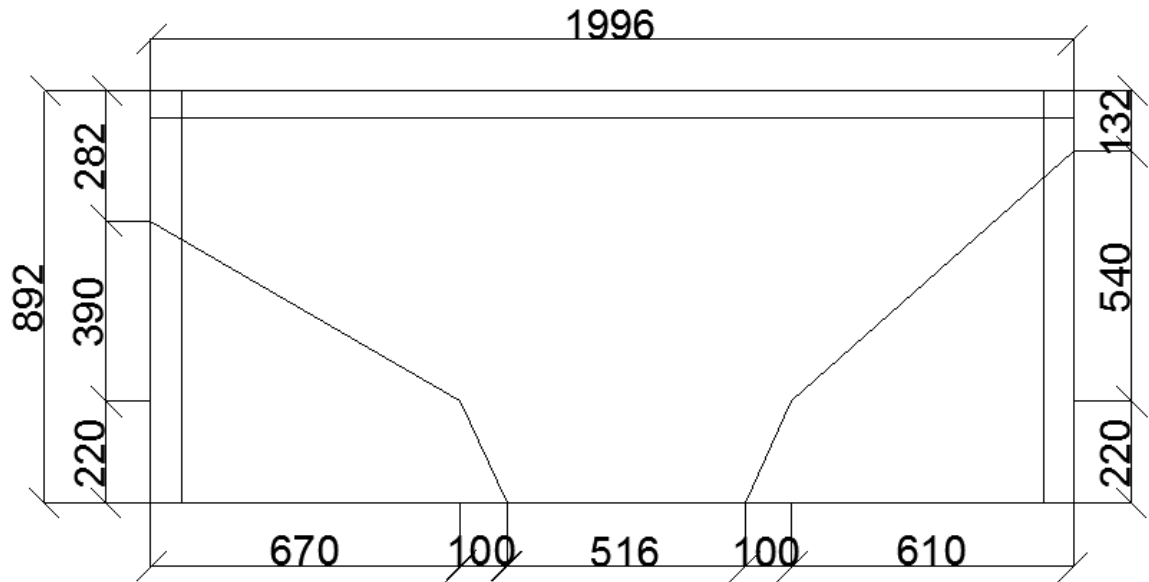
Carga total estimada

$$W = 346.28 * 1.997 * 0.905 - 2190 * 0.031 * 1.997 * 0.905 = 503 \text{ kg}$$

*Nótese que se descontó la carga debida al peso propio de la placa de concreto.*

## Concreto convencional (CC)

### Refuerzo Tipo 1



Gráfica 21. Mecanismo de falla CC refuerzo tipo 1 – placas

Para el cálculo del trabajo externo, se considera una carga uniformemente repartida ( $w$ ), ya que así se pretendió hacer en la prueba:

Los siguientes valores difieren de los mostrados en el esquema anterior, ya que para los cálculos se toman las distancias libres (descontando el ancho de los apoyos) y fueron calculados mediante el programa AutoCAD 2009.

$$W_{ext} = \left( \frac{0.572 * 0.705}{2} * \frac{1}{3} * 2 + \frac{0.702 * 0.645}{2} * \frac{1}{3} * 2 + 0.516 * 0.834 / 2 + 0.262 * 0.705 / 2 + 0.132 * 0.645 / 2 \right) * w$$

$$W_{ext} = 0.635 * w$$

Para la determinación del trabajo interno, se considera un momento resistente ( $m$ ), el cual, para el caso en estudio es nulo en la dirección corta:

$$W_{int} = \left( 0.572 * \frac{1}{0.705} + 0.702 * \frac{1}{0.645} \right) * m$$

$$W_{int} = 1.900 * m$$

Trabajo Externo = Trabajo Interno

$$0.635 * w = 1.900 * m$$

$$w = 2.99 * m$$



Momento resistente

$$A_s = \phi 6mm / 0.15m = 188mm^2 / m$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{188 * 592}{0.85 * 18,4 * 1000} = 7mm$$

$$m = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 188 * 592 * \left(16.7 - \frac{7}{2}\right) / 1000000$$

$$m = 1.47kN - m / m = 149.85kg - m / m$$

El valor de d corresponde al promedio de las alturas medidas (ver anexo 4)

Carga resistente estimada por metro cuadrado

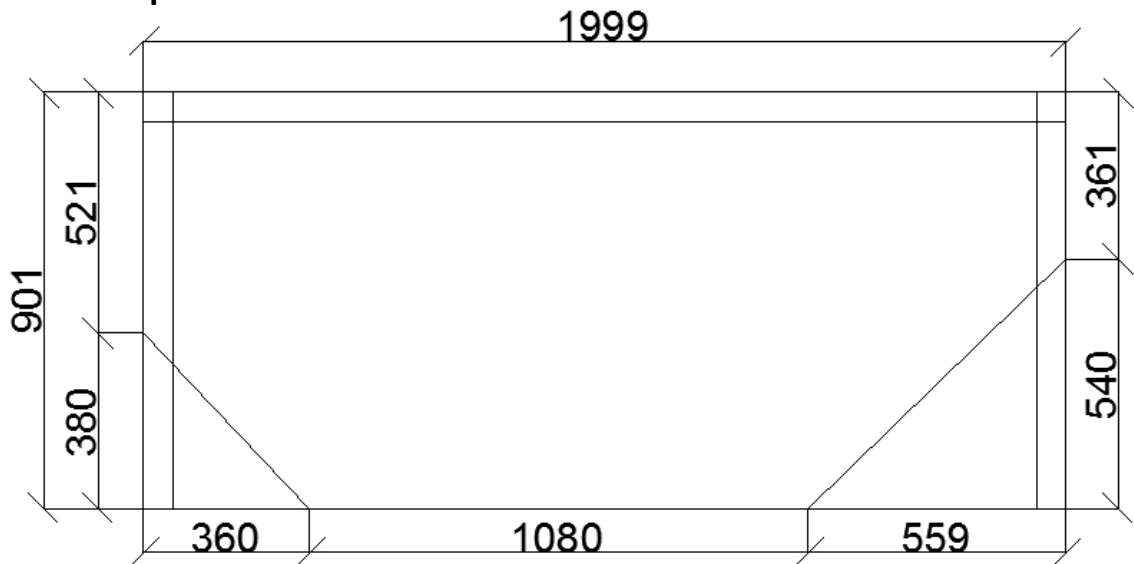
$$w = 2,99 * 149,85 = 448,05 \text{ kg/m}^2$$

Carga total estimada

$$W = 448,05 * 1,996 * 0,892 - 2213 * 0,031 * 1,996 * 0,892 = 676 \text{ kg}$$

*Nótese que se descontó la carga debida al peso propio de la placa de concreto.*

### Refuerzo Tipo 2



Gráfica 22. Mecanismo de falla CC refuerzo tipo 2 – placas

Para el cálculo del trabajo externo, se considera una carga uniformemente repartida (w), ya que así se pretendió hacer en la prueba:

Los siguientes valores difieren de los mostrados en el esquema anterior, ya que para los cálculos se toman las distancias libres (descontando el ancho de los apoyos) y fueron calculados mediante el programa AutoCAD 2009.

$$W_{ext} = \left( \frac{0.313 * 0.297}{2} * \frac{1}{3} * 2 + \frac{0.479 * 0.496}{2} * \frac{1}{3} * 2 + 1.080 * 0.837 / 2 + 0.524 * 0.297 / 2 + 0.358 * 0.496 / 2 \right) * w$$

$$W_{ext} = 0.729 * w$$

Para la determinación del trabajo interno, se considera un momento resistente (m), el cual, para el caso en estudio es igual en ambas direcciones:

$$W_{int} = \left( 0.313 * \frac{1}{0.297} + 0.479 * \frac{1}{0.496} + \frac{0.297}{0.313} + \frac{0.496}{0.479} \right) * m$$

$$W_{int} = 4.00 * m$$

Trabajo Externo = Trabajo Interno

$$0.729 * w = 4.00 * m$$

$$w = 5.49 * m$$

Momento resistente

$$A_s = \phi 3mm / 0.15m = 47mm^2 / m$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} = \frac{47 * 614}{0.85 * 18,4 * 1000} = 2mm$$

$$m = A_s * f_y * \left( d - \frac{a}{2} \right) = 47 * 614 * \left( 18 - \frac{2}{2} \right) / 1000000$$

$$m = 0.49kN - m / m = 49.95kg - m / m$$

El valor de d corresponde al promedio de las alturas medidas (ver anexo 4)

Carga resistente estimada por metro cuadrado

$$w = 5,49 * 49,95 = 274,23 \text{ kg/m}^2$$

Carga total estimada

$$W = 274,23 * 1,999 * 0,901 - 2213 * 0,029 * 1,999 * 0,901 = 378 \text{ kg}$$

*Nótese que se descontó la carga debida al peso propio de la placa de concreto.*

## Resumen de cargas teóricas de falla estimadas

Refuerzo	Concreto Convencional (CC)		Concreto Reciclado (CR)	
	w (kg/m <sup>2</sup> )	W (kg)	w (kg/m <sup>2</sup> )	W (kg)
Tipo 1	448	676	342	496
Tipo 2	274	378	346	503

**Tabla 6. Cargas teóricas de falla – placas**

### Diferencias teóricas CC vs. CR

Refuerzo	Dif. w (kg/m <sup>2</sup> )	Dif. W (kg)	Disminución
Tipo 1	106	180	27%
Tipo 2	72	125	25%

**Tabla 7. Diferencias teóricas CC vs CR – placas**

La anterior tabla corresponde a la disminución teórica de la capacidad de carga del concreto con agregado de concreto reciclado frente al concreto convencional para el refuerzo tipo 1 y viceversa para el tipo 2 (se muestra resaltado en la tabla a fin de recalcar la diferencia) debida a la leve diferencia de resistencia a la compresión y en especial a las diferencias entre alturas efectivas del refuerzo de la sección, ya que estos elementos estructurales por poseer espesores pequeños (alrededor de 3 cm) son susceptibles a la desubicación de la armadura debida al proceso constructivo (en especial al vibrado del concreto) y no se logró tener alturas efectivas iguales en ninguno de los casos.

Para ilustrar mejor la incidencia de la variación de las alturas efectivas se realizó el análisis de sensibilidad que se presenta a continuación utilizando los datos de las placas de concreto convencional.

Refuerzo centrado				Refuerzo centrado			
f <sub>c</sub> (MPa) =	18,4	b (mm) =	1000	f <sub>c</sub> (MPa) =	18,4	b (mm) =	1000
f <sub>y</sub> (MPa) =	592	h (mm) =	31	f <sub>y</sub> (MPa) =	614	h (mm) =	31
As (mm <sup>2</sup> ) =	188	d' (mm) =	15,5	As (mm <sup>2</sup> ) =	47	d' (mm) =	15,5
		d (mm) =	15,5			d (mm) =	15,5
a (mm) =	7			a (mm) =	2		
M (kN-m) =	1,33			M (kN-m) =	0,42		
M (Ton-m) =	0,14		<b>406 kg/m<sup>2</sup></b>	M (Ton-m) =	0,04	42,99	<b>236 kg/m<sup>2</sup></b>

Diferencia 1 mm				Diferencia 1 mm			
Refuerzo centrado				Refuerzo centrado			
f'c (MPa) =	18,4	b (mm) =	1000	f'c (MPa) =	18,4	b (mm) =	1000
fy (MPa) =	592	h (mm) =	31	fy (MPa) =	614	h (mm) =	31
As (mm <sup>2</sup> ) =	188	d' (mm) =	14,5	As (mm <sup>2</sup> ) =	47	d' (mm) =	14,5
		d (mm) =	16,5			d (mm) =	16,5
a (mm) =	7			a (mm) =	2		
M (kN-m) =	1,44			M (kN-m) =	0,45		
M (Ton-m) =	0,15		<b>440 kg/m<sup>2</sup></b>	M (Ton-m) =	0,05	45,94	<b>252 kg/m<sup>2</sup></b>

Diferencia 2 mm				Diferencia 2 mm			
Refuerzo centrado				Refuerzo centrado			
f'c (MPa) =	18,4	b (mm) =	1000	f'c (MPa) =	18,4	b (mm) =	1000
fy (MPa) =	592	h (mm) =	31	fy (MPa) =	614	h (mm) =	31
As (mm <sup>2</sup> ) =	188	d' (mm) =	13,5	As (mm <sup>2</sup> ) =	47	d' (mm) =	13,5
		d (mm) =	17,5			d (mm) =	17,5
a (mm) =	7			a (mm) =	2		
M (kN-m) =	1,55			M (kN-m) =	0,48		
M (Ton-m) =	0,16		<b>474 kg/m<sup>2</sup></b>	M (Ton-m) =	0,05	48,89	<b>268 kg/m<sup>2</sup></b>

Realizando los cálculos similarmente se tiene la siguiente tabla:

Variación d (mm)	Refuerzo Tipo 1		Refuerzo Tipo 2	
	w (kg/m <sup>2</sup> )	Variación w (%)	w (kg/m <sup>2</sup> )	Variación w (%)
0	406	0%	236	0%
1	440	8%	252	7%
2	474	17%	268	14%
3	508	25%	285	21%
4	542	33%	301	28%
5	576	42%	317	34%

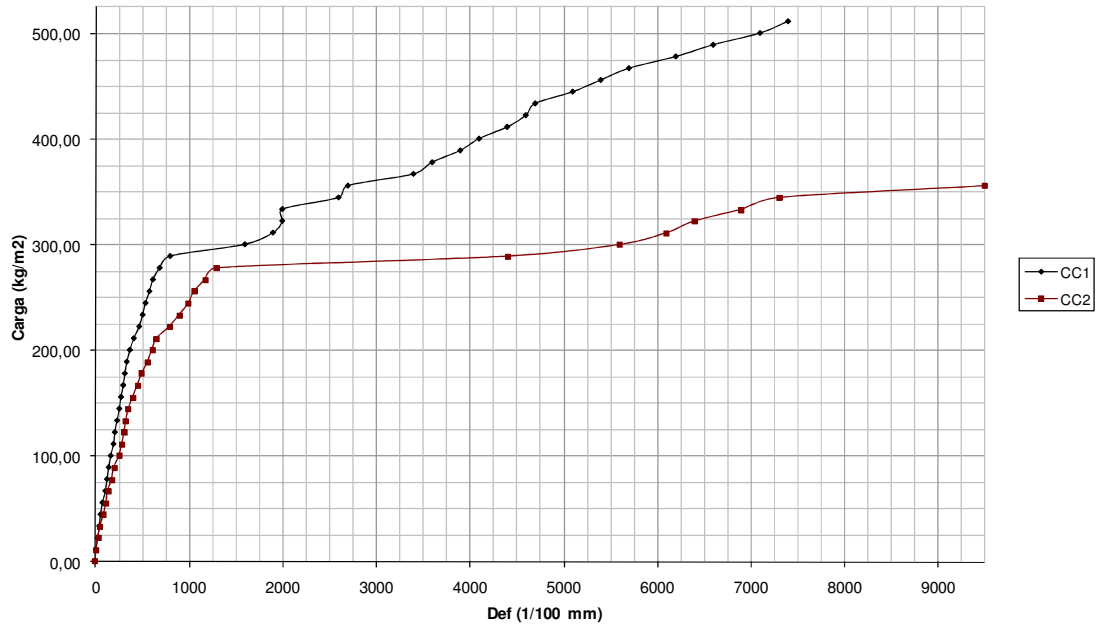
**Tabla 8. Análisis de sensibilidad variación altura efectiva – placas**

Se demuestra con éste análisis la gran incidencia que tiene la variación de la altura efectiva en este tipo de elementos estructurales; con esto se explica la alta variabilidad de los resultados obtenidos.

### 5.2-3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

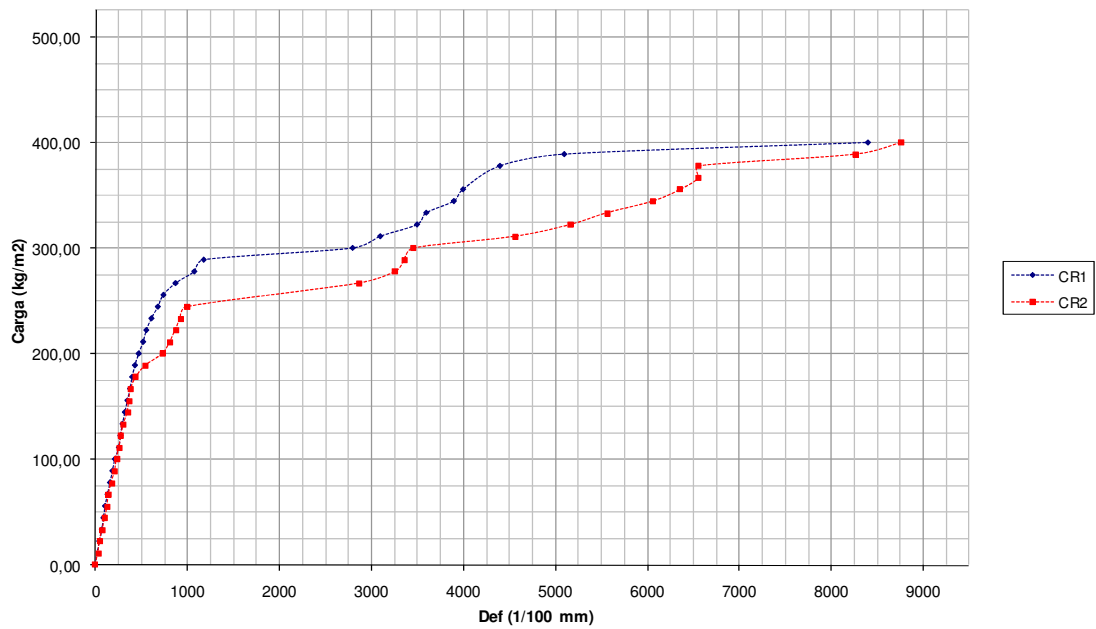
A continuación se presentan las gráficas Carga distribuida vs. Deformación de las placas ensayadas y las comparaciones gráficas necesarias entre el concreto convencional (CC) y el concreto con agregado de concreto reciclado (CR).

**CARGA DISTRIBUIDA VS. DEFORMACIÓN  
CONCRETO CONVENCIONAL**



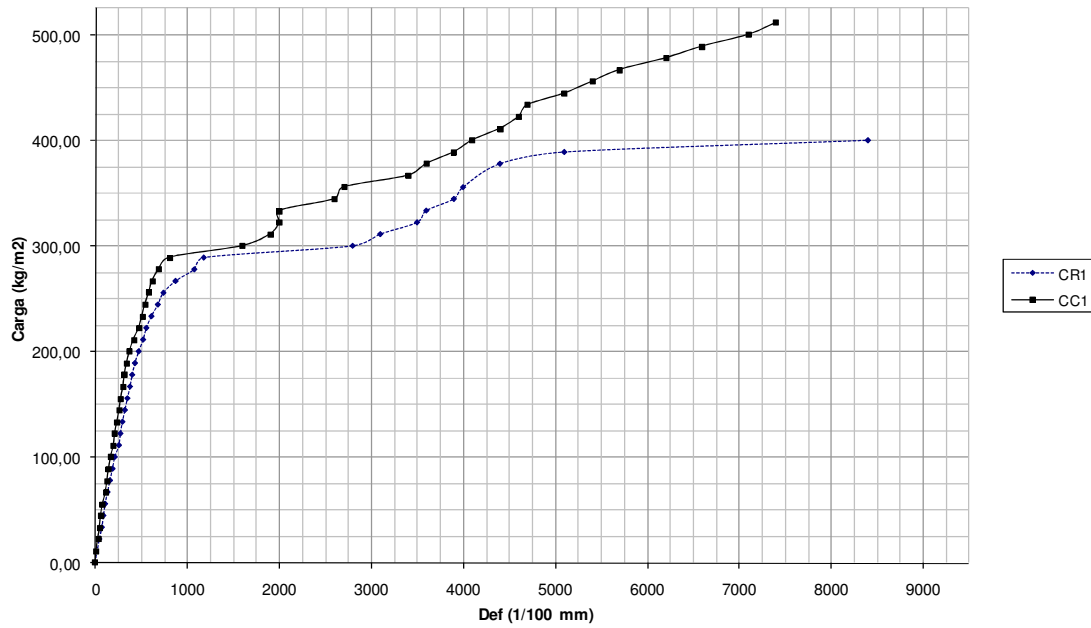
**Gráfica 23. Carga distribuida vs. Deformación – placas CC**

**CARGA DISTRIBUIDA VS. DEFORMACIÓN  
"CONCRETO RECICLADO"**



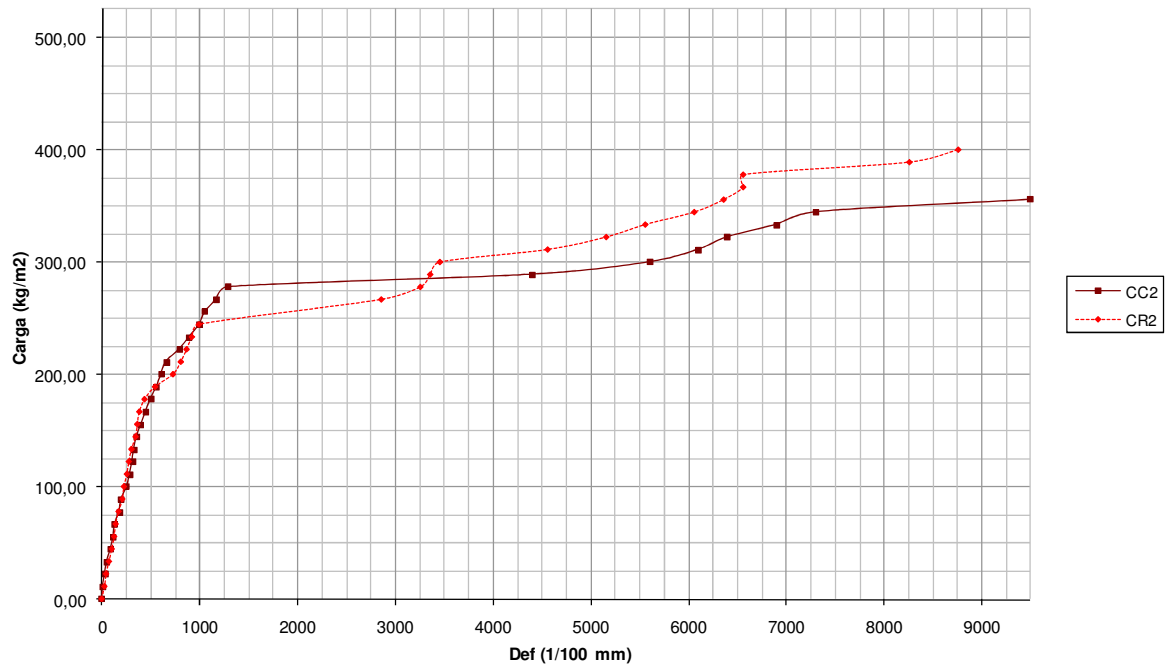
**Gráfica 24. Carga distribuida vs. Deformación – placas CR**

**CARGA DISTRIBUIDA VS. DEFORMACIÓN  
COMPARACIÓN CC Y CR CON REFUERZO TIPO 1**



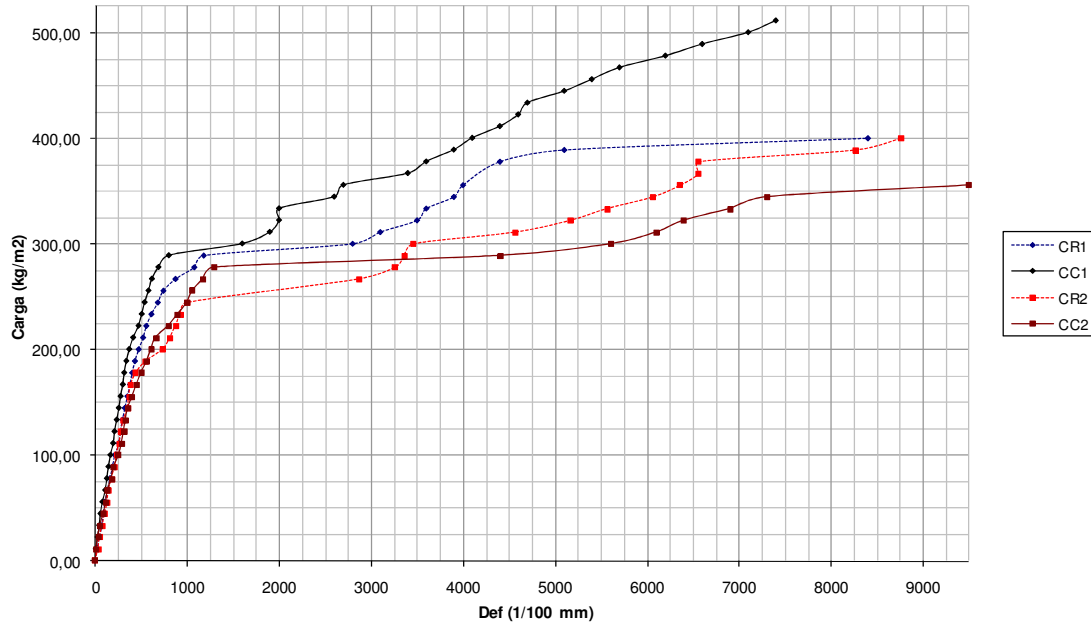
**Gráfica 25. Comparación placas Tipo 1**

**CARGA DISTRIBUIDA VS. DEFORMACIÓN  
COMPARACIÓN CC Y CR CON REFUERZO TIPO 2**



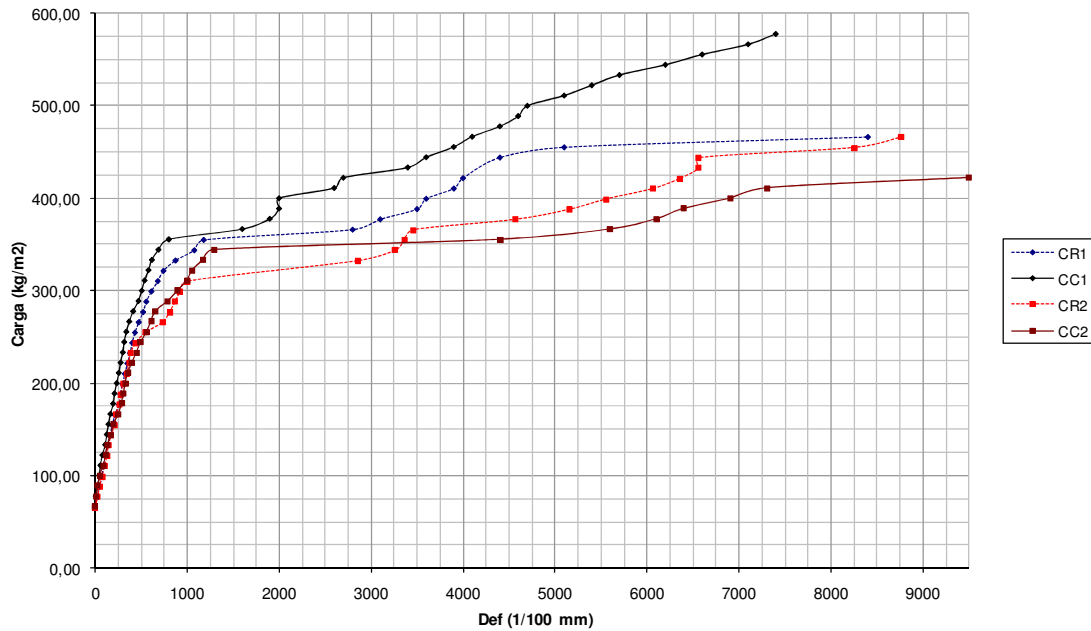
**Gráfica 26. Comparación placas Tipo 2**

**CARGA DISTRIBUIDA VS. DEFORMACIÓN  
COMPARACIÓN CC Y CR CON REFUERZO TIPO 1 Y 2**



**Gráfica 27. Comparación placas Tipo 1 y 2**

**CARGA DISTRIBUIDA (INCLUYENDO PESO PROPIO) VS. DEFORMACIÓN  
COMPARACIÓN CC Y CR CON REFUERZO TIPO 1 Y 2**



**Gráfica 28. Comparación placas Tipo 1 y 2 – incluyendo peso propio**

## 5.2-4. COMPARACIÓN CARGAS DE FALLA TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES

### Concreto convencional (CC)

Refuerzo	Carga Teórica (kg/m <sup>2</sup> )	Carga Experim. (kg/m <sup>2</sup> )	Error (%)
Tipo 1	448	589	31
Tipo 2	274	422	54

**Tabla 9. Comparación cargas de falla CC – placas**

### Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

Refuerzo	Carga Teórica (kg/m <sup>2</sup> )	Carga Experim. (kg/m <sup>2</sup> )	Error (%)
Tipo 1	342	466	36
Tipo 2	346	466	35

**Tabla 10. Comparación cargas de falla CR – placas**

### Diferencias teóricas y experimentales CC vs. CR

Refuerzo	Dif. Q Teórica (kg/m <sup>2</sup> )	Disminución	Dif. Q Experi. (kg/m <sup>2</sup> )	Disminución
Tipo 1	106	24%	123	21%
Tipo 2	72	26%	44	10%

**Tabla 11. Diferencias teóricas y experimentales CC vs. CR – placas**

La anterior tabla presenta las disminuciones de la carga distribuida –tanto teóricas como experimentales– del concreto con agregado de concreto reciclado frente al concreto convencional para el refuerzo tipo 1 y viceversa para el tipo 2 (se muestra resaltado en la tabla a fin de recalcar la diferencia).

*Nótese que en las anteriores tablas se tuvo en cuenta el peso propio de las placas incrementando la carga experimental sobrepuesta a fin de hacer comparables los resultados experimentales y teóricos.*

## 5.2-5. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Se observaron para todas las placas resistencias experimentales muy diferentes a las teóricas (superiores en su totalidad), teniendo como máximo una diferencia alrededor del 54 % para la placa tipo 2 (armadura en los dos sentidos) de concreto convencional y como mínimo 31% para la placa tipo 1 (armadura únicamente en el sentido longitudinal) de concreto convencional; el concreto con agregado de concreto reciclado presento diferencias del orden de 35% para los dos tipos de refuerzo.



- Como estaba previsto las placas presentaron diferentes comportamientos en función de la disposición del acero de refuerzo, aunque todas presentaron el único mecanismo de falla posible dada la geometría de los elementos estructurales ( $L > 2B$ ). La diferencia en comportamiento se refleja en los esquemas de fisuración –como era de esperarse se presenta una fisuración más notoria (inclusive con colapso total) en las placas armadas únicamente en el sentido longitudinal pese a su mayor resistencia– y adicionalmente en la ductilidad (área debajo de las curvas carga – deformación) en las cuáles se observa mayor ductilidad para el refuerzo tipo 1 independientemente del tipo de concreto.
- Se presentaron deformaciones en el soporte longitudinal, se recomienda para ensayos posteriores rigidizar el soporte o disponer apoyos intermedios para obtener comportamientos más similares a los esperados teóricamente.
- Se observan variaciones menos pronunciadas para el mismo concreto y diferente tipo de refuerzo en el concreto con agregado de concreto reciclado, esto mismo se observó en el ensayo de vigas continuas.
- Durante los ensayos se observó que las fisuras del concreto con agregado de concreto reciclado son ligeramente de mayor espesor que las correspondientes al concreto convencional; las mayores fisuras tenían un espesor de 0,40 mm en las placas de concreto con agregado de concreto reciclado mientras que en el concreto convencional eran del orden de 0,35 mm.
- Se encontraron menores variaciones –entre el concreto con agregado de concreto reciclado y el concreto convencional– experimentalmente que teóricamente; aunque esto no es relevante y muy dicente por las diferencias de alturas efectivas.
- Se observan comportamientos similares en el concreto convencional y en el concreto con agregado de concreto reciclado, toda vez que sus propiedades físico-mecánicas de acuerdo a los cilindros ensayados presentaron similitud ya que los concretos ensayados tan sólo tenían una diferencia de edad de 1 día.
- Por tratarse de un ensayo destructivo en el que se llevaron los elementos estructurales hasta la falla total se evidenciaron ciertas diferencias –aunque pequeñas– en comportamiento entre el concreto convencional y el concreto con agregado de concreto reciclado, pero bajo cargas de trabajo o de funcionamiento normal en una estructura real serían prácticamente imperceptibles, como se dijo también en el ensayo de vigas continuas; nótese que en los diagramas carga–deformación todas las placas

ensayadas presentan un comportamiento muy similar hasta una carga de aproximadamente 250 kg/m<sup>2</sup> (incluyendo peso propio).

- Se calcularon las áreas bajo las curvas carga-deformación y se encontró una disminución del 5% en el concreto con agregado grueso reciclado frente al concreto convencional para el refuerzo tipo 2 (placa armada en los dos sentidos), para el refuerzo tipo 1 (placa armada únicamente en el sentido longitudinal) se presenta un porcentaje del 0,75% a favor del concreto con agregado grueso de concreto reciclado; éste último presenta una variación entre tipos de refuerzo del orden del 6% mientras que en el concreto convencional la variación es prácticamente nula (ver anexo 6).
- Como se mencionó con anterioridad el concreto con agregado de concreto reciclado presentó un comportamiento adecuado comparativamente con el concreto convencional de control, lo que hace pensar que para una sustitución del 20% del agregado grueso por agregado de concreto reciclado –que es el caso de estudio– las diferencias son insignificantes, como se había concluido en el ensayo de vigas continuas.
- No se considera adecuado este tipo de elementos estructurales para hacer comparaciones entre concreto convencional y concreto con agregado de concreto reciclado, ya que por poseer espesores pequeños (alrededor de 3 cm) son susceptibles a la desubicación de la armadura debida al proceso constructivo (en especial al vibrado del concreto) y no se logró tener alturas efectivas iguales en ninguno de los casos. Lo anterior se demostró con el estudio de sensibilidad, en el cual con una variación de tan solo 1 mm en la altura efectiva se presentan diferencias en la carga resistente alrededor del 8% y para una variación de 5 mm (que es muy factible que se presente) se obtienen diferencias del orden de 42% -valores inaceptables para realizar comparaciones objetivas-; los anteriores valores corresponden a las placas con refuerzo tipo 1 (armadura únicamente en el sentido longitudinal), para las placas con refuerzo tipo 2 (armadura en los dos sentidos) se tienen diferencias del 7% y 34% respectivamente.

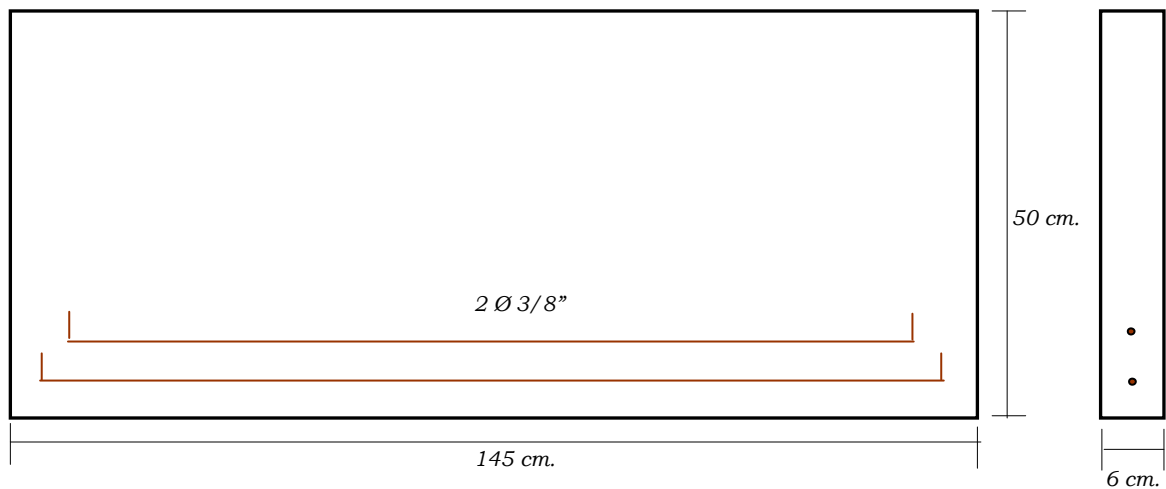
### **5.3- VIGAS ALTAS**

#### **5.3-1. GENERALIDADES DE LOS ENSAYOS**

##### **Muestras**

En total se ensayaron 4 vigas prismáticas (dos de concreto convencional y dos de concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso) de 145 x 50 cm y espesor 6 cm. Todas con armadura longitudinal inferior de dos barras No. 3 y dos con armadura adicional, así:

Muestras Tipo 1: Sin armadura adicional  
 Muestras Tipo 2: Gráfíl  $\Phi$  5 mm. cada 9 cm. Vertical.



**Gráfica 29. Esquema vigas altas**

### Recubrimientos

3 cm y 7 cm respectivamente al centro de la barra.

### **Materiales**

Se utilizó concreto convencional para el concreto de control y concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso.

La resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y peso unitario se relacionan en seguida, estos valores corresponden al promedio del ensayo de cuatro (4) cilindros para cada tipo de concreto (ver anexo 1).

### Concreto convencional (CC)

Fecha de fundida	Octubre 16 de 2010
Fecha de ensayo	Noviembre 17 de 2010
Edad concreto ensayado	32 días
Resistencia a la compresión promedio	27,6 MPa
Módulo de elasticidad	18445 MPa
Peso unitario	2271 kg/m <sup>3</sup>

### Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

Fecha de fundida	Octubre 16 de 2010
Fecha de ensayo	Noviembre 17 de 2010
Edad concreto ensayado	32 días

Resistencia a la compresión promedio 27,7 MPa  
Módulo de elasticidad 18459 MPa  
Peso unitario 2210 kg/m<sup>3</sup>

### Acero de refuerzo

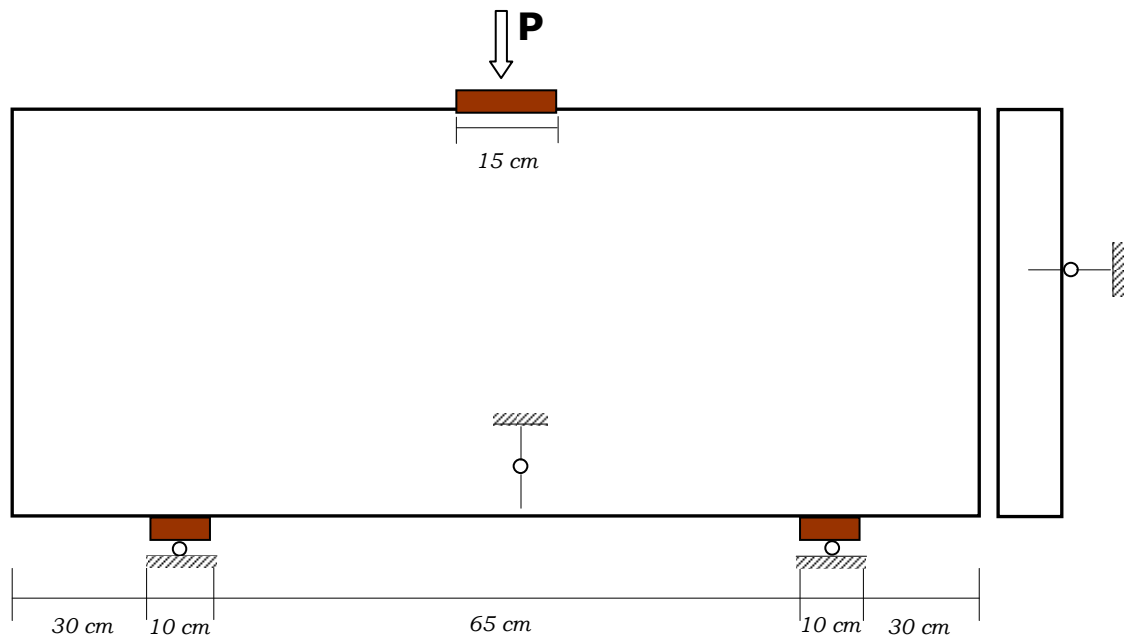
Acero corrugado:  $f_y = 443 \text{ MPa}$   $F_u = 640 \text{ MPa}$

Alambre grafilado:  $f_y = 643 \text{ MPa}$   $F_u = 718 \text{ MPa}$

Los anteriores valores corresponden al promedio de los ensayos realizados al acero de refuerzo, a saber 2 muestras de grafiles y 3 de barras (ver anexo 2).

### **Montaje**

Sobre la consola de la Máquina Universal de Ensayos Shimadzu de capacidad 100 toneladas se realizó el montaje representado en la siguiente figura, teniendo en cuenta que el plano mayor de la viga quedara perfectamente vertical, para lograrlo se utilizó un nivel de burbuja.



**Gráfica 30. Montaje ensayo vigas altas**

El marco móvil de la máquina fue la consola inferior, cuyo desplazamiento se detectó en la pantalla del computador de la máquina. El deformímetro mecánico central midió el desplazamiento del borde inferior de la sección central de la viga.

## Procedimiento

Montada la muestra, se inspeccionó detalladamente a fin de detectar cualquier irregularidad en ella, como agrietamientos o defectos geométricos de fabricación. Se cargó lentamente hasta alrededor de 1 tonelada, con objeto de comprobar el funcionamiento de los deformímetros mecánicos y se observó si hubo deterioros en la muestra. Luego se descargó hasta unos 50 kg. Entonces, se ajustaron los deformímetros mecánicos en cero y se procedió a cargar con velocidad de 1000 kg. por minuto y se leyeron deformaciones cada 1 toneladas sin detener el proceso de carga. Durante él se observaron minuciosamente los planos verticales de la muestra para detectar el inicio y el progreso del agrietamiento. Se anotó el valor de la carga máxima, los datos obtenidos se encuentran en el anexo 3. Se hizo un registro fotográfico de las muestras falladas (ver anexo 4).

### 5.3-2. CÁLCULO TEÓRICO DE LAS CARGAS DE FALLA

Como primera medida se evalúa la condición de viga alta de acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

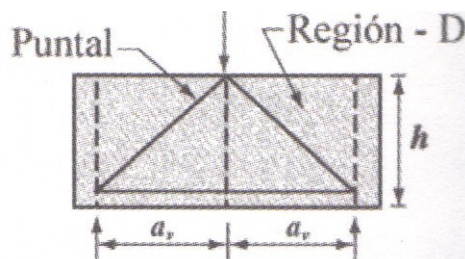
Según C.11.7.1  $l_n \leq 4h$

La luz libre entre las caras de los apoyos corresponde a 650 mm como se puede observar en la anterior figura del montaje del ensayo.

$$l_n = 650 \text{ mm} < 4 \cdot 500 = 2000 \text{ mm} \quad (\text{cumple condición})$$

Así mismo, de acuerdo a C.11.7.2. es válido utilizar para el análisis de estos tipos de elementos el Modelo Puntal – Tensor incluido en el Apéndice C-A del mencionado reglamento y con el cual se adelantarán los presentes cálculos.

#### Modelo Puntal – Tensor



(a) Luz de cortante,  $a_v < 2h$ , viga alta

#### Gráfica 31. Modelo Puntal – Tensor

$$a_v = (145 - 2 \cdot 30) / 2 = 42,5 \text{ cm} < 2 \cdot 50 = 100 \text{ cm} \quad (\text{cumple condición})$$

## Resistencia de los Puntales

$$F_{ns} = f_{ce}A_{cs}$$

$$f_{ce} = 0,85\beta_s f'_c$$

Para un puntal de sección transversal uniforme  $\beta_s = 1$

$$A_{cs} = w_s b_w = 60 \cdot 60 = 3600 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ángulo del puntal} = \text{atan}(50/42,5) = 49,64^\circ$$

$$\text{Componente vertical puntal} = CV = F_{ns} \text{Sen } 49,64^\circ$$

$$\Sigma F_y = 2 \cdot CV - P = 0$$

$$\text{Entonces } P = 2 \cdot CV$$

### Para concreto convencional (CC)

$$f_{ce} = 0,85 \cdot 27,6 \text{ MPa} = 23,46 \text{ MPa}$$

$$F_{ns} = 23,46 \cdot 3600 / 1000 = 84,46 \text{ kN}$$

Refuerzo Tipo 1 (sin armadura adicional)

$$F_{ns} = 84,46 \text{ kN}$$

$$CV = 84,46 \text{ Sen } 49,64^\circ = 64,36 \text{ kN}$$

$$P_{\text{máx}} = 2 \cdot 64,36 \text{ kN} = 128,72 \text{ kN} = 13,12 \text{ Ton}$$

Refuerzo Tipo 2 (con armadura adicional)

Grafíl  $\Phi$  5 mm. Cada 9 cm. Vertical.

$$A_s = 218 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

Longitud proyectada del puntal = 0,425 m.

$$A_s = 218 \cdot 0,425 = 93 \text{ mm}^2 / \text{puntal}$$

$$\alpha = 90^\circ - 49,64^\circ = 40,36^\circ$$

Para refuerzo en una sola dirección  $\alpha \geq 40^\circ$  (cumple condición)

$$A_s \text{ Sen } \alpha / b_s s > 0,003$$

$$93 \text{ Sen } 40,36^\circ / 60 \cdot 90 = 0,011 > 0,003 \quad (\text{cumple condición})$$

$$CV' = (A_s \text{ Sen } \alpha / b_s s) \text{ Cos } 49,64^\circ f_s A_{cs} = 0,011 \cdot \text{Cos } 49,64^\circ \cdot 643 \cdot 3600 / 1000 = 16,72 \text{ kN}$$

$$F_{ns} = 84,46 \text{ kN}$$

$$CV = 84,46 \text{ Sen } 49,64^\circ + CV' = 64,36 + 16,72 = 81,08 \text{ kN}$$

$$P_{\text{máx}} = 2 \cdot 81,08 \text{ kN} = 162,16 \text{ kN} = 16,53 \text{ Ton}$$

Para concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

$$f_{ce} = 0,85 \cdot 27,7 \text{ MPa} = 23,55 \text{ MPa}$$

$$F_{ns} = 23,55 \cdot 3600 / 1000 = 84,78 \text{ kN}$$

Refuerzo Tipo 1 (sin armadura adicional)

$$F_{ns} = 84,78 \text{ kN}$$

$$CV = 84,78 \text{ Sen } 49,64^\circ = 64,60 \text{ kN}$$

$$P_{\text{máx}} = 2 \cdot 64,60 \text{ kN} = 129,20 \text{ kN} = 13,17 \text{ Ton}$$

Refuerzo Tipo 2 (con armadura adicional)

Idéntico al cálculo mostrado para el concreto convencional, entonces:

$$CV' = 16,72 \text{ kN}$$

$$F_{ns} = 84,78 \text{ kN}$$

$$CV = 84,78 \text{ Sen } 49,64^\circ + CV' = 64,60 + 16,72 = 81,32 \text{ kN}$$

$$P_{\text{máx}} = 2 \cdot 81,32 \text{ kN} = 162,64 \text{ kN} = 16,58 \text{ Ton}$$

### **Resistencia del Tensor**

$$F_{nt} = f_y A_{ts}$$

Refuerzo 2#3

$$F_{nt} = 443 \cdot 142 / 1000 = 62,91 \text{ kN}$$

Verificación para la mayor resistencia de un puntal:

$$62,91 \text{ kN} > 84,78 \text{ kN} \cos 49,64^\circ$$

$$62,91 \text{ kN} > 54,90 \text{ kN} \quad (\text{se garantiza la falla por el puntal})$$

### Resumen de cargas teóricas de falla estimadas

Refuerzo	Concreto Convencional (CC)		Concreto Ag. Reciclado (CR)	
	P (kN)	P (Ton)	P (kN)	P (Ton)
Tipo 1	128,72	13,12	129,20	13,17
Tipo 2	162,16	16,53	162,64	16,58

**Tabla 12. Cargas teóricas de falla – vigas altas**

#### Diferencias teóricas CC vs. CR

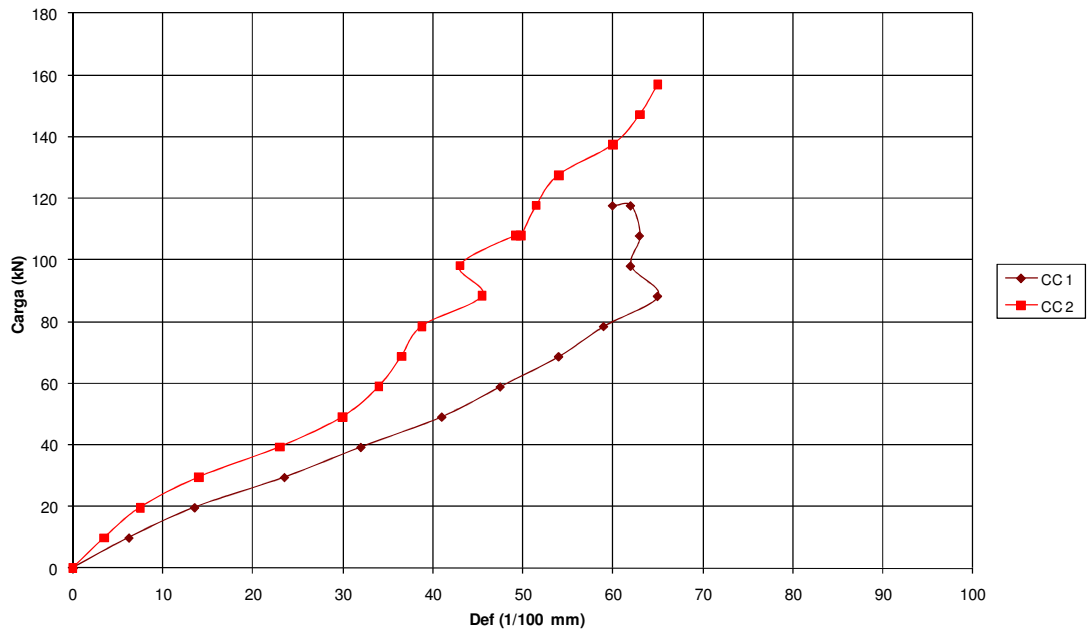
Como se puede observar en la anterior tabla, las cargas teóricas de falla estimadas son muy similares correspondiendo a la similitud en resistencia a la compresión de los cilindros ensayados para cada tipo de concreto; las diferencias esperadas teóricamente son del orden de 0,4% como se mostrará más adelante.

### 5.3-3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

A continuación se presentan las gráficas Carga puntual vs. Deformación de las vigas altas ensayadas y las comparaciones gráficas necesarias entre el concreto convencional (CC) y el concreto con agregado de concreto reciclado (CR).

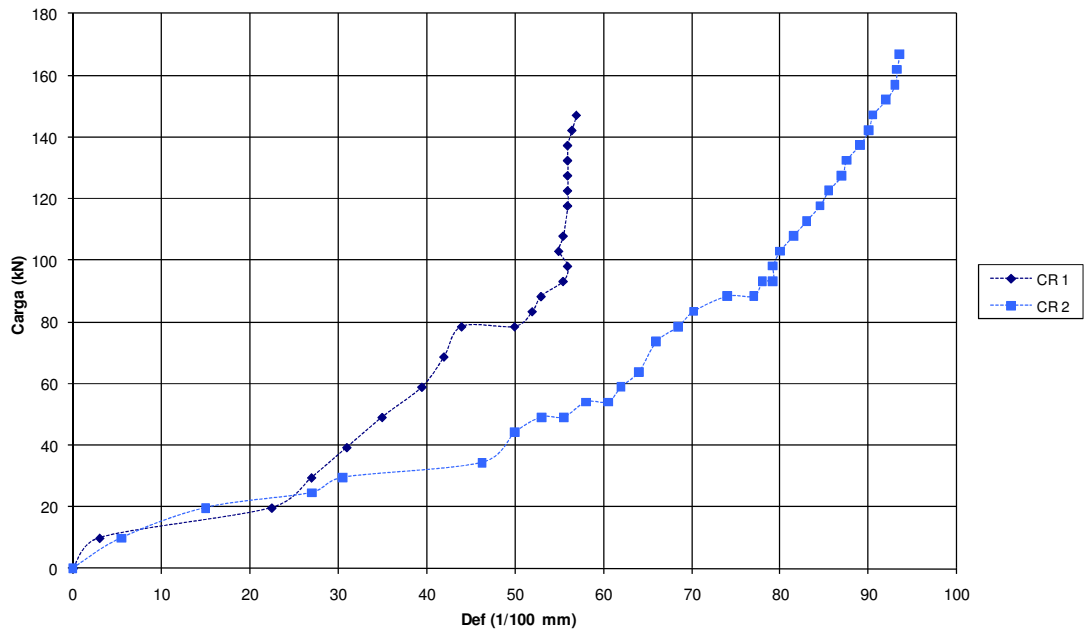


**CARGA PUNTUAL Vs. DEFORMACIÓN  
"CONCRETO CONVENCIONAL" REFUERZOS TIPO 1 Y 2**



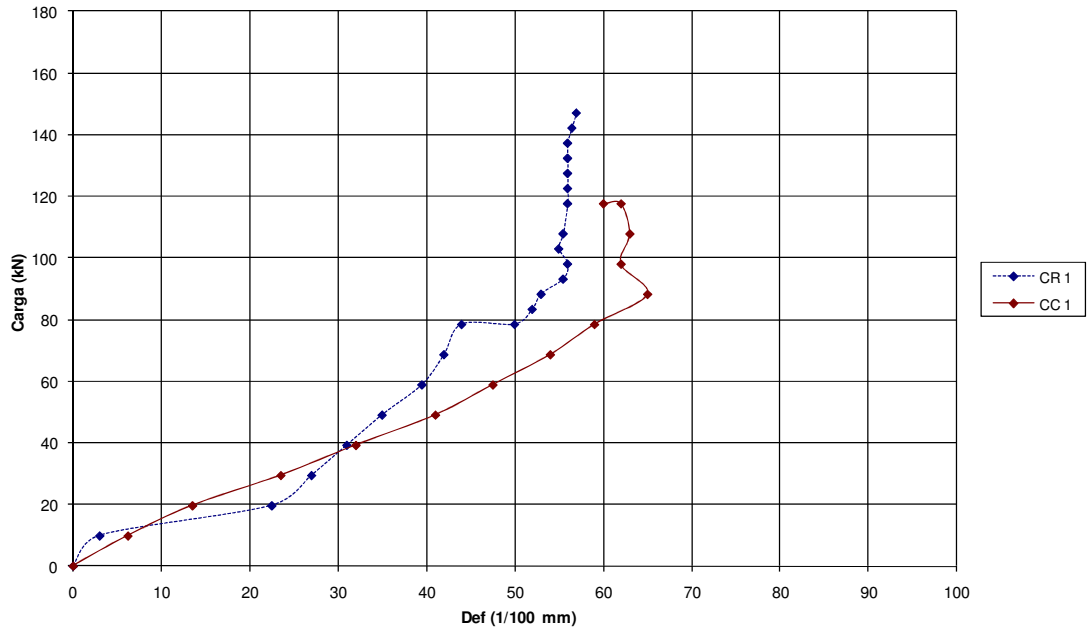
**Gráfica 32. Carga puntual vs. Deformación – vigas altas CC**

**CARGA PUNTUAL Vs. DEFORMACIÓN  
"CONCRETO Ag. RECICLADO" REFUERZOS TIPO 1 Y 2**



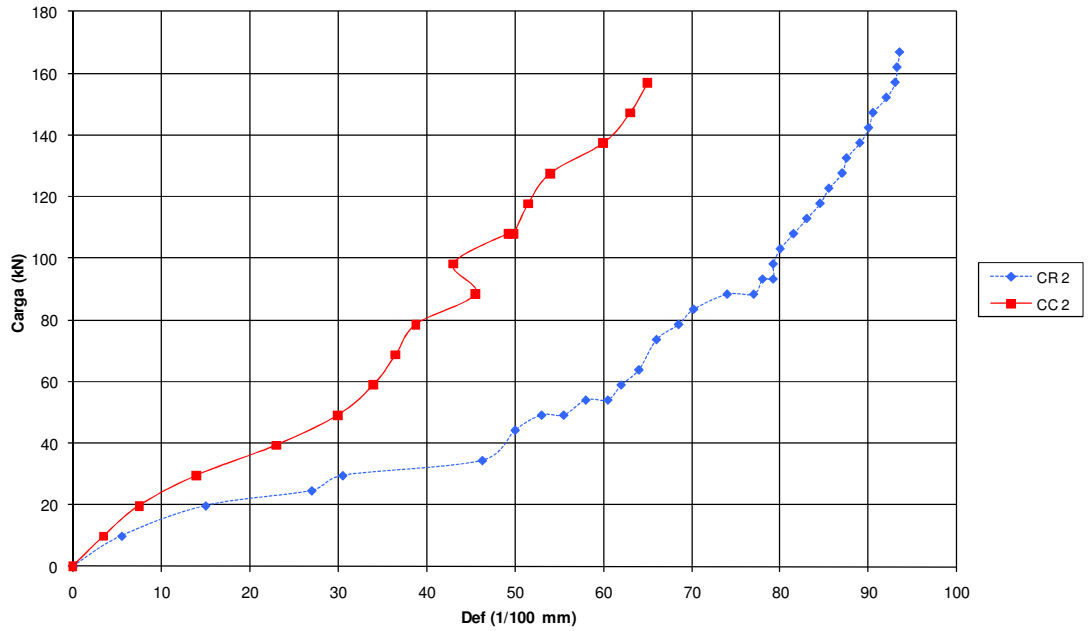
**Gráfica 33. Carga puntual vs. Deformación – vigas altas CR**

**CARGA PUNTUAL Vs. DEFORMACIÓN  
COMPARACIÓN CR Y CC CON REFUERZO TIPO 1**



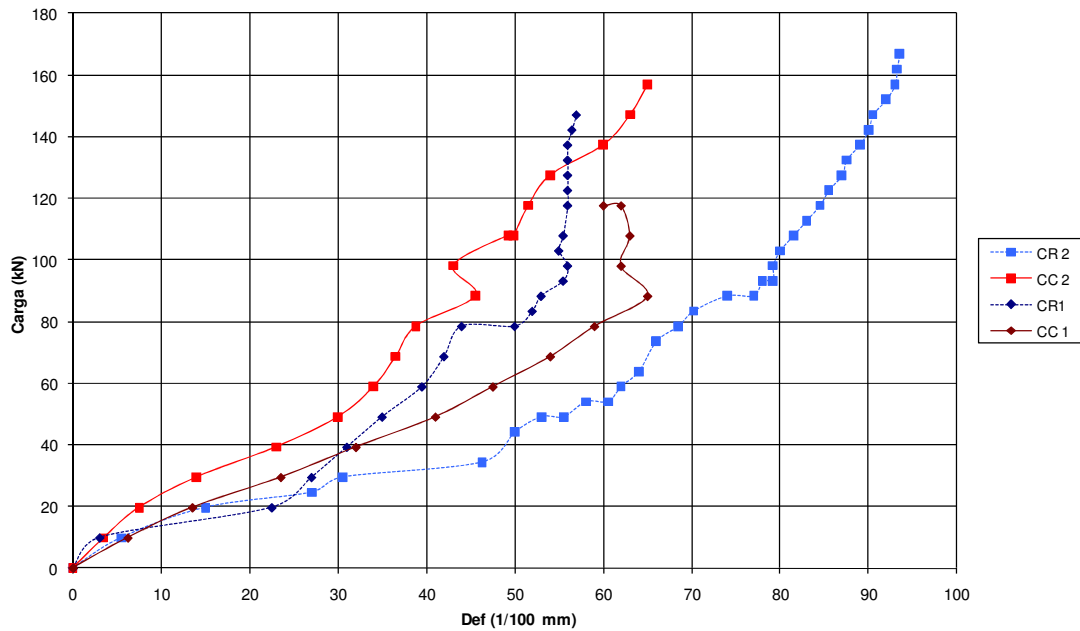
**Gráfica 34. Comparación vigas altas Tipo 1**

**CARGA PUNTUAL Vs. DEFORMACIÓN  
COMPARACIÓN CR Y CC CON REFUERZO TIPO 2**



**Gráfica 35. Comparación vigas altas Tipo 2**

**CARGA PUNTUAL Vs. DEFORMACIÓN  
COMPARACIÓN CR Y CC CON REFUERZOS TIPO 1 Y 2**



**Gráfica 36. Comparación vigas altas Tipo 1 y 2**

**5.3-4. COMPARACIÓN CARGAS DE FALLA TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES**

Concreto convencional (CC)

Refuerzo	Carga Teórica (Ton)	Carga Experim. (Ton)	Error (%)
Tipo 1	13,12	12,05	-8,16
Tipo 2	16,53	16,15	-2,30

**Tabla 13. Comparación cargas de falla CC – vigas altas**

Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

Refuerzo	Carga Teórica (Ton)	Carga Experim. (Ton)	Error (%)
Tipo 1	13,17	15,60	18,45
Tipo 2	16,58	17,35	4,64

**Tabla 14. Comparación cargas de falla CR – vigas altas**

### Diferencias teóricas y experimentales CC vs. CR

Refuerzo	Dif. P Teórica (Ton)	Dif. Porcentual	Dif. P Experi. (Ton)	Dif. Porcentual
Tipo 1	0,05	0,38%	3,55	29,46%
Tipo 2	0,05	0,30%	1,20	7,43%

**Tabla 15. Diferencias teóricas y experimentales CC vs. CR – vigas altas**

La anterior tabla presenta las diferencias de la carga puntual –tanto teóricas como experimentales– del concreto con agregado de concreto reciclado frente al concreto convencional; para el caso particular de los elementos ensayados el concreto con agregado de concreto reciclado presentó mayores resistencias que el concreto convencional.

#### **5.3-5. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES**

- Debido a que los elementos estructurales se fundieron y ensayaron en las mismas fechas y bajo condiciones climáticas muy similares, se observaron en los cilindros de testigo propiedades físico-mecánicas casi idénticas en cuanto a resistencia a la compresión y módulo de elasticidad para el concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso y el concreto convencional, en cuanto a peso unitario como se ha venido observando en los ensayos anteriores es ligeramente inferior en el concreto con agregado de concreto reciclado. Pese a estas similitudes que condujeron a la obtención de diferencias teóricas insignificantes, en los ensayos realizados se evidenciaron diferencias considerables entre los dos tipos de concreto tanto en la carga máxima que en todos los casos fue superior en el concreto con agregado de concreto reciclado (alrededor de 30% y 7% para viga alta sin refuerzo adicional y con refuerzo adicional respectivamente) como para las deformaciones como se evidencia en las gráficas carga-deformación.
- Para el concreto convencional se presentó una carga de falla experimental inferior a la teórica del orden de 8% menos para la viga alta sin refuerzo adicional y 2% para la viga alta con refuerzo adicional. Por otra parte, las vigas altas de concreto con agregado de concreto reciclado presentaron cargas de falla superiores a las teóricas del orden de 18 y 5 % más para el tipo 1 –sin armadura adicional– y el tipo 2 –con armadura adicional– respectivamente. A pesar de las diferencias los resultados obtenidos se consideran satisfactorios, toda vez que existen una gran cantidad de variables involucradas de difícil control que inciden en el comportamiento real de los elementos estructurales; así mismo se empleó el método puntal-tensor que si bien es muy acertado también está basado en hipótesis y

suposiciones que se asemejan a la realidad pero finalmente es un modelo que puede diferir con la experimentación.

- Como se esperaba, comparando las muestras de concreto convencional, la viga alta con refuerzo adicional presentó un mejor comportamiento que la que carecía de éste. Por el contrario, para el caso de las muestras de concreto con agregado de concreto reciclado se comportó mejor la viga alta sin refuerzo adicional pese a que la carga máxima fue inferior a la obtenida en la viga alta con refuerzo adicional.
- Comparando el concreto con agregado de concreto reciclado con el concreto convencional se observa para el refuerzo tipo 1 –sin armadura adicional– que el concreto convencional hasta alrededor de 40kN presenta un mejor comportamiento (menores deformaciones para la misma carga) a partir del mencionado nivel de carga se invierte el comportamiento pasando a funcionar mejor el concreto con agregado de concreto reciclado desarrollando una mayor capacidad de carga máxima. Analizando similarmente el comportamiento para las vigas altas tipo 2 –con refuerzo adicional– se presentó una carga máxima similar para los dos tipos de concreto pero el concreto convencional muestra un mejor desempeño, esto se evidencia claramente en las gráficas carga-deformación.
- A diferencia de lo observado en los ensayos de vigas continuas y placas apoyadas en tres bordes, se observan variaciones más pronunciadas para el mismo concreto y diferente tipo de refuerzo en el concreto con agregado de concreto reciclado.
- Como se ha venido mencionando el concreto con agregado de concreto reciclado presenta un comportamiento adecuado comparativamente con el concreto convencional de control, lo que hace pensar que para una sustitución del 20% del agregado grueso por concreto reciclado se obtienen desempeños satisfactorios.

## **5.4- MENSULAS**

### **5.4-1. GENERALIDADES DE LOS ENSAYOS**

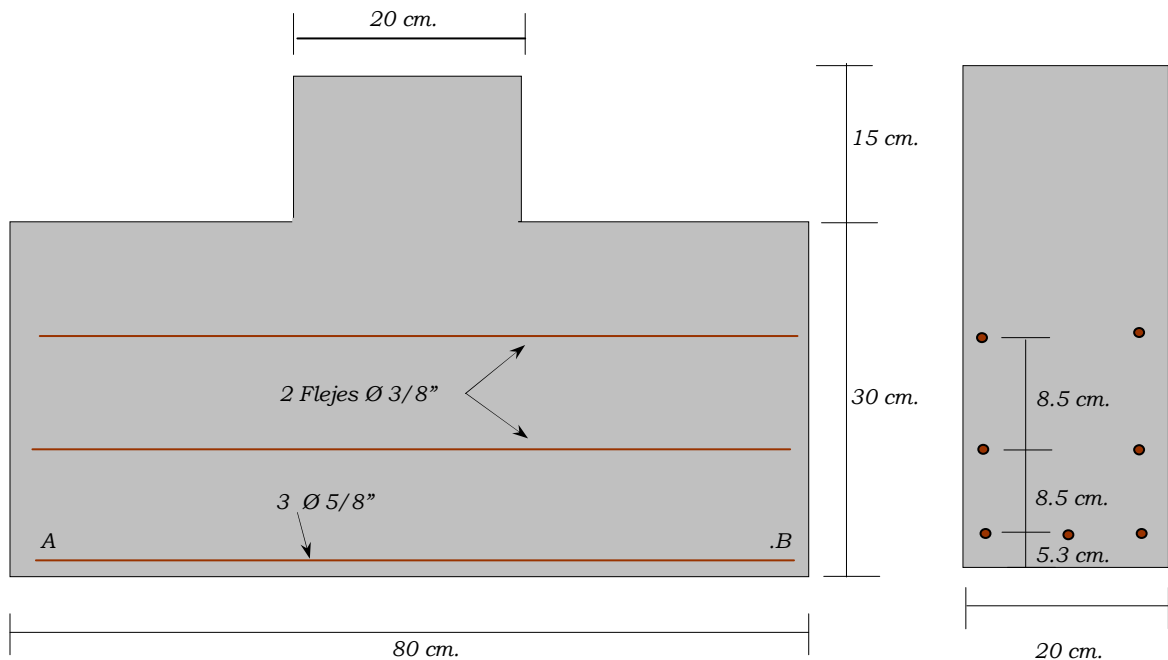
#### **Muestras**

En total se ensayaron 4 ménsulas (dos de concreto convencional y dos de concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso).

Se utilizaron elementos en forma de T invertida (ménsula doble), formada por un travesaño de 80 x 30 cm y una columneta de 15 cm de longitud, con sección transversal uniforme de 20 x 20 cm.

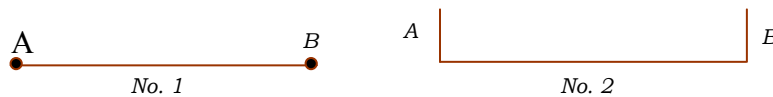
Armadura: en todos los casos, en el travesaño: tres barras inferiores, longitudinales, No. 5, y dos flejes paralelos a ellas, colocadas a distancia de 8.5 cm, en varilla No. 3. La diferencia de los dos tipos de ménsulas estriba en el anclaje de la armadura del travesaño.

A continuación se presenta un esquema de los elementos estructurales.



*Muestra 1. – barra transversal Ø 5/8 en A y en B soldada a barras longitudinales.*

*Muestra 2. – barras longitudinales con ganchos de 23 cm en A y en B.*



**Gráfica 37. Esquemas ménsulas**

## Materiales

Se utilizó concreto convencional para el concreto de control y concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso.

La resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y peso unitario se relacionan en seguida, estos valores corresponden al promedio del ensayo de cuatro (4) cilindros para cada tipo de concreto (ver anexo 1).

#### Concreto convencional (CC)

Fecha de fundida	Octubre 16 de 2010
Fecha de ensayo	Noviembre 17 de 2010
Edad concreto ensayado	32 días
Resistencia a la compresión promedio	27,6 MPa
Módulo de elasticidad	18445 MPa
Peso unitario	2271 kg/m <sup>3</sup>

#### Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

Fecha de fundida	Octubre 16 de 2010
Fecha de ensayo	Noviembre 17 de 2010
Edad concreto ensayado	32 días
Resistencia a la compresión promedio	27,7 MPa
Módulo de elasticidad	18459 MPa
Peso unitario	2210 kg/m <sup>3</sup>

#### Acero de refuerzo

Acero corrugado:  $f_y = 443 \text{ MPa}$   $F_u = 640 \text{ MPa}$

Los anteriores valores corresponden al promedio de los ensayos realizados al acero de refuerzo, a saber 3 muestras de barras (ver anexo 2).

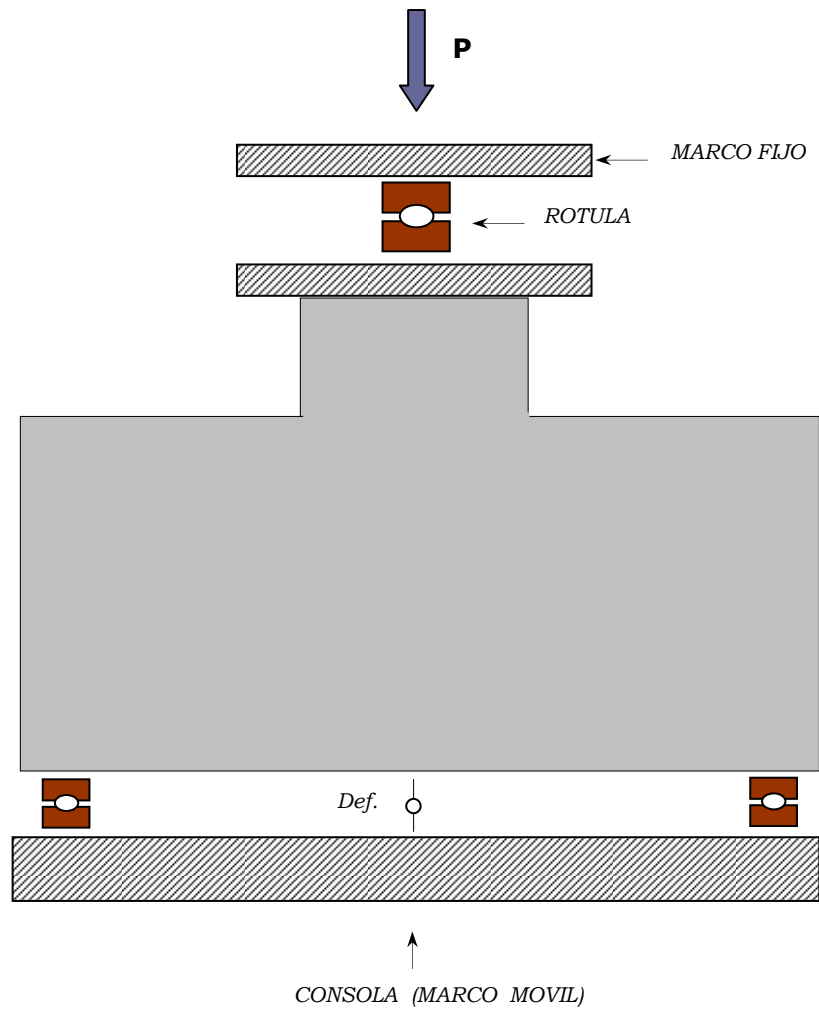
### **Montaje**

La máquina universal de ensayos Shimadzu de capacidad 100 toneladas tiene una consola inferior como marco móvil y un marco superior fijo.

Se instaló la muestra como se ve en el siguiente esquema.

Al subir el marco móvil se aplicaron cargas iguales sobre los dos extremos del travesaño y el marco fijo hizo la carga de reacción sobre la columneta.

El ascenso de los extremos fue detectado en la máquina (desplazamiento de la consola), el ascenso del punto del borde inferior del travesaño alineado con una cara vertical de la columneta, se determinó con el deformímetro mecánico del montaje.



**Gráfica 38. Montaje ensayo ménsulas**

### **Procedimiento**

Hecho el montaje, se verificó el estado de las muestras, a fin de detectar posibles defectos de construcción y/o averías por la manipulación.

Se aplicó carga lentamente para verificar el funcionamiento de los deformímetros mecánicos instalados y la detección del movimiento de la consola. Se llevó la carga hasta 1 tonelada. Se observó si había agrietamiento en la muestra y se descargó totalmente.

En seguida se cargó lentamente, con velocidad de carga de 4 toneladas por minuto, anotando deformaciones cada 4 toneladas, sin detener el proceso de carga; esto para el primer ensayo, a partir del segundo ensayo se tomaron



lecturas de deformaciones cada 2 toneladas a fin de obtener una mayor cantidad de datos (ver anexo 3).

Al estabilizarse la carga, se leyó en incrementos de deformación. Cuando la carga dejó de aumentar, se anotó su valor máximo y se permitió que la deformación aumentara para que el agrietamiento pudiera ser registrado en fotografías (ver anexo 4).

#### **5.4-2. CÁLCULO TEÓRICO DE LAS CARGAS DE FALLA**

Como primera medida se evalúa la condición de aplicabilidad para el análisis del Modelo Puntal – Tensor incluido en el Apéndice C-A del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

Según C.11.8.1  $a_v / d < 2$

Observando que las muestras presentaron variaciones dimensionales entre sí por efecto de las formaletas se realizarán análisis individuales para cada una de estas; a fin de verificar la mencionada aplicabilidad del método de análisis se realizará de manera general con las dimensiones proyectadas ya que las variaciones de las muestras no son lo suficientemente grandes para modificar el cumplimiento de la condición.

$$a_v = 660 / 2 = 330 \text{ mm}$$

$$d = 300 - 53 = 247 \text{ mm}$$

$$330 / 247 = 1,34 < 2 \quad \text{(cumple condición)}$$

Así mismo,  $a_v / d > 1$  por lo que no son aplicables C.11.8.3. y C.11.8.4 por lo que sólo es válido para el análisis del caso particular de estos tipos de elementos el Modelo Puntal – Tensor incluido en el Apéndice C-A del mencionado reglamento y con el cual se adelantarán los presentes cálculos.

#### **Modelo Puntal – Tensor**

Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

Refuerzo Tipo 1

$$a_v = (800 - 2*50)/2 = 350 \text{ mm}$$

#### **Resistencia de los Puntales**

$$F_{ns} = f_{ce}A_{cs}$$

$$f_{ce} = 0,85\beta_s f'_c$$

Para un puntal de sección transversal uniforme  $\beta_s = 1$

$$A_{cs} = w_s b_w = 32 \cdot 193 = 6176 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ángulo del puntal} = \text{atan}(303/350) = 40,88^\circ$$

$$\text{Componente vertical puntal} = CV = F_{ns} \text{Sen } 40,88^\circ$$

$$\Sigma F_y = 2 \cdot CV - P = 0$$

$$\text{Entonces } P = 2 \cdot CV$$

$$f_{ce} = 0,85 \cdot 27,7 \text{ MPa} = 23,55 \text{ MPa}$$

$$F_{ns} = 23,55 \cdot 6176 / 1000 = 145,44 \text{ kN}$$

Armadura horizontal

E # 3 Cada 8,5 cm.

$$A_s = 71 \cdot 2 \cdot 2 = 284 \text{ mm}^2$$

$$\alpha = 40,88^\circ$$

Para refuerzo en una sola dirección  $\alpha \geq 40^\circ$  (cumple condición)

$$A_s \text{ Sen } \alpha / b_s s > 0,003$$

$$284 \text{ Sen } 40,88^\circ / 193 \cdot 85 = 0,011 > 0,003 \quad (\text{cumple condición})$$

$$CV' = (A_s \text{ Sen } \alpha / b_s s) \text{Cos } 40,88^\circ f_s A_{cs} = 0,011 \cdot \text{Cos } 40,88^\circ \cdot 443 \cdot 6176 / 1000 = 23,44 \text{ kN}$$

$$F_{ns} = 145,44 \text{ kN}$$

$$CV = 145,44 \text{ Sen } 40,88^\circ + CV' = 95,19 + 23,44 = 118,63 \text{ kN}$$

$$P_{\text{máx}} = 2 \cdot 118,63 \text{ kN} = 237,26 \text{ kN} = 24,19 \text{ Ton}$$

### Refuerzo Tipo 2

$$a_v = (637) / 2 = 319 \text{ mm}$$

## Resistencia de los Puntales

$$F_{ns} = f_{ce}A_{cs}$$

$$f_{ce} = 0,85\beta_s f'_c$$

Para un puntal de sección transversal uniforme  $\beta_s = 1$

$$A_{cs} = w_s b_w = 32 \cdot 195 = 6240 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ángulo del puntal} = \text{atan}(308/319) = 43,99^\circ$$

$$\text{Componente vertical puntal} = CV = F_{ns} \text{Sen } 43,99^\circ$$

$$\Sigma F_y = 2 \cdot CV - P = 0$$

$$\text{Entonces } P = 2 \cdot CV$$

$$f_{ce} = 0,85 \cdot 27,7 \text{ MPa} = 23,55 \text{ MPa}$$

$$F_{ns} = 23,55 \cdot 6240 / 1000 = 146,96 \text{ kN}$$

Armadura horizontal

E # 3 Cada 8,5 cm.

$$A_s = 71 \cdot 2 \cdot 2 = 284 \text{ mm}^2$$

$$\alpha = 43,99^\circ$$

Para refuerzo en una sola dirección  $\alpha \geq 40^\circ$  (cumple condición)

$$A_s \text{ Sen } \alpha / b_s s > 0,003$$

$$284 \text{ Sen } 43,99^\circ / 195 \cdot 85 = 0,012 > 0,003 \quad (\text{cumple condición})$$

$$CV' = (A_s \text{ Sen } \alpha / b_s s) \text{Cos } 43,99^\circ f_s A_{cs} = 0,012 \cdot \text{Cos } 43,99^\circ \cdot 443 \cdot 6240 / 1000 = 23,67 \text{ kN}$$

$$F_{ns} = 146,96 \text{ kN}$$

$$CV = 146,96 \text{ Sen } 43,99^\circ + CV' = 102,07 + 23,67 = 125,74 \text{ kN}$$

$$P_{\text{máx}} = 2 \cdot 125,74 \text{ kN} = 251,48 \text{ kN} = 25,64 \text{ Ton}$$

## Concreto convencional (CC)

### Refuerzo Tipo 1

$$a_v = (662)/2 = 331 \text{ mm}$$

### **Resistencia de los Puntales**

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs}$$

$$f_{ce} = 0,85\beta_s f'_c$$

Para un puntal de sección transversal uniforme  $\beta_s = 1$

$$A_{cs} = w_s b_w = 32 \cdot 195 = 6240 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ángulo del puntal} = \text{atan}(303/331) = 42,47^\circ$$

$$\text{Componente vertical puntal} = CV = F_{ns} \text{Sen } 42,47^\circ$$

$$\Sigma F_y = 2 \cdot CV - P = 0$$

$$\text{Entonces } P = 2 \cdot CV$$

$$f_{ce} = 0,85 \cdot 27,6 \text{ MPa} = 23,46 \text{ MPa}$$

$$F_{ns} = 23,46 \cdot 6240 / 1000 = 146,39 \text{ kN}$$

Armadura horizontal

E # 3 Cada 8,5 cm.

$$A_s = 71 \cdot 2 \cdot 2 = 284 \text{ mm}^2$$

$$\alpha = 42,47^\circ$$

Para refuerzo en una sola dirección  $\alpha \geq 40^\circ$  (cumple condición)

$$A_s \text{ Sen } \alpha / b_s s > 0,003$$

$$284 \text{ Sen } 42,47^\circ / 195 \cdot 85 = 0,012 > 0,003 \quad (\text{cumple condición})$$

$$CV' = (A_s \text{ Sen } \alpha / b_s s) \text{Cos } 42,47^\circ f_s A_{cs} = 0,012 \cdot \text{Cos } 42,47^\circ \cdot 443 \cdot 6240 / 1000 = 23,59 \text{ kN}$$

$$F_{ns} = 146,39 \text{ kN}$$

$$CV = 146,39 \text{ Sen } 42,47^\circ + CV' = 98,84 + 23,59 = 122,43 \text{ kN}$$

$$P_{\text{máx}} = 2 * 122,43 \text{ kN} = 244,86 \text{ kN} = 24,96 \text{ Ton}$$

### Refuerzo Tipo 2

$$a_v = (658)/2 = 329 \text{ mm}$$

### **Resistencia de los Puntales**

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs}$$

$$f_{ce} = 0,85 \beta_s f'_c$$

Para un puntal de sección transversal uniforme  $\beta_s = 1$

$$A_{cs} = w_s b_w = 32 * 193 = 6176 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ángulo del puntal} = \text{atan}(303/329) = 42,64^\circ$$

$$\text{Componente vertical puntal} = CV = F_{ns} \text{ Sen } 42,64^\circ$$

$$\Sigma F_y = 2 * CV - P = 0$$

$$\text{Entonces } P = 2 * CV$$

$$f_{ce} = 0,85 * 27,6 \text{ MPa} = 23,46 \text{ MPa}$$

$$F_{ns} = 23,46 * 6176 / 1000 = 144,89 \text{ kN}$$

Armadura horizontal

E # 3 Cada 8,5 cm.

$$A_s = 71 * 2 * 2 = 284 \text{ mm}^2$$

$$\alpha = 42,64^\circ$$

Para refuerzo en una sola dirección  $\alpha \geq 40^\circ$  (cumple condición)

$$A_s \text{ Sen } \alpha / b_s s > 0,003$$

$$284 \text{ Sen } 42,64^\circ / 193 * 85 = 0,012 > 0,003 \quad (\text{cumple condición})$$

$$CV' = (A_s \text{Sen} \alpha / b_{ss}) \text{Cos } 42,64^\circ f_s A_{cs} = 0,012 * \text{Cos} 42,64^\circ * 443 * 6176 / 1000 = 23,60 \text{ kN}$$

$$F_{ns} = 144,89 \text{ kN}$$

$$CV = 144,89 \text{ Sen } 42,64^\circ + CV' = 98,14 + 23,60 = 121,74 \text{ kN}$$

$$P_{\text{máx}} = 2 * 121,74 \text{ kN} = 243,48 \text{ kN} = 24,82 \text{ Ton}$$

### Resistencia del Tensor

$$F_{nt} = f_y A_{ts}$$

Refuerzo 3#5

$$F_{nt} = 443 * 3 * 198 / 1000 = 263,14 \text{ kN}$$

Verificación para la mayor resistencia de un puntal:

$$263,14 \text{ kN} > 146,96 \text{ kN Cos } 43,99^\circ$$

$$263,14 \text{ kN} > 105,73 \text{ kN} \quad (\text{se garantiza la falla por el puntal})$$

### Resumen de cargas teóricas de falla estimadas

	Concreto Convencional (CC)		Concreto Ag. Reciclado (CR)	
Refuerzo	P (kN)	P (Ton)	P (kN)	P (Ton)
Tipo 1	244,86	24,96	237,26	24,19
Tipo 2	243,48	24,82	251,48	25,64

Tabla 16. Cargas teóricas de falla – ménsulas

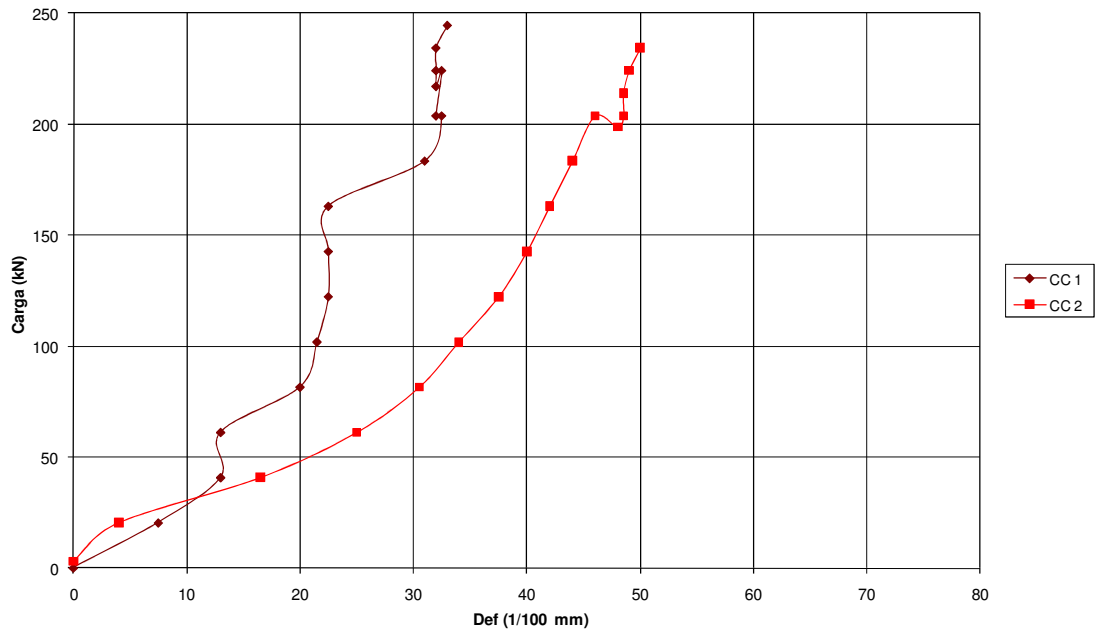
#### Diferencias teóricas CC vs. CR

Como se puede observar en la anterior tabla, las cargas teóricas de falla estimadas son muy similares correspondiendo a la similitud en resistencia a la compresión de los cilindros ensayados para cada tipo de concreto; las diferencias esperadas teóricamente son del orden de 3% como se mostrará más adelante.

### 5.4-3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

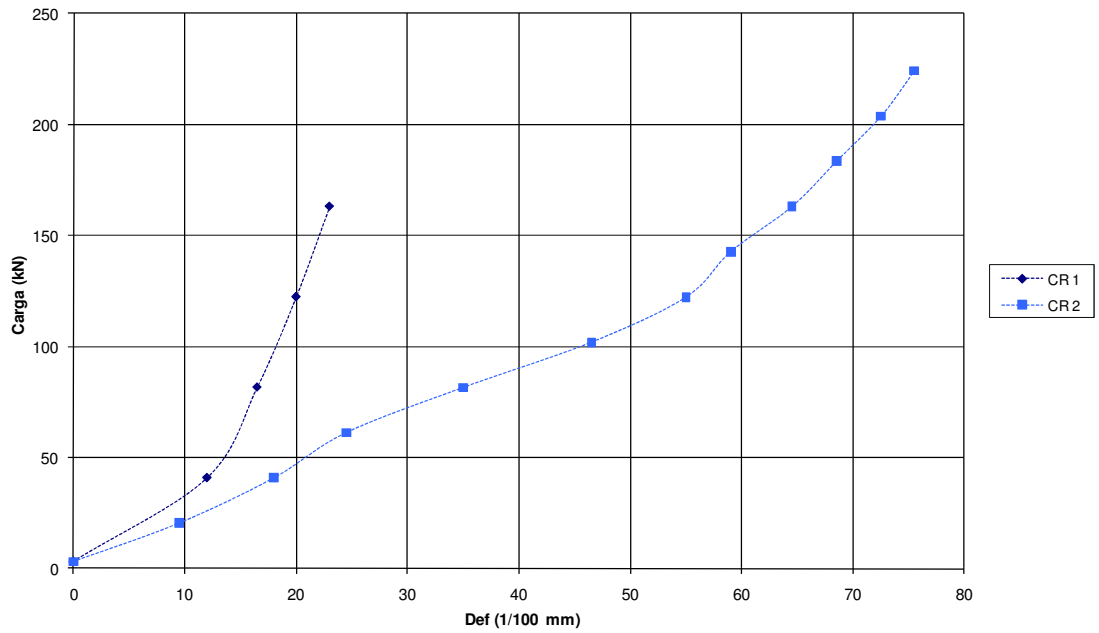
A continuación se presentan las gráficas Carga puntual vs. Deformación de las ménsulas ensayadas y las comparaciones gráficas necesarias entre el concreto convencional (CC) y el concreto con agregado de concreto reciclado (CR).

**CARGA Vs. DEFORMACIÓN  
"CONCRETO CONVENCIONAL" REFUERZOS TIPO 1 Y 2**



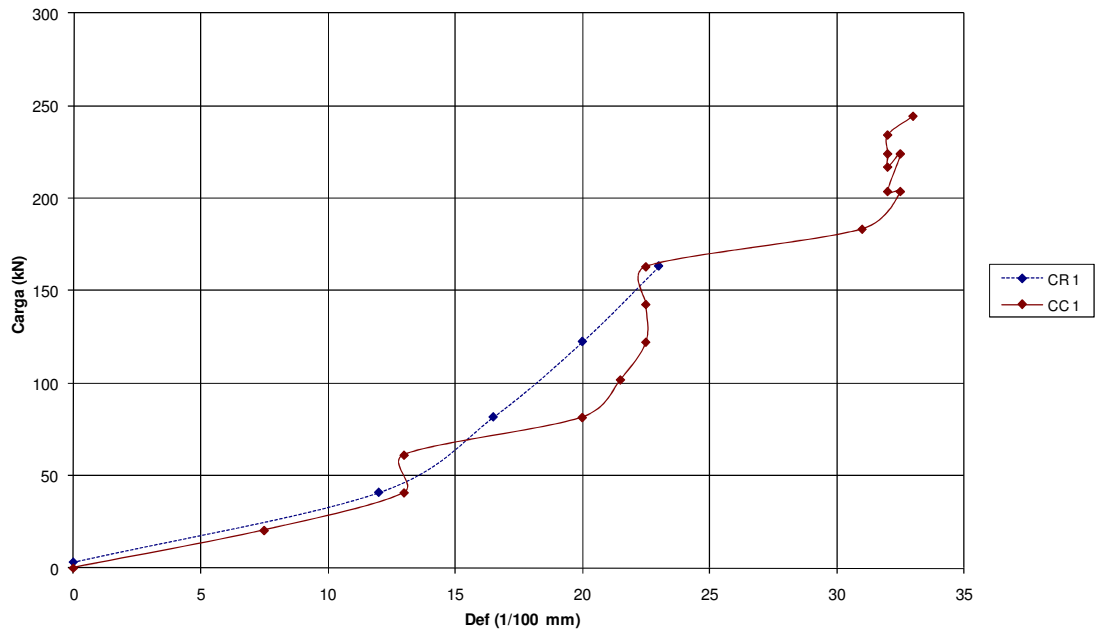
**Gráfica 39. Carga vs. Deformación – ménsulas CC**

**CARGA Vs. DEFORMACIÓN  
"CONCRETO RECICLADO" REFUERZOS TIPO 1 Y 2**



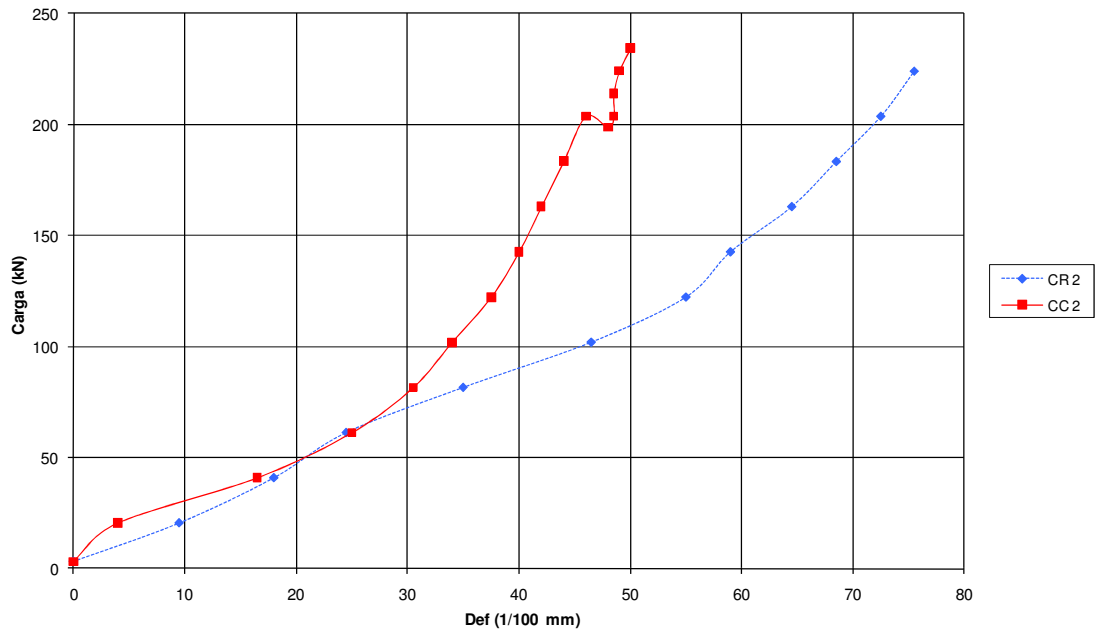
**Gráfica 40. Carga vs. Deformación – ménsulas CR**

**CARGA Vs. DEFORMACIÓN  
COMPARACIÓN CR Y CC CON REFUERZO TIPO 1**



**Gráfica 41. Comparación ménsulas Tipo 1**

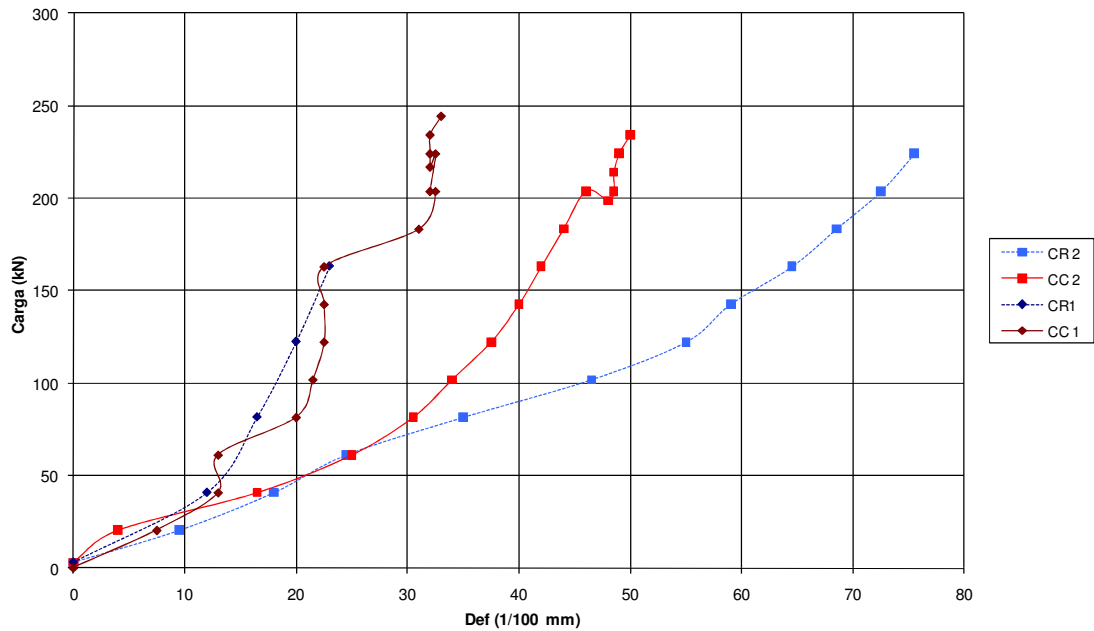
**CARGA Vs. DEFORMACIÓN  
COMPARACIÓN CR Y CC CON REFUERZO TIPO 2**



**Gráfica 42. Comparación ménsulas Tipo 2**



**CARGA Vs. DEFORMACIÓN  
COMPARACIÓN CR Y CC CON REFUERZOS TIPO 1 Y 2**



**Gráfica 43. Comparación ménsulas Tipo 1 y 2**

**5.4-4. COMPARACIÓN CARGAS DE FALLA TEÓRICAS EXPERIMENTALES**

Concreto convencional (CC)

Refuerzo	Carga Teórica (Ton)	Carga Experim. (Ton)	Error (%)
Tipo 1	24,96	24,87	-0,36
Tipo 2	24,82	23,62	-4,83

**Tabla 17. Comparación cargas de falla CC – ménsulas**

Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

Refuerzo	Carga Teórica (Ton)	Carga Experim. (Ton)	Error (%)
Tipo 1	24,19	16,14	-33,27
Tipo 2	25,64	22,32	-12,93

**Tabla 18. Comparación cargas de falla CR – ménsulas**

## Diferencias teóricas y experimentales CC vs. CR

Refuerzo	Dif. P Teórica (Ton)	Dif. Porcentual	Dif. P Experi. (Ton)	Dif. Porcentual
Tipo 1	-0,77	-3,10%	-8,73	-35,10%
Tipo 2	0,82	3,29%	-1,30	-5,50%

**Tabla 19. Diferencias teóricas y experimentales CC vs. CR – ménsulas**

La anterior tabla presenta las diferencias de la carga puntual –tanto teóricas como experimentales– del concreto con agregado de concreto reciclado frente al concreto convencional; para el caso particular de los elementos ensayados el concreto con agregado de concreto reciclado presentó menores resistencias que el concreto convencional.

La mayor diferencia que se presentó (aproximadamente 35%) es el caso de la ménsula de concreto con agregado de concreto reciclado que falló anticipadamente debido a que la armadura quedó desplazada en el momento de la construcción y en consecuencia quedó un apoyo en una zona sin refuerzo; éste defecto sólo se pudo identificar después de ensayar el elemento estructural.

### **5.4-5. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES**

- Al igual que para las vigas altas se observaron en los cilindros de testigo propiedades físico-mecánicas casi idénticas en cuanto a resistencia a la compresión y módulo de elasticidad para el concreto con agregado de concreto reciclado con una sustitución del 20% del agregado grueso y el concreto convencional debido a que todos los elementos estructurales se fundieron y ensayaron en las mismas fechas y bajo condiciones climáticas muy similares, en cuanto a peso unitario como se ha venido observando en los ensayos anteriores es ligeramente inferior en el concreto con agregado de concreto reciclado. Pese a estas similitudes que condujeron a la obtención de diferencias teóricas pequeñas, en los ensayos realizados se evidenciaron diferencias considerables entre los dos tipos de concreto tanto en la carga máxima que en todos los casos fue superior en el concreto convencional (alrededor de 35% y 6% para anclaje con barra transversal soldada y ganchos a 90° respectivamente) como para las deformaciones como se evidencia en las gráficas carga-deformación.
- Para el concreto convencional se presentó una carga de falla experimental inferior a la teórica del orden de 5% menos para la ménsula con anclaje en ganchos a 90° y cargas de falla experimentales y teóricas muy similares (la diferencia no alcanza el 0,5%) para la ménsula con anclaje de barra soldada. Por otra parte, las ménsulas de concreto con agregado de concreto reciclado presentaron cargas de falla inferiores a las teóricas del

orden de 33 y 13 % menos para el tipo 1 –anclaje con barra soldada– y el tipo 2 –anclaje con ganchos a 90°– respectivamente. A pesar de las diferencias los resultados obtenidos se consideran satisfactorios, toda vez que existen una gran cantidad de variables involucradas de difícil control que inciden en el comportamiento real de los elementos estructurales; así mismo se empleó el método puntal-tensor que si bien es muy acertado también está basado en hipótesis y suposiciones que se asemejan a la realidad pero finalmente es un modelo que puede diferir con la experimentación, adicionalmente *por la naturaleza de la falla (cortante) los elementos estructurales pueden presentar fallas locales súbitas como es el caso de la ménsula de concreto con agregado de concreto reciclado que falló anticipadamente debido a que la armadura quedó desplazada en el momento de la construcción y en consecuencia quedó un apoyo en una zona sin refuerzo, éste caso fue el que presentó la mayor diferencia (aproximadamente 33% menos que la carga de falla teórica)*; cabe anotar que esto se presentó en el primer ensayo realizado por lo que se aumentó en dos centímetros la distancia del borde de la ménsula al centro de los apoyos a fin de evitar la repetición del inconveniente.

- Como se esperaba, comparando las muestras de concreto convencional, la ménsula con anclaje soldado presentó un mejor comportamiento que la que tenía anclaje con ganchos a 90°. Para el caso de las muestras de concreto con agregado de concreto reciclado se obtuvo una mayor carga de falla en la ménsula con anclaje de ganchos a 90° debido a la falla prematura de la ménsula con anclaje soldado por las razones explicadas con anterioridad, sin embargo pese a que la carga máxima fue inferior a la obtenida en la ménsula con anclaje de ganchos a 90° se evidencia claramente en las curvas carga–deformación un mejor comportamiento en la ménsula con anclaje soldado.
- Comparando el concreto con agregado de concreto reciclado con el concreto convencional se observa para el refuerzo tipo 1 –con anclaje de barra soldada– que presentan un comportamiento muy similar hasta alrededor de 16 toneladas (carga de falla de la ménsula de concreto con agregado de concreto reciclado), inclusive la ménsula de concreto con agregado de concreto reciclado se comportó ligeramente mejor hasta su falla prematura. Analizando similarmente el comportamiento para las ménsulas con refuerzo tipo 2 –con anclaje de ganchos a 90°– se presentó una carga máxima similar para los dos tipos de concreto pero el concreto convencional muestra un mejor desempeño, teniendo menores deformaciones para el mismo nivel de carga, esto se puede notar con claridad en las gráficas carga-deformación.

- A diferencia de lo observado en los ensayos de vigas continuas y placas apoyadas en tres bordes, se observan al igual que el caso de vigas altas variaciones más pronunciadas para el mismo concreto y diferente tipo de refuerzo en el concreto con agregado de concreto reciclado, esto se puede explicar por el tipo de sollicitación (cortante), mostrando que el comportamiento del concreto con agregado de concreto reciclado es más susceptible al cortante que a la flexión.
- Como se ha venido mencionando el concreto con agregado de concreto reciclado presenta un comportamiento adecuado comparativamente con el concreto convencional de control, lo que hace pensar que para una sustitución del 20% del agregado grueso por concreto reciclado se obtienen desempeños satisfactorios.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

Adicionalmente a las conclusiones particulares de cada tipo de elemento estructural estudiado incluidas al final de los respectivos capítulos, a continuación se plantearán unas conclusiones generales producto de la compilación de las conclusiones ya mencionadas y unas recomendaciones para futuros estudios.

- De manera general, se comprobó que para una sustitución del 20% del agregado grueso por agregado de concreto reciclado se obtienen comportamientos satisfactorios desde el punto de vista de resistencia mecánica y las diferencias entre el concreto convencional y el concreto con agregado de concreto reciclado no son significativas, permitiendo su utilización en diversos tipos de elementos estructurales sin acarrear consecuencias negativas en contra de la seguridad.
- El concreto con agregado de concreto reciclado es una alternativa prometedora que amerita seguir siendo estudiada para en un futuro alcanzar la normalización y por ende su aplicación en las obras civiles del entorno Colombiano con los correspondientes beneficios al medio ambiente.
- Se considera necesario acometer más investigaciones del material a fin de avanzar en el estado del arte a nivel nacional; sería interesante estudiar otros tipos de elementos estructurales como columnas ó pórticos, para estos últimos es aconsejable incluir cargas dinámicas y analizar el comportamiento ante este tipo de solicitaciones.
- Es recomendable adelantar estudios con diferentes porcentajes de sustitución del agregado grueso natural por agregado de concreto reciclado para encontrar el punto de equilibrio a partir del cual las propiedades físico-mecánicas y el comportamiento estructural se vean significativamente comprometidos.
- Las investigaciones previas referenciadas fueron muy útiles para el desarrollo del presente estudio, en especial las del Ing. Nestor Raúl Bojacá Castañeda que sirvieron de punto partida en cuanto a propiedades de los agregados y diseños de mezclas para los elementos estructurales ensayados; esto se propició por la coordinación de trabajos de grado dentro de la línea de investigación Tecnología del concreto del Posgrado en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Para terminar, el desempeño de los elementos estructurales ensayados (vigas continuas, placas apoyadas en tres bordes, vigas altas y ménsulas) cumplió a cabalidad con las expectativas ante las solicitaciones impuestas,

no siendo necesario hacer ajuste alguno a las ecuaciones clásicas del diseño estructural, mostrando un comportamiento muy similar al concreto convencional o de control.

## 7. REFERENCIAS

- Ref. 1** ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). *UTILIZACION DE ARIDO REICLADO PARA LA FABRICACION DE HORMIGON ESTRUCTURAL*, España, 2006.
- Ref. 2** BOJACA C., Néstor R. *CONCRETO SOSTENIBLE COMO ALTERNATIVA ESTRUCTURAL, AMBIENTAL Y ECONOMICA EN LA CONSTRUCCION DE OBRAS CIVILES*, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., 2008.
- Ref. 3** RODRÍGUEZ, Alvaro L. *PROPIEDADES DEL CONCRETO REICLADO COMO AGREGADO*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2001.
- Ref. 4** AGUJA L., Elsa A. e HINCAPIÉ H., Ángela M. *AGREGADO REICLADO PARA MORTEROS*, Universidad EAFIT, Medellín, 2002.
- Ref. 5** ROBLES C., Juan P. y VANEGAS C., Juliana M. *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO REICLADO PARA USO EN EDIFICACIONES CONVENCIONALES*, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2008.
- Ref. 6** AGUDELO, Laura. *ABRASIÓN Y SORTIVIDAD EN CONCRETOS CON AGREGADO GRUESO REICLADO*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Ref. 7** HERRERA R., Diana M. *ANÁLISIS DE LA PERMEABILIDAD EN CONCRETOS CON AGREGADO GRUESO REICLADO Y ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Ref. 8** BOJACA C., Néstor R. *PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS CON AGREGADO REICLADO*, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., 2013.
- Ref. 9** SÁNCHEZ DE JUAN, M. *ESTUDIO SOBRE LA UTILIZACION DE ARIDO REICLADO PARA LA FABRICACION DE HORMIGON ESTRUCTURAL*, Madrid, España, 2005.

- Ref. 10** GOTTFREDSSEN, F. R.; THSOGERSEN, F. *RECYCLING OF CONCRETE IN AGGRESSIVE ENVIRONMENT*, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the third International RILEM Symposium; Ed. Erik K. Lauritzen; pp 309 – 316; 1993.
- Ref. 11** ETXEBERRIA, M. *EXPERIMENTAL STUDY ON MICROSTRUCTURE AND STRUCTURAL BEHAVIOUR OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE*, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2004.
- Ref. 12** YAGISHITA, F., SANO, M., YAMADA, M. *BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS CONTAINING RECYCLED COARSE AGGREGATE CONCRETE*, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the third International RILEM Symposium; Edited by Erik K. Lauritzen; pp 331 – 342; 1993.
- Ref. 13** MUKAY, T., KIKUCHI, M. *PROPERTIES OF REINFORCED CONCRETE BEAMS CONTAINING RECYCLED AGGREGATE*, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai; pp 670 – 679; 1988.
- Ref. 14** GONZÁLEZ, B. *HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE DEMOLICIONES: DOSIFICACIONES, PROPIEDADES MECÁNICAS Y COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL A CORTANTE*, Universidad Politécnica A Coruña, 2002.
- Ref. 15** INSTITUTO DEL CONCRETO – ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO (ASOCRETO). *TECNOLOGÍA Y PROPIEDADES*, Bogotá D.C., 2000.
- Ref. 16** MCNAIL, K., KANG, T. *RECYCLED CONCRETE AGGREGATES: A REVIEW*, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 7, No. 1; pp 61 – 69; March 2013.
- Ref. 17** TSUJINI, M., NOGUCHI, T., TAMURA, M., KANEMATSU, M., MARUYAMA, I., *APPLICATION OF RECYCLED COARSE AGGREGATE TO CONCRETE STRUCTURE BY SURFACE MODIFICATION TREATMENT*, Journal of Advanced Technology, Vol. 5, No. 1; pp 13 – 25; February 2007.



## 8. BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). *REQUISITOS DE REGLAMENTO PARA CONCRETO ESTRUCTURAL (ACI 318S-08) Y COMENTARIO*, Bogotá D.C., 2008.
- ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). *UTILIZACION DE ARIDO RECICLADO PARA LA FABRICACION DE HORMIGON ESTRUCTURAL*, España., 2006.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA (AIS). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESISTENTE (NSR-10)*, Bogotá D.C., 2010.
- BOJACA C., Néstor R. *CONCRETO SOSTENIBLE COMO ALTERNATIVA ESTRUCTURAL, AMBIENTAL Y ECONOMICA EN LA CONSTRUCCION DE OBRAS CIVILES*, Bogotá D.C., 2008.
- NILSON, Arthur H. *DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO*, Bogotá D.C., 1999.
- ROBLES C., Juan P. y VANEGAS C., Juliana M. *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO RECICLADO PARA USO EN EDIFICACIONES CONVENCIONALES*, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2008.
- RODRÍGUEZ, Alvaro L. *PROPIEDADES DEL CONCRETO RECICLADO COMO AGREGADO*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2001.
- SEGURA F., Jorge I. *ESTRUCTURAS DE CONCRETO I*, Bogotá D.C., 2002.

## 9. ANEXOS VIGAS CONTINUAS

### ANEXO 1 – Ensayos cilindros de concreto

Muestras de concreto con agregado de concreto reciclado (CR)						
<b>CR1</b>						
Peso	3594 g					
	<b>distancias (cm)</b>			<b>Carga (Ton)</b>	<b>Deformación x10<sup>-2</sup> mm</b>	
					<b>CR1</b>	<b>CR2</b>
					<b>CR3</b>	
Diámetro	10,1			2	2	3
Altura	19,9			4	4	4
Distancia entre anillos	9,0			6	6	6
	9,1			8	9	9
Distancia al deformímetro	5,8			10	12	12
Distancia a la varilla	5,4			12	15	16
				14	20	20
<b>CR2</b>						
Peso	3480 g			16	23	25
	<b>distancias (cm)</b>			18	28	35
				20	37	-
Diámetro	9,9			<b>Carga de falla</b>	<b>20,3 Ton</b>	<b>19,2 Ton</b>
Altura	19,9					<b>18,3 Ton</b>
Distancia entre anillos	9,0					
	9,1					
Distancia al deformímetro	5,7					
Distancia a la varilla	5,5					
<b>CR3</b>						
Peso	3712 g					
	<b>distancias (cm)</b>					
Diámetro	10,1					
Altura	20,1					
Distancia entre anillos	9,3					
	9,2					
Distancia al deformímetro	5,8					
Distancia a la varilla	5,2					

Muestras de concreto convencional (CC)						
<b>CC1</b>						
Peso	3612 g					
	<b>distancias (cm)</b>			<b>Carga (Ton)</b>	<b>Deformación x10<sup>-2</sup> mm</b>	
					<b>CC1</b>	<b>CC2</b>
Diámetro	10,1			2	1	1
Altura	19,8			4	2,5	3
Distancia entre anillos	9,1			6	4,5	5
	8,9			8	7	7
Distancia al deformímetro	5,4			10	9	10
Distancia a la varilla	5,4			12	12	12
				14	14	15
<b>CC2</b>				16	16,5	18
Peso	3774 g			18	19	20
	<b>distancias (cm)</b>			20	22	23
Diámetro	10,2			22	25	27
Altura	20,2			24	28	30
Distancia entre anillos	9,0			26	33	34
	9,3			28	-	41
Distancia al deformímetro	5,5			<b>Carga de falla</b>	<b>26,55 Ton</b>	<b>28,00 Ton</b>
Distancia a la varilla	5,0					<b>26,90 Ton</b>
<b>CC3</b>						
Peso	3522 g					
	<b>distancias (cm)</b>					
Diámetro	9,9					
Altura	19,9					
Distancia entre anillos	9,0					
	9,1					
Distancia al deformímetro	5,7					
Distancia a la varilla	5,5					

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

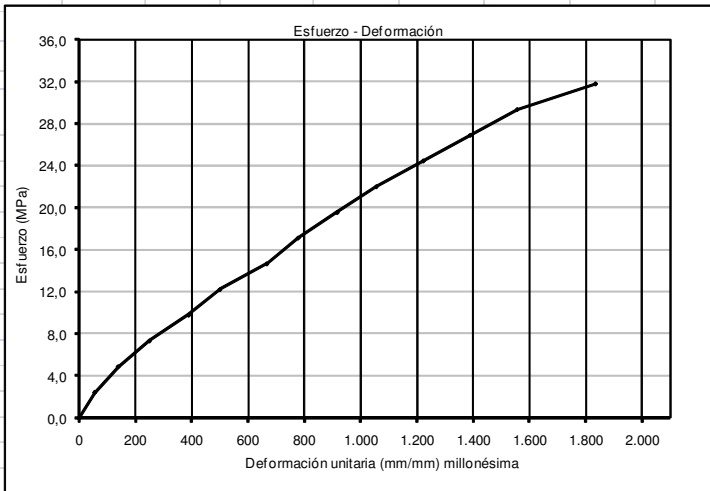
LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO CONVENCIONAL - MUESTRA 1**

Diámetro promedio:	101,0 mm
Área cilindro:	8011,9 mm <sup>2</sup>
Distancia vertical entre anillos:	90 mm
Distancia horizontal a deformimetro:	54 mm
Distancia horizontal a apoyo:	54 mm

Peso específico:  
2276,93 kg/m<sup>3</sup>

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{cl} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
2.000	1,0	2,45	56
4.000	2,5	4,89	139
6.000	4,5	7,34	250
8.000	7,0	9,79	389
10.000	9,0	12,23	500
12.000	12,0	14,68	667
14.000	14,0	17,12	778
16.000	16,5	19,57	917
18.000	19,0	22,02	1.056
20.000	22,0	24,46	1.222
22.000	25,0	26,91	1.389
24.000	28,0	29,36	1.556
26.000	33,0	31,80	1.833
<b>26.550</b>		<b>32,5</b>	



Máximo

$E_c$  : 21.505 MPa

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

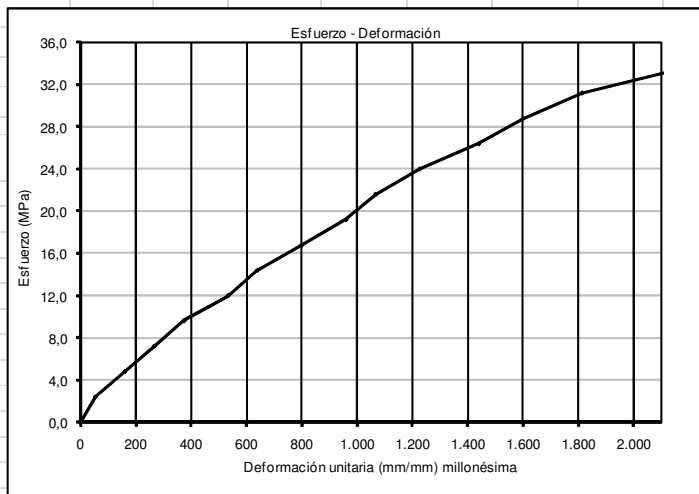
Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

**CONCRETO CONVENCIONAL - MUESTRA 2**

Diámetro promedio:	102,0 mm
Área cilindro:	8171,3 mm <sup>2</sup>
Distancia vertical entre anillos:	91,5 mm
Distancia horizontal a deformimetro:	55 mm
Distancia horizontal a apoyo:	50 mm

Peso específico:

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{cl} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
2.000	1,0	2,40	53
4.000	3,0	4,80	160
6.000	5,0	7,20	267
8.000	7,0	9,59	373
10.000	10,0	11,99	533
12.000	12,0	14,39	640
14.000	15,0	16,79	800
16.000	18,0	19,19	960
18.000	20,0	21,59	1.066
20.000	23,0	23,99	1.226
22.000	27,0	26,39	1.440
24.000	30,0	28,78	1.600
26.000	34,0	31,18	1.813
28.000	41,0	33,58	2.186
<b>28.000</b>		<b>33,6</b>	



Máximo

$E_c$  : 20.436 MPa

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

CONCRETO CONVENCIONAL - MUESTRA 3

Diámetro promedio:	99,0 mm	Peso específico:	2299,19 kg/m <sup>3</sup>
Área cilindro :	7697,7 mm <sup>2</sup>		
Distancia vertical entre anillos :	90,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	57 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	55 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{el} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
2.000	1,0	2,55	55
4.000	2,0	5,09	109
6.000	5,0	7,64	274
8.000	8,0	10,18	438
10.000	10,0	12,73	547
12.000	13,0	15,28	711
14.000	15,0	17,82	821
16.000	18,0	20,37	985
18.000	21,0	22,92	1.149
20.000	24,0	25,46	1.313
22.000	27,0	28,01	1.478
24.000	30,0	30,55	1.642
26.000	34,0	33,10	1.861
<b>26.900</b>		<b>34,2</b>	

Ec : 20.321 MPa

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

CONCRETO CON AGREGADO DE CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 1

Diámetro promedio:	101,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8011,9 mm <sup>2</sup>		
Distancia vertical entre anillos :	90,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	58 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	54 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{el} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
2.000	2,0	2,45	108
4.000	4,0	4,89	217
6.000	6,0	7,34	325
8.000	9,0	9,79	488
10.000	12,0	12,23	651
12.000	15,0	14,68	813
14.000	20,0	17,12	1.084
16.000	23,0	19,57	1.247
18.000	28,0	22,02	1.518
20.000	37,0	24,46	2.006
<b>20.300</b>		<b>24,83</b>	

Ec : 19.667 MPa

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025

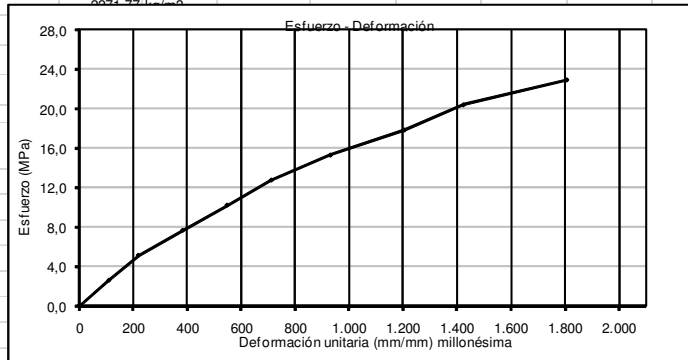
Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

**CONCRETO CON AGREGADO DE CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 2**

Diámetro promedio: 99,0 mm  
 Área cilindro: 7697,7 mm<sup>2</sup>  
 Distancia vertical entre anillos: 90,5 mm  
 Distancia horizontal a deformímetro: 57 mm  
 Distancia horizontal a apoyo: 55 mm

Peso específico: 2031,37 kg/m<sup>3</sup>

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{cl} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
2.000	2,0	2,55	109
4.000	4,0	5,09	219
6.000	7,0	7,64	383
8.000	10,0	10,18	547
10.000	13,0	12,73	711
12.000	17,0	15,28	930
14.000	22,0	17,82	1.204
16.000	26,0	20,37	1.423
18.000	33,0	22,92	1.806
<b>19.200</b>		<b>24,44</b>	



**Máximo**

**Ec : 18.290 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

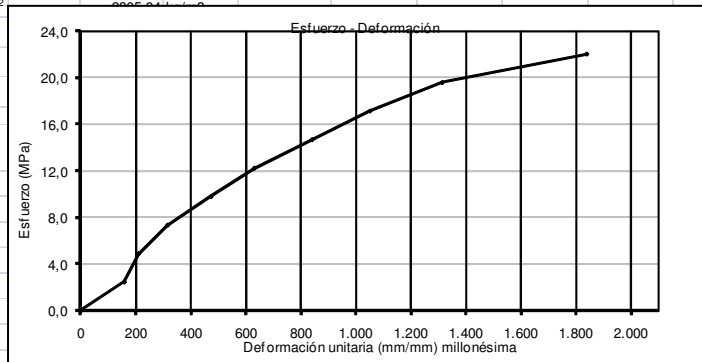
Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

**CONCRETO CON AGREGADO DE CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 3**

Diámetro promedio: 101,0 mm  
 Área cilindro: 8011,9 mm<sup>2</sup>  
 Distancia vertical entre anillos: 92,5 mm  
 Distancia horizontal a deformímetro: 58 mm  
 Distancia horizontal a apoyo: 52 mm

Peso específico: 2035,84 kg/m<sup>3</sup>

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{cl} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
2.000	3,0	2,45	158
4.000	4,0	4,89	210
6.000	6,0	7,34	315
8.000	9,0	9,79	473
10.000	12,0	12,23	630
12.000	16,0	14,68	840
14.000	20,0	17,12	1.050
16.000	25,0	19,57	1.313
18.000	35,0	22,02	1.838
<b>18.300</b>		<b>22,38</b>	



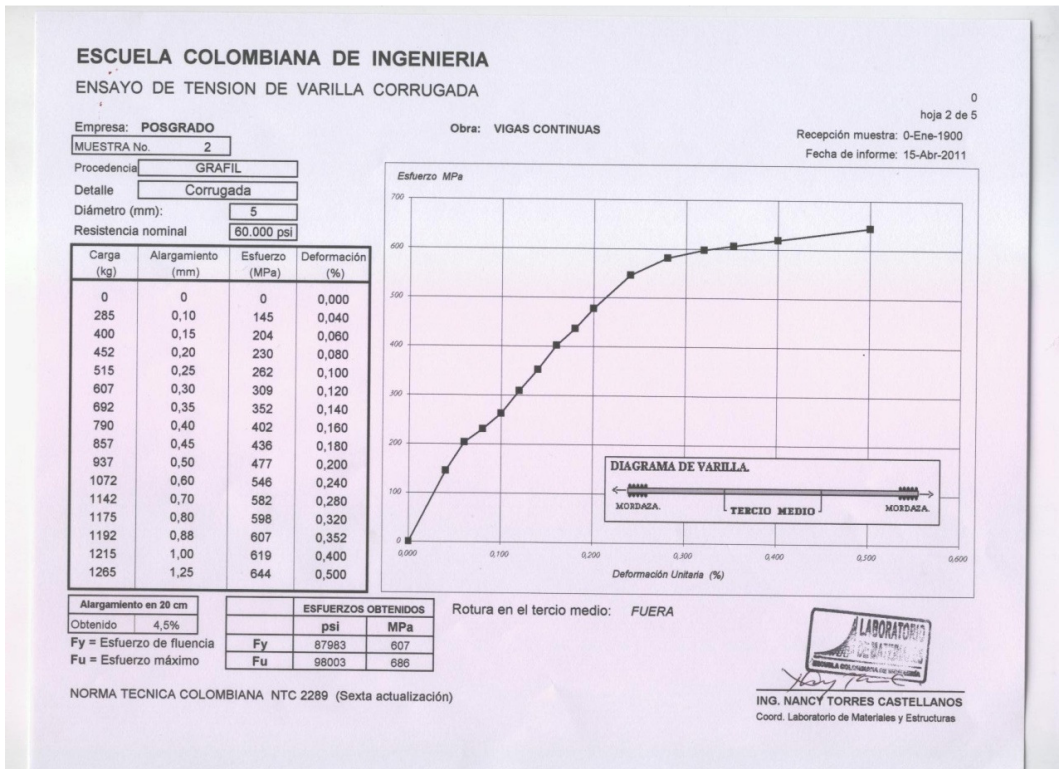
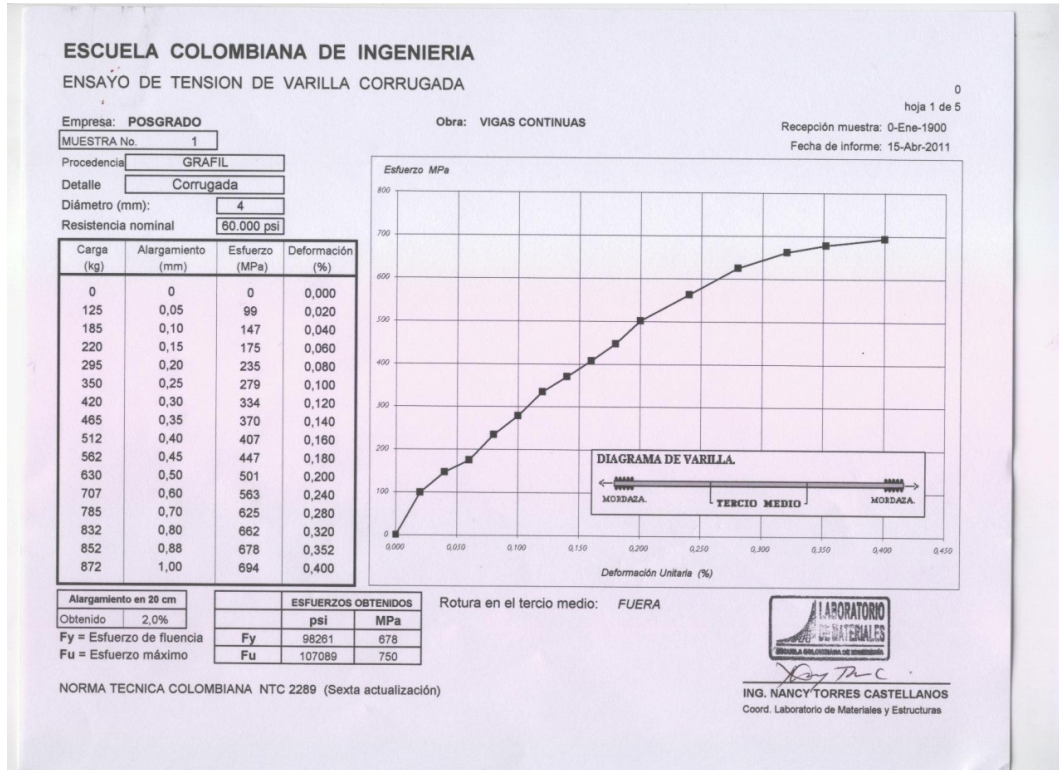
**Máximo**

**Ec : 22.156 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

## ANEXO 2 – Ensayos refuerzo



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA  
ENSAYO DE TENSION DE VARILLA CORRUGADA

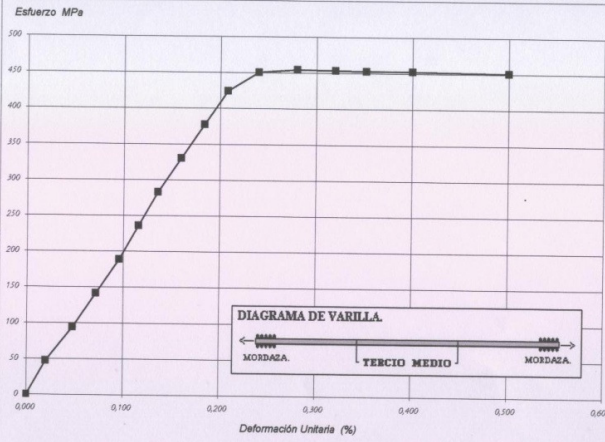
0  
hoja 3 de 5

Empresa: **POSGRADO**  
MUESTRA No. **3**  
Procedencia: **BOYACA**  
Detalle: **Corrugada**  
Diámetro (mm): **9**  
Resistencia nominal: **60.000 psi**

Obra: **VIGAS CONTINUAS**

Recepción muestra: 0-Ene-1900  
Fecha de informe: 15-Abr-2011

Carga (kg)	Alargamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)
0	0	0	0,000
300	0,05	47	0,020
600	0,12	94	0,048
900	0,18	141	0,072
1200	0,24	189	0,096
1500	0,29	236	0,116
1800	0,34	283	0,136
2100	0,40	330	0,160
2400	0,46	377	0,184
2700	0,52	424	0,208
2865	0,60	450	0,240
2890	0,70	454	0,280
2885	0,80	453	0,320
2880	0,88	453	0,352
2880	1,00	453	0,400
2870	1,25	451	0,500



Alargamiento en 20 cm

Obtenido 20,0%

Fy = Esfuerzo de fluencia

Fu = Esfuerzo máximo

ESFUERZOS OBTENIDOS	
psi	MPa
Fy	64672
Fu	90766
	635

Rotura en el tercio medio: **FUERA**

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 2289 (Sexta actualización)



ING. NANCY TORRES CASTELLANOS  
Coord. Laboratorio de Materiales y Estructuras

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA  
ENSAYO DE TENSION DE VARILLA CORRUGADA

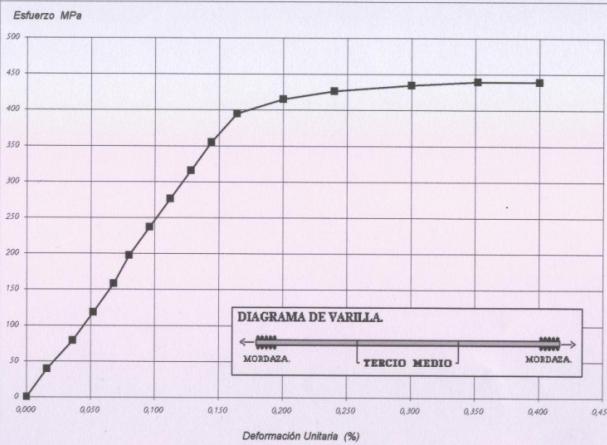
0  
hoja 4 de 5

Empresa: **POSGRADO**  
MUESTRA No. **4**  
Procedencia: **PAZ DEL RIO**  
Detalle: **Corrugada**  
Diámetro (pulg): **1/2**  
Resistencia nominal: **60.000 psi**

Obra: **VIGAS CONTINUAS**

Recepción muestra: 0-Ene-1900  
Fecha de informe: 15-Abr-2011

Carga (kg)	Alargamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)
0	0	0	0,000
500	0,04	39	0,016
1000	0,09	79	0,036
1500	0,13	118	0,052
2000	0,17	158	0,068
2500	0,20	197	0,080
3000	0,24	237	0,096
3500	0,28	276	0,112
4000	0,32	316	0,128
4500	0,36	355	0,144
5000	0,41	395	0,164
5260	0,50	415	0,200
5400	0,60	426	0,240
5510	0,75	435	0,300
5570	0,88	440	0,352
5565	1,00	439	0,400



Alargamiento en 20 cm

Obtenido 20,5%

Fy = Esfuerzo de fluencia

Fu = Esfuerzo máximo

ESFUERZOS OBTENIDOS	
psi	MPa
Fy	62814
Fu	89316
	625

Rotura en el tercio medio: **FUERA**

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 2289 (Sexta actualización)



ING. NANCY TORRES CASTELLANOS  
Coord. Laboratorio de Materiales y Estructuras



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA**

**ENSAÑO DE TENSION DE VARILLA CORRUGADA**

0  
hoja 5 de 5

Empresa: **POSGRADO**

Obra: **VIGAS CONTINUAS**

Recepción muestra: 0-Ene-1900

MUESTRA No. **5**

Fecha de informe: 15-Abr-2011

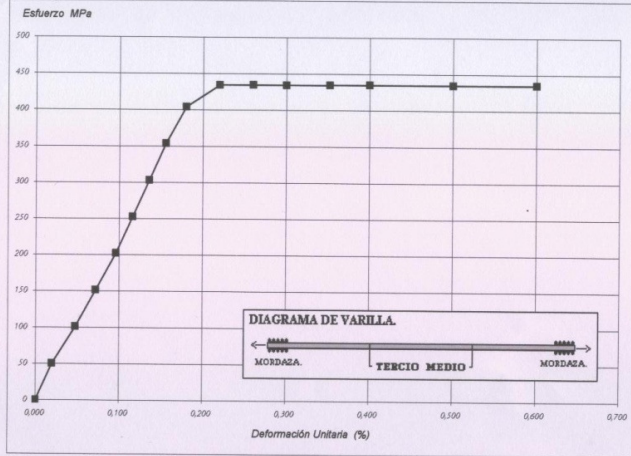
Procedencia **SIDENAL**

Detalle **Corrugada**

Diámetro (pulg): **5/8**

Resistencia nominal **60,000 psi**

Carga (kg)	Alargamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)
0	0	0	0,000
1000	0,05	51	0,020
2000	0,12	101	0,048
3000	0,18	152	0,072
4000	0,24	202	0,096
5000	0,29	253	0,116
6000	0,34	303	0,136
7000	0,39	354	0,156
8000	0,45	404	0,180
8600	0,55	434	0,220
8605	0,65	435	0,260
8600	0,75	434	0,300
8605	0,88	435	0,352
8610	1,00	435	0,400
8605	1,25	435	0,500
8615	1,50	435	0,600



Alargamiento en 20 cm

Obtenido **20,5%**

Fy = Esfuerzo de fluencia

Fu = Esfuerzo máximo

	ESFUERZOS OBTENIDOS	
	psi	MPa
Fy	62106	435
Fu	94260	660

Rotura en el tercio medio: **FUERA**



**ING. NANCY TORRES CASTELLANOS**  
Coord. Laboratorio de Materiales y Estructuras

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 2289 (Sexta actualización)

## ANEXO 3 – Registro fotográfico

### Proceso Constructivo



Armaduras de refuerzo típicas



Armado de formaleta (CR) y vigas fundidas (CC)



Vibración del concreto (CR)



Cilindros de testigo (CR)

Ensayo No. 1 Viga Tipo 3 CR



Montaje



Deflexión final



Fisuras luz izquierda



Fisuras apoyo central



Fisuras luz derecha



Vista superior apoyo central

Ensayo No. 2 Viga Tipo 2 CR



Fisuras luz izquierda



Fisuras apoyo central



Fisuras luz derecha



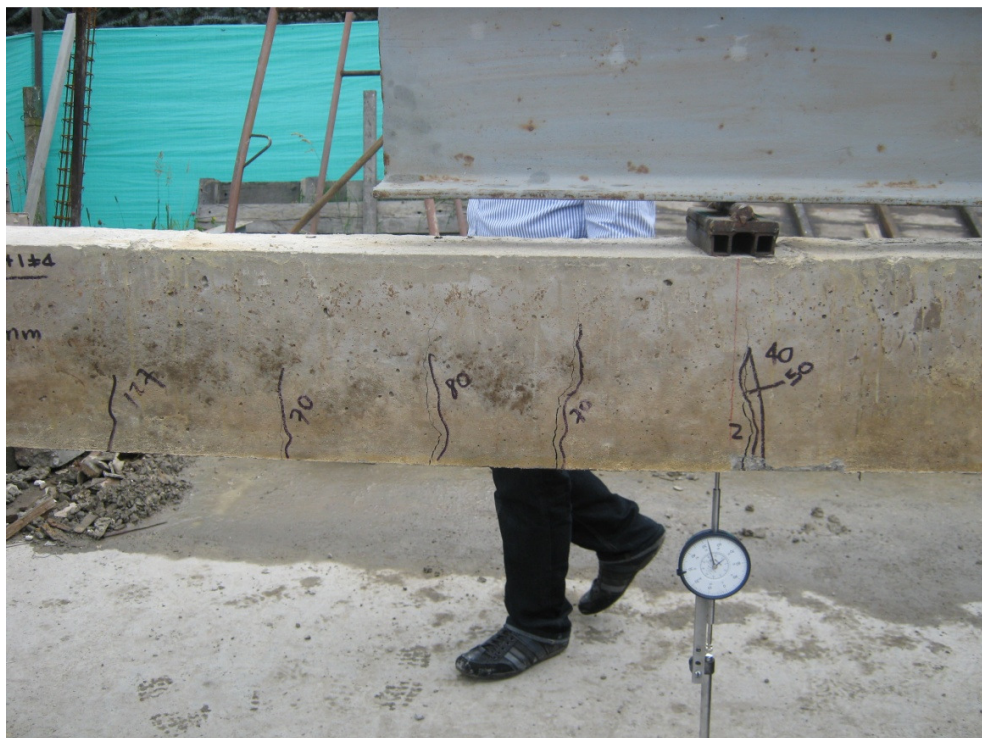
Sección en el apoyo central



Ensayo No. 3 Viga Tipo 1 CR



Montaje



Fisuras luz izquierda



Fisuras apoyo central



Fisuras luz derecha

Ensayo No. 4 Viga Tipo 3 CC



Fisuras luz izquierda



Fisuras apoyo central



Fisuras luz derecha



Vista superior apoyo central

Ensayo No. 5 Viga Tipo 2 CC



Fisuras luz izquierda



Fisuras luz derecha



Fisura apoyo central



Vista inferior luz derecha

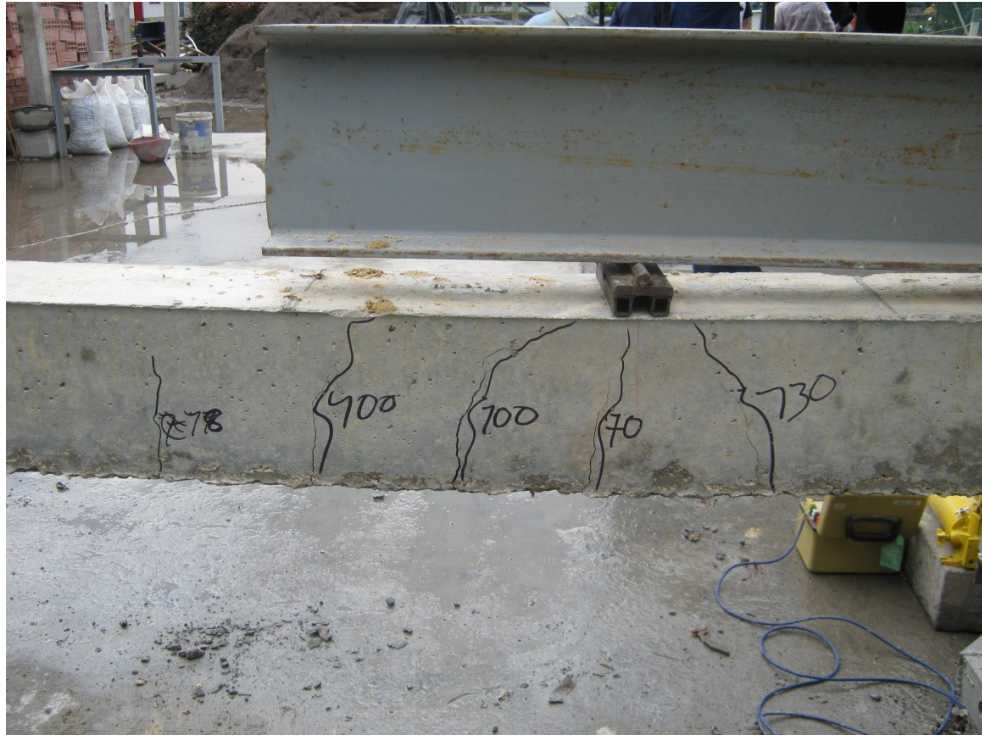
Ensayo No. 6 Viga Tipo 1 CC



Fisuras luz izquierda



Fisuras apoyo central vista luz izquierda



Fisuras luz derecha



Fisuras apoyo central vista luz derecha



Ensayo No. 6 Viga Tipo 1 CC



Fisuras luz izquierda



Fisuras luz derecha



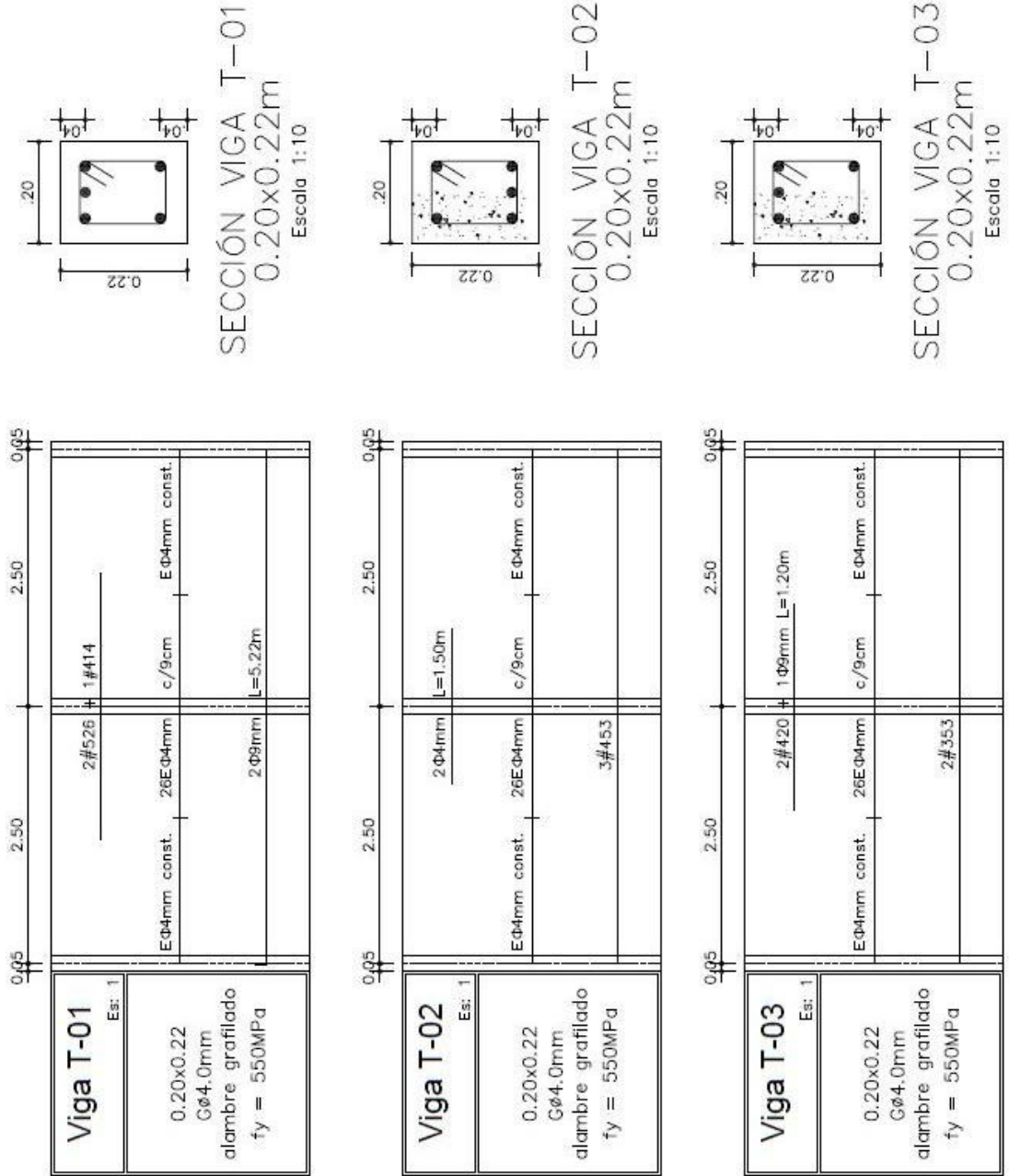
Fisuras apoyo intermedio



Vista superior apoyo central



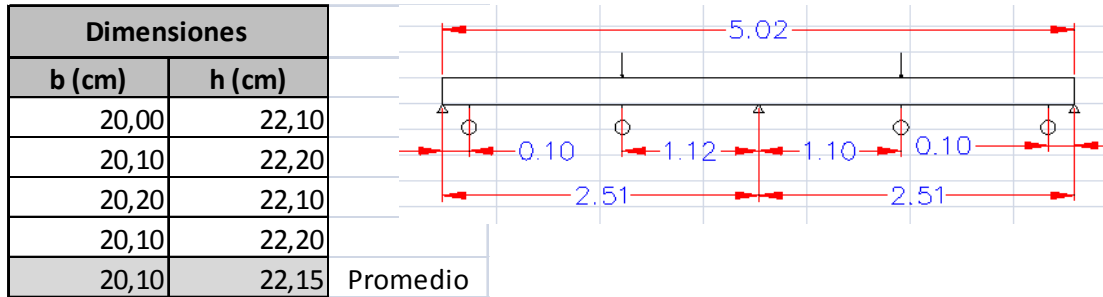
## ANEXO 5 – Esquemas de refuerzo



## ANEXO 6 – Datos ensayos

### Concreto convencional (CC)

#### Viga Tipo 1 CC

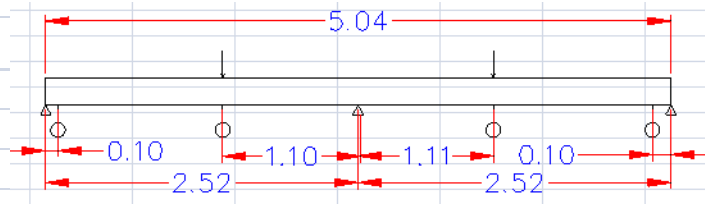


UND DE CARGA	CARGA (kN)	$\delta_1$ (1/100 mm)	$\delta_2$ (1/100 mm)	$\delta_3$ (1/100 mm)	$\delta_4$ (1/100 mm)
0	0,00	0	0	0	0
10	6,76	6	0	9	4
25	16,91	22	22	33	20
30	20,29	27	32	40	27
40	27,05	39	52	56	40
50	33,82	52	118	68	65
60	40,58	69	202	93	69
70	47,34	84	270	174	98
80	54,11	89	330	220	105
90	60,87	97	384	289	122
100	67,63	114	467	325	134
110	74,40	129	546	374	146
120	81,16	145	628	471	163
130	87,92	162	718	514	170
140	94,68	186	840	572	177
150	101,45	209	960	650	188
160	104,27	234	1.098	740	199
170	110,79	270	1.270	830	211
180	117,31	318	1.554	952	227
185	120,57	362	1.701	1.070	245
185	120,57	390	1.818	1.138	251
186	121,22	405	1.925	1.210	259
187	121,87	450	2.098	1.239	270
188	122,52	475	2.203	1.435	271
190	123,83	493	2.330	1.560	287
191	124,48	498	2.438	1.676	295
193	125,78	505	2.501	1.770	301
197	128,39	Carga Máxima			

## Viga Tipo 2 CC

Dimensiones	
b (cm)	h (cm)
20,00	22,10
19,90	22,30
20,10	22,10
20,00	22,20
20,00	22,18

Promedio



UND DE CARGA	CARGA (kN)	$\delta_1$ (1/100 mm)	$\delta_2$ (1/100 mm)	$\delta_3$ (1/100 mm)	$\delta_4$ (1/100 mm)
7	4,73	0	0	0	0
10	6,76	1	0	2	0
20	13,53	35	48	57	46
30	20,29	57	74	101	83
40	27,05	71	105	228	109
50	33,82	88	160	274	139
60	40,58	103	230	351	158
70	47,34	120	323	435	184
80	54,11	134	385	493	198
90	60,87	151	470	478	220
100	67,63	174	554	561	240
110	74,40	189	640	646	259
120	81,16	215	775	679	296
130	87,92	231	860	760	314
140	94,68	250	922	826	328
150	101,45	268	1.028	938	355
160	104,27	281	1.121	1.025	375
160	104,27	289	1.410	1.050	385
164	106,88	300	1.567	1.076	391
166	108,19	311	1.607	1.130	395
164	106,88	311	1.703	1.292	396
164	106,88	324	1.870	1.339	399
165	107,53	358	1.975	1.382	402
169	110,14	Carga Máxima			

### Viga Tipo 3 CC

Dimensiones	
b (cm)	h (cm)
20,00	22,00
20,30	22,40
20,20	22,20
20,10	22,20
20,15	22,20

Promedio

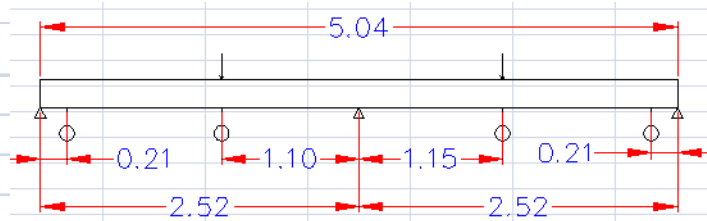
UND DE CARGA	CARGA (kN)	$\delta_1$ (1/100 mm)	$\delta_2$ (1/100 mm)	$\delta_3$ (1/100 mm)	$\delta_4$ (1/100 mm)
7	4,73	0	0	0	0
10	6,76	2	0	4	3
20	13,53	15	5	30	23
30	20,29	25	21	43	39
40	27,05	36	41	67	54
50	33,82	50	112	99	69
60	40,58	57	203	145	78
70	47,34	66	262	239	93
80	54,11	79	349	305	104
90	60,87	85	424	380	115
105	71,01	91	451	434	125
105	71,01	100	907	474	132
108	73,04	106	1.024	570	135
112	75,75	114	1.112	640	141
114	77,10	140	1.248	698	146
115	77,78	148	1.320	741	153
115	77,78	156	1.492	845	158
121	81,83	Carga Máxima			

## Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

### Viga Tipo 1 CR

Dimensiones	
b (cm)	h (cm)
20,00	22,20
20,10	22,30
20,50	23,00
20,20	22,30
20,20	22,45

Promedio



UND DE CARGA	CARGA (kN)	$\delta_1$ (1/100 mm)	$\delta_2$ (1/100 mm)	$\delta_3$ (1/100 mm)	$\delta_4$ (1/100 mm)
2	1,35	0	0	0	0
10	6,76	34	18	29	25
20	13,53	88	67	71	63
30	20,29	126	114	106	97
40	27,05	166	234	138	127
50	33,82	181	270	209	162
60	40,58	215	405	356	182
70	47,34	246	508	406	200
80	54,11	272	584	530	236
85	57,49	290	655	576	249
90	60,87	307	726	607	256
95	64,25	320	795	646	266
100	67,63	330	854	682	273
105	71,01	348	960	749	286
110	74,40	365	1.049	799	298
115	77,78	388	1.160	864	312
120	81,16	403	1.255	918	323
125	84,54	435	1.440	1.065	367
126	85,22	462	1.500	1.160	377
127	85,89	485	1.655	1.263	398
129	87,25	516	1.738	1.285	422
130	87,92	440	1.775	1.467	445
131	88,60	450	1.840	1.539	454
136	91,98	Carga Máxima			



## Viga Tipo 2 CR

Dimensiones	
b (cm)	h (cm)
20,00	22,20
19,80	22,70
20,10	22,20
20,00	22,50
19,98	22,40

Promedio

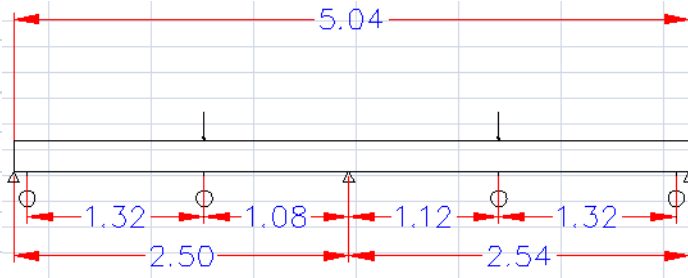


UND DE CARGA	CARGA (kN)	$\delta_1$ (1/100 mm)	$\delta_2$ (1/100 mm)	$\delta_3$ (1/100 mm)	$\delta_4$ (1/100 mm)
4	2,71	0	0	0	0
10	6,76	60	30	37	32
20	13,53	84	63	59	52
30	20,29	112	106	90	77
40	27,05	131	139	118	97
50	33,82	150	204	155	118
60	40,58	171	272	225	147
70	47,34	195	373	290	175
80	54,11	215	475	365	201
90	60,87	236	465	445	225
100	67,63	261	555	523	249
110	74,40	284	655	612	270
120	81,16	305	757	699	292
130	87,92	325	750	790	314
140	94,68	352	873	894	340
145	98,07	435	892	995	374
146	98,74	449	956	1.047	385
148	100,10	484	1.120	1.180	394
150	101,45	495	1.226	1.215	402
152	102,80	504	1.315	1.240	407
153	103,48	510	1.392	1.257	411
153	103,48	522	1.560	1.268	412
156	105,51	Carga Máxima			

### Viga Tipo 3 CR

Dimensiones	
b (cm)	h (cm)
20,10	22,00
20,60	22,90
20,50	22,40
20,20	22,50
20,35	22,45

Promedio



UND DE CARGA	CARGA (kN)	$\delta_1$ (1/100 mm)	$\delta_2$ (1/100 mm)	$\delta_3$ (1/100 mm)	$\delta_4$ (1/100 mm)
7	4,73	0	0	0	0
10	6,76	6	0	4	3
20	13,53	21	12	19	16
30	20,29	31	32	40	36
40	27,05	65	62	63	59
50	33,82	83	85	82	74
60	40,58	100	177	101	83
70	47,34	116	266	212	97
80	54,11	131	307	238	105
85	57,49	142	371	340	109
90	60,87	150	392	360	116
100	67,63	164	445	417	125
110	74,40	178	530	515	133
120	81,16	192	625	658	141
130	87,92	215	765	1.050	135
134	90,63	220	940	1.110	137
135	91,30	233	1.020	1.230	138
136	91,98	235	1.080	1.275	137
137	92,66	249	1.146	1.345	138
138	93,33	259	1.237	1.437	137
139	94,01	268	1.383	1.615	137
140	94,68	277	1.473	1.720	140
145	98,07	Carga Máxima			

## ANEXO 7 – Cálculo para cargas de trabajo

Suponiendo que la viga soporta un entrepiso típico con tipo de ocupación residencial.

$$\text{Peso propio} = 1 \text{ kN/m} \quad \text{CM} = 4,10 \text{ kN/m}^2 \quad \text{CV} = 1,80 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Carga de trabajo} = D + L = 4,10 + 1,80 = 5,90 \text{ kN/m}^2$$

Suponiendo un área aferente de  $2,50 \text{ m} \times 5,00 \text{ m} = 12,50 \text{ m}^2$ .

$$w_u = (5,90 \text{ kN/m}^2 \times 12,50 \text{ m}^2) / 5 \text{ m} + 1 \text{ kN/m} = 15,75 \text{ kN/m}$$

El momento máximo positivo ubicado a 0,94 m del apoyo externo es:

$$M_{Luz} = 0,44 * 15,75 = 6,93 \text{ kN-m}$$

El momento máximo negativo ubicado en el apoyo intermedio es:

$$M_{Apoyo} = 0,78 * 15,75 = 12,29 \text{ kN-m}$$

Para hacer una comparación, el momento máximo negativo (caso más crítico que el momento positivo) sería producido por dos cargas puntuales equivalentes de 25,57 kN cada una correspondiendo al montaje del ensayo, es decir una carga total de 51,14 kN (valor por debajo de las cargas teóricas de falla y por ende de las cargas de falla experimentales) que conduce a los siguientes momentos:

$$M_{Luz} = 8,87 \text{ kN-m} \quad M_{Apoyo} = 12,29 \text{ kN-m}$$

Sacando un promedio para este nivel de carga, se tendrían las siguientes deformaciones en las luces:

Concreto convencional: 3,47 mm

Concreto con agregado de concreto reciclado: 4,17 mm

El valor de la deflexión máxima admisible más estricto de la Tabla C.9.5(b) del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 corresponde a  $l/480$  es decir  $2500\text{mm}/480 = 5,21 \text{ mm}$ , demostrándose que los dos tipos de concreto cumplen a cabalidad con la normatividad y las diferencias entre sí no superarían 1 mm, valor irrelevante.

## ANEXO 8 – Diseños de mezclas y propiedades de los agregados

### MEZCLA 0% DE REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO - VIGAS

FECHA  
 RELACION AGUA/CEMENTO 0.5  
 METODO RNL

#### DATOS PREVIOS

##### CEMENTO

Densidad 3080 kg/m<sup>3</sup>

##### AGREGADO GRUESO

Tamaño Máximo Nominal TMN 25.4 mm  
 Masa Unitaria Compacta MUC 1282.2 kg/m<sup>3</sup>  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1132.1 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente (dg) 2123 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción (Abs.g) 3.90% 0.0390  
 Origen aluvial Angular

##### AGREGADO FINO

Módulo de Finura 3.72  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1581.3 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente 2474 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción 2.40% 0.024  
 Ensayo Colorimétrico No. 4  
 Origen aluvial Forma TRITURADO

##### AGUA

Volumen 0.195 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

##### CONTENIDO DE AIRE

0.015 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

##### ADITIVOS

##### ASENTAMIENTO

7.5 cm

**VOLUMEN DE MEZCLA** 0.6800 m<sup>3</sup>

**VOLUMEN TOTAL MEZCLA (30%)** 0.8840 m<sup>3</sup>

#### CÁLCULOS

##### Peso de cemento por metro cúbico de concreto

( $r=a/c$ ) ; ( $c=a/r$ )

	r=	0.5
Agua (a)=		195 kg/m <sup>3</sup>
cemento ( c)=		390 kg/m <sup>3</sup>

##### Volumen de cemento por metro cúbico de concreto (Vc)

Vc=c/densidad cemento 0.127 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

De la grafica de optimizacion de granulometrias, se tiene:

La mezcla optima estara compuesta 0.55 grava  
0.45 arena

#### VOLUMEN DE AGREGADOS

$$V_{\text{agregados}} = 1 - (V_{\text{aire}} + V_{\text{agua}} + V_{\text{cemento}}) = 0.663 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

De los cuales:

$$V_{\text{volumen de arena}} = 0.299 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$V_{\text{volumen de grava}} = 0.365 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Para calcular los pesos respectivos, se debe conocer la densidad aparente promedio.

Como las densidades aparentes son similares, tenemos:

$$d_{\text{prom.}} = 2280.95 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\text{Peso seco de la arena ( } W_f) = 680.91 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\text{Peso seco de la grava ( } W_g) = 832.22 \text{ kg}/\text{m}^3$$

MATERIAL	PESO (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Ajuste por humedad (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	195.00	1	0.195	158.64
Aire	0.00	0	0.015	0.00
Cemento	390.00	3080	0.127	390.00
Grava	832.22	2281	0.365	851.94
Arena	680.91	2281	0.299	746.34
<b>Total</b>	<b>2098.13</b>		<b>1.000</b>	

#### AJUSTES POR HUMEDAD

##### GRAVA

$$\% \text{ Humedad en la grava} = 2.37 \%$$

##### Peso húmedo de la grava= Mhg

$$M_{hg} = \text{Peso de la grava} * (1 + \% \text{ humedad Natural})$$

$$M_{hg} = 851.94 \text{ kg}/\text{m}^3$$

##### ARENA

$$\% \text{ Humedad en la arena} = 9.61 \%$$

##### Peso húmedo de la arena= Mhf

$$M_{hf} = \text{Peso de la arena} * (1 + \% \text{ humedad Natural})$$

$$M_{hf} = 746.34 \text{ kg}/\text{m}^3$$

#### Exceso o déficit de agua

##### GRAVA

$$H_g = 0.0237$$

$$A_{bs.g} = 0.0390$$

Por lo tanto

**Necesita agua!!!!!!**

**Agua de la grava (Ag) = Peso de la grava \* (humedad natural - la absorción de la grava)**  
 Ag = -12.73 kg

ARENA  
 Hf 0.096  
 Abs.f 0.024  
 Por lo tanto

**Agua en exceso**

**Agua de la arena (Af) = Peso de la arena \* (humedad natural - la absorción de la arena)**  
 Af = 49.09 kg

**Agua total en exceso = Agua de la grava + agua de la arena**  
 A = 36.36 kg

**Cantidad de agua final para la mezcla = Agua inicial - agua en exceso**  
 Agua final para la mezcla = 158.64 kg/m<sup>3</sup>

<b>MEZCLA DE PRUEBA</b>	0.8840 m <sup>3</sup>
Agua (añadida)	140237.33 g
Cemento	344760.00 g
Grava (humedad)	753118.97 g
Arena (humedad)	659767.45 g
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>1897883.75 g</b>

<b>ADITIVO</b>	%	0.013
<b>MEZCLA DE PRUEBA CON ADITIVO</b>	0.884 m <sup>3</sup>	
		kg
Agua (añadida)	135755.45 g	135.7554
Aditivo	4481.88 g	4.48188
Cemento	344760.00 g	344.76
Grava (humedad)	753118.97 g	753.119
Arena (humedad)	659767.45 g	659.7674
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>1897883.75 g</b>	<b>1897.884</b>

AGREGADO GRUESO NATURAL REEMPLAZO 0%

AGR. GRUESO NATURAL 753118.97  
 AGR. GRUESO RECICLADO 0

TOTAL 753118.97 0.00

**MEZCLA 20% DE REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO - VIGAS**

FECHA  
 RELACION AGUA/CEMENTO 0.5  
 METODO RNL

**DATOS PREVIOS**

**CEMENTO**  
 Densidad 3080 kg/m<sup>3</sup>



MATERIAL	PESO (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Ajuste por humedad (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	195.00	1	0.195	162.57
Aire	0.00	0	0.015	0.00
Cemento	390.00	3080	0.127	390.00
Grava	832.22	2281	0.365	853.19
Arena	680.91	2281	0.299	741.17
<b>Total</b>	<b>2098.13</b>		<b>1.000</b>	

#### AJUSTES POR HUMEDAD

##### GRAVA

% Humedad en la grava= **2.52** %

**Peso húmedo de la grava= Mhg**

Mhg= Peso de la grava\*(1+% humedad Natural)

Mhg= 853.19 kg/m<sup>3</sup>

##### ARENA

% Humedad en la arena= **8.85** %

**Peso húmedo de la arena= Mhf**

Mhf= Peso de la arena\*(1+% humedad Natural)

Mhf= 741.17 kg/m<sup>3</sup>

#### Exceso o déficit de agua

GRAVA

Hg 0.0252

Abs.g 0.0390

Por lo tanto

**Necesita agua!!!!!!**

**Agua de la grava (Ag)= Peso de la grava\*(humedad natural - la absorción de la grava)**

Ag= -11.48 kg

ARENA

Hf 0.089

Abs.f 0.024

Por lo tanto

**Agua en exceso**

**Agua de la arena (Af)= Peso de la arena\*(humedad natural - la absorción de la arena)**

Af= 43.92 kg

**Agua total en exceso= Agua de la grava + agua de la arena**

A= 32.43 kg

**Cantidad de agua final para la mezcla= Agua inicial - agua en exceso**

Agua final para la mezcla= 162.57 kg/m<sup>3</sup>



<b>MEZCLA DE PRUEBA</b>	0.8840 m <sup>3</sup>
Agua (añadida)	143708.42 g
Cemento	344760.00 g
Grava (húmedad)	754222.49 g
Arena (húmedad)	655192.84 g
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>1897883.75 g</b>

<b>ADITIVO</b>	%	0.01
<b>MEZCLA DE PRUEBA CON ADITIVO</b>	0.884 m <sup>3</sup>	
		kg
Agua (añadida)	140260.82 g	140.2608
Aditivo	3447.60 g	3.4476
Cemento	344760.00 g	344.76
Grava (húmedad)	754222.49 g	754.2225
Arena (húmedad)	655192.84 g	655.1928
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>1897883.75 g</b>	<b>1897.884</b>

AGREGADO GRUESO NATURAL REEMPLAZO 20%

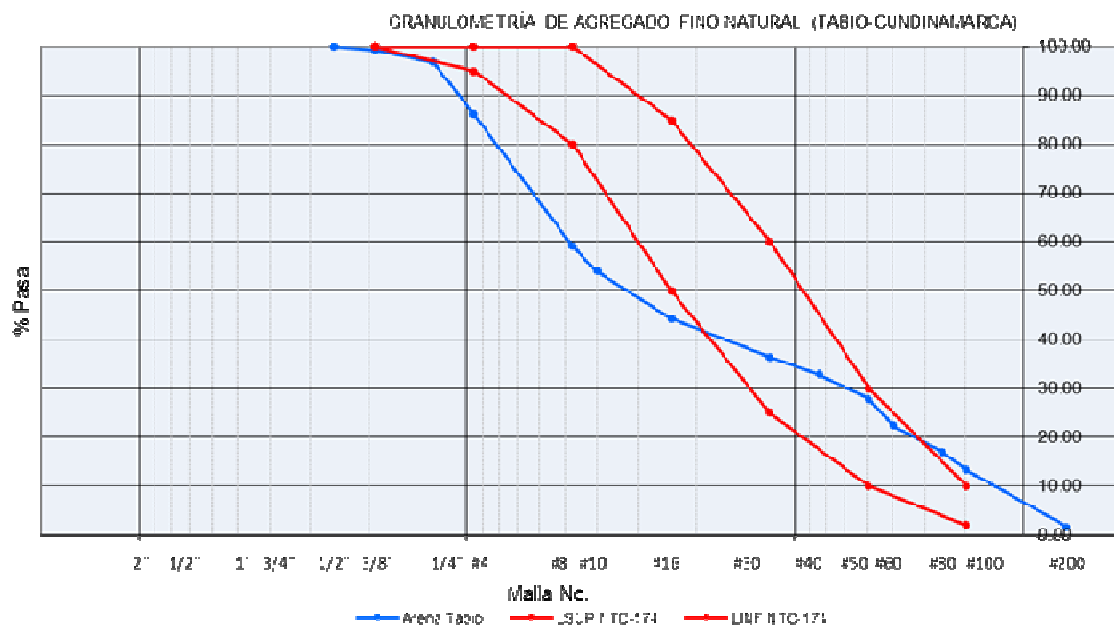
<b>AGR. GRUESO NATURAL</b>	<b>603378.00</b>
AGR. GRUESO RECICLADO	150844.5

TOTAL 754222.49 0.00

## PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

### Agregado fino (Tabio – Cundinamarca)

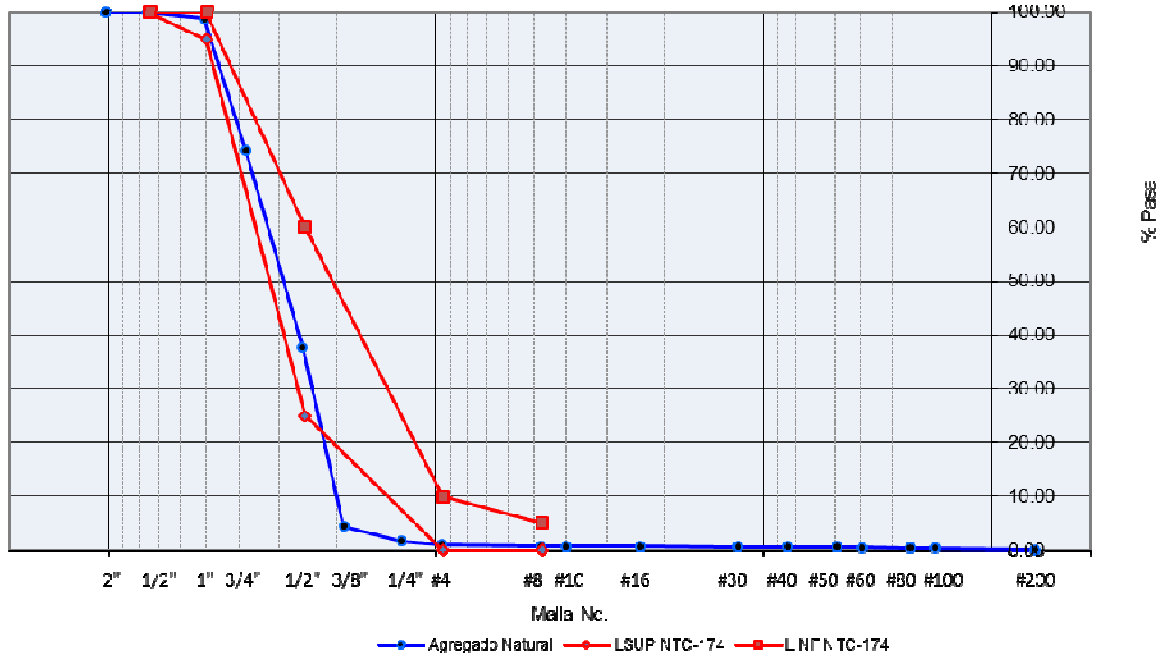
Densidad Aparente. S:	2.47 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Nominal:	2.63 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Aparente S.S.S.:	2.53 g/cm <sup>3</sup>
Humedad de Absorción:	2.4 %
Masa U. Suelta:	1581 kg/cm <sup>3</sup>
Masa U. Compacta:	1768 kg/cm <sup>3</sup>
Resultado de la Prueba Colorimétrica	4



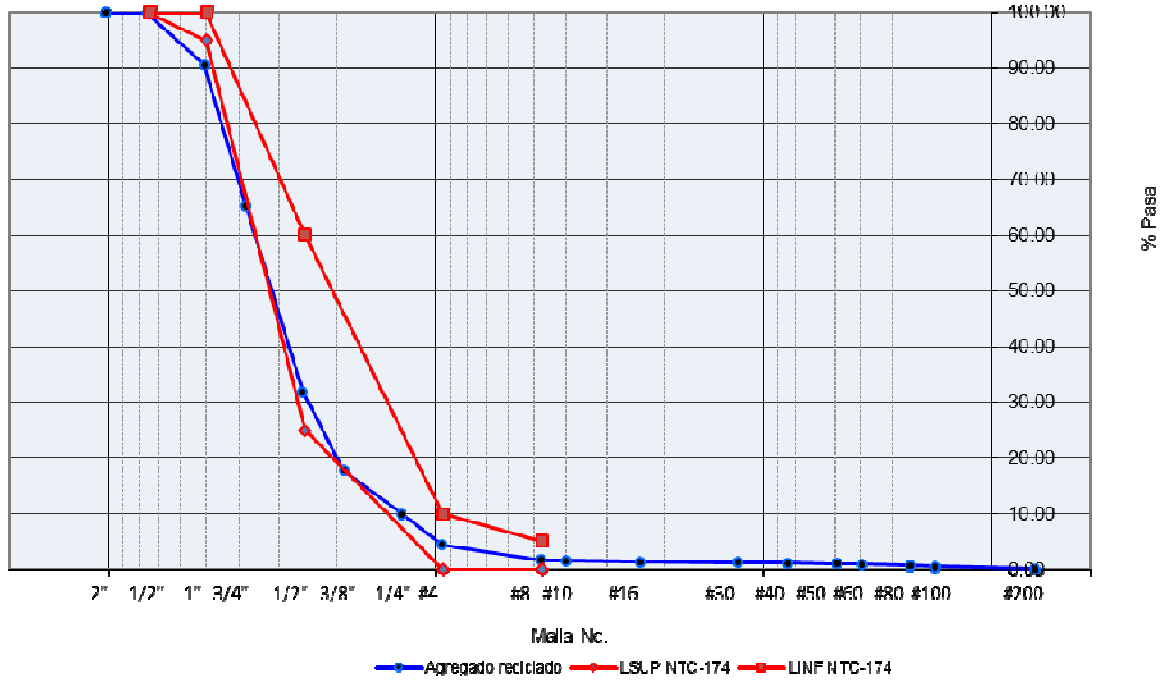
### Agregado grueso

PROPIEDAD FÍSICA	AGREGADO GRUESO	
	Natural	Reciclado
<b>Tamaño Máximo</b>	1 1/2"	1 1/2"
<b>Tamaño Máximo Nominal</b>	1"	1"
<b>Densidad Aparente. S (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.36	2.12
<b>Densidad Nominal (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.60	2.54
<b>Densidad Aparente S.S.S. (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.45	2.29
<b>Humedad de Absorción (%)</b>	3.9	7.8
<b>Masa U. Suelta (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1318	1132
<b>Masa U. Compacta (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1474	1282
<b>Coefficiente de Forma</b>	0.31	0.24
<b>Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%)</b>	30.3	40.5
<b>Ensayo de Micro-Deval (%)</b>	16.5	31.0

GRANULOMETRIA DE AGREGADO GRUESO NATURA\_(1")



GRANULOMETRIA DE AGREGADO GRUESO RECICLADO (1")



## ANEXO 9 – Ductilidades

Para el cálculo de la ductilidad (área bajo la curva de las gráficas carga-deformación) se utilizó el programa AutoCAD 2009; se presentan dos ductilidades para cada viga ensayada porque corresponden a las deformaciones en cada una de las luces y posteriormente se promedian.

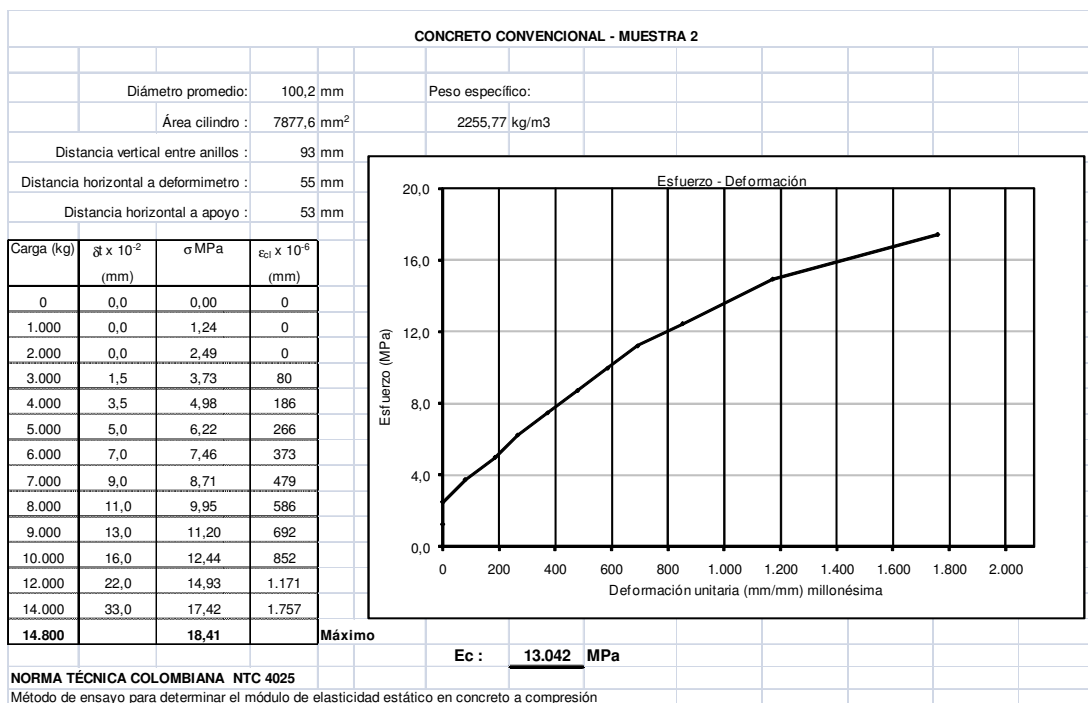
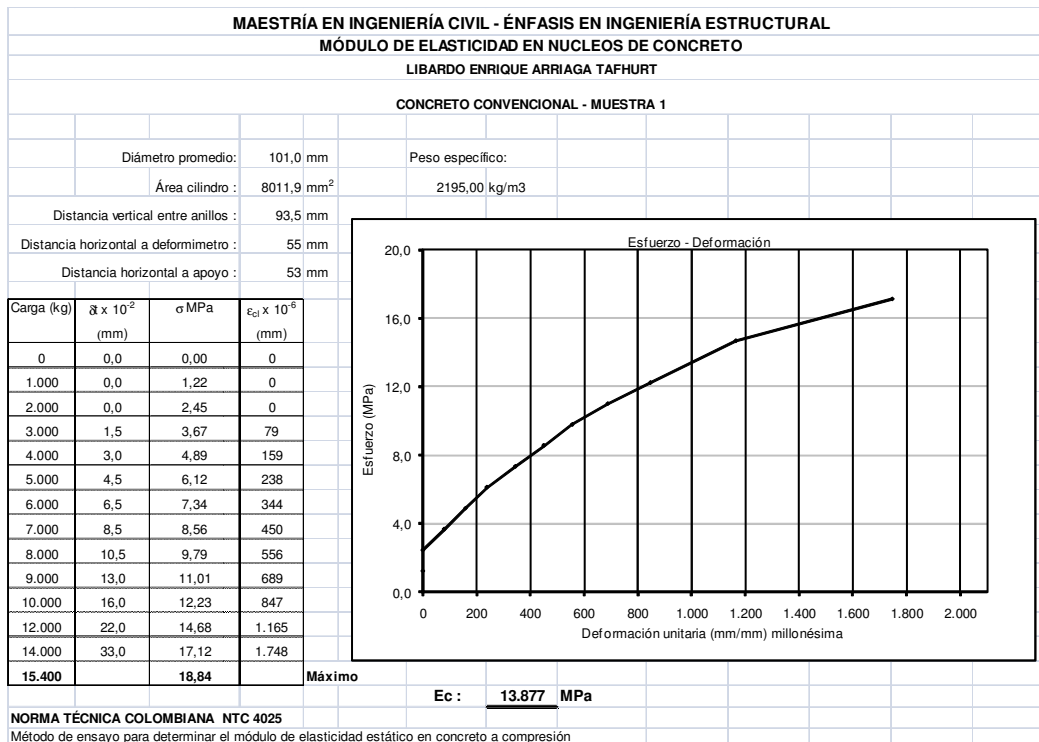
A continuación se presenta un cuadro con los resultados obtenidos:

	CONCRETO CONVENCIONAL			CONCRETO AGREGADO RECICLADO		
TIPO	Ductilidad 1	Ductilidad 2	Promedio	Ductilidad 1	Ductilidad 2	Promedio
1	584997	813279	699138	328727	384495	356611
2	331849	546560	439204	298313	390485	344399
3	168482	323681	246082	368426	445174	406800
			<b>461475</b>			<b>369270</b>

Estas ductilidades se presentan sólo como de carácter informativo y no se realizan comparaciones entre los tipos de concreto, ya que como se mencionó con anterioridad los resultados no son comparables por la diferencia de edad del concreto con agregado de concreto reciclado y el convencional al momento del ensayo; por esta razón las comparaciones no serían representativas y conllevarían a conclusiones erróneas.

## 10. ANEXOS PLACAS APOYADAS EN TRES BORDES

### ANEXO 1 – Ensayo cilindros de concreto



**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

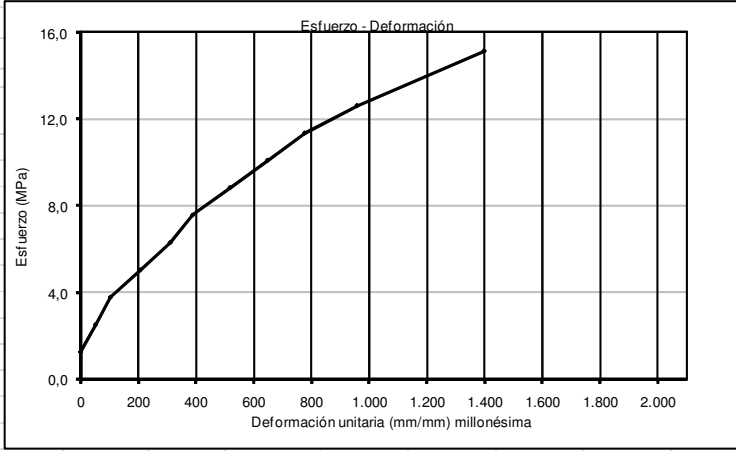
LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO CONVENCIONAL - MUESTRA 3**

Diámetro promedio:	99,5 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	7775,7 mm <sup>2</sup>		2144,62 kg/m <sup>3</sup>
Distancia vertical entre anillos :	95,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	53 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	51 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{cl} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,26	0
2.000	1,0	2,52	52
3.000	2,0	3,78	104
4.000	4,0	5,04	207
5.000	6,0	6,30	311
6.000	7,5	7,56	389
7.000	10,0	8,82	518
8.000	12,5	10,08	648
9.000	15,0	11,34	778
10.000	18,5	12,60	959
12.000	27,0	15,12	1.400
<b>14.000</b>		<b>17,64</b>	



**Ec : 14.891 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

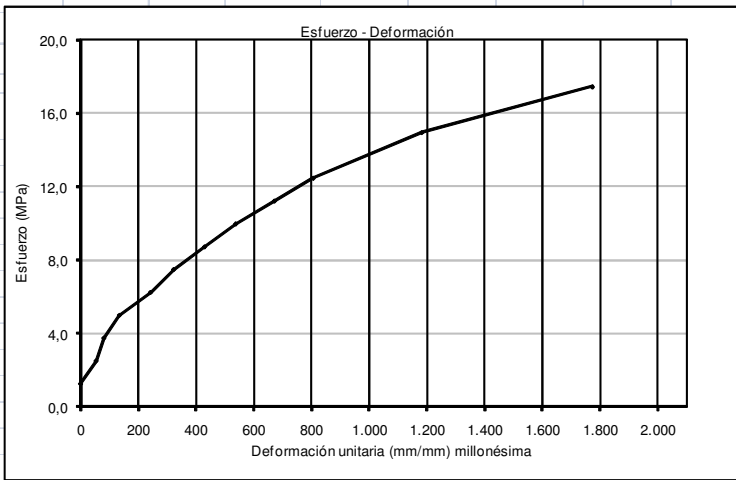
LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO CONVENCIONAL - MUESTRA 4**

Diámetro promedio:	100,1 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	7861,9 mm <sup>2</sup>		2254,79 kg/m <sup>3</sup>
Distancia vertical entre anillos :	92,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	53 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	52 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{cl} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,25	0
2.000	1,0	2,49	54
3.000	1,5	3,74	81
4.000	2,5	4,99	134
5.000	4,5	6,23	242
6.000	6,0	7,48	323
7.000	8,0	8,73	430
8.000	10,0	9,97	538
9.000	12,5	11,22	672
10.000	15,0	12,47	807
12.000	22,0	14,96	1.183
14.000	33,0	17,45	1.775
<b>15.000</b>		<b>18,70</b>	



**Ec : 18.603 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

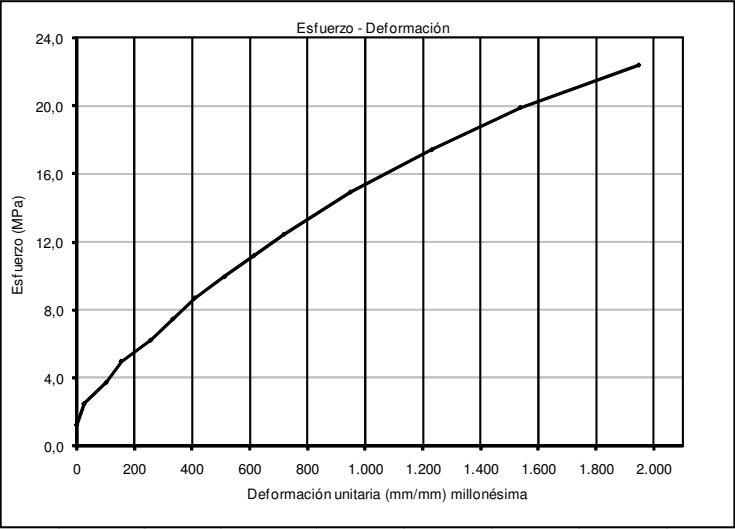
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 1**

Diámetro promedio:	100,2 mm	Peso específico:	
Área cilindro:	7877,6 mm <sup>2</sup>		2214,76 kg/m <sup>3</sup>
Distancia vertical entre anillos:	97,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro:	54 mm		
Distancia horizontal a apoyo:	54 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{cl} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,24	0
2.000	0,5	2,49	26
3.000	2,0	3,73	103
4.000	3,0	4,98	154
5.000	5,0	6,22	256
6.000	6,5	7,46	333
7.000	8,0	8,71	410
8.000	10,0	9,95	513
9.000	12,0	11,20	615
10.000	14,0	12,44	718
12.000	18,5	14,93	949
14.000	24,0	17,42	1.231
16.000	30,0	19,90	1.538
18.000	38,0	22,39	1.949
<b>19.600</b>		<b>24,38</b>	



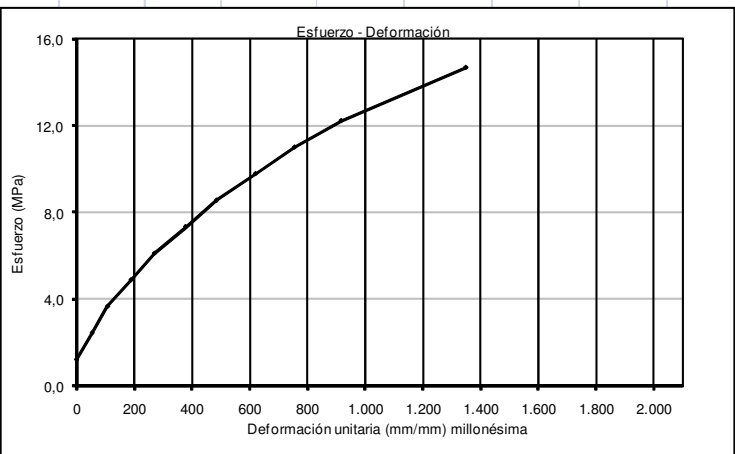
Máximo  $E_c$  : 15.392 MPa

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**  
 Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 2**

Diámetro promedio:	101,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro:	8011,9 mm <sup>2</sup>		2179,72 kg/m <sup>3</sup>
Distancia vertical entre anillos:	93 mm		
Distancia horizontal a deformimetro:	54 mm		
Distancia horizontal a apoyo:	55 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{cl} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,22	0
2.000	1,0	2,45	54
3.000	2,0	3,67	108
4.000	3,5	4,89	189
5.000	5,0	6,12	270
6.000	7,0	7,34	378
7.000	9,0	8,56	486
8.000	11,5	9,79	621
9.000	14,0	11,01	756
10.000	17,0	12,23	918
12.000	25,0	14,68	1.350
<b>13.400</b>		<b>16,39</b>	



Máximo  $E_c$  : 16.220 MPa

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**  
 Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

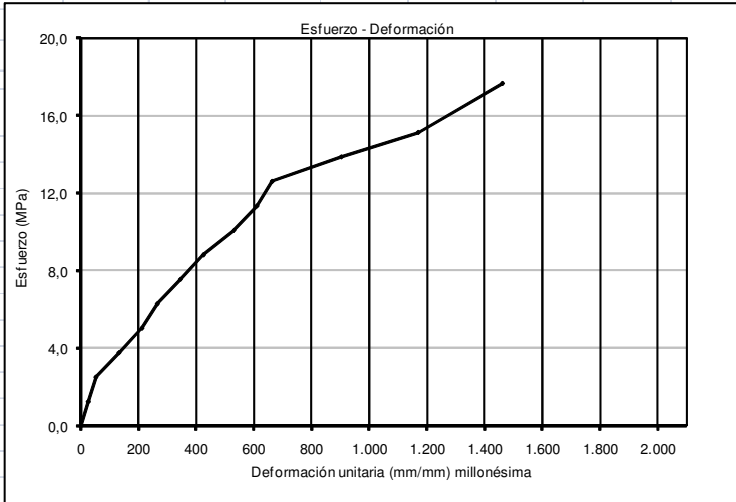
LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 3**

Diámetro promedio:	99,5 mm	Peso específico:	
Área cilindro:	7775,7 mm <sup>2</sup>		2115,72 kg/m <sup>3</sup>
Distancia vertical entre anillos:	94 mm		
Distancia horizontal a deformimetro:	54 mm		
Distancia horizontal a apoyo:	54 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,5	1,26	27
2.000	1,0	2,52	53
3.000	2,5	3,78	133
4.000	4,0	5,04	213
5.000	5,0	6,30	266
6.000	6,5	7,56	346
7.000	8,0	8,82	426
8.000	10,0	10,08	532
9.000	11,5	11,34	612
10.000	12,5	12,60	665
11.000	17,0	13,86	904
12.000	22,0	15,12	1.170
14.000	27,5	17,64	1.463
<b>17.500</b>		<b>22,06</b>	



**Ec : 17.184 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

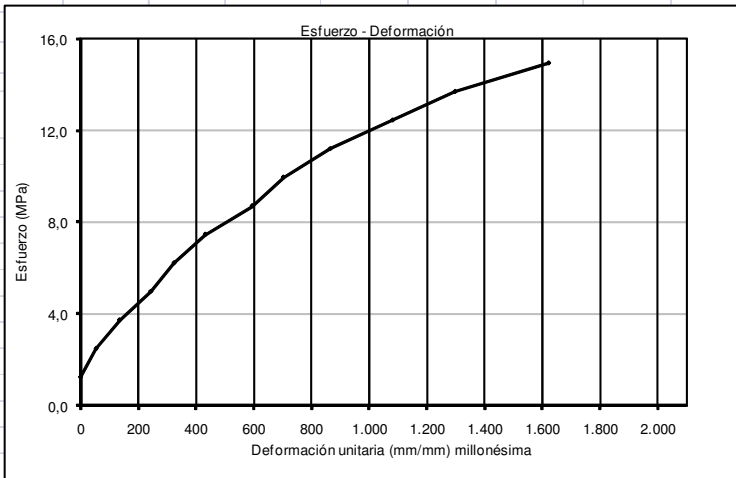
Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 4**

Diámetro promedio:	100,2 mm	Peso específico:	
Área cilindro:	7877,6 mm <sup>2</sup>		2251,54 kg/m <sup>3</sup>
Distancia vertical entre anillos:	92 mm		
Distancia horizontal a deformimetro:	51 mm		
Distancia horizontal a apoyo:	50 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,24	0
2.000	1,0	2,49	54
3.000	2,5	3,73	135
4.000	4,5	4,98	243
5.000	6,0	6,22	324
6.000	8,0	7,46	433
7.000	11,0	8,71	595
8.000	13,0	9,95	703
9.000	16,0	11,20	865
10.000	20,0	12,44	1.082
11.000	24,0	13,68	1.298
12.000	30,0	14,93	1.622
<b>13.400</b>		<b>16,67</b>	



**Ec : 13.637 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión



## ANEXO 2 – Ensayo refuerzo

### ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

#### ENSAYO DE TENSION DE GRAFILES

MJESTRANo. 1

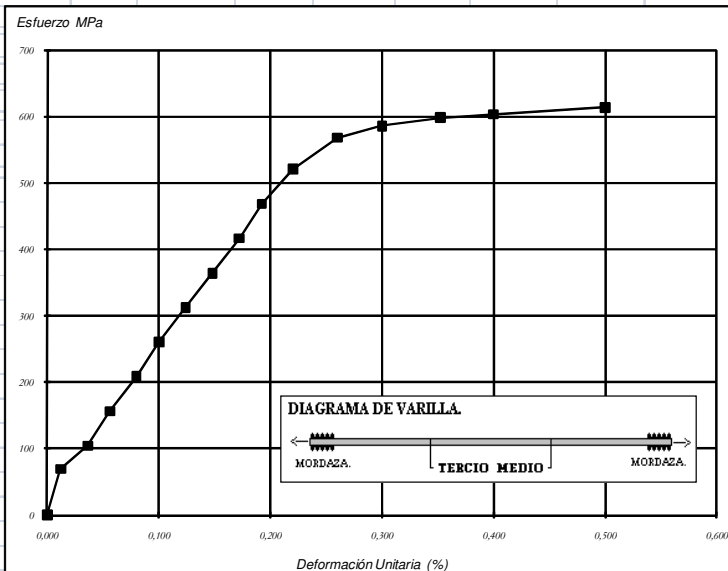
Procedenci: GRAFIL

Detalle: Corrugada

Diámetro (mm): 6

Resistencia nominal: 60.000 psi

Carga (kg)	Alargamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)
0	0	0	0,000
200	0,03	69	0,012
300	0,09	104	0,036
450	0,14	156	0,056
600	0,20	208	0,080
750	0,25	260	0,100
900	0,31	312	0,124
1050	0,37	364	0,148
1200	0,43	416	0,172
1350	0,48	468	0,192
1500	0,55	520	0,220
1637	0,65	568	0,260
1688	0,75	586	0,300
1723	0,88	598	0,352
1738	1,00	603	0,400
1769	1,25	614	0,500



Alargamiento en 20 cm

Obtenido 5,0%

Fy = Esfuerzo de fluencia

Fu = Esfuerzo máximo

ESFUERZOS OBTENIDOS

psi	MPa
-----	-----

Fy	88317	598
----	-------	-----

Fu	96099	660
----	-------	-----

Rotura en el tercio medio: FUERA

MJESTRANo. 2

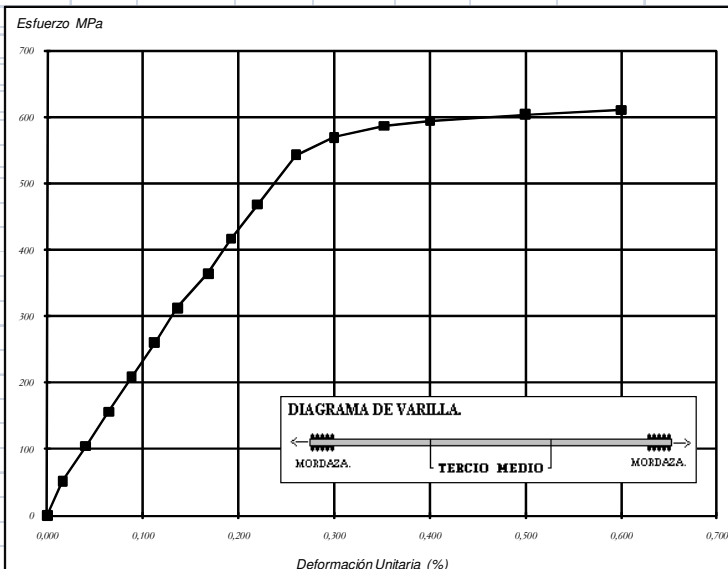
Procedenci: GRAFIL

Detalle: Corrugada

Diámetro (mm): 6

Resistencia nominal: 60.000 psi

Carga (kg)	Alargamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)
0	0	0	0,000
150	0,04	52	0,016
300	0,10	104	0,040
450	0,16	156	0,064
600	0,22	208	0,088
750	0,28	260	0,112
900	0,34	312	0,136
1050	0,42	364	0,168
1200	0,48	416	0,192
1350	0,55	468	0,220
1565	0,65	543	0,260
1640	0,75	569	0,300
1690	0,88	586	0,352
1712	1,00	594	0,400
1740	1,25	604	0,500
1760	1,50	611	0,600



Alargamiento en 20 cm

Obtenido 5,5%

Fy = Esfuerzo de fluencia

Fu = Esfuerzo máximo

ESFUERZOS OBTENIDOS

psi	MPa
-----	-----

Fy	86625	586
----	-------	-----

Fu	96857	665
----	-------	-----

Rotura en el tercio medio: FUERA

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 2289 (Sexta actualización)

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA				
ENSAYO DE TRACCIÓN Y CORTE EN LA SOLDADURA DE MALLA ELECTROSOLDADA				
		1		
		TRANSVERSAL		
		Valor	CD	
Espaciamiento nominal entre alambres (mm)		150		
Diámetro nominal (mm)		3,0		
Espaciamiento promedio entre alambres (mm)				
Máxima diferencia entre espaciado nominal y medido (mm)				
Diámetro medido (mm)		3,00	0,0%	
Area medida (mm <sup>2</sup> )		7,1	0,0%	
Resistencia a Tracción (MPa)*		672	4,6%	
Resistencia a fluencia (MPa)*		614	8,0%	
% De Reduccion de area.		38%	15,6%	
Fuerza cortante en soldadura ( N )		3793	3,6%	
<b>CD:</b> Coeficiente de dispersión ( % )				
* Calculada con base en el diámetro nominal				
NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 2310 (Segunda actualización)				

## ANEXO 3 – Registro fotográfico

### Proceso Constructivo



Armado de formaleta



Armaduras de refuerzo típicas



Mezcla del concreto



Vibración del concreto (CR)



Acabado de superficies



Cilindros de testigo (CR)



Asentamiento 7,5 cm (CR)



Asentamiento 6,5 cm (CC)

Acciones previas y montaje del ensayo



Dibujo de retícula e instalación de deformímetro mecánico



Procedimiento y material de carga (CR)

Ensayo No. 1 Placa Tipo 1 CR



Placa deformada



Esquema de fisuración





Levantamiento esquinas vista apoyo transversal



Levantamiento esquina vista apoyo longitudinal

Ensayo No. 2 Placa Tipo 2 CR



Montaje ensayo



Deformación final de la placa



Esquema de fisuración 1



Esquema de fisuración 2

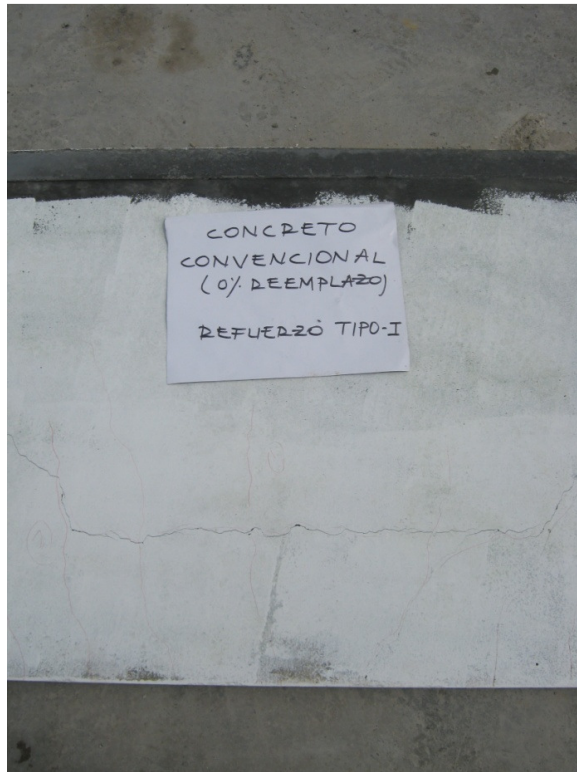
Ensayo No. 3 Placa Tipo 1 CC



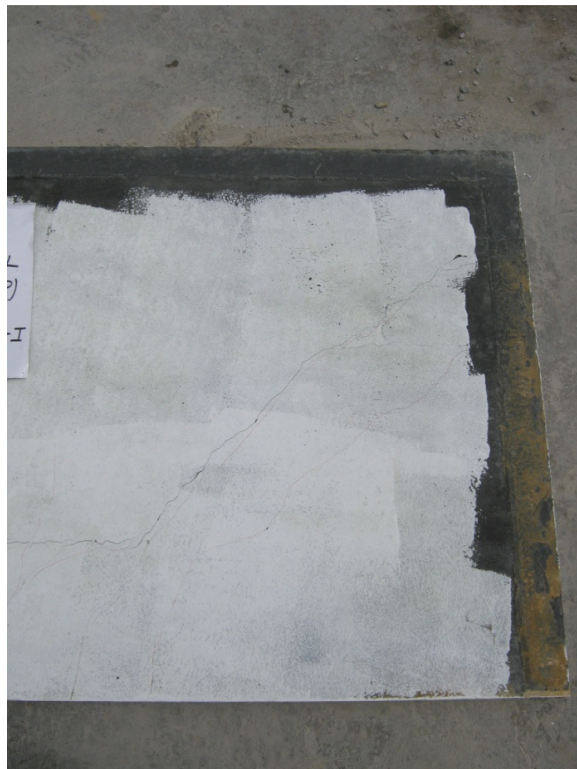
Placa deformada



Esquema de fisuración izquierda



Esquema de fisuración centro



Esquema de fisuración derecha

Ensayo No. 4 Placa Tipo 2 CC



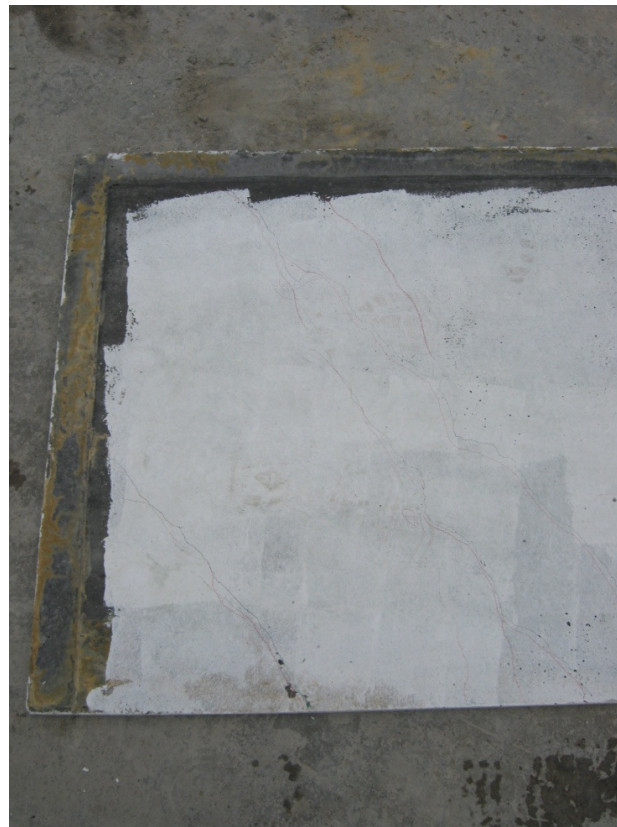
Montaje ensayo



Deformación final de la placa



Levantamiento esquina y vista deformímetro apoyo longitudinal



Esquema de fisuración izquierdo



Esquema de fisuración centro y exploración del recubrimiento



Esquema de fisuración derecha



## ANEXO 4 – Datos Ensayos

### Resultados de los ensayos

#### Concreto convencional (CC)

#### Placa Tipo 1 CC

Dimensiones:

L (cm)	B (cm)	h (cm)	L libre (cm)	B libre (cm)
199,6	89,2	3,1	186,5	83,4

Recubrimientos medidos (mm) = 7,75; 13; 13,14

Recubrimiento promedio = 11,3 mm

$$d' = 11,3 \text{ mm} + \Phi/2 = 14,3 \text{ mm}$$

$$d = 31 - 14,3 = 16,7 \text{ mm}$$

W (kg)	$\delta_1$ (x10-2 mm)	$\delta_2$ (x10-2 mm)	h cinta (cm)	Observaciones
0	0	-	69,6	
20	9	-	-	
40	29	-	-	
60	46	-	-	
80	58	-	-	
100	80	-	-	
120	111	-	-	
140	128	-	-	
160	146	-	-	
180	168	-	-	
200	197	-	-	
220	212	-	-	
240	236	-	-	
260	259	-	-	
280	278	62	-	Se instala deformímetro bajo el soporte longitudinal porque se detectaron deflexiones.
300	302	74	-	
320	318	80	-	
340	340	88	-	
360	372	105	-	
380	415	130	-	
400	472	160	-	
420	508	178	-	
440	539	185	-	
460	581	200	-	

W (kg)	$\delta 1$ (x10-2 mm)	$\delta 2$ (x10-2 mm)	h cinta (cm)	Observaciones
480	618	232	-	
500	690	260	-	Aparecen las primeras fisuras.
520	802	289	-	
540	1600	-	68,0	Grandes deformaciones, se quita el deformímetro 1 y se empieza a medir con cinta métrica.
560	1900	300	67,7	
580	2000	329	67,6	
600	2000	365	67,6	
620	2600	380	67,0	
640	2700	385	66,9	
660	3400	404	66,2	
680	3600	437	66,0	
700	3900	450	65,7	
720	4100	464	65,5	
740	4400	479	65,2	
760	4600	485	65,0	
780	4700	492	64,9	
800	5100	498	64,5	
820	5400	500	64,2	
840	5700	524	63,9	
860	6200	535	63,4	
880	6600	546	63,0	
900	7100	552	62,5	
920	7400	557	62,2	
940	-	-	-	Falla

## Placa Tipo 2 CC

Dimensiones:

L (cm)	B (cm)	h (cm)	L libre (cm)	B libre (cm)
199,9	90,1	2,9	187,2	83,7

Recubrimientos medidos (mm) = 10,55; 8,17; 5,19

Recubrimiento promedio = 8,0 mm

$d' = 8,0 \text{ mm} + \Phi = 11,0 \text{ mm}$

$d = 29 - 11,0 = 18,0 \text{ mm}$

W (kg)	$\delta 1$ (x10-2 mm)	$\delta 2$ (x10-2 mm)	h cinta (cm)	Observaciones
0	0	0	68,9	
20	9	4	-	
40	29	6	-	

W (kg)	$\delta 1$ (x10-2 mm)	$\delta 2$ (x10-2 mm)	h cinta (cm)	Observaciones
60	50	32	-	
80	88	45	-	
100	115	60	-	
120	133	71	-	
140	174	92	-	
160	199	112	-	
180	253	134	-	
200	284	150	-	
220	308	159	-	
240	327	178	-	
260	354	184	-	
280	400	209	-	
300	448	231	-	
320	496	291	-	
340	558	302	-	Aparecen las primeras fisuras
360	605	361	-	
380	655	368	-	
400	790	392	-	
420	895	430	-	
440	995	454	-	
460	1055	480	-	
480	1170	493	-	
500	1288	516	-	
520	4400	569	64,5	Grandes deformaciones, se quita el deformímetro 1 y se empieza a medir con cinta métrica.
540	5600	595	63,3	
560	6100	653	62,8	
580	6400	680	62,5	
600	6900	694	62	
620	7300	710	61,6	
640	9500	755	59,4	Falla

### **Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)**

#### **Placa Tipo 1 CR**

Dimensiones:

L (cm)	B (cm)	h (cm)	L libre (cm)	B libre (cm)
200,3	90,4	3,1	187,6	84,4

Recubrimientos medidos (mm) = 16; 17,63; 17,24; 9,66; 11,62; 6,72

Recubrimiento promedio = 13,2 mm

$$d' = 13,2 \text{ mm} + \Phi/2 = 16,2 \text{ mm}$$

$$d = 31 - 16,2 = 14,8 \text{ mm}$$

W (kg)	$\delta_1$ (x10-2 mm)	$\delta_2$ (x10-2 mm)	h cinta (cm)	Observaciones
0	0	-	72,6	No se tomaron registros en el deformímetro 2 porque no se había detectado la deflexión del apoyo longitudinal.
40	47	-	-	
60	74	-	-	
80	92	-	-	
100	109	-	-	
120	136	-	-	
140	163	-	-	
160	190	-	-	
180	215	-	-	
200	260	-	-	
220	276	-	-	
240	298	-	-	
260	325	-	-	
280	352	-	-	
300	381	-	-	
320	404	-	-	
340	434	-	-	
360	475	-	-	
380	523	-	-	
400	558	-	-	
420	613	-	-	
440	683	-	-	
460	744	-	-	
480	875	-	-	Aparecen las primeras fisuras.
500	1080	-	-	
520	1182	-	-	
540	2800	-	69,8	Grandes deformaciones, se quita el deformímetro 1 y se empieza a medir con cinta métrica.
560	3100	-	69,5	
580	3500	-	69,1	
600	3600	-	69,0	
620	3900	-	68,7	
640	4000	-	68,6	
680	4400	-	68,2	
700	5100	-	67,5	
720	8400	-	64,2	Falla total al quitar el cajón.

## Placa Tipo 2 CR

Dimensiones:

L (cm)	B (cm)	h (cm)	L libre (cm)	B libre (cm)
199,7	90,5	3,1	187,0	84,2

Recubrimientos medidos (mm) = 6,76; 13,07; 2,38

Recubrimiento promedio = 7,4 mm

$d' = 7,4 \text{ mm} + \Phi = 10,4 \text{ mm}$

$d = 31 - 10,4 = 20,6 \text{ mm}$

W (kg)	$\delta_1$ (x10-2 mm)	$\delta_2$ (x10-2 mm)	h cinta (cm)	Observaciones
0	0	-	-	No se tomaron registros en el deformímetro 2 porque no se había detectado la deflexión del apoyo longitudinal.
20	29	-	-	
40	46	-	72,6	
60	75	-	-	
80	104	-	-	
100	129	-	-	
120	144	-	-	
140	174	-	-	
160	212	-	-	
180	228	-	-	
200	258	-	-	
220	279	-	-	
240	306	-	-	
260	348	-	-	
280	365	-	-	Aparecen las primeras fisuras.
300	386	-	-	
320	440	-	-	
340	547	-	-	
360	730	-	-	
380	810	-	-	
400	869	-	-	
420	924	-	-	
440	995	-	-	
480	2860	-	70,2	
500	3260	-	69,8	
520	3360	-	69,7	
540	3460	-	69,6	
560	4560	-	68,5	
580	5160	-	67,9	

W (kg)	$\bar{\delta}1$ (x10-2 mm)	$\bar{\delta}2$ (x10-2 mm)	h cinta (cm)	Observaciones
600	5560	-	67,5	
620	6060	-	67,0	
640	6360	-	66,7	
660	6560	-	66,5	
680	6560	-	66,5	
700	8260	-	64,8	
720	8760	-	64,3	Falla.

## ANEXO 5 – Diseños de mezclas y propiedades de los agregados

### MEZCLA 0% DE REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO - PLACAS

FECHA  
 RELACION AGUA/CEMENTO 0.5  
 METODO RNL

#### DATOS PREVIOS

##### CEMENTO

Densidad 3080 kg/m<sup>3</sup>

##### AGREGADO GRUESO

Tamaño Máximo Nominal TMN 25.4 mm  
 Masa Unitaria Compacta MUC 1282.2 kg/m<sup>3</sup>  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1132.1 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente (dg) 2123 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción (Abs.g) 3.90% 0.0390  
 Origen aluvial Angular

##### AGREGADO FINO

Módulo de Finura 3.72  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1581.3 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente 2474 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción 2.40% 0.024  
 Ensayo Colorimétrico No. 4  
 Origen aluvial Forma TRITURADO

##### AGUA

Volumen 0.195 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

##### CONTENIDO DE AIRE

0.015

##### ADITIVOS

##### ASENTAMIENTO

7.5

**VOLUMEN DE MEZCLA** 0.1080 m<sup>3</sup>  
**VOLUMEN TOTAL MEZCLA (30%)** 0.1404 m<sup>3</sup>

#### CÁLCULOS

##### Peso de cemento por metro cúbico de concreto

( $r=a/c$ ) ; ( $c=a/r$ )

	r=	0.5
Agua (a)=		195 kg/m <sup>3</sup>
cemento ( c)=		390 kg/m <sup>3</sup>

##### Volumen de cemento por metro cúbico de concreto (Vc)

Vc=c/densidad cemento 0.127 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

De la grafica de optimizacion de granulometrias, se tiene:

La mezcla optima estara compuesta 0.55 grava  
0.45 arena

#### VOLUMEN DE AGREGADOS

$$V_{\text{agregados}} = 1 - (V_{\text{aire}} + V_{\text{agua}} + V_{\text{cemento}}) = 0.663 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

De los cuales:

$$V_{\text{volumen de arena}} = 0.299 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$V_{\text{volumen de grava}} = 0.365 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Para calcular los pesos respectivos, se debe conocer la densidad aparente promedio.

Como las densidades aparentes son similares, tenemos:

$$d_{\text{prom.}} = 2280.95 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso seco de la arena ( } W_f) = 680.91 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso seco de la grava ( } W_g) = 832.22 \text{ kg/m}^3$$

MATERIAL	PESO (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Ajuste por humedad (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	195.00	1	0.195	156.85
Aire	0.00	0	0.015	0.00
Cemento	390.00	3080	0.127	390.00
Grava	832.22	2281	0.365	866.67
Arena	680.91	2281	0.299	733.41
<b>Total</b>	<b>2098.13</b>		<b>1.000</b>	

#### AJUSTES POR HUMEDAD

##### GRAVA

$$\% \text{ Humedad en la grava} = 4.14 \%$$

##### Peso húmedo de la grava = Mhg

$$M_{hg} = \text{Peso de la grava} \cdot (1 + \% \text{ humedad Natural})$$

$$M_{hg} = 866.67 \text{ kg/m}^3$$

##### ARENA

$$\% \text{ Humedad en la arena} = 7.71 \%$$

##### Peso húmedo de la arena = Mhf

$$M_{hf} = \text{Peso de la arena} \cdot (1 + \% \text{ humedad Natural})$$

$$M_{hf} = 733.41 \text{ kg/m}^3$$

#### Exceso o déficit de agua

##### GRAVA

$$H_g = 0.0414$$

$$\text{Abs.g} = 0.0390$$

Por lo tanto

**Agua en exceso!!!!!!**



**Agua de la grava (Ag) = Peso de la grava \* (humedad natural - la absorción de la grava)**  
 Ag = 2.00 kg

ARENA  
 Hf 0.077  
 Abs.f 0.024

Por lo tanto

**Agua en exceso**

**Agua de la arena (Af) = Peso de la arena \* (humedad natural - la absorción de la arena)**  
 Af = 36.16 kg

**Agua total en exceso = Agua de la grava + agua de la arena**  
 A = 38.15 kg

**Cantidad de agua final para la mezcla = Agua inicial - agua en exceso**  
 Agua final para la mezcla = 156.85 kg/m<sup>3</sup>

<b>MEZCLA DE PRUEBA</b>	0.1404 m <sup>3</sup>
Agua (añadida)	22021.24 g
Cemento	54756.00 g
Grava (humedad)	121681.15 g
Arena (humedad)	102970.20 g
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>301428.60 g</b>

<b>ADITIVO</b>	%	0.013
<b>MEZCLA DE PRUEBA CON ADITIVO</b>	0.140 m <sup>3</sup>	
		kg
Agua (añadida)	21309.41 g	21.30941
Aditivo	711.83 g	0.711828
Cemento	54756.00 g	54.756
Grava (humedad)	121681.15 g	121.6811
Arena (humedad)	102970.20 g	102.9702
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>301428.60 g</b>	<b>301.4286</b>

AGREGADO GRUESO NATURAL REEMPLAZO 0%

**AGR. GRUESO NATURAL 121681.15**  
 AGR. GRUESO REICLADO 0

TOTAL 121681.15 0.00

## MEZCLA 20% DE REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO - PLACAS

FECHA  
RELACION AGUA/CEMENTO 0.5  
METODO RNL

### DATOS PREVIOS

#### CEMENTO

Densidad 3080 kg/m<sup>3</sup>

#### AGREGADO GRUESO

Tamaño Máximo Nominal TMN 25.4 mm  
Masa Unitaria Compacta MUC 1282.2 kg/m<sup>3</sup>  
Masa Unitaria Suelta MUS 1132.1 kg/m<sup>3</sup>  
Densidad Aparente (dg) 2123 kg/m<sup>3</sup>  
Absorción (Abs.g) 3.90% 0.0390  
Origen aluvial Angular

#### AGREGADO FINO

Módulo de Finura 3.72  
Masa Unitaria Suelta MUS 1581.3 kg/m<sup>3</sup>  
Densidad Aparente 2474 kg/m<sup>3</sup>  
Absorción 2.40% 0.024  
Ensayo Colorimétrico No. 4  
Origen aluvial Forma TRITURADO

#### AGUA

Volumen 0.195 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

CONTENIDO DE AIRE 0.015 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

#### ADITIVOS

ASENTAMIENTO 7.5 cm

VOLUMEN DE MEZCLA 0.1080 m<sup>3</sup>

VOLUMEN TOTAL MEZCLA (30%) 0.1404 m<sup>3</sup>

### CÁLCULOS

#### Peso de cemento por metro cúbico de concreto

( $r=a/c$ ) ; ( $c=a/r$ )

r=	0.5
Agua (a)=	195 kg/m <sup>3</sup>
cemento ( c)=	390 kg/m <sup>3</sup>

#### Volumen de cemento por metro cúbico de concreto (Vc)

Vc=c/densidad cemento 0.127 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

De la grafica de optimizacion de granulometrias, se tiene:

La mezcla optima estara compuesta 0.55 grava  
0.45 arena

#### VOLUMEN DE AGREGADOS

$$V_{\text{agregados}} = 1 - (V_{\text{aire}} + V_{\text{agua}} + V_{\text{cemento}}) = 0.663 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

De los cuales:

$$V_{\text{volumen de arena}} = 0.299 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$V_{\text{volumen de grava}} = 0.365 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Para calcular los pesos respectivos, se debe conocer la densidad aparente promedio.

Como las densidades aparentes son similares, tenemos:

$$d_{\text{prom.}} = 2280.95 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\text{Peso seco de la arena ( } W_f) = 680.91 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\text{Peso seco de la grava ( } W_g) = 832.22 \text{ kg}/\text{m}^3$$

MATERIAL	PESO (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Ajuste por humedad (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	195.00	1	0.195	168.00
Aire	0.00	0	0.015	0.00
Cemento	390.00	3080	0.127	390.00
Grava	832.22	2281	0.365	866.01
Arena	680.91	2281	0.299	722.92
<b>Total</b>	<b>2098.13</b>		<b>1.000</b>	

#### AJUSTES POR HUMEDAD

##### GRAVA

$$\% \text{ Humedad en la grava} = 4.06 \%$$

##### Peso húmedo de la grava = Mhg

$$M_{hg} = \text{Peso de la grava} \cdot (1 + \% \text{ humedad Natural})$$

$$M_{hg} = 866.01 \text{ kg}/\text{m}^3$$

##### ARENA

$$\% \text{ Humedad en la arena} = 6.17 \%$$

##### Peso húmedo de la arena = Mhf

$$M_{hf} = \text{Peso de la arena} \cdot (1 + \% \text{ humedad Natural})$$

$$M_{hf} = 722.92 \text{ kg}/\text{m}^3$$

#### Exceso o déficit de agua

##### GRAVA

$$H_g = 0.0406$$

$$\text{Abs.g} = 0.0390$$

Por lo tanto

**Agua en exceso!!!!!!**

**Agua de la grava (Ag) = Peso de la grava\*(humedad natural - la absorción de la grava)**  
 Ag= 1.33 kg

ARENA  
 Hf 0.062  
 Abs.f 0.024

Por lo tanto

**Agua en exceso**

**Agua de la arena (Af) = Peso de la arena\*(humedad natural - la absorción de la arena)**  
 Af= 25.67 kg

**Agua total en exceso= Agua de la grava + agua de la arena**  
 A= 27.00 kg

**Cantidad de agua final para la mezcla= Agua inicial - agua en exceso**  
 Agua final para la mezcla= 168.00 kg/m<sup>3</sup>

<b>MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>0.1404 m<sup>3</sup></b>
Agua (añadida)	23586.95 g
Cemento	54756.00 g
Grava (humedad)	121587.67 g
Arena (humedad)	101497.97 g
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>301428.60 g</b>

ADITIVO	%	0.01
<b>MEZCLA DE PRUEBA CON ADITIVO</b>	<b>0.140 m<sup>3</sup></b>	
		kg
Agua (añadida)	23039.39 g	23.03939
Aditivo	547.56 g	0.54756
Cemento	54756.00 g	54.756
Grava (humedad)	121587.67 g	121.5877
Arena (humedad)	101497.97 g	101.498
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>301428.60 g</b>	<b>301.4286</b>

AGREGADO GRUESO NATURAL REEMPLAZO 20%

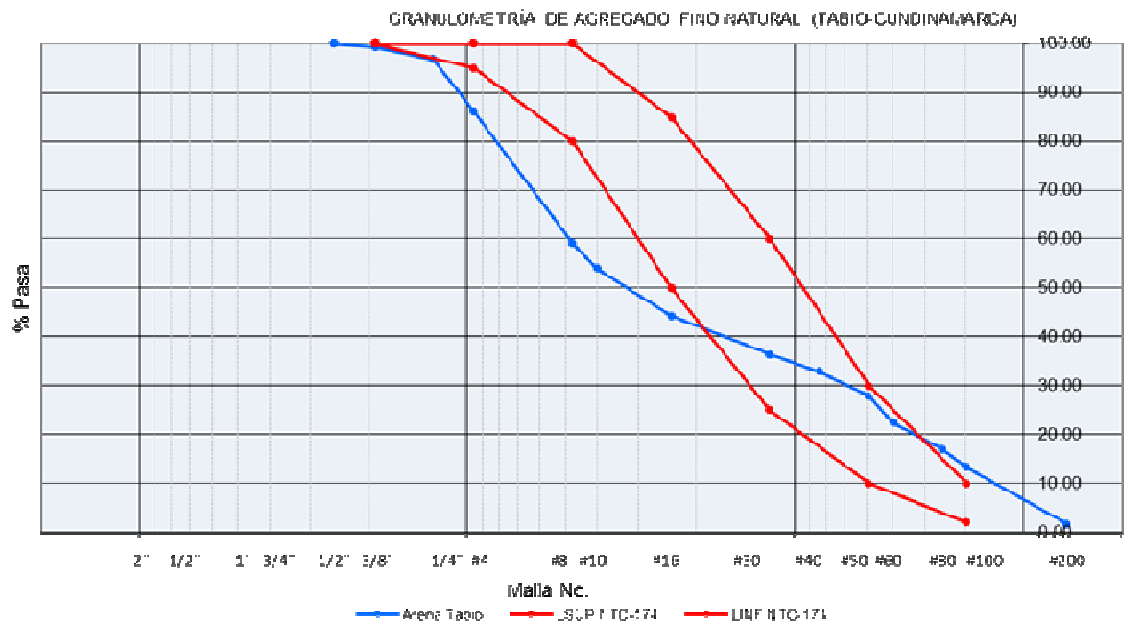
AGR. GRUESO NATURAL 97270.14  
 AGR. GRUESO RECICLADO 24317.535

TOTAL 121587.67 0.00

## PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS

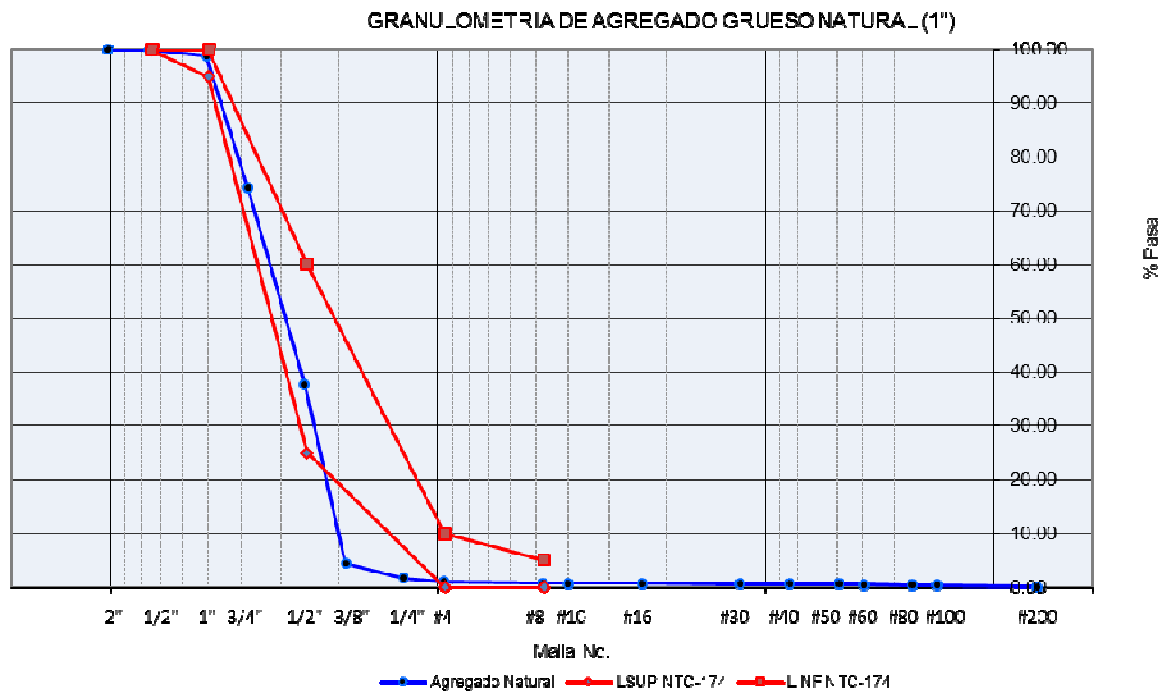
### Agregado fino (Tabio – Cundinamarca)

Densidad Aparente. S:	2.47 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Nominal:	2.63 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Aparente S.S.S.:	2.53 g/cm <sup>3</sup>
Humedad de Absorción:	2.4 %
Masa U. Suelta:	1581 kg/cm <sup>3</sup>
Masa U. Compacta:	1768 kg/cm <sup>3</sup>
Resultado de la Prueba Colorimétrica	4

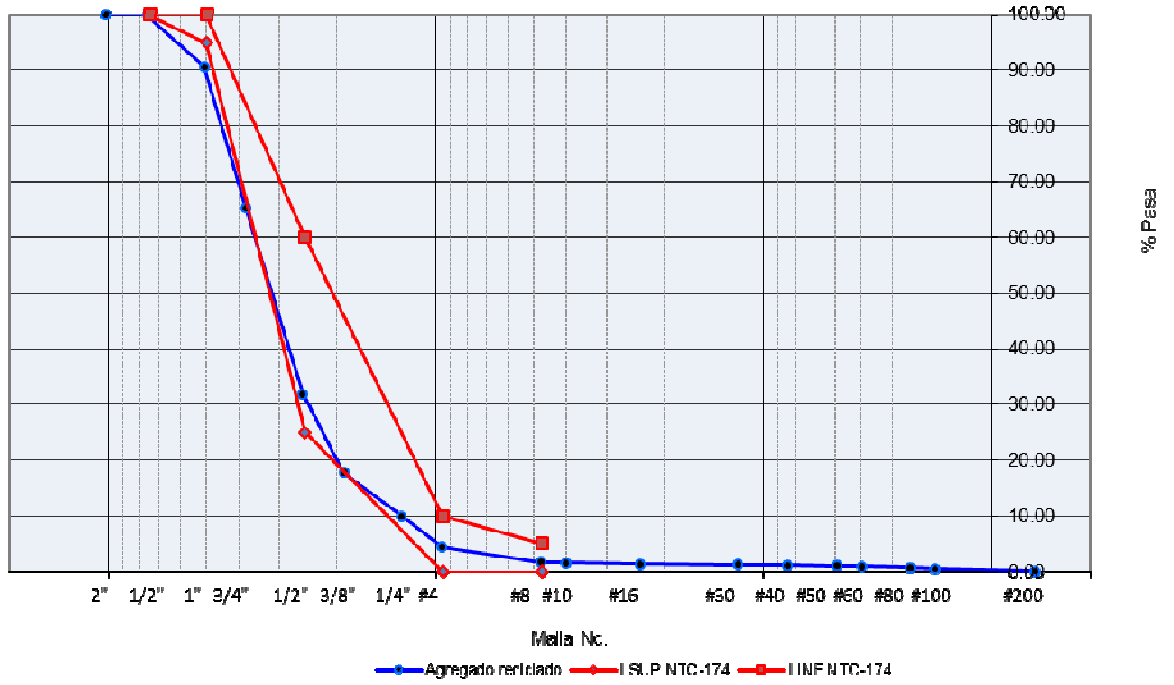


## Agregado grueso

PROPIEDAD FÍSICA	AGREGADO GRUESO	
	Natural	Reciclado
Tamaño Máximo	1½"	1½"
Tamaño Máximo Nominal	1"	1"
Densidad Aparente. S (g/cm <sup>3</sup> )	2.36	2.12
Densidad Nominal (g/cm <sup>3</sup> )	2.60	2.54
Densidad Aparente S.S.S. (g/cm <sup>3</sup> )	2.45	2.29
Humedad de Absorción (%)	3.9	7.8
Masa U. Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1318	1132
Masa U. Compacta (kg/m <sup>3</sup> )	1474	1282
Coefficiente de Forma	0.31	0.24
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%)	30.3	40.5
Ensayo de Micro-Deval (%)	16.5	31.0



GRANULOMETRIA DE AGREGADO GRUESO RECICLADO (1")



## ANEXO 6 – Ductilidades

Para el cálculo de la ductilidad (área bajo la curva de las gráficas carga-deformación) se utilizó el programa AutoCAD 2009.

A continuación se presenta un cuadro con los resultados obtenidos:

	CONVENCIONAL	RECICLADO	RECIC./CONV.
TIPO	Ductilidad	Ductilidad	Comparación
1	621509	626147	100,75%
2	620599	589977	95,07%
Variación	0,15%	6,13%	

Se encontró una disminución del 4,93% en el concreto con agregado grueso reciclado frente al concreto convencional para el refuerzo tipo 2 (placa armada en los dos sentidos), para el refuerzo tipo 1 (placa armada únicamente en el sentido longitudinal) se presenta un porcentaje del 0,75% a favor del concreto con agregado grueso de concreto reciclado.

Se presenta variación (6,13%) entre tipos de refuerzo en el concreto con agregado grueso de concreto reciclado, mientras que para el concreto convencional la variación es insignificante (0,15%).



# 11. ANEXOS VIGAS ALTAS

## ANEXO 1 – Ensayos cilindros de concreto

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL			
MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO			
LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT			
CONCRETO CONVENCIONAL - MUESTRA 1			
Diámetro promedio:	101,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8011,9 mm <sup>2</sup>	2210,92 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	96 mm		
Distancia horizontal a deformímetro :	50 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	54 mm		
Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,22	0
2.000	0,5	2,45	27
3.000	1,5	3,67	80
4.000	2,8	4,89	149
5.000	4,0	6,12	212
6.000	5,2	7,34	276
7.000	6,8	8,56	361
8.000	8,0	9,79	425
9.000	9,5	11,01	504
10.000	10,8	12,23	573
11.000	12,0	13,46	637
12.000	13,5	14,68	717
13.000	15,0	15,90	796
14.000	16,5	17,12	876
15.000	18,0	18,35	956
16.000	19,5	19,57	1.035
17.000	21,0	20,79	1.115
18.000	22,5	22,02	1.195
19.000	24,5	23,24	1.301
20.000	26,2	24,46	1.391
21.000	28,2	25,69	1.497
22.000	30,8	26,91	1.635
<b>22.100</b>		<b>27,03</b>	

Máximo **Ec : 17.719 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**  
Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

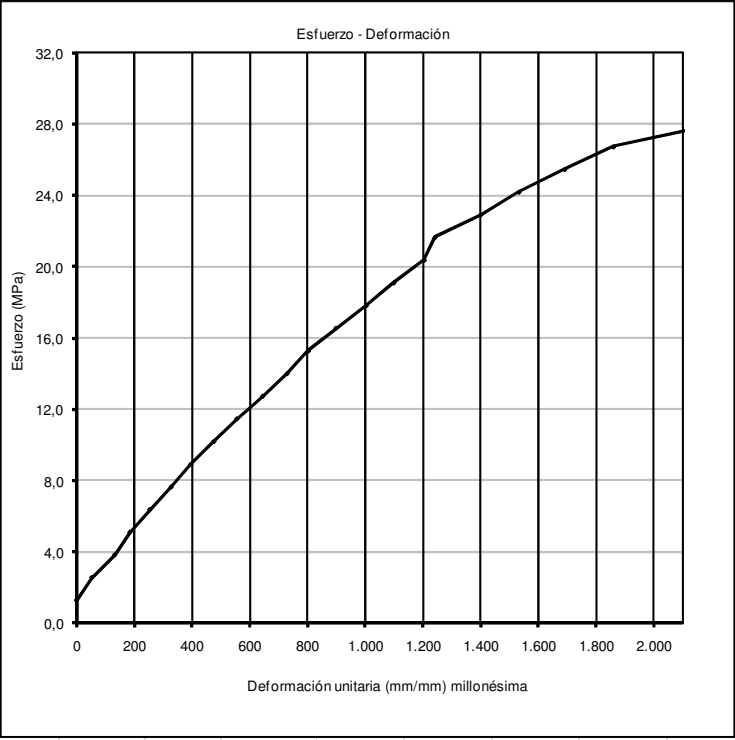
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO CONVENCIONAL - MUESTRA 2**

Diámetro promedio:	99,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro:	7697,7 mm <sup>2</sup>	2297,89 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos:	94,5 mm		
Distancia horizontal a deformímetro:	55,3 mm		
Distancia horizontal a apoyo:	55,0 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{cl} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,27	0
2.000	1,0	2,55	53
3.000	2,5	3,82	132
4.000	3,5	5,09	185
5.000	4,8	6,37	254
6.000	6,2	7,64	328
7.000	7,5	8,91	396
8.000	9,0	10,18	476
9.000	10,5	11,46	555
10.000	12,2	12,73	645
11.000	13,8	14,00	729
12.000	15,2	15,28	803
13.000	17,0	16,55	898
14.000	19,0	17,82	1.004
15.000	20,8	19,10	1.099
16.000	22,8	20,37	1.205
17.000	23,5	21,64	1.242
18.000	26,5	22,92	1.400
19.000	29,0	24,19	1.532
20.000	32,0	25,46	1.691
21.000	35,2	26,74	1.860
22.000	42,0	28,01	2.219
<b>22.200</b>		<b>28,26</b>	



Máximo **Ec : 17.824 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**  
 Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

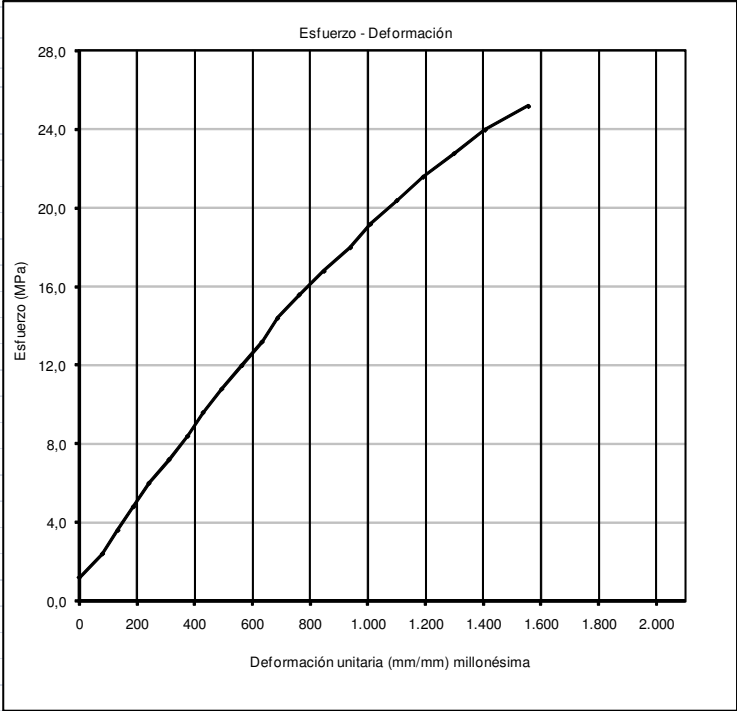
LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

CONCRETO CONVENCIONAL - MUESTRA 4

Diámetro promedio:	102,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8171,3 mm <sup>2</sup>	2303,18 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	94,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	51 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	54 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,20	0
2.000	1,5	2,40	81
3.000	2,5	3,60	134
4.000	3,5	4,80	188
5.000	4,5	6,00	242
6.000	5,8	7,20	311
7.000	7,0	8,40	376
8.000	8,0	9,59	429
9.000	9,2	10,79	494
10.000	10,5	11,99	564
11.000	11,8	13,19	633
12.000	12,8	14,39	687
13.000	14,2	15,59	762
14.000	15,8	16,79	848
15.000	17,5	17,99	939
16.000	18,8	19,19	1.009
17.000	20,5	20,39	1.100
18.000	22,2	21,59	1.192
19.000	24,2	22,79	1.299
20.000	26,2	23,99	1.406
21.000	29,0	25,19	1.557
21.900		26,27	



Máximo

Ec : 19.987 MPa

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

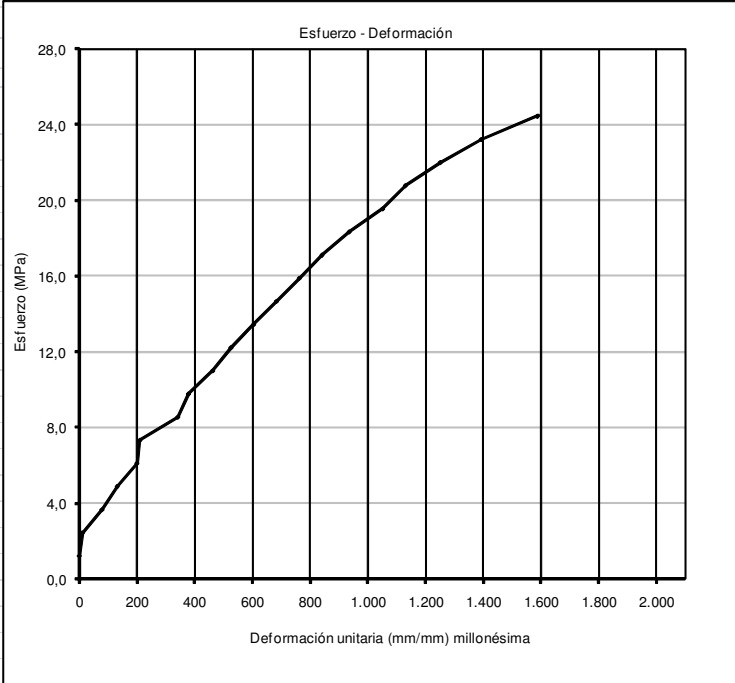
LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 1**

Diámetro promedio:	101,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8011,9 mm <sup>2</sup>	2320,68 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	95 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	53 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	53 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,22	0
2.000	0,2	2,45	11
3.000	1,5	3,67	79
4.000	2,5	4,89	132
5.000	3,8	6,12	200
6.000	4,0	7,34	211
7.000	6,5	8,56	342
8.000	7,2	9,79	379
9.000	8,8	11,01	463
10.000	10,0	12,23	526
11.000	11,5	13,46	605
12.000	13,0	14,68	684
13.000	14,5	15,90	763
14.000	16,0	17,12	842
15.000	17,8	18,35	937
16.000	20,0	19,57	1.053
17.000	21,5	20,79	1.132
18.000	23,8	22,02	1.253
19.000	26,5	23,24	1.395
20.000	30,2	24,46	1.589
<b>20.300</b>		<b>24,83</b>	



Máximo

**Ec : 19.998 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

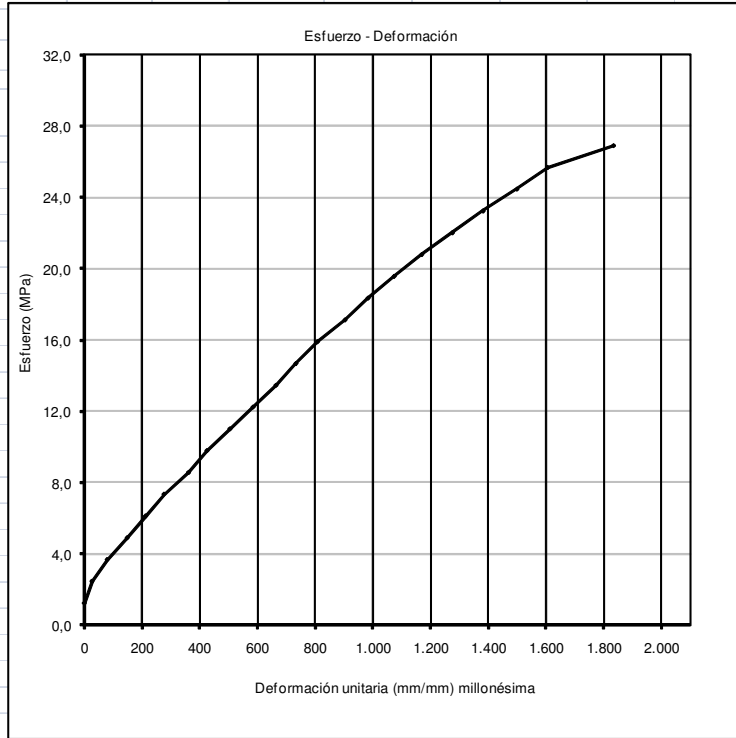
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 2**

Diámetro promedio:	101,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8011,9 mm <sup>2</sup>	2303,80 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	94,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	52 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	53 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,22	0
2.000	0,5	2,45	27
3.000	1,5	3,67	80
4.000	2,8	4,89	149
5.000	4,0	6,12	213
6.000	5,2	7,34	276
7.000	6,8	8,56	362
8.000	8,0	9,79	425
9.000	9,5	11,01	505
10.000	11,0	12,23	585
11.000	12,5	13,46	665
12.000	13,8	14,68	734
13.000	15,2	15,90	808
14.000	17,0	17,12	904
15.000	18,5	18,35	984
16.000	20,2	19,57	1.074
17.000	22,0	20,79	1.170
18.000	24,0	22,02	1.276
19.000	26,0	23,24	1.382
20.000	28,2	24,46	1.499
21.000	30,2	25,69	1.606
22.000	34,5	26,91	1.834
<b>22.800</b>		<b>27,89</b>	



Máximo

**Ec : 17.584 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

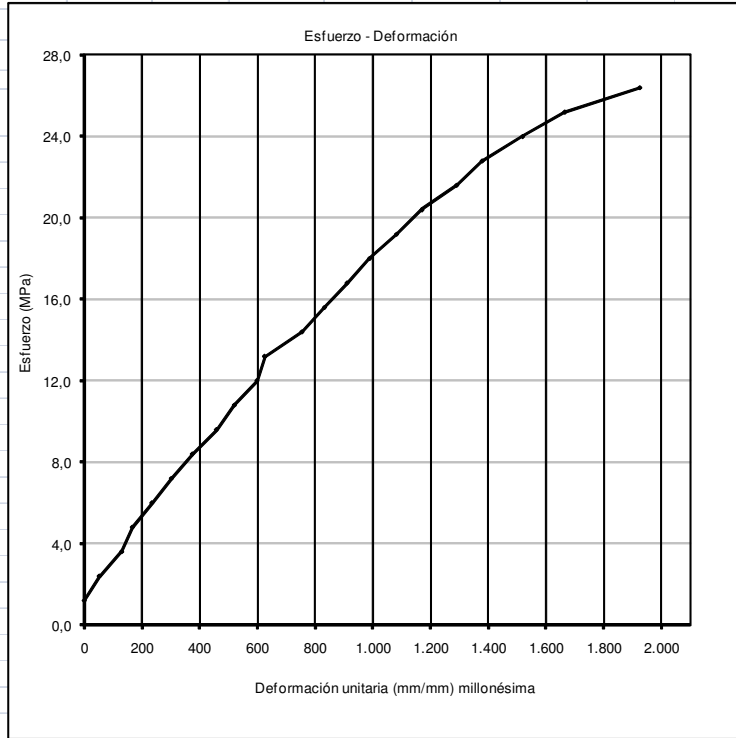
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 3**

Diámetro promedio:	102,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8171,3 mm <sup>2</sup>	2103,36 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	96,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	52 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	53 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,20	0
2.000	1,0	2,40	52
3.000	2,5	3,60	130
4.000	3,2	4,80	167
5.000	4,5	6,00	234
6.000	5,8	7,20	302
7.000	7,2	8,40	375
8.000	8,8	9,59	458
9.000	10,0	10,79	521
10.000	11,5	11,99	599
11.000	12,0	13,19	625
12.000	14,5	14,39	755
13.000	16,0	15,59	833
14.000	17,5	16,79	911
15.000	19,0	17,99	989
16.000	20,8	19,19	1.083
17.000	22,5	20,39	1.171
18.000	24,8	21,59	1.291
19.000	26,5	22,79	1.380
20.000	29,2	23,99	1.520
21.000	32,0	25,19	1.666
22.000	37,0	26,39	1.926
<b>22.000</b>		<b>26,39</b>	



Máximo

Ec : 17.905 MPa

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

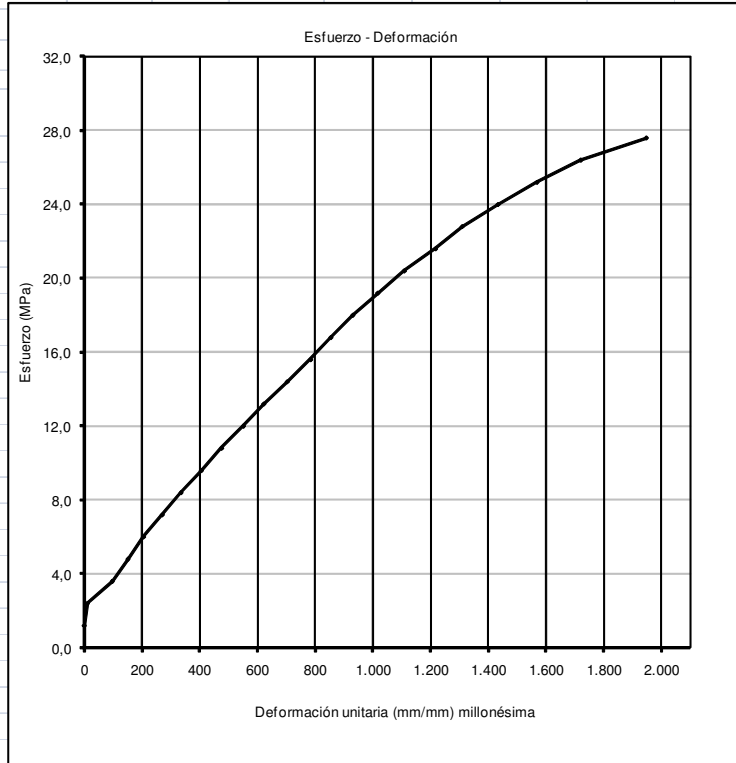
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 4**

Diámetro promedio:	102,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8171,3 mm <sup>2</sup>	2110,74 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	92 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	51 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	50 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,20	0
2.000	0,2	2,40	11
3.000	1,8	3,60	97
4.000	2,8	4,80	151
5.000	3,8	6,00	206
6.000	5,0	7,20	270
7.000	6,2	8,40	335
8.000	7,5	9,59	406
9.000	8,8	10,79	476
10.000	10,2	11,99	552
11.000	11,5	13,19	622
12.000	13,0	14,39	703
13.000	14,5	15,59	784
14.000	15,8	16,79	854
15.000	17,2	17,99	930
16.000	18,8	19,19	1.017
17.000	20,5	20,39	1.109
18.000	22,5	21,59	1.217
19.000	24,2	22,79	1.309
20.000	26,5	23,99	1.433
21.000	29,0	25,19	1.568
22.000	31,8	26,39	1.720
23.000	36,0	27,58	1.947
<b>23.000</b>		<b>27,58</b>	



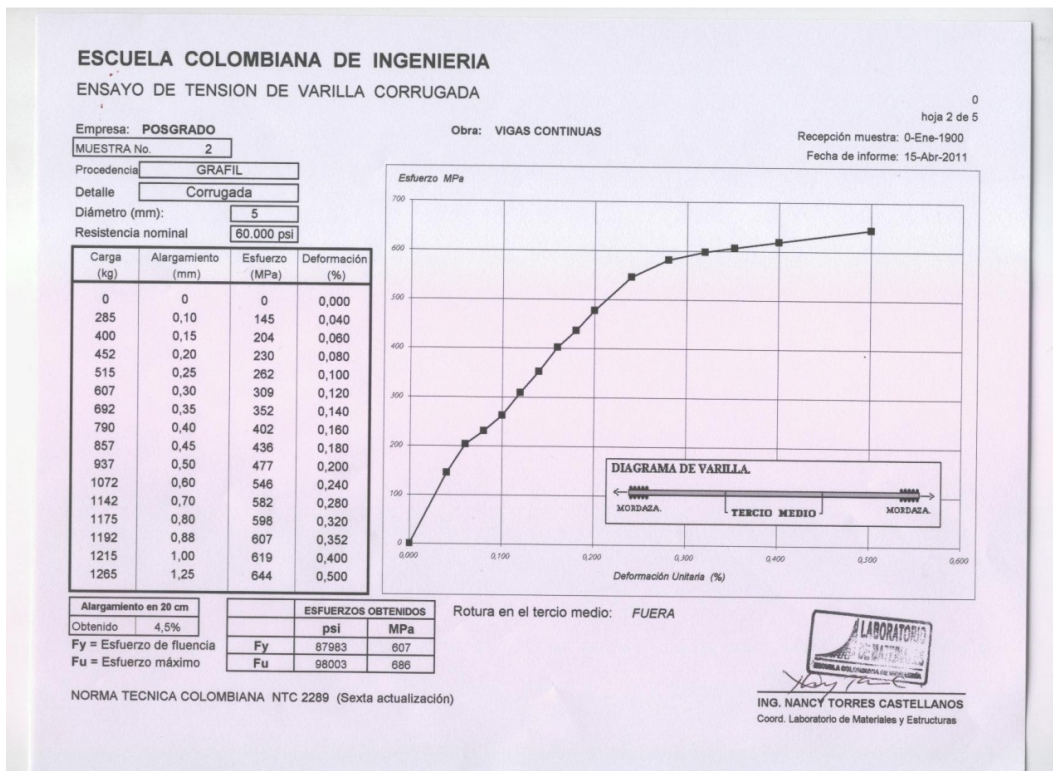
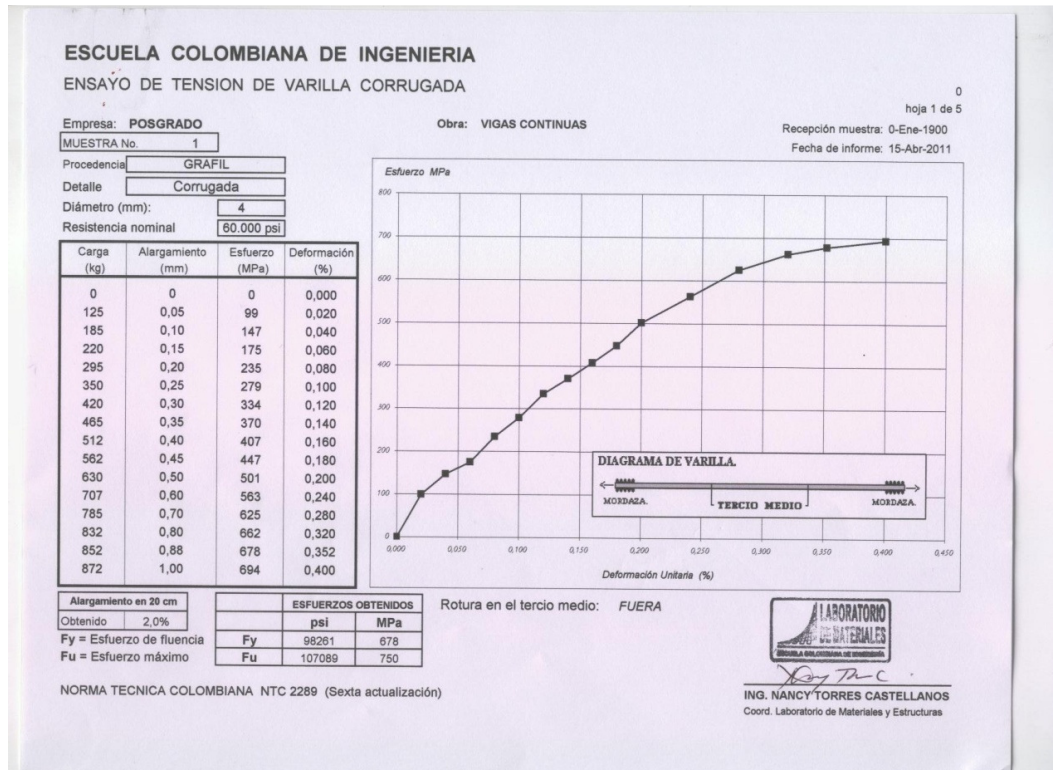
Máximo

**Ec : 18.347 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

## ANEXO 2 – Ensayos refuerzo





ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA  
ENSAYO DE TENSION DE VARILLA CORRUGADA

0  
hoja 3 de 5

Empresa: POSGRADO

Obra: VIGAS CONTINUAS

Recepción muestra: 0-Ene-1900  
Fecha de informe: 15-Abr-2011

MUESTRA No. 3

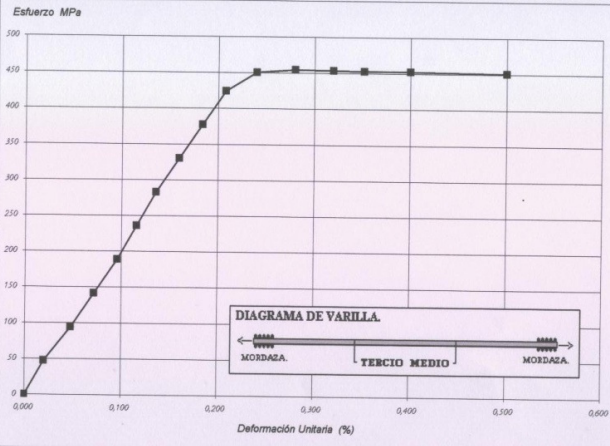
Procedencia: BOYACA

Detalle: Corrugada

Diámetro (mm): 9

Resistencia nominal: 60.000 psi

Carga (kg)	Alargamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)
0	0	0	0,000
300	0,05	47	0,020
600	0,12	94	0,048
900	0,18	141	0,072
1200	0,24	189	0,096
1500	0,29	236	0,116
1800	0,34	283	0,136
2100	0,40	330	0,160
2400	0,46	377	0,184
2700	0,52	424	0,208
2865	0,60	450	0,240
2890	0,70	454	0,280
2885	0,80	453	0,320
2880	0,88	453	0,352
2880	1,00	453	0,400
2870	1,25	451	0,500



Alargamiento en 20 cm

Obtenido 20,0%

Fy = Esfuerzo de fluencia

Fu = Esfuerzo máximo

ESFUERZOS OBTENIDOS	
psi	MPa
Fy	64672
Fu	90766
	635

Rotura en el tercio medio: FUERA

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 2289 (Sexta actualización)



ING. NANCY TORRES CASTELLANOS  
Coord. Laboratorio de Materiales y Estructuras

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA  
ENSAYO DE TENSION DE VARILLA CORRUGADA

0  
hoja 4 de 5

Empresa: POSGRADO

Obra: VIGAS CONTINUAS

Recepción muestra: 0-Ene-1900  
Fecha de informe: 15-Abr-2011

MUESTRA No. 4

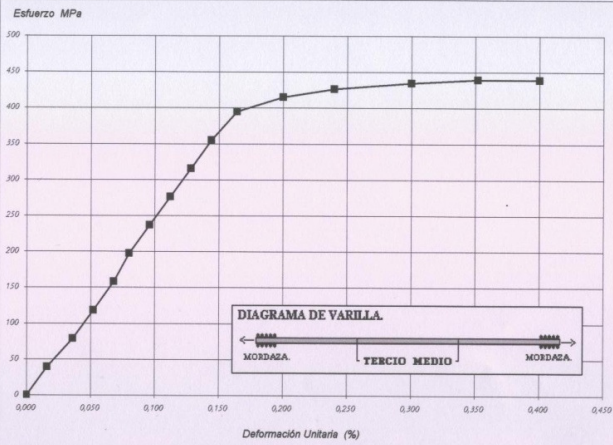
Procedencia: PAZ DEL RIO

Detalle: Corrugada

Diámetro (pulg): 1/2

Resistencia nominal: 60.000 psi

Carga (kg)	Alargamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)
0	0	0	0,000
500	0,04	39	0,016
1000	0,09	79	0,036
1500	0,13	118	0,052
2000	0,17	158	0,068
2500	0,20	197	0,080
3000	0,24	237	0,096
3500	0,28	276	0,112
4000	0,32	316	0,128
4500	0,36	355	0,144
5000	0,41	395	0,164
5260	0,50	415	0,200
5400	0,60	426	0,240
5510	0,75	435	0,300
5570	0,88	440	0,352
5565	1,00	439	0,400



Alargamiento en 20 cm

Obtenido 20,5%

Fy = Esfuerzo de fluencia

Fu = Esfuerzo máximo

ESFUERZOS OBTENIDOS	
psi	MPa
Fy	62814
Fu	89316
	625

Rotura en el tercio medio: FUERA

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 2289 (Sexta actualización)



ING. NANCY TORRES CASTELLANOS  
Coord. Laboratorio de Materiales y Estructuras

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA**

**ENSAÑO DE TENSION DE VARILLA CORRUGADA**

0  
hoja 5 de 5

Empresa: **POSGRADO**

Obra: **VIGAS CONTINUAS**

Recepción muestra: 0-Ene-1900

MUESTRA No. **5**

Fecha de informe: 15-Abr-2011

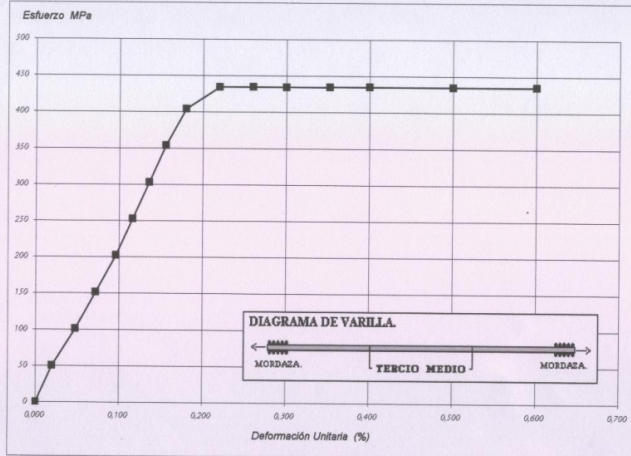
Procedencia **SIDENAL**

Detalle **Corrugada**

Diámetro (pulg): **5/8**

Resistencia nominal **60,000 psi**

Carga (kg)	Alargamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)
0	0	0	0,000
1000	0,05	51	0,020
2000	0,12	101	0,048
3000	0,18	152	0,072
4000	0,24	202	0,096
5000	0,29	253	0,116
6000	0,34	303	0,136
7000	0,39	354	0,156
8000	0,45	404	0,180
8600	0,55	434	0,220
8605	0,65	435	0,260
8600	0,75	434	0,300
8605	0,88	435	0,352
8610	1,00	435	0,400
8605	1,25	435	0,500
8615	1,50	435	0,600



Alargamiento en 20 cm

Obtenido **20,5%**

Fy = Esfuerzo de fluencia

Fu = Esfuerzo máximo

	ESFUERZOS OBTENIDOS	
	psi	MPa
Fy	62106	435
Fu	94260	660

Rotura en el tercio medio: **FUERA**

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 2289 (Sexta actualización)



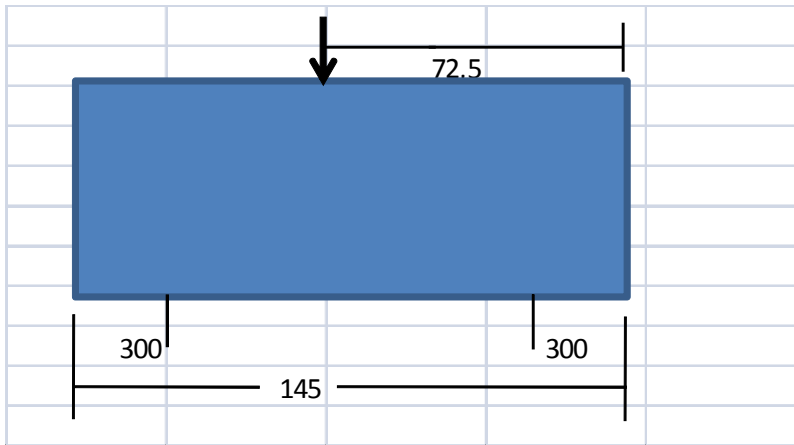
**ING. NANCY TORRES CASTELLANOS**  
Coord. Laboratorio de Materiales y Estructuras

## ANEXO 3 – Datos ensayos

### Concreto convencional (CC)

#### Refuerzo Tipo 1 CC (sin armadura adicional)

Dimensiones:



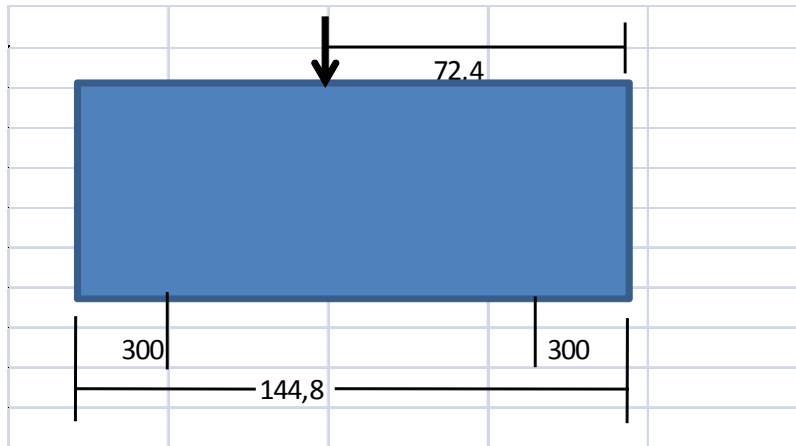
B (mm)	H (mm)		B (mm)	H (mm)
64	500		61	498
64	500		62	498

Datos:

TON	V x10-2 mm	H x10-2 mm	mm
CARGA	DEF1 ↔	DEF2 ↓	MESA ↑
0	0	0	0
1	1	6,2	0,122
2	3	13,5	0,236
3	-13,5	23,5	0,399
4	-19,2	32	0,58
5	-29	41	0,74
6	-45	47,5	0,926
7	-52	54	1,092
8	-59,5	59	1,314
9	-68,5	65	1,564
10	-68,5	62	1,994
11	-68,5	63	2,222
12	-67,5	62	2,642
12	-67,5	60	2,868
<b>CARGA MAX</b>	<b>12,05 Ton</b>		

## Refuerzo Tipo 2 CC (con armadura adicional)

Dimensiones:



B (mm)	H (mm)		B (mm)	H (mm)
65	501		62	499
64	501		65	499

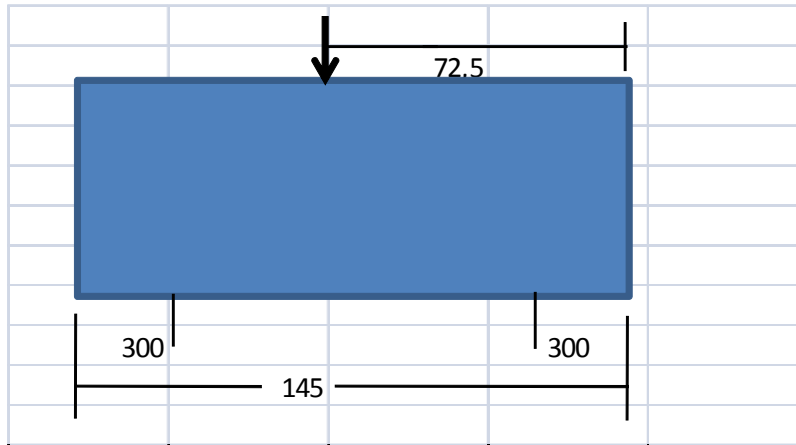
Datos:

TON	V x10-2 mm	H x10-2 mm	mm
CARGA	DEF1 ↔	DEF2 ↓	MESA ↑
0	0,0	0,0	0,000
1	0,0	3,5	0,128
2	-6,5	7,5	0,264
3	-18,0	14,0	0,396
4	-28,0	23,0	0,518
5	-36,0	30,0	0,636
6	-40,0	34,0	0,748
7	-47,0	36,5	0,852
8	-51,0	38,8	0,966
9	-58,0	45,5	1,102
10	-58,0	43,0	1,132
11	-62,0	49,2	1,514
11	-62,0	49,8	1,644
12	-63,5	51,5	1,832
13	-69,0	54,0	2,048
14	-72,0	60,0	2,296
15	-73,0	63,0	2,528
16	-88,0	65,0	2,840
<b>CARGA MAX</b>	<b>16,15 Ton</b>		

## Concreto con agregado de concreto reciclado (CR)

### Refuerzo Tipo 1 CR (sin armadura adicional)

Dimensiones:



B (mm)	H (mm)		B (mm)	H (mm)
62	500		67	500
63	500		71	500

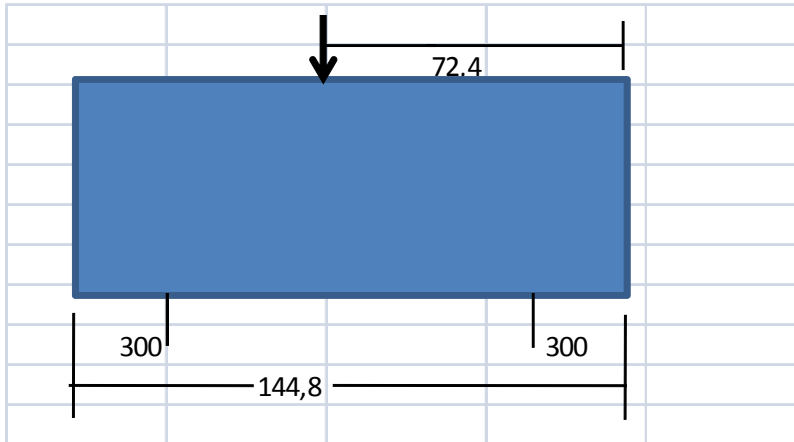
Datos:

TON	V x10-2 mm	H x10-2 mm	mm
CARGA	DEF1 ↔	DEF2 ↓	MESA ↑
0	0,0	0,0	0,000
1	1,0	3,0	0,526
2	1,0	22,5	1,072
3	1,0	27,0	1,334
4	-4,0	31,0	1,488
5	-8,0	35,0	1,614
6	-14,0	39,5	1,748
7	-23,0	42,0	1,936
8	-29,0	44,0	2,082
8	-38,0	50,0	2,268
8,5	-38,0	52,0	2,332
9	-45,0	53,0	2,400
9,5	-45,0	55,5	2,482
10	-47,0	56,0	2,560
10,5	-50,0	55,0	2,702
11	-55,0	55,5	2,820
12	-63,0	56,0	2,996

TON	V x10-2 mm	H x10-2 mm	mm
CARGA	DEF1 ↔	DEF2 ↓	MESA ↑
12,5	-64,0	56,0	3,094
13	-65,5	56,0	3,186
13,5	-70,0	56,0	3,290
14	-73,0	56,0	3,380
14,5	-77,0	56,5	3,498
15	-79,0	57,0	3,602
<b>CARGA MAX</b>	<b>15,6 Ton</b>		

### Refuerzo Tipo 2 CR (con armadura adicional)

Dimensiones:



B (mm)	H (mm)		B (mm)	H (mm)
65	500		61	500
61	500		63	500

Datos:

TON	V x10-2 mm	H x10-2 mm	mm
CARGA	DEF1 ↔	DEF2 ↓	MESA ↑
0	0,0	0,0	0,000
1	0,0	5,5	0,170
2	0,0	15,0	0,330
2,5	-5,0	27,0	0,482
3	-9,0	30,5	0,546
3,5	-11,0	46,3	0,748
4,5	-12,0	50,0	0,790
5	-12,0	53,0	0,842

<b>TON</b>	<b>V x10-2 mm</b>	<b>H x10-2 mm</b>	<b>mm</b>
<b>CARGA</b>	<b>DEF1 ↔</b>	<b>DEF2 ↓</b>	<b>MESA ↑</b>
5	-18,0	55,5	0,844
5,5	-30,0	58,0	0,978
5,5	-33,0	60,5	1,052
6	-35,0	62,0	1,116
6,5	-38,0	64,0	1,184
7,5	-45,0	66,0	1,266
8	-50,0	68,5	1,340
8,5	-55,0	70,2	1,412
9	-65,0	74,0	1,544
9	-80,0	77,0	1,616
9,5	-85,0	78,0	1,688
9,5	-86,0	79,2	1,774
10	-80,0	79,2	1,840
10,5	-83,0	80,0	1,928
11	-88,0	81,5	2,010
11,5	-90,0	83,0	2,142
12	-90,0	84,5	2,234
12,5	-95,0	85,5	2,332
13	-96,0	87,0	2,430
13,5	-101,0	87,5	2,523
14	-102,0	89,0	2,651
14,5	-104,0	90,0	2,808
15	-106,0	90,5	2,908
15,5	-107,0	92,0	3,046
16	-110,0	93,0	3,192
16,5	-112,0	93,2	3,370
17	-119,0	93,5	3,774
<b>CARGA MAX</b>	<b>17,35 Ton</b>		

## ANEXO 4 – Registro fotográfico

### Proceso Constructivo



Armado de formaleta



Armaduras de refuerzo típicas





Vibración del concreto (CR)



Armaduras de refuerzo típicas



Acabado de superficies



Cilindros de testigo (CR)



Asentamiento 6,0 cm (CR)



Asentamiento 6,6 cm (CC)

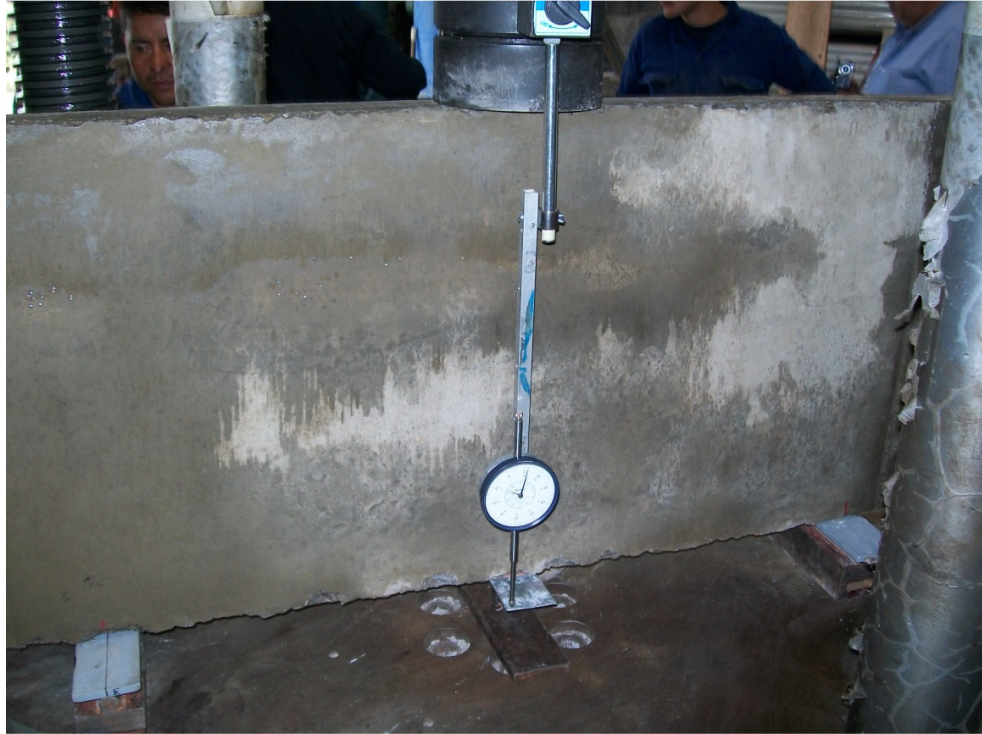
Ensayo No. 1 Viga Alta Tipo 1 CR



Nivelación de la viga



Instalación de deformímetro vertical



Instalación deformímetro horizontal



Esquema de falla cara 1



Esquema de falla cara 2

Ensayo No. 2 Viga Alta Tipo 2 CR



Esquema de falla cara 1



Esquema de falla cara 2



Exploración acero de refuerzo

Ensayo No. 3 Viga Alta Tipo 1 CC



Esquema de falla cara 1



Esquema de falla cara 2



Ensayo No. 4 Viga Alta Tipo 2 CC



Esquema de falla cara 1



Esquema de falla cara 2

## ANEXO 5 – Diseños de mezclas y propiedades de los agregados

### MEZCLA 0% DE REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO - MÉNSULAS Y VIGAS ALTAS

FECHA  
 RELACION AGUA/CEMENTO 0.5  
 METODO RNL

#### DATOS PREVIOS

##### CEMENTO

Densidad 3080 kg/m<sup>3</sup>

##### AGREGADO GRUESO

Tamaño Máximo Nominal TMN 25.4 mm  
 Masa Unitaria Compacta MUC 1282.2 kg/m<sup>3</sup>  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1132.1 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente (dg) 2123 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción (Abs.g) 3.90% 0.0390  
 Origen aluvial Angular

##### AGREGADO FINO

Módulo de Finura 3.72  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1581.3 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente 2474 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción 2.40% 0.024  
 Ensayo Colorimétrico No. 4  
 Origen aluvial Forma TRITURADO

##### AGUA

Volumen 0.195 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

##### CONTENIDO DE AIRE

0.015 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

##### ADITIVOS

##### ASENTAMIENTO

7.5 cm

VOLUMEN DE MEZCLA 0.1950 m<sup>3</sup>

VOLUMEN TOTAL MEZCLA (30%) 0.2535 m<sup>3</sup>

#### CÁLCULOS

##### Peso de cemento por metro cúbico de concreto

( $r=a/c$ ) ; ( $c=a/r$ )

r= 0.5  
 Agua (a)= 195 kg/m<sup>3</sup>  
 cemento (c)= 390 kg/m<sup>3</sup>

##### Volumen de cemento por metro cúbico de concreto (Vc)

Vc=c/densidad cemento 0.127 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

De la grafica de optimizacion de granulometrias, se tiene:

La mezcla optima estara compuesta 0.55 grava  
 0.45 arena

**VOLUMEN DE AGREGADOS**

Vagregados =  $1 - (V_{aire} + V_{agua} + V_{cemento}) = 0.663 \text{ m}^3/\text{m}^3$

De los cuales:

Volumen de arena =  $0.299 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Volumen de grava =  $0.365 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Para calcular los pesos respectivos, se debe conocer la densidad aparente promedio.

Como las densidades aparentes son similares, tenemos:

$d_{prom.} = 2280.95 \text{ kg}/\text{m}^3$

Peso seco de la arena (  $W_f$ ) =  $680.91 \text{ kg}/\text{m}^3$

Peso seco de la grava (  $W_g$ ) =  $832.22 \text{ kg}/\text{m}^3$

MATERIAL	PESO (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Ajuste por humedad (kg/m <sup>3</sup> )
Aqua	195.00	1	0.195	163.28
Aire	0.00	0	0.015	0.00
Cemento	390.00	3080	0.127	390.00
Grava	832.22	2281	0.365	851.86
Arena	680.91	2281	0.299	741.78
<b>Total</b>	<b>2098.13</b>		<b>1.000</b>	

**AJUSTES POR HUMEDAD**

**GRAVA**

% Humedad en la grava = **2.36** %

**Peso húmedo de la grava = Mhg**

Mhg = Peso de la grava \* (1 + % humedad Natural)

Mhg =  $851.86 \text{ kg}/\text{m}^3$

**ARENA**

% Humedad en la arena = **8.94** %

**Peso húmedo de la arena = Mhf**

Mhf = Peso de la arena \* (1 + % humedad Natural)

Mhf =  $741.78 \text{ kg}/\text{m}^3$

**Exceso o déficit de agua**

**GRAVA**

Hg =  $0.0236$

Abs.g =  $0.0390$

Por lo tanto

**Necesita agua!!!!!!**

**Aqua de la grava (Aq) = Peso de la grava \* (humedad natural - la absorción de la grava)**

Aq =  $-12.82 \text{ kg}$

**ARENA**

Hf =  $0.089$

Abs.f =  $0.024$

Por lo tanto

**Agua en exceso**

**Agua de la arena (Af) = Peso de la arena \* (humedad natural - la absorción de la arena)**

Af =  $44.53 \text{ kg}$

**Agua total en exceso= Agua de la grava + agua de la arena**  
 A= 31.72 kg

**Cantidad de agua final para la mezcla= Agua inicial - agua en exceso**  
 Agua final para la mezcla= 163.28 kg/m<sup>3</sup>

<b>MEZCLA DE PRUEBA</b>	0.2535 m <sup>3</sup>
Agua (añadida)	41392.70 q
Cemento	98865.00 q
Grava (húmedad)	215946.84 q
Arena (húmedad)	188041.53 g
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>544246.07 g</b>

<b>ADITIVO</b>	%	0.013
<b>MEZCLA DE PRUEBA CON ADITIVO</b>	0.254 m <sup>3</sup>	
		kg
Agua (añadida)	40107.46 g	40.10745638
Aditivo	1285.25 g	1.285245
Cemento	98865.00 g	98.865
Grava (húmedad)	215946.84 g	215.9468429
Arena (húmedad)	188041.53 g	188.0415304
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>544246.07 g</b>	<b>544.2460747</b>

AGREGADO GRUESO NATURAL REEMPLAZO 0%

AGR. GRUESO NATURAL 215946.84  
 AGR. GRUESO RECICLADO 0

TOTAL 215946.84 0.00

**MEZCLA 20% DE REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO - MÉNSULAS Y VIGAS ALTAS**

FECHA  
 RELACION AGUA/CEMENTO 0.5  
 METODO RNL

**DATOS PREVIOS**

**CEMENTO**

Densidad 3080 kg/m<sup>3</sup>

**AGREGADO GRUESO**

Tamaño Máximo Nominal TMN 25.4 mm  
 Masa Unitaria Compacta MUC 1282.2 kg/m<sup>3</sup>  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1132.1 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente (dg) 2123 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción (Abs.g) 3.90% 0.0390  
 Origen aluvial Angular

**AGREGADO FINO**

Módulo de Finura 3.72  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1581.3 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente 2474 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción 2.40% 0.024  
 Ensayo Colorimétrico No. 4  
 Origen aluvial Forma TRITURADO

<b>AGUA</b>	
Volumen	0.195 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<b>CONTENIDO DE AIRE</b>	0.015 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<b>ADITIVOS</b>	
<b>ASENTAMIENTO</b>	7.5 cm
<b>VOLUMEN DE MEZCLA</b>	0.1950 m <sup>3</sup>
<b>VOLUMEN TOTAL MEZCLA (30%)</b>	0.2535 m <sup>3</sup>

### CÁLCULOS

#### Peso de cemento por metro cúbico de concreto

( $r=a/c$ ) ; ( $c=a/r$ )

r=	0.5
Agua (a)=	195 kg/m <sup>3</sup>
cemento ( c)=	390 kg/m <sup>3</sup>

#### Volumen de cemento por metro cúbico de concreto (Vc)

$Vc=c/\text{densidad cemento}$  0.127 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

De la grafica de optimizacion de granulometrias, se tiene:

La mezcla optima estara compuesta 0.55 grava  
0.45 arena

#### VOLUMEN DE AGREGADOS

Vagregados =  $1-(Vaire+Vagua+Vcemento)=$  0.663 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

De los cuales:

Volumen de arena= 0.299 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

Volumen de grava= 0.365 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

Para calcular los pesos respectivos, se debe conocer la densidad aparente promedio.

Como las densidades aparentes son similares, tenemos:

$d_{prom.}=$  2280.95 kg/m<sup>3</sup>

Peso seco de la arena ( Wf)= 680.91 kg/m<sup>3</sup>

Peso seco de la grava ( Wg)= 832.22 kg/m<sup>3</sup>

MATERIAL	PESO (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Ajuste por humedad (kg/m <sup>3</sup> )
Aqua	195.00	1	0.195	163.28
Aire	0.00	0	0.015	0.00
Cemento	390.00	3080	0.127	390.00
Grava	832.22	2281	0.365	851.86
Arena	680.91	2281	0.299	741.78
<b>Total</b>	<b>2098.13</b>		<b>1.000</b>	

#### AJUSTES POR HUMEDAD

##### GRAVA

% Humedad en la grava= 2.36 %

#### Peso húmedo de la grava= Mhg

$Mhg= \text{Peso de la grava} \cdot (1+\% \text{ humedad Natural})$

Mhg= 851.86 kg/m<sup>3</sup>

**ARENA****% Humedad en la arena= 8.94 %****Peso húmedo de la arena= Mhf**

Mhf= Peso de la arena\*(1+% humedad Natural)

Mhf= 741.78 kg/m<sup>3</sup>**Exceso o déficit de agua**

GRAVA

Hg 0.0236

Abs.g 0.0390

Por lo tanto

**Necesita agua!!!!!!****Aqua de la grava (Aq)= Peso de la grava\*(humedad natural - la absorción de la grava)**

Aq= -12.82 kg

ARENA

Hf 0.089

Abs.f 0.024

Por lo tanto

**Agua en exceso****Agua de la arena (Af)= Peso de la arena\*(humedad natural - la absorción de la arena)**

Af= 44.53 kg

**Agua total en exceso= Agua de la grava + agua de la arena**

A= 31.72 kg

**Cantidad de agua final para la mezcla= Agua inicial - agua en exceso**Agua final para la mezcla= 163.28 kg/m<sup>3</sup>**MEZCLA DE PRUEBA 0.2535 m<sup>3</sup>**

Agua (añadida) 41392.70 g

Cemento 98865.00 g

Grava (humedad) 215946.84 g

Arena (humedad) 188041.53 g

**TOTAL MEZCLA DE PRUEBA 544246.07 g****ADITIVO % 0.01****MEZCLA DE PRUEBA CON ADITIVO 0.254 m<sup>3</sup>**

Agua (añadida) 40404.05 g 40.40405138 kg

Aditivo 988.65 g 0.98865

Cemento 98865.00 g 98.865

Grava (humedad) 215946.84 g 215.9468429

Arena (humedad) 188041.53 g 188.0415304

**TOTAL MEZCLA DE PRUEBA 544246.07 g 544.2460747**

AGREGADO GRUESO NATURAL REEMPLAZO 20%

**AGR. GRUESO NATURAL 172757.47**

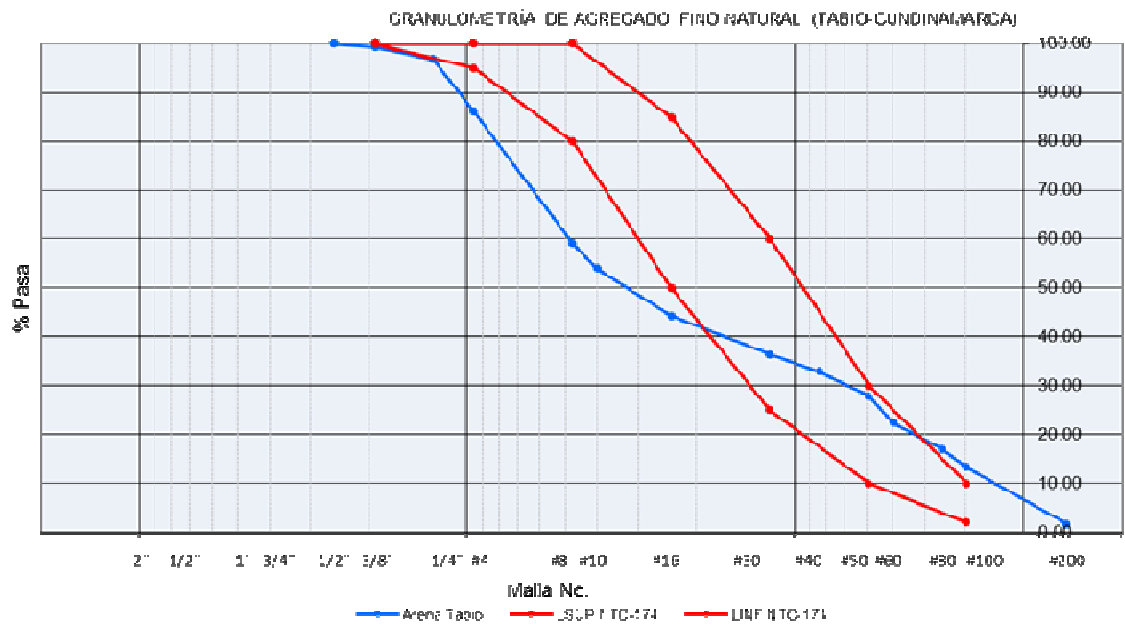
AGR. GRUESO RECICLADO 43189.369

TOTAL 215946.84 0.00

## PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

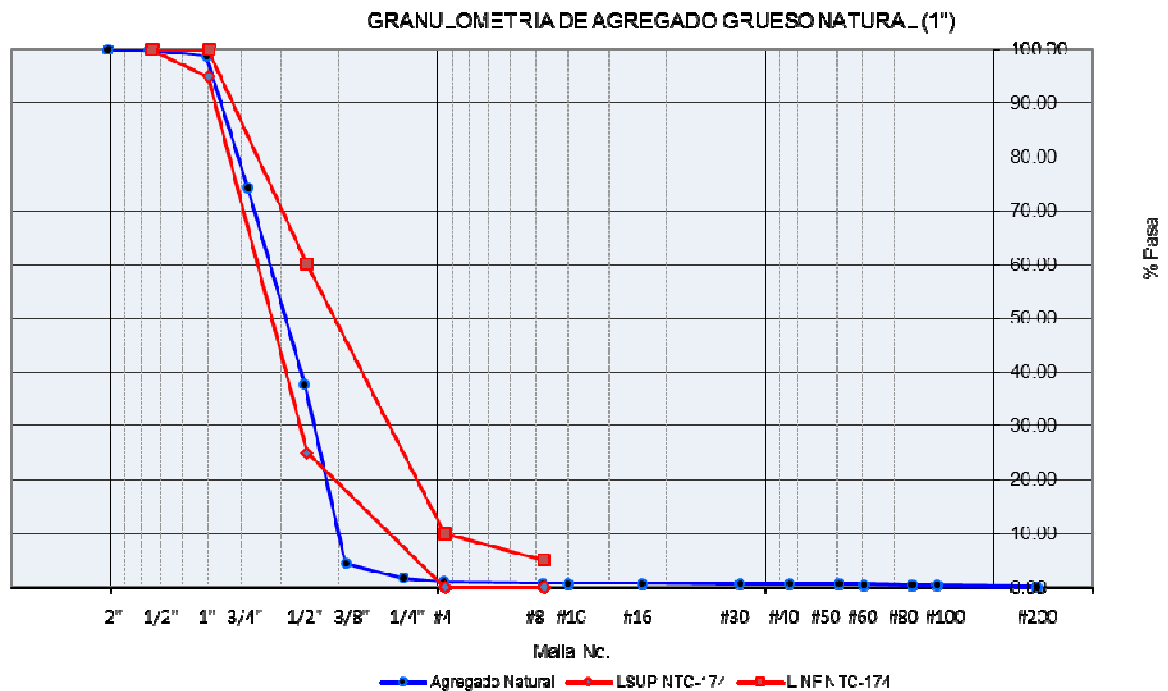
### Agregado fino (Tabio – Cundinamarca)

Densidad Aparente. S:	2.47 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Nominal:	2.63 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Aparente S.S.S.:	2.53 g/cm <sup>3</sup>
Humedad de Absorción:	2.4 %
Masa U. Suelta:	1581 kg/cm <sup>3</sup>
Masa U. Compacta:	1768 kg/cm <sup>3</sup>
Resultado de la Prueba Colorimétrica	4



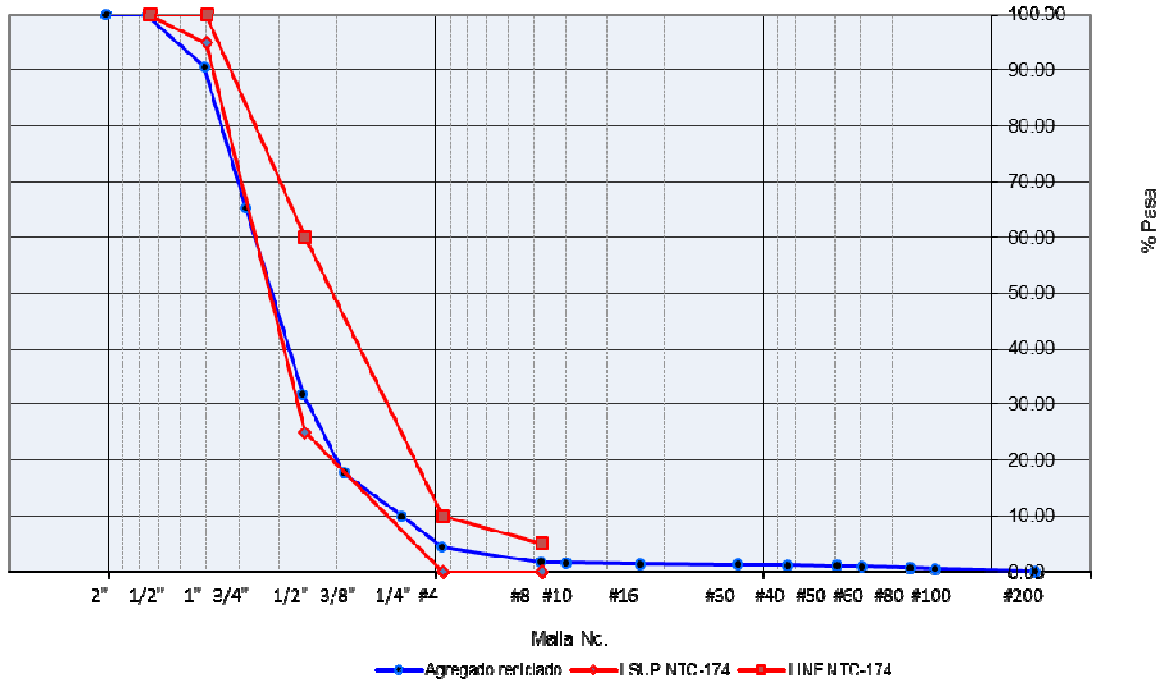
## Agregado grueso

PROPIEDAD FÍSICA	AGREGADO GRUESO	
	Natural	Reciclado
Tamaño Máximo	1½"	1½"
Tamaño Máximo Nominal	1"	1"
Densidad Aparente. S (g/cm <sup>3</sup> )	2.36	2.12
Densidad Nominal (g/cm <sup>3</sup> )	2.60	2.54
Densidad Aparente S.S.S. (g/cm <sup>3</sup> )	2.45	2.29
Humedad de Absorción (%)	3.9	7.8
Masa U. Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1318	1132
Masa U. Compacta (kg/m <sup>3</sup> )	1474	1282
Coefficiente de Forma	0.31	0.24
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%)	30.3	40.5
Ensayo de Micro-Deval (%)	16.5	31.0



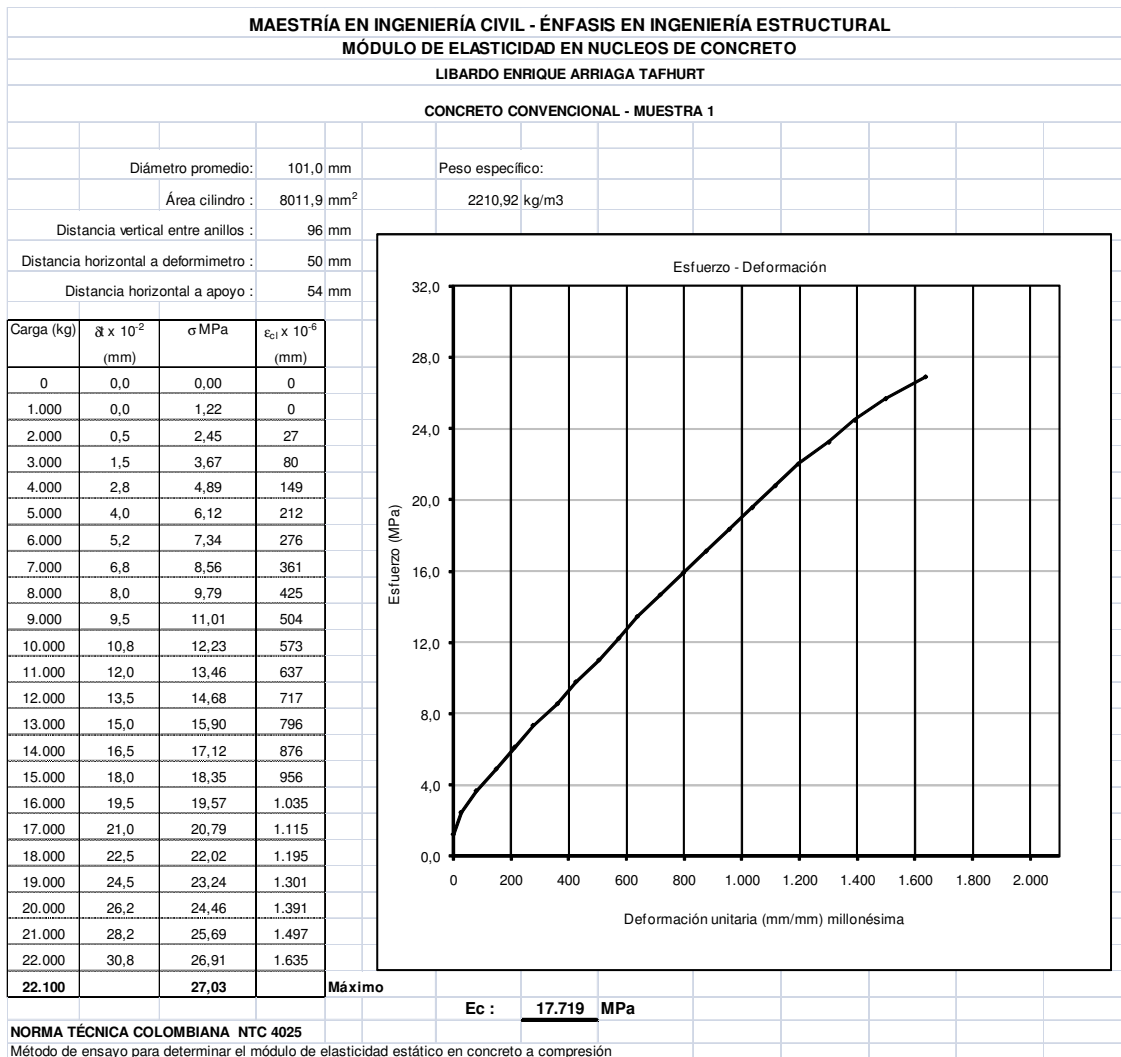


GRANULOMETRIA DE AGREGADO GRUESO RECICLADO (1")



## 12. ANEXOS MÉNSULAS

### ANEXO 1 – Ensayos cilindros de concreto



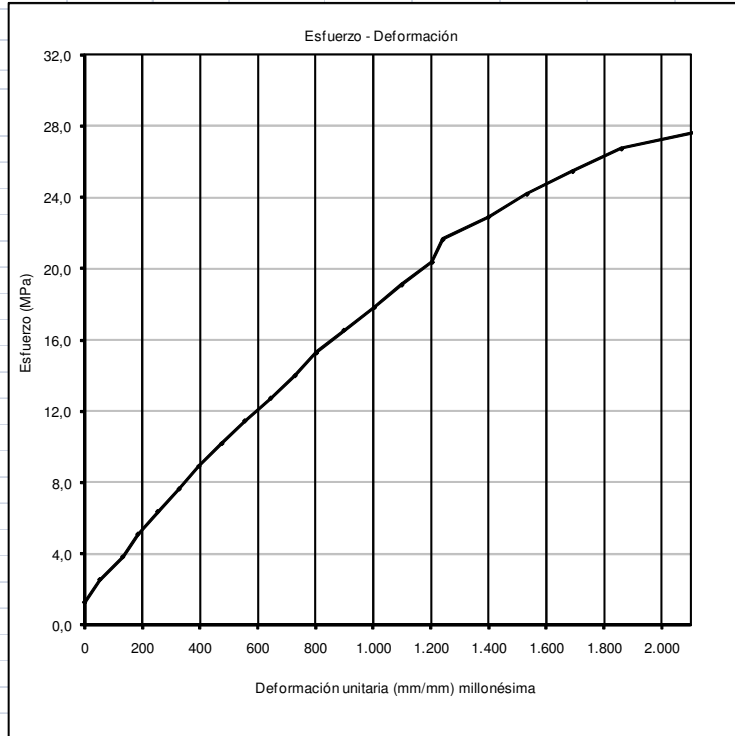
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO CONVENCIONAL - MUESTRA 2**

Diámetro promedio:	99,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro:	7697,7 mm <sup>2</sup>	2297,89 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos:	94,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro:	55,3 mm		
Distancia horizontal a apoyo:	55,0 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{cl} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,27	0
2.000	1,0	2,55	53
3.000	2,5	3,82	132
4.000	3,5	5,09	185
5.000	4,8	6,37	254
6.000	6,2	7,64	328
7.000	7,5	8,91	396
8.000	9,0	10,18	476
9.000	10,5	11,46	555
10.000	12,2	12,73	645
11.000	13,8	14,00	729
12.000	15,2	15,28	803
13.000	17,0	16,55	898
14.000	19,0	17,82	1.004
15.000	20,8	19,10	1.099
16.000	22,8	20,37	1.205
17.000	23,5	21,64	1.242
18.000	26,5	22,92	1.400
19.000	29,0	24,19	1.532
20.000	32,0	25,46	1.691
21.000	35,2	26,74	1.860
22.000	42,0	28,01	2.219
<b>22.200</b>		<b>28,26</b>	



Máximo

Ec : 17.824 MPa

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

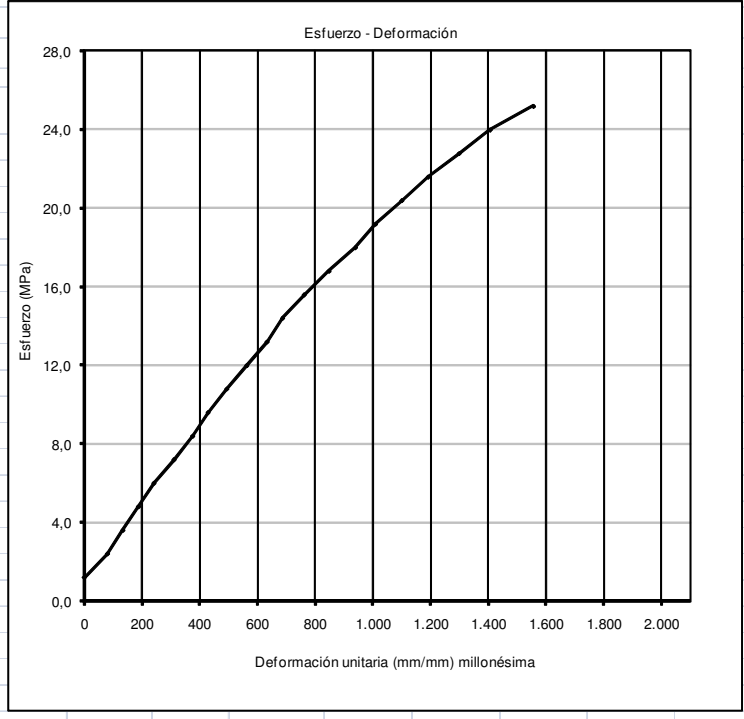
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

CONCRETO CONVENCIONAL - MUESTRA 4

Diámetro promedio:	102,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8171,3 mm <sup>2</sup>	2303,18 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	94,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	51 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	54 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_c \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,20	0
2.000	1,5	2,40	81
3.000	2,5	3,60	134
4.000	3,5	4,80	188
5.000	4,5	6,00	242
6.000	5,8	7,20	311
7.000	7,0	8,40	376
8.000	8,0	9,59	429
9.000	9,2	10,79	494
10.000	10,5	11,99	564
11.000	11,8	13,19	633
12.000	12,8	14,39	687
13.000	14,2	15,59	762
14.000	15,8	16,79	848
15.000	17,5	17,99	939
16.000	18,8	19,19	1.009
17.000	20,5	20,39	1.100
18.000	22,2	21,59	1.192
19.000	24,2	22,79	1.299
20.000	26,2	23,99	1.406
21.000	29,0	25,19	1.557
21.900		26,27	



Máximo

**Ec : 19.987 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

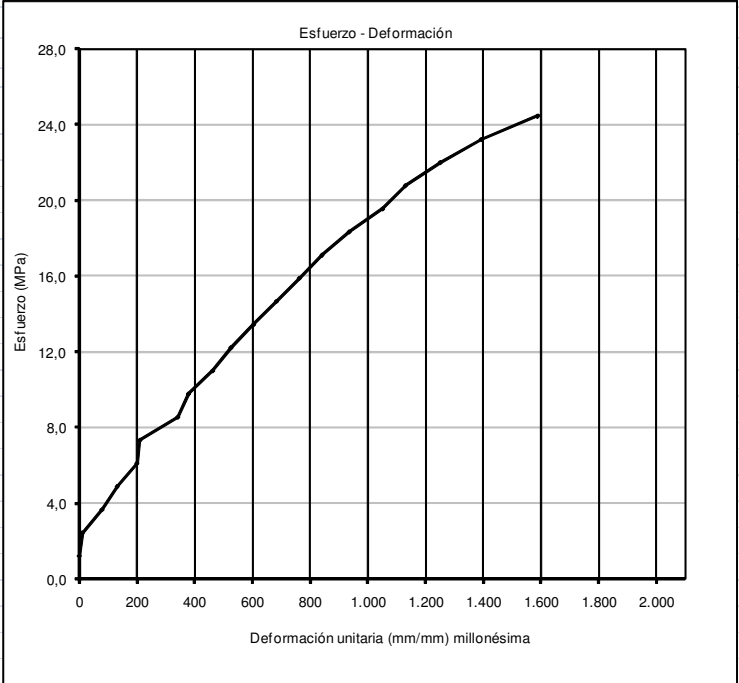
LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 1**

Diámetro promedio:	101,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8011,9 mm <sup>2</sup>	2320,68 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	95 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	53 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	53 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,22	0
2.000	0,2	2,45	11
3.000	1,5	3,67	79
4.000	2,5	4,89	132
5.000	3,8	6,12	200
6.000	4,0	7,34	211
7.000	6,5	8,56	342
8.000	7,2	9,79	379
9.000	8,8	11,01	463
10.000	10,0	12,23	526
11.000	11,5	13,46	605
12.000	13,0	14,68	684
13.000	14,5	15,90	763
14.000	16,0	17,12	842
15.000	17,8	18,35	937
16.000	20,0	19,57	1.053
17.000	21,5	20,79	1.132
18.000	23,8	22,02	1.253
19.000	26,5	23,24	1.395
20.000	30,2	24,46	1.589
<b>20.300</b>		<b>24,83</b>	



Máximo **Ec : 19.998 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

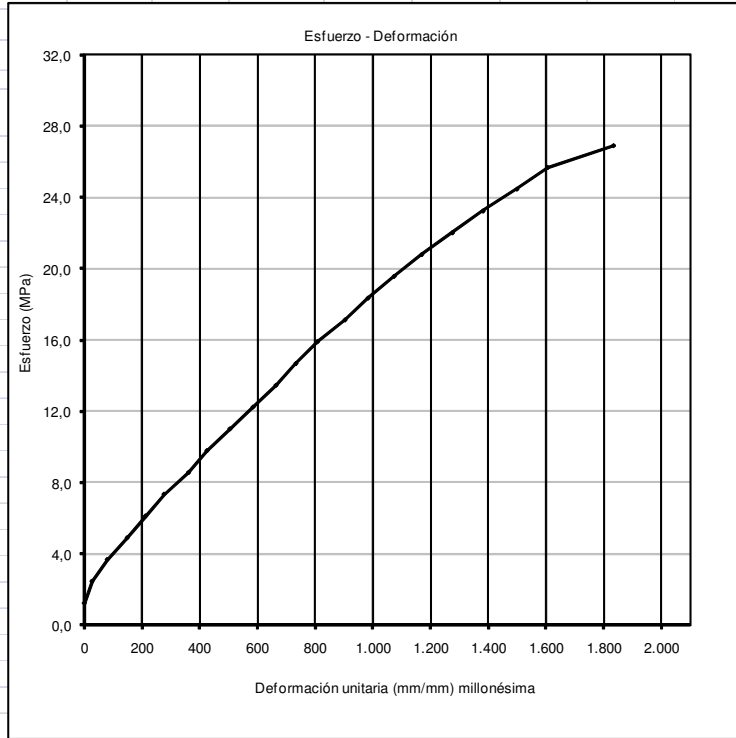
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 2**

Diámetro promedio:	101,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8011,9 mm <sup>2</sup>	2303,80 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	94,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	52 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	53 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,22	0
2.000	0,5	2,45	27
3.000	1,5	3,67	80
4.000	2,8	4,89	149
5.000	4,0	6,12	213
6.000	5,2	7,34	276
7.000	6,8	8,56	362
8.000	8,0	9,79	425
9.000	9,5	11,01	505
10.000	11,0	12,23	585
11.000	12,5	13,46	665
12.000	13,8	14,68	734
13.000	15,2	15,90	808
14.000	17,0	17,12	904
15.000	18,5	18,35	984
16.000	20,2	19,57	1.074
17.000	22,0	20,79	1.170
18.000	24,0	22,02	1.276
19.000	26,0	23,24	1.382
20.000	28,2	24,46	1.499
21.000	30,2	25,69	1.606
22.000	34,5	26,91	1.834
<b>22.800</b>		<b>27,89</b>	



Máximo

**Ec : 17.584 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

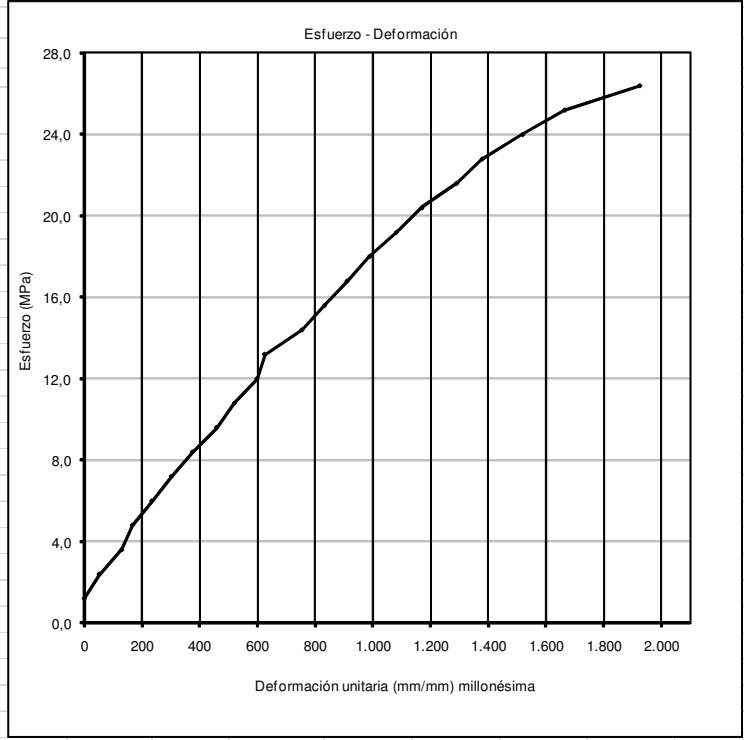
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 3**

Diámetro promedio:	102,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8171,3 mm <sup>2</sup>	2103,36 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	96,5 mm		
Distancia horizontal a deformimetro :	52 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	53 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,20	0
2.000	1,0	2,40	52
3.000	2,5	3,60	130
4.000	3,2	4,80	167
5.000	4,5	6,00	234
6.000	5,8	7,20	302
7.000	7,2	8,40	375
8.000	8,8	9,59	458
9.000	10,0	10,79	521
10.000	11,5	11,99	599
11.000	12,0	13,19	625
12.000	14,5	14,39	755
13.000	16,0	15,59	833
14.000	17,5	16,79	911
15.000	19,0	17,99	989
16.000	20,8	19,19	1.083
17.000	22,5	20,39	1.171
18.000	24,8	21,59	1.291
19.000	26,5	22,79	1.380
20.000	29,2	23,99	1.520
21.000	32,0	25,19	1.666
22.000	37,0	26,39	1.926
<b>22.000</b>		<b>26,39</b>	



Máximo **Ec : 17.905 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**

Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión

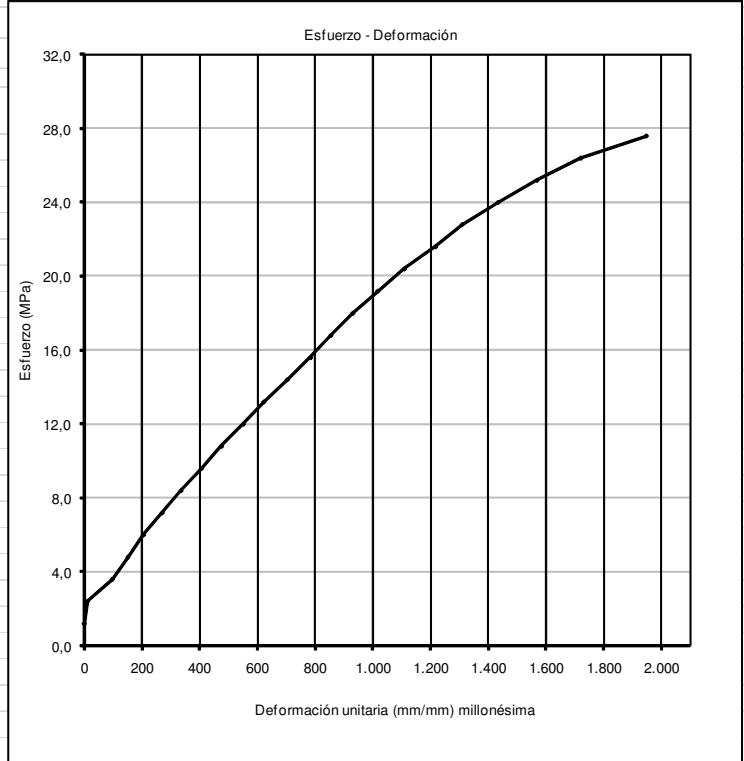
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD EN NUCLEOS DE CONCRETO**

LIBARDO ENRIQUE ARRIAGA TAFHURT

**CONCRETO RECICLADO - MUESTRA 4**

Diámetro promedio:	102,0 mm	Peso específico:	
Área cilindro :	8171,3 mm <sup>2</sup>	2110,74 kg/m <sup>3</sup>	
Distancia vertical entre anillos :	92 mm		
Distancia horizontal a deformímetro :	51 mm		
Distancia horizontal a apoyo :	50 mm		

Carga (kg)	$\delta \times 10^{-2}$ (mm)	$\sigma$ MPa	$\epsilon_{ci} \times 10^{-6}$ (mm)
0	0,0	0,00	0
1.000	0,0	1,20	0
2.000	0,2	2,40	11
3.000	1,8	3,60	97
4.000	2,8	4,80	151
5.000	3,8	6,00	206
6.000	5,0	7,20	270
7.000	6,2	8,40	335
8.000	7,5	9,59	406
9.000	8,8	10,79	476
10.000	10,2	11,99	552
11.000	11,5	13,19	622
12.000	13,0	14,39	703
13.000	14,5	15,59	784
14.000	15,8	16,79	854
15.000	17,2	17,99	930
16.000	18,8	19,19	1.017
17.000	20,5	20,39	1.109
18.000	22,5	21,59	1.217
19.000	24,2	22,79	1.309
20.000	26,5	23,99	1.433
21.000	29,0	25,19	1.568
22.000	31,8	26,39	1.720
23.000	36,0	27,58	1.947
<b>23.000</b>		<b>27,58</b>	



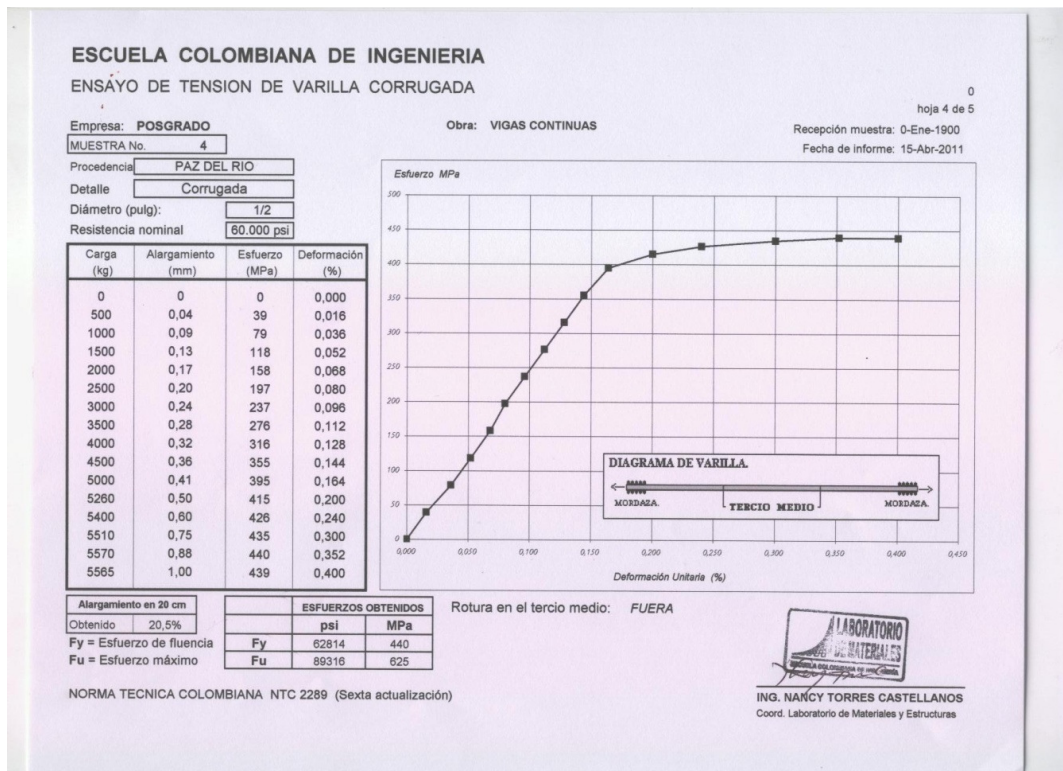
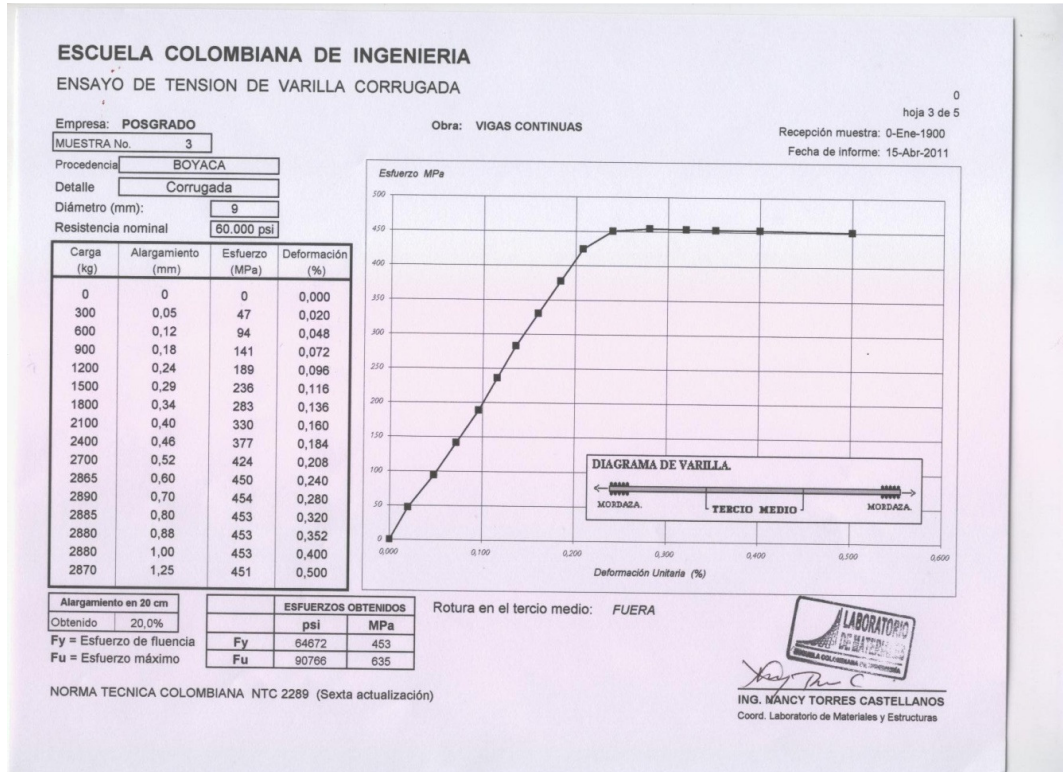
Máximo

**Ec : 18.347 MPa**

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4025**  
 Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático en concreto a compresión



## ANEXO 2 – Ensayos refuerzo



# ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

## ENSAÑO DE TENSION DE VARILLA CORRUGADA

0

hoja 5 de 5

Empresa: **POSGRADO**

Obra: **VIGAS CONTINUAS**

Recepción muestra: 0-Ene-1900

MUESTRA No. **5**

Fecha de informe: 15-Abr-2011

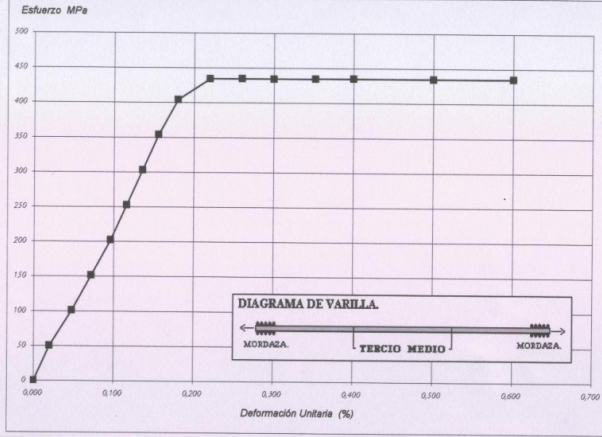
Procedencia: **SIDENAL**

Detalle: **Corrugada**

Diámetro (pulg): **5/8**

Resistencia nominal: **60.000 psi**

Carga (kg)	Alargamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)
0	0	0	0,000
1000	0,05	51	0,020
2000	0,12	101	0,048
3000	0,18	152	0,072
4000	0,24	202	0,096
5000	0,29	253	0,116
6000	0,34	303	0,136
7000	0,39	354	0,156
8000	0,45	404	0,180
8600	0,55	434	0,220
8605	0,65	435	0,260
8600	0,75	434	0,300
8605	0,88	435	0,352
8610	1,00	435	0,400
8605	1,25	435	0,500
8615	1,50	435	0,600



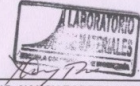
Alargamiento en 20 cm	
Obtenido	20,5%

Fy = Esfuerzo de fluencia

Fu = Esfuerzo máximo

ESFUERZOS OBTENIDOS		
	psi	MPa
Fy	62106	435
Fu	94260	660

Rotura en el tercio medio: **FUERA**



ING. NANCY TORRES CASTELLANOS  
Coord. Laboratorio de Materiales y Estructuras

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 2289 (Sexta actualización)

### ANEXO 3 – Datos ensayos

DATOS LABORATORIO		
MENSULA	TIPO DE CONCRETO RECICLADO	
	REFUERZO TIPO 1	
CARGA	DEF (mm x10 <sup>2</sup> )	MESA (mm)
300	0,0	0,000
4.000	12,0	0,388
8.000	16,5	0,658
12.000	20,0	1,004
16.000	23,0	1,372
<b>CARGA MAX</b>	<b>16140,00 kg</b>	

DATOS LABORATORIO		
MENSULA	TIPO DE CONCRETO RECICLADO	
	REFUERZO TIPO 2	
CARGA	DEF (mm x10 <sup>2</sup> )	MESA (mm)
300	0,0	0,000
2.000	9,5	0,184
4.000	18,0	0,344
6.000	24,5	0,472
8.000	35,0	0,636
10.000	46,5	0,856
12.000	55,0	1,054
14.000	59,0	1,266
16.000	64,5	1,458
18.000	68,5	1,640
20.000	72,5	1,838
22.000	75,5	2,008
<b>CARGA MAX</b>	<b>22.320,00 kg</b>	

DATOS LABORATORIO		
MENSULA	TIPO DE CONCRETO CONVENCIONAL REFUERZO TIPO 1	
CARGA	DEF (mm x10 <sup>2</sup> )	MESA (mm)
0	0,0	0,000
2.000	7,5	0,236
4.000	13,0	0,408
6.000	13,0	0,586
8.000	20,0	0,746
10.000	21,5	0,898
12.000	22,5	1,054
14.000	22,5	1,248
16.000	22,5	1,392
18.000	31,0	1,544
20.000	32,5	1,736
20.000	32,0	1,920
22.000	32,5	2,154
24.000	No se tomo lectura	
21.300	32,0	2,510
22.000	32,0	2,592
23.000	32,0	2,752
24.000	33,0	2,992
<b>CARGA MAX</b>	<b>24.870,00 kg</b>	

DATOS LABORATORIO		
MENSULA	TIPO DE CONCRETO CONVENCIONAL REFUERZO TIPO 2	
CARGA	DEF (mm x10 <sup>2</sup> )	MESA (mm)
300	0,0	0,000
2.000	4,0	0,200
4.000	16,5	0,418
6.000	25,0	0,620
8.000	30,5	0,784
10.000	34,0	0,942
12.000	37,5	1,120
14.000	40,0	1,284
16.000	42,0	1,444
18.000	44,0	1,610
20.000	46,0	1,782
19.500	48,0	2,180
20.000	48,5	2,230
21.000	48,5	2,330
22.000	49,0	2,460
23.000	50,0	2,638
<b>CARGA MAX</b>	<b>23.620,00 kg</b>	

## ANEXO 4 – Registro fotográfico

### Proceso Constructivo



Alistamiento de formaleta



Armadura de refuerzo tipo 1



Armadura de refuerzo tipo 2



Colocación de armadura y vaciado concreto



Vibración del concreto



Acabado de superficies



Cilindros de testigo (CR)



Asentamiento 6,8 cm (CR)





Asentamiento 6,0 cm (CC)

Acciones previas al ensayo



Transporte de ménsulas



Montaje e instrumentación

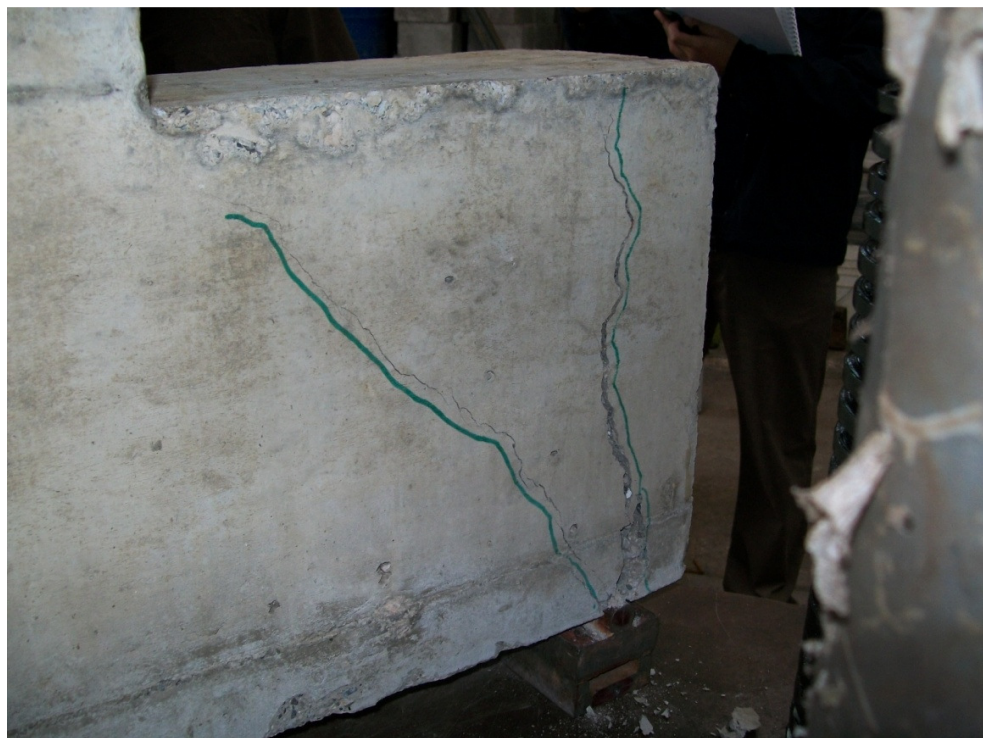


Maquina Universal de Ensayos (medición)

Ensayo No. 1 Ménsula Tipo 1 CR



Mecanismo de falla cara 1



Mecanismo de falla cara 2



Verificación refuerzo

Ensayo No. 2 Ménsula Tipo 2 CR



Mecanismo de falla cara 1



Mecanismo de falla cara 2



Exploración acero de refuerzo

Ensayo No. 3 Ménsula Tipo 2 CC



Mecanismo de falla cara 1



Mecanismo de falla cara 2



Verificación acero de refuerzo

Ensayo No. 4 Viga Alta Tipo 1 CC



Mecanismo de falla cara 1



Mecanismo de falla cara 2



Verificación acero de refuerzo



## ANEXO 5 – Diseños de mezclas y propiedades de los agregados

### MEZCLA 0% DE REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO - MÉNSULAS Y VIGAS ALTAS

FECHA  
 RELACION AGUA/CEMENTO 0.5  
 METODO RNL

#### DATOS PREVIOS

##### CEMENTO

Densidad 3080 kg/m<sup>3</sup>

##### AGREGADO GRUESO

Tamaño Máximo Nominal TMN 25.4 mm  
 Masa Unitaria Compacta MUC 1282.2 kg/m<sup>3</sup>  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1132.1 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente (dg) 2123 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción (Abs.g) 3.90% 0.0390  
 Origen aluvial Angular

##### AGREGADO FINO

Módulo de Finura 3.72  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1581.3 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente 2474 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción 2.40% 0.024  
 Ensayo Colorimétrico No. 4  
 Origen aluvial Forma TRITURADO

##### AGUA

Volumen 0.195 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

##### CONTENIDO DE AIRE

0.015 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

##### ADITIVOS

##### ASENTAMIENTO

7.5 cm

VOLUMEN DE MEZCLA 0.1950 m<sup>3</sup>

VOLUMEN TOTAL MEZCLA (30%) 0.2535 m<sup>3</sup>

#### CÁLCULOS

##### Peso de cemento por metro cúbico de concreto

( $r=a/c$ ) ; ( $c=a/r$ )

r= 0.5  
 Agua (a)= 195 kg/m<sup>3</sup>  
 cemento (c)= 390 kg/m<sup>3</sup>

##### Volumen de cemento por metro cúbico de concreto (V<sub>c</sub>)

V<sub>c</sub>=c/densidad cemento 0.127 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

De la grafica de optimizacion de granulometrias, se tiene:

La mezcla optima estara compuesta 0.55 grava  
 0.45 arena

**VOLUMEN DE AGREGADOS**

Vagregados =  $1 - (V_{aire} + V_{agua} + V_{cemento}) = 0.663 \text{ m}^3/\text{m}^3$

De los cuales:

Volumen de arena =  $0.299 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Volumen de grava =  $0.365 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Para calcular los pesos respectivos, se debe conocer la densidad aparente promedio.

Como las densidades aparentes son similares, tenemos:

$d_{prom.} = 2280.95 \text{ kg}/\text{m}^3$

Peso seco de la arena ( $W_f$ ) =  $680.91 \text{ kg}/\text{m}^3$

Peso seco de la grava ( $W_g$ ) =  $832.22 \text{ kg}/\text{m}^3$

MATERIAL	PESO ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Densidad Aparente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Volumen ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	Ajuste por humedad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Aqua	195.00	1	0.195	163.28
Aire	0.00	0	0.015	0.00
Cemento	390.00	3080	0.127	390.00
Grava	832.22	2281	0.365	851.86
Arena	680.91	2281	0.299	741.78
<b>Total</b>	<b>2098.13</b>		<b>1.000</b>	

**AJUSTES POR HUMEDAD**

**GRAVA**

% Humedad en la grava = **2.36** %

**Peso húmedo de la grava =  $M_{hg}$**

$M_{hg} = \text{Peso de la grava} * (1 + \% \text{ humedad Natural})$

$M_{hg} = 851.86 \text{ kg}/\text{m}^3$

**ARENA**

% Humedad en la arena = **8.94** %

**Peso húmedo de la arena =  $M_{hf}$**

$M_{hf} = \text{Peso de la arena} * (1 + \% \text{ humedad Natural})$

$M_{hf} = 741.78 \text{ kg}/\text{m}^3$

**Exceso o déficit de agua**

**GRAVA**

$H_g = 0.0236$

$Abs.g = 0.0390$

Por lo tanto

**Necesita agua!!!!!!**

**Aqua de la grava ( $A_g$ ) =  $\text{Peso de la grava} * (\text{humedad natural} - \text{la absorción de la grava})$**

$A_g = -12.82 \text{ kg}$

**ARENA**

$H_f = 0.089$

$Abs.f = 0.024$

Por lo tanto

**Agua en exceso**

**Aqua de la arena ( $A_f$ ) =  $\text{Peso de la arena} * (\text{humedad natural} - \text{la absorción de la arena})$**

$A_f = 44.53 \text{ kg}$

Agua total en exceso= Agua de la grava + agua de la arena

A= 31.72 kg

Cantidad de agua final para la mezcla= Agua inicial - agua en exceso

Agua final para la mezcla= 163.28 kg/m<sup>3</sup>

<b>MEZCLA DE PRUEBA</b>	0.2535 m <sup>3</sup>
Agua (añadida)	41392.70 q
Cemento	98865.00 q
Grava (húmedad)	215946.84 q
Arena (húmedad)	188041.53 q
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>544246.07 g</b>

**ADITIVO** % 0.013  
**MEZCLA DE PRUEBA CON ADITIVO** 0.254 m<sup>3</sup>

		kg
Agua (añadida)	40107.46 g	40.10745638
Aditivo	1285.25 g	1.285245
Cemento	98865.00 g	98.865
Grava (húmedad)	215946.84 g	215.9468429
Arena (húmedad)	188041.53 g	188.0415304
<b>TOTAL MEZCLA DE PRUEBA</b>	<b>544246.07 g</b>	<b>544.2460747</b>

AGREGADO GRUESO NATURAL REEMPLAZO 0%

**AGR. GRUESO NATURAL** 215946.84  
 AGR. GRUESO RECICLADO 0

TOTAL 215946.84 0.00

**MEZCLA 20% DE REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO - MÉNSULAS Y VIGAS ALTAS**

FECHA  
 RELACION AGUA/CEMENTO 0.5  
 METODO RNL

**DATOS PREVIOS**

**CEMENTO**

Densidad 3080 kg/m<sup>3</sup>

**AGREGADO GRUESO**

Tamaño Máximo Nominal TMN 25.4 mm  
 Masa Unitaria Compacta MUC 1282.2 kg/m<sup>3</sup>  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1132.1 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente (dg) 2123 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción (Abs.g) 3.90% 0.0390  
 Origen aluvial Angular

**AGREGADO FINO**

Módulo de Finura 3.72  
 Masa Unitaria Suelta MUS 1581.3 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad Aparente 2474 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción 2.40% 0.024  
 Ensayo Colorimétrico No. 4  
 Origen aluvial Forma TRITURADO

<b>AGUA</b>	
Volumen	0.195 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<b>CONTENIDO DE AIRE</b>	0.015 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<b>ADITIVOS</b>	
<b>ASENTAMIENTO</b>	7.5 cm
<b>VOLUMEN DE MEZCLA</b>	0.1950 m <sup>3</sup>
<b>VOLUMEN TOTAL MEZCLA (30%)</b>	0.2535 m <sup>3</sup>

### CÁLCULOS

#### Peso de cemento por metro cúbico de concreto

( $r=a/c$ ) ; ( $c=a/r$ )

$r=$	0.5
Agua (a)=	195 kg/m <sup>3</sup>
cemento ( c)=	390 kg/m <sup>3</sup>

#### Volumen de cemento por metro cúbico de concreto (Vc)

$Vc=c/\text{densidad cemento}$  0.127 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

De la grafica de optimizacion de granulometrias, se tiene:

La mezcla optima estara compuesta 0.55 grava  
0.45 arena

#### VOLUMEN DE AGREGADOS

Vagregados =  $1-(Vaire+Vagua+Vcemento)=$  0.663 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

De los cuales:

Volumen de arena= 0.299 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

Volumen de grava= 0.365 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

Para calcular los pesos respectivos, se debe conocer la densidad aparente promedio.

Como las densidades aparentes son similares, tenemos:

$d_{prom.}=$  2280.95 kg/m<sup>3</sup>

Peso seco de la arena ( Wf)= 680.91 kg/m<sup>3</sup>

Peso seco de la grava ( Wg)= 832.22 kg/m<sup>3</sup>

MATERIAL	PESO (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Ajuste por humedad (kg/m <sup>3</sup> )
Aqua	195.00	1	0.195	163.28
Aire	0.00	0	0.015	0.00
Cemento	390.00	3080	0.127	390.00
Grava	832.22	2281	0.365	851.86
Arena	680.91	2281	0.299	741.78
<b>Total</b>	<b>2098.13</b>		<b>1.000</b>	

#### AJUSTES POR HUMEDAD

##### GRAVA

% Humedad en la grava= 2.36 %

Peso húmedo de la grava= Mhg

Mhg= Peso de la grava\*(1+% humedad Natural)

Mhg= 851.86 kg/m<sup>3</sup>

**ARENA****% Humedad en la arena= 8.94 %****Peso húmedo de la arena= Mhf**

Mhf= Peso de la arena\*(1+% humedad Natural)

Mhf= 741.78 kg/m<sup>3</sup>**Exceso o déficit de agua****GRAVA**

Hg 0.0236

Abs.g 0.0390

Por lo tanto

**Necesita agua!!!!!!****Agua de la grava (Ag)= Peso de la grava\*(humedad natural - la absorción de la grava)**

Ag= -12.82 kg

**ARENA**

Hf 0.089

Abs.f 0.024

Por lo tanto

**Agua en exceso****Agua de la arena (Af)= Peso de la arena\*(humedad natural - la absorción de la arena)**

Af= 44.53 kg

**Agua total en exceso= Agua de la grava + agua de la arena**

A= 31.72 kg

**Cantidad de agua final para la mezcla= Agua inicial - agua en exceso**Agua final para la mezcla= 163.28 kg/m<sup>3</sup>**MEZCLA DE PRUEBA 0.2535 m<sup>3</sup>**

Agua (añadida) 41392.70 g

Cemento 98865.00 g

Grava (humedad) 215946.84 g

Arena (humedad) 188041.53 g

**TOTAL MEZCLA DE PRUEBA 544246.07 g****ADITIVO % 0.01****MEZCLA DE PRUEBA CON ADITIVO 0.254 m<sup>3</sup>**

Agua (añadida) 40404.05 g 40.40405138 kg

Aditivo 988.65 g 0.98865

Cemento 98865.00 g 98.865

Grava (humedad) 215946.84 g 215.9468429

Arena (humedad) 188041.53 g 188.0415304

**TOTAL MEZCLA DE PRUEBA 544246.07 g 544.2460747**

AGREGADO GRUESO NATURAL REEMPLAZO 20%

**AGR. GRUESO NATURAL 172757.47**

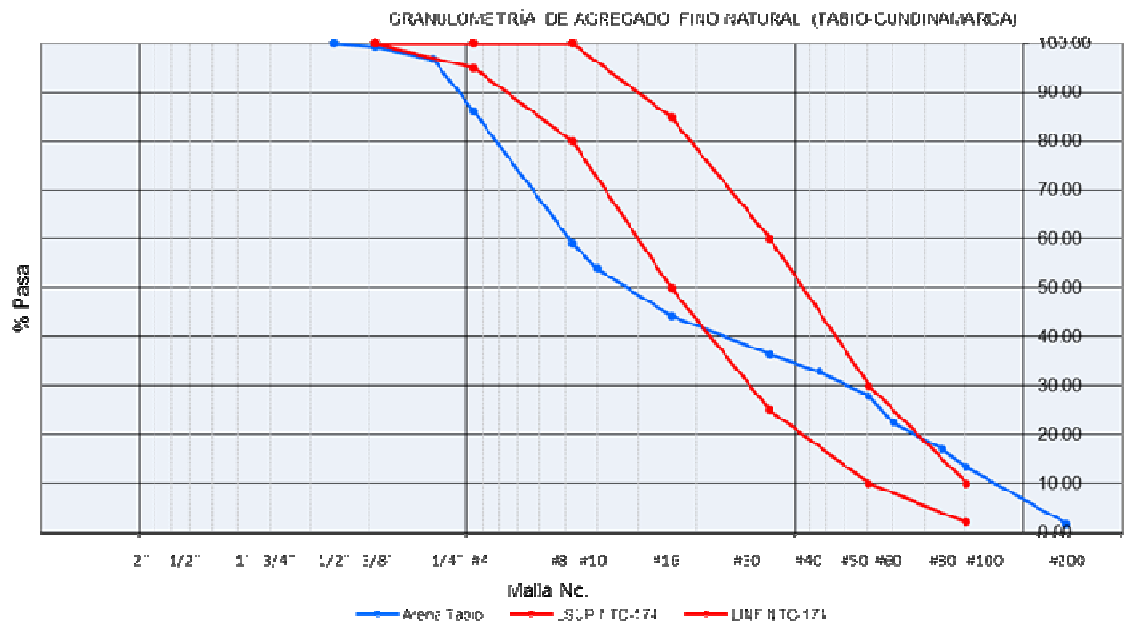
AGR. GRUESO RECICLADO 43189.369

TOTAL 215946.84 0.00

## PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

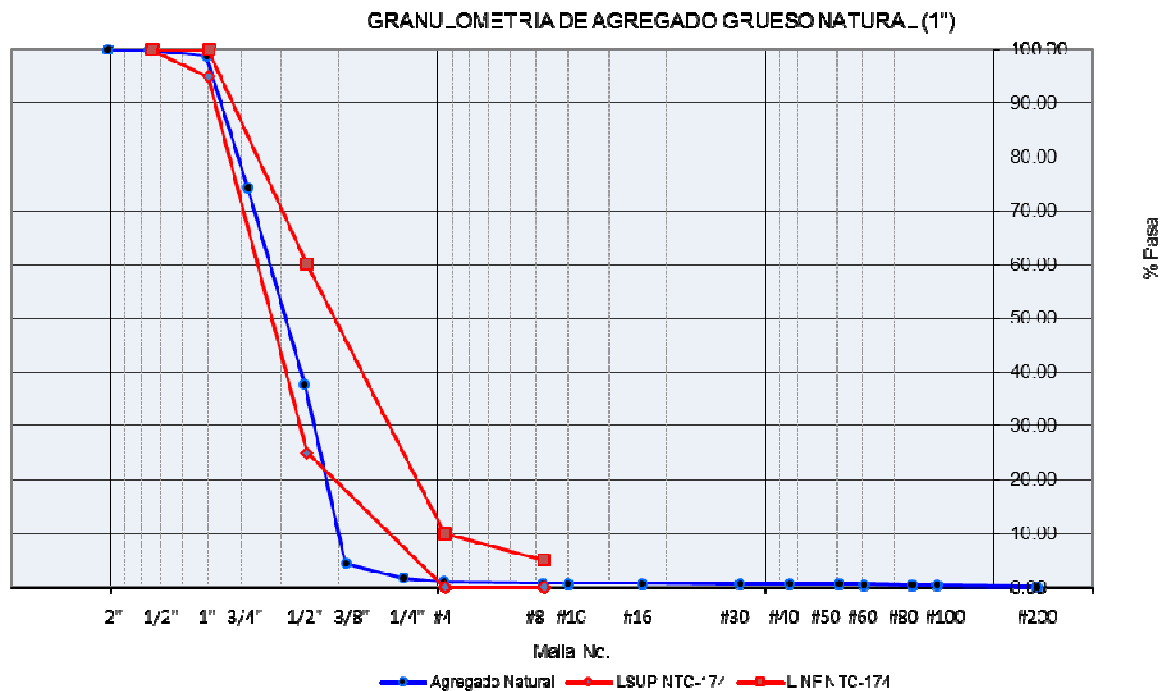
### Agregado fino (Tabio – Cundinamarca)

Densidad Aparente. S:	2.47 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Nominal:	2.63 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Aparente S.S.S.:	2.53 g/cm <sup>3</sup>
Humedad de Absorción:	2.4 %
Masa U. Suelta:	1581 kg/cm <sup>3</sup>
Masa U. Compacta:	1768 kg/cm <sup>3</sup>
Resultado de la Prueba Colorimétrica	4

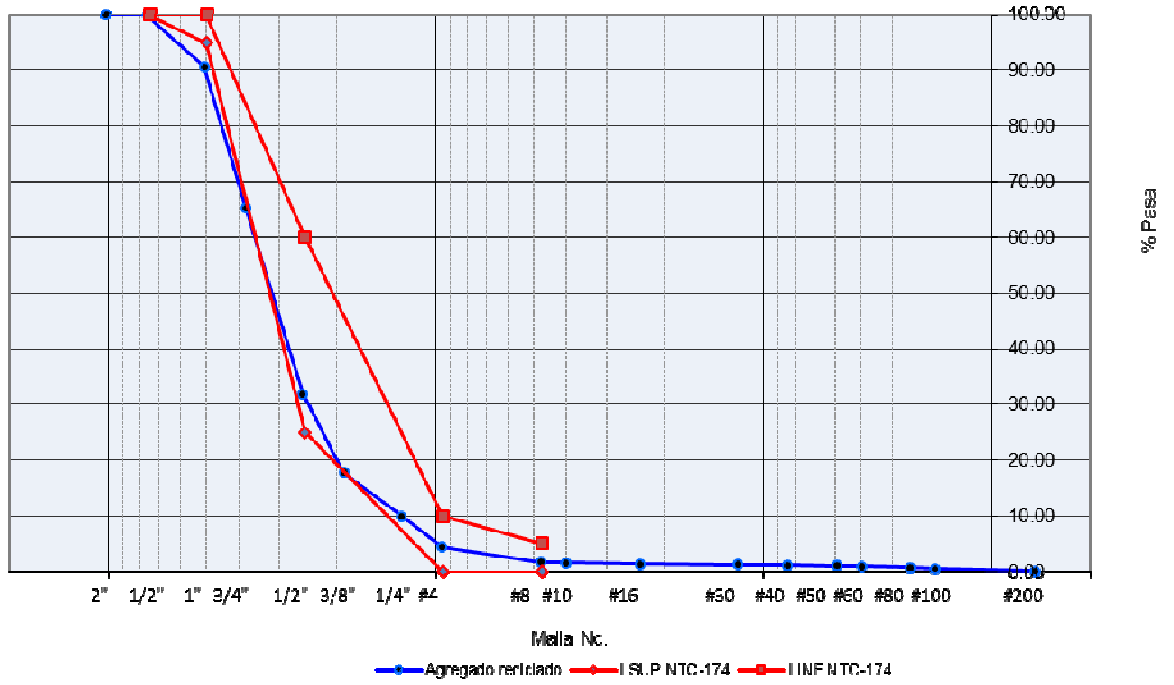


## Agregado grueso

PROPIEDAD FÍSICA	AGREGADO GRUESO	
	Natural	Reciclado
Tamaño Máximo	1½"	1½"
Tamaño Máximo Nominal	1"	1"
Densidad Aparente. S (g/cm <sup>3</sup> )	2.36	2.12
Densidad Nominal (g/cm <sup>3</sup> )	2.60	2.54
Densidad Aparente S.S.S. (g/cm <sup>3</sup> )	2.45	2.29
Humedad de Absorción (%)	3.9	7.8
Masa U. Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1318	1132
Masa U. Compacta (kg/m <sup>3</sup> )	1474	1282
Coefficiente de Forma	0.31	0.24
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%)	30.3	40.5
Ensayo de Micro-Deval (%)	16.5	31.0



GRANULOMETRIA DE AGREGADO GRUESO RECICLADO (1")





### 13. ANEXOS GENERALES

Autor	% sustitución AG	% pérdida resistencia	Áridos (mm): AF / AG <sup>(*)</sup>
Wainwright 1993 <sup>[6.1]</sup>	100	10-20	-
Kobayashi 1988 <sup>[6.2]</sup>	100	15 -20	MF=2,5
Kakizaki 1988 <sup>[6.3]</sup>	100	14	0-4 (MF=3,4) / 5-25 (MF=6,2)
Ravindrarajah 1988 <sup>[6.4]</sup>	100	25	0-5 / 5-19
Ikeda 1988 <sup>[6.5]</sup>	100	8	MF=3,6 / MF=7,5
Kasai 1988 <sup>[6.6]</sup>	100	15	0-5 (MF=2,8) / 5-20 (MF=6,6)
Nishibayashi 1988 <sup>[6.7]</sup>	100	15-30	0-5 / 5-30
Fujii 1988 <sup>[6.8]</sup>	100	5-10	MF= 3,0 / MF=6,8
Hendriks 1998 <sup>[6.9]</sup>	100	10	0-4 / 4-32
Teranishi 1998 <sup>[6.10]</sup>	100	10	0-5 / 5-20
Di Niro 1998 <sup>[6.11]</sup>	100	20	-
	50	15	
	30	4	
Frondistou-Yannas 1977 <sup>[6.12]</sup>	100	4-14	MF=2,8 / 4,75-19 (MF=7,0)
Schulz 1986 <sup>[6.13]</sup>	100	10-25	0-4 /
González Fonteboa <sup>[6.14]</sup>	50	< 1	0-4 / 4-25
Parra y Castilla <sup>[6.15]</sup>	50	18% a 7 días 12% a 28 días 10% a 60 días 8% a 90 días	0-4 / 4-20
CEDEX <sup>[6.16]</sup>	20-50% 100%	Valor medio	0-4 / 4-16
		Rango	
		7%      2-15% 13%     10-16%	

En algunos casos las fuentes consultadas sólo proporcionan el valor del Módulo de Finura

**Tabla 6.1: Porcentajes de pérdida de resistencia en los hormigones con áridos reciclados (con sustituciones de la fracción gruesa (AG)) según diversos autores**

Autor	% sustitución	% caída de módulo
Kakizaki 1988 <sup>[6.3]</sup>	AG, AG+AF	25-40
Ravindrarajah 1988 <sup>[6.4]</sup>	100% AG	30
	100% AF+0% AG	20
	100% AF+100% AG	35
Ikeda 1988 <sup>[6.5]</sup>	100% AG	30-50
Nishibayashi 1988 <sup>[6.7]</sup>	100% AG	15-35
Hendriks 1998 <sup>[6.9]</sup>	100% AG +100% AF	10-30
Frondistou-Yannas 1977 <sup>[6.12]</sup>	100% AG	10-40
Schulz 1986 <sup>[6.13]</sup>	100% AG	15-35
González Fonteboa 2002 <sup>[6.14]</sup>	50% AG	11
CEDEX 2005 <sup>[6.16]</sup> (árido saturado)	20% AG	10
	50% AG	20
	100% AG	40
Maultzsth 1998 <sup>[6.19]</sup>	100%	10-25
Merlet 1993 <sup>[6.21]</sup>	100% AF +100% AG	25
Etxeberria 2004 <sup>[6.25]</sup>	25% AG	0
	100% AG	11-15
Topcu 1995 <sup>[6.29]</sup>	100% AG+100% AF	80
Mulheron 1988 <sup>[6.35]</sup>	--	16-20
Kikuchi 1998 <sup>[6.36]</sup>	100%AG	5-20
Hansen 1992 <sup>[6.37]</sup>	100% AG	15-50
Ravindrarajah 1987 <sup>[6.38]</sup>	100% AG	12-15
	100% AG+100% AF	26-28

**Tabla 6.9: Porcentajes de caída en el módulo de elasticidad en los hormigones reciclados (con sustituciones en cualquiera de las fracciones) según diversos autores**

AUTOR	COMENTARIOS	% de aumento de la Fluencia
Nishibayashi 1988 <sup>[6.7]</sup> (gráfica 6.17)	100% AGR a 400 días, Cemento:	
	250 kg/m <sup>3</sup>	30%
	350 kg/m <sup>3</sup>	50%
	450 kg/m <sup>3</sup>	50%
Hendriks 1998 <sup>[6.9]</sup>	-	15-40%
Schulz 1986 <sup>[6.13]</sup>	-	50%
Ravindrarajah 1987 <sup>[6.38]</sup>	100% AG	30% a 60%
Limbachiya 2000 <sup>[6.43]</sup>	Resistencia 50-60 N/mm <sup>2</sup>	
	100% AG	65%;33%
	50% AG	15%;22%
	30% AG	1%;2%
Gómez Soberón 2002 <sup>[6.44]</sup>	100% AG	30%

**Tabla 6.13: Porcentajes de aumento de la fluencia en los hormigones reciclados según diversos autores**

REFERENCIA	% sustitución	% de variación de resistencia a tracción
Ikeda et al <sup>[6.5]</sup>	100% AG	-6 %
	100% AG + 50% AF	-21%
Hendriks et al <sup>[6.9]</sup>		Diferencias despreciables
Di Niro <sup>[6.11]</sup>	100 % AG	-32%; -31%
	70 % AG	-27%
	30% AG	-3%
	50% AG	-3,2%
González Fonteboa <sup>[6.14]</sup>	50 % AG	+1; -2%
CEDEX <sup>[6.16]</sup>	20% AG	-2%
	100% AG	-10%
Etxeberria <sup>[6.25]</sup>	25 % AG	Diferencias despreciables
	50 % AG	
	100 % AG	
Hansen et al <sup>[6.37]</sup>	100% AG + 100% AF	-20,-30 %
Ravindrarajah <sup>[6.38]</sup> H.O (26,5-27,5-20 N/mm <sup>2</sup> )	100 % AG	+6% -2% +6%
	100 % AG	-7% +4% -4%
	100 % AG	-8% -3% +13%
Gomez <sup>[6.44]</sup>	100 % AG	-11%; -9%
	20%-30%-50% AG	0%
Yamato <sup>[6.45]</sup>	100 % AG	10,-20 %
Mukai <sup>[6.46]</sup>	100 % AG	-18%
	15% AG+15% AF	-9%
	30% AG+30% AF	-14%
González <sup>[6.47]</sup>	50 % AG	-1,8%; -2,5%
		+5%; -1%
Katz <sup>[6.49]</sup>	100 % AG	-6%

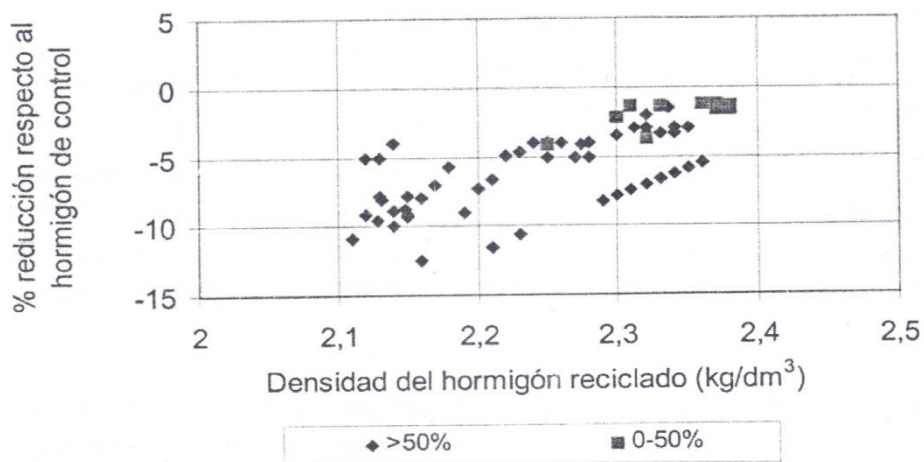
**Tabla 6.15: Porcentajes de variación de resistencia a tracción en los hormigones reciclados según diversos autores**

REFERENCIA	% sustitución	% de disminución de resistencia a flexión
Ravindrarajah <sup>[6.4]</sup>	100 % AG +100% AF	-15;+27;+29%
	100% AG + 50% AF	+22;+31%
Ikeda et al <sup>[6.5]</sup>	100% AG	-23; -20; -47%
	100% AG + 50% AF	-15 %
Ikeda <sup>[6.5]</sup>	100 % AG	
Ravindrarajah <sup>[6.18]</sup>	100 % AG	-10% -1%
Hansen et al <sup>[6.37]</sup>	100% AG + 100 % AF	20 %
Ravindrarajah <sup>[6.38]</sup> H.O (26,5-27,5-20 N/mm <sup>2</sup> )	100 % AG	+10% -15% -2%
	100 % AG	-7% -15% -7%
	100 % AG	+12% +0% -9%
Limbachiya <sup>[6.43]</sup>	100 % AG	-4% +0% +3%
	30% AG	+0% +2% +1%
	50% AG	-6% +2% +0%
Katz <sup>[6.45]</sup>	100 % AG	-6%
Dhir <sup>[6.48]</sup>	20% AG	-2%
	30% AG	-2%
	50% AG	+2%

**Tabla 6.16: Porcentajes de variación de la resistencia a flexión en los hormigones reciclados según diversos autores**

REFERENCIA	% sustitución	% de disminución de resistencia a cortante
Ikeda et al <sup>[6.5]</sup>	100 % AG	26%
Ikeda et al <sup>[6.5]</sup>	100% AG 100% AG + 50% AF	26% 41 %
Hansen et al <sup>[6.37]</sup>	100% AG + 100 % AF	32 %

**Tabla 6.17: Porcentajes de variación de resistencia a cortante en los hormigones reciclados según diversos autores**



**Gráfica 6.23: Relación densidad-porcentaje reducción <sup>[6.16]</sup>**

		Absorción (%)	Incremento absorción
Ref. [7.1]			
Áridos	Árido fino calizo	1,1	
	Árido grueso calizo	0,7	
	Árido grueso reciclado (100% hormigón)	7,2	
Hormigón	Hormigón convencional	5,2	
	Hormigón reciclado	8,9	71 %
	100% sustitución del árido grueso		
Ref. [7.2]			
Áridos	Arena caliza	0,88	
	Árido grueso cuarcítico	0,12	
	Árido grueso reciclado (72% hormigón, 20% piedra, 6% bituminosos, 2% cerámico)	6,22	
Hormigón	Hormigón convencional	5,33	
	Hormigón reciclado	6,17	16 %
	50% sustitución del árido grueso		
Ref. [7.24]			
Áridos	Árido grueso reciclado (100% hormigón).	5,5%	
Hormigón	Hormigón convencional	5,2-5,6-6,0%	
	Hormigón reciclado 75% sustitución del árido grueso	7,0-7,4-7,3%	34-32-22%

Tabla 7.1: Absorción del hormigón reciclado <sup>[7.1][7.2]</sup>

Mezcla	a/c	Resistencia a compresión (N/mm <sup>2</sup> )		Porosidad (%)		Coeficiente de permeabilidad al aire (10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup> )		
		28d	168d	28d	168d	28d	168d	
RC/100% NF	3A	0,62	44,2	50,0	14	14	5,7	4,2
	3B	0,69	42,3	44,7	14	14	3,9	2,8
RC/100% RF	4A	0,65	30,0	34,6	22	21	10,5	6,7
	4B	0,66	37,0	44,0	19	16	10,0	5,0
RC/50% RF/50% NF	5A	0,60	35,2	40,9	18	18	6,4	5,2
RC/75% RF/25% NF	5B	0,62	38,6	46,4	16	13	5,2	2,2
	6A	0,69	35,0	39,1	21	20	9,4	4,8
RC/90% RF/10% PFA	6B	0,65	38,9	45,1	18	15	6,9	5,9
	7A	0,61	39,9	55,0	21	17	10,5	6,6
RC/70% RF/30% PFA	7B	0,63	53,7	63,4	15	13	7,8	6,4
	8A	0,58	48,3	62,7	17	14	5,4	5,0
NC/100% RF	8B	0,57	55,9	76,0	13	11	4,8	4,7
	9A	0,71	36,3	39,5	19	15	8,8	5,5
RC/100% RF + SP	9B	0,71	38,9	44,2	15	12	7,3	3,3
	10A	0,58	39,1	42,9	19	18	6,3	4,7
control	10B	0,56	47,5	53,2	17	14	8,6	3,1
		0,62	49,8	55,9	10	8	4,3	2,1

RC = árido grueso reciclado; RF = árido fino reciclado; NC = árido grueso natural; NF = árido fino natural; PFA = ceniza volante ; SP = superplastificante.

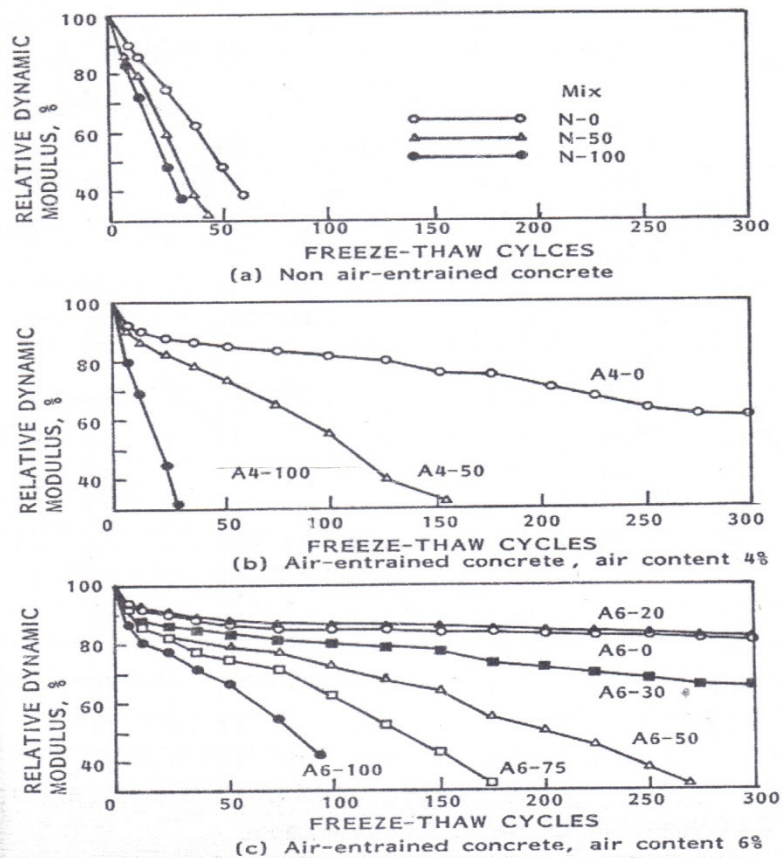
Tabla 7.2: Porosidad y permeabilidad del hormigón reciclado <sup>[7.3]</sup>

Mezcla	Factor de durabilidad	Mezcla	Factor de durabilidad
N-0	8	A6-0	81
N-50	5	A6-20	82
N-100	4	A6-30	65
A4-0	58	A6-50	32
A4-50	19	A6-75	22
A4-100	4	A6-100	13

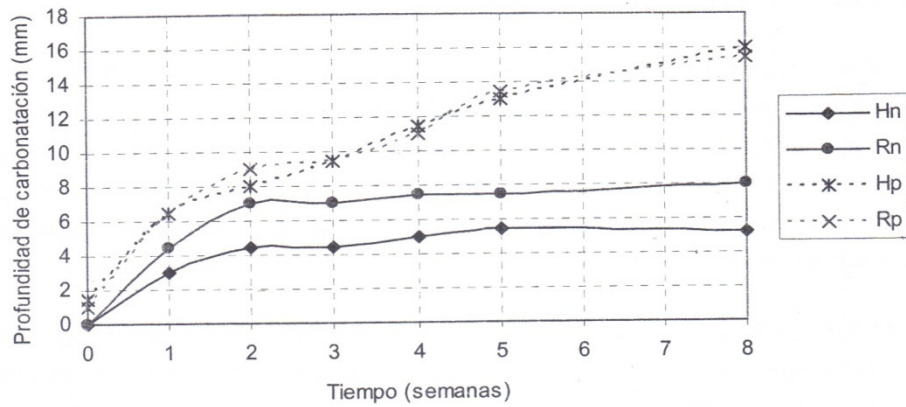
N – hormigón sin aire ocluido  $C=335 \text{ kg/m}^3$ ;  
A4 – hormigón con aire ocluido  $C=329 \text{ kg/m}^3$  4% de  
aire;  
A6 – hormigón con aire ocluido  $C=305 \text{ kg/m}^3$  6%  
de aire

El nº posterior al guiñe indica el  
porcentaje de sustitución de árido  
grosso natural por árido grosso  
reciclado.

Tabla 7.3: Factor de durabilidad de hormigones con distintos porcentajes de sustitución de árido grosso reciclado<sup>[7.4]</sup>



Gráfica 7.1: Resistencia a la helada<sup>[7.5]</sup>



**Gráfica 7.8: Resultado del ensayo acelerado de carbonatación de hormigones convencionales (Hn – ( $f_c = 55,7$  MPa) y Hp – ( $f_c = 44,4$  MPa) y hormigones con árido grueso reciclado (Rn – ( $f_c = 50,2$  MPa) y Rp – ( $f_c = 40,3$  MPa)) [7.1]**

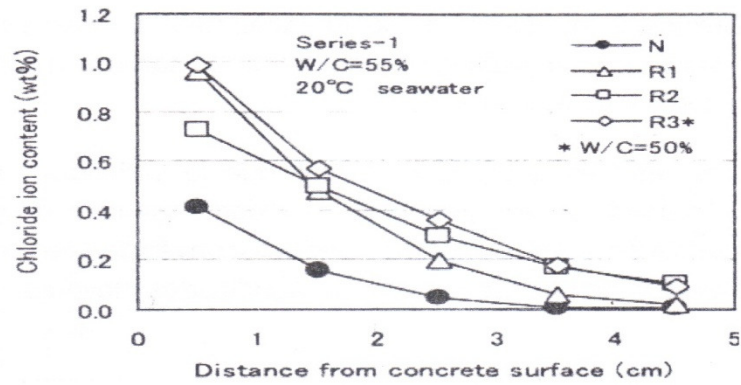
TIPO DE HORMIGÓN		Profundidad de carbonatación (mm)
Hormigón convencional	60-180N1	14,0
Hormigones reciclados	60-180RG(US)-30	16,1
	60-180RG(T/G)-30	14,6
	60-180RG(US)-100	18,2
	60-180RG(T/G)-100	20,1

La 1ª cifra corresponde a la relación agua /cemento, la segunda al contenido de cemento y la 3ª al porcentaje de sustitución.

US – árido grueso procedente de la parte superior de la estructura.

T/G – árido grueso procedente del pedestal de la turbina.

**Tabla 7.6: Profundidad de carbonatación [7.13]**



N (hormigón convencional) R1 (8,30 - 4,25) R2(12,28 - 4,86) R3(13,10 - 6,80) N(2,11 - 0,70)  
 La 1º cifra corresponde a la absorción de la fracción fina y la 2ª la de la fracción gruesa.

Gráfica 7.10: Perfil de cloruros en el interior del hormigón<sup>[7.15]</sup>.

	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )	Tipo de hormigón					
		NA	Hormigón reciclado				
			% árido grueso			% árido fino	
			30	50	100	20	50
Ataque por sulfato	10	47	48	47	63	48	56
Expansión %x10 <sup>-3</sup>	20	38	35	54	56	---	---

Tabla 7.7: Resistencia al ataque por sulfatos<sup>[7.9]</sup>

Viga	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Momento de fisuración (kN m)	Momento último (kN m)		
				Experimental	Calculado	Exp/Calc
BA	30,0	2,42	4,00	12,13	12,50	0,97
BR1	30,9	2,84	3,75	12,25	12,60	0,97
BR2	32,0	2,43	4,25	12,65	12,65	1,00
BR3	33,2	2,49	3,25	12,40	12,62	0,98

Tabla 8.5: Resultado de los ensayos a flexión<sup>[8.3]</sup>



	$V_{EHE}$ (kN)	$V_{fail}$ (kN)	$V_{fis}$ (kN)		$V_{yield}$ (kN)		Flecha para $V_{fail}$ (mm)
	$(V_{fail}/V_{EHE})$	S6	S6	S8	S6	S8	
V13HC	127,66 (1,49)	190,29	96,00	104,00	180,00	No se alcanzó	14,42
V13HCS	130,44 (1,69)	220,08	104,00	95,20	197,00	No se alcanzó	15,62
V13HR	129,19 (1,81)	233,59	108,00	112,00	197,00	216,30	18,38
V13HRS	128,76 (1,57)	202,36	95,00	76,00	175,00	No se alcanzó	17,54
V17HC	112,31 (1,34)	150,83	85,00	95,60	151,00	No se alcanzó	11,47
V17HCS	116,97 (1,71)	199,79	104,00	80,00	187,00	No se alcanzó	14,54
V17HR	113,70 (1,56)	176,99	90,00	93,00	157,00	162,00	13,72
V17HRS	114,69 (1,68)	192,92	100,00	93,70	176,00	175,50	17,08
V24HC	96,46 (1,33)	127,97	84,30	65,00	125,00	No se alcanzó	10,49
V24HCS	98,93 (1,52)	150,07	92,00	81,00	140,00	No se alcanzó	10,62
V24HR	97,68 (1,68)	164,29	91,00	107,00	130,00	156,00	11,8
V24HRS	99,78 (1,48)	147,33	89,50	104,00	130,50	No se alcanzó	11,52
V0HC	74,79 (1,19)	88,86	81,00	No se alcanzó	--	No se alcanzó	4,745
V0HCS	78,88 (1,27)	100,53	90,00	No se alcanzó	--	No se alcanzó	5,72
V0HR	73,76 (1,23)	90,64	77,00	No se alcanzó	--	No se alcanzó	5,57
V0HRS	74,83 (1,12)	83,88	74,00	No se alcanzó	--	No se alcanzó	4,77

Tabla 8.7: Resultado de ensayo sobre vigas <sup>[8.1]</sup>

Viga	Material	$f_c$ (MPa)	Cortante de fisuración ( $V_{cr}$ ) (kN): Ø6	Cortante último ( $V_r$ ) (kN): Ø6
HC-1	HC	41.91	96	100.5
HR25-1	HR25	42.38	85	104
HR50-1	HR50	41.34	82	89
HR100-1	HR100	39.75	80	84
HC-3	HC	41.91	98	177
HR25-3	HR25	42.38	100.5	169
HR50-3	HR50	41.34	93.5	176
HR100-3	HR100	39.75	90	163
HC-2	HC	41.91	108	213
HR25-2	HR25	42.38	86	186.5
HR50-2	HR50	41.34	92.5	220
HR100-2	HR100	39.75	86	189.5

Tabla 8.9: Resultado de ensayo sobre vigas <sup>[8.2]</sup>

Viga	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Carga de fisuración		Carga de rotura
			Flecha (mm)	V/bd (MPa)	V/bd (MPa)
SA	33,9	2,84	0,61	1,751	4,792
SR1	28,4	2,45	0,62	1,462	4,654
SR2	30,3	2,65	0,60	1,384	4,651
SR3	32,4	3,04	0,43	1,370	4,850

Tabla 8.10: Resultado de los ensayos a cortante <sup>[8.3]</sup>