

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO HIDRÁULICO TRAS  
LA INCLUSIÓN DE TUBOS AL INTERIOR DE VIGAS



CESAR AUGUSTO FONSECA VELANDIA  
ELKIN JULIÁN SUAREZ ROJAS



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS  
TUNJA  
2018

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO HIDRÁULICO TRAS  
LA INCLUSIÓN DE TUBOS AL INTERIOR DE VIGAS

CESAR AUGUSTO FONSECA VELANDIA  
ELKIN JULIÁN SUAREZ ROJAS

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero en Transporte y Vías.

Director: Ing. Diego Fernando Páez Moreno  
Magister en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS  
TUNJA  
2018

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Tunja 22 de Noviembre de 2018

## **DEDICATORIA**

Dedicamos este logro cumplido a Dios, a nuestras familias y a todas aquellas personas que hicieron un aporte para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores del trabajo expresan su agradecimiento a:

Ing. Magister Diego Fernando Páez Moreno por el interés dispuesto en el presente trabajo de investigación, colaboración y empeño en el enfoque y realización del mismo.

A los ingenieros: Manuel Sierra, Osman Gamba, y colaboradores de laboratorio, en especial a Edwin Rodríguez, por su serviciabilidad y aporte en el desarrollo del trabajo practico.

A nuestros compañeros: Cristian González, Bayron Vega, Viviana Pedraza, Yuber Molina, por su importante colaboración en la realización de los ensayos de laboratorio y transporte de materiales.

## Tabla de contenido

	Págs.
INTRODUCCIÓN .....	12
<b>CAPITULO I- GENERALIDADES</b> .....	13
1. OBJETIVOS.....	13
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
2. JUSTIFICACIÓN.....	14
<b>CAPITULO II- ESTADO DEL ARTE</b> .....	15
2.1 CONSIDERACIONES DEL REGLAMENTO NSR-10.....	15
2.2 RECOMENDACIONES DE ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE) IPS-1 .....	16
2.3 TIPOS DE FISURAS ESPERADAS .....	17
2.3.1 Fisuras por falla a cortante .....	18
2.3.2 Fisuras por falla a flexión.....	18
2.3.3 Fisuras por carga concentrada.....	19
2.3.4 Fisuras en una viga sometida a flexión en la rotura .....	19
2.4 RESPUESTA ESPERADA EN VIGAS DE CONCRETO REFORZADO.....	20
2.5 RESISTENCIA ÚLTIMA ESPERADA.....	22
2.6 MODULO DE ROTURA.....	23
2.7 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (INV E - 410-13) .....	24
2.8 RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL CONCRETO (INV E – 414 – 13).....	26
2.9 TUBERÍA COMÚN EN OBRAS PEQUEÑAS .....	27
2.9.1 Tubos de Suministro.....	28
2.9.1.1 Tubos de Cobre.....	28
2.9.1.2 Tubos de CPVC .....	29
2.9.1.3 Tubos de PVC .....	29
2.9.1.4 Tubos de PEX .....	29
2.10 DISEÑO DE MEZCLA EN CONCRETO HIDRÁULICO .....	30
2.10.1 Selección del asentamiento.....	30
2.10.2 Selección del Tamaño Máximo Nominal (TMN) .....	31

2.10.3 Determinación de la resistencia de dosificación.....	32
2.10.4 Selección de la relación Agua/Cemento.....	32
2.10.5 Cálculo del contenido de cemento y aditivo .....	33
2.10.6 Selección de la proporción de porcentaje adecuado de agregados .....	34
2.10.7 Cálculo de proporciones iniciales .....	35
2.10.8 Primera mezcla de prueba. ....	35
2.10.9.1 Ajuste por humedad de los agregados .....	35
2.10.9.2 Ajuste por resistencia .....	36
<b>CAPÍTULO III- METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>37</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO .....	37
3.1.1 Caso 1- Tubo de 2” ubicado en el centro de la base de la viga.....	37
3.1.2 Caso 2- Tubo de 2” ubicado en el centro del costado lateral de la viga. ....	38
3.1.3 Caso 3- Tubo de 2” ubicado en el centro de la viga reforzada .....	38
3.1.4 Caso 4- Tubo de 1” ubicado en el centro de la base de la viga.....	39
3.1.5 Caso 5- Tubos de 1” ubicados en los límites del tercio central de la viga ...	40
3.1.6 Caso 6- Tubo de 1” ubicado en el límite derecho del tercio central de la viga	41
3.2 DOSIFICACIÓN PARA UN CONCRETO DE 21 Mpa. ....	41
3.2.1 Asentamiento .....	42
3.2.2 Verificación o selección del tamaño máximo nominal (TMN) .....	42
3.2.3 Resistencia de dosificación de la mezcla de concreto.....	43
3.2.4 Estimación de cantidad de agua .....	45
3.2.5 Relación agua cemento (a/c).....	46
3.2.6 Calculo cantidad de cemento .....	46
3.2.7 Calculo de la cantidad de agregado .....	47
3.2.8 Cálculo de las proporciones iniciales.....	49
3.2.9 Fabricación de la primera mezcla de prueba.....	49
3.2.10 Corrección por asentamiento .....	51
3.2.10 Cilindros de prueba y datos obtenidos.....	51
3.3 ANÁLISIS DE CARGAS .....	52
3.3.1 Carga y momento último para la viga reforzada.....	52
3.3.2 Carga y momento último para las vigas sin refuerzo.....	55

3.3.3 Momento último esperado para las vigas de cada caso .....	55
3.4. REPORTE DE FUNDICIÓN.....	56
3.4.1 Determinación del asentamiento.....	58
<b>CAPITULO IV - ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
4. DATOS OBTENIDOS EN LABORATORIO Y CÁLCULOS .....	64
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS POR CASO .....	65
5.1 Caso 1- Tubo de 2” ubicado en el centro de la base de la viga.....	65
5.2 Caso 2- Tubo de 2” ubicado en el centro del costado lateral de la viga. ....	67
5.3 Caso 3- Tubo ubicado en el centro de la viga reforzada. ....	69
5.4 Caso 4- Tubo de 1” ubicado en el centro de la base de la viga.....	72
5.5 Caso 5- Tubos de 1” ubicados en los límites del tercio central de la viga .....	74
5.6 Caso 6- Tubo ubicado en el límite derecho del tercio central de la viga. ....	77
6. ANÁLISIS COMBINADO DE CASOS.....	80
6.1 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA VERTICAL Y LA RESISTENCIA HORIZONTAL .....	80
6.2 INFLUENCIA DEL DIÁMETRO DEL EMBEBIDO .....	81
6.3 INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE TUBOS EMBEBIDOS .....	83
7. RESUMEN DE TODOS LOS CASOS .....	85
<b>CAPITULO V - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>88</b>
CONCLUSIONES GENERALES.....	91
RECOMENDACIONES .....	93
BIBLIOGRAFÍA .....	94
<b>ANEXOS .....</b>	<b>96</b>



## Tabla de Ilustraciones

	<b>Págs.</b>
Ilustración 1. Tubo atravesando columna.....	14
Ilustración 2. Recomendación NSR-10 para instalación de tubería. ....	16
Ilustración 3. Disposiciones para la instalación de tubería según IPS-1. ....	17
Ilustración 4. Grietas producidas por esfuerzo cortante. ....	18
Ilustración 5. Diferencia entre grietas por cortante y flexión y grietas por flexión. .	19
Ilustración 6. Grietas presentadas por cargas aplicadas.....	19
Ilustración 7. Apariencia de grietas tras la aplicación de una carga uniforme. ....	20
Ilustración 8. Curvatura generada por flexión en la viga. ....	21
Ilustración 9. Comportamiento de una viga de concreto reforzado tras la flexión. 21	21
Ilustración 10. Distribución de esfuerzos en una sección de concreto. ....	23
Ilustración 11. Ensayo de carga axial.....	25
Ilustración 12. Esquema de patrones de falla típicos. ....	26
Ilustración 13. Equipo para el ensayo de concreto a flexión. ....	27
Ilustración 14. Resistencia a la compresión de dosificación de concreto vs coeficiente de variación.....	33
Ilustración 15. Resistencia a la compresión Vs A/C .....	34
Ilustración 16. Tubo de 2" ubicado en el centro de la viga. ....	37
Ilustración 17. Tubo de 2" ubicado en el costado lateral de la viga. ....	38
Ilustración 18. Tubo de 2" ubicado en el centro de la base de la viga reforzada... 39	39
Ilustración 19. Tubo de 1" ubicado en el centro de la luz de la viga. ....	40
Ilustración 20. Tubos de 1" ubicados en los límites del tercio central de la viga. ..	40
Ilustración 21. Tubo de 1" ubicado en límite derecho del tercio central de la viga. 41	41
Ilustración 22. Cilindros de prueba tras proceso de falla.....	51
Ilustración 23. Despiece viga reforzada. ....	52
Ilustración 24. Diagrama de cuerpo libre de la viga reforzada.....	53
Ilustración 25. Procedimiento de pesado de los materiales .....	57
Ilustración 26. Adición de agua durante el proceso de mezclado.....	58
Ilustración 27. Mezcla final obtenida .....	58
Ilustración 28. Medición de asentamiento .....	59
Ilustración 29. Engrasado de moldes y posicionamiento de los tubos. ....	59
Ilustración 30. Fundición de las vigas.....	60
Ilustración 31. Muestra de prueba (Vigueta) .....	60
Ilustración 32. Proceso de sumergido de las briquetas de prueba .....	61
Ilustración 33. Vigas con tubo de 2" pos-falla.....	65
Ilustración 34. Perdida de carga en una viga con tubo de 2" en el centro.....	66
Ilustración 35. Vigas con tubo de 2" pos-falla.....	67
Ilustración 36. Perdida de resistencia a flexión para el caso 2.....	68
Ilustración 37. Vigas con tubo de 2" y 2 barras de refuerzo #2 pos-falla .....	69
Ilustración 38. Momento máximo para una viga con dos cargas puntuales. ....	70

Ilustración 39. Momento ultimo soportado por las vigas reforzadas.....	71
Ilustración 40. Patrón de agrietamiento de vigas reforzadas.....	72
Ilustración 41. Vigas con tubo de 1" pos-falla.....	72
Ilustración 42. Comportamiento de las vigas del caso 4 y vigas de control.....	74
Ilustración 43. Vigas con tubos de 1" ubicados en los límites del tercio central pos-falla.....	75
Ilustración 44. Comportamiento de las vigas del caso 5 y vigas de control.....	76
Ilustración 45. Viga con tubo de 1" pos-falla .....	77
Ilustración 46. Comportamiento de las vigas del caso 6 y vigas de control.....	78
Ilustración 47. Rotura total de la viga para el caso 6.....	79
Ilustración 48. Influencia en la variación del posicionamiento del tubo de 2". .....	81
Ilustración 49. Variación de 1" en el diámetro del tubo.....	82
Ilustración 50. Comportamiento de la viga con 1 y 2 tubos. ....	84
Ilustración 51. Pérdida por sección en todos los casos.....	86
Ilustración 52. Momento práctico-teórico en todos los casos. ....	86
Ilustración 53. Carga vs Tiempo- Viga de control.....	96
Ilustración 54. Carga vs Tiempo- Caso 1 .....	96
Ilustración 55. Carga vs Tiempo- Caso 2 .....	97
Ilustración 56. Carga vs Tiempo- Caso 3 .....	97
Ilustración 57. Carga vs Tiempo- Caso 4 .....	98
Ilustración 58. Carga vs Tiempo- Caso 5 .....	98
Ilustración 58. Carga vs Tiempo- Caso 6 .....	99

## Tabla de cuadros

	<b>Pág.</b>
Cuadro 1. Módulo de rotura según la resistencia. ....	24
Cuadro 2. Diámetros de tuberías internas. ....	28
Cuadro 3. Asentamientos típicos según el tipo de mezcla. ....	31
Cuadro 4. Cantidad de agua recomendada en kg/m <sup>3</sup> según el tipo de concreto. .	32
Cuadro 5. Selección del asentamiento de la mezcla. ....	42
Cuadro 6. Selección del coeficiente de variación. ....	44
Cuadro 7. Resistencia a compresión promedio de la mezcla- Criterio NSR-10 ....	45
Cuadro 8. Estimación de la cantidad de agua para un concreto sin aire incluido..	46
Cuadro 9. Estimación de la relación agua/cemento. ....	47
Cuadro 10. Propiedades iniciales de los materiales. ....	48
Cuadro 11. Estimación de la cantidad de agregados. ....	49
Cuadro 12. Proporciones iniciales para la mezcla de prueba. ....	49
Cuadro 13. Volumen para la primera mezcla de prueba. ....	50
Cuadro 14. Cantidades de materiales y aportes de agua. ....	50
Cuadro 15. Datos obtenidos tras fallar los cilindros. ....	52
Cuadro 16. Momento último y resistencia a flexión tras pérdida de sección. ....	56
Cuadro 17. Escenarios de Investigación. ....	62
Cuadro 18. Continuación escenarios de investigación. ....	63
Cuadro 19. Datos obtenidos de las vigas y capacidad de carga tras falla. ....	64
Cuadro 20. Resultados para el caso 1. ....	66
Cuadro 21. Resultados para el caso 2. ....	68
Cuadro 22. Carga máxima soportada por la viga reforzada. ....	70
Cuadro 23. Resultados para el caso 4. ....	73
Cuadro 25. Resultados para el caso 6. ....	77
Cuadro 26. Diferencias entre los casos 1 y 2. ....	80
Cuadro 28. Diferencia entre los casos 5 y 6. ....	83
Cuadro 29. Pérdida de capacidad para cada caso. ....	85

## INTRODUCCIÓN

En el proceso constructivo en la ejecución de una obra, se deben incluir diferentes tareas que complementan la serviciabilidad que representa una construcción específica; una de dichas tareas es el tendido o instalación de tubería, con el objetivo de solucionar el alcance de los diferentes servicios públicos hasta el interior de una construcción, entendiendo como servicios públicos aquellos relacionados con agua, luz, gas, telefonía, entre otros.

En la instalación de la tubería para cada uno de los servicios, se hace necesario el diseño de diferentes planos que especifiquen el recorrido por el cual se debe realizar el tendido de la tubería; sin embargo, no se realiza una combinación entre el plano estructural y los planos de tubería, de manera que se evidencien los elementos estructurales y no se atraviesen de manera directa debido a los posibles daños que sufre la estructura una vez instalada la tubería.

Los instaladores de tubería, en la mayoría de los casos, no tienen en cuenta los componentes estructurales en la instalación de tubería, de manera que se instalan tubos a través del elemento en concreto tanto vertical, como horizontalmente, afectando la composición del elemento como unidad.

Uno de los elementos estructurales más afectados tras la instalación de tubería son las vigas, dado que son un elemento que atraviesa la estructura de un lado a otro y no existe la posibilidad de esquivarla en el proceso de instalación, sin afectar la misma composición de la tubería; en elementos como las columnas, suele cometerse el error de instalar las bajantes de aguas lluvias al interior de la misma, generando un vacío en el centro de la misma y afectando de manera considerable el funcionamiento de la misma.

Para el presente trabajo de investigación se plantearon 6 casos de estudio, manejando un dimensionamiento de viga constante para todos los casos, variando la ubicación de los tubos que atraviesan la viga, la cantidad de tubos, el diámetro de los mismos y vigas con refuerzo y sin refuerzo, ya que se considera mayoritariamente la afección al concreto que al propio refuerzo.

Se realizó una revisión de la bibliografía dispuesta para el tema, considerando específicamente la reglamentación que ofrece la <sup>1</sup>Norma Sismo Resistente -10 y algunos documentos relacionados con el objeto del presente trabajo, además de realizar un resumen del ensayo que se realiza para la evaluación de la resistencia a flexión del concreto hidráulico.

Posteriormente se realiza una descripción de la metodología utilizada en el proceso de mezclado para la elaboración del concreto y fallo de vigas, para así realizar el análisis de cada uno de los casos y redactar las respectivas conclusiones.

---

➤ <sup>1</sup> ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Norma sismo resistente. Título C. Concreto Estructural. Bogotá, Colombia.

## **CAPITULO I- GENERALIDADES**

### **1. OBJETIVOS**

#### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento del concreto hidráulico a partir de la inclusión de tubos al interior de vigas.

#### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la influencia de la inclusión de tubos en el interior de una viga de concreto hidráulico a partir de la evaluación de su resistencia.
- Definir el porcentaje de pérdida de resistencia a partir de la inclusión de tubos en vigas.
- Realizar una familia de curvas en la cual se pueda reconocer el porcentaje de pérdida de resistencia teniendo en cuenta el diámetro.
- Reconocer las zonas de mayor significancia para la inclusión de tubos al interior de vigas, definir la zona crítica.
- Realizar una dosificación de concreto hidráulico que permita alcanzar una resistencia de 21 MPa.
- Afianzar el conocimiento de los ensayos de determinación de densidades unitarias para los materiales granulares, al igual que el ensayo de resistencia al concreto.
- Evaluar el efecto que produce una zona de vacío al interior de una viga.

## 2. JUSTIFICACIÓN

En el desarrollo del proceso constructivo de una obra, la instalación de tubería debe ser una de las tareas más importantes, ya que de esta depende la funcionalidad del proyecto como tal. Sin embargo, es una de las tareas que menos relevancia tiene, y que generalmente se deja en manos de personas inexpertas que tienden a realizar juicios basados en la experiencia que han adquirido a lo largo de los años, mas no en las recomendaciones de los diferentes manuales que ofrecen las entidades gubernamentales para la ejecución de dichas actividades.

En el proceso de instalación se suelen atravesar los elementos estructurales, tanto vertical, como horizontalmente, afectando el funcionamiento del elemento (viga, columna) como unidad y generando zonas de debilidad a lo largo de las mismas, tal como se presenta en la ilustración 1.

Ilustración 1. Tubo atravesando columna.



Fuente: autores.

Por esta razón es necesario determinar cuál es el comportamiento del concreto hidráulico a partir de la inclusión de tubos en su interior, evaluando el comportamiento tras la variación del posicionamiento del tubo y el diámetro del mismo.

Es necesario dar las recomendaciones pertinentes a los instaladores de tubería, de manera que comprendan el daño que se hace a un elemento estructural cuando lo atraviesan tubos, y saber hasta qué punto es permisible teniendo en cuenta los factores de seguridad apropiados.

## CAPITULO II- ESTADO DEL ARTE

A continuación se presentan las bases teóricas relativas a la inclusión de tubos en vigas, considerando las principales recomendaciones del reglamento local y normas internacionales, revisando los capítulos pertinentes a tubos embebidos en vigas.

### 2.1 CONSIDERACIONES DEL REGLAMENTO NSR-10

La Norma Sismo Resistente colombiana, NSR-10<sup>2</sup>, en su título C, capítulo 6, establece las condiciones básicas para los embebidos en vigas o elementos estructurales, realizando una serie de recomendaciones al respecto.

Señala que se permite la posibilidad de embebidos en un elemento estructural, siempre y cuando haya una autorización previa de un profesional que tenga las facultades para el diseño de estructuras, teniendo en cuenta que el embebido nunca reemplazará la sección de concreto desalojada.

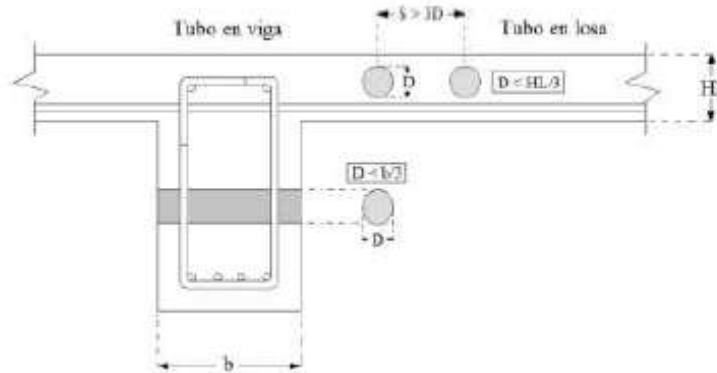
- Cuando se trata específicamente de tubería en aluminio embebida en concreto, debe considerarse que dicha tubería deberá ser recubierta con un químico específico, de manera que se evite la reacción concreto- aluminio.
- Teniendo en cuenta que, al diseñar una estructura, cada uno de los elementos tiene un aporte específico, será necesario garantizar que cada ducto, tubería o inserción que traspase un elemento estructural, no afecte considerablemente la resistencia de la estructura en cuestión.
- Para trabajar específicamente en columnas, se entenderá que los ductos o tuberías que traspasen la misma no deberán superar el 4% del área de la sección transversal con la cual se ha diseñado dicha columna.
- Las tuberías, ductos o inserciones en cualquier elemento estructural no deben sobrepasar 1/3 del espesor del mismo.
- Cuando se trata de traspasar varias veces el mismo elemento estructural, se debe considerar que el espaciamiento que haya entre cada tubo, ducto o inserción debe ser mayor a 3 veces su diámetro.
- La tubería, ductos o inserciones realizadas en elemento estructural no deben superar los 5 cm.
- En lozas macizas la ubicación más adecuada para cualquier embebido es en la zona superior o inferior de la misma, de manera que no se afecte el cuerpo central del elemento, y su recubrimiento deberá ser como mínimo de 4 cm en zonas expuestas a la intemperie y de 2 cm en aquellas que no están directamente en contacto con el suelo o expuestas a la intemperie.
- Cuando se realice la instalación de tubería, ductos o inserciones en un elemento estructural, se deberán reforzar en cada uno de sus lados con un área mínima de 0,002 veces el área de la sección del elemento estructural.

---

<sup>2</sup> ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Norma sismo resistente. Título C. Concreto Estructural. Bogotá, Colombia.

Las anteriores recomendaciones se pueden visualizar en la ilustración 2.

Ilustración 2. Recomendación NSR-10 para instalación de tubería.



Fuente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Norma sismo resistente. Título C. Concreto Estructural. Bogotá, Colombia.

El reglamento NSR-10 es muy enfático en mantener la resistencia del elemento estructural, de manera que no se ponga en riesgo la estructura en general y no se afecten los factores de seguridad con los cuales se ha diseñado.

## 2.2 RECOMENDACIONES DE ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE) IPS-1

En la publicación realizada por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), en asocio con el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) y el American Concrete Institute (ACI), denominada “*Requisitos esenciales para edificios en concreto reforzado*”, se trabajó de manera esporádica los embebidos en elementos estructurales, determinando como conclusión principal que no es posible incluir tubos, ductos, o inserciones en cualquier elemento estructural, cuando estas sean de aluminio, y que en elementos de columna no es posible embeber algún tipo de tubería.

En este documento se dan las recomendaciones principales para realizar el embebido de tubería en vigas y viguetas, llegando a la conclusión que el elemento que atraviesa la viga no podrá tener una abertura mayor a  $1/3$  la altura de la misma, y deberá ser menor que  $1/3$  de la base de la viga cuando este lo atraviesa transversalmente.

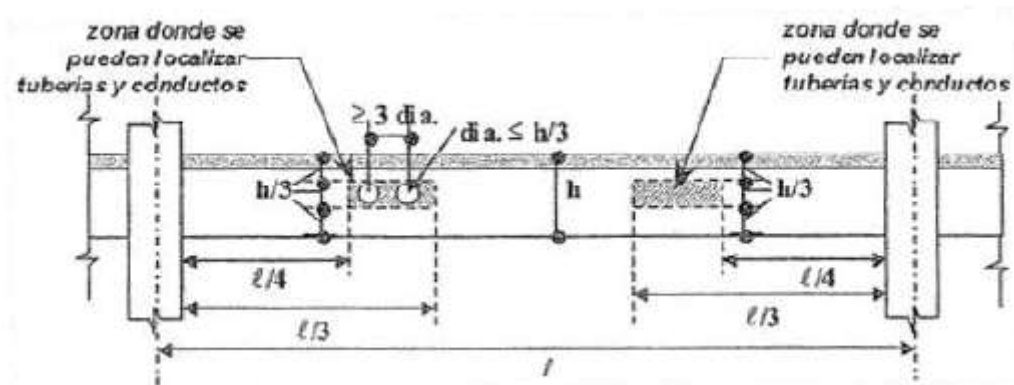
Si se trata de la ubicación en la viga, el documento en revisión llega a la conclusión que los conductos o tuberías deberán ubicarse en planta a no menos de  $1/4$  de la longitud de la viga y no más de  $1/3$  de la cara del apoyo.

Aquellos conductos o tuberías que atraviesan el elemento de manera horizontal, serán ubicados en el tercio central de la altura de la viga, mientras que los que lo atraviesan verticalmente deberán ubicarse en el tercio central de la base de la viga.



De la misma manera que la NSR-10, el documento IPS-1 establece que la separación entre ductos o tuberías en un mismo elemento, no podrá ser menor de tres veces la abertura del ducto o tubería que se esté instalando. Las recomendaciones anteriormente mencionadas se encuentran en la ilustración 3.

Ilustración 3. Disposiciones para la instalación de tubería según IPS-1.



Fuente: ACI- AIS-ICONTEC. IPS-1 Requisitos esenciales para edificios en concreto reforzado. Bogotá. Colombia. 2002.

### 2.3 TIPOS DE FISURAS ESPERADAS

Los elementos estructurales nacen de la composición de dos elementos, el concreto y el acero; esta fusión de elementos ofrece una resistencia específica, teniendo en cuenta el tipo y número del acero utilizado, la calidad de los materiales, entre otros elementos que conllevan a una variación del comportamiento del material afectando de manera positiva o negativa el elemento estructural.

El acero tiene una tarea fundamental en esta combinación, y es la de evitar la falla tanto por corte como por flexión, las cuales pueden ocurrir cerca al apoyo o en el centro de la viga respectivamente.

Sin embargo se tienen muchas variaciones en el tipo de fisuras que se van a presentar tras el proceso de falla de una viga, ya que existen diferentes variaciones que no permiten llegar a una fisura específica, por ejemplo la calidad de los materiales, el tipo de acero u otros factores que no permiten llegar a una teoría aproximada.

Por esta razón, las fisuras esperadas se ciñen específicamente a las diferentes pruebas de laboratorio que se han realizado y de las cuales si se tiene en antecedente relativamente cercano para predecir el tipo de fisura que pueda llegar a presentarse tras el proceso de falla de una viga.

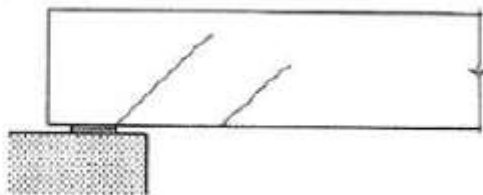
Es importante realizar un análisis a las fisuras que se generen a partir del proceso de falla, para luego tratar de establecer cuál es la causa más probable por la que se han provocado y de esta manera tratar de establecer un patrón de fisuras.

### 2.3.1 Fisuras por falla a cortante

Son grietas o fisuras que generalmente se generan en la zona cercana al apoyo, generalmente formando ángulos de  $45^\circ$ ; este tipo de fisuras son producidas principalmente por la excesiva tracción diagonal en el concreto. Son de ancho variable, dependiente del tipo de acero de refuerzo por cortante.

Este tipo de fisura generalmente ocurre cuando el esfuerzo de tensión diagonal alcanza valores cercanos a la resistencia del concreto, y se presentan en vigas de gran altura y poca base; en la ilustración 4 se presenta un ejemplo de las grietas producidas por cortante en el alma.

Ilustración 4. Grietas producidas por esfuerzo cortante.



Fuente: CABRERA, Fabián. Influencia de las aberturas transversales, en la resistencia a corte y a flexión de vigas de concreto reforzado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011. 203 págs.<sup>3</sup>

### 2.3.2 Fisuras por falla a flexión

Es un tipo de fisura muy característico en el proceso de falla de una viga, dado que se presenta gracias a los momentos actuantes. Al someter la viga a una carga, la misma experimenta una serie de tensiones en su interior, que la debilitan tras el aumento progresivo de la carga, hasta llegar al punto de vencer la resistencia, con lo cual viene la aparición de este tipo de grietas o bien las grietas por falla a cortante. Cuando la viga está correctamente dimensionada y reforzada, las grietas por flexión aparecen primero que las de falla por cortante.

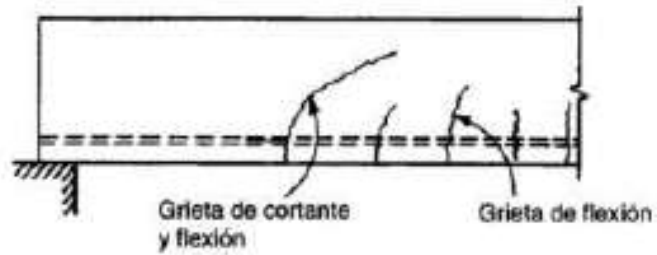
Sin embargo, las grietas por cortante y flexión pueden presentarse en conjunto, representadas como el producto de la interacción de un conjunto de tensiones a tracción, las cuales se producen al interior de la viga.

En la ilustración 5, se aprecia la diferencia entre las grietas por flexión y las grietas por cortante y flexión; estas últimas se caracterizan por tener una mayor longitud y por ende atravesar en mayor porcentaje de área a la viga.

---

<sup>3</sup> CABRERA, Fabián. Influencia de las aberturas transversales, en la resistencia a corte y a flexión de vigas de concreto reforzado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011. 203 págs.

Ilustración 5. Diferencia entre grietas por cortante y flexión y grietas por flexión.

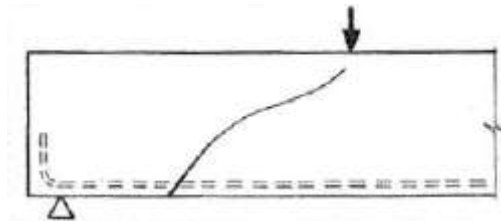


Fuente: CABRERA, Fabián. Influencia de las aberturas transversales, en la resistencia a corte y a flexión de vigas de concreto reforzado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011. 203 págs.<sup>4</sup>

### 2.3.3 Fisuras por carga concentrada

Son un tipo de fisuras que se caracterizan porque se presentan a  $45^\circ$  a nivel de la armadura de tracción, y tras algunas ondulaciones se dirige hacia el punto donde está concentrada la carga. El ancho de este tipo de grieta varía a lo largo de su recorrido, ya que presenta mayor ancho en el extremo opuesto al punto de carga, y al llegar al mismo su ancho es prácticamente nulo. Generalmente son causadas por el aumento de tensiones, además del daño que causa la carga puntual a la viga en estudio. En la ilustración 6 se presenta un ejemplo de las fisuras que se presentan por la aplicación de cargas puntuales.

Ilustración 6. Grietas presentadas por cargas aplicadas.



Fuente: CABRERA, Fabián. Influencia de las aberturas transversales, en la resistencia a corte y a flexión de vigas de concreto reforzado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011. 203 págs.<sup>5</sup>

### 2.3.4 Fisuras en una viga sometida a flexión en la rotura

Cuando una viga está sometida a una carga uniforme, y la magnitud de carga se aumenta hasta el punto de llegar a la rotura, la viga presentará una serie de grietas

---

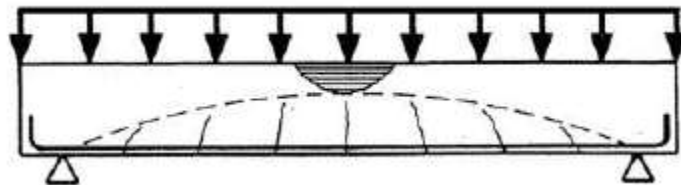
<sup>4</sup> CABRERA, Fabián. Influencia de las aberturas transversales en la resistencia a corte y a flexión de vigas de concreto reforzado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011. 203 págs.

a lo largo de su luz, cuyo ancho es variable pero con el mismo comportamiento de las grietas por cargas puntuales, es decir que su mayor ancho se presenta en la parte más baja de la viga, y al llegar a la cercanía de la aplicación de la carga, la grieta se hace imperceptible al ojo humano.

Se dice que se ha llegado a una fisuración estabilizada cuando ya no se observa la aparición de grietas a lo largo de la luz de la viga, si no que el ancho de las grietas existentes va aumentando proporcionalmente con el aumento de la carga.

La apariencia de las grietas tras la aplicación de una carga uniforme se presenta en la ilustración 7.

Ilustración 7. Apariencia de grietas tras la aplicación de una carga uniforme.

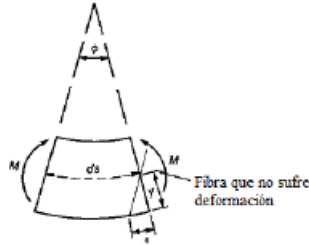


Fuente: CABRERA, Fabián. Influencia de las aberturas transversales, en la resistencia a corte y a flexión de vigas de concreto reforzado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011. 203 págs.<sup>6</sup>

## 2.4 RESPUESTA ESPERADA EN VIGAS DE CONCRETO REFORZADO

En el análisis del comportamiento a flexión del concreto hidráulico, es necesario reconocer la curvatura que se presenta en el momento de falla de la viga, en el entendido que los momento flectores generan una especie de compresión en las fibras superiores de las vigas y un alargamiento en las inferiores, de manera que se da paso a la grieta. Existe un eje neutro en la curvatura, el cual representa aquellas fibras que no sufren acortamiento ni alargamiento. La curvatura definida en el proceso de falla de la viga se presenta en la ilustración 8, en la cual se aprecia además, los momentos flectores que generan la rotura de la viga.

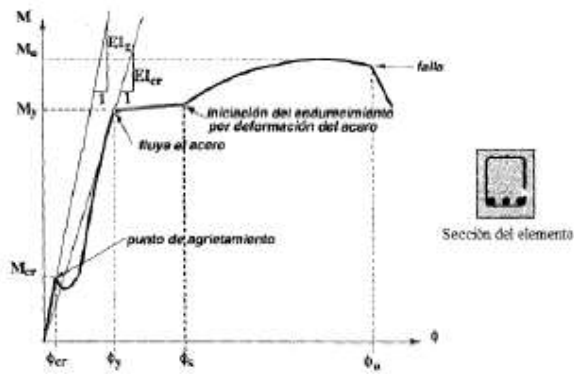
Ilustración 8. Curvatura generada por flexión en la viga.



Fuente: CABRERA, Fabián. Influencia de las aberturas transversales, en la resistencia a corte y a flexión de vigas de concreto reforzado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011. 203 págs.

Al tener definida la curvatura de la viga, existe la posibilidad de predecir el comportamiento que tendrá la viga de concreto reforzado, la cual se representa en la ilustración 9.

Ilustración 9. Comportamiento de una viga de concreto reforzado tras la flexión.



Fuente: GARCIA, Luis Enrique. Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico. Ensayo a flexión. Respuesta esperada de una viga de concreto reforzado. Bogotá, Colombia. 412 págs.<sup>7</sup>

Uno de los primeros puntos que se observa en la ilustración 9 es el punto de agrietamiento ( $M_{cr}$ ), punto en el cual empieza la aparición de grietas en la luz de la viga, y el cual está asociado con el módulo de elasticidad del concreto y la inercia que genera la sección transversal de la viga.

Con el aumento de la carga aplicada y consecuentemente el aumento de momento, se presenta un aumento de esfuerzos al interior de la viga, los cuales generan un aumento de la deformación y de la curvatura en la parte inferior de la viga. Posteriormente se observa el punto de fluencia del acero ( $M_y$ ), en el cual el proceso tiene un cambio de comportamiento, dado que se ha presentado un cambio en la

<sup>7</sup> Fuente: GARCIA, Luis Enrique. Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico. Ensayo a flexión. Respuesta esperada de una viga de concreto reforzado. Bogotá, Colombia. 412 págs.

composición del acero; en este punto habrá una rigidez, un momento de fluencia y una deformación asociada a dicho punto, cuyos valores son consecuencia específica del comportamiento del acero; de la misma manera en dicho punto se tendrá un momento de inercia, asociado a la sección de la viga fisurada.

A partir del punto de fluencia del acero se presenta un aumento de la curvatura, dando inicio al endurecimiento por deformación del acero, zona en la cual el acero adquiere una mayor resistencia. En este punto la curvatura aumentara hasta que el acero llegue a su máxima resistencia, punto en el cual se espera que el acero falle por tensión, teniendo entonces la curvatura máxima que se puede presentar en las fibras interiores de la viga.

Para obtener los valores teóricos que se darán en cada uno de los puntos anteriormente mencionados, es posible utilizar el modelo de "Mcgregor 1997" quien establece los valores de rigidez en cada uno de los puntos en función del módulo de elasticidad y el momento de inercia.

## **2.5 RESISTENCIA ÚLTIMA ESPERADA**

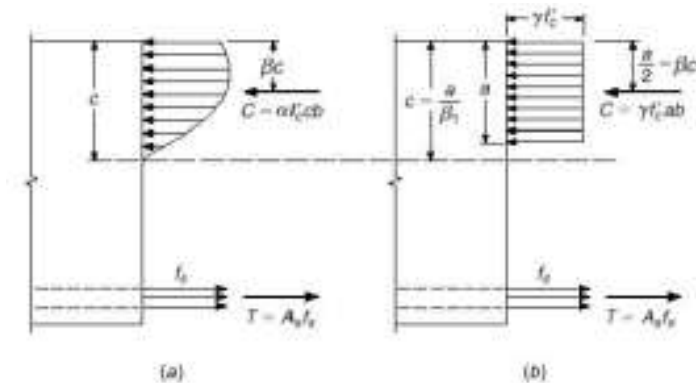
Tras la introducción de un tubo al interior de una viga, existe la posibilidad de afectar el correcto funcionamiento del elemento como unidad, ya que se genera una discontinuidad de los materiales y se genera un vacío al interior de la misma. Estas condiciones pueden causar una falla prematura de la viga, un tipo de grietas diferente al esperado, afectando su módulo de rotura, rigidez y en su comportamiento habitual.

Sin embargo, para efectos del presente documento se trabajara en función de la distribución de esfuerzos típica de una sección de concreto reforzado a partir del rectángulo equivalente, tal como se muestra en la ilustración 11.

Para el diseño de las vigas, teniendo en cuenta que se probarán casos atravesando la viga transversalmente, se tendrán en cuenta las consideraciones impuestas por el reglamento sismo resistente vigente (NSR-10) y las recomendaciones hechas por el documento ACI IPS-1 del año 2002, las cuales son prácticamente las mismas del reglamento NSR-10.

Al trabajar con el comportamiento típico del concreto reforzado, se espera establecer un punto comparativo entre el escenario ideal y el escenario práctico, de manera que se puedan evaluar las ventajas y desventajas de los embebidos en elementos estructurales.

Ilustración 10. Distribución de esfuerzos en una sección de concreto.



Fuente: CABRERA, Fabián. Influencia de las aberturas transversales, en la resistencia a corte y a flexión de vigas de concreto reforzado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011. 203 págs.<sup>8</sup>

## 2.6 MODULO DE ROTURA

El módulo de rotura de una mezcla de concreto hidráulico es un parámetro que define la resistencia de una viga a partir de la aplicación de una carga en los tercios de la misma. El módulo de rotura es comúnmente utilizado en el proceso de diseño y prueba de pavimentos rígidos, con el objetivo de simular los esfuerzos de tensión a los que se somete dicho pavimento, tras la aplicación de repeticiones de carga. La resistencia a la flexión de una viga es un factor determinante para probar pavimentos en concreto hidráulico, ya que permite estimar valores de deformación en las losas de concreto. Los esfuerzos de flexión generalmente son contrarrestados con la colocación de refuerzos en acero que evitan deformaciones altas en la viga que la puedan llevar a la rotura. Para realizar el diseño de una mezcla para evaluar el módulo de rotura, se tendrá en cuenta que el valor de la resistencia ha de ser debidamente mayor al utilizado para el ensayo de resistencia a la tracción, de manera que no se disminuya el factor de seguridad de la estructura en estudio.

Existen diferentes correlaciones que permiten conocer el módulo de rotura de una mezcla a partir de su resistencia a la compresión, dado que en muchas ocasiones no es posible realizar ambos ensayos, y es necesario tener un valor de referencia para la evaluación de la estructura.

<sup>8</sup> Fuente: CABRERA, Fabián. Influencia de las aberturas transversales, en la resistencia a corte y a flexión de vigas de concreto reforzado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011. 203 págs.

“El valor del módulo de rotura comúnmente fluctúa entre un 10% y un 20% del valor de resistencia a la compresión”<sup>9</sup>.

La correlación más utilizada para determinar el módulo de rotura a partir de la resistencia a la compresión es:

$$MR = k(RC)^{1/2}$$

Donde:

MR: Modulo de rotura estimado para el concreto (kg/cm<sup>2</sup>).

RC: Resistencia a la compresión del concreto en kg/ cm<sup>2</sup>

K: Constante que varía normalmente entre 2 y 2.7, Para resistencias en Kg/ cm<sup>2</sup> a 28 días.

El módulo de rotura para las resistencias más comunes en el campo laboral se presenta en el cuadro 1, cuyo cálculo se ha realizado para un valor de k= 2.5

Cuadro 1. Módulo de rotura según la resistencia.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm <sup>2</sup> )	MÓDULO DE ROTURA (kg/cm <sup>2</sup> )
210	36.23
240	38.73
280	41.83
320	44.72
350	46.77
380	48.73

Fuente: autores.

## 2.7 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (INV E - 410-13)

La resistencia a compresión del concreto se determina para comprobar si la dosificación de la mezcla es adecuada para cumplir con la resistencia de diseño, para verificar la uniformidad de la resistencia, ajustarla al nivel requerido para la producción del concreto y para verificar la resistencia del concreto en la estructura.

<sup>10</sup>

Este método consiste en la aplicación de una carga axial de compresión a cilindros moldeados o a núcleos a una velocidad que está dentro de un intervalo prescrito hasta que ocurra la falla. En la práctica se utilizan cilindros de 15 cm x 30 cm, como

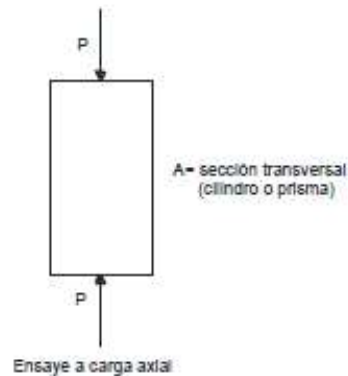
<sup>9</sup> RIVERA, Gerardo. Concreto Simple. Resistencia del concreto. Universidad del Cauca. 267 Págs.

<sup>10</sup> Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras 2013. (Sección 400. Concreto hidráulico; norma 410).



medida estándar; sus bases deben ser paralelas al eje axial. Ante el hecho de que el concreto tiene que haber alcanzado un porcentaje elevado de su resistencia potencial, los cilindros se prueban en periodos determinados; de manera, estandarizada, se tienen las edades de 7, 14, 28, 91 y 128 días, de los cuales se toma un intervalo para el estudio que se requiera.

Ilustración 11. Ensayo de carga axial

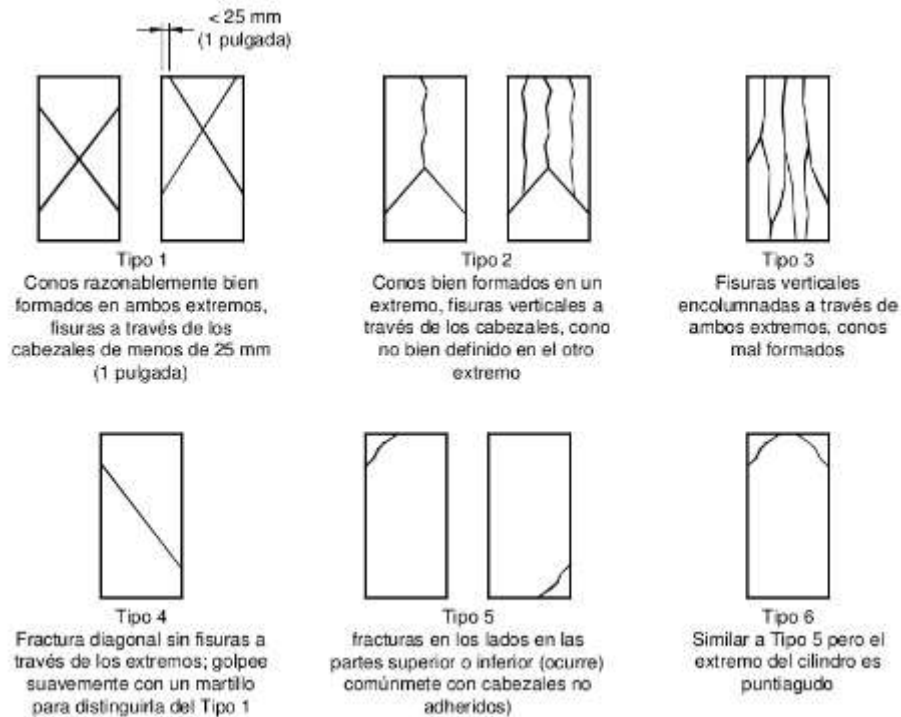


Fuente: autores.

La resistencia a la compresión del espécimen se calcula dividiendo la máxima carga alcanzada durante el ensayo entre el área de la sección transversal del espécimen. La carga se debe aplicar a una velocidad a una tasa de aplicación de esfuerzo de  $0.25 \pm 0.05$  MPa/s sobre el espécimen. Esta velocidad escogida se debe mantener, al menos, durante la segunda mitad de la fase de carga prevista.

Se aplica la carga de compresión hasta que el indicador de carga señale que ella comienza a decrecer progresivamente y el cilindro muestre un patrón de fractura bien definido.

Ilustración 12. Esquema de patrones de falla típicos.



Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras 2013. (Sección 400. Concreto hidráulico; norma 410. Figura 403-10).

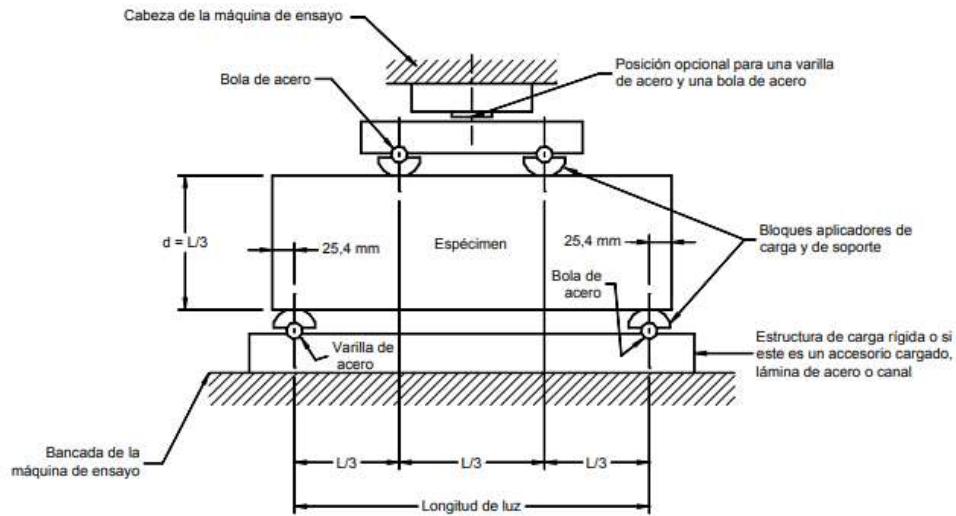
## 2.8 RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL CONCRETO (INV E – 414 – 13)

Este ensayo consiste en determinar la resistencia a la flexión del concreto por medio del uso de una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de su luz.<sup>11</sup>

Para realizar este ensayo se retiran las vigas del lugar de curado y se llevan al laboratorio donde está la máquina universal. Para localizar las vigas en los apoyos, se divide la longitud de la viga en tres partes iguales, se marcan estas longitudes en una de las caras de la viga para así poder situar correctamente los bloques de apoyo en los puntos  $L/3$  desde los extremos de la viga hacia el centro. Teniendo correctamente localizadas las vigas, se prosigue a colocar una carga puntual en el centro de la viga auxiliar que luego será distribuida mediante una viga auxiliar a los tercios de la viga a ensayar. La carga se debe aplicar de manera constante sin cambios bruscos de velocidad, a una velocidad que incremente constantemente el esfuerzo sobre la cara en tensión entre 0.9 y 1.2 MPa/min (125 y 175 lbf/pulg<sup>2</sup>/min), hasta llegar a la falla.

<sup>11</sup> Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras 2013. (Sección 400. Concreto hidráulico; norma 414).

Ilustración 13. Equipo para el ensayo de concreto a flexión.



Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras 2013. (Sección 400. Concreto hidráulico; norma 414. Figura 414-1).

Los resultados se calculan y reportan como el módulo de rotura. La resistencia que se determina variará si existen diferencias en el tamaño del espécimen, su preparación, condiciones de humedad, curado, o si la viga ha sido fundida o cortada al tamaño requerido.

## 2.9 TUBERÍA COMÚN EN OBRAS PEQUEÑAS

Los tubos son cañerías que se pueden utilizar en los hogares, y sirve para suministrar o drenar fluidos, como son los desechos de todo tipo y agua generalmente en PVC. Generalmente tienen una forma circular y en Colombia se encuentran establecidos en tamaños respecto a la pulgada.<sup>12</sup> Dichos tubos transportadores pueden ser de tipo pesado o de tipo ligero, dependiendo de la función que vaya a cumplir (NTC 382)<sup>13</sup>. Generalmente para el transporte de agua se utilizan tubos de tipo pesado, los cuales difieren con los tubos de tipo ligero que se utilizan para el transporte de cables de energía eléctrica en su capacidad de

<sup>12</sup> INGEPLAN, Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para las conducciones de saneamiento de poblaciones Definición y clasificación de tubos de PVC. Capítulo II. Artículo 129. 6 págs. Disponible en Internet: [http://www.elorrio.eus/esS/Ayuntamiento/PerfilContratante/2014%20Proyecto%20de%20urbanizacion%20del%20vial%20y%20puente6/P1201\\_PPTP\\_129\\_V03.pdf](http://www.elorrio.eus/esS/Ayuntamiento/PerfilContratante/2014%20Proyecto%20de%20urbanizacion%20del%20vial%20y%20puente6/P1201_PPTP_129_V03.pdf)

<sup>13</sup> NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 382). Plásticos. Tubos de poli cloruro de vinilo, clasificados según la presión RDE. Bogotá, Colombia. 2011. 25 págs.

resistencia. Los tubos de tipo ligero generalmente se utilizan para el encauchetado de redes de gas (NTC 2505)<sup>14</sup>, cuya tubería principal se realiza con tubos de cobre y soldadura de estaño. Los tubos de agua y electricidad son de color blanco y verde respectivamente. Para la tubería de agua en obras pequeñas generalmente se utilizan diámetros desde ½ “, hasta 1”, mientras que para la tubería eléctrica se utilizan diámetros de ½”. Los diámetros mayores en obras pequeñas son utilizados para las bajantes de canales receptoras de aguas lluvias, las cuales manejan otro tipo de caudales, también son manejados los diámetros mayores para el transporte de desechos sanitarios, los cuales son de color amarillo. En la cuadro 2 se presentan los diámetros que se manejan para tuberías.

Cuadro 2. Diámetros de tuberías internas.

DIAMETRO NOMINAL		REFERENCIA		DIAMETRO EXTERIOR PROMEDIO		ESPESOR DE PARED MINIMO		PESO METRO
		TUBO 5 METROS	TUBO 6 METROS	(mm)	(pulgada)	(mm)	(pulgada)	
(mm)	(pulgada)							(kg)
48	1 ½	1110015006	1110016006	48.26	1.900	2.79	0.110	0.6
60	2	1110015007	1110016007	60.32	2.375	2.92	0.115	0.8
82	3	1110015009	1110016009	82.56	3.250	3.18	0.125	1.2
114	4	1110015010	1110016010	114.30	4.500	3.30	0.130	1.8
168	6	1110015011	1110016011	168.28	6.625	4.12	0.162	3.3
219	8	1110015012	1110016012	219.08	8.625	5.33	0.209	5.4

Fuente: DURMAN, Esquivel. Tubos y accesorios de PVC. Bogotá, Colombia. 2005. 6 págs. Disponible en internet: [https://www.coval.com.co/pdfs/manuales/man\\_durman\\_sanitaria.pdf](https://www.coval.com.co/pdfs/manuales/man_durman_sanitaria.pdf).

## 2.9.1 Tubos de Suministro

A continuación se presenta una descripción de la tubería comúnmente utilizada para el acercamiento de los servicios a la zona interna de la construcción, desde la tubería en cobre hasta la tubería en PVC.

### 2.9.1.1 Tubos de Cobre

Son extremadamente duraderos y seguros, pero su costo es relativamente alto. Usualmente son utilizados en el hogar para las líneas de suministro con diámetros entre 12 mm (1/2”) y 25 mm (1”). Pueden ser rígidos o flexibles y con paredes más o menos gruesas. En el sistema norteamericano, el espesor de las paredes se indica con letras, M, L, y K en forma creciente, siendo los de grado M los que poseen las paredes más finas y son adecuados para la mayoría de las aplicaciones domésticas. Los de grado L se requieren por algunos códigos locales para su uso en locales comerciales y en ciertas aplicaciones domésticas y por último los de grado K se usan para las entradas principales de suministro soterradas.

<sup>14</sup> NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 2505). Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales. Bogotá, Colombia. 2006. 46 págs.

Para ciertas situaciones donde los tubos de desagüe están a la vista (por ejemplo, fregaderos o lavamanos) es frecuente que se usen tubos de cobre o latón, cromados para las partes visibles, por razones de estética y limpieza.

Los tubos de cobre rígidos de grado M están estandarizados por su diámetro interior, los de grado L y K se clasifican por su diámetro exterior.<sup>15</sup>

### **2.9.1.2 Tubos de CPVC**

Estos tubos plásticos están hechos de policloruro de vinilo clorado son utilizados para las líneas de suministro de agua en aquellas zonas donde estén permitidos por los códigos locales, son muy duraderos, resistentes a altas temperaturas (90°C) y soportan con seguridad las presiones normales de las líneas domésticas. Son más fáciles de trabajar que los tubos de cobre, más flexibles y más baratos.<sup>16</sup>

### **2.9.1.3 Tubos de PVC**

Están hechos de policloruro de vinilo, están indicados en muchas partes por los códigos locales de plomería solo para las aguas de desagüe, especialmente cuando los valores de presión en la línea son altos y existe el peligro de congelamiento. También se usan para los sistemas de riego por aspersión de los jardines; estos tubos son muy baratos y fáciles de trabajar.

Los tubos de PVC pueden acoplarse roscados, pegados a tope con calor y presión, por medio de un acampanado en uno de los extremos del tubo que acopla con el extremo sin campana del otro, usando pegamento, o bien con el uso de accesorios de empate pegados.<sup>17</sup>

### **2.9.1.4 Tubos de PEX**

Los tubos de polietileno reticulado están adquiriendo cada vez más popularidad y han emergido como los tubos flexibles más comunes para el suministro de agua en los hogares, aunque pueden no estar aprobados para ese uso en ciertas localidades. Están disponibles en varias medidas y usualmente se adquieren en rollos, aunque también los hay rectos. Son muy duraderos, aunque se usen en agua caliente.

Aun son algo caros, pero el costo se puede ver compensado por la facilidad de montaje, al no ser necesarias las uniones en muchas aplicaciones, ya que su

---

<sup>15</sup> FONTANERIA Y SANEAMIENTO VOLUMEN III. Tubos de suministro. 1ª Edición: diciembre 2006. Tornapunta Ediciones, S.L.U. España. 25 págs. Disponible en internet <http://libreria.fundacionlaboral.org/ExtPublicaciones/Fontaneria%20y%20saneamiento%20III.pdf>

<sup>16</sup> FONTANERIA Y SANEAMIENTO VOLUMEN III. Tubos de suministro. 1ª Edición: diciembre 2006. Tornapunta Ediciones, S.L.U. España. 25 págs. Disponible en internet <http://libreria.fundacionlaboral.org/ExtPublicaciones/Fontaneria%20y%20saneamiento%20III.pdf>

<sup>17</sup> FONTANERIA Y SANEAMIENTO VOLUMEN III. Tubos de suministro. 1ª Edición: diciembre 2006. Tornapunta Ediciones, S.L.U. España. 25 págs. Disponible en internet <http://libreria.fundacionlaboral.org/ExtPublicaciones/Fontaneria%20y%20saneamiento%20III.pdf>

relativa flexibilidad, permite en muchos casos, serpentear entre las paredes y pisos, desde el punto de inicio hasta el fin de la línea, lo que lo hace ideal para desarrollar un proyecto de una línea nueva, o para sustituir viejas líneas de tubos deteriorados. No pueden tomar curvas muy cerradas, pero en caso de ser necesario, existen accesorios curvos acoplables al tubo para ello.

En los lugares donde se pueden usar estos tubos para las líneas de suministro, los acoplamientos que se hagan no pueden quedar ocultos dentro de las paredes, lo usual es que se utilicen piezas con múltiples conexiones (figura 6) montadas en lugares con acceso, y desde donde se distribuyen las líneas a las diferentes zonas y llaves de la casa con un conducto entero entre el múltiple y la conexión final.

Están disponibles en diferentes colores por lo que se pueden diferenciar, por ejemplo, las líneas de agua caliente de las de agua fría.

Las tuberías de aluminio no deben disponerse al interior del concreto, dado que la reacción entre elementos como el aluminio y el concreto no es apropiada para el desempeño del mismo, de la misma manera que dicho material no debe afectar significativamente la resistencia de la estructura, al atravesar losas, vigas o muros de contención. Los ductos no deben ocupar más del 4% de la sección transversal de la viga, y no deberán tener dimensiones mayores a 1/3 del espesor de la losa (ACI 318 SR-05).

## **2.10 DISEÑO DE MEZCLA EN CONCRETO HIDRÁULICO**

La dosificación de una mezcla de concreto es la determinación de la combinación más económica y practica de los componentes del concreto, cemento, agua, agregado grueso y en ciertos casos aditivos para que este sea “trabajable” en su estado plástico y para que adquiera las propiedades requeridas en su estado sólido.<sup>18</sup>

Para encontrar las proporciones más apropiadas, será necesario preparar varias mezclas de prueba, las cuales se calcularán con base en las propiedades de los materiales y la aplicación de leyes o principios básicos preestablecidos. Las características de las mezclas de prueba indicarán los ajustes que deben hacerse en la dosificación de acuerdo con reglas empíricas determinadas.

### **2.10.1 Selección del asentamiento**

El asentamiento se selecciona teniendo en cuenta los parámetros contemplados en el cuadro 3, es decir, la consistencia requerida de la mezcla, el tipo de estructura y las condiciones de colocación del concreto y el grado de manejabilidad solicitados por el diseño.

---

<sup>18</sup> RIVERA, Gerardo. Dosificación de mezclas de concreto. Generalidades. 2009. Universidad del Cauca, Colombia. 255 págs.

Cuadro 3. Asentamientos típicos según el tipo de mezcla.

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO mm.	EJEMPLO DE TIPO DE CONSTRUCCIÓN	SISTEMA DE COLOCACIÓN	SISTEMA DE COMPACTACIÓN
MUY SECA	0,0 – 20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantalla de cimentación.	Con vibradores de formaleta, concretos de proyección neumática (lanzados).	Secciones sujetas a vibración externa, puede requerirse presión.
SECA	20-35	Pavimentos.	Pavimentos con máquina terminadora vibratoria.	Secciones sujetas a vibración intensa.
SEMISECA	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple, losas poco reforzadas.	Colocación con máquinas operadas manualmente.	Secciones simplemente reforzadas con vibración.
MEDIA (PLÁSTICA)	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas, columnas, cimentaciones.	Colocación manual.	Secciones simplemente reforzadas con vibración.
HÚMEDA	100-150	Elementos estructurales esbeltos o muy reforzados.	Bombeo.	Secciones bastante reforzadas con vibración.
MUY HÚMEDA	150-200	Elementos esbeltos, pilotes fundidos "in situ".	Tubo-embudo-tremie.	Secciones altamente reforzadas con vibración.
SÚPER FLUIDA	más de 200	Elementos muy esbeltos.	Autonivelante, autocompactante.	Secciones altamente reforzadas sin vibración y normalmente no adecuados para vibrarse.

Fuente: RIVERA, Gerardo. Dosificación de mezclas de concreto. Generalidades. 2009. Universidad del Cauca, Colombia. 255 págs. Tabla N°8.1

### 2.10.2 Selección del Tamaño Máximo Nominal (TMN)

El tamaño máximo nominal se obtiene mediante los resultados del ensayo granulométrico de los agregados gruesos y debe cumplir los requisitos del NSR/10:

1/3 (Espesor de la losa)

1/5 (Menor distancia entre lados de formaleta)

3/4 (Espacio libre entre varillas de refuerzo).

### 8.3 Estimación del agua de mezcla.

Se supone una cantidad de agua, según el cuadro No. 3, con el asentamiento escogido y de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado, teniendo en cuenta si es concreto con aire incluido o no. Si se va a emplear aditivo se deben consultar las recomendaciones del fabricante, en especial si es un plastificante o un súperplastificante.

Cuadro 4. Cantidad de agua recomendada en kg/m<sup>3</sup> según el tipo de concreto.

ASENTAMIENTO (cm)	CONCRETOS CON AIRE INCLUIDO						
	TAMANOS MÁXIMOS NOMINALES (mm)						
	10	13	19	25	38	50	75
0,0 – 2,5	175	170	155	150	135	130	120
3,0 – 5,0	180	175	165	160	145	140	135
5,5 – 7,5	190	185	175	170	155	150	145
8,0 – 10,0	200	190	180	175	165	155	150
10,5 – 15,0	210	195	185	180	170	160	155
15,5 – 18,0	215	205	190	185	175	165	160
% CONTENIDO DE AIRE	8,0	7,0	6,0	5,0	4,5	4,0	3,5

Fuente: RIVERA, Gerardo. Dosificación de mezclas de concreto. Generalidades. 2009. Universidad del Cauca, Colombia. 255 págs. Tabla N°8.2

### 2.10.3 Determinación de la resistencia de dosificación

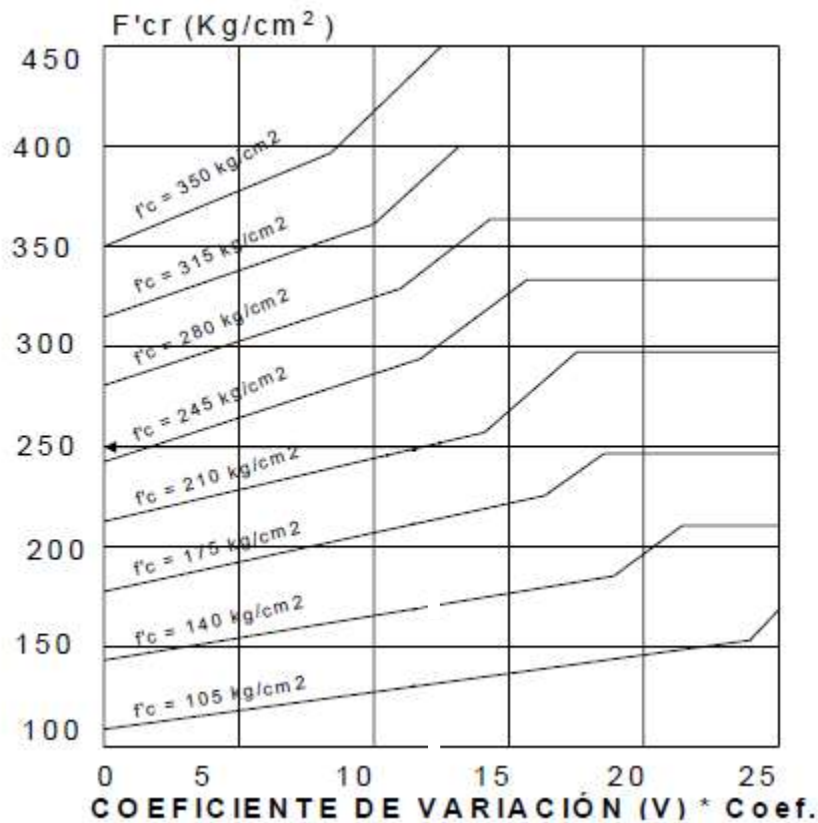
El concreto se debe dosificar y producir para asegurar una resistencia a la compresión promedio lo suficientemente alta para minimizar la frecuencia de los resultados de pruebas de resistencia por debajo del valor de la resistencia a la compresión especificada del concreto.

### 2.10.4 Selección de la relación Agua/Cemento

La relación agua/cemento no solo se determina por los requisitos de resistencia sino también por factores como la durabilidad y propiedades para el acabado. La utilización de baja relaciones agua cemento prolonga la vida útil del concreto reduciendo la penetración de líquidos agresivos, siendo la más baja 0.3 y la más alta 0.8.



Ilustración 14. Resistencia a la compresión de dosificación de concreto vs coeficiente de variación.



Fuente: RIVERA, Gerardo. Dosificación de mezclas de concreto. Generalidades. 2009. Universidad del Cauca, Colombia. 255 págs. Figura N°8.1

Se deberá trabajar con el menor valor de relación agua/cemento, puesto que este valor garantiza tanto la resistencia como la durabilidad del concreto.

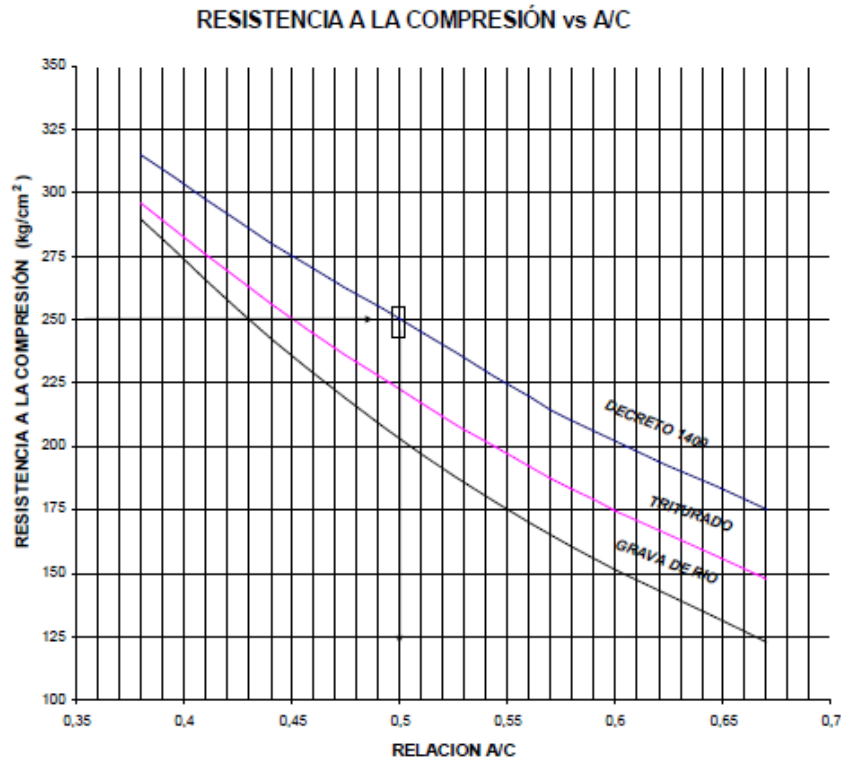
### 2.10.5 Cálculo del contenido de cemento y aditivo

La cantidad de kilogramos de cemento por metro cubico de concreto se obtiene mediante la división del contenido estimado de agua en la mezcla sobre la relación agua cemento de la mezcla (ecuación 1) Luego se halla el volumen de cemento por metro cubico dividiendo la cantidad en kilogramos por la densidad obtenida en el ensayo realizado en el laboratorio.

Ecuación 1. Cantidad de cemento en una mezcla de cemento

$$C = \frac{A}{A/C}$$

Ilustración 15. Resistencia a la compresión Vs A/C



Fuente: RIVERA, Gerardo. Dosificación de mezclas de concreto. Generalidades. 2009. Universidad del Cauca, Colombia. 255 págs. Figura N°8.2

### 2.10.6 Selección de la proporción de porcentaje adecuado de agregados

La información recopilada de masa unitaria seca y compacta de diferentes proporciones de agregado grueso y fino convencional, fue utilizada para llevar a cabo en el laboratorio el ensayo de determinación de masa unitaria resultante de la combinación de agregados según la mezcla de porciones de cada uno. Obteniendo los anteriores valores se realiza la gráfica de porcentaje de vacío (ecuación N°2) vs la densidad aparente (ecuación N°3)

Ecuación N°2. Peso aparente

$$\text{Peso Aparente} = \% \text{ agregado grueso} \times \text{peso específico del agregado grueso} + \% \text{ de agregado fino} \times \text{peso específico de agregado fino}$$

Para la selección de la mezcla indicada primero se determina el peso específico aparente de la mezcla (ecuación 2). Con la densidad aparente de las mezclas y la masa unitaria compacta se halla el porcentaje de vacío (ecuación 3).

Ecuación 3. Porcentaje de vacíos

$$\text{Porcentaje de vacios} = \frac{\text{Densidad aparente} - \text{masa unitaria}}{\text{densidad aparente}} \times 100$$

### 2.10.7 Cálculo de proporciones iniciales

El método más utilizado para expresar las proporciones de una mezcla de concreto, es el de indicirlas en forma de relaciones por masa de agua, cemento y agregados, tomando como unidad el cemento.

Para evitar confusiones cuando hay varias clases de agregado fino y agregado grueso, es conveniente colocar las proporciones en orden ascendente de tamaño (primero la arena con módulo de finura menor y por último el agregado grueso de mayor tamaño máximo). Además de lo anterior, se considera conveniente colocar antes de la unidad el valor de la masa del agua, o sea la relación agua/cemento.

Si se utiliza aditivo, además de las proporciones, se debe dar la cantidad escogida (% en masa del cemento).

$$\frac{A}{C} : 1(C) : Fi : Gi$$

Proporción agregado i = (Masa del agregado i) / C

### 2.10.8 Primera mezcla de prueba.

Para fabricar la primera mezcla de prueba es necesario tener en cuenta la cantidad de agua de los agregados (humedad) y el porcentaje de absorción de los mismos, de manera que se conozca el aporte de agua de los agregados y se relacione con la cantidad de agua inicial.

#### 2.10.9.1 Ajuste por humedad de los agregados

Al preparar la primera mezcla de prueba deberá utilizarse la cantidad de agua necesaria para producir el asentamiento escogido. Si ésta cantidad de agua por m<sup>3</sup> de concreto difiere de la estimada, es necesario, calcular los contenidos ajustados de agua, cemento y agregados, y las proporciones ajustadas, teniendo en cuenta que, si se mantiene constante el volumen absoluto de agua y agregado grueso por unidad de volumen de concreto, el asentamiento no presenta mayor cambio al variar un poco los volúmenes absolutos de cemento y agregado fino.

### **2.10.9.2 Ajuste por resistencia**

Se prepara una segunda mezcla de prueba con las proporciones ajustadas, que debe cumplir con el asentamiento y se elaboran muestras para el ensayo de resistencia.

Si las resistencias obtenidas difieren de la resistencia de dosificación, se reajustan los contenidos de agua, cemento y agregados, sin perjudicar durabilidad. Las proporciones reajustadas se calculan variando las cantidades de cemento y agregado fino para obtener la nueva relación agua/cemento, pero dejando constante la cantidad de agua y agregado grueso por volumen unitario de concreto, para mantener el asentamiento.

## CAPÍTULO III- METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se muestra una descripción para cada uno de los casos en estudio del procedimiento llevado a cabo para realizar la dosificación, el reporte de las fundiciones realizadas según el caso de estudio, al igual que el análisis de cargas para la viga con refuerzo.

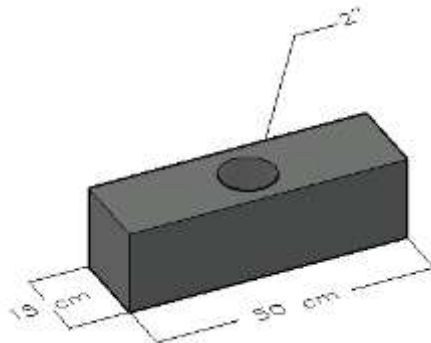
### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

En el presente numeral se resumen cada uno de los casos que se van a desarrollar en el presente trabajo, enfatizando en la composición de los mismos, los valores que se esperan obtener a partir del ensayo y reconociendo los factores más importantes en cada uno de ellos.

#### 3.1.1 Caso 1- Tubo de 2" ubicado en el centro de la base de la viga

Con el objetivo de determinar la influencia de un tubo ubicado en el punto medio de la viga ubicado transversalmente, se ensaya un tubo de 2" en el tercio central, rayando el límite de la condición impuesta por la normativa colombiana vigente (NSR-10), la cual, entre las recomendaciones que ofrece, señala que no deben introducirse tubos cuyo diámetro sea mayor a  $1/3$  del ancho o alto de la viga; la viga de ensayo tiene 15 cm de ancho, con lo cual las 2" (5,08 cm) están en el límite de lo establecido por la normativa. En la ilustración 20 se presenta el diagrama del caso en estudio.

Ilustración 16. Tubo de 2" ubicado en el centro de la viga.



Fuente: autores.

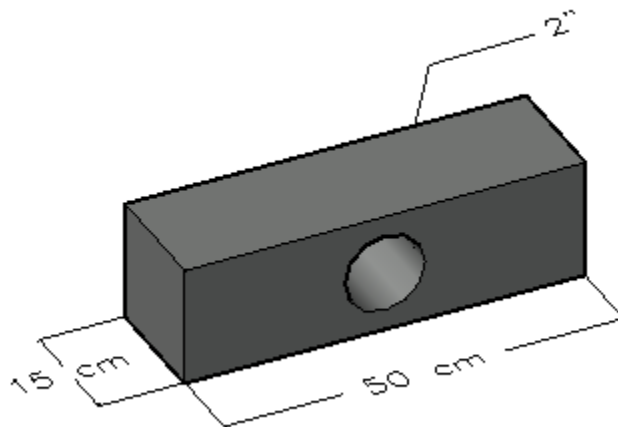
En este caso el tubo atravesará verticalmente la viga, con el objetivo de simular el daño que representa la inserción de un tubo de 2" en una viga o vigueta; esta situación generalmente se presenta en la zona de baños auxiliares, para los cuales se manejan tuberías de diámetros menores a los regulares, dado el poco uso que

tienen los mismos. Se evaluara su resistencia a partir del módulo de rotura y se observara detalladamente el patrón de grietas que representa este caso.

### **3.1.2 Caso 2- Tubo de 2" ubicado en el centro del costado lateral de la viga.**

Para emular la condición de un tubo atravesando la viga a lo ancho de su base, se presenta el caso 2, el cual se diseña con el fin de determinar la influencia de un tubo ubicado en el centro de los costados laterales de la viga. Se trabajara, al igual que el caso 1, con un tubo de 2" de diámetro y verticalmente estará ubicado a la mitad de la altura de la viga ( $h/2$ ), tal como se presenta en la ilustración 21.

Ilustración 17. Tubo de 2" ubicado en el costado lateral de la viga.



Fuente: autores.

De la misma manera que el caso 1, el tubo de 2" está en el límite de lo estipulado por el reglamento NSR-10, de manera que se evalúe la condición más crítica de la norma, y se defina el patrón de grietas obtenidas tras introducir un tubo atravesando la viga. Esta situación se presenta generalmente en el tendido de tuberías de luz y agua, ya que por razones diversas no existe la posibilidad de instalar la tubería por un lugar diferente al interior de la viga. Se evaluara el módulo de rotura de la viga en esta condición y la pérdida de capacidad de carga de la viga como consecuencia de la introducción de un tubo.

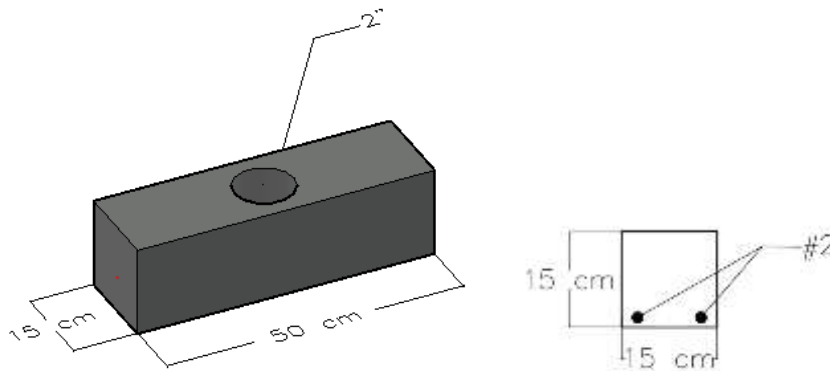
### **3.1.3 Caso 3- Tubo de 2" ubicado en el centro de la viga reforzada**

Es uno de los casos más representativos de la situación real en las obras, ya que considera la existencia de un refuerzo longitudinal en la viga, de manera que se solucione hasta cierto punto la falla por flexión. Se considera un tubo de 2", similar a la posición del caso 1, en el centro de la base de la viga y en el centro de la luz de la viga, la cual se encuentra reforzada con dos varillas #2 en la parte inferior, de

manera que se solucione el momento para una carga específica. En la ilustración 22 se presenta la situación en estudio.

En este caso se desea determinar la pérdida de capacidad de carga de la viga, en función de un tubo de 2" embebido en su tercio central, considerando que la viga en sus condiciones teóricas (sin tubo) tendrá una capacidad de carga específica y existe la posibilidad de realizar el comparativo entre la condición teórica y la práctica, de manera que se evalúe la afectación. También se medirá el módulo de rotura de la viga reforzada, teniendo en cuenta cada uno de los puntos de fluencia (concreto y acero).

Ilustración 18. Tubo de 2" ubicado en el centro de la base de la viga reforzada.



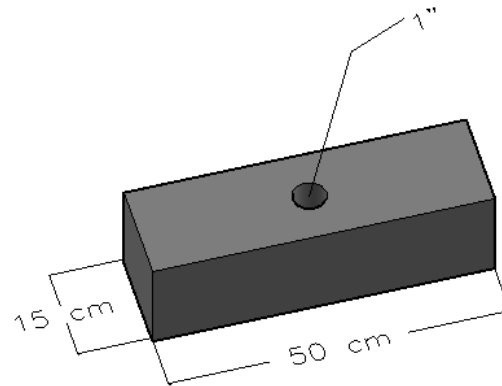
Fuente: autores.

Este caso se presenta generalmente en zonas de baños auxiliares o cocinetas en edificios de aparta estudios.

### 3.1.4 Caso 4- Tubo de 1" ubicado en el centro de la base de la viga

El caso 4 es de carácter comparativo con el caso 1, ya que su única diferencia radica en el diámetro del tubo con el cual se va a trabajar, ya que para el caso 1 se trabajó con un tubo de 2", mientras que en este caso se trabajara un tubo de 1". El objetivo de realizar este ensayo radica en determinar la influencia del diámetro de los tubos en el proceso de falla de la viga, reconociendo la capacidad de carga de cada una de las vigas y realizando un comparativo entre las cargas obtenidas. El tubo estará ubicado en el centro de la base de la viga ( $b/2$ ) y en el centro de la luz de la viga ( $L/2$ ), tal como se muestra en la ilustración 23.

Ilustración 19. Tubo de 1" ubicado en el centro de la luz de la viga.



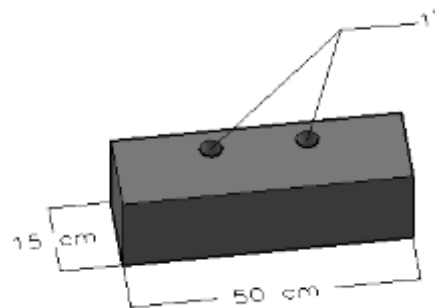
Fuente: autores.

En esta condición, será necesario evaluar el módulo de rotura, de manera que sea posible evaluar la capacidad de carga de la viga tras el cambio de diámetro entre los casos 1 y 4.

### 3.1.5 Caso 5- Tubos de 1" ubicados en los límites del tercio central de la viga

El objetivo del caso 5 es determinar la influencia de dos tubos en los límites del tercio central de la viga, tanto por izquierda, como por derecha, los cuales tendrán un diámetro de 1" y estarán separados a 1/3 de la luz de la viga, tal como se muestra en la ilustración 24. La recomendación de la NSR-10 describe que la separación de los embebidos en una viga debe ser mayor a 3 veces su diámetro, con lo cual se estará evaluando una condición promedio de la separación, ya que la separación entre tubos será de aproximadamente 15 cm y el limite estaría en las 3", es decir 7.62 cm, aproximadamente la mitad.

Ilustración 20. Tubos de 1" ubicados en los límites del tercio central de la viga.



Fuente: autores.

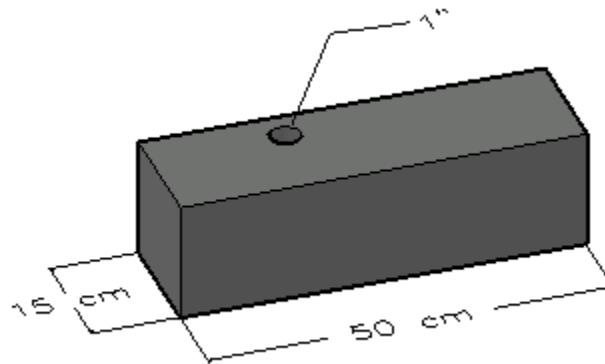


Se evaluará el módulo de rotura de la viga, el cual tendrá valores bajos, dado que la aplicación de la carga se realiza directamente sobre los tubos, con lo cual se espera un debilitamiento mayor de la viga; se verificará el patrón de grietas obtenidas tras el proceso de falla y la pérdida de capacidad de carga del concreto tras introducir dos tubos en la luz de la viga.

### 3.1.6 Caso 6- Tubo de 1" ubicado en el límite derecho del tercio central de la viga

El caso 6 es el comparativo del caso 5, ya que en este se trabajara únicamente un tubo ubicado en el límite derecho del tercio central de la viga, pero se ubicara a  $\frac{1}{4}$  del extremo de la base de la viga, tal como se muestra en la ilustración 25. Es importante evaluar las afectaciones de un tubo ubicado cerca al extremo de la viga, ya que en muchas ocasiones se considera que, por estar cerca al extremo de la viga no afectara de ninguna forma la misma, mas es necesario corroborar dicha afirmación.

Ilustración 21. Tubo de 1" ubicado en límite derecho del tercio central de la viga.



Fuente: autores.

Es necesario evaluar el módulo de rotura para este caso, reconociendo el daño que produce la aplicación de una de las cargas en uno de los límites del tercio central de la viga, al igual que el patrón de grietas que se producen en el proceso de falla, con el fin de reconocer las características del daño. Esta situación generalmente se presenta en columnas y vigas, tras el tendido de tuberías relacionadas con la conducción del agua y la energía eléctrica.

### 3.2 DOSIFICACIÓN PARA UN CONCRETO DE 21 Mpa.

A continuación se presenta el procedimiento llevado a cabo para la realización de una dosificación para un concreto de 21 Mpa, teniendo en cuenta los 10 pasos que generalmente se utilizan para la realización de la misma.

### 3.2.1 Asentamiento

Para la selección del asentamiento se tendrá en cuenta el tipo de mezcla que se quiere obtener al final, teniendo en cuenta factores como plasticidad, de manera que sea consecuente con los elementos estructurales que se están trabajando, tal como se muestra en el cuadro 5.

Cuadro 5. Selección del asentamiento de la mezcla.

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO mm.	EJEMPLO DE TIPO DE CONSTRUCCIÓN	SISTEMA DE COLOCACIÓN	SISTEMA DE COMPACTACIÓN
MUY SECA	0,0 – 20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantalla de cimentación.	Con vibradores de formaleta, concretos de proyección neumática (lanzados)	Secciones sujetas a vibración externa, puede requerirse presión.
SECA	20-35	Pavimentos.	Pavimentos con máquina terminadora vibratoria.	Secciones sujetas a vibración intensa.
SEMISECA	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple, losas poco reforzadas.	Colocación con máquinas operadas manualmente.	Secciones simplemente reforzadas con vibración.
<b>MEDIA (PLÁSTICA)</b>	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas, columnas, cimentaciones.	Colocación manual.	Secciones simplemente reforzadas con vibración.
HUMEDA	100-150	Elementos estructurales esbeltos o muy reforzados.	Bombeo.	Secciones bastante reforzadas con vibración.
MUY HUMEDA	150-200	Elementos esbeltos, pilotes fundidos "in situ".	Tubo-embudo-trémie.	Secciones altamente reforzadas con vibración.
SUPER FLUIDA	más de 200	Elementos muy esbeltos.	Autonivelante, autocompactante.	Secciones altamente reforzadas sin vibración y normalmente no adecuados para vibrarse.

Fuente: RIVERA, Gerardo. Concreto Simple. Resistencia del concreto. Universidad del Cauca. 267 Págs.

De esta manera el asentamiento elegido será el correspondiente a una mezcla media (plástica), tomando el valor promedio entre los límites expuestos, los cuales son: 50-100 por ende, se tomará un valor de 75 mm.

### 3.2.2 Verificación o selección del tamaño máximo nominal (TMN)

Para la selección del tamaño máximo nominal de la grava, se tendrá en cuenta que no sea 3 veces mayor que la altura de la viga, de manera que el tamaño máximo deberá ser menor a 5 cm. Tras realizar la evaluación del material se presenta un tamaño máximo de 1", con lo cual el tamaño máximo será de 25mm, por lo tanto se espera que el material cumpla la siguiente condición:  $25 \text{ mm} \leq 1/3 h$ , h se asume como una losa de concreto de 10 cm de espesor, luego la condición del TMN estará dada por:

$$25 \text{ mm} \leq 33.33 \text{ mm}$$

Consecuentemente los agregados utilizados cumplen con lo estipulado por el reglamento NSR.

### 3.2.3 Resistencia de dosificación de la mezcla de concreto

Se elige la resistencia a la compresión en función a la resistencia utilizada generalmente en obras que no superan los 3 niveles de altura, en este caso 210 kg/cm<sup>2</sup>, y se realiza la evaluación de criterios para conocer la resistencia de diseño.

➤ Criterio 1: Probabilidad de obtener valores menores a 35 MPa es del 100%

Como se mencionó anteriormente  $f'_c$  va a ser 21 MPa, el coeficiente de variación (CV) es un valor que se obtiene a partir de interpolación, tal como se observa en el cuadro 6. Para este caso se tomara un coeficiente de variación de 5%, teniendo en cuenta las condiciones de laboratorio, además de tomar un factor de corrección K con un valor de 1.

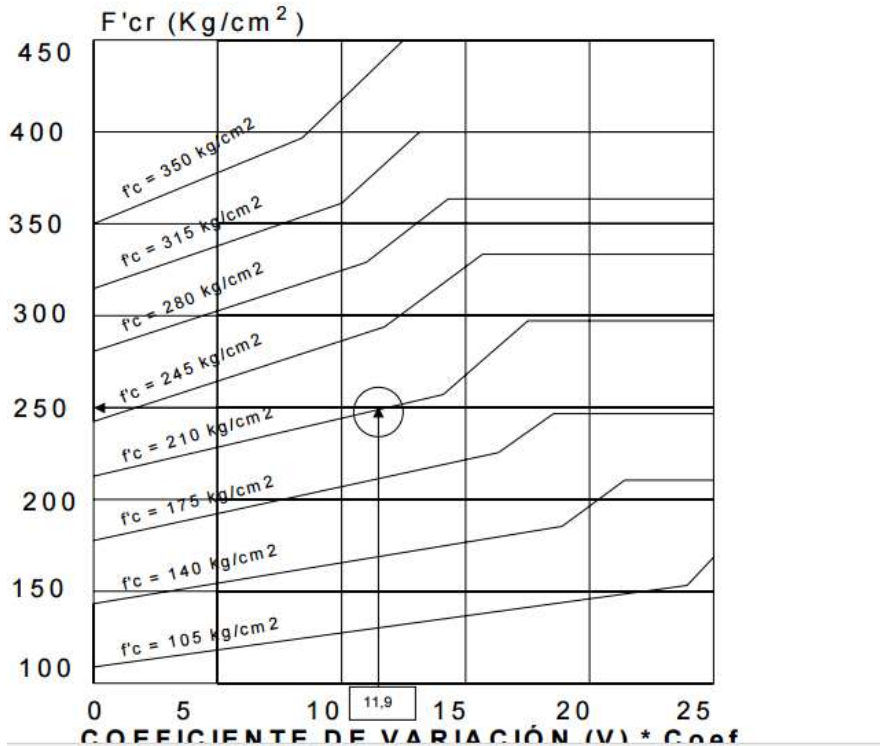
De esta manera la evaluación del criterio 1 será:

$$f'_{cr} = \frac{f'_c - 35}{1 - 2.326 * CV * K}$$

$$f'_{cr} = \frac{21 - 3.5}{1 - 2.326 * 0.05 * 1}$$

$$f'_{cr} = 19.803 \text{ MPa}$$

Cuadro 6. Selección del coeficiente de variación.



Fuente: RIVERA, Gerardo. Concreto Simple. Resistencia del concreto. Universidad del Cauca. 267 Págs.

- Criterio 2: Probabilidad de obtener  $RC < f'_c$  para muestras de 3 ensayos debe ser menor a 1%

$$f'_{cr} = \frac{f'_c}{1 - 1,342 * CV * K}$$

$$f'_{cr} = \frac{21}{1 - 1,342 * 0,05 * 1}$$

$$f'_{cr} = 22,5105 \text{ MPa}$$

- Criterio 3: según NSR-10

Teniendo en cuenta el cuadro 7, proporcionada por el reglamento NSR-10, para la resistencia promedio a la compresión, la cual se establece en base a una resistencia inicial y presenta unos factores de mayoración para la resistencia de diseño, se trabaja la ecuación indicada.

Cuadro 7. Resistencia a compresión promedio de la mezcla- Criterio NSR-10

**TABLA C.5.3.2.2 — RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN REQUERIDA CUANDO NO HAY DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MUESTRA**

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$

Fuente: Norma sismo resistente NSR-10, Título C.

Teniendo en cuenta que se está trabajando en MPa, la resistencia según el reglamento NSR-10 es:

$$f'_{cr} = f'_c + 83$$

$$f'_{cr} = 210 + 83 = 293 \text{ MPa}$$

La resistencia promedio a la compresión seleccionada será la mayor de los dos primeros criterios, pero no mayor al tercer criterio, es decir, 225.105 kg/cm<sup>2</sup>.

### 3.2.4 Estimación de cantidad de agua

Para estimar la cantidad de agua de la mezcla, se tiene en cuenta el TMN del agregado grueso y el asentamiento seleccionado anteriormente, dependiendo si se trabajaran concretos con o sin aire incluido. En este caso se trabajaran concretos sin aire incluido, con lo cual se tomaran los datos proporcionados por el cuadro 8.

Cuadro 8. Estimación de la cantidad de agua para un concreto sin aire incluido.

ASENTAMIENTO (cm)	CONCRETOS SIN AIRE INCLUIDO						
	TAMAÑOS MÁXIMOS NOMINALES (mm)						
	10	13	19	25	38	50	75
0,0 – 2,5	185	180	165	160	140	135	125
3,0 – 5,0	205	200	185	180	160	155	145
5,5 – 7,5	215	210	190	185	170	165	155
8,0 – 10,0	225	215	200	195	175	170	165
10,5 – 15,0	235	225	205	200	180	175	170
15,5 – 18,0	240	230	210	205	185	180	175
% CONTENIDO DE AIRE	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3

Fuente: RIVERA, Gerardo. Concreto Simple. Resistencia del concreto. Universidad del Cauca. 267 Págs.

Tras realizar la interpolación en el cuadro 8, se observa que la cantidad de agua para una mezcla de 21 Mpa es aproximadamente de 185 kg por cada metro cubico de concreto.

### 3.2.5 Relación agua cemento (a/c)

La relación agua/cemento se elige en función de la resistencia a compresión esperada y la procedencia del material de agregado grueso, que en este caso es grava de río. Se realiza la interpolación como se observa en el cuadro 9, en lo referente a la línea roja.

### 3.2.6 Calculo cantidad de cemento

La cantidad de cemento se calculó mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{A}{A/C}$$

$$C = \frac{185}{0.48} = 385.416 \text{ kg/m}^3 \text{ de ccto.}$$

Cuadro 9. Estimación de la relación agua/cemento.



Fuente: GOBIERNO NACIONAL. Decreto 1400 de 1984. Código de construcciones sísmo-resistentes. Bogotá, Colombia. 18 págs.

De acuerdo con lo anterior, la relación agua/cemento utilizada para la mezcla es de 0.48.

### 3.2.7 Cálculo de la cantidad de agregado

Para realizar el cálculo de la cantidad de agregado es necesario conocer las densidades de los materiales (grava, arena, cemento), en su condición superficial, ya que a partir de estas se realizarán las interpolaciones y cálculos respectivos. Los datos iniciales se presentan en el cuadro 10.

Cuadro 10. Propiedades iniciales de los materiales.

<b>PROPIEDADES DE LOS MATERIALES</b>		
	<b>GRAVA</b>	<b>ARENA</b>
Densidad relativa aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	2.133	2.585
Absorción (%)	4.134	1.709
Humedad (%)	4.657	0.014
Y Apisonado	1.6	N.A
Modulo de finura	N.A	2.41
Densidad del cemento (gr/cm <sup>3</sup> )	3.05	

Fuente: autores.

Dado que la suma del volumen de los materiales es igual a un metro cúbico de concreto o mil litros de concreto, se trabaja a partir de la siguiente ecuación:

$$volumen\ abs.\ agregados + Vol.\ abs.\ agua + vol.\ abs.\ cemento = 1000$$

Donde el volumen de los agregados es:

$$volumen\ abs.\ agregados = 1000 - \frac{Masa\ agua}{G_a} - \frac{Masa\ cemento}{G_c}$$

$$volumen\ abs.\ agregados = 1000 - \frac{185}{1} - \frac{385.416}{3.05}$$

$$volumen\ abs.\ agregados = 688.634\ dm^3$$

Con el fin de conocer el volumen de los agregados, a partir de la utilización del método de la ACI (American Concrete Institute), será necesario realizar la interpolación en el cuadro 11, de manera que de allí se conoce el volumen de agregados gruesos, teniendo en cuenta el módulo de finura y la densidad apisonada del agregado grueso.

Tras realizar la interpolación, entrando con un tamaño máximo nominal de 1", se obtuvo un porcentaje de agregados gruesos de 460 dm<sup>3</sup>, con lo cual es posible obtener el volumen de la arena a partir de la siguiente ecuación:

$$Volumen\ de\ la\ arena = 1000 - (vol.\ de\ agua + vol.\ de\ cemento + vol.\ de\ grava)$$

$$Volumen\ de\ la\ arena = 1000 - (185 + 126.36 + 460)$$

$$Volumen\ de\ la\ arena = 228.64\ dm^3$$



De esta manera sera posible conocer las proporciones iniciales de la mezcla, teniendo en cuenta el volumen y las densidades unitarias de cada uno de los materiales.

Cuadro 11. Estimacion de la cantidad de agregados.

Tamaño máximo agregado grueso	Modulo de finura de la arena (MF)								
	0	1	2	2.4	2.75	3.1	4	5	6
3/8"	0.70	0.63	0.54	0.5	0.45	0.39	-	-	-
1/2"	0.74	0.69	0.61	0.57	0.53	0.48	0.3	-	-
3/4"	0.8	0.75	0.68	0.65	0.62	0.58	0.44	-	-
1"	0.82	0.78	0.72	0.69	0.66	0.63	0.51	0.21	-
1 1/2"	0.85	0.81	0.76	0.73	0.71	0.68	0.59	0.33	-
2"	0.87	0.83	0.79	0.76	0.74	0.71	0.64	0.47	-
3"	0.89	0.86	0.82	0.8	0.78	0.76	0.64	0.56	0.21
6"	0.93	0.91	0.87	0.86	0.84	0.82	0.76	0.66	0.51

Fuente: GIRALDO, Orlando. Diseño de mezclas de hormigon. Metodo ACI 211.1. Medellin, Colombia. 58 págs.

### 3.2.8 Cálculo de las proporciones iniciales

A partir del conocimiento de los volúmenes de los materiales, es posible determinar el peso de cada uno de los materiales, dividiéndolo en su densidad, teniendo así el peso del material fresco, para posteriormente dividir cada uno de los pesos de los materiales en el peso del cemento y así tener las proporciones iniciales, tal como se muestra en el cuadro 12.

Cuadro 12. Proporciones iniciales para la mezcla de prueba.

	AGUA	CEMENTO	ARENA	GRAVA
<b>Pesos (kg)</b>	185.00	402.17	592.88	981.18
<b>Bulk (Gi)</b>	1.00	3.05	2.66	2.13
<b>Bulk (Vi)</b>	185.00	131.86	223.14	460.00
<b>Proporciones</b>	0.46	1.00	1.47	2.44

Fuente: autores.

### 3.2.9 Fabricación de la primera mezcla de prueba

Para determinar la resistencia a la compresión de una mezcla de concreto hidráulico es necesario realizar dos cilindros de prueba y promediar la resistencia de las dos probetas; para determinar el módulo de rotura del concreto es necesario realizar dos vigas de prueba, de manera que sea posible promediar los datos obtenidos tras fallar cada una de ellas. Adicionalmente a las vigas y cilindros, es necesario tener en cuenta el volumen del cono para realizar la prueba de asentamiento de la mezcla,

teniendo en cuenta además un 10% de desperdicios con respecto al total del volumen, tal como se presenta en el cuadro 13.

Cuadro 13. Volumen para la primera mezcla de prueba.

Descripción	Cantidad
Asentamiento (m3)	0.0059
2 Viguetas (m3)	0.0225
2 Cilindros (m3)	0.0106
10% Desperdicios (m3)	0.0033
<b>TOTAL</b>	<b>0.0423</b>

Fuente: autores.

Teniendo en cuenta las proporciones iniciales para la mezcla, se calcula la cantidad de materiales para la fabricación de la mezcla de prueba, teniendo en cuenta además el aporte de agua que realiza cada uno de los materiales, de manera que no se afecte la relación agua/cemento tras la realización de la mezcla. Las cantidades iniciales y el aporte de agua se presentan en el cuadro 14.

Cuadro 14. Cantidades de materiales y aportes de agua.

MATERIALES	prop.	Masa seca (kg)	H. natural %	Masa húmeda (kg)	Absorción (%)	Aporte (kg)
<b>AGUA</b>	0.46	7.8255				
<b>CEMENTO</b>	1	17.01				
<b>AGR. FINO</b>	1.47	25.08	0	31.3	1.709	-0.42859868
<b>AGR. GRUESO</b>	2.44	51.69	4.66	54.22	4.134	0.27190701
					<b>APORTE FINAL</b>	<b>-0.15669167</b>

Fuente: autores.

Teniendo en cuenta el aporte de agua realizado por los materiales, se calcula el agua de mezcla teórica, con el objetivo de corroborar la relación agua/cemento del concreto después de mezclado.

$$\text{Agua mezcla teorica} = \text{Agua calculada} - \text{aporte}$$

$$\text{Agua mezcla teorica} = 7.82 - (-0.156) = 7.976 \text{ kg}$$

De esta manera se obtiene la cantidad de agua final que debe llevar la mezcla.

### 3.2.10 Corrección por asentamiento

Para definir si se debe realizar ajuste por asentamiento, nuevamente se calcula la relación agua cemento:

$$\frac{A}{C} = \frac{7.976 \text{ kg}}{17.01 \text{ kg}} = 0.46$$

Gracias al bajo aporte de los materiales en la cantidad de agua, la relación agua/cemento se mantiene en la establecida inicialmente, de manera que se trabajara con las cantidades establecidas anteriormente para la fabricación de la mezcla de prueba.

### 3.2.10 Cilindros de prueba y datos obtenidos

Tras elaborar los cilindros para realizar el ensayo de resistencia a la compresión del concreto, se procede a realizar el proceso de falla de los cilindros, teniendo en cuenta que se fallaran a los 7 días y que se espera aproximadamente un 65% de la resistencia final a los 28 días. En la ilustración 26 se observan los cilindros tras ser fallados.

Ilustración 22. Cilindros de prueba tras proceso de falla.



Fuente: autores.

El daño realizado por la carga a los cilindros no se evidencia de manera notoria, pero se observa una falla tipo 5, es decir que los bordes de las partes superior e inferior se fracturan tras encontrar agregados que no se han adherido correctamente o tienen caras lisas. La resistencia para cada una de las probetas se presenta en el cuadro 15, en el cual se evidencia el promedio de las dimensiones de cada una de

las probetas, la resistencia en Mpa obtenida, además del peso de cada uno de los cilindros.

Cuadro 15. Datos obtenidos tras fallar los cilindros.

CARACTERÍSTICAS	PROBETA 1	PROBETA 2
Velocidad del ensayo (Mpa/s)	0.2	
Altura cilindro (mm)	306.41	304.59
Diametro cilindro (mm)	150.09	152.2
Masa del cilindro (kg)	12.581	12.563
Carga especifica (Mpa)	13.98	13.82
<b>RESISTENCIA PROMEDIO</b>	13.9	

Fuente: autores.

En el cuadro 15 se observa que la resistencia promedio entre los dos cilindros es de 13,9 Mpa, con lo cual se cumple la resistencia esperada para un concreto de 21 Mpa, el cual, a los 7 días deberá tener una resistencia promedio de 13.65 Mpa, con lo cual se cumple la resistencia objetivo con un margen cercano al 5%, con lo cual se concluye que se trabajara con dicha resistencia para el fundido de las vigas.

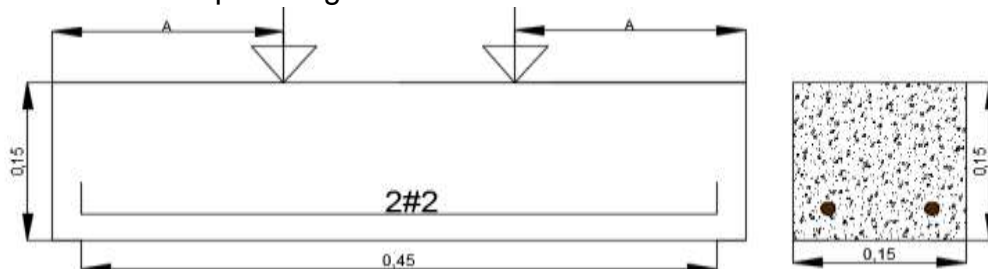
### 3.3 ANÁLISIS DE CARGAS

En el presente numeral se presentan las cargas teóricas de una viga en sus condiciones normales, considerando especialmente el caso de la viga reforzada, para la cual se determinara su carga ultima en las condiciones normales, de manera que sea un punto de comparación entre el resultado obtenido en este punto y el obtenido en el laboratorio tras la inserción de un tubo en el centro de la viga.

#### 3.3.1 Carga y momento último para la viga reforzada

Con el objetivo de tener un punto de comparación entre el resultado obtenido en laboratorio y el teórico, se determinara la carga ultima de una viga simplemente apoyada, reforzada con dos barras #2, las cuales comprenden el refuerzo por flexión de la viga para una carga específica, tal como se presenta en la ilustración 16.

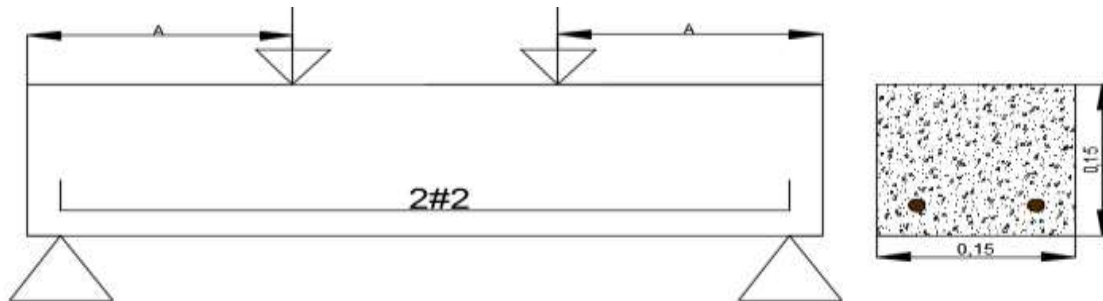
Ilustración 23. Despiece viga reforzada.



Fuente: autores.

A partir de esta condición es posible calcular la carga última a la que estará sometida la viga, sabiendo que se aplicaran dos cargas puntuales en los límites del tercio central de la viga simplemente apoyada, tal como se presenta en la ilustración 27.

Ilustración 24. Diagrama de cuerpo libre de la viga reforzada.



Fuente: autores.

A partir de esta condición, utilizando la ecuación de la cuantía con factor de reducción por resistencia, se podrá definir la carga última a la que está sometida la viga, teniendo en cuenta conceptos básicos de estática así:

$$0.9 \left( \frac{bd^2fy^2}{1.7fc} \right) \rho^2 - (bd^2fy)0.9\rho + Mu = 0$$

Donde:

b= base de la viga.

d= altura de la viga.

Fc= Resistencia a la compresión del concreto.

Fy= Resistencia a la fluencia del acero.

Mu= Momento último de la viga.

p= cuantía mínima de la viga

Se sabe que la cantidad de acero que necesita la viga está dada por:

$$As = \rho * b * d$$

Luego la cuantía de la viga es:

$$\rho = \frac{As}{b * d}$$

$$\rho = \frac{0.64 \text{ cm}^2}{15 \text{ cm} * 10 \text{ cm}}$$

$$\rho = 0.00426$$

Reemplazando este valor en la ecuación se tiene que:

$$0.000016332 \left( \frac{bd^2fy^2}{1.7fc} \right) - (bd^2fy)0.003834 + Mu = 0$$

Despejando el momento último y reemplazando el mismo por P\*A se tiene que:

$$P/2 = \frac{((bd^2fy)0.003834 - 0.000016332 \left( \frac{bd^2fy^2}{1.7fc} \right))}{A}$$

En la ecuación se reemplazaran los siguientes valores:

b= 15 cm.

d= 10 cm.

Fc= 210 kg/cm<sup>2</sup>.

Fy= 4200 kg/cm<sup>2</sup>.

L= 0.45 m

$$P/2 = \frac{((15 * 10^2 * 4200)0.003834 - 0.000016332 \left( \frac{15 * 10^2 * 4200^2}{1.7 * 210} \right))}{0.15}$$

$$P = 3.059 \text{ ton.}$$

$$Mu = 1.529 * \left( \frac{0.45}{3} \right) + \frac{0.0243 * 0.45^2}{8} = 0,2296 \text{ ton.m}$$

Teniendo en cuenta el factor de reducción por resistencia, teóricamente la viga reforzada podrá soportar una carga última de 3,059 ton. Se observa que se tuvo en cuenta los 5 cm de recubrimiento que deben llevar las barras; se realizara el comparativo con el valor obtenido en laboratorio, tras incluir el tubo, de manera que se observe la afección que genera introducir el tubo, o si se mantienen las mismas condiciones.

### 3.3.2 Carga y momento último para las vigas sin refuerzo

Para determinar la carga última que tendrán las vigas en sus condiciones normales (sin introducir tubos), se tendrá en cuenta la expresión para calcular el módulo de rotura, la cual está en función de la luz, altura y ancho de la viga.

$$\text{Modulo de Rotura (MR)} = \frac{P * L}{b * h^2}$$

Donde:

P = Carga Aplicada

L = Longitud de la Vigueta (m)

b = Ancho promedio de la Vigueta (m)

h = Altura promedio de la Vigueta (m)

El módulo de rotura de la viga esperado es aproximadamente 36.2 kg/ cm<sup>2</sup>, de manera que es posible despejar de la ecuación la carga máxima para el módulo de rotura esperado así:

$$P = \frac{b * h^2 * MR}{L}$$

Reemplazando los valores de la viga en estudio se tiene que:

$$P = \frac{15 * 15^2 * 36,2}{45}$$

$$P = 2715 \text{ kg} \approx 2,715 \text{ Ton}$$

$$Mu = \frac{2,715 \text{ ton}}{2} * \left(\frac{0.45 \text{ m}}{3}\right) + \frac{0.0243 * 0.45^2}{8} = 0,2042 \text{ ton.m}$$

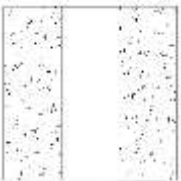
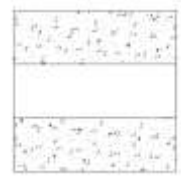
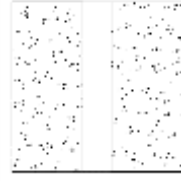
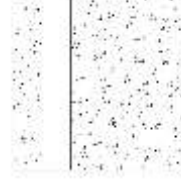
La carga última para una viga sin refuerzo es de 2,715 toneladas, punto en el cual se espera que la viga proceda a la rotura.

### 3.3.3 Momento último esperado para las vigas de cada caso

A continuación se presenta el momento último esperado para las vigas de cada caso, teniendo en cuenta la disminución de área en cada una de las vigas, generada por el embebido en cada caso. Se calculó el área del embebido y se contrastó con el área de las vigas de control (225 cm<sup>2</sup>). Se determinó el área que perdería la viga tras generarle ese vacío en la sección y se calculó la resistencia a flexión con las nuevas dimensiones de la viga, al igual que el momento último que soportaría dicha

viga con menores dimensiones; los resultados para cada uno de los casos se presentan en el cuadro 16.

Cuadro 16. Momento último y resistencia a flexión tras pérdida de sección.

CASO	ÁREA DEL EMBEBIDO (cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO TRAS PÉRDIDA DE SECCIÓN (Ton.m)	RESISTENCIA A FLEXIÓN TRAS PÉRDIDA DE SECCIÓN (Kg/cm <sup>2</sup> )
	76,200	0,150	26,489
	76,200	0,100	17,659
	38,100	0,186	33,005
	38,100	0,186	33,005

Fuente: autores.

### 3.4 REPORTE DE FUNDICIÓN

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados y tomando en cuenta la cantidad de moldes para la fabricación de viguetas disponibles en el laboratorio de pavimentos de la UPTC se realizaron dos fundiciones, para cubrir con los 20 especímenes necesarios para la investigación.

La primera fundición se realizó el día miércoles 12 de septiembre de 2018, para lo cual se utilizó aproximadamente 0.45 m<sup>3</sup> de concreto con una grava de tamaño máximo nominal de 1" y una resistencia de 21 MPa para fundir 14 viguetas.

La segunda fundición se realizó el día jueves 13 de septiembre de 2018 y se utilizaron aproximadamente 0.18 m<sup>3</sup> de concreto con el mismo tamaño máximo



nominal de la grava y la misma resistencia de la primera fundición; en este caso se fundieron las 6 viguetas restantes para cumplir con los 20 especímenes de la investigación.

Con las proporciones de la primera mezcla de prueba en la cual se especifica los pesos de los materiales (Cemento, agua, arena, grava) se procedió a pesar estas cantidades con la precaución de tener precisión en los valores, debido que de esto depende la efectividad de la mezcla.

Ilustración 25. Procedimiento de pesado de los materiales



Fuente. Los Autores.

Con los materiales debidamente pesados (Cemento, Arena, Grava y Agua), se depositaron en una superficie lisa con el fin de evitar la pérdida de humedad de la mezcla.

En primera instancia se mezclaron solamente la arena con el cemento portland sin adicionar agua, posteriormente se agregó el agregado grueso al mezclado con el fin de que se produzca una homogeneidad de los materiales más finos.

Luego de realizar el proceso de mezclado de los agregados junto con el cemento, se adiciono agua en forma progresiva al mismo tiempo que se mezcló el material con la precaución de no desperdiciar agua para evitar las variaciones en la resistencia del concreto.

Ilustración 26. Adición de agua durante el proceso de mezclado



Fuente. Autores

Se realizó el proceso de mezclado en forma consecutiva hasta que se obtuvo una mezcla completamente homogénea teniendo estricto control de que no se produzca un falso fraguado en la mezcla que puede repercutir en la capacidad portante del material.

Ilustración 27. Mezcla final obtenida



Fuente. Autores

### **3.4.1 Determinación del asentamiento.**

La determinación del asentamiento se realizó a través de la norma INV. E – 404 – 13 que se desarrolla con la ayuda del cono de Abrams en el cual se determina la distancia de asentamiento que tiene el concreto hidráulico inmediatamente después de mezclado.

Con la mezcla de concreto completamente homogénea se depositó una muestra de concreto en el cono mediante tres capas en las cuales se compacta con veinte y cinco golpes cada una (25). Completamente lleno el cono de Abrams, se enrasó y se dejó fraguar durante un minuto. Pasado el tiempo de fraguado para la prueba de asentamiento, se retiró el cono de Abrams y se mide el asentamiento generado de la muestra.

Ilustración 28. Medición de asentamiento



Fuente. Autores

Como el valor de asentamiento fue el esperado con un rango de más o menos 0.5 centímetros, se procedió a elaborar los especímenes de prueba; de no haber sido así la mezcla debe corregirse por asentamiento siguiendo las condiciones del diseño de mezcla.

Para empezar a fundir se engrasaron los moldes con aceite para facilitar la desmontada de las vigas y se ubicaron los tubos de PVC en el interior de los moldes en su respectivo lugar, dependiendo del caso en estudio

Ilustración 29. Engrasado de moldes y posicionamiento de los tubos.



Fuente. Autores.

En el proceso de fundición se dispuso atención especial en la ubicación del tubo, dado que uno de los aspectos fundamentales que espera resolver la presente investigación es la relevancia de la ubicación del tubo al interior de la viga; las medidas fueron verificadas continuamente, de manera que no se produjese ningún desfase del tubo hacia alguno de los lados.

Ilustración 30. Fundición de las vigas.



Fuente. Autores

Se dejó fraguar el cemento durante 24 horas en los moldes y pasado este tiempo se sumergieron en un contenedor con agua por 28 días hasta el día de la prueba con el fin que el concreto obtenga su hidratación completa y su máxima resistencia.

Ilustración 31. Muestra de prueba (Vigueta)



Fuente. Autores

Al terminar el fundido de las tres probetas para cada uno de los casos, se precede a sumergir la totalidad de las vigas con el objetivo de alcanzar la máxima resistencia y un curado correcto del concreto tras pasar los 28 días.

Ilustración 32. Proceso de sumergido de las briquetas de prueba



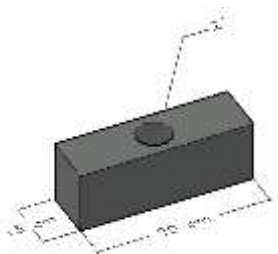
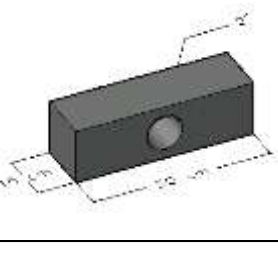
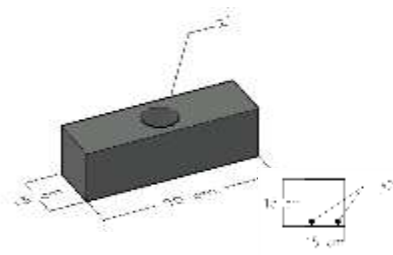
Fuente. Autores

## CAPITULO IV - ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se resumen los datos obtenidos tras el proceso de falla de las vigas, además de un análisis respectivo de los mismos, contrastando con lo estipulado en el marco teórico; se observa la comparación entre los resultados teóricos y prácticos. Se analizará la pérdida de resistencia a flexión del concreto hidráulico, tras la inclusión de tubos al interior de vigas.

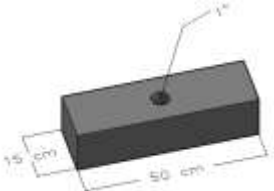
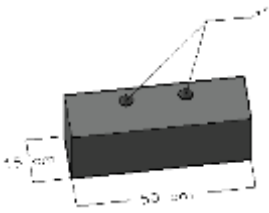
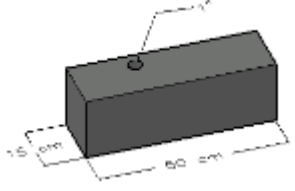
Para analizar los resultados obtenidos, se realizará un análisis previo de cada una de las vigas por separado. En el cuadro 17 se muestran los diferentes casos de estudio, que se utilizaron para valorar y puntualizar los resultados. En total se hicieron 20 vigas; 3 para cada caso de estudio y 2 para hallar el módulo de rotura de la mezcla a los 28 días sin ningún embebido.

Cuadro 17. Escenarios de Investigación.

#CASO	ESQUEMA	$\Phi$	POSICIÓN	N° PROBETAS	TIPO DE ENSAYO
1		2"	L/2 Y B/2	3	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN
2		2"	L/2 Y H/2	3	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN
3		2"	L/2 Y B/2	3	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Fuente: autores.

Cuadro 18. Continuación escenarios de investigación.

#CASO	ESQUEMA	$\phi$	POSICIÓN	N° PROBETAS	TIPO DE ENSAYO
4		1"	L/2 Y B/2	3	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN
5		1"	L/3 Y B/4 (cu)	3	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN
6		1"	L/3 Y B/4	3	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Fuente: autores.

Cabe destacar que la investigación se centró en realizar una comparación tanto cualitativa como cuantitativa entre la viga de control (sin ductos embebidos), con los demás casos de estudio (según la localización del ducto), midiendo el desempeño bajo carga de cada una de ellas.

#### 4 . DATOS OBTENIDOS EN LABORATORIO Y CÁLCULOS

Para realizar el proceso de falla de las vigas, es necesario conocer la altura, base y luz de las mismas, datos necesarios para el cálculo de la resistencia a flexión de cada uno de los especímenes. En el cuadro 19 se presentan los datos anteriormente estipulados y la capacidad de carga que tuvo cada una de las vigas.

Cuadro 19. Datos obtenidos de las vigas y capacidad de carga tras falla.

#CASO	ALTURA (mm)	BASE (mm)	LUZ (mm)	PESO (Kg)	CARGA MÁX. (KN)
<b>CASO 1</b>	151,50	150,60	450	24,651	17,00
	151,67	152,33	450	24,756	15,00
	150,60	151,33	450	24,636	18,00
<b>CASO 2</b>	150,60	152,60	450	24,475	18,00
	149,60	150,60	450	24,502	19,00
	148,33	151,00	450	24,595	17,00
<b>CASO 3</b>	152,00	151,00	450	25,693	27,00
	153,00	150,60	450	25,718	29,00
	152,30	151,50	450	25,476	24,00
<b>CASO 4</b>	152,33	151,33	450	25,113	18,00
	152,33	152,00	450	25,124	21,00
	150,60	152,00	450	25,051	18,00
<b>CASO 5</b>	150,50	151,50	450	25,212	22,00
	150,60	151,30	450	25,499	21,00
	150,30	151,60	450	25,499	15,00
<b>CASO 6</b>	150,30	150,83	450	25,576	25,00
	151,00	151,00	450	25,423	26,00
	152,30	151,50	450	25,615	24,00
<b>VIGAS DE CONTROL</b>	151,00	149,50	450	25,592	26,00
	151,50	150,50	450	25,722	27,00

Fuente: autores.

Los datos mostrados en el cuadro 19 hacen referencia a las variables necesarias para el cálculo del módulo de rotura representativo de cada caso, el cual se calculará para cada una de las vigas y posteriormente se determinará el promedio entre las tres, de manera que dicho promedio se denominará el modulo representativo del caso.



## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS POR CASO

En el presente ítem se desarrollan cada uno de los casos, realizando el respectivo comparativo con las vigas de control y en lo referente a la capacidad de carga de cada uno de los casos, identificando el patrón de agrietamiento y determinando el módulo de rotura representativo para cada caso.

### 5.1 Caso 1- Tubo de 2" ubicado en el centro de la base de la viga

En este caso se evalúa el límite de la norma NSR-10, la cual, en su título C especifica que no se deberán introducir embebidos cuyo diámetro sea mayor a  $1/3$  de la base de la viga. El tubo de dos pulgadas tiene un diámetro de 5,08 cm, y teniendo una viga de 15 cm de base, este caso se encuentra en las cercanías del límite establecido y se reconoce como una referencia importante. En la ilustración 33 se observan las vigas con el tubo embebido tras el proceso de falla.

Ilustración 33. Vigas con tubo de 2" pos-falla.



Fuente: autores.

Como se observa en la ilustración 33, al aplicar carga a la viga en los límites del tercio central, la viga presenta una rotura en el centro de la viga, evidenciando la poca adherencia que existe entre materiales como el PVC y el concreto hidráulico, acción que facilita que la viga falle en las cercanías al tubo o por su límite inmediatamente exterior, generando una rotura prematura y disminuyendo considerablemente la capacidad de carga de la viga y consecuentemente el módulo de rotura representativo de la sección. En el cuadro 20 se presenta la carga máxima que soporta cada una de las vigas y el módulo de rotura representativo para el caso y para las vigas de control.

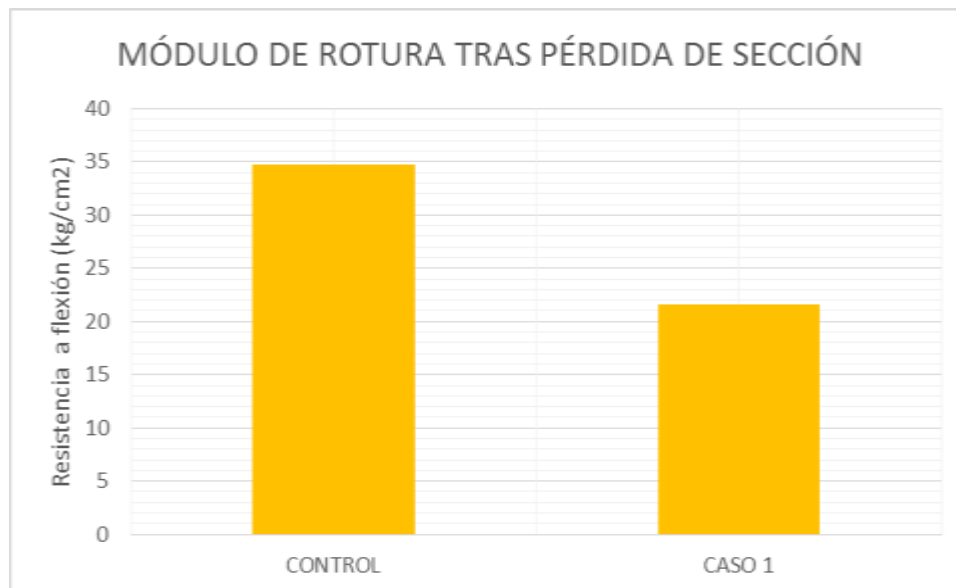
Cuadro 20. Resultados para el caso 1.

#CASO	CARGA MÁX. (Ton)	MÓDULO DE ROTURA (Kg/cm <sup>2</sup> )	MÓDULO REPRESENTATIVO (Kg/cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO (Ton.m)	PÉRDIDA POR SECCIÓN (%)
CASO 1	1,7	22,13	21,66	0,126	37,65
	1,5	19,26			
	1,8	23,60			
VIGAS DE CONTROL	2,6	34,32	34,75	0,199	
	2,7	35,17			

Fuente: autores.

En el cuadro 20 se observa una variación de **37,65%** tras el cambio de sección transversal que genera el embebido, lo cual evidencia una pérdida de resistencia a flexión del concreto hidráulico, y no permite que se desarrolle la misma deformación tras la aplicación de la carga. Se entiende que la viga presenta un debilitamiento en el centro de la misma, ya que el tubo genera un vacío en el centro que no se compensa con la presencia del mismo, por el contrario se genera un debilitamiento tras la baja o nula adherencia entre el concreto y el PVC, tal como se observa en la ilustración 34.

Ilustración 34. Perdida de carga en una viga con tubo de 2” en el centro.



Fuente: autores.

Al comparar el momento último obtenido tras la aplicación de la carga con el momento teórico, se observa una disminución de **16,25%** del práctico con respecto al teórico, ya que el momento teórico calculado fue de 0,150 ton.m, mientras que el práctico fue de 0,125 ton.m. Dicha variación se debe a la disminución en la capacidad de carga de las vigas y la zona de debilitamiento que genera el embebido en el tercio central de la viga.

En lo relativo al agrietamiento que sufren las vigas tras el proceso de falla se observa que la inclusión del tubo es uno de los principales factores para que la viga falle, ya que generalmente el agrietamiento se produce en los alrededores del tubo; cabe resaltar que la rotura se espera en el centro de la viga y que es dicha ubicación el lugar por el cual ha fallado la viga. Se genera una grieta perpendicular al eje longitudinal de la viga, la cual, para este caso se presentó en toda la altura y ancho de la sección, razón por la cual no se ha medido dicha abertura.

### **5.2 Caso 2- Tubo de 2" ubicado en el centro del costado lateral de la viga.**

En este caso se evalúa la misma viga del caso 1 con el tubo de 2" ubicado en el centro del espécimen; pero a diferencia del caso 1, en este caso se gira la viga 90° de manera que el tubo embebido quede ubicado horizontalmente. En la ilustración 35 se observan las vigas con el tubo embebido tras el proceso de falla.

Ilustración 35. Vigas con tubo de 2" pos-falla



Fuente: autores.

Como se observa en la ilustración 40, al aplicar carga a la viga en los límites del tercio central, la viga presenta una rotura en el centro del espécimen al igual que el caso 1, reconociendo que la zona débil se genera en el tercio central de la viga tras la inclusión del tubo y la aplicación de la carga. Gracias a la superficie lisa que rodea el tubo, la fricción concreto- PVC es baja.

En el cuadro 21 se observa la capacidad de carga de la viga y el módulo de rotura obtenido tras la realización de los cálculos, tanto para la viga de control, como para la viga referente al caso 2.

Cuadro 21. Resultados para el caso 2.

#CASO	CARGA MÁX. (Ton)	MÓDULO DE ROTURA (Kg/cm <sup>2</sup> )	MÓDULO REPRESENTATIVO (Kg/cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO (Ton.m)	PÉRDIDA POR SECCIÓN (%)
CASO 2	1,8	23,40	23,93	0,136	31,13
	1,9	25,37			
	1,7	23,03			
VIGAS DE CONTROL	2,6	34,32	34,75	0,199	
	2,7	35,17			

Fuente: autores.

En lo relativo al módulo de rotura para el caso 2 se presenta una disminución relativamente menor a la presentada en el caso 1, ya que la variación en el módulo de rotura de **31,13%**.

Para observar la pérdida de resistencia a flexión, se realiza la ilustración 41, en la cual se evidencia la diferencia en el módulo de rotura tras la pérdida de sección que genera el embebido.

Ilustración 36. Perdida de resistencia a flexión para el caso 2.



Fuente: autores.

El momento teórico para el caso 2 fue de 0,100 ton.m, mientras que el practico fue de 0,135 ton.m, lo cual, representa una variación de 26,2% en lo referente al momento. Siendo el momento práctico mayor, podría considerarse que el embebido en la posición horizontal no representa una pérdida de sección tan alta (76,2 cm<sup>2</sup>) como la considerada para el caso 1. El valor bajo de momento teórico (0.100 ton.m)

puede tener razón en la afectación producida por la disminución de la altura de la viga en un tercio de la misma. Por otra parte se observan mayores valores de resistencia dado que el embebido se encuentra ubicado en el centro de la viga, por lo cual la zona que trabaja a flexión no se ve directamente afectada.

El patrón de agrietamiento de las vigas del caso 2 es debidamente parecido al presentado en el caso 1, ya que se presenta una ruptura en el tercio central de la viga tanto a lo largo de la base, como de la altura; la fisura presentada rodea perimetralmente el tubo, y continúa por el centro de la viga. En cada una de las vigas se generó la ruptura total de la viga, por lo cual no se ha medido la abertura de la misma.

### **5.3 Caso 3- Tubo ubicado en el centro de la viga reforzada.**

En este caso se evalúa la influencia del tubo de 2" atravesado verticalmente, ubicado en el tercio central de la viga y en el centro respecto a la base de la viga; se reforzó con 2 barras de acero corrugado #2 cuyo diámetro de cada barra es 6.35 mm; ubicadas en la cara inferior de la viga, separadas a 10 cm una de la otra y con un recubrimiento de 2 cm a cada lado.

Es uno de los casos más particulares en su análisis, ya que por la condición de concreto reforzado la capacidad de carga de la viga es mucho más alta, y para este caso específico no se han realizado vigas de control, para lo cual se considera la posibilidad de realizar el análisis respectivo teniendo en cuenta las condiciones teóricas de la capacidad de carga máxima, además de los factores de reducción por resistencia.

Ilustración 37. Vigas con tubo de 2" y 2 barras de refuerzo #2 pos-falla



Fuente: autores.

Como se observa en la ilustración 37, al aplicar carga a la viga en los límites del tercio central, la viga presenta una rotura en el centro del espécimen y en los

extremos de los apoyos con grietas a 45° respecto al eje longitudinal lo que evidencia una falla por cortante y flexión.

En el cuadro 22 se observa la carga que genera la aparición temprana de grietas, carga en la cual se presenta la falla del concreto, aún sin la fluencia del acero, pero entendiendo el tipo de grietas que se presentaron en el proceso de falla, los autores consideran que la falla se reduce a la falta de refuerzo por cortante, ya que dicho refuerzo no se incluyó en el diseño de la misma.

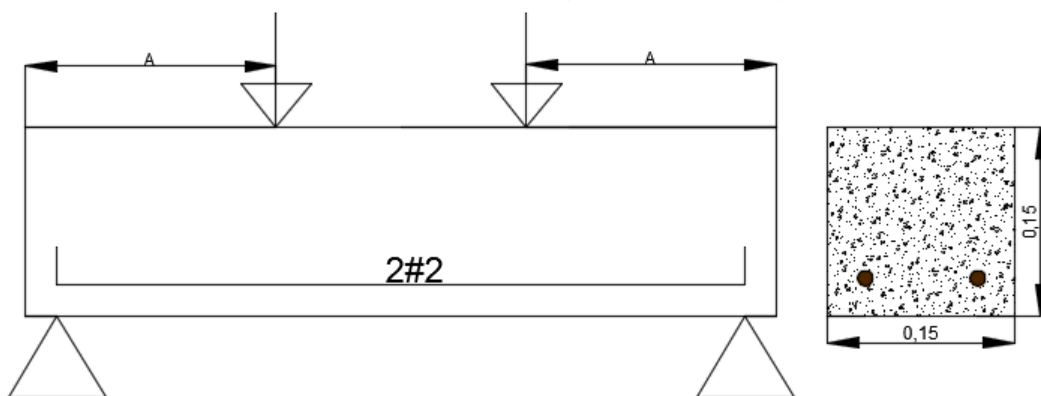
Cuadro 22. Carga máxima soportada por la viga reforzada.

#CASO	CARGA MÁX. (Ton)	MÓDULO DE ROTURA (Kg/cm <sup>2</sup> )	MÓDULO REPRESENTATIVO (Kg/cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO (Ton.m)	PÉRDIDA POR AGRIETAMIENTO (%)
CASO 3	2,7	34,83	34,19	0,201	12,40
	2,9	37,02			
	2,4	30,73			
CARGA (Ton)		MOMENTO (Ton.m)			
CONTROL (TEÓRICO)	3,05	0,23			

Fuente: autores.

Se observa un patrón de carga similar entre cada una de las vigas; cuando una viga está sometida a dos cargas puntuales, el momento último de la misma está determinado como la multiplicación de la carga por el valor de la distancia comprendida entre el apoyo y el punto donde esta aplicada la carga, teniendo en cuenta que las dos cargas puntuales han de tener la misma separación desde el apoyo hasta el punto de aplicación, tal como se muestra en la ilustración 38.

Ilustración 38. Momento máximo para una viga con dos cargas puntuales.



Fuente: autores.

En el proceso de falla de la viga se observa que al llegar a cargas cercanas a las 3 toneladas se generan grietas sobre la superficie del concreto, las cuales generalmente se dirigen hacia el embebido o se desarrollan en la zona aledaña. Al comparar el momento teórico con el momento práctico se observa una variación de **12,4 %**, lo que permite inferir que la inclusión de un embebido en una viga reforzada afecta directamente la capacidad de carga de la misma; tras la generación de grietas se puede generar una exposición del acero de refuerzo y corrosión del mismo.

Ilustración 39. Momento ultimo soportado por las vigas reforzadas.



Fuente: autores.

En la ilustración 39 se observa el momento último calculado según la carga aplicada a cada una de las probetas, las cuales llegan a un momento ultimo cercano a los 0.2 ton.m.

En lo relativo al patrón de agrietamiento, se observan grietas que se distribuyen de las puntas hacia al centro con ángulos cercanos a los 40°, tal como se observa en la ilustración 40.

Ilustración 40. Patrón de agrietamiento de vigas reforzadas.



Fuente: autores.

Generalmente las grietas que aparecen como se observa en la ilustración 45 se clasifican dentro del campo de las grietas por cortante y flexión, ya que además de aparecer las grietas cercanas al apoyo y a los  $45^\circ$ , se observan grietas en el centro de la viga que hacen referencia a la ruptura del concreto y a la falla por flexión del mismo. Se observan fisuramientos de compresión en la parte superior de la viga, y la ruptura de la viga en toda la altura de la misma, generalmente paralela al embebido que se ha dispuesto en la viga, en algunos casos con aberturas mayores de los 3mm, otras por el orden de 1mm.

#### **5.4 Caso 4- Tubo de 1" ubicado en el centro de la base de la viga**

En este caso se evalúa la influencia de un tubo de 1" que tiene un diámetro de 2.54 cm teniendo una viga de 15 cm de base, ubicado en el tercio central de la viga y en el centro de la viga respecto a la base; este caso es una referencia importante ya que simula el embebido de las tuberías para las instalaciones eléctricas. En la ilustración 41 se observan las vigas con el tubo embebido tras el proceso de falla.

Ilustración 41. Vigas con tubo de 1" pos-falla.



Fuente: autores.



Como se observa en la ilustración 41, al igual que los otros casos, la viga presenta una rotura en el centro de la misma, que evidencia la poca adherencia que existe entre materiales como el PVC y el concreto hidráulico, lo que disminuye considerablemente la capacidad de carga de la viga. Es importante destacar que el tubo embebido en este caso está bajo la reglamentación de la norma, ya que su diámetro se encuentra por debajo de  $b/3$  (5 cm), con lo cual se esperaría de entrada que el concreto no sufra daños cuantiosos, ya que se encuentra dentro de los permisible.

En el cuadro 23 se observa la capacidad de carga máxima de cada una de las vigas del caso, además del módulo de rotura alcanzado por las vigas tanto de control, como del caso.

Cuadro 23. Resultados para el caso 4.

#CASO	CARGA MÁX. (Ton)	MÓDULO DE ROTURA (Kg/cm <sup>2</sup> )	MÓDULO REPRESENTATIVO (Kg/cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO (Ton.m)	PÉRDIDA POR SECCIÓN (%)
CASO 4	1,8	23,07	24,45	0,143	29,63
	2,1	26,79			
	1,8	23,50			
VIGAS DE CONTROL	2,6	34,32	34,75	0,199	
	2,7	35,17			

Fuente: autores.

En lo referente al módulo de rotura se observa una variación cercana al **29,63%** con respecto a la viga de control. Dicha variación relativamente baja se presenta gracias a que se incluyó un embebido con un diámetro de 1", con lo cual se esperaba una variación menor a la sufrida en el caso 1, en el cual se contaba con un embebido de 2".

En la ilustración 42 se observa el cambio en el módulo de rotura tras la pérdida de sección generada por el embebido.

Ilustración 42. Comportamiento de las vigas del caso 4 y vigas de control.



Fuente: autores.

El momento teórico calculado para el caso 4 fue de 0,186 ton.m, mientras que el práctico fue de 0,143 ton.m, presentando una variación de **23%**, lo cual quiere decir que se genera una reducción de sección mayor a la estipulada para el cálculo del momento teórico (38,1 cm<sup>2</sup>).

En lo relativo al patrón de agrietamiento se observan rupturas a lo largo y ancho de la altura y la base de la viga, es decir ruptura total, razón por la cual no fue posible la medición del agrietamiento. Se observan grietas paralelas al embebido, en la cara de la altura de la viga, mientras que en la base se observa que la grieta se desplaza por el centro de la viga hasta llegar a la zona del embebido, dicha grieta rodea el tubo perimetralmente hasta lograr pasarlo y continuar la grieta cerca del centro de la viga.

### 5.5 Caso 5- Tubos de 1" ubicados en los límites del tercio central de la viga

En este caso se evalúa la influencia de dos tubos de 1" variando la posición de los mismos, ubicándolos en los límites del tercio central de la viga y a b/4 del borde superior de la viga, tal como se muestra en la ilustración 43.

Ilustración 43. Vigas con tubos de 1" ubicados en los límites del tercio central pos-falla.



Fuente: autores.

Como se observa en la ilustración 43, la viga presenta rotura en uno de los tercios a diferencia de los demás casos en los que la viga falla en el centro de la misma. Tras este comportamiento se puede inferir que con la inclusión de 2 tubos en los límites del tercio central, el debilitamiento de la viga se va a producir en cualquiera de los dos.

Para verificar el módulo de rotura y la carga máxima a la que fueron sometidas dichas vigas, se presenta el cuadro 24, en el cual se observa el módulo de rotura representativo del caso, la carga máxima promedio, tanto para las vigas del caso, como para las de control.

Cuadro 24. Módulo de rotura y carga máxima para vigas del caso 5.

#CASO	CARGA MÁX. (Ton)	MÓDULO DE ROTURA (Kg/cm <sup>2</sup> )	MÓDULO REPRESENTATIVO (Kg/cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO (Ton.m)	PÉRDIDA POR SECCIÓN (%)
CASO 5	2,2	28,85	27,88	0,146	19,78
	2,1	27,54			
	1,5	27,24			
VIGAS DE CONTROL	2,6	34,32	34,75	0,199	
	2,7	35,17			

Fuente: autores.

Se observa una diferencia por pérdida de sección del **19,78%** con respecto al módulo de las vigas de control. El caso 5, es uno de los casos que ha representado menores perdidas en lo relativo a carga y modulo, ya que se encuentra por debajo del 30%. El posicionamiento del tubo es un factor clave, ya que puede ayudar a que la viga falle de manera más lenta o rápida. En este caso, dado que el tubo se encuentra en las cercanías al borde de la viga, la rotura no llega de manera ligera

como en los casos anteriores, aunque, aun así, se tiene una pérdida de resistencia que afecta considerablemente la composición estructural.

Para conocer la diferencia de las vigas de control y las vigas del caso, se presenta la ilustración 44, en la cual se observan los puntos máximos de resistencia a flexión.

Ilustración 44. Comportamiento de las vigas del caso 5 y vigas de control.



Fuente: autores.

El momento teórico calculado para el caso 5 fue de 0,186 ton.m, mientras que el práctico fue de 0,145 ton.m, observando una variación de **21,7%**, lo cual evidencia que se genera una pérdida de sección mayor a la tenida en cuenta para el cálculo del momento teórico (38,1 cm<sup>2</sup>).

En cuanto al patrón de grietas del caso se observa que la grieta no se presenta en el centro de la viga, la rotura se observa en uno de los embebidos, bien sea el izquierdo o el derecho, tal como se observa en la ilustración 43. La rotura se da con un ángulo de aproximadamente 30°, tomando como origen el borde más cercano al tubo embebido, con lo cual se podría inferir que el incluir un embebido en las cercanías al borde de la viga permite que la rotura empiece a producirse por dicho lugar, gracias al vacío de sección que se genera en la zona y consecuentemente el debilitamiento de la misma. Se observa una rotura total para cada una de las vigas, con lo cual no fue posible la medición de la abertura de la grieta.

### 5.6 Caso 6- Tubo ubicado en el límite derecho del tercio central de la viga.

En este caso se evalúa la influencia de un tubo de 1" que tiene un diámetro de 2.54 cm teniendo una viga de 15 cm de base; ubicado a L/3 de la viga y a b/4 del borde de la viga. En la ilustración 45 se observan las vigas con el tubo embebido tras el proceso de falla. Es el caso 6 uno de los más comunes en el sector de la construcción, ya que generalmente se incluyen tubos en el borde de las vigas.

Ilustración 45. Viga con tubo de 1" pos-falla



Fuente: autores.

Como se observa en la ilustración 45, la viga presenta rotura en el tercio de la viga en donde está ubicado el tubo embebido, tal como se presentó en el caso 5, en el cual la viga falla en el límite del tercio central de la misma.

La carga máxima que soporta las vigas del caso y el módulo de rotura calculado para las mismas se presentan en el cuadro 25, en el cual también se observa el módulo de rotura y carga máxima para las vigas de control.

Cuadro 25. Resultados para el caso 6.

#CASO	CARGA MÁX. (Ton)	MÓDULO DE ROTURA (Kg/cm <sup>2</sup> )	MÓDULO REPRESENTATIVO (Kg/cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO (Ton.m)	PÉRDIDA POR SECCIÓN (%)
CASO 6	2,5	33,02	32,58	0,188	6,25
	2,6	33,98			
	2,4	30,73			
VIGAS DE CONTROL	2,6	34,32	34,75	0,199	
	2,7	35,17			

Fuente: autores.

Para observar la diferencia entre las vigas de control y las vigas del caso 6, se presenta la ilustración 46, en la cual se observa la resistencia a flexión obtenida para cada una de ellas. Se observa que las vigas del caso 6 tienen una resistencia cerca de los 32,6 Kg/cm<sup>2</sup>, mientras que las vigas de control llegan cerca de los 34,7 Kg/cm<sup>2</sup>. Se calcula una diferencia con respecto a las vigas de control de aproximadamente **6,25%**, una de las menores diferencias obtenidas en la evaluación de los casos, con lo cual es una de las posiciones más recomendables para embebidos.

Ilustración 46. Comportamiento de las vigas del caso 6 y vigas de control.



Fuente: autores.

El momento teórico calculado para las vigas del caso 6 fue de 0,186 ton.m, mientras que el momento práctico fue de 0,188 ton.m lo cual evidencia una variación de 1%, con lo cual se puede inferir que: al ubicar el embebido en el borde de la viga, se generan menores pérdidas de capacidad de carga en la viga y su resistencia a flexión se encuentra cercana a la esperada.

En lo relativo al patrón de agrietamiento de este tipo de vigas, se observa que, la viga falla en el tercio en el cual se encuentra ubicado el embebido, presentando el origen de la grieta en el borde más cercano al tubo. Posteriormente la grieta se desplaza perimetralmente alrededor del tubo, hasta llegar al otro extremo de la viga. Se observan bordes redondeados a lo largo de la grieta y su abertura no pudo ser medida dado que la viga presentó ruptura total, tal como se muestra en la ilustración 47.

Ilustración 47. Rotura total de la viga para el caso 6.



Fuente: autores.

## 6. ANÁLISIS COMBINADO DE CASOS

Hasta este punto se han analizado cada uno de los casos por separado, pero es necesario contrastar el comportamiento de algunos casos con variaciones en posición o tipo de falla, con el objetivo de recomendar instalaciones de tubería más segura. En el presente numeral se analizan combinaciones de casos que tienen ciertas similitudes, con el objetivo de observar en cuales se tiene menores pérdidas de carga y modulo, determinar la influencia de la abertura de los tubos, al igual que la del posicionamiento.

### 6.1 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA VERTICAL Y LA RESISTENCIA HORIZONTAL

Esta comparación tiene por objeto evaluar la influencia en el posicionamiento del tubo de 2" de manera vertical y horizontal en una viga de 15 cm de base y altura y 45 cm de luz;

En el cuadro 26; se observa el módulo de rotura y la carga máxima obtenida para los casos 1 y 2 y también se observa la pérdida de capacidad de carga con respecto a la viga de control y la diferencia entre los dos casos.

Cuadro 26. Diferencias entre los casos 1 y 2.

#CASO	RESISTENCIA A FLEXIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO (ton.m)	PÉRDIDA POR SECCIÓN (%)	DIFERENCIA ENTRE CASOS (%)
CASO 1	21,66	0,126	37,65	6,53
CASO 2	23,93	0,136	31,13	

Fuente: autores.

Como se puede evidenciar en el cuadro anterior, el caso 1 pierde un **37.65%** de la resistencia con respecto a las vigas de control, mientras que el caso 2 pierde el **31.13%**. La diferencia de la resistencia a flexión entre los dos casos es del **6.53%**, este valor hace referencia a la variación del posicionamiento del tubo de 2" teniendo en cuenta que el tubo se ubicó en el centro de las dos vigas y lo que vario fue la ubicación de la viga al momento de fallarlas, teniendo en cuenta que se trabajó bajo las mismas condiciones de resistencia. Tras observar el comportamiento del concreto, se puede inducir que cuando se varía el posicionamiento de la viga con un tubo de 2" en el centro de la misma, la perdida de la capacidad portante del concreto llega a tener un valor cercano al **6,53%**. Para apreciar la pérdida de resistencia a flexión se presenta la ilustración 48, en la cual se observa el comportamiento de la variación del posicionamiento del tubo de 2".



Ilustración 48. Influencia en la variación del posicionamiento del tubo de 2”.



Fuente: autores.

En la ilustración 48 se observa la resistencia a flexión para una viga con un tubo paralelo a su altura y una viga con un tubo paralelo a su base. Lo más recomendable entre los dos casos sería el tubo horizontal (atravesando la base), ya que dicho embebido alcanza mayores valores de resistencia.

Respecto a las grietas en la pos falla de las vigas se observaron patrones similares, debido a que las grietas se originaron cerca al centro de la viga donde se hallaba ubicado el tubo, las cuales lo rodearon perimetralmente y continuaron un poco más alejadas del centro de la viga hasta llegar al otro borde, obteniendo una ruptura total del espécimen.

## 6.2 INFLUENCIA DEL DIÁMETRO DEL EMBEBIDO

Se realiza esta comparación con el objetivo de evaluar la influencia de la abertura en las pérdidas de resistencia a flexión, de manera que sea posible la determinación de un valor promedio que permita conocer la influencia del diámetro del tubo en el comportamiento del concreto para una viga de las 15 cm de base y altura y 45 cm de luz.

En el cuadro 27 se observa el módulo de rotura y la carga máxima obtenida para los casos 1 y 4; también se observa la pérdida de capacidad de carga con respecto a la viga de control y la diferencia entre los dos casos.

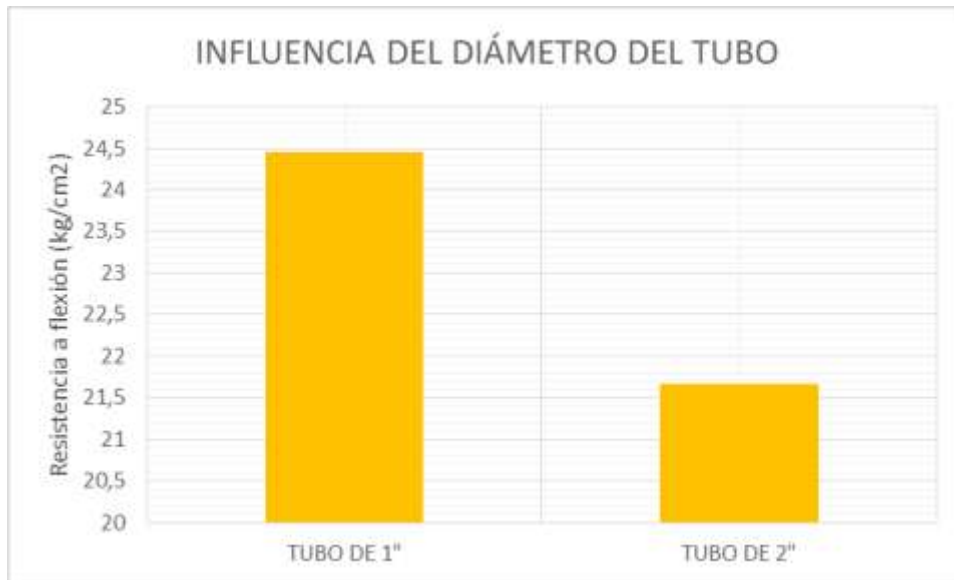
Cuadro 27. Diferencias entre los casos 1 y 4.

#CASO	RESISTENCIA A FLEXIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO (ton.m)	PÉRDIDA POR SECCIÓN (%)	DIFERENCIA ENTRE CASOS (%)
CASO 1	21,66	0,126	37,65	8,02
CASO 4	24,45	0,143	29,63	

Fuente: autores.

Como se observa en el cuadro 25, el caso 1 pierde un **37.65%** de capacidad portante con respecto a las vigas de control, mientras que el caso 4 llega a perder hasta **29,63%**. La diferencia de pérdida de capacidad portante entre los dos casos es del **8,02%**, valor que hace referencia a la variación de 1" en el diámetro del tubo, teniendo en cuenta que se trabajó en las mismas condiciones de posición y resistencia. Tras observar el comportamiento del concreto, se puede inferir que cuando se varía el diámetro de un tubo en 1", la pérdida de capacidad portante del concreto llega a tener un valor cercano al **8%**. Para apreciar la pérdida de resistencia a flexión se presenta la ilustración 49, en la cual se observa el comportamiento con tubos de 1" y 2".

Ilustración 49. Variación de 1" en el diámetro del tubo.



Fuente: autores.

En lo referente al agrietamiento se observa un patrón relativamente similar, ya que para cada uno de los casos se observa una rotura total de la viga, con grietas que se originan en cercanías al centro de la viga, las cuales rodean perimetralmente el

tubo y continúan un poco más alejadas del centro de la viga hasta llegar al otro borde.

### 6.3 INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE TUBOS EMBEBIDOS

Para observar la influencia del posicionamiento y la cantidad de tubos se presentan los casos 5 y 6, en los cuales se han dispuesto tubos de 1" en las cercanías del borde de la viga y en los límites del tercio central. El caso 5 tiene dos tubos ubicados a  $b/4$  y a  $L/3$ , uno en cada lado; por otra parte el caso 6 tiene un solo tubo ubicado a  $b/4$  y a  $L/3$ . Se desea observar la influencia de incluir uno o dos tubos en la luz de la viga, teniendo en cuenta una separación de  $L/3$ .

En el cuadro 28 se observan los módulos representativos de cada caso y la carga promedio a la cual fueron sometidos. De la misma manera se observa la pérdida de resistencia a flexión con respecto a la viga de control y la diferencia entre los dos casos.

Cuadro 28. Diferencia entre los casos 5 y 6.

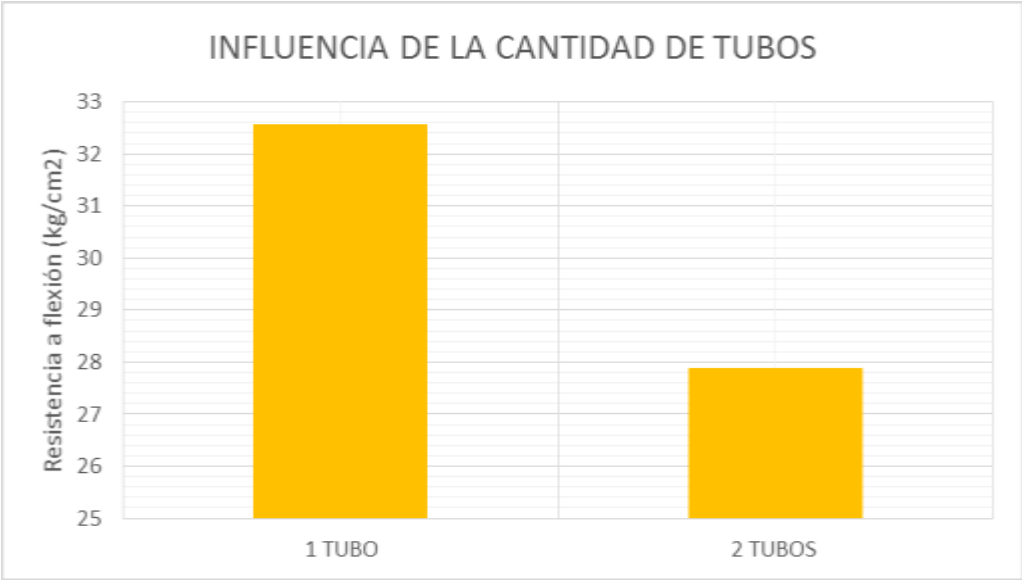
#CASO	RESISTENCIA A FLEXIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO (ton.m)	PÉRDIDA POR SECCIÓN (%)	DIFERENCIA ENTRE CASOS (%)
CASO 5	27,88	0,146	19,78	13,53
CASO 6	32,58	0,188	6,25	

Fuente: autores.

En el cuadro 28 se observan los módulos de rotura obtenidos para la viga del caso 5 y 6, además de los valores para las vigas de control, de la misma manera que los valores de carga. Se observa la pérdida de cada caso con respecto a las vigas de control y la diferencia entre los casos 5 y 6. Dicha diferencia de **13,53%** permite inferir que: cuando la viga tiene un solo embebido incluido a  $b/4$  y  $L/3$ , se llega a tener una pérdida de aproximadamente **6%**, mientras que si la viga tiene más de un tubo empieza a perder su resistencia en fragmentos de **13,53%** por cada tubo.

Para observar la pérdida de resistencia a flexión gráficamente se presenta la ilustración 50, en la cual se observan los casos con 1 y 2 tubos.

Ilustración 50. Comportamiento de la viga con 1 y 2 tubos.



Fuente: autores.

## 7. RESUMEN DE TODOS LOS CASOS

Para conocer la el módulo de rotura y la carga promedio obtenida para cada uno de los casos se presenta el cuadro 29, en el cual se observan los parámetros anteriores para cada caso y la pérdida de capacidad portante para cada uno de los casos con respecto a las vigas de control.

Cuadro 29. Pérdida de capacidad para cada caso.

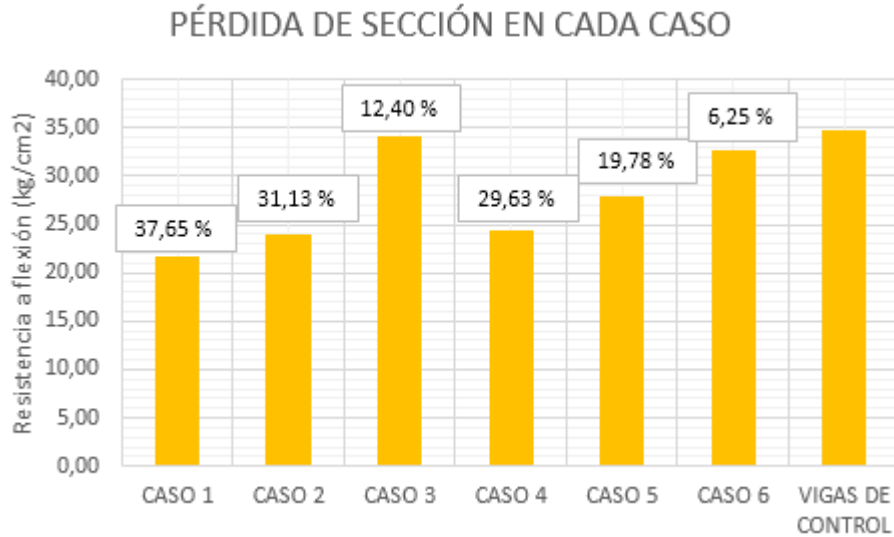
#CASO	RESISTENCIA A FLEXIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	MOMENTO ÚLTIMO (ton.m)	PÉRDIDA POR SECCIÓN (%)
CASO 1	21,66	0,126	37,65
CASO 2	23,93	0,136	31,13
CASO 3	34,19	0,201	12,40
CASO 4	24,45	0,143	29,63
CASO 5	27,88	0,146	19,78
CASO 6	32,58	0,188	6,25
VIGAS DE CONTROL	34,75	0,199	0

Fuente: autores.

Se observa en el cuadro 29 la pérdida de capacidad de carga de cada uno de los casos. Se observa que el caso 1 es aquel en el cual se pierde mayor capacidad de carga con un valor de 37.65%, mientras que el caso 6 es aquel que menor pérdida de capacidad de carga registro, con un valor de 6.25%. El rango de los datos se encuentra desde **0% a 38%**, de manera general. En todos los casos se observa una pérdida de resistencia con respecto a las vigas de control, es decir que el comportamiento del concreto es debidamente frágil al incluir tubos en su interior, ya que se genera un debilitamiento en las zonas.

Para observar el comportamiento de las vigas en el proceso de falla, se observa la ilustración 51 en la cual se observa el comparativo entre cada uno de los casos.

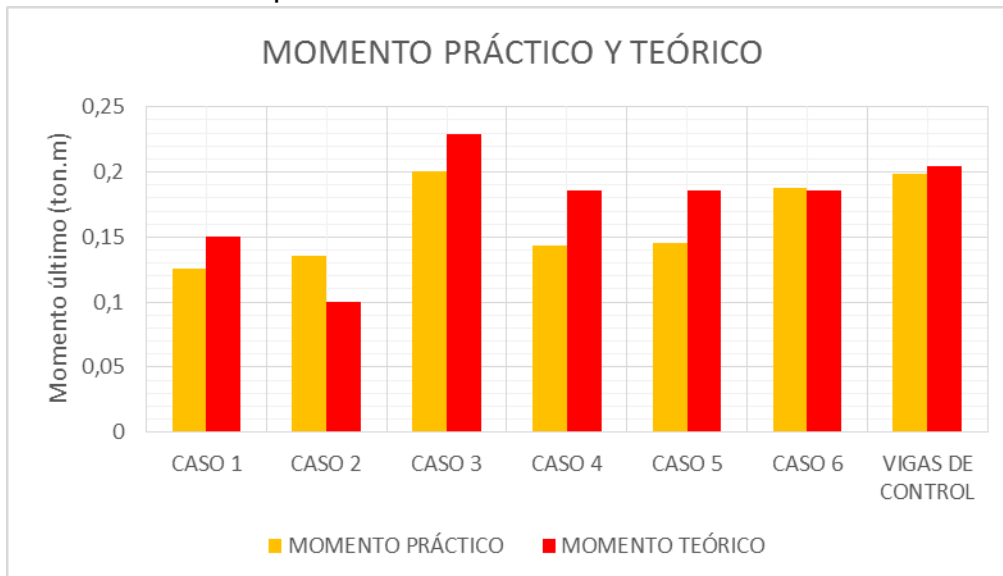
Ilustración 51. Pérdida por sección en todos los casos.



Fuente: autores.

Al comparar el momento teórico con el momento práctico, se observa que generalmente el práctico es menor que el teórico, con excepción del caso 2, tal como se observa en la ilustración 52. Esta diferencia puede producirse porque la sección descontada al calcular el momento teórico, no representa la sección que realmente se ve afectada por el embebido.

Ilustración 52. Momento práctico-teórico en todos los casos.



Fuente: autores.

En la ilustración 52 se observa la comparación de cada uno de los casos con respecto a las vigas de control, se observa el comportamiento de cada uno de los

casos y el punto de mayor resistencia de las vigas. Como se mencionó anteriormente se observa que las vigas de mejor condición de resistencia fueron aquellas que representan al caso 6, las cuales llegan a perder cerca del 6% de capacidad de carga con respecto a la viga de control. Por otra parte se presentan las de menores resistencias, por ejemplo aquellas del caso 1 y el caso 2, las cuales llegan a perder entre 30%-40%.

## **CAPITULO V - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En el presente capítulo se presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el desarrollo del trabajo, con el objetivo que sean tenidas en cuenta en el desarrollo de edificaciones y permitan evitar errores comunes en el proceso constructivo de las mismas.

### **Caso 1- Tubo de 2” ubicado en el centro de la base de la viga**

Tras realizar las probetas con un tubo de 2” en el centro de la viga, y realizar el comparativo con las vigas de control, se observó un comportamiento que disminuye considerablemente la composición de unidad de la viga, ya que se observaron fallas prematuras en las probetas del caso y ruptura de manera presurosa. Respecto a las vigas de control, al introducir un tubo de 2” en el centro de la viga, se observó una disminución del 37,65% en su resistencia.

Observando el tipo de grietas en el caso 1, se puede apreciar que el tubo embebido tiene una acción importante sobre las mismas. Al tener un embebido circular en el centro de la viga, se observan grietas que inician en el centro de la viga y que al encontrar el tubo lo rodean perimetralmente hasta superar la longitud de su diámetro y continuar elocuentemente por las cercanías del centro de la viga, hasta llegar al otro extremo de la misma.

### **Caso 2- Tubo de 2” ubicado en el centro del costado lateral de la viga**

Cuando un embebido de 2” atraviesa la viga horizontalmente y en el centro de su altura y luz, se observan mejores comportamientos del concreto; dado que el embebido no se encuentra directamente en la cara de aplicación de la carga, la viga tiende a mejorar su módulo de rotura y su capacidad de carga. Comparando la resistencia a flexión con la esperada, se presenta una variación del 31,13%.

Respecto al tipo de grietas obtenido tras el proceso de falla, se observan grietas paralelas al embebido en lo ancho de la viga, que al llegar al embebido lo rodean en la mitad de su perímetro y continúan hasta llegar al otro extremo de la viga. No se aprecian bordes redondeados en la longitud de la grieta, por el contrario se reconoce la falta de adherencia entre el material del tubo (PVC) y los agregados del concreto hidráulico, facilitando la falla prematura de la viga y debilitando su tercio central.



### **Caso 3- Tubo de 2” ubicado en el centro de la viga reforzada**

Al iniciar el proceso de falla de las vigas de concreto reforzado se observó un comportamiento resistente en lo referente a la capacidad de carga, ya que las vigas llegaron a soportar una carga promedio de 3 ton hasta la aparición de grietas. La carga última teórica que ofrece una viga con las características en estudio es de 3,059 ton, y se observa en el proceso de falla que cuando la viga llega a una carga de 3 ton la aparición de grietas en el borde y centro de la viga ocasionan daños irreversibles en la composición del concreto, grietas que no se encuentran dentro de las aberturas permisibles, con dimensiones superiores o iguales a los 2mm.

El agrietamiento presentado en las vigas de estudio se clasifica dentro del campo de las grietas por cortante y flexión, ya que se observan grietas entre los 40°-50° que hacen referencia a la falla por cortante, pero además se observan grietas en el centro de la viga en toda la longitud de su altura, las cuales se consideran grietas por flexión. Por otra parte, en la zona superior de la viga se observan grietas por efecto de compresión en la parte superior de la viga, en la cercanía al tercio central y la zona de aplicación de la carga.

### **Caso 4- Tubo de 1” ubicado en el centro de la base de la viga**

Tras la inclusión de un tubo de 1” en el centro de la viga, se observa una disminución del 29,63% con respecto al módulo de rotura de las vigas de control. Si bien es cierto que el diámetro del tubo se encuentra dentro de lo permitido por la norma NSR-10, la cual indica que el diámetro del tubo no debe ser mayor a 1/3 de la base de la viga, se aprecian comportamientos del concreto sensiblemente bajos, que en la consideración de los autores no es permisible en el proceso de construcción y puede causar afecciones importantes en los elementos estructurales.

Por otra parte, se observan grietas que inician en el centro de la viga, llegan al embebido y lo rodean perimetralmente hasta lograr el desprendimiento y continuar algo más lejana del centro de la viga; en dicha grieta se observan bordes redondeados en las cercanías al tubo y su medición no fue posible dado que las vigas presentaron una ruptura total.

### **Caso 5- Tubos de 1” ubicados en los límites del tercio central de la viga**

Al incluir dos tubos en la longitud de la viga, específicamente en los límites del tercio central de la misma y a una distancia corta a partir de los bordes, se observa una pérdida de capacidad de carga y módulo de rotura, dado que la aplicación de carga

se realiza directamente sobre el embebido. En lo referente al módulo de rotura se observa una disminución del 19,78% con respecto a las vigas de control.

Respecto al patrón de grietas para el caso, se observó que la viga puede presentar la ruptura en los límites del tercio central, sobre la zona donde se encuentran los embebidos. Se presentan grietas paralelas al embebido incrustado, fallando en los límites izquierdo y derecho del tercio central de la viga, y generando grietas con un ángulo de inclinación cerca a los 30°, lo cual permite pensar en el debilitamiento generado en los bordes de la viga tras la inclusión de tubos en las cercanías al mismo.

### **Caso 6- Tubo de 1” ubicado en el límite derecho del tercio central de la viga**

Al ubicar un tubo en uno de los límites del tercio central de la viga y en las cercanías al borde de la misma, se observa un comportamiento de reducción de capacidad de carga y módulo de rotura. En lo referente a resistencia a flexión de la viga se tuvo una disminución cercana al 6,25%. Es el caso más recomendable para el proceso constructivo, ya que se presentan variaciones relativamente bajas y el comportamiento del concreto es debidamente aceptable.

Al analizar el patrón de grietas se observa que el embebido genera un debilitamiento en la zona donde se encuentra incrustado, ya que la rotura de la viga no se presenta en el centro de la misma sino en las inmediaciones del mismo. Las vigas del caso presentaron ruptura total, y el agrietamiento presenta figuras redondeadas en toda su longitud. Se confirma nuevamente que la inclusión de un embebido conlleva a debilitar la zona y generar la falla en la misma.

## CONCLUSIONES GENERALES

Al evaluar la influencia de los tubos embebidos en vigas de concreto simple, se observa una disminución considerable de la capacidad de carga y el módulo de rotura, dependiendo de la zona en la que se incruste dicho tubo. De manera general, la pérdida de capacidad de carga, para los casos evaluados en el presente trabajo de investigación, se mantuvo en un rango de 5%-38% con respecto a las vigas de control, afectando cuantiosamente el comportamiento del concreto en lo referente a rotura.

Al realizar una comparación entre los casos 1 y 4, con el objetivo de determinar la influencia del diámetro del embebido, se obtuvieron resultados concluyentes, ya que al incrustar un tubo de 2" se tuvo una pérdida de capacidad de carga de aproximadamente 37,65%, mientras que al incluir un tubo de 1" bajo las mismas condiciones se presentó una disminución de capacidad de carga cercana al 29,63%. Estos datos permiten inferir que: al aumentar una pulgada el diámetro del embebido dispuesto en el centro de la luz de la viga, la pérdida de resistencia se aumentará en un 8%.

Para definir las zonas en las cuales existe la posibilidad de inclusión de tubos es necesario realizar un estudio con mayor cantidad de vigas; sin embargo, tras los resultados obtenidos, se observa que la rotura se dará en aquel lugar donde se encuentre el embebido, bien sea en el tercio central o en sus límites, dado que la inclusión de un tubo genera un debilitamiento en la zona aledaña al mismo, lo cual genera que, tras la aplicación de una carga, la rotura del concreto empiece en dicho lugar; sin embargo, al incluir el embebido en las zonas cercanas al borde y fuera del tercio central, se obtienen pérdidas de capacidad de carga cercanas al 6%, con lo cual son zonas en las cuales se podrían disponer los embebidos sin afectar considerablemente la estructura.

Para el presente trabajo de investigación se realizó una dosificación para un concreto de 21 Mpa, cuyas proporciones se mantuvieron así: 0.46: 1: 1.47: 2.44, la cual arrojó una resistencia de 13,95 Mpa a los 7 días, rango que se encuentra cerca del 65% de la resistencia total, que es el valor esperado; dicha mezcla obtuvo un módulo de rotura a los 28 días de aproximadamente 34,75 Kg/cm<sup>2</sup>, valor que se encuentra dentro del rango estipulado para una mezcla de 21 Mpa, el cual se encuentra alrededor de los 36 Kg/cm<sup>2</sup>.

Al analizar el patrón de grietas obtenido para cada uno de los casos se observa una rotura total en la zona que se incluye el embebido, generalmente grietas que se canalizan paralelas al embebido. Este comportamiento evidencia la falta de adherencia entre el material del tubo (PVC) y el concreto hidráulico, ya que al fallar las vigas se observa un desprendimiento del tubo en toda su longitud; por otra

parte, al llegar al tubo la grieta lo rodea perimetralmente, ya que es la zona de mayor debilidad y consecuentemente por aquella que se generará la grieta.

Al realizar un comparativo entre la inclusión del tubo atravesando la viga vertical y horizontalmente se observa que: al incluir el tubo verticalmente la viga tendrá una pérdida de resistencia de aproximadamente 37,65%, mientras que al incluir el tubo atravesando la viga horizontalmente se obtuvo una pérdida de resistencia alrededor de 31.13%, una variación de aproximadamente 6% entre los dos casos, con lo cual, es más recomendable la inclusión del tubo horizontalmente en la viga, ya que no se encuentra directamente sobre la zona de aplicación de la carga y tiende a generar mayores valores de resistencia.

Al generar un vacío en una viga de concreto, se genera un debilitamiento de la viga en su condición de unidad, permitiendo que la rotura de la viga empiece en la zona aledaña a dicho vacío y generando disminuciones en su capacidad de carga y módulo de rotura.

Es importante tener en cuenta que las pérdidas de capacidad de carga aquí presentadas están sujetas a las condiciones geométricas de las vigas de ensayo. Los autores consideran que tras la variación de la altura de la viga y el ancho de la base, se pueden obtener mejores comportamientos.

## RECOMENDACIONES

Tras evaluar los resultados obtenidos en cada uno de los casos, se observa que el caso 6 es el que presenta menores afectaciones al comportamiento del concreto, por tal razón, los autores recomiendan que: al existir la necesidad de incluir un embebido en una viga se deberá realizar preferiblemente cerca del borde de la misma y fuera del tercio central de la viga, ya que al incluirla en dicha zona, las variaciones en la capacidad de carga se hacen excesivamente altas.

No se recomienda la inclusión de embebidos con diámetros mayores a 1" en vigas cuya base sea igual o menor a 15 cm, ya que el fracturamiento del concreto tras la aplicación de carga puede afectar la composición estructural de la construcción y generar accidentes en el proceso constructivo y posteriores.

Para la inclusión de embebidos en elementos estructurales se recomienda el forrado del mismo con elementos que le generen mayor adherencia entre la superficie del tubo y los agregados del concreto, con el ánimo de no generar zonas débiles que conlleven al fisuramiento o a la falla de la viga tras la aplicación de carga.

## BIBLIOGRAFÍA

- INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL. El pavimento de concreto hidráulico premezclado en la modernización y rehabilitación de la avenida arboledas. Definición de un pavimento. México D.F. México. 2008. 168 págs.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Norma sismo resistente. Título C. Concreto Estructural. Bogotá, Colombia.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Norma sismo resistente. Título C. Requisitos de durabilidad. Bogotá, Colombia.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Norma sismo resistente. Título E. Casas de 1 y dos pisos. Bogotá, Colombia.
- BOLIVAR, José. Calcular una viga de madera. Disponible en internet: <http://e-struc.com/2015/04/08/como-calculiar-con-e-struc-una-viga-de-madera/>.
- PAVCO. Tubería de agua fría. Disponible en internet: <https://pavco.com.co/tuberia-pvc-presion-agua-fria>.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 382). Plásticos. Tubos de poli cloruro de vinilo, clasificados según la presión RDE. Bogotá, Colombia. 2011. 25 págs.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 2505). Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales. Bogotá, Colombia. 2006. 46 págs.
- DURMAN, Esquivel. Tubos y accesorios de PVC. Bogota, Colombia. 2005. 6 págs. Disponible en internet: ([https://www.coval.com.co/pdfs/manuales/man\\_durman\\_sanitaria.pdf](https://www.coval.com.co/pdfs/manuales/man_durman_sanitaria.pdf))
- RIVERA, Gerardo. Dosificación de mezclas de concreto. Generalidades. 2009. Universidad del Cauca, Colombia. 30 págs.
- CARRILLO, ECHEVERRI, Julián, Fabián. Evaluación de los costos de construcción de sistemas estructurales para viviendas de baja altura y de interés social. Bogotá, Colombia. 2015. 12 págs.
- RIVERA, Gerardo. Proporciones en volumen suelto. Proporciones en volumen suelto para concretos. 2009. Universidad del Cauca, Colombia. 11 págs.
- MANUAL DE PRACTICAS DE LABORATORIO DE CONCRETO. Agregado grueso y fino. Peso volumétrico, suelto y compactado. México D.F., México. 73 págs.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS). INV E-141. Relaciones de humedad- Peso unitario seco en los suelos. Bogotá, Colombia. 2013.
- CABANILLAS, Guillermo. Diseño de mezclas para concreto. Características de los materiales seleccionados. 2014.
- American Concrete Institute ACI. Requisitos de reglamento para concreto estructural. Capítulo 6: Cimbra, tuberías embebidas y juntas de construcción. USA. 2005. 495 págs.
- NSR-10, Norma Sismo Resistente. Título C. Concreto. Cimbra y encofrados, embebidos y juntas de construcción. 2010. Bogotá, Colombia. 590 págs.

- CABRERA, Fabián. Influencia de las aberturas transversales, en la resistencia a corte y a flexión de vigas de concreto reforzado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2011. 203 págs.
- Instituto nacional de vías. normas de ensayo de materiales para carreteras. INV E-402-13 Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión. Bogotá, Colombia. 2013
- Instituto nacional de vías. normas de ensayo de materiales para carreteras. INV E-414-13 Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre. Bogotá, Colombia. 2013.
- GARCIA, Luis Enrique. Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico. Ensayo a flexión. Respuesta esperada de una viga de concreto reforzado. Bogotá, Colombia. 412 págs.
- Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras 2013. (Sección 400. Concreto hidráulico; norma 410).
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 2505). Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales. Bogotá, Colombia. 2006. 46 págs.
- FONTANERIA Y SANEAMIENTO VOLUMEN III. Tubos de suministro. 1ª Edición: diciembre 2006. Tornapunta Ediciones, S.L.U. España.25 págs. [Consultado 11 de septiembre de 2018]. Disponible en internet <http://libreria.fundacionlaboral.org/ExtPublicaciones/Fontaneria%20y%20saneamiento%20III.pdf>
- GOBIERNO NACIONAL. Decreto 1400 de 1984.Código de construcciones sismo-resistentes. Bogotá, Colombia. 18 págs.

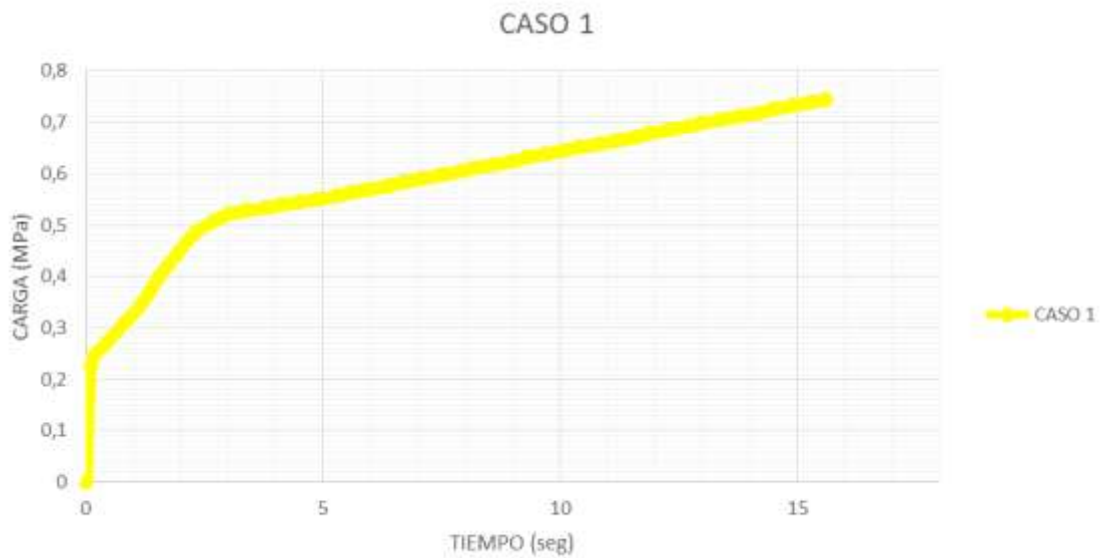
## ANEXOS

Ilustración 53. Carga vs Tiempo- Viga de control



Fuente: autores.

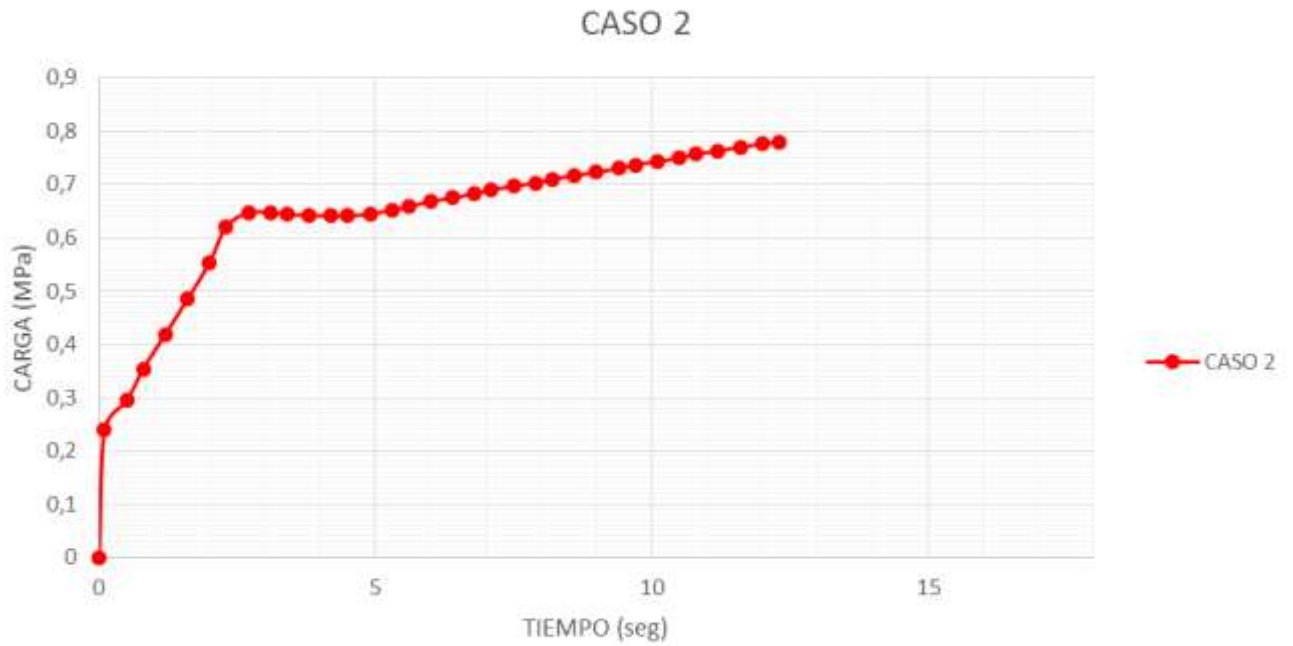
Ilustración 54. Carga vs Tiempo- Caso 1



Fuente: autores.

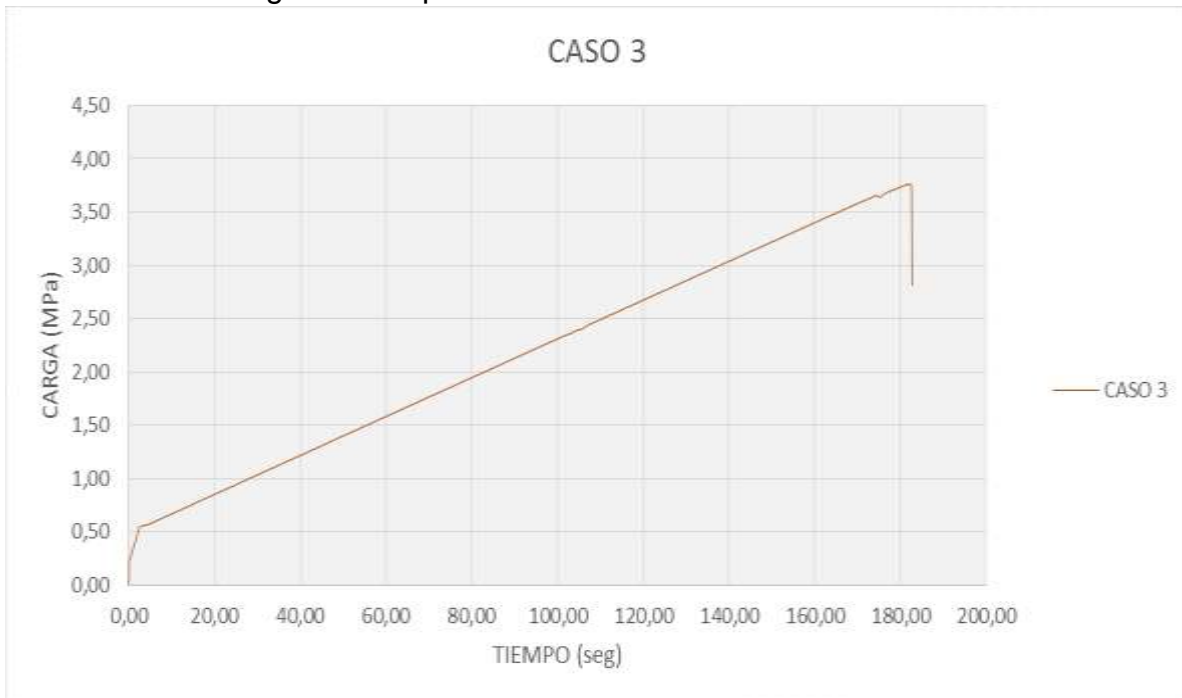


Ilustración 55. Carga vs Tiempo- Caso 2



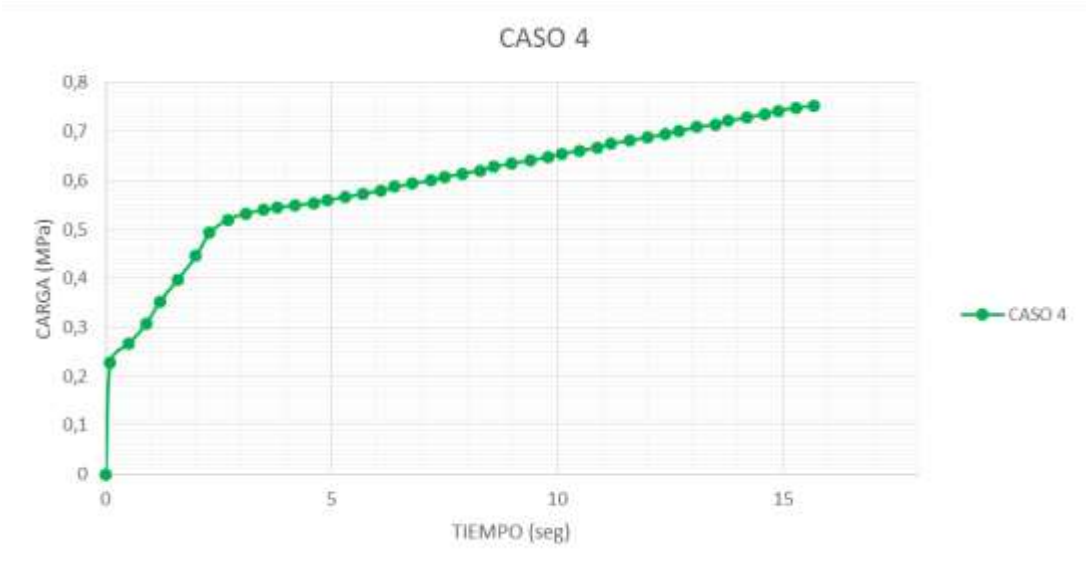
Fuente: autores.

Ilustración 56. Carga vs Tiempo- Caso 3



Fuente: autores.

Ilustración 57. Carga vs Tiempo- Caso 4



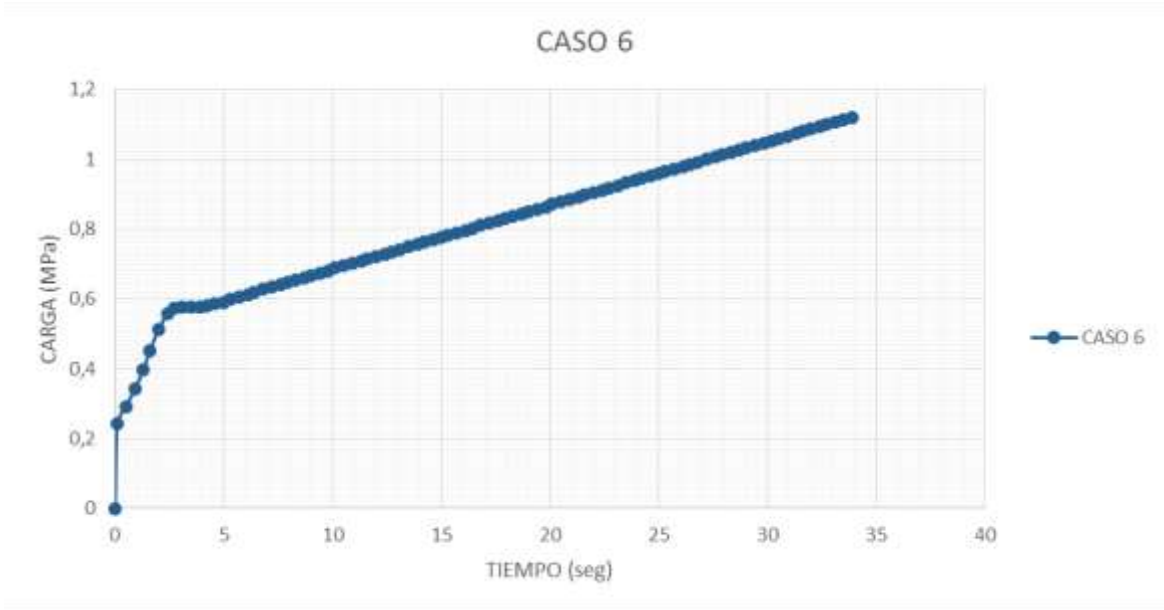
Fuente: autores.

Ilustración 58. Carga vs Tiempo- Caso 5



Fuente: autores.

Ilustración 58. Carga vs Tiempo- Caso 6



Fuente: autores.