

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN LA UBICACIÓN DE DISCONTINUIDADES O VACÍOS EN ELEMENTOS DE CONCRETO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br:
González Luis, Miguel Ángel

Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN LA UBICACIÓN DE DISCONTINUIDADES O VACÍOS EN ELEMENTOS DE CONCRETO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. César Peñuela

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br:
González Luis, Miguel Ángel
Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2014

ACTA

El día 23 de octubre de 2014 se reunió el jurado formado por los profesores:

María Eugenia Korody

César Peñuela

Nelson Camacho

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: "EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN LA UBICACIÓN DE DISCONTINUIDADES O VACÍOS EN ELEMENTOS DE CONCRETO".

Presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de INGENIERO CIVIL.

Una vez oída la defensa oral que el bachiller hic de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. González Luis, Miguel Ángel.	20	VEINTE

Recomendaciones:

Se otorga mención Honorífica

FIRMAS DEL JURADO

María Eugenia Korody
César Peñuela
Nelson Camacho

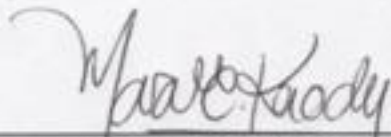
Caracas. 23 de octubre de 2014

ACTA

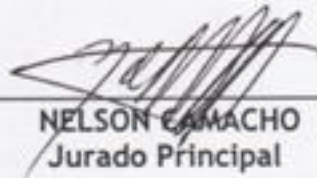
Quienes suscriben, integrantes de la totalidad del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: "Evaluación de la aplicación del ensayo de Velocidad de pulso ultrasónico en la ubicación de discontinuidades o vacíos en elementos de concreto" presentado por el Br. Miguel Ángel González CI: 18.587.585, para optar al título de Ingeniero Civil, acordaron por unanimidad solicitarle a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORÍFICA** al Trabajo de Grado antes mencionado.

Esta solicitud se hace por considerar que el trabajo es un aporte importante en el área de ensayos no destructivos, estableciendo de manera clara una metodología de estudio y aproximación de uso práctico en la ingeniería, lo cual redundará significativamente en la atención y evaluación de estructuras de concreto Armado.

Se levanta la presente Acta en Caracas, a los veintitrés días del mes de octubre de dos mil catorce.



MARÍA EUGENIA KORODY
Jurado Principal



NELSON CAMACHO
Jurado Principal



CESAR PEÑUELA
TUTOR

Les dedico esta tesis a Dios, mis padres y hermano

“Por haberme brindado su apoyo a lo largo de la vida y la carrera”.

Miguel González

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia, a mis padres por haberme dado la vida, por los valores inculcados, por haberme permitido tener una excelente educación y por su apoyo incondicional. Gracias a mi hermano que siempre ha estado ahí a mi lado dándome su apoyo incondicional.

Gracias a mi compañera y amiga Andrea Rojas, por haberme apoyado durante toda la carrera, por haber estado ahí en las buenas y en las malas, es una bendición tenerte como amiga.

Gracias a la Universidad Central de Venezuela, por haberme formado profesionalmente y ser mi escuela de vida.

Gracias al profesor Cesar Peñuela, por haberme ofrecido este tema de tesis y haber aceptado ser mi tutor. Gracias por su valiosa asesoría y apoyo técnico durante la ejecución de este proyecto.

Gracias al profesor José Romero por su apoyo técnico brindado con el equipo de ultrasonido.

Gracias a mis compañeras Naiyit Meléndez y Diana Pérez por haber donado el material necesario para la realización de esta investigación.

Gracias a mis compañeros Héctor Rodríguez, Sofía de Abreu, Melani Osuna, por el apoyo prestado durante la elaboración de esta investigación.

González L. Miguel A.

EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN LA UBICACIÓN DE DISCONTINUIDADES O VACÍOS EN ELEMENTOS DE CONCRETO

Tutor Académico: Prof. Cesar Peñuela. T.E.G. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. 2014.

Palabras claves: Concreto, resistencia, vacíos, discontinuidades, velocidad, ultrasonido.

Resumen. En este trabajo especial de grado se evaluó la eficiencia del ensayo de pulso ultrasónico en elementos de concreto con una resistencia de 250 kgf/cm². Se realizó un diseño de mezcla para elaborar cinco vigas, una patrón, tres vigas que poseen en su interior objetos comunes de densidades menores a la del concreto con el fin de simular vacíos en el interior del elemento y por último una viga que posee una junta en su capa central la cual fue simulada con aserrín. Se determinó la velocidad de propagación de ondas tomando puntos referenciales en todas las caras de las vigas. La data obtenida fue procesada a través de tablas y gráficos comparativos, que permiten contrastar los resultados obtenidos en la viga patrón con los resultados obtenidos en el resto de las vigas. La velocidad promedio obtenida en la viga patrón fue de 3895 m/s, con una desviación estándar de 81 m/s tomándose como velocidad aceptable para todos los elementos 3814 m/s. Contrastando los resultados obtenidos del ensayo de ultrasonido respecto a la ubicación inicial de los vacíos en las vigas, se determinó para la viga con vacíos esféricos en su interior una exactitud del ensayo de 88,94 % en los alrededores del vacío respecto al diámetro de éstos, y en la ubicación del centro de los vacíos una exactitud de 97,56 % respecto al diámetro de los vacíos. Para la viga con vacíos planos se determinó una exactitud de 83,33 % en los alrededores del vacío respecto a la longitud de dichos vacíos. Para la viga con vacío tubular continuo no se pudo determinar el diámetro de la tubería, sin embargo se puede asegurar que

el vacío se encuentra ubicado en la zona central de la viga. Por último para la viga con junta central se pudo determinar que existe un vacío en toda su longitud pero no se puede definir el espesor ni la profundidad del vacío incluso realizando el ensayo de forma indirecta.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. Planteamiento del problema.....	2
1.1. <i>El problema de la investigación.</i>	2
1.2. <i>Objetivos de la Investigación.</i>	4
1.2.1. <i>Objetivo General.</i>	4
1.2.2. <i>Objetivos Específicos.</i>	4
1.3. <i>Aportes.</i>	5
CAPÍTULO II. Marco teorico.....	6
2.1. <i>Cemento Portland.</i>	6
2.1.1. <i>Clasificación del cemento Portland.</i>	6
2.2. <i>Agregados y sus funciones.</i>	6
2.2.1. <i>Ensayos de los agregados.</i>	7
2.2.2. <i>Tipos de agregados.</i>	8
2.3. <i>Concreto.</i>	8
2.4. <i>Diseño de mezcla.</i>	8
2.5. <i>La ley de Abrams.</i>	8
2.6. <i>Relación triangular.</i>	9
2.7. <i>Concreto en estado fresco.</i>	10
2.8. <i>Reología del concreto.</i>	10
2.8.1. <i>Fluidez.</i>	10
2.8.2. <i>Compactibilidad.</i>	10
2.8.3. <i>Estabilidad de la segregación.</i>	11
2.9. <i>Trabajabilidad.</i>	11
2.9.1. <i>Cono de Abrams.</i>	11

2.10. Tiempo de fraguado.....	11
2.11. Resistencias mecánicas.....	12
2.11.1. Resistencia a la compresión.....	12
2.12. Proceso de curado.....	12
2.13. Superficie de fractura.....	12
2.14. Principios estadísticos.....	13
2.14.1. Promedio.....	13
2.14.2. Desviación estándar.....	13
2.15. Ensayos no destructivos.....	14
2.16. Métodos básicos para realizar ensayos no destructivos de estructuras de concreto.....	15
2.17. Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.....	17
2.18. Equipo para el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.....	17
2.19. Aplicaciones del ensayo.....	18
2.20. Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico.....	19
2.20.1. Disposición de los transductores.....	19
2.20.2. Determinación de la velocidad de pulso por transmisión directa.....	20
2.20.3. Determinación de la velocidad de pulso por transmisión semi-directa.....	21
2.20.4. Determinación de la velocidad de pulso por transmisión indirecta.....	21
2.20.5. Acoplamiento de los transductores en la superficie del concreto.....	23
2.21. Factores que influyen en la medida de la velocidad de pulso ultrasónico.....	23
2.21.1. Contenido de humedad.....	23
2.21.2. Temperatura del concreto.....	23
2.21.3. Dimensiones del espécimen.....	24
2.21.4. Efecto de las barras de refuerzo.....	25
2.21.5. Determinación de la uniformidad del concreto.....	26
2.22. Detección de defectos.....	26
2.22.1. Estimación del espesor de capa de concreto de baja calidad.....	27
2.22.2. Determinación del módulo de elasticidad.....	29

CAPÍTULO III. Método	31
<i>3.1. Búsqueda y almacenamiento de los materiales.</i>	<i>32</i>
<i>3.2. Caracterización de los agregados.</i>	<i>32</i>
3.2.1. Granulometría.....	32
3.2.2. Desgaste los Ángeles.....	34
3.2.3. Absorción y peso específico.....	35
3.2.4. Contenido de humedad.....	38
<i>3.3. Diseño geométrico de vigas con vacíos en su interior.</i>	<i>38</i>
<i>3.4. Diseño de mezcla.</i>	<i>41</i>
3.4.1. Relación Beta (β).....	42
3.4.2. Resistencia promedio requerida (F_{cr}).....	43
3.4.3. Relación agua / cemento (α).....	44
3.4.4. Relación agua / cemento corregida (α_c).....	44
3.4.5. Dosis de cemento (C).....	46
3.4.6. Dosis de cemento corregida (Cc).....	46
3.4.7. Volumen absoluto de los granos de cemento (V_c).....	48
3.4.8. Volumen absoluto de agua (a).....	48
3.4.9. Volumen de aire atrapado (V).....	49
3.4.10. Volumen absoluto de los agregados.....	49
3.4.11. Volumen y dosis de agregados.....	50
<i>3.5. Dosificación de los materiales para la mezcla.</i>	<i>51</i>
3.5.1. Corrección por humedad.....	51
3.5.2. Corrección de la cantidad de agua de mezclado.....	52
<i>3.6. Elaboración de la mezcla.</i>	<i>52</i>
<i>3.7. Preparación y curado de cilindros.....</i>	<i>54</i>
<i>3.8. Preparación y curado de vigas.....</i>	<i>54</i>
<i>3.9. Caracterización del concreto fresco.....</i>	<i>57</i>
3.9.1. Medición del asentamiento.....	57

3.10. Caracterización del concreto endurecido.....	58
3.10.1. Peso unitario.....	58
3.10.2. Ensayo a compresión.....	59
3.10.3. Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros.....	60
3.11. Velocidad de pulso ultrasónico en vigas.....	61
3.12. Curvas comparativas de los resultados de velocidad de pulso ultrasónico.....	63
CAPÍTULO IV. Resultados	65
4.1. Características de los agregados.....	65
4.1.1. Granulometría.....	65
4.1.2. Desgaste los Ángeles.....	67
4.1.3. Absorción y peso específico.....	67
4.1.4. Contenido de humedad.....	68
4.2. Diseño de mezcla.....	68
4.2.1. Relación Beta (β).....	68
4.2.2. Parámetros utilizados para el diseño de mezcla.....	69
4.2.3. Componentes del diseño de mezcla.....	70
4.2.4. Dosificación de los materiales para la mezcla.....	70
4.3. Caracterización del concreto fresco.....	70
4.3.1. Medición de asentamiento.....	70
4.4. Caracterización del concreto endurecido.....	71
4.4.1. Peso unitario.....	71
4.4.2. Ensayo a compresión.....	71
4.4.3. Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros.....	72
4.5. Velocidad de pulso ultrasónico en vigas.....	72
4.5.1. Viga patrón.....	72

4.5.2. Viga con vacíos esféricos.....	74
4.5.3. Viga con vacíos planos.	81
4.5.4. Viga con vacío tubular continuo.	88
4.5.5. Viga con junta en su capa central.	95
 4.6. Comparación de los resultados obtenidos del ensayo con el planteamiento inicial.	 101
 CAPÍTULO V. Análisis de los resultados	 103
 5.1. Caracterización de los agregados.	 103
5.1.1. Granulometría.....	103
5.1.2. Desgaste Los Ángeles.	103
5.1.3. Absorción y peso específico.	103
 5.2. Caracterización del concreto fresco.	 103
5.2.1. Medición de asentamiento.	103
 5.3. Caracterización del concreto endurecido.	 104
5.3.1. Peso unitario.	104
5.3.2. Ensayo a compresión.	104
5.3.3. Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros.	104
 5.4. Velocidad de pulso ultrasónico en vigas.	 104
5.4.1. Viga patrón.....	104
5.4.2. Viga con vacíos esféricos.....	105
5.4.3. Viga con vacíos planos.	105
5.4.4. Viga con vacío tubular continuo.	106
5.4.5. Viga con junta en su capa central.	106
 CAPÍTULO VI. Conclusiones y recomendaciones.....	 108
6.1. Conclusiones.	108
6.2. Recomendaciones.	109

CAPÍTULO VII. Referencias bibliográficas	111
CAPÍTULO VIII. Anexos	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efecto de la temperatura sobre la transmisión del pulso.	24
Tabla 2. Efecto de las dimensiones del espécimen en la transmisión del pulso ultrasónico.	25
Tabla 3. Gradaciones de muestras de ensayo.	34
Tabla 4. Numero de esferas o carga abrasiva.	35
Tabla 5. Limites granulométricos recomendados para distintos tamaños máximos del agregado. Porcentajes pasantes.	43
Tabla 6. Resistencia promedio a la compresión, Fcr, cuando no se dispone de datos para establecer la desviación estándar.	43
Tabla 7. Factor para corregir α por tamaño máximo (Kr).	45
Tabla 8. Factor para corregir α por tipo de agregado (Ka).	45
Tabla 9. Máximos valores de α para distintas condiciones de servicio o ambientales.	46
Tabla 10. Factor para corregir la dosis de cemento por tamaño máximo (C1).	47
Tabla 11. Factor para corregir la dosis de cemento por tipo de agregado (C2).	47
Tabla 12. Contenidos mínimos de cemento en función de las condiciones de servicio o ambientales.	48
Tabla 13. Granulometría de la arena lavada.	65
Tabla 14. Granulometría de la piedra picada.	66
Tabla 15. Porcentaje desgaste Los Ángeles de la piedra picada.	67
Tabla 16. Densidad y absorción de la arena lavada.	67
Tabla 17. Densidad y absorción de la Piedra picada.	68
Tabla 18. Humedad de la arena lavada.	68
Tabla 19. Humedad de la piedra picada.	68
Tabla 20. Relación beta.	68
Tabla 21. Parámetros utilizados para el diseño de mezcla.	69
Tabla 22. Componentes del diseño de mezcla.	70
Tabla 23. Dosificación de los materiales para la mezcla.	70
Tabla 24. Medición del asentamiento.	70
Tabla 25. Peso unitario promedio a los 7 días.	71
Tabla 26. Peso unitario promedio a los 14 días.	71
Tabla 27. Peso unitario promedio a los 28 días.	71
Tabla 28. Ensayo a compresión promedio a los 7 días.	71
Tabla 29. Ensayo a compresión promedio a los 14 días.	72
Tabla 30. Ensayo a compresión promedio a los 28 días.	72
Tabla 31. Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros a los 28 días.	72

Tabla 32. Resultados estadísticos de la viga patrón.	72
Tabla 33. Comparación de los resultados obtenidos en la viga con vacíos esféricos, tomando en cuenta los centros de los vacíos.	101
Tabla 34. Comparación de los resultados obtenidos en la viga con vacíos esféricos, tomando en cuenta los alrededores de los vacíos.	101
Tabla 35. Comparación de los resultados obtenidos en la viga con vacíos planos en los alrededores de los vacíos.	101
Tabla 36. Velocidades promedios en la viga con junta central a partir de la disposición indirecto.	102

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Gráfica correspondiente a la disposición indirecta cuando hay presencia de grieta superficial o capa de calidad inferior.	22
Gráfico 2. Representación de los Tiempos de viaje vs Distancia.	28
Gráfico 3. Curva granulométrica de la arena lavada.	66
Gráfico 4. Curva granulométrica de la piedra picada.	67
Gráfico 5. Relación arena / agregado total, β (%).	69
Gráfico 6. Distribución normal de velocidades en la viga patrón.	73
Gráfico 7. Viga con vacíos esféricos (Frontal – Posterior) 1/3.	74
Gráfico 8. Viga con vacíos esféricos (Frontal – Posterior) 2/3.	74
Gráfico 9. Viga con vacíos esféricos (Frontal – Posterior) 3/3.	75
Gráfico 10. Viga con vacíos esféricos (Superior – Inferior) 1/3.	75
Gráfico 11. Viga con vacíos esféricos (Superior – Inferior) 2/3.	76
Gráfico 12. Viga con vacíos esféricos (Superior - Inferior) 3/3.	76
Gráfico 13. Viga con vacíos esféricos (Superior - Posterior) 1/2.	77
Gráfico 14. Viga con vacíos esféricos (Superior - Posterior) 2/2.	77
Gráfico 15. Viga con vacíos esféricos (Superior – Frontal) 1/2.	78
Gráfico 16. Viga con vacíos esféricos (Superior - Frontal) 2/2.	78
Gráfico 17. Viga con vacíos esféricos (Inferior - Posterior) 1/2.	79
Gráfico 18. Viga con vacíos esféricos (Inferior - Posterior) 2/2.	79
Gráfico 19. Viga con vacíos esféricos (Inferior - Frontal) 1/2.	80
Gráfico 20. Viga con vacíos esféricos (Inferior - Frontal) 2/2.	80
Gráfico 21. Viga con vacíos planos (Frontal – Posterior) 1/3.	81
Gráfico 22. Viga con vacíos planos (Frontal – Posterior) 2/3.	81
Gráfico 23. Viga con vacíos planos (Frontal – Posterior) 3/3.	82
Gráfico 24. Viga con vacíos planos (Superior – Inferior) 1/3.	82
Gráfico 25. Viga con vacíos planos (Superior – Inferior) 2/3.	83
Gráfico 26. Viga con vacíos planos (Superior - Inferior) 3/3.	83
Gráfico 27. Viga con vacíos planos (Superior - Posterior) 1/2.	84
Gráfico 28. Viga con vacíos planos (Superior - Posterior) 2/2.	84
Gráfico 29. Viga con vacíos planos (Superior – Frontal) 1/2.	85
Gráfico 30. Viga con vacíos planos (Superior - Frontal) 2/2.	85
Gráfico 31. Viga con vacíos planos (Inferior - Posterior) 1/2.	86
Gráfico 32. Viga con vacíos planos (Inferior - Posterior) 2/2.	86

Gráfico 33. Viga con vacíos planos (Inferior - Frontal) 1/2.....	87
Gráfico 34. Viga con vacíos planos (Inferior - Frontal) 2/2.....	87
Gráfico 35. Viga con vacío tubular continuo (Frontal – Posterior) 1/3.....	88
Gráfico 36. Viga con vacío tubular continuo (Frontal – Posterior) 2/3.....	88
Gráfico 37. Viga con vacío tubular continuo (Frontal – Posterior) 3/3.....	89
Gráfico 38. Viga con vacío tubular continuo (Superior – Inferior) 1/3.....	89
Gráfico 39. Viga con vacío tubular continuo (Superior – Inferior) 2/3.....	90
Gráfico 40. Viga con vacío tubular continuo (Superior - Inferior) 3/3.....	90
Gráfico 41. Viga con vacío tubular continuo (Superior - Posterior) 1/2.....	91
Gráfico 42. Viga con vacío tubular continuo (Superior - Posterior) 2/2.....	91
Gráfico 43. Viga con vacío tubular continuo (Superior – Frontal) 1/2.....	92
Gráfico 44. Viga con vacío tubular continuo (Superior - Frontal) 2/2.....	92
Gráfico 45. Viga con vacío tubular continuo (Inferior - Posterior) 1/2.....	93
Gráfico 46. Viga con vacío tubular continuo (Inferior - Posterior) 2/2.....	93
Gráfico 47. Viga con vacío tubular continuo (Inferior - Frontal) 1/2.....	94
Gráfico 48. Viga con vacío tubular continuo (Inferior - Frontal) 2/2.....	94
Gráfico 49. Viga con junta en su capa central (Frontal – Posterior) 1/2.....	95
Gráfico 50. Viga con junta en su capa central (Frontal – Posterior) 2/2.....	95
Gráfico 51. Viga con junta en su capa central (Superior – Inferior) 1/3.....	96
Gráfico 52. Viga con junta en su capa central (Superior – Inferior) 2/3.....	96
Gráfico 53. Viga con junta en su capa central (Superior - Inferior) 3/3.....	97
Gráfico 54. Viga con junta en su capa central (Superior - Posterior) 1/1.....	97
Gráfico 55. Viga con junta en su capa central (Superior – Frontal) 1/1.....	98
Gráfico 56. Viga con junta en su capa central (Inferior - Posterior) 1/1.....	98
Gráfico 57. Viga con junta en su capa central (Inferior - Frontal) 1/1.....	99
Gráfico 58. Viga con junta en su capa central (Indirecto) 1/3.....	99
Gráfico 59. Viga con junta en su capa central (Indirecto) 2/3.....	100
Gráfico 60. Viga con junta en su capa central (Indirecto) 3/3.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general del sistema de operación.	18
Figura 2. Disposición de los transductores.	20
Figura 3. Disposición para transmisión indirecta.	22
Figura 4. Evaluación de la profundidad de afectación en concreto dañado.	28
Figura 5. Cernidora mecánica modelo Gilson Screen.	33
Figura 6. Máquina Los Ángeles.	35
Figura 7. Picnómetro con la muestra y el agua.	36
Figura 8. Diseño de viga patrón.	39
Figura 9. Diseño de viga con vacíos esféricos.	40
Figura 10. Diseño de viga con vacíos planos.	40
Figura 11. Diseño de viga con vacío tubular continuo.	41
Figura 12. Diseño de viga con junta en su capa central.	41
Figura 13. Mezcladora de eje vertical.	53
Figura 14. Vaciado de viga con vacíos esféricos.	55
Figura 15. Vaciado de viga con vacíos planos.	56
Figura 16. Vaciado de viga con vacío tubular continuo.	56
Figura 17. Vaciado de viga con junta en su capa central.	57
Figura 18. Elaboración del Cono de Abrams.	58
Figura 19. Ensayo a compresión de cilindros de concreto.	60
Figura 20. Equipo de ultrasonido.	61
Figura 21. Secciones cuadradas en vigas.	62
Figura 22. Ensayo de pulso ultrasónico.	63

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I. Certificado de calidad enviado por BZS CONSTRUCCIÓN, S.A.	113
Anexo II. Fallas de cilindros ensayados.	114
Anexo III. Diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión.	117
Anexo IV. Resultados del ensayo de pulso ultrasónico.....	118

INTRODUCCIÓN

A menudo es necesario poner a prueba estructuras de concreto después de su endurecimiento para determinar si son adecuadas para el uso al cual están destinadas. Para poner a prueba estas estructuras se suelen aplicar ensayos no destructivos con el fin de determinar las condiciones del concreto ya endurecido sin poner en riesgo la estructura.

El propósito de este estudio consistió en evaluar la eficiencia del ensayo de pulso ultrasónico en elementos de concreto, determinando la exactitud con la cual el ensayo refleja la presencia de vacíos o discontinuidades en el concreto.

Para cumplir con los objetivos de la investigación se realizó un diseño de mezcla de concreto de 250 kgf/cm² para elaborar cinco vigas, una patrón, tres vigas que poseen en su interior objetos comunes de densidades menores a la del concreto con el fin de simular vacíos en el interior del elemento y por último una viga que posee una junta en su capa central la cual fue simulada con aserrín.

Estas vigas serán ensayadas, determinando velocidades de ultrasonido aceptables en la viga patrón y contrastando los resultados del ensayo de ultrasonido en el resto de las vigas con la disposición inicial de los vacíos.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. El problema de la investigación.

Con el fin de garantizar la correcta compactación del concreto durante el proceso constructivo de edificaciones se emplean métodos manuales o de vibración que permiten densificar la mezcla de concreto reduciendo al mínimo la cantidad de vacíos generados, principalmente por el aire atrapado y por la evaporación de parte del agua de amasado.

Sin embargo, no está definido un tiempo específico de vibración para reducir al mínimo estos vacíos, dejando a criterio del operador determinar este tiempo mediante la observación directa de la superficie en las cercanías del punto de penetración del vibrador. Si se genera exceso de vibración en una zona ocurrirá segregación del materia, haciendo que los granos gruesos se agrupen generando discontinuidades o vacíos en el interior del elemento.

Adicionalmente, Porrero S. Joaquín (2009) y otros establece que en la construcción de obras civiles existe la tendencia a trabajar con concretos de alta fluidez, que son fáciles de colocar y alisar, por lo cual algunos constructores en vez de diseñar mezclas especiales o solicitar concretos premezclados con aditivos que retarden el fraguado, añaden agua a la mezcla indiscriminadamente. Esto produce una disminución sobre la resistencia mecánica, favorece la aparición de grietas, disminuye las defensas del concreto para lograr durabilidad y hace la mezcla propensa a la segregación.

Además, el concreto como material de construcción presenta variaciones en sus propiedades en relación con la edad de la estructura y de acuerdo con el último censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) más del 33 % de las edificaciones del país fueron construidas hace más de 29 años. Si se quiere realizar una evaluación de una estructura

particular de concreto, a fin de determinar las condiciones del material es necesario realizar ensayos que no afecten la integridad de la estructura.

Con el fin de evaluar estas estructuras existentes, se dispone de ensayos que permiten evaluar el concreto, en particular su resistencia en sitio tal como la extracción de núcleos de la estructura, cuyo procedimiento es costoso, difícil de ejecutar y en el cual influyen variables como la orientación vertical u horizontal de la extracción del núcleo, la resistencia alta o baja del concreto y el daño posible de la broca sobre el cilindro extraído. Los resultados obtenidos pueden ser complementados con ensayos adicionales para lograr una evaluación integral del concreto en la estructura. En este sentido vale la pena mencionar el ensayo esclerométrico, ensayos de penetración y madurez, muestras moldeadas en sitio y la determinación de la velocidad de propagación de onda a través de un pulso ultrasónico; Este último ensayo está descrito en la norma COVENIN 1681:1980 *“Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto”*.

Es posible realizar predicciones de la resistencia del concreto colocado, aún cuando no se recomienda su utilización para este fin, tal como lo indica el American Concrete Institute en su publicación ACI 437R-91. Sin embargo, su utilización para determinar zonas en la estructura donde el concreto posee diferente calidad o donde hay defectos internos es altamente recomendable. El siguiente trabajo especial de grado se plantea ¿Qué tan eficiente es este método para ubicar variaciones de densidad o vacíos en el interior del concreto?.

1.2. Objetivos de la Investigación.

1.2.1. Objetivo General.

Evaluar la eficiencia del ensayo de velocidad de propagación de ondas en la ubicación de discontinuidades o vacíos en elementos de concreto.

1.2.2. Objetivos Específicos.

1. Plantear la geometría de elementos de concreto que contengan vacíos y discontinuidades.
2. Detectar mediante la técnica de ultrasonido, vacíos y discontinuidades en elementos ensayados en el laboratorio.
3. Contrastar la ubicación planteada inicialmente con la obtenida en los elementos ensayados.
4. Calcular la confiabilidad del ensayo de velocidad de propagación de onda en la inspección de estructuras de concreto ya existentes.

1.3. Aportes.

Este trabajo especial de grado verifica la validez e importancia de los ensayos no destructivos en estructuras existentes, en particular, el ensayo de pulso ultrasónico. En el campo de mantenimiento y diagnóstico de obras existentes y en particular en aquellas edificaciones que poseen cierta edad de construcción se promueve la realización de ensayos no destructivos con el fin de evaluar las condiciones actuales del material.

A la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Central de Venezuela y en especial al laboratorio del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) permite dar continuidad a la investigación sobre el campo de los ensayos no destructivos; se ampliarán los conocimientos en el ensayo de pulso ultrasónico, y disponer de una base de datos de los resultados experimentales obtenidos en esta investigación.

Adicionalmente, se promueve la realización de futuros trabajos de investigación relacionados no solo con el ensayo de pulso ultrasónico sino también con el resto de los ensayos no destructivos; Así como realizar evaluaciones y verificaciones de otros ensayos no destructivos tales como el ensayo esclerométrico, ensayos de penetración y madurez y muestras moldeadas en sitio.

CAPÍTULO II. MARCO TEORICO

2.1. Cemento Portland.

De acuerdo con lo establecido con la Norma COVENIN 28:1993 “Cemento *Portland. Especificaciones*” el cemento Portland “es el producto obtenido por la pulverización de Clinker Portland, el cual consiste esencialmente en silicatos de calcio hidráulico con la adición de agua y sulfato de calcio”.

2.1.1. Clasificación del cemento Portland.

De acuerdo con la Norma COVENIN 28:1993 “*Cemento Portland. Especificaciones*” el cemento Portland se clasifica según su uso en:

- Tipo I: Usado en las construcciones de concreto en general, cuando no se requieren las propiedades especiales correspondientes a los otros tipos.
- Tipo II: Usado en obras expuestas a la acción moderada de los sulfatos, o donde se requiera un calor de hidratación moderado.
- Tipo III: Usado en construcciones que requieren altas resistencias iniciales.
- Tipo IV: Usado en obras donde sea necesario un muy bajo calor de hidratación.
- Tipo V: Usado en construcciones que requieren alta resistencia a los sulfatos.

2.2. Agregados y sus funciones.

Los agregados son fragmentos o granos, usualmente pétreos, cuyas finalidades específicas son abaratar la mezcla y dotarla de ciertas características favorables, entre las cuales se destaca la disminución de la retracción de fraguado. Porrero (2009).

2.2.1. Ensayos de los agregados.

Para determinar la calidad de los agregados deben realizarse una serie de ensayos tales como:

- Ensayo Granulométrico: COVENIN 255:1998 “*Agregados. Determinación de la composición granulométrica*”. Tiene como objeto determinar por cernido la distribución de los tamaños de las partículas de agregados finos y gruesos.
- Ensayo para la determinación del material pasante del tamiz #200: COVENIN 258:1977 “*Método de ensayo para la determinación por lavado del contenido de materiales más finos que el cedazo COVENIN 74 micras en agregados minerales*”. Tiene como objeto determinar por lavado, en un agregado la cantidad de material más fino que el cedazo COVENIN 74 micras (#200).
- Ensayo de absorción y densidad: COVENIN 268:1998 “*Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción*” COVENIN 269:1998 “*Agregado grueso. Determinación de la densidad y la absorción*”. Tiene como objeto determinar la densidad aparente, densidad aparente con muestra saturada y de superficie seca, la densidad nominal y la absorción del agregado.
- Ensayo de humedad: de acuerdo con Porrero (2009), la humedad puede encontrarse en los agregados de dos formas diferentes, cuando el agua forma una película alrededor de los granos del agregado y cuando el agua rellena los poros y micro – poros internos de los granos. COVENIN 1375:1979 “*Método de ensayo para la determinación por secado, el contenido de humedad total y superficial en el agregado*”.
- Ensayo de desgaste Los Ángeles: COVENIN 266:1977: “*Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste en agregados gruesos menores de 38,1 mm (1 ½ ") por medio de la máquina de Los Ángeles*”. Tiene como

objeto determinar la resistencia al desgaste (abrasión) en agregados gruesos menores a 38,1 mm.

2.2.2. Tipos de agregados.

De acuerdo con Porrero (2009), los agregados están formados por dos fracciones:

Agregados finos: conformado por las partículas más finas es también denominado arena. Generalmente formada por granos naturales depositados por las aguas.

Agregados Gruesos: conformado por las partículas de mayor tamaño, generalmente roca triturada (piedra picada) o granos redondeados por el arrastre de las aguas (canto rodado). También son utilizados otros tipos como la grava, gravilla, arrocillo, etc.

2.3. Concreto.

El concreto es aquel material formado principalmente por dos partes: una parte pastosa y moldeable la cual se endurece con el tiempo y la otra formada por trozos pétreos que quedan envueltos por la parte pastosa. (Porrero 2009, p.31).

2.4. Diseño de mezcla.

Es aquel procedimiento mediante el cual se calculan las cantidades que debe haber de cada uno de los componentes que intervienen en la mezcla de concreto, para obtener de ese material el comportamiento deseado. (Porrero 2009, p. 123)

2.5. La ley de Abrams.

La Ley de Abrams permite establece la correspondencia entre la resistencia del concreto y la relación agua cemento a través de la siguiente fórmula:

$$\bar{R} = M/N^\alpha \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$\alpha = a/C$: es la relación agua / cemento en peso.

\bar{R} : es la resistencia media a la compresión (kgf/cm^2)

M, N: son constantes.

Porrero (2009) establece que a partir de una gran cantidad de ensayos, hechos sobre mezclas elaboradas con agregado grueso triturado, de 25,4 mm de tamaño máximo, arena natural y cemento Portland Tipo I, se obtuvieron buenos ajustes con las siguientes expresiones:

$$\bar{R}_7 = 861,3/13,1^\alpha \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\bar{R}_{28} = 902,5/8,69^\alpha \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\bar{R}_{90} = 973,1/7,71^\alpha \quad (\text{Ecuación 4})$$

2.6. Relación triangular.

La relación triangular es una expresión que permite relacionar la trabajabilidad con dos parámetros del diseño de mezcla tales como la relación agua cemento y la dosis de cemento.

$$C = k * T^n / \alpha^m \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

C: es la dosis de cemento (kgf/m^3).

$\alpha = a/C$: es la relación agua/cemento en peso.

- T:** asentamiento en el cono de Abrams.
- k, m, n:** constantes que dependen de las características de los materiales componentes de la mezcla y de las condiciones en que se elabora.

2.7. Concreto en estado fresco.

El concreto se encuentra en estado fresco mientras permanece fluido, desde que todos los componentes son mezclados hasta que se inicia el fraguado". (Porrero 2009, p.45).

Durante este lapso de tiempo el concreto es transportado, colocado en encofrados y compactado ya sea por vibración o manualmente.

2.8. Reología del concreto.

"Características que permiten el manejo y compactación del concreto, pueden variar con la viscosidad y con la tixotropía de la mezcla en el tiempo. Se define con base en tres características: fluidez, compactibilidad y estabilidad a la segregación" (Porrero 2009, p.45).

2.8.1. Fluidez.

"Indica el grado de movilidad de la mezcla, describiendo la calidad del fluido o viscosidad. Generalmente, la palabra trabajabilidad también se emplea con el significado de fluidez" (Porrero 2009, p.45).

2.8.2. Compactibilidad.

Al vibrar la mezcla esta se hace más fluida logrando una distribución más uniforme ocupando todos los espacios del encofrado y envolviendo bien las armaduras. "Esta propiedad que se conoce como tixotropía: atiesamiento en reposo y fluidificación en movimiento; y es la característica que permite la compactibilidad de la mezcla y su adaptación al molde" (Porrero 2009, p.46).

2.8.3. Estabilidad de la segregación.

Los componentes de la mezcla de concreto son heterogéneos: agua (líquido), arena y cemento (polvo), fragmentos de piedra y aire, estos materiales al ser mezclados tienen la tendencia a separarse en especial el agregado grueso. “depende de la viscosidad y de la tixotropía, y se relaciona con la cantidad y el tamaño de los granos” (Porrero 2009, p.46).

2.9. Trabajabilidad.

Se define como “El conjunto de propiedades del concreto que permiten manejarlo sin que se produzca segregación, colocarlo en los moldes y compactarlo adecuadamente” (Porrero 2009, p.46).

2.9.1. Cono de Abrams.

De acuerdo con la Norma COVENIN 339:1994 “Concreto. Método para la medición del asentamiento del cono de Abrams” el cono de Abrams es “Construido de un material rígido e inatacable por el concreto, con un espesor mínimo de 1.5 mm. Su forma interior debe ser la de un tronco de cono, de 200 ± 2 mm de diámetro de base mayor y, 100 ± 2 mm de base menor y 300 ± 2 mm de altura. Las bases deben ser abiertas, paralelas entre si y perpendiculares al eje del cono. El molde debe estar provisto de asas y aletas. El interior del molde debe ser relativamente suave y sin protuberancias tales como remaches”.

2.10. Tiempo de fraguado.

Al mezclarse el cemento con el agua se produce una pasta que mantiene en un principio una plasticidad prácticamente constante. Luego la mezcla pierde su plasticidad y se dificulta su manejo, este estado se conoce como fraguado inicial. A medida que se va endureciendo la mezcla se presenta un nuevo estado conocido como fraguado final en el cual la mezcla se atiesa.

2.11. Resistencias mecánicas.

De acuerdo con Porrero (2009) el concreto estructural se encuentra sometido a sollicitaciones muy variables tales como compresión, corte, tracción, y agentes agresivos, entre otros. Debido a que no es práctico realizar ensayos que analicen todos los aspectos tensionales, se ha establecido la costumbre de realizar el ensayo destructivo a compresión simple, sobre probetas normalizadas y a partir de sus resultados los valores de otras características mecánicas.

2.11.1. Resistencia a la compresión.

La resistencia de un concreto se determina al conocer el promedio de los resultados de ensayos válidos, sobre un conjunto de probetas normalizadas, a una fecha determinada y siguiendo un procedimiento establecido. Se hace referencia a ensayos válidos porque eventualmente el resultado de alguna o varias probetas puede ser rechazado por ciertas anomalías. Se debe trabajar siempre con un conjunto mínimo de probetas para contar con una confiabilidad estadística. (Porrero 2009, p.245).

2.12. Proceso de curado.

De acuerdo con Porrero (2009), el curado es la operación mediante la cual se protege el desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento, evitando la pérdida parcial del agua de reacción por efecto de la evaporación superficial, impidiendo la aparición de grietas en el concreto por retracción o fraguado. Adicionalmente, el curado mejora la resistencia mecánica, gana impermeabilidad, aumenta la resistencia al desgaste y a la abrasión, y logra una mayor durabilidad.

2.13. Superficie de fractura.

Al observar la superficie de fractura del concreto es posible apreciar tres situaciones claras las cuales pueden aparecer de forma combinada. De acuerdo con lo indicado por Porrero (2009) estas situaciones son:

- Rotura del agregado.
- Separación por la interface mortero/agregado.
- Rotura por el mortero o pasta.

2.14. Principios estadísticos.

2.14.1. Promedio.

De acuerdo con la Norma COVENIN 1976:2003 “Concreto. Evaluación y métodos de ensayo” la media aritmética del conjunto de los resultados involucrados puede utilizarse como tendencia central del valor de los ensayos.

$$\bar{X} = \frac{\sum_1^n xi}{n} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

\bar{X} = media muestral.

X_i = valor cualquiera.

n = número de datos.

2.14.2. Desviación estándar.

La Norma COVENIN 1976:2003 “Concreto. Evaluación y métodos de ensayo” define la desviación estándar o desviación típica como la dispersión del conjunto de datos estudiados y expresa la siguiente fórmula para su cálculo:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n X_i^2 - \frac{(\sum_1^n X_i)^2}{n}}{n-1}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

S: desviación estándar.

\bar{X} : media muestral.

- Xi:** valor cualquiera.
n: número de datos.

2.15. Ensayos no destructivos.

A menudo es necesario poner a prueba estructuras de concreto después de su endurecimiento para determinar si son adecuadas para el uso al cual están destinadas. Lo ideal es que tales pruebas sean realizadas sin dañar el concreto; las pruebas disponibles que cumplen con esta condición son los ensayos no destructivos. Las propiedades que se pueden evaluar mediante ensayos no destructivos y ensayos parcialmente destructivos, como la extracción de núcleos, son numerosas e incluyen parámetros fundamentales como densidad, módulo de elasticidad y resistencia, así como dureza superficial, absorción del soporte ubicación de las barras de refuerzo, tamaño y distancia de la superficie. En algunos casos también es posible comprobar la calidad de la mano de obra y la integridad estructural por la capacidad de detectar huecos y grietas.

Los ensayos no destructivos se pueden aplicar a estructuras antiguas y nuevas. En el caso de las nuevas estructuras, las principales aplicaciones son para realizar el control de calidad o resolver dudas sobre la calidad de los materiales o la construcción. Las pruebas realizadas en estructuras existentes suelen estar relacionadas con la evaluación de la integridad estructural o adecuación. En cualquier caso, si solo se realizaran pruebas mediante la extracción de núcleos para la prueba de compresión, el coste de extracción de muestras y su posterior ensayo puede permitir solo un número relativamente pequeño de pruebas para una gran estructura lo cual puede llevar a resultados dudosos. En estas situaciones se pueden realizar ensayos no destructivos como paso previo a la extracción de núcleos.

Algunas situaciones típicas en las cuales pueden ser utilizados los ensayos no destructivos son:

- Control de calidad de las unidades prefabricadas o la construcción en sitio.
- La eliminación de las incertidumbres acerca de la aceptabilidad del material suministrado, por la aparente falta de cumplimiento con la especificación.
- Evaluación de la mano de obra involucrada en dosificación, mezclado, colocación, compactación y curado del concreto.
- Monitoreo del desarrollo de la fuerza en relación con la eliminación de encofrado, el cese de curado, pretensado, aplicación de la carga o propósito similar.
- Localización y identificación de la extensión de las grietas, huecos y defectos similares dentro de una estructura de concreto.
- Comprobar la uniformidad de concreto.
- Comprobar la posición, la cantidad o la condición de refuerzo.
- Incremento del nivel de confianza de un menor número de pruebas destructivas.
- Medición de la variabilidad del concreto con el fin de ayudar en la selección de las muestras en lugares representativos de la calidad para ser evaluadas.
- Confirmación o localización de deterioro del concreto debido a factores tales como la sobrecarga, fatiga, incendios, explosiones o efectos ambientales.
- Evaluación del potencial de durabilidad del concreto.
- Seguimiento de los cambios a largo plazo en las propiedades del concreto.

2.16. Métodos básicos para realizar ensayos no destructivos de estructuras de concreto.

Los siguientes métodos, con algunas aplicaciones típicas, se han utilizado para realizar ensayos no destructivos en el concreto:

- Inspección visual, que es un precursor esencial para cualquier ensayo no destructivo previsto. Un Ingeniero Civil o estructural experimentado puede ser capaz de establecer las posibles causas de daños en una estructura de concreto y por lo tanto identificar cuáles de los diversos métodos de

ensayos no destructivos disponibles podría ser más útil para cualquier otra investigación del problema.

- Método de potencial eléctrico de media celda, que se utiliza para detectar el potencial de corrosión de las barras de refuerzo en el concreto.
- Prueba del martillo de rebote, utilizada para evaluar la dureza de la superficie de concreto.
- Prueba de medición de la profundidad de carbonatación, que se utiliza para determinar si la humedad ha alcanzado la profundidad de las barras de refuerzo y por lo tanto, la corrosión puede estar ocurriendo.
- Ensayo de permeabilidad, que se utiliza para medir el flujo de agua a través del concreto.
- Resistencia a la penetración, utilizado para medir la dureza de la superficie y de las capas cercanas a la superficie del concreto.
- Pruebas de la cobertura de concreto, que se utilizan para medir la distancia de las barras de acero de refuerzo debajo de la superficie del concreto y también para medir el diámetro de las barras de refuerzo.
- Prueba radiográfica, que se utiliza para detectar los huecos en el concreto.
- Pruebas de velocidad de pulso ultrasónico, que se utilizan principalmente para medir la velocidad del sonido en el concreto.
- Modelo tomográfico, que utiliza los datos de pruebas de transmisión ultrasónica en dos o más direcciones para detectar huecos en el concreto.
- Eco de las pruebas de impacto, que se utiliza para detectar vacíos, delaminación y otras anomalías en el concreto.
- Radar de penetración terrestre o radar de impulso, utilizado para detectar la posición de las barras de refuerzo.
- Escaneo a través de infrarrojo, que sirve para detectar vacíos, delaminación y otras anomalías en concreto y también detectar los puntos de entrada de agua en edificaciones.

2.17. Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico consiste en una vibración longitudinal de pulso que es producida por un transductor electro – acústico, el cual se coloca sobre la superficie del elemento a ser ensayado. Cuando el pulso generado es transmitido a través del concreto desde el transductor emisor, un complejo sistema de ondas, que incluye tanto ondas longitudinales como perpendiculares al plano donde se coloca el transductor emisor, se propaga a través del concreto. La primera onda en alcanzar el transductor receptor será la onda longitudinal, es decir, la onda de menor trayectoria entre los transductores. Esta onda es convertida en una señal eléctrica por el transductor receptor y se ve reflejada en el equipo como el tiempo que tarda la onda en salir del transductor emisor y llegar al receptor. La velocidad de pulso ultrasónico se puede expresar de la siguiente forma:

$$V = \frac{L}{T} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde:

V: es la velocidad de pulso.

L: es la longitud de la trayectoria.

T: es el tiempo que toma el pulso en atravesar dicha distancia.

2.18. Equipo para el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.

El equipo consiste esencialmente en un generador de pulso eléctrico, un par de transductores, un amplificador y un dispositivo electrónico para medir el intervalo de tiempo entre la transmisión del pulso generado en el transductor de transmisión y su llegada al transductor receptor. La Figura 1 muestra un diagrama general del sistema de operación.

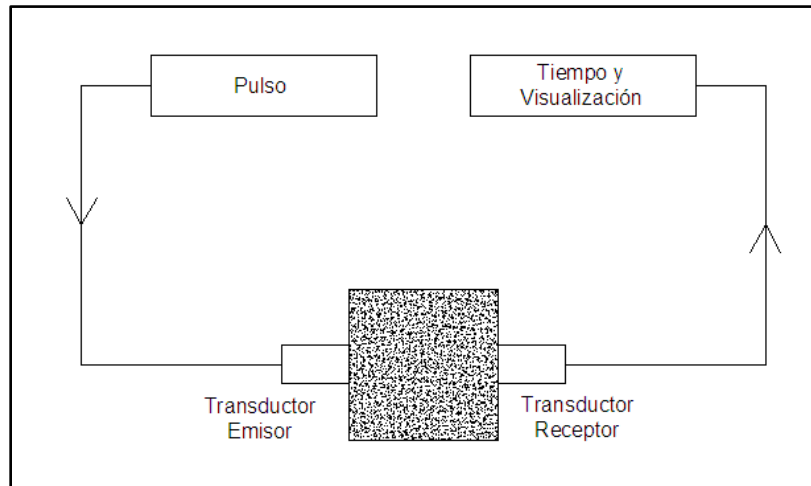


Figura 1. Diagrama general del sistema de operación.

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) "Manual del Concreto Estructural"

El equipo debe ser capaz de medir el tiempo de tránsito a través de longitudes de trayectoria que van desde aproximadamente 100 mm hasta el máximo espesor que debe ser inspeccionado con una precisión de $\pm 1\%$. Generalmente los transductores utilizados deben estar en la gama de 20 a 150 kHz, transductores con una frecuencia de 50 kHz a 60 kHz son adecuadas para la mayoría de las aplicaciones.

2.19. Aplicaciones del ensayo.

La medición de la velocidad de pulso ultrasónico de vibraciones longitudinales que pasan a través del concreto puede ser utilizada para las siguientes aplicaciones:

1. Determinación de la uniformidad del concreto de un miembro en específico o entre miembros.
2. Medida de cambios en las propiedades del concreto a través del tiempo.
3. Correlación de la velocidad de pulso y la resistencia como medida de la calidad del concreto.

4. Determinación del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson del concreto.

La variación obtenida en una serie de medidas de velocidad de pulso hechas a través de distintos caminos en un elemento refleja una variación correspondiente en el estado del concreto para cada camino. Cuando una región presenta baja compactación, es decir, existen vacíos o discontinuidades del material, la velocidad de pulso disminuye mientras que cuando la compactación es elevada la velocidad de pulso será mayor.

A medida que el concreto madura o se deteriora, ocurren cambios en sus propiedades los cuales se ven reflejados en un incremento o disminución de la velocidad de pulso, respectivamente. Estos cambios pueden ser monitoreados realizando ensayos en intervalos de tiempo apropiados.

Las medidas de velocidad de pulso hechas en estructuras de concreto pueden ser utilizadas como control de calidad del material. En comparación con los ensayos de resistencia de cilindros normalizados, la velocidad de pulso tiene la ventaja de que se relaciona directamente con el concreto colocado en la estructura, mientras que los cilindros normalizados no siempre son representativos del concreto en sitio.

2.20. Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico.

2.20.1. Disposición de los transductores.

El transductor receptor detecta la primera onda en llegar a éste, la cual debe corresponder a la onda que viaja a través de la menor distancia entre ambos transductores. Adicionalmente, la dirección en la cual se propaga la mayor energía viene dada por el ángulo recto a la cara del transductor emisor. Existen distintas disposiciones de los transductores los cuales generalmente son escogidos con base en el número de caras accesibles del elemento a ser ensayado o al tipo de

discontinuidad que se quiere evaluar. Entre estas disposiciones podemos encontrar:

1. Transmisión directa (Caras opuestas). Figura 2 (1).
2. Transmisión semi-directa (Caras adyacentes). Figura 2 (2).
3. Transmisión indirecta (Sobre la misma cara). Figura 2 (3).

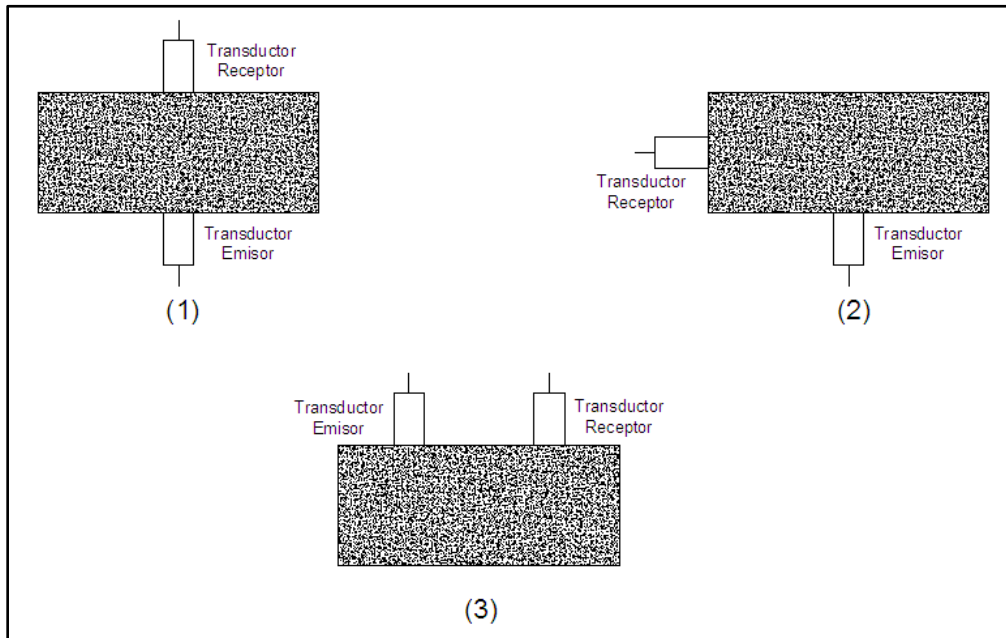


Figura 2. Disposición de los transductores.

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) "Manual del Concreto Estructural"

2.20.2. Determinación de la velocidad de pulso por transmisión directa.

La determinación de la velocidad de pulso ultrasónico de forma directa consiste en colocar los transductores en caras perpendicularmente opuestas entre sí. La exactitud de determinación de la velocidad es gobernada principalmente por la exactitud de la medición de longitud de la trayectoria. El acoplador utilizado debe extenderse lo más fino posible para evitar cualquier efecto que resulta de la diferentes velocidades en medio de acoplamiento y el concreto.

2.20.3. Determinación de la velocidad de pulso por transmisión semi-directa.

La disposición semi-directa consiste en colocar los transductores en caras adyacentes. La exactitud de determinación de la velocidad es similar al de la disposición directa a pesar de que puede existir alguna reducción en la precisión de la medición de la longitud de la trayectoria, en general esta longitud se calcula como la distancia medida centro a centro de las caras de los transductores.

2.20.4. Determinación de la velocidad de pulso por transmisión indirecta.

La transmisión indirecta es utilizada generalmente cuando sólo una de las caras del concreto es accesible, cuando la profundidad de una grieta superficial debe ser determinada o cuando la calidad de la superficie del concreto en relación a la calidad global es de interés. Esta disposición proporciona mediciones de la velocidad del pulso que son influidas por el concreto cercano a la superficie, esta región es a menudo de composición diferente a la del concreto dentro del cuerpo del elemento estudiado y los resultados de la prueba pueden no ser representativos del concreto. La velocidad indirecta es mucho menor que la velocidad directa en el mismo elemento de concreto, aproximadamente entre un 5 y un 20 % menor que la velocidad establecida en la transmisión directa.

Con la transmisión indirecta existe cierta incertidumbre con respecto a la longitud exacta de la trayectoria de transmisión debido al gran tamaño de las zonas de contacto entre los transductores y el concreto. Por lo tanto, es preferible hacer una serie de mediciones con los transductores a diferentes distancias, aparte de eliminar esta incertidumbre. Para ello, el transductor de transmisión debe ser colocado en contacto con la superficie de concreto en un punto X fijo y el transductor receptor se debe colocar en X_n incrementos fijos a lo largo de una línea elegida en la superficie del elemento de estudio. Los tiempos de transmisión

registrados deben ser representados como puntos en un gráfico que muestra su relación con la distancia que separa los transductores. (Figura 3 y Gráfico 1)

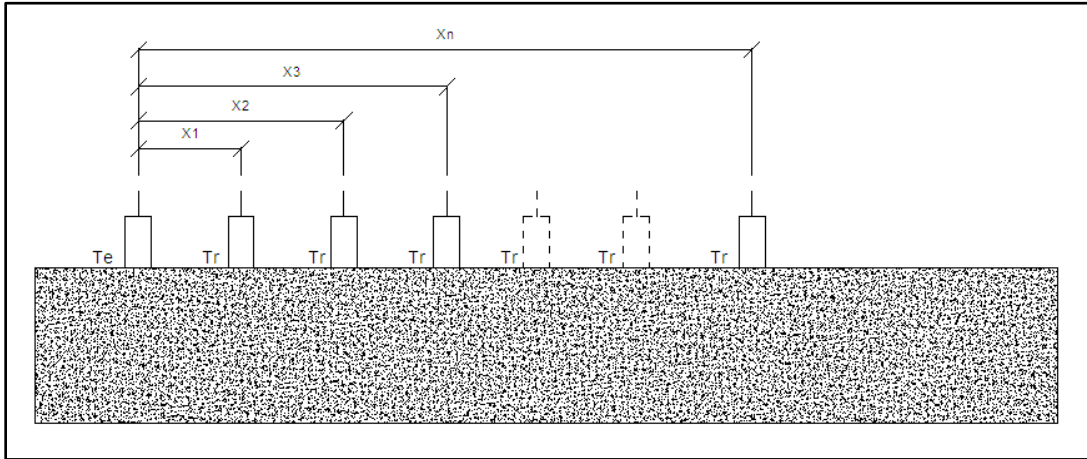


Figura 3. Disposición para transmisión indirecta.

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) "Manual del Concreto Estructural"

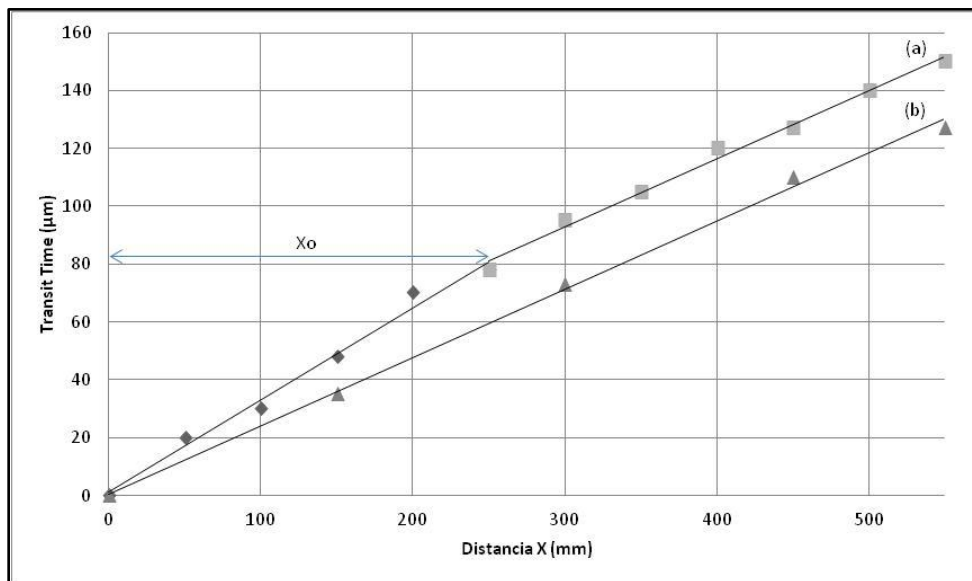


Gráfico 1. Gráfica correspondiente a la disposición indirecta cuando hay presencia de grieta superficial o capa de calidad inferior.

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) "Manual del Concreto Estructural"

2.20.5. Acoplamiento de los transductores en la superficie del concreto.

Para asegurarse que los pulsos ultrasónicos generados por el transductor emisor pasen a través del concreto y luego sean detectados por el transductor receptor, es necesario que haya un adecuado acoplamiento acústico entre el concreto y la cara de los transductores. Para muchas superficies de concreto, el acabado es suficientemente suave como para asegurar un buen contacto acústico por el uso de un medio de acoplamiento y presionando el transductor contra la superficie del elemento ensayado. Acopladores típicos son la vaselina, grasa y jabón suave.

2.21. Factores que influyen en la medida de la velocidad de pulso ultrasónico.

2.21.1. Contenido de humedad.

El contenido de humedad tiene dos efectos en la velocidad del pulso, uno químico y otro físico. Estos efectos son importantes en la producción de las correlaciones para la estimación de la resistencia del concreto. Entre un cubo estándar adecuadamente curado y un elemento estructural hecho del mismo concreto, puede haber una diferencia significativa de velocidad de pulso. Gran parte de la diferencia se explica por el efecto de diferentes condiciones de curado en la hidratación del cemento, mientras que algunas de las diferencias se deben a la presencia de agua libre en los espacios vacíos. Es importante que estos efectos sean considerados cuidadosamente cuando se estima la fuerza.

2.21.2. Temperatura del concreto.

Se ha encontrado que las variaciones de la temperatura del concreto entre 10°C y 30°C causan cambios no significativos excluyendo cambios en ocurrencia de cambios en la resistencia o propiedades elásticas por lo tanto, deben realizarse correcciones a las mediciones de la velocidad de pulso para temperaturas fuera de este rango de acuerdo a la tabla 1.

Tabla 1. Efecto de la temperatura sobre la transmisión del pulso.

Fuente: International Atomic Energy Agency (2002) "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures"

Temperature	Correlation to the measured pulse velocity	
	Air dried concrete	Water saturated concrete
°C	%	%
60	+5	+4
40	+2	+1.7
20	0	0
0	-0.5	-1
-4	-1.5	-7.5

2.21.3. Dimensiones del espécimen.

La velocidad de pulsos cortos de vibración es independiente de la forma y tamaño de la muestra en la que se desplazan, a menos que su menor dimensión lateral sea menor que un cierto valor mínimo. Por debajo de este valor, la velocidad de pulso se puede ver reducida apreciablemente. El grado de esta reducción depende principalmente de la relación de la longitud de onda de las vibraciones del pulso con la menor dimensión lateral de la muestra pero es insignificante si la relación es menor que la unidad. La Tabla 2 muestra la relación entre la velocidad de pulso en el concreto, la frecuencia del transductor y la dimensión lateral mínima admisible de la muestra. Si la dimensión lateral mínima es menor que la longitud de onda o si se utiliza la disposición de transmisión indirecta, el modo de propagación cambia y por lo tanto la velocidad medida será diferente. Esto es particularmente importante en los casos en que se están comparando elementos de hormigón de tamaños significativamente diferentes.

Tabla 2. Efecto de las dimensiones del espécimen en la transmisión del pulso ultrasónico.

Fuente: International Atomic Energy Agency (2002) "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures"

Transducer Frequency	Pulse Velocity in Concrete (km/s)		
	Vc	Vc	Vc
KHz	Minimum permissible lateral specimen dimension		
	Mm	mm	Mm
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

2.21.4. Efecto de las barras de refuerzo.

La velocidad de pulso ultrasónico medida en el concreto armado en las proximidades de barras de refuerzo es por lo general mayor que en concreto en masa de la misma composición. Esto se debe a que la velocidad de pulso en el acero puede ser hasta dos veces la velocidad medida en el concreto en masa y, bajo ciertas condiciones, el primer pulso en llegar al transductor receptor viaja en parte en el concreto y en parte en el acero. El aparente aumento en la velocidad de pulso depende de la proximidad de las mediciones a la barra de refuerzo, el diámetro y el número de barras y su orientación con respecto a la trayectoria de propagación. La frecuencia del pulso y condiciones de la superficie de la barra también pueden afectar el grado de influencia del acero en la medición de la velocidad. Correcciones de los valores medidos reducirán la precisión de la velocidad de pulso estimada en el concreto de forma que, siempre que sea posible, las mediciones deben realizarse de tal manera que el acero no se encuentre en la ruta directa entre los transductores o en sus cercanías.

2.21.5. Determinación de la uniformidad del concreto.

Las heterogeneidades en el concreto dentro o entre los miembros causan variaciones en la velocidad de pulso, que a su vez están relacionadas con variaciones en la calidad. Las mediciones de la velocidad de pulso proporcionar un medio de estudio de la homogeneidad y para este fin un sistema de puntos de medición que cubre uniformemente el volumen apropiado de hormigón en la estructura tiene que ser elegido.

El número de puntos de prueba depende del tamaño de la estructura, la precisión requerida y la variabilidad del concreto. En un elemento de concreto bastante uniforme, suele ser adecuado realizar ensayos en una cuadrícula de 1m, pero, en elementos pequeños o de concreto variable, puede ser necesaria una cuadrícula más fina. Cabe señalar que, en los casos en que la longitud de la trayectoria es la misma a lo largo del estudio, el tiempo medido puede ser utilizado para evaluar la uniformidad de concreto sin la necesidad de convertir a la velocidad. Esta técnica es particularmente adecuada para los estudios donde todas las mediciones se hicieron por mediciones indirectas.

Es posible expresar la homogeneidad en forma de un parámetro estadístico, tales como la desviación estándar o el coeficiente de variación de las mediciones de la velocidad de pulso realizados sobre la cuadrícula. Sin embargo, estos parámetros sólo pueden ser utilizados correctamente para comparar las variaciones en unidades concretas de dimensiones muy similares.

2.22. Detección de defectos.

Cuando un pulso ultrasónico viaja a través del concreto encuentra una interfaz concreto-aire, la transmisión de energía a través de esta interfaz no es despreciable. De esta forma, cualquier vacío lleno de aire situado inmediatamente entre los transductores obstruye el haz ultrasónico cuando la longitud proyectada del vacío es mayor que la anchura de los transductores y la longitud de onda

utilizada. Cuando esto sucede el primer pulso en llegar al transductor receptor habrá sido difractado alrededor de la periferia del vacío y el tiempo de tránsito será más largo que en el concreto similar sin ningún vacío.

El método no es muy exitoso cuando se aplica a estructuras con grietas debido a que las caras agrietadas por lo general se encuentran en contacto una con la otra como para permitir que la energía del pulso pase sin obstáculos a través de la grieta. Esto puede suceder en pilas verticales de carga agrietadas donde también existe una compresión suficiente para mantener las caras muy juntas. Si el concreto está rodeado por el agua de tal manera que la grieta se llena con agua, la grieta es indetectable ya que la energía ultrasónica puede viajar a través de un líquido.

2.22.1. Estimación del espesor de capa de concreto de baja calidad.

Si se sospecha que el concreto tiene una capa superficial de mala calidad debido a la mala fabricación, o daños por el fuego, heladas o sulfato de ataque, el espesor de la capa puede ser estimado a partir de mediciones ultrasónicas de los tiempos de tránsito a lo largo de la superficie.

La técnica utilizada es la correspondiente a una disposición indirecta de los transductores; colocando el transductor receptor a una distancia " x_1 " desde el transductor emisor. El tiempo de tránsito se mide y luego se repite el procedimiento para distancias de " x_2 ", " x_3 ", etcétera (Figura 4). Los tiempos de tránsito se representan frente a distancia como se muestra en el gráfico 2. A la distancia más corta de la separación de los transductores (X_1), el pulso viaja a través de la capa superficial y la pendiente de la línea experimental da la velocidad de pulso en esta capa superficial. Más allá de una cierta distancia de separación el primer pulso en llegar al transductor receptor ha pasado a lo largo de la superficie subyacente del concreto de calidad superior y la pendiente de estos puntos experimentales da la velocidad en el concreto de calidad inferior.

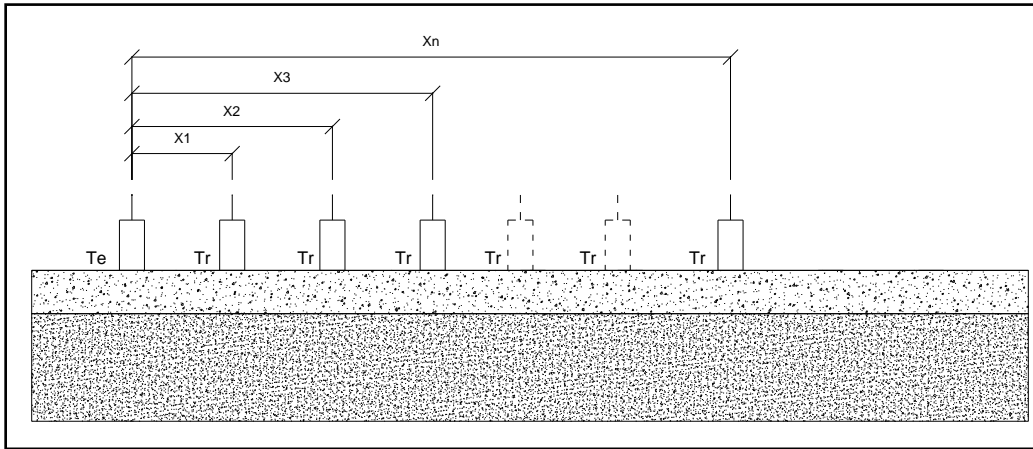


Figura 4. Evaluación de la profundidad de afectación en concreto dañado.

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) "Manual del Concreto Estructural"

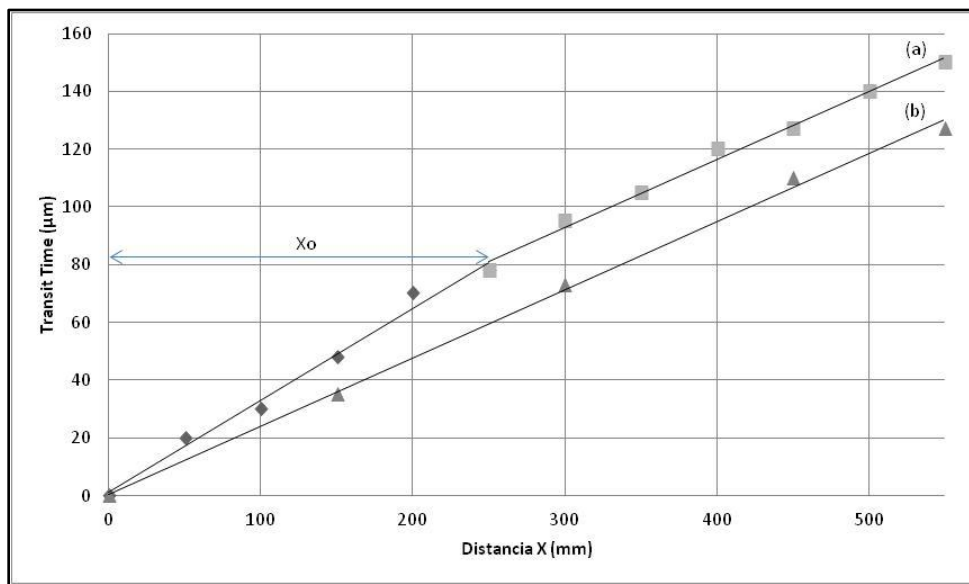


Gráfico 2. Representación de los Tiempos de viaje vs Distancia.

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) "Manual del Concreto Estructural"

La distancia "Xo" a la cual el cambio de pendiente ocurre junto con la medida de la velocidad de pulso en las dos capas de concreto, permite estimar el

espesor t en milímetros de la capa de calidad inferior mediante la siguiente ecuación.

$$t = \frac{X_o}{2} * \sqrt{\frac{(v_s - v_d)}{(v_s + v_d)}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

- Vd:** es la velocidad de pulso en el concreto de calidad inferior. [Km/s]
- Vs:** es la velocidad de pulso en la capa subyacente de calidad superior. [Km/s]
- Xo:** es la distancia desde el transductor emisor a la cual la pendiente cambia. [mm]

El método es aplicable a extensas áreas de superficie en la que el concreto inferior forma una capa distinta de espesor relativamente uniforme. Áreas localizadas de concreto dañado o tipo panal de abejas son más difíciles de ensayar pero es posible derivar un espesor aproximado de dicho material de mala calidad si se hacen tanto para la transmisión directa y mediciones de la propagación de superficie.

2.22.2. Determinación del módulo de elasticidad.

La relación entre estas constantes elásticas y la velocidad de un pulso ultrasónico que viaja en un medio elástico isótropo de dimensiones infinitas se expresa de acuerdo a la siguiente expresión.

$$Ed = \frac{\rho * v^2 (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

- Ed:** es el módulo de elasticidad dinámico. [MN/m²]

- μ** : es el coeficiente de Poisson.
- ρ** : es la densidad del material. [Kg/m³]
- v** : es la velocidad de pulso ultrasónico [km/s]

Si se conocen los valores de **μ** y **ρ** , es posible utilizar esta ecuación para determinar el valor **E_d** en muestras de concreto para una amplia gama de formas o tamaños. Esto es debido a que la velocidad de pulso no se ve afectada significativamente por las dimensiones de la muestra de ensayo, excepto cuando uno o más de las dimensiones laterales es pequeña en relación con la longitud de onda del pulso. Del mismo modo **v** se pudo determinar si se conocen los valores de **ρ** y **E_d** .

CAPÍTULO III. MÉTODO

En este capítulo se presenta toda la información referente a las distintas actividades y ensayos realizados durante la investigación con el fin de cumplir con los objetivos planteados en el Capítulo I de este documento. Estas actividades y ensayos permiten obtener información necesaria tanto para el diseño de mezcla, elaboración de las viguetas a ser ensayadas, ensayos de pulso ultrasónico, como la obtención de curvas que muestran la relación entre las velocidades obtenidas en la viga patrón y las demás vigas y el contraste de los resultados obtenidos. Para cumplir con los objetivos propuestos, se establecen una serie de actividades, las cuales se enumeran a continuación:

1. Búsqueda y almacenamiento de los materiales.
2. Caracterización de los agregados.
3. Diseño geométrico de vigas con vacíos en su interior.
4. Diseño de mezcla.
5. Dosificación de los materiales para la mezcla.
6. Elaboración de la mezcla.
7. Preparación y curado de los cilindros.
8. Preparación y curado de las vigas.
9. Caracterización del concreto fresco.
10. Caracterización del concreto endurecido en función del peso unitario.
11. Velocidad de pulso ultrasónico en vigas.
12. Procesamiento de la información.
13. Curvas comparativas de los resultados de velocidad de pulso ultrasónico.

3.1. Búsqueda y almacenamiento de los materiales.

El material utilizado para el diseño de mezcla fue donado por la empresa BZS CONSTRUCCIÓN, S.A. en las siguientes proporciones: $\frac{1}{2}$ m³ de arena lavada, cuatro (4) sacos de cemento Portland Tipo I. Los cuales fueron transportados hasta las instalaciones del IMME y se colocaron en sacos sellados y almacenados bajo techo para controlar la humedad de los mismos. El anexo I de este documento muestra el certificado de calidad del cemento suministrado por la compañía.

La piedra triturada utilizada para el diseño de mezcla fue donada por el IMME – UCV, producto de la trituración de cilindros de concreto estructural ensayados a compresión.

3.2. Caracterización de los agregados.

3.2.1. Granulometría.

La determinación de la granulometría fue realizada de acuerdo a lo establecido en la Norma COVENIN 255:1998 “Agregados. Determinación de la composición granulométrica”.

Para tamizar los agregados gruesos se utilizó una cernidora mecánica modelo Gilson Screen (Figura 5) haciendo pasar el agregado grueso por los tamices de 1 1/2”, 1”, 3/4”, 1/2”, 3/8” y 1/4”. Por otra parte el tamizado de los agregados finos se realizó utilizando los cedazos 3/4”, 1/2”, 3/8”, 1/4”, N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N°200.

Para determinar el material pasante por el tamiz N° 200 del agregado fino se siguió el procedimiento de la Norma COVENIN 258:1998 “Método de ensayo para la determinación por lavado del contenido de materiales más finos que el cedazo COVENIN 74 micras en agregados minerales”

El procedimiento consistió en tomar una muestra del agregado fino y se dejó secar al horno, luego se realizó un lavado sobre el tamiz N° 200. El material retenido en dicho tamiz fue secado al horno nuevamente y posteriormente fue pesado. Para calcular el porcentaje de material que es más fino que el pasante N° 200 se utilizó la siguiente ecuación.

$$\%F = \frac{W_0 - W_1}{W_0} * 100 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

- F:** Porcentaje de material más fino que el cedazo COVENIN 74.
- W₀:** Peso seco original de la muestra, en gramos [gr].
- W₁:** Peso seco de la muestra después de lavada [gr].



Figura 5. Cernidora mecánica modelo Gilson Screen.

Fuente: Elaboración propia. Fecha 22/05/2014

3.2.2. Desgaste los Ángeles.

Este ensayo se realizó según lo establecido en la Norma COVENIN 266:1977 "Método de ensayo para la determinar la resistencia al desgaste en agregados gruesos de menores de 38.1 mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles" (Figura 6).

Luego de realizarse la granulometría del agregado grueso se clasifico el material de acuerdo a su gradación utilizando la Tabla 3. Para la determinación de la carga abrasiva o número de esferas a utilizar en el ensayo se utilizó la Tabla 4.

Tabla 3. Gradaciones de muestras de ensayo.

Fuente: Norma COVENIN 266:1977.

GRADACIONES DE MUESTRAS DE ENSAYO					
TAMAÑO DEL CEDAZO Aberturas Cuadradas		PESO DE LOS TAMAÑOS INDICADOS (g)			
Pasa	Retenido en	A	B	C	D
38,1 mm (1 1/2")	25,4 mm (1")	1250 _± 25			
25,4 mm (1")	19,0 mm (3/4")	1250 _± 25			
19,0 mm (3/4")	12,7 mm (1/2")	1250 _± 10	2500 _± 10		
12,7 mm (1/2")	9,51mm (3/8")	1250 _± 10	2500 _± 10		
9,51 mm (3/8")	6,35mm (1/4")			2500 _± 10	
6,35 mm (1/4")	4,76mm (#4)			2500 _± 10	
4,76 mm (#4)	2,38mm (#8)				5000 _± 10
TOTAL		5000 _± 10	5000 _± 10	5000 _± 10	5000 _± 10

Tabla 4. Numero de esferas o carga abrasiva.

Fuente: Norma COVENIN 266:1977

GRADACION	NUMEROS DE ESFERAS	PESO DE LA CARGA (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15



Figura 6. Máquina Los Ángeles.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 02/06/2014

3.2.3. Absorción y peso específico.

Para determinar el peso específico y porcentaje de absorción del agregado se utilizó el procedimiento de acuerdo a la Norma COVENIN 268:1998 “Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción”.

Se tomó una muestra representativa de 3000 g de agregado fino y fue sumergida en agua durante aproximadamente 24 horas con el fin de lograr la saturación de los poros. Luego se extendió la muestra y se secó la superficie del

material con una estufa, removiendo la muestra con el fin de garantizar un secado homogéneo y controlando este procedimiento por medio del ensayo del cono especificado en la norma.

Posteriormente se introdujeron 500 g de la muestra saturada con superficie seca en el picnómetro, luego se agregó agua retirando las burbujas tal como se indica en la Norma. A continuación se incorporó más agua hasta la marca de calibración donde se determinó la masa del picnómetro con la muestra y el agua. (Figura 7)



Figura 7. Picnómetro con la muestra y el agua

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 26/05/2014

Luego se retiró el material del picnómetro y se secó en el horno a 100 °C durante aproximadamente 24 horas con el fin de determinar la masa de la muestra seca.

Finalmente se determinó la densidad aparente y la absorción de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\rho_a = \frac{d \cdot M_1}{M_a + M - M_p} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$A = \frac{M-M_1}{M_1} * 100 \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

- ρa :** es la densidad aparente [g/ml].
- M1:** es la masa de la muestra en el aire secada al horno [g].
- Ma:** es la masa del picnómetro lleno con agua [g].
- M:** es la masa de la muestra saturada con superficie seca [g].
- Mp:** es la masa del picnómetro con la muestra y el agua hasta la marca de calibración [g].
- A:** es la absorción [%].

Para el agregado grueso se sumergió en agua aproximadamente 10000 g del agregado durante 24 horas, luego se removió el agua y se secó la superficie de las partículas. Se tomó aproximadamente 5000 g de la muestra saturada con superficie seca y se sumergió en agua determinando su masa. Con las masas obtenidas se realizó el cálculo de la densidad con las siguientes formulas:

$$\rho a = \frac{d * M_2}{M_2 - M_3} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$A = \frac{M - M_1}{M_1} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

- ρa :** es la densidad aparente [g/ml].
- d:** es la densidad del agua [g/ml].
- M1:** es la masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno [g].
- M2:** es la masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y de superficie seca [g].
- M3:** es la masa en el agua de la muestra de ensayo saturada [g].

A: es la absorción [%].

3.2.4. Contenido de humedad.

Con el fin de determinar el contenido de humedad se siguió el procedimiento descrito en la Norma COVENIN 1375:1979 “*Método de ensayo para determinar por secado el contenido de humedad total y superficial del agregado*”. Luego los agregados fueron colocados en sacos sellados bajo techo para tener un mejor control de humedad.

Para realizar el ensayo se tomó una muestra húmeda del agregado por cada saco y se colocaron en el horno para su posterior secado a 100 °C. Una vez transcurridas 24 horas se determinaron las masas secas de cada muestra.

$$H = \frac{(W_o - W_s)}{W_s} * 100 \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

H: es el contenido de humedad de la muestra [%].

W_o: es el peso de la muestra original [g].

W_s: es el peso de la muestra seca [g].

3.3. Diseño geométrico de vigas con vacíos en su interior.

El diseño geométrico de las vigas con vacíos en su interior consistió en la representación gráfica de la ubicación de los vacíos en cada una de las vigas y las dimensiones y materiales de dichos vacíos. Se plantearon cinco vigas las cuales fueron denominadas de la siguiente forma:

1. Viga Patrón.
2. Viga con vacíos esféricos.
3. Viga con vacíos planos.

4. Viga con vacío tubular continuo.
5. Viga con junta en su capa central.

Todas las vigas tendrán dimensiones de 15 cm de ancho, 15 cm de alto y 75 cm de largo. La viga patrón se planteó sin ningún tipo de vacío en su interior. Para la viga con vacíos esférico se simularon los vacíos utilizando cinco pelotas, una de tenis, una de anime, una de plástico, una de papel periódico y un globo. Los diámetros para cada pelota fueron de 6,21 cm, 6,35 cm, 6,50 cm, 6,50 cm y 6,64 cm respectivamente. Para la viga con vacíos planos se simularon dichos vacíos con láminas de madera, anime, y restos de un ladrillo de arcilla con espesores de 2 cm, 1,6 cm, y 0,6 cm respectivamente. Todas las láminas poseen 15 cm de largo y 7 cm de ancho. Para la viga con vacío tubular continuo se utilizó un tubo de PVC de 2 pulgadas de diámetro para simular el vacío y finalmente para la viga con junta en su capa central se utilizó aserrín con un espesor aproximado de 4 mm para simular la junta en la viga. (Figuras 8 – 12)

Es importante señalar que la variación de los materiales para simular los vacíos en los elementos se debe a que no se conocía el comportamiento de la onda en dichos materiales.

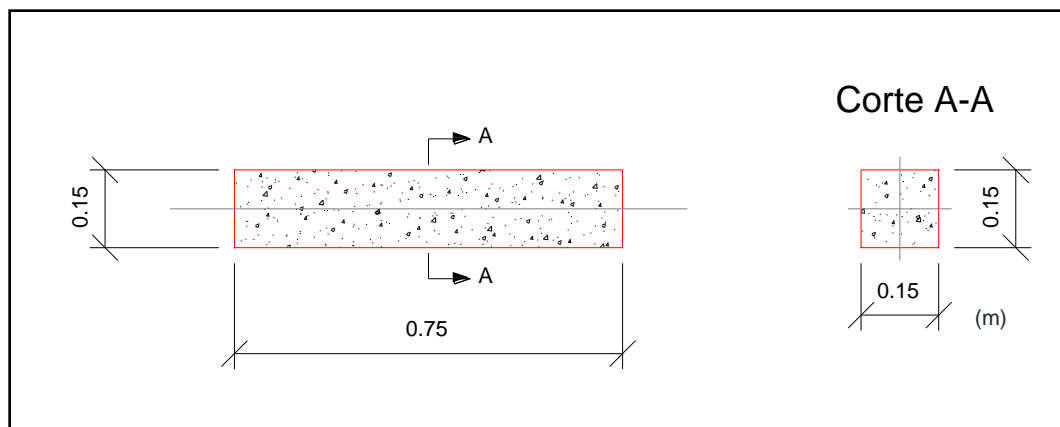


Figura 8. Diseño de viga patrón.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 07/06/2014

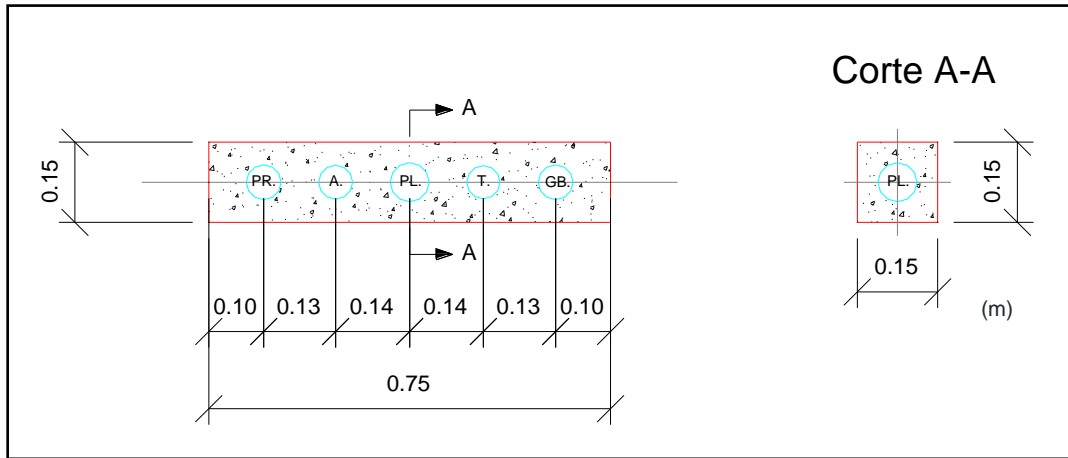


Figura 9. Diseño de viga con vacíos esféricos.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 07/06/2014

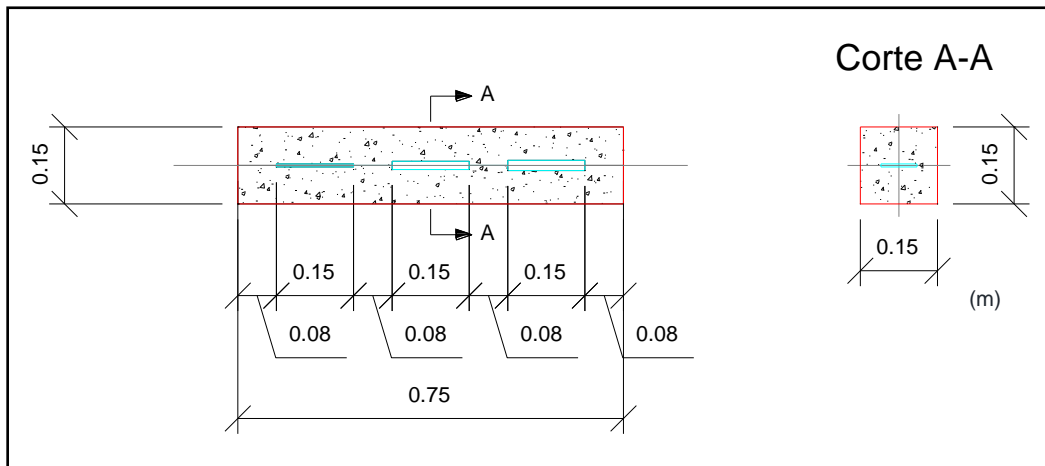


Figura 10. Diseño de viga con vacíos planos.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 07/06/2014

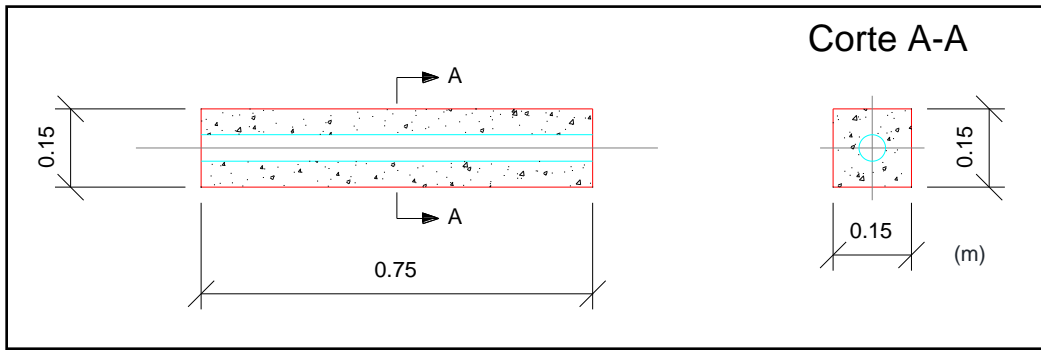


Figura 11. Diseño de viga con vacío tubular continuo.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 07/06/2014

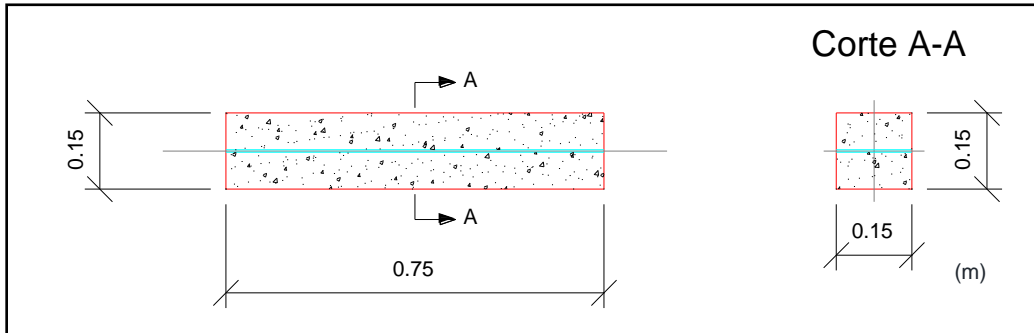


Figura 12. Diseño de viga con junta en su capa central.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 07/06/2014

3.4. Diseño de mezcla.

Se utilizó para el diseño de mezcla el método descrito en el “*Manual del Concreto Estructural*” Porrero (2009) y otros conforme con la Norma COVENIN 1753:2003, este método es organizado y sistemático y admite la utilización de agregados poco controlados y puede ser aplicado por profesionales con relativa poca experiencia.

Las variables fundamentales de este método son la relación agua / cemento, la trabajabilidad, la dosis de cemento y la resistencia las cuales se relacionan a través de dos leyes básicas tales como la relación triangular y la Ley de Abrams. Adicionalmente, toma en cuenta correcciones para la influencia del tamaño máximo y tipo de agregado.

A continuación se describe el procedimiento seguido y formulario para el cálculo de la dosificación de los componentes de la mezcla de concreto empleada.

3.4.1. Relación Beta (β).

Para determinar la relación beta se utilizó el método grafico descrito en el “*Manual del concreto estructural*” Porrero (2009) y otros. Dicha grafica consiste de tres ejes con escalas que representan el material pasante del agregado fino en porcentaje en el eje vertical izquierdo, el material pasante del agregado grueso en porcentaje en el eje vertical derecho y la relación arena / agregado total en porcentaje en el eje horizontal inferior.

Sobre la escala de los gruesos se marcaron los puntos correspondientes a los porcentajes pasantes del agregado grueso en cada cedazo y en la escala de los finos se marcaron los correspondientes al agregado fino. Luego se unieron con rectas los puntos marcados de los cedazos de igual denominación.

Sobre cada una de las rectas se señalaron los límites correspondientes a la tabla 5 en función del tamaño máximo del agregado. Luego se señalaron los valores extremos entre los que se puede escoger β . Finalmente el promedio de los valores extremos fue utilizado para el diseño de mezcla.

Tabla 5. Límites granulométricos recomendados para distintos tamaños máximos del agregado. Porcentajes pasantes.

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) y otros "Manual del Concreto Estructural".

LÍMITES GRANULOMÉTRICOS RECOMENDADOS PARA DISTINTOS TAMAÑOS MÁXIMOS DEL AGREGADO. PORCENTAJES PASANTES											
CERDAZO		TAMAÑOS MÁXIMOS: mm (PULGADAS)									
ABERTURA		88,9	76,2	63,5	50,8	38,1	25,4	19,1	12,7	9,53	6,35
mm	pulg	(31/2)	(3)	(21/2)	(2)	(11/2)	(1)	(3/4)	(1/2)	(3/8)	(1/4)
88,9	31/2	100-90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76,2	3	95-80	100-90	-	-	-	-	-	-	-	-
63,5	21/2	92-60	92-70	100-90	-	-	-	-	-	-	-
50,8	2	85-50	87-55	87-65	100-90	-	-	-	-	-	-
38,1	11/2	76-40	80-45	80-55	87-73	100-90	-	-	-	-	-
25,4	1	68-33	72-38	73-47	77-59	84-70	100-90	-	-	-	-
19,1	3/4	63-30	68-35	68-43	73-53	77-61	90-70	100-90	-	-	-
12,7	1/2	57-28	62-32	62-37	68-44	70-49	75-55	85-65	100-90	-	-
9,53	3/8	53-25	58-30	60-35	65-40	65-43	68-45	75-55	98-90	100-90	-
6,35	1/4	45-22	48-25	58-30	60-35	60-35	60-35	65-45	65-51	73-61	100-90
4,76	#4	45-22	48-25	50-28	55-30	55-30	55-30	60-38	58-42	62-48	65-52
2,38	#8	40-20	43-20	45-20	45-20	45-20	45-20	45-20	43-37	40-26	38-26
1,19	#16	35-15	35-15	35-15	35-15	35-15	35-15	35-15	31-17	26-14	21-9
0,59	#30	25-10	25-10	25-10	25-10	25-10	25-10	25-10	20-10	13-5	8-2
0,29	#50	16-7	16-7	16-7	16-7	16-7	16-5	16-5	11-5	7-3	5-1
0,14	#100	8-2	8-2	8-2	8-2	8-2	8-1	8-1	6-1	5-1	2-0

3.4.2. Resistencia promedio requerida (F_{cr}).

Partiendo de que la desviación estándar es desconocida, se utilizó la tabla 6 para estimar el sumando $z\sigma$ en función del grado del control de calidad previsto en obra y la resistencia especificada a la compresión.

Tabla 6. Resistencia promedio a la compresión, F_{cr} , cuando no se dispone de datos para establecer la desviación estándar.

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) y otros "Manual del Concreto Estructural".

RESISTENCIA ESPECIFICADA A LA COMPRESIÓN F_c (kg/cm^2)	RESISTENCIA REQUERIDA A LA COMPRESIÓN F_{cr} (kg/cm^2)		
	CONTROL DE CALIDAD EXCELENTE	CONTROL DE CALIDAD INTERMEDIO	SIN CONTROL DE CALIDAD
	Menor de 210 ⁽²⁾	$F_c + 45$	$F_c + 80$
De 210 a 350	$F_c + 60$	$F_c + 95$	$F_c + 170$
Más de 350	$F_c + 75$	$F_c + 110$	$F_c + 210$

La resistencia a la compresión con la cual se trabajo fue $F_c=250$ kgf/cm² y con un control de calidad excelente, debido a los ensayos realizados a los agregados. La ecuación utilizada para el cálculo de la resistencia promedio requerida (F_{cr}) fue:

$$F_{cr} = F_c + 60 \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde:

F_{cr}: es la resistencia promedio requerida [kgf/cm²].

F_c: es la resistencia a compresión especificada en el proyecto [kgf/cm²].

3.4.3. Relación agua / cemento (α).

Esta relación se obtuvo a través de la Ley de Abrams utilizando la siguiente ecuación:

$$\alpha = 3,147 - 1,065 * \text{Log}(\bar{R}_{28}) \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

$\alpha = a/C$: es la relación agua / cemento.

\bar{R}_{28} : es la resistencia media esperada a los 28 días. [kgf/cm²]

3.4.4. Relación agua / cemento corregida (α_c).

La influencia del tamaño máximo de agregado se corrigió utilizando un factor simbolizado como “K_r” y la influencia del tipo de agregado a través de un factor simbolizado como “K_a”. Las tablas 7 y 8 recogen valores de estos factores para situaciones promedio.

Tabla 7. Factor para corregir α por tamaño máximo (K_r).

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) y otros “Manual del Concreto Estructural”.

KR FACTOR PARA CORREGIR α POR TAMAÑO MÁXIMO, mm (PULGADAS)									
TAMAÑO MÁXIMO	6,35 (1/4)	9,53 (3/8)	12,7 (1/2)	19,1 (3/4)	25,4 (1)	38,1 (1 1/2)	50,8 (2)	63,5 (2 1/2)	76,2 (3)
FACTOR K_r	1,60	1,30	1,10	1,05	1,00	0,91	0,82	0,78	0,74

Tabla 8. Factor para corregir α por tipo de agregado (K_a).

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) y otros “Manual del Concreto Estructural”.

KA FACTOR PARA CORREGIR α POR TIPO DE AGREGADO			
	GRUESOS		
FINOS	TRITURADOS	SEMITRITURADOS	CANTO RODADO (GRAVA NATURAL)
Arena natural	1,00	0,97	0,91
Arena triturada	1,14	1,10	0,93

La ecuación utilizada para realizar las correcciones fue la siguiente:

$$\alpha_c = \alpha * K_r * K_a \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

- α : es la relación agua /cemento.
- α_c : es la relación agua /cemento corregida.
- K_r : es el factor para corregir α por tamaño máximo de agregado grueso.
- K_a : es el factor para corregir α por tipo de agregado grueso.

Una vez determinada la relación agua / cemento corregida se realizó la revisión por durabilidad, tomando el menor valor entre el requerido por resistencia estructural y el requerido por condiciones de servicio. Las tablas 9, 10 y 11 recogen valores de estos factores para situaciones promedio.

Tabla 9. Máximos valores de α para distintas condiciones de servicio o ambientales.

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) y otros "Manual del Concreto Estructural".

RESISTENCIA ESPECIFICADA Fc (kgf/cm ²) (2)	RELACION AGUA/CEMENTO POR PESO (1)	
	CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO	CONCRETO CON AIRE INCORPORADO
150 (3)	0,62	0,51
210	0,52	0,42
250	0,44	0,34
300	0,37	(4)
350	(4)	(4)

3.4.5. Dosis de cemento (C).

Utilizando la relación triangular se determinó la dosis de cemento a través de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{k \cdot T^n}{\alpha^m} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde:

- C:** es la dosis de cemento [kg/m³].
- α :** es la relación agua / cemento.
- T:** es el asentamiento del cono de Abrams [cm].
- K,n,m:** son constantes que dependen de las características de los materiales componentes de la mezcla y de las condiciones en que se elabora.

Debido a que se utilizó piedra triturada de 25,4 mm de tamaño máximo, arena natural y cemento Portland Tipo I los valores utilizados para k, n y m fueron 117,2, 0,16 y 1,3 respectivamente.

3.4.6. Dosis de cemento corregida (Cc).

Para corregir el valor de la dosis de cemento se realizó un procedimiento análogo al utilizado para corregir la relación agua / cemento. Los coeficientes

utilizados son C1 y C2; el primero está relacionado con el tamaño máximo del agregado y el segundo con el tipo de agregado utilizado.

Tabla 10. Factor para corregir la dosis de cemento por tamaño máximo (C1).

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) y otros "Manual del Concreto Estructural".

C₁ FACTOR PARA CORREGIR C POR TAMAÑO MÁXIMO, mm (PULGADAS)									
TAMAÑO MÁXIMO	6,35	9,53	12,7	19,1	25,4	38,1	50,8	63,5	76,2
	(1/4)	(3/8)	(1/2)	(3/4)	(1)	(1 1/2)	(2)	(2 1/2)	(3)
FACTOR C ₁	1,33	1,20	1,14	1,05	1,00	0,93	0,88	0,85	0,82

Tabla 11. Factor para corregir la dosis de cemento por tipo de agregado (C2).

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) y otros "Manual del Concreto Estructural".

C₂ FACTOR PARA CORREGIR C POR TIPO DE AGREGADO				
FINOS	GRUESOS	TRITURADOS	SEMITRITURADOS	CANTO RODADO (GRAVA NATURAL)
	Arena natural			
Arena triturada		1,28	1,23	0,96

Finalmente la ecuación utilizada para realizar las correcciones fue la siguiente:

$$C_c = C * C_1 * C_2 \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde:

- C_c:** es la dosis de cemento corregida [kg/m³].
- C:** es la dosis de cemento. [kg/m³].
- C₁:** es el factor para corregir C por tamaño máximo de agregado grueso.
- C₂:** es el factor para corregir C por tipo de agregado grueso.

Una vez determinada la dosis de cemento corregida se realizó la revisión por durabilidad, tomando el mayor valor de entre el requerido por trabajabilidad y el que asegura la durabilidad. (Tabla 12)

Tabla 12. Contenidos mínimos de cemento en función de las condiciones de servicio o ambientales.

Fuente: Porrero S. Joaquín (2009) y otros "Manual del Concreto Estructural".

TABLA VI.13 CONTENIDOS MÍNIMOS DE CEMENTO EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES DE SERVICIO O AMBIENTALES, SEGÚN COVENIN 1753:2003	
CONDICIONES AMBIENTALES	DOSIS MÍNIMA DE CEMENTO kg/m ³
En cualquier circunstancia. Los concretos masivos de represa son un caso especial ⁽¹⁾	270
En ambientes agresivos, marinos, o concretos sometidos a desgaste	350

3.4.7. Volumen absoluto de los granos de cemento (V_c).

De acuerdo con Porrero (2009) y otros para el cálculo del volumen absoluto de los granos de cemento, en la práctica, se recomienda multiplicar el peso del cemento por el valor de 0,30.

$$V_c = 0,30 * C \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde:

V_c: es el volumen absoluto de los granos de cemento [l/m³].

C: es la dosis de cemento [kg/m³].

3.4.8. Volumen absoluto de agua (a).

Para determinar el peso de agua en la mezcla se utilizó la siguiente ecuación:

$$a = C * \alpha \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde:

- a:** es el volumen del agua presente en la mezcla [l/m³].
- C:** es la dosis de cemento [kg/m³].
- α :** es la relación agua / cemento.

3.4.9. Volumen de aire atrapado (V).

Para determinar el volumen del aire en la mezcla se utilizó la siguiente ecuación:

$$V = C/P \quad \text{(Ecuación 25)}$$

Donde:

- V:** es el volumen de aire atrapado [l/m³].
- C:** es la dosis de cemento [kg/m³].
- P:** es el tamaño máximo de agregado [mm].

3.4.10. Volumen absoluto de los agregados.

Para simplificar el cálculo, primero se determinó el peso específico de los agregados combinados utilizando el promedio ponderado basado en la relación β tal como lo indica la ecuación 26.

$$\gamma_{(A+G)} = \beta * \gamma_A + (1 - \beta) * \gamma_G \quad \text{(Ecuación 26)}$$

Donde:

- γ_A :** es el peso específico del agregado fino [L/m³].
- γ_G :** es el peso específico del agregado grueso [kgf/m³].
- β :** es la relación beta.
- $\gamma_{(A+G)}$:** es el peso específico del agregado combinado [mm].

Luego se utilizó la ecuación x.x para determinar el volumen absoluto de los agregados en la mezcla.

$$V_{(A+G)} = (A + G)/\gamma_{(A+G)} \quad (\text{Ecuación 27})$$

Donde:

$V_{(A+G)}$: es el volumen absoluto de los agregados en la mezcla [l/m³].

A: es el peso del agregado fino [kgf/m³].

G: es el peso del agregado grueso [kgf/m³].

$\gamma_{(A+G)}$: es el peso específico del agregado combinado [mm].

3.4.11. Volumen y dosis de agregados.

Una vez conocido el peso específico de los agregados combinados y sabiendo que la suma de los volúmenes absolutos de todos los componentes de la mezcla debe ser igual a 1000 litros, entonces:

$$V_c + V_a + a + V_{(A+G)} = 1000 \text{ litros} \quad (\text{Ecuación 28})$$

Donde:

V_c: es el volumen absoluto de los granos de cemento [l/m³].

V: es el volumen de aire atrapado [l/m³].

a: es el volumen absoluto de agua [l/m³].

$V_{(A+G)}$: es el volumen absoluto de los agregados en la mezcla [L/m³].

Para calcular los pesos de los agregados finos y gruesos respectivamente se utilizó la relación β de acuerdo a las ecuaciones 29 y 30.

$$A = \beta * (A + G) \quad (\text{Ecuación 29})$$

$$G = (1 - \beta) * (A + G) \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde:

- β :** es la relación beta.
- A:** es el peso del agregado fino [kg/m³].
- G:** es el peso del agregado grueso [kg/m³].

3.5. Dosificación de los materiales para la mezcla.

Para el diseño de mezcla se consideró que el grado de humedad de los agregados se encontraba en la condición ideal de saturados con superficie seca, pero en la práctica esta condición no se da. Por lo tanto se realizaron correcciones por humedad para cada uno de los agregados.

Finalmente se corrigió la cantidad de agua de mezclado con el fin de no incorporar más agua a la mezcla evitando que se altere la relación agua / cemento.

3.5.1. Corrección por humedad.

La corrección por humedad fue realizada tanto para el agregado fino como para el agregado grueso utilizando las siguientes formulas:

$$G_{SSS} = G_W * \frac{(100 + Ab_G)}{(100 + w_G)} \quad (\text{Ecuación 31})$$

$$A_{SSS} = A_W * \frac{(100 + Ab_A)}{(100 + w_A)} \quad (\text{Ecuación 32})$$

Donde:

G_{sss} : es el peso del agregado grueso saturado con superficie seca [kgf/m³].

A_{sss} : es el peso del agregado fino saturado con superficie seca [kgf/m³].

G_w : es el peso del agregado grueso húmedo [kgf/m³].

A_w : es el peso del agregado fino húmedo [kgf/m³].

Ab_G : es la absorción del agregado grueso [%].

Ab_A : es la absorción del agregado fino [%].

w_G : es la humedad del agregado grueso [%].

w_A : es la humedad del agregado fino [%].

3.5.2. Corrección de la cantidad de agua de mezclado.

La corrección de la cantidad de agua de mezclado fue realizada con la siguiente ecuación:

$$a_M = a_D + A_{sss} - A_w + G_{sss} - G_w \quad (\text{Ecuación 33})$$

Donde:

a_M : es la cantidad de agua a usar en la mezcla [kgf/m³].

a_D : es la dosis de agua calculada en el diseño de mezcla [kgf/m³].

A_{sss}, G_{sss} : son las dosis de agregados supuestos saturados con superficie seca (fino y grueso) [kgf/m³].

A_w, G_w : son los pesos de los agregados en cualquier condición de humedad [mm].

3.6. Elaboración de la mezcla.

La mezcla de concreto fue realizada de acuerdo a lo establecido en la Norma COVENIN 354:2001 “*Método para mezclado en el laboratorio*”, la cual contempla el método para mezclado a mano y a máquina.

El mezclado del concreto se realizó en una mezcladora de eje vertical con capacidad de 75 litros y los materiales utilizados para la elaboración de la mezcla fueron piedra picada con tamaño máximo de una pulgada, arena lavada, Cemento Portland Tipo I y agua. (Figura 13)

Antes de iniciar el proceso de mezclado se pesó cada material a utilizar en la mezcla de acuerdo a las dosificaciones obtenidas en el diseño de mezcla. Primero se incorporó la piedra picada en la mezcladora, luego se agregó poco menos de la mitad del agua estimada para el diseño de mezcla seguido por la arena lavada, el cemento y el agua restante. Se dejó mezclar durante aproximadamente dos minutos con la finalidad de cubrir los agregados con la pasta de cemento, produciendo una pasta homogénea.



Figura 13. Mezcladora de eje vertical.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 26/06/2014

3.7. Preparación y curado de cilindros.

Para la preparación de los cilindros se utilizó el procedimiento especificado en la Norma COVENIN 338:2002 "*Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto*".

Para el vaciado de los cilindros se utilizaron moldes cilíndricos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura con superficie interior lisa. Los moldes fueron lubricados con grasa y vaciados en tres capas de aproximadamente un tercio de la altura del molde y fueron compactadas dando 25 golpes en toda su sección transversal con una barra normalizada de 5/8". Al compactar capas superiores la barra se penetra entre 20 y 30 mm en la capa inmediatamente inferior tal como lo especifica la norma.

Una vez finalizado el vaciado de los cilindros se esperó unos minutos y se realizó el enrasado de la superficie superior con la barra compactadora garantizando que quedaran lisas y al ras con el borde del molde.

Una vez transcurridas 24 horas se realizó el desencofrado de los cilindros y fueron colocados en la piscina de curado bajo agua saturada con cal hasta su correspondiente día de ensayo.

3.8. Preparación y curado de vigas.

El procedimiento utilizado para el vaciado de las vigas fue el descrito por la Norma COVENIN 340:2004 "*Elaboración y curado de probetas de laboratorio para ensayos a flexión*".

En general, para el vaciado de las vigas se utilizaron moldes rectangulares de 15 cm de ancho, 75 cm de largo y 15 cm de altura de acero con superficie interior lisa. Los moldes fueron lubricados con grasa y vaciado en dos capas de aproximadamente la mitad de la altura del molde y fueron compactadas dando 80

golpes por capa en toda su sección transversal con una barra de 5/8". Al compactar la capa superior la barra se penetra entre 20 y 30 mm en la capa inmediatamente inferior tal como lo especifica la norma. (Figura 14 – 17)

Para incorporar los vacíos a las vigas, una vez vaciada y compactada la primera capa de la viga se colocaron los vacíos simplemente apoyados sobre dicha capa y se procedió a vaciar la capa superior. En el caso particular de la viga con junta en su capa central se vació y compactó la primera capa de la viga y se agregó una capa de aserrín de aproximadamente 2 cm de espesor y se procedió a vaciar la capa superior.



Figura 14. Vaciado de viga con vacíos esféricos.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 26/06/2014



Figura 15. Vaciado de viga con vacíos planos.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 26/06/2014



Figura 16. Vaciado de viga con vacío tubular continuo.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 26/06/2014



Figura 17. Vaciado de viga con junta en su capa central.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 26/06/2014

3.9. Caracterización del concreto fresco.

3.9.1. Medición del asentamiento.

El método utilizado para la medición del asentamiento fue el descrito en la Norma COVENIN 339:1994 “*Método para la medición del asentamiento con el Cono de Abrams*”.

Primero se humedeció el interior del molde y se colocó sobre una superficie horizontal rígida, plana y no absorbente. Luego se sujetó el molde firmemente por las aletas con los pies y se llenó con la muestra de concreto en tres capas, cada una de ellas de un tercio del volumen del molde. Cada capa se compactó con 25 golpes de la barra compactadora de 5/8” distribuidos uniformemente en toda la sección. Las capas superiores fueron compactadas penetrando ligeramente la capa inmediatamente inferior. Antes de compactar la última capa el molde se llenó por exceso, se compactó y se enrasó con la barra compactadora. Inmediatamente

se retiró el molde alzándolo cuidadosamente en dirección vertical evitando movimientos laterales o torsionales.

Finalmente se determinó el asentamiento tomando la distancia entre la altura del molde y la altura promedio de la base superior del cono deformado. (Figura 18)



Figura 18. Elaboración del Cono de Abrams.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 26/06/2014

3.10. Caracterización del concreto endurecido.

3.10.1. Peso unitario.

Antes de ensayar cada cilindro a compresión, se tomaron dos medidas del diámetro y la altura de los mismos con un vernier. Con estas medidas se determinó el volumen de cada cilindro a ensayar. Una vez tomadas las medidas se pesaron los cilindros en la balanza correspondiente.

El cálculo del peso unitario en estado endurecido se realizó con la siguiente ecuación.

$$\rho = Pe/V \quad (\text{Ecuación 34})$$

Donde:

- ρ :** es la densidad en estado endurecido [kg/m³].
- Pe :** es el peso de la probeta en estado endurecido [kgf].
- V :** es el volumen de la probeta [m³].

El peso unitario correspondiente a cada muestra es el promedio del peso unitario de las tres probetas que la conforman.

3.10.2. Ensayo a compresión.

El ensayo a compresión de las probetas se realizó de acuerdo a lo descrito en la Norma COVENIN 338:2002 “*Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto*”

El procedimiento para este ensayo consistió en colocar los cilindros en la máquina de ensayo y se centraron cuidadosamente entre dos discos confinantes de neopreno. Se alinearon verticalmente con el vástago de aplicación de carga y se comprimieron hasta lograr la falla. Finalmente el resultado del ensayo es el promedio de las resistencias de los cilindros ensayados para una misma edad.

Para determinar la resistencia a compresión de cada cilindro se utilizó la siguiente ecuación.

$$R_c = P/A \quad (\text{Ecuación 35})$$

Donde:

- R_c :** es la resistencia a la compresión [kgf/cm²].
- P :** es la carga máxima aplicada [kgf].
- A :** es el área de la sección transversal del cilindro [m²].

Los cilindros fueron ensayados a los 7, 14 y 28 días luego del vaciado, para 7 y 14 días se ensayaron 3 cilindros, mientras que para 28 días se ensayaron dos cilindros (Figura 19). Las fallas de los cilindros ensayados y los diagramas de falla utilizados se muestran en los anexos II y III de este documento respectivamente.



Figura 19. Ensayo a compresión de cilindros de concreto.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 23/07/2014

3.10.3. Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros.

El método utilizado para determinar la velocidad de pulso ultrasónico en los cilindros fue el descrito por la Norma COVENIN 1681:1980 "*Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto*". El modelo del equipo utilizado para este ensayo fue "NDT JAMES INSTRUMENT INC. NON DESTRUCTIVE TESTING SYSTEM. V-meter MK-II". (Figura 20)



Figura 20. Equipo de ultrasonido.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 23/07/2014

El procedimiento para realizar el ensayo consistió la aplicación de vaselina en la zona a ensayar, garantizando un buen acoplamiento entre el transductor y el concreto. Luego se presionaron los transductores firmemente contra la superficie del concreto y se tomó la lectura del tiempo de paso de la onda. Finalmente se midió la distancia entre los dos puntos de aplicación de los transductores. Para determinar la velocidad de onda se utilizó la ecuación 8.

3.11. Velocidad de pulso ultrasónico en vigas.

El método utilizado para determinar la velocidad de pulso ultrasónico en las vigas fue el descrito por la Norma COVENIN 1681:1980 “*Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto*” y el procedimiento fue análogo al utilizado para ensayar los cilindros.

En primer lugar se dividió cada cara de las vigas en secciones rectangulares de aproximadamente 5 cm de lado con el fin de poder hacer un seguimiento a las lecturas realizadas y además poder presentar los resultados de forma estructurada. (Figura 21)



Figura 21. Secciones cuadradas en vigas.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 19/08/2014

Los ensayos para determinar la velocidad de pulso ultrasónico de forma directa y semi-directa se realizaron para todas las vigas (Figura 22). Se realizaron dos mediciones directas y cuatro semi-directas las cuales fueron denominadas de la siguiente forma:

1. Frontal – Posterior. (Directa)
2. Superior – Inferior. (Directa)
3. Superior – Posterior. (Semi-directa)
4. Superior – Frontal. (Semi-directa)
5. Inferior – Posterior. (Semi-directa)
6. Inferior – Frontal. (Semi-directa)

Figura 22. Ensayo de pulso ultrasónico.

Fuente: Elaboración propia. Fecha: 28/08/2014



Adicionalmente, para la viga con junta en su capa central se realizaron ensayos de pulso ultrasónico indirectos en la cara inferior. Es importante señalar que todos los ensayos fueron realizados en un tiempo comprendido entre los 56 y 98 días luego del vaciado.

Los valores de los resultados obtenidos para todos los ensayos realizados pueden ser visualizados en el anexo IV de este documento. Los valores de los resultados obtenidos para todos los ensayos realizados se muestran en el anexo IV de este documento.

3.12. Curvas comparativas de los resultados de velocidad de pulso ultrasónico.

Para poder establecer curvas de comparación primero se realizó el análisis estadístico de la viga patrón, determinando para las 210 mediciones realizadas en esta viga su promedio y desviación estándar utilizando las ecuaciones 6 y 7. Luego se estableció el menor valor aceptable de la velocidad de pulso ultrasónico,

para considerar que no se encuentran vacíos en el interior del elemento, restando a la velocidad promedio la desviación estándar.

Los resultados fueron graficados a partir de una distancia "X" medida desde el borde de la viga. Adicionalmente se graficaron la velocidad teórica calculada a partir de la ecuación 6 y la menor velocidad aceptable en cada una de las gráficas.

Para la viga con vacíos esféricos se tomó el promedio de dos lecturas consecutivas de velocidades bajas y se contrastaron dichas distancias con la ubicación de los centros de las esferas en la geometría planteada inicialmente. Adicionalmente para esta viga se contrastaron las distancias "X" de inicio y fin de los vacíos con las distancias obtenidas en el ensayo.

Para la viga con vacíos planos se determinó esta misma distancia "X" y se contrastaron las distancias de inicio y fin de los vacíos con las distancias obtenidas a través del ensayo.

Para la viga con junta en su capa central se utilizó el método descrito en el punto 2.22.1 del capítulo II de este documento con el fin de determinar el espesor de la capa de concreto limitada con aserrín.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Los resultados se obtuvieron de acuerdo a lo establecido en el Capítulo III de este trabajo especial de grado. Estos son presentados a través de tablas y gráficos.

4.1. Características de los agregados.

4.1.1. Granulometría.

Tabla 13. Granulometría de la arena lavada.

Agregado	Fino
Peso Inicial (g)	1.221,9

Abertura (mm)	Cedazo (Pulgadas)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Pasante
38,1	1 1/2"			100,00
25,4	1"			100,00
19,1	3/4 "			100,00
12,7	1/2 "	16,6	1,36	98,64
9,53	3/8 "	64,5	5,28	93,36
6,35	1/4 "	163,6	13,39	79,97
4,76	#4	101,8	8,33	71,63
2,38	#8	204,9	16,77	54,86
1,19	#16	192,5	15,76	39,10
0,595	#30	165,8	13,57	25,53
0,298	#50	142,7	11,68	13,84
0,149	#100	104,3	8,54	5,30
0,074	#200	35	2,87	2,44
-	FONDO	29,8	2,44	0,00
	TOTAL	1221,5	100,00	

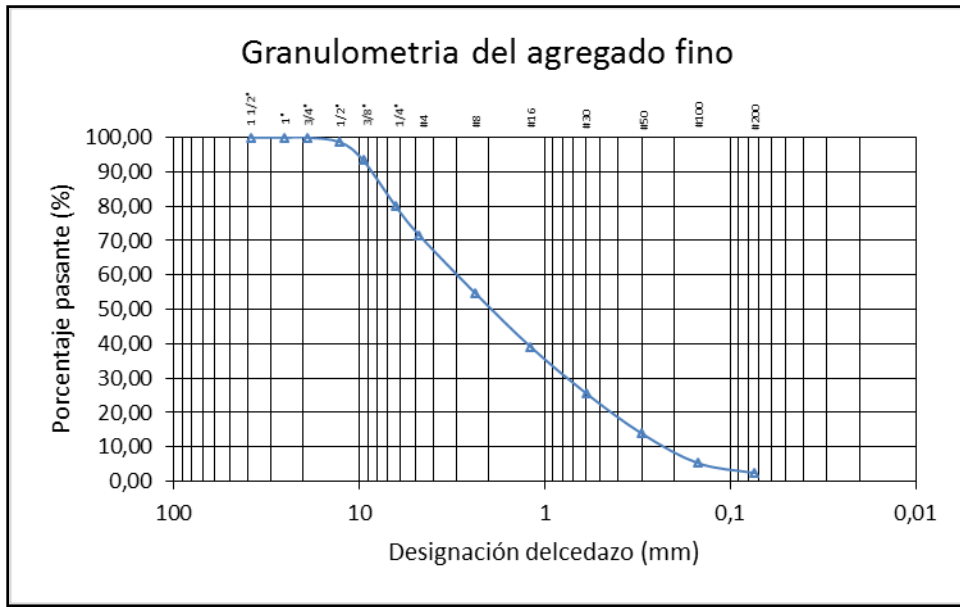


Gráfico 3. Curva granulométrica de la arena lavada.

Tabla 14. Granulometría de la piedra picada.

Agregado	Grueso
Peso Inicial (g)	20.000,0

Abertura (mm)	Cedazo (Pulgadas)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Pasante
38,1	1 1/2"			100,00
25,4	1"	4000	20,00	80,00
19,1	3/4 "	6500	32,50	47,50
12,7	1/2 "	6500	32,50	15,00
9,53	3/8 "	2000	10,00	5,00
6,35	1/4 "	950	4,75	0,25
4,76	#4		0,00	0,25
2,38	#8		0,00	0,25
1,19	#16		0,00	0,25
0,595	#30		0,00	0,25
0,298	#50		0,00	0,25
0,149	#100		0,00	0,25
0,074	#200		0,00	0,25
-	FONDO	50	0,25	0,00
	TOTAL	20000,00	100,00	

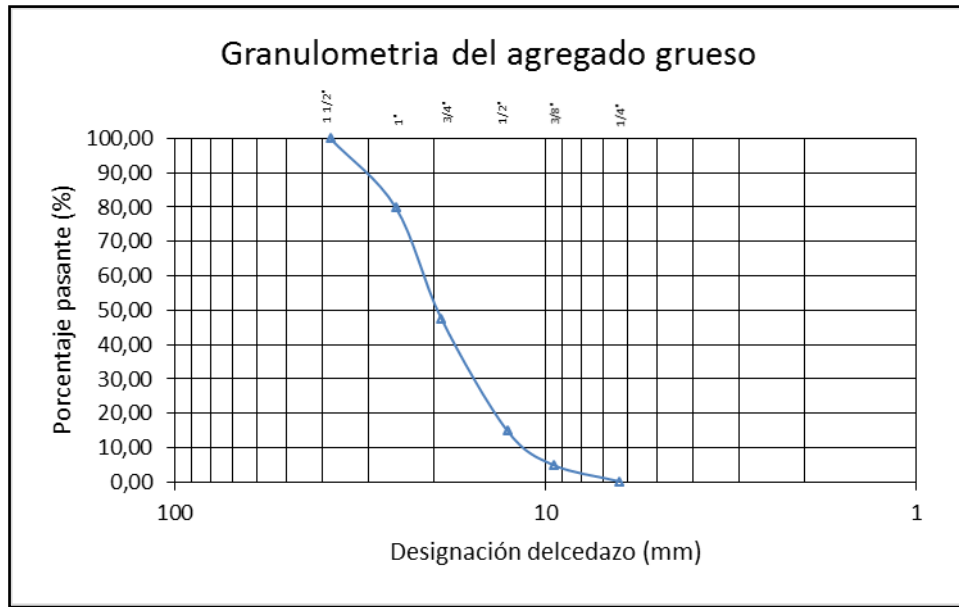


Gráfico 4. Curva granulométrica de la piedra picada.

4.1.2. Desgaste los Ángeles.

Tabla 15. Porcentaje desgaste Los Ángeles de la piedra picada.

Peso Inicial [g]	5.000,0
Peso Final [g]	3.500,0
Desgaste [%]	30,00

4.1.3. Absorción y peso específico.

Tabla 16. Densidad y absorción de la arena lavada.

Masa de la muestra en el aire saturada con superficie seca [g]	500,1
Masa de la muestra en el aire secada al horno [g]	487,8
Masa del picnómetro con agua [g]	1275,3
Masa del picnómetro con la muestra y el agua [g]	1581,4
Densidad aparente [g/ml]	2,51
Absorción [%]	2,52

Tabla 17. Densidad y absorción de la Piedra picada.

Masa de la muestra en el aire saturada con superficie seca [g]	5000,1
Masa sumergida en agua de la muestra saturada con superficie seca [g]	3020,4
Masa de la muestra en el aire secada al horno [g]	4843,3
Densidad aparente [g/ml]	2,53
Absorción [%]	3,24

4.1.4. Contenido de humedad.

Tabla 18. Humedad de la arena lavada.

Masa húmeda [g]	374,47
Masa seca [g]	369,61
Contenido de humedad [%]	1,30

Tabla 19. Humedad de la piedra picada.

Masa húmeda [g]	605,79
Masa seca [g]	605,11
Contenido de humedad [%]	0,11

4.2. Diseño de mezcla.

4.2.1. Relación Beta (β).

Tabla 20. Relación beta.

Relación Beta (β)	
β Limite de combinación mas gruesa (%)	50
β Limite de combinación mas fina (%)	71
β Promedio (%)	60.5
β de diseño (%)	55.3

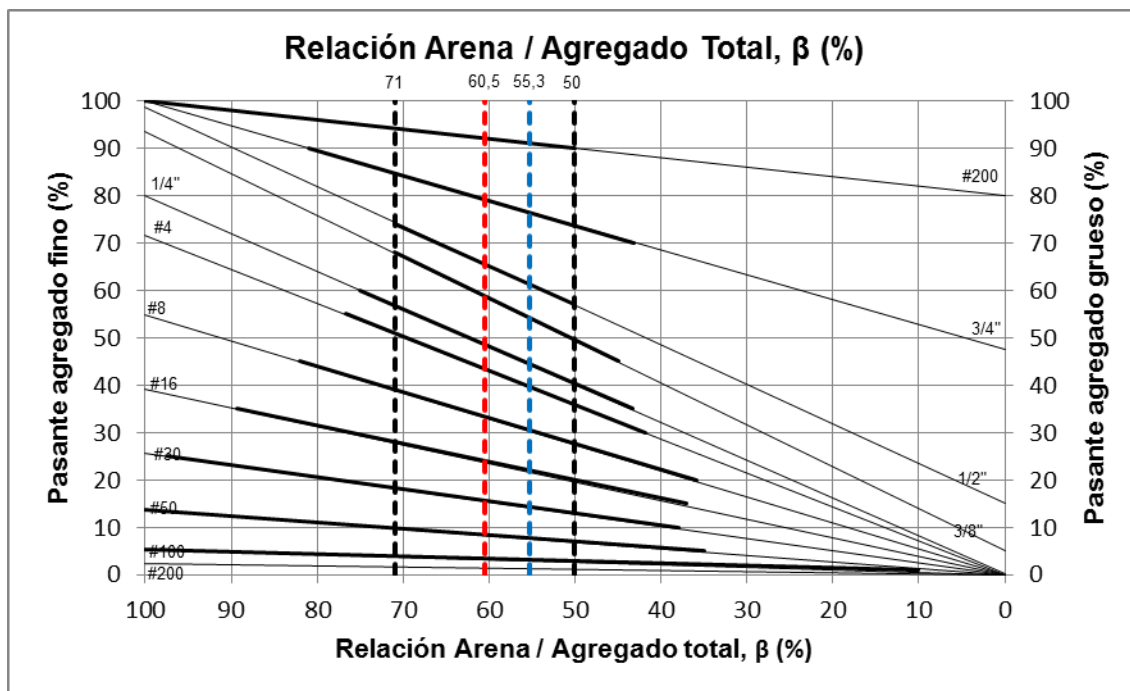


Gráfico 5. Relación arena / agregado total, β (%).

4.2.2. Parámetros utilizados para el diseño de mezcla.

Tabla 21. Parámetros utilizados para el diseño de mezcla.

$f'c$ (kgf/cm ²) a los 28 días	250
Fcr (kgf/cm ²)	310
α	0,49
Kr	1,00
Ka	1,00
α Corregido	0,49
α Máximo	0,75
α Diseño	0,49
Trabajabilidad (cm)	8,5
C (kg/m ³)	413
$C1$	1,00
$C2$	1,00
C Corregido (kg/m ³)	413
C Mínima (kg/m ³)	270
C Diseño (kg/m ³)	413
γ A. Fino (g/ml)	2,51
γ A. Grueso (g/ml)	2,53
β (%)	55,3

4.2.3. Componentes del diseño de mezcla.

Tabla 22. Componentes del diseño de mezcla.

Componente	Peso (Kgf/m ³)	Volumen Absoluto (Litros /m ³)
Cemento	413,17	123,95
Agua	203,98	203,98
Arena	912,69	362,33
Grueso	739,23	293,47
Aire	0,00	16,27
Total	2.269,08	1.000,00

4.2.4. Dosificación de los materiales para la mezcla.

Tabla 23. Dosificación de los materiales para la mezcla.

Volumen de un cilindro (m3)	0,0053
N° de cilindros	9
Volumen de una viga (m3)	0,0169
N° de vigas	5
Desperdicios (%)	15
Volumen total (m3)	0,1520

Componente	Peso (Kgf)	Volumen Absoluto (Litros)
Cemento	62,8	18,8
Agua	31,0	31,0
Arena	138,8	55,1
Grueso	112,4	44,6
Aire	0,0	2,5
Total	345,0	152,0

4.3. Caracterización del concreto fresco.

4.3.1. Medición de asentamiento.

Tabla 24. Medición del asentamiento.

Asentamiento	9,0
--------------	-----

4.4. Caracterización del concreto endurecido.

4.4.1. Peso unitario.

Tabla 25. Peso unitario promedio a los 7 días.

Cilindro	Peso (kg)	Φ 1 (cm)	Φ 2 (cm)	Φ Promedio (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Peso unitario (kg/m ³)	Peso unitario promedio (kg/cm ³)
P-1	12,123	15,00	14,91	14,96	30,32	5.325,89	2.276	2.281
P-2	12,243	15,03	15,04	15,04	30,10	5.343,96	2.291	
P-3	12,098	14,98	14,91	14,95	30,31	5.317,01	2.275	

Tabla 26. Peso unitario promedio a los 14 días

Cilindro	Peso (kg)	Φ 1 (cm)	Φ 2 (cm)	Φ Promedio (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Peso unitario (kg/m ³)	Peso unitario promedio (kg/cm ³)
P-1	12,177	15,10	15,06	15,08	30,04	5.365,28	2.270	2.269
P-2	12,085	15,06	15,04	15,05	30,13	5.359,97	2.255	
P-3	12,213	15,06	15,06	15,06	30,04	5.351,06	2.282	

Tabla 27. Peso unitario promedio a los 28 días.

Cilindro	Peso (kg)	Φ 1 (cm)	Φ 2 (cm)	Φ Promedio (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Peso unitario (kg/m ³)	Peso unitario promedio (kg/cm ³)
P-1	12,172	15,01	15,03	15,02	30,08	5.329,76	2.284	2.268
P-2	12,115	15,11	15,00	15,06	29,80	5.304,78	2.284	
P-3	12,014	15,10	15,05	15,08	30,10	5.372,43	2.236	

4.4.2. Ensayo a compresión.

Tabla 28. Ensayo a compresión promedio a los 7 días.

Cilindro	Φ Promedio (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima aplicada (kgf)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esfuerzo promedio (kgf/cm ²)
P-1	14,96	175,66	38.898,0	221,44	213
P-2	15,04	177,54	38.282,0	215,62	
P-3	14,95	175,42	35.329,0	201,40	

Tabla 29. Ensayo a compresión promedio a los 14 días.

Cilindro	Φ Promedio (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima aplicada (kgf)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esfuerzo promedio (kgf/cm ²)
P-1	15,08	178,60	43.617,0	244,21	239
P-2	15,05	177,89	42.384,0	238,25	
P-3	15,06	178,13	41.559,0	233,31	

Tabla 30. Ensayo a compresión promedio a los 28 días.

Cilindro	Φ Promedio (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima aplicada (kgf)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esfuerzo promedio (kgf/cm ²)
P-1	15,02	177,19	49.262,0	278,02	264
P-2	15,055	178,01	44.493,0	249,94	

4.4.3. Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros.

Tabla 31. Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros a los 28 días.

Cilindro	Tiempo (μ s)	Distancia (cm)	Velocidad (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
P-1	76,4	30,08	3937	3940
P-2	76,1	29,80	3916	
P-3	75,9	30,10	3966	

4.5. Velocidad de pulso ultrasónico en vigas.

4.5.1. Viga patrón.

Tabla 32. Resultados estadísticos de la viga patrón.

Promedio =	3895
Desv. Estandar =	81

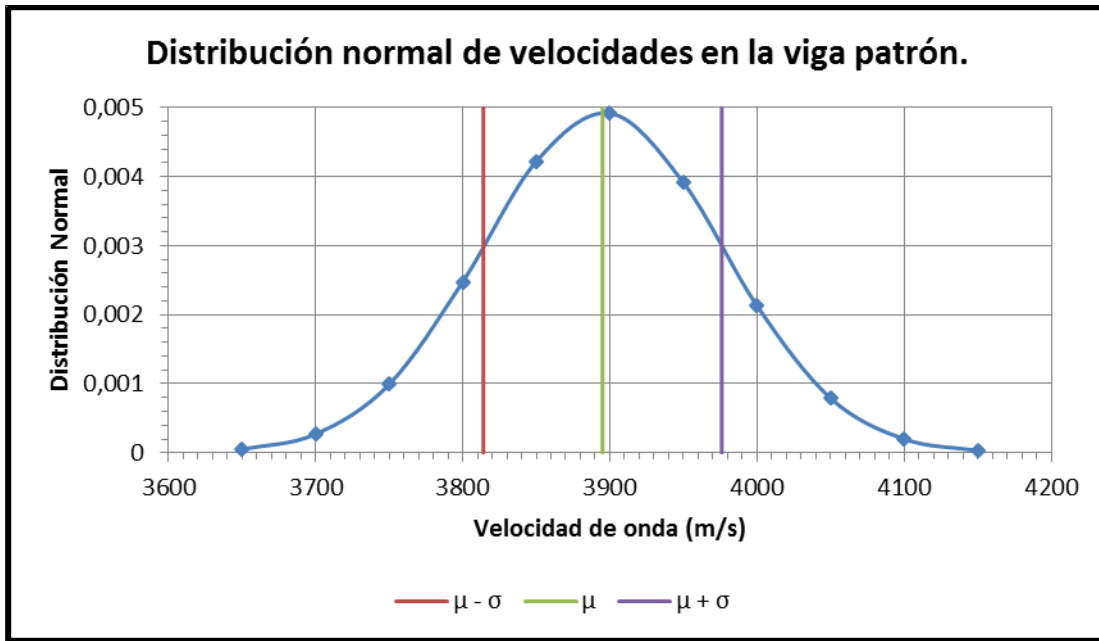


Gráfico 6. Distribución normal de velocidades en la viga patrón.

4.5.2. Viga con vacíos esféricos.

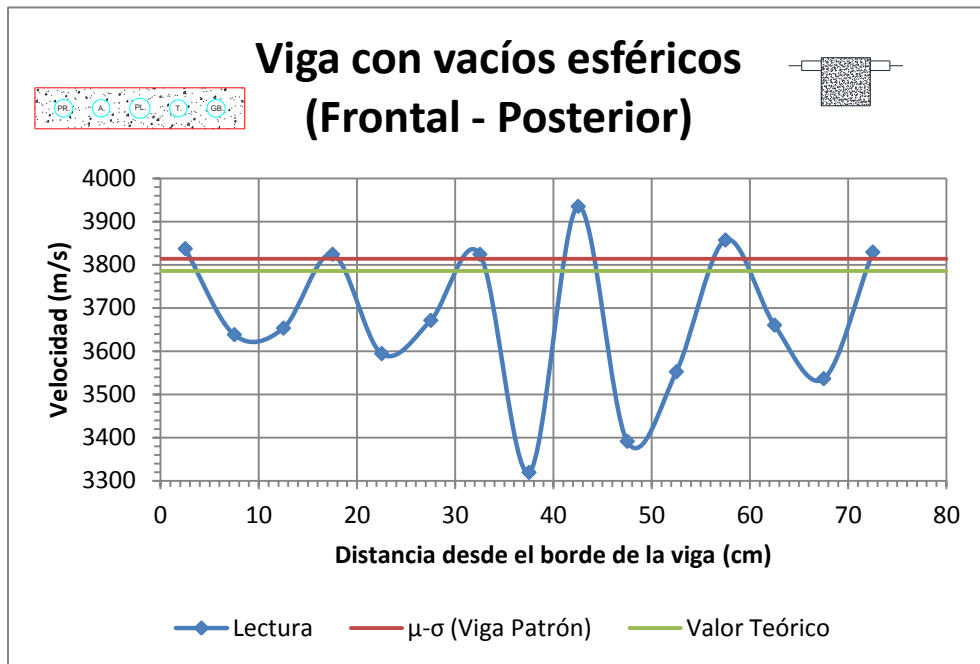


Gráfico 7. Viga con vacíos esféricos (Frontal – Posterior) 1/3.

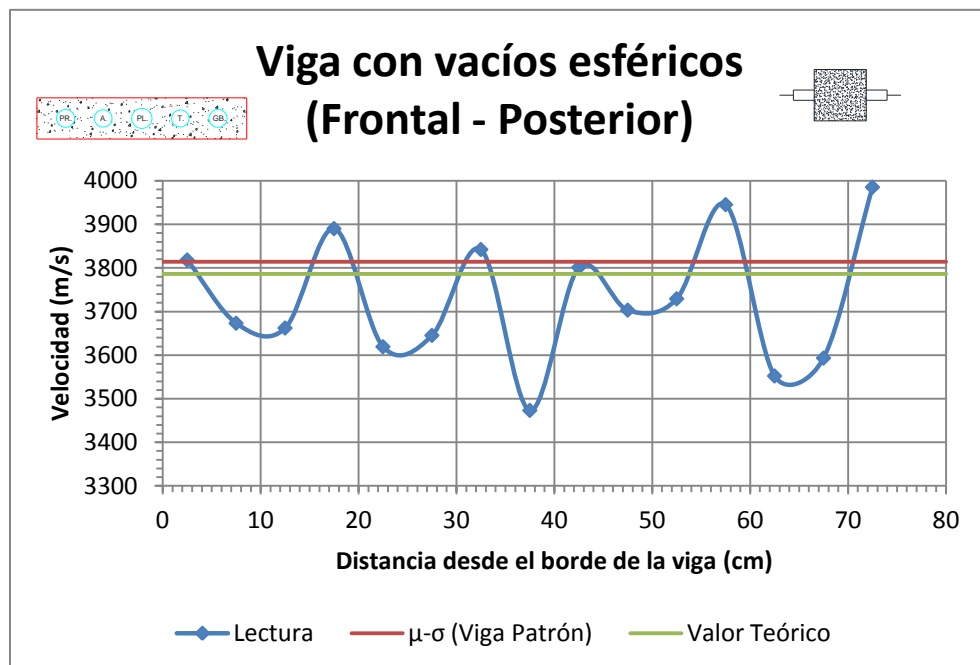


Gráfico 8. Viga con vacíos esféricos (Frontal – Posterior) 2/3.

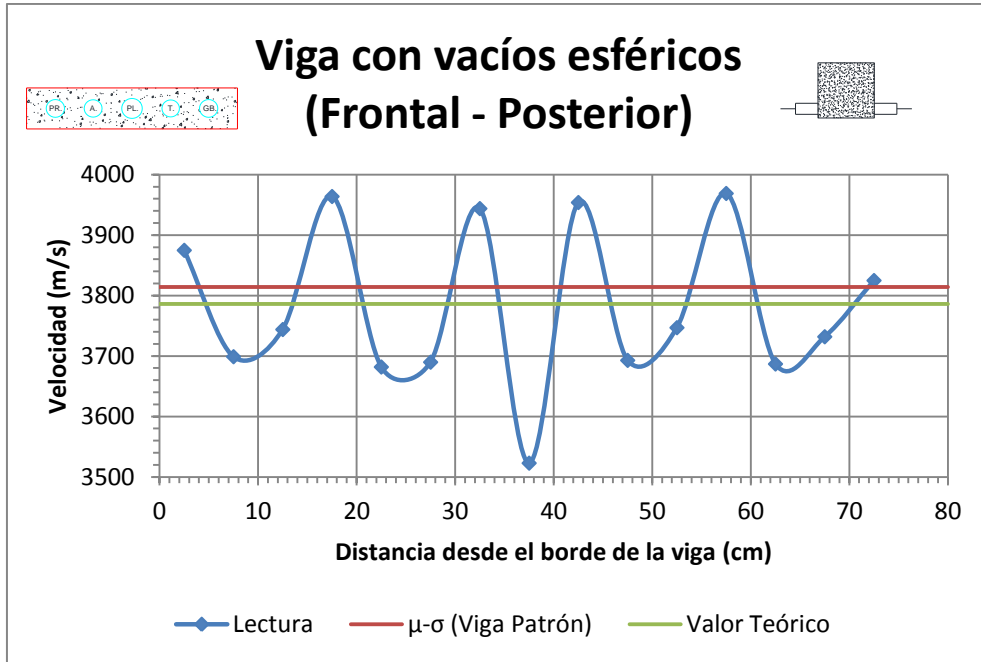


Gráfico 9. Viga con vacíos esféricos (Frontal – Posterior) 3/3.

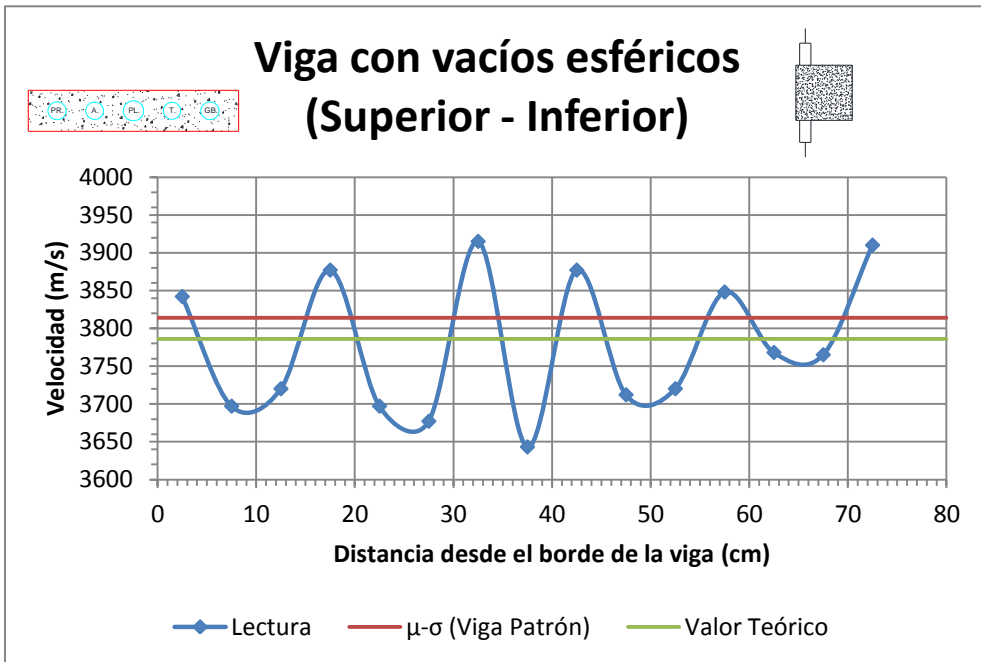


Gráfico 10. Viga con vacíos esféricos (Superior – Inferior) 1/3.

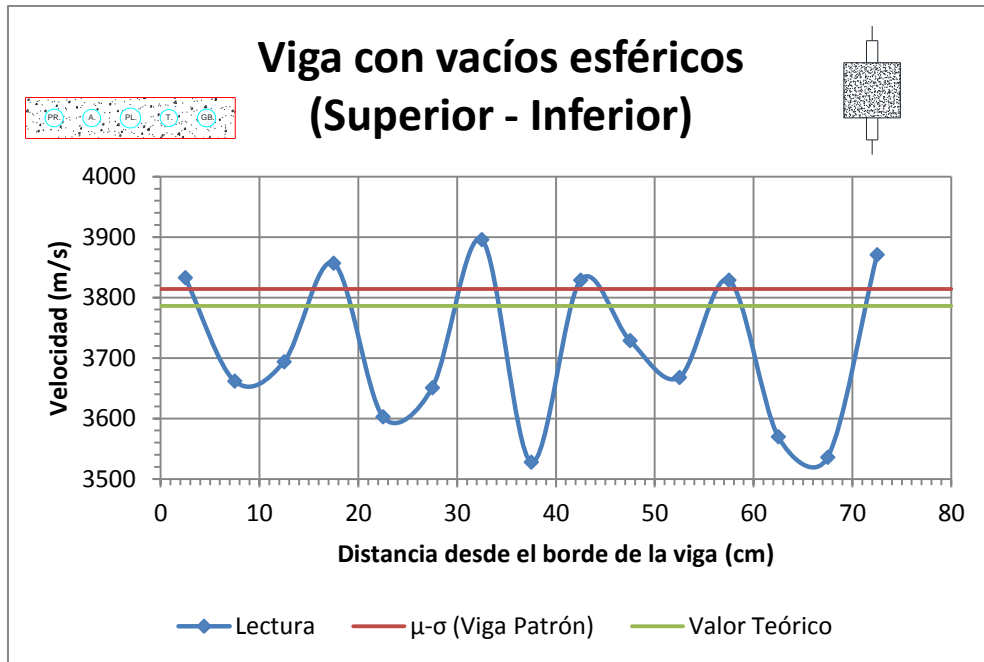


Gráfico 11. Viga con vacíos esféricos (Superior – Inferior) 2/3.

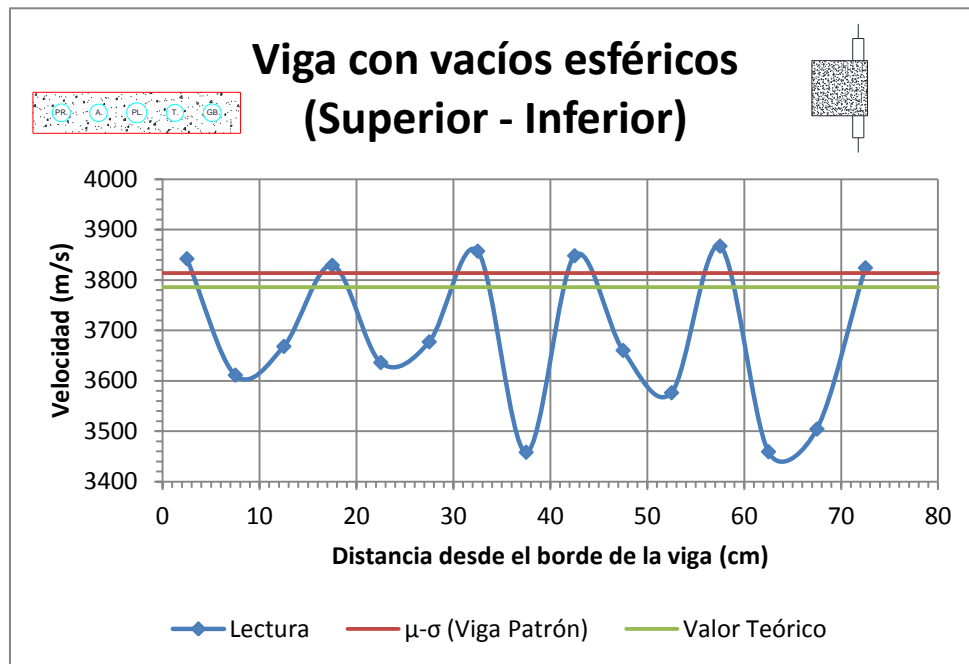


Gráfico 12. Viga con vacíos esféricos (Superior - Inferior) 3/3.

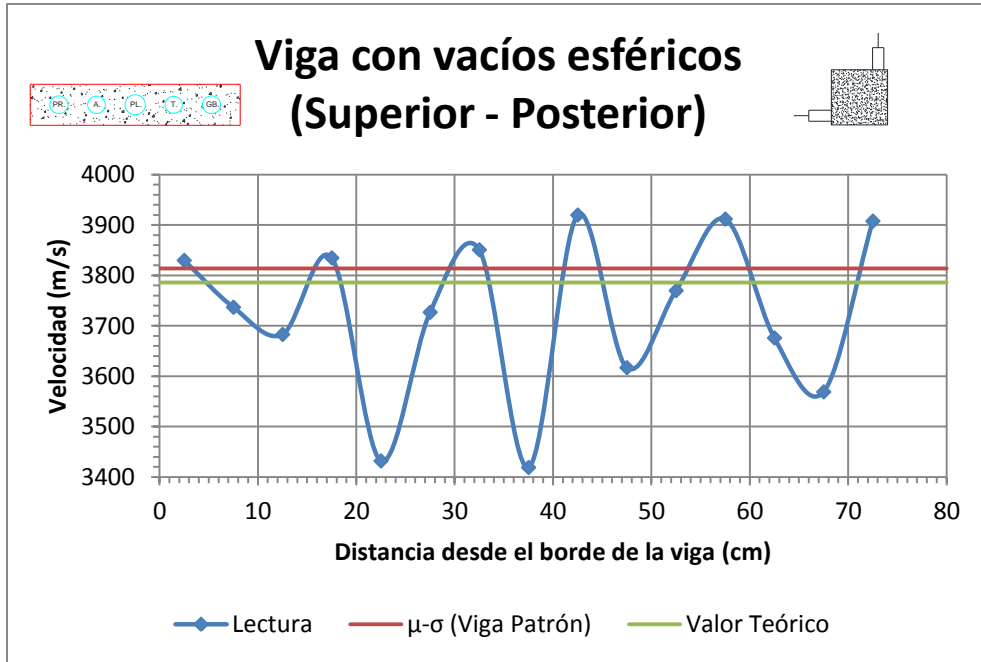


Gráfico 13. Viga con vacíos esféricos (Superior - Posterior) 1/2.

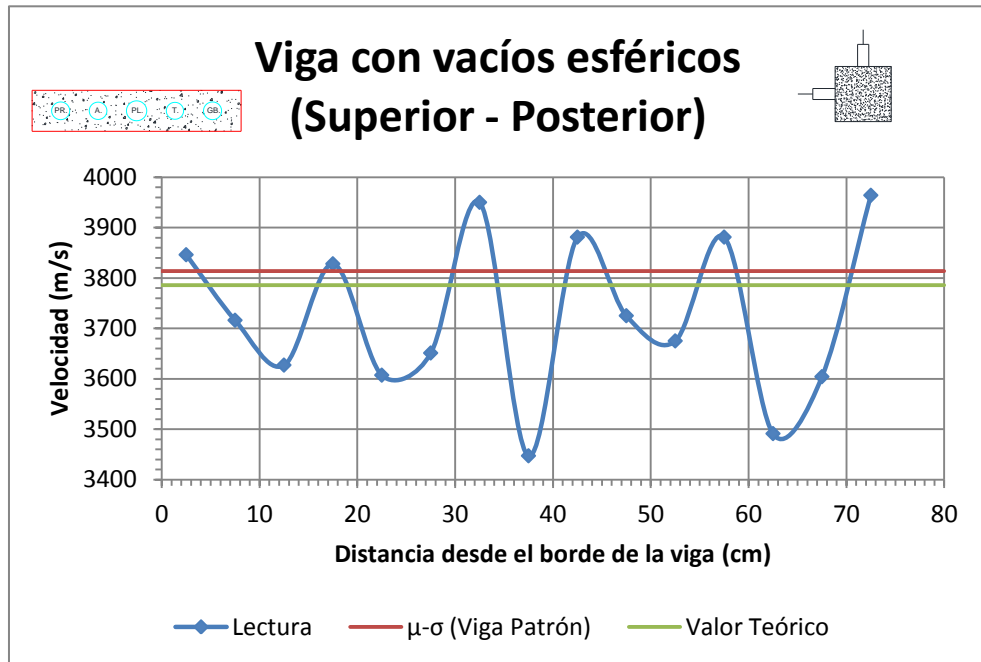


Gráfico 14. Viga con vacíos esféricos (Superior - Posterior) 2/2.

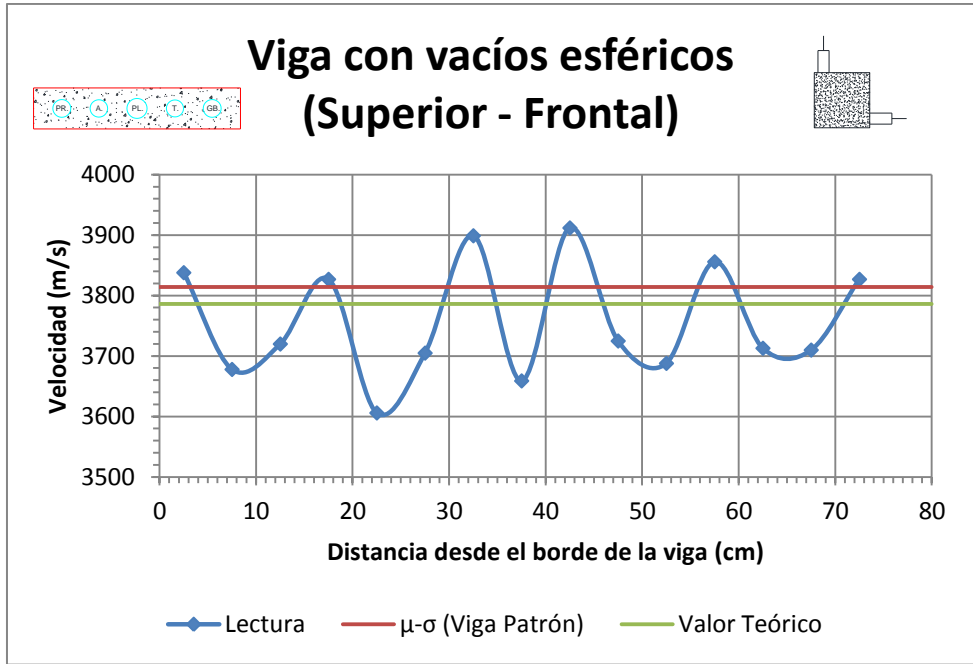


Gráfico 15. Viga con vacíos esféricos (Superior – Frontal) 1/2.

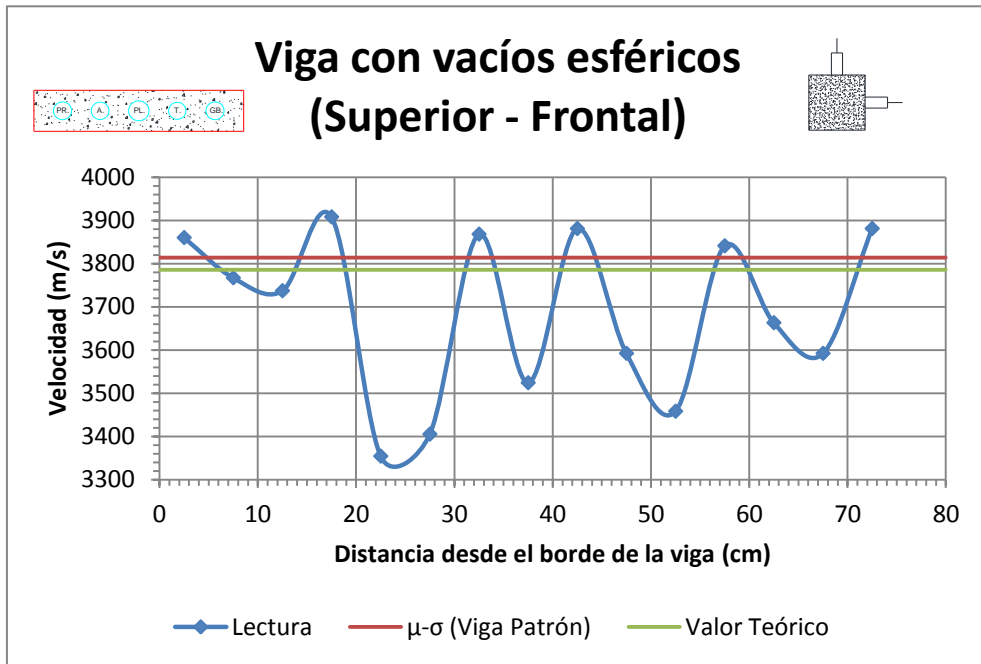


Gráfico 16. Viga con vacíos esféricos (Superior - Frontal) 2/2.

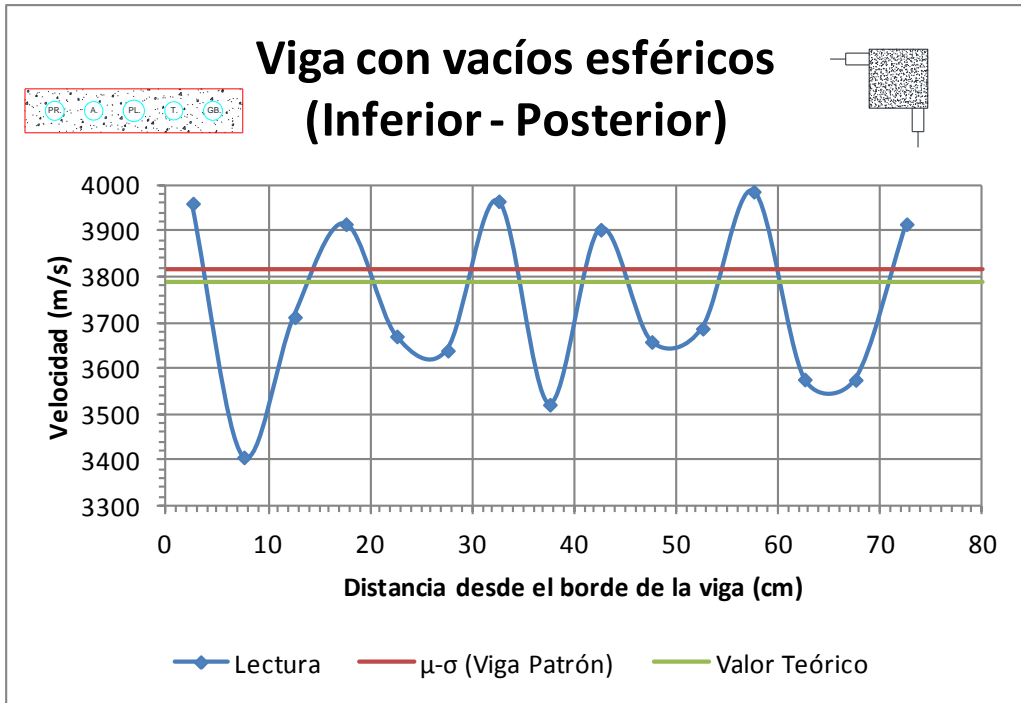


Gráfico 17. Viga con vacíos esféricos (Inferior - Posterior) 1/2.

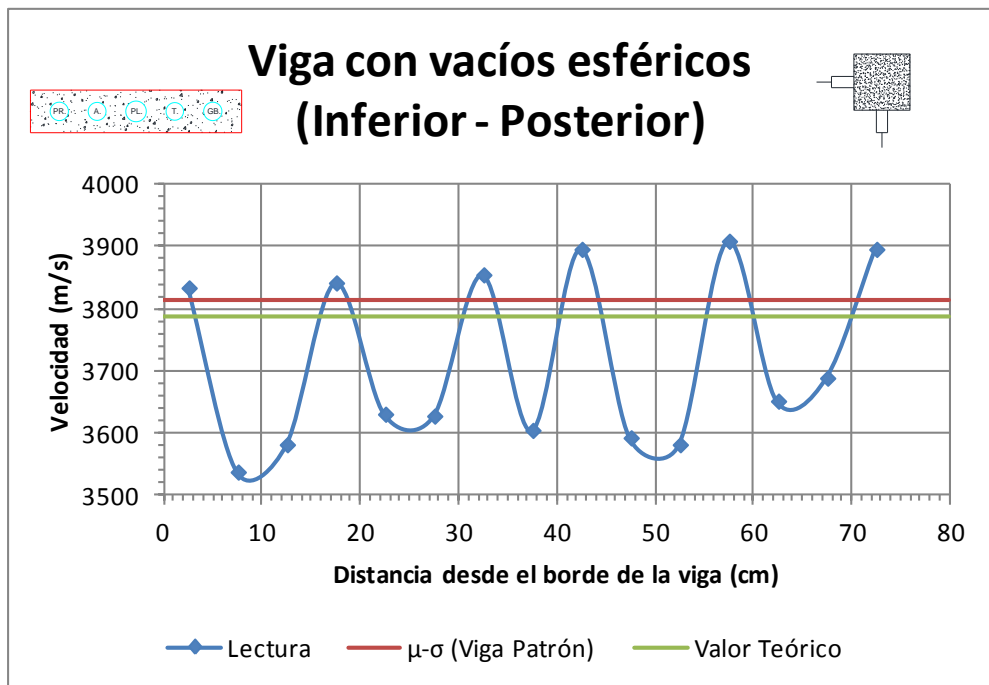


Gráfico 18. Viga con vacíos esféricos (Inferior - Posterior) 2/2.

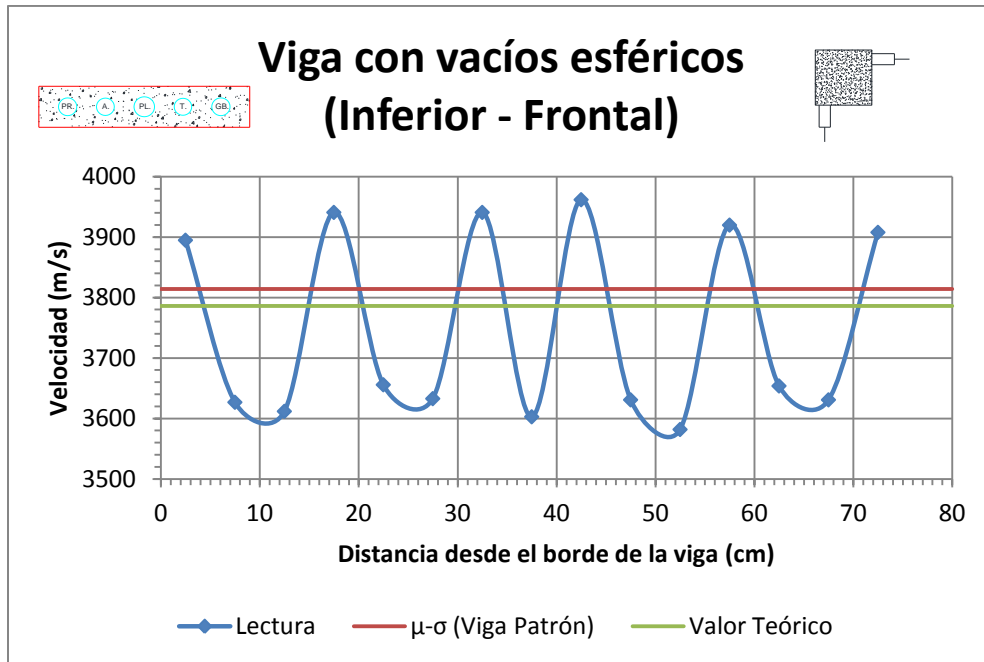


Gráfico 19. Viga con vacíos esféricos (Inferior - Frontal) 1/2.

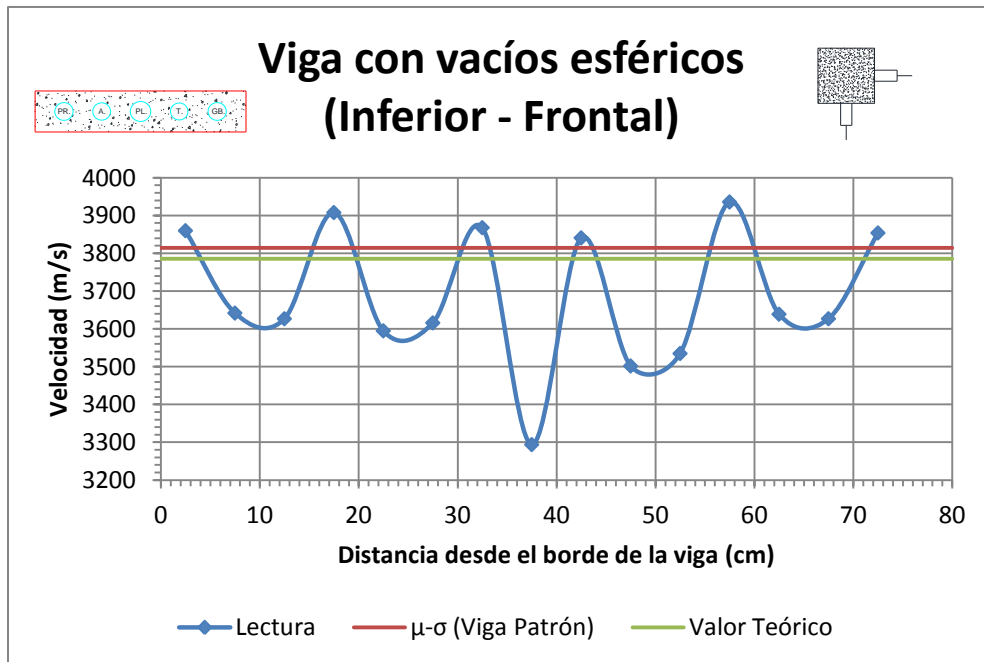


Gráfico 20. Viga con vacíos esféricos (Inferior - Frontal) 2/2.

4.5.3. Viga con vacíos planos.

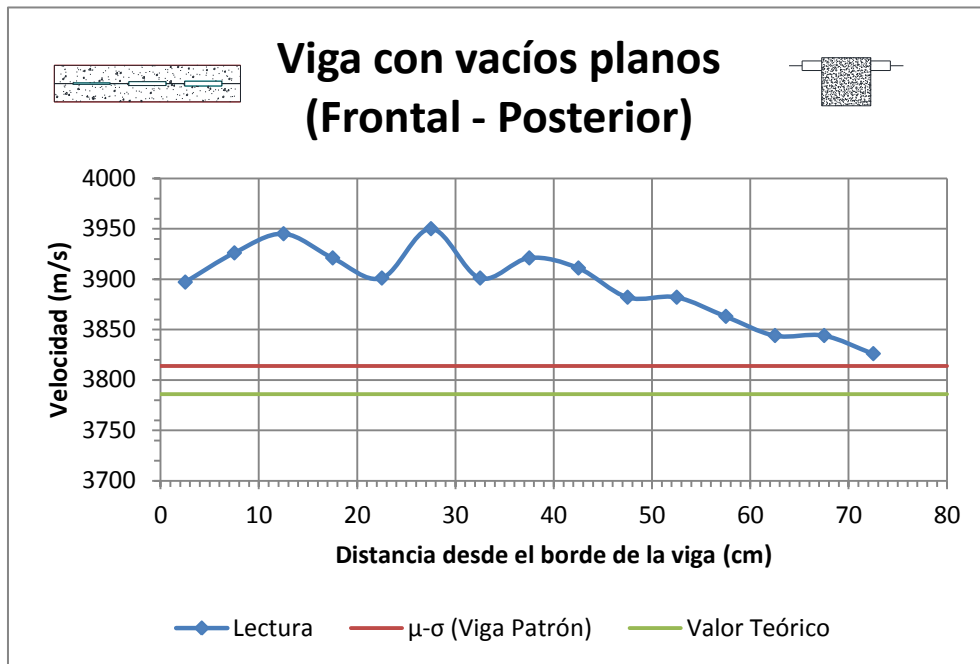


Gráfico 21. Viga con vacíos planos (Frontal – Posterior) 1/3.

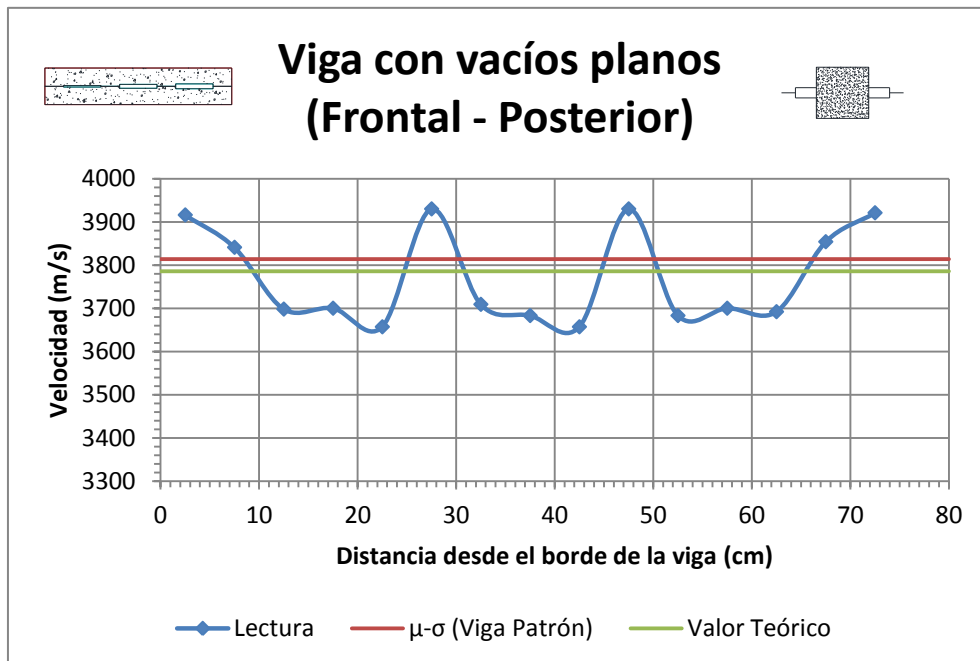


Gráfico 22. Viga con vacíos planos (Frontal – Posterior) 2/3.

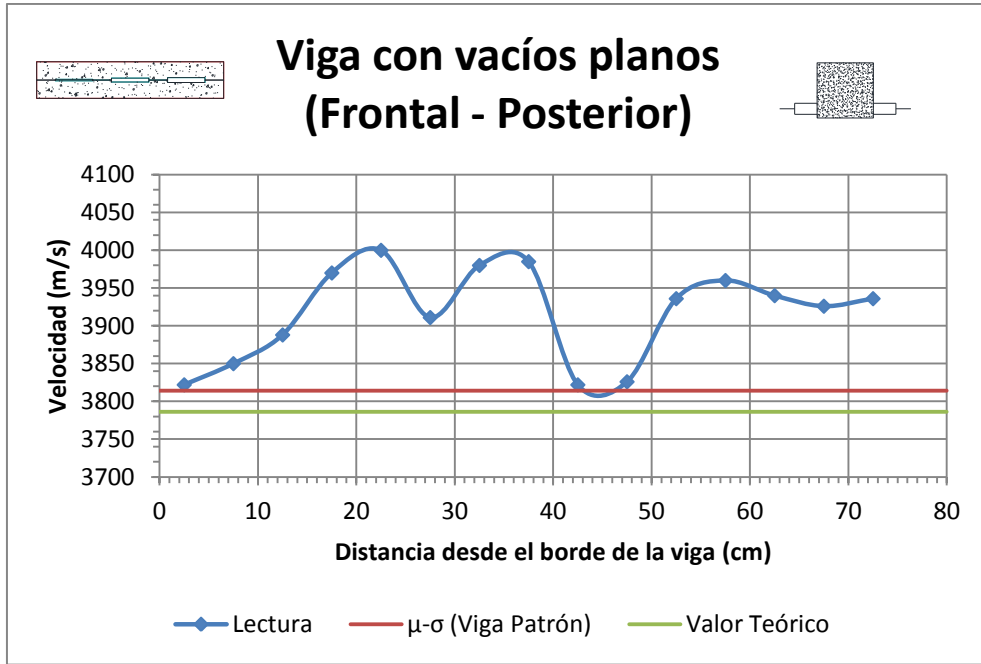


Gráfico 23. Viga con vacíos planos (Frontal – Posterior) 3/3.

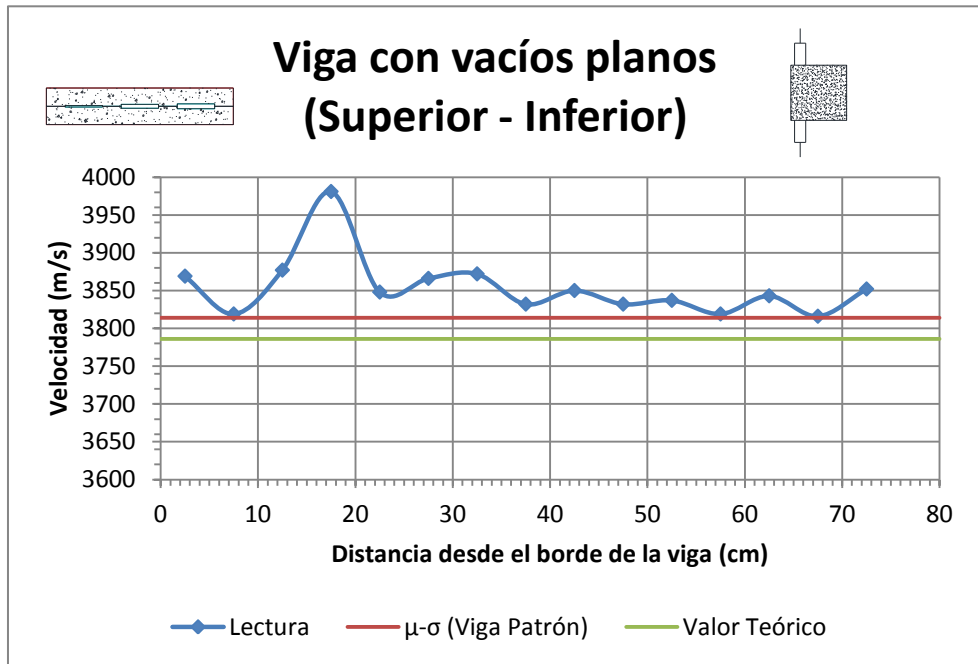


Gráfico 24. Viga con vacíos planos (Superior – Inferior) 1/3.

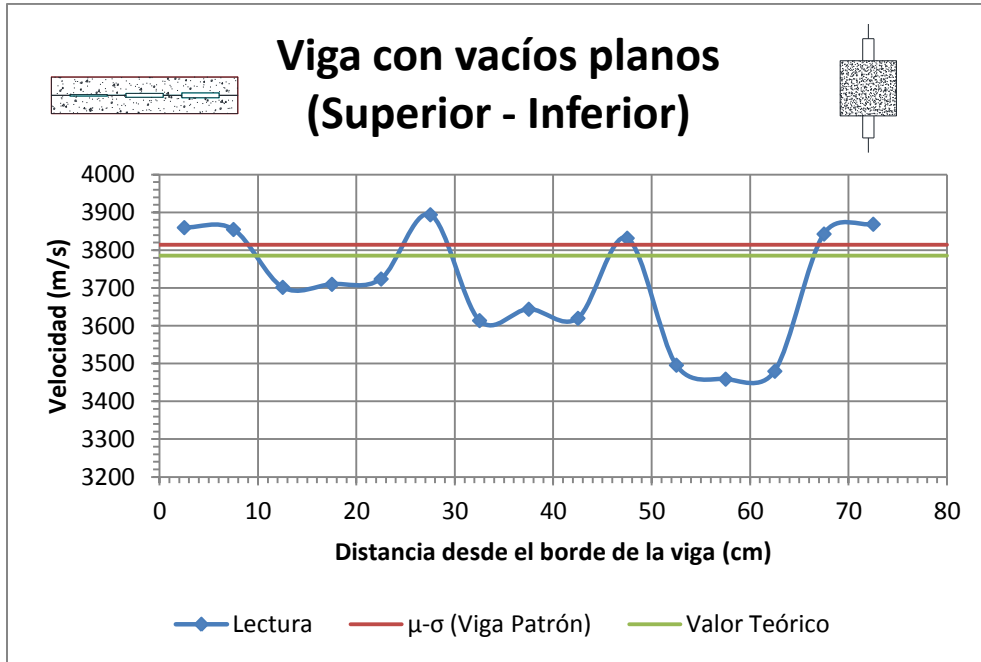


Gráfico 25. Viga con vacíos planos (Superior – Inferior) 2/3.

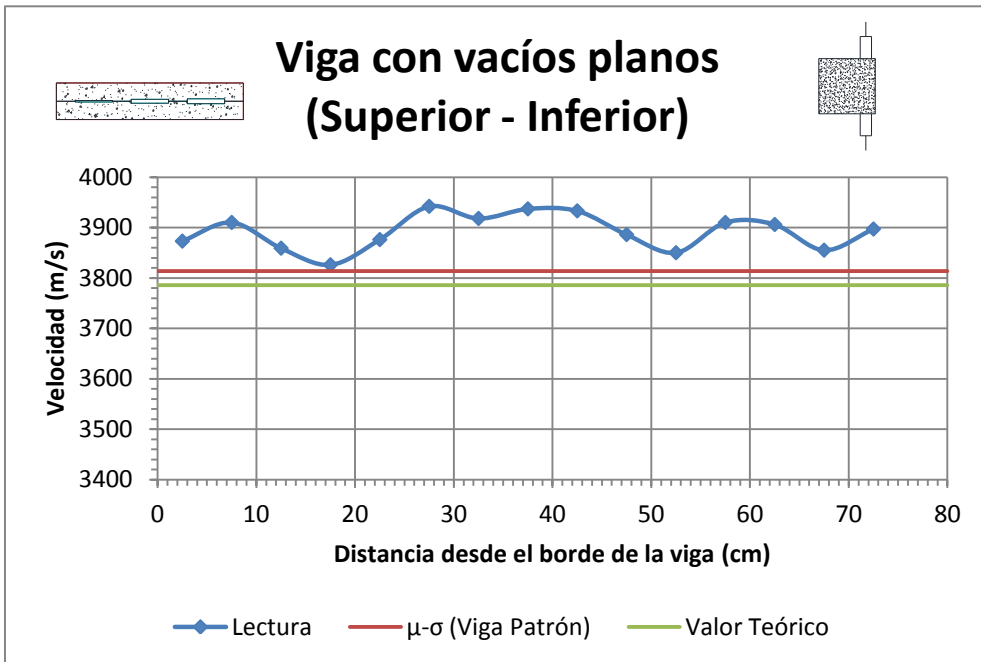


Gráfico 26. Viga con vacíos planos (Superior - Inferior) 3/3.

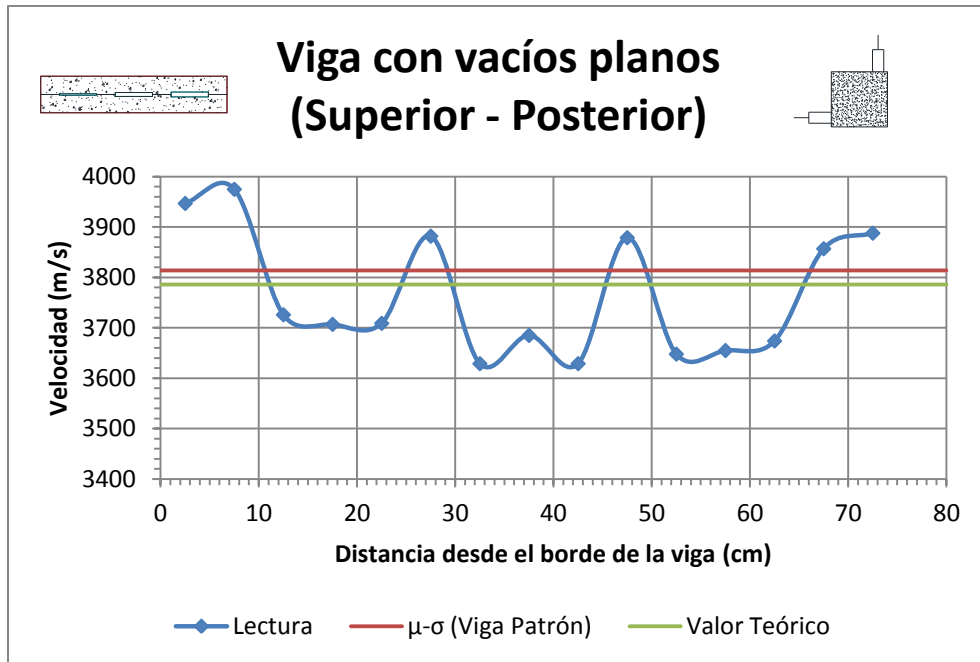


Gráfico 27. Viga con vacíos planos (Superior - Posterior) 1/2.

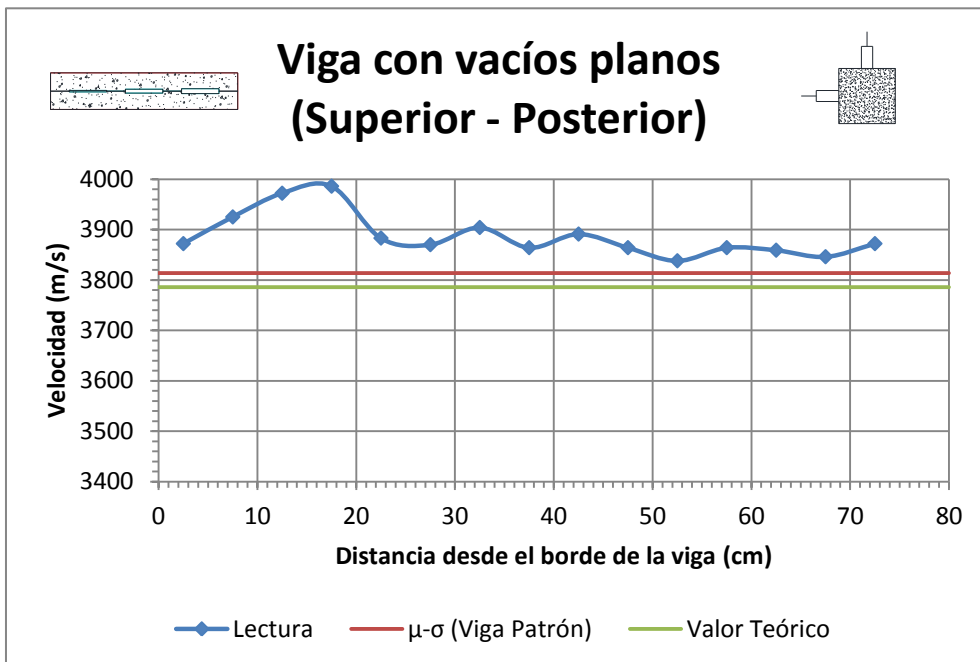


Gráfico 28. Viga con vacíos planos (Superior - Posterior) 2/2.

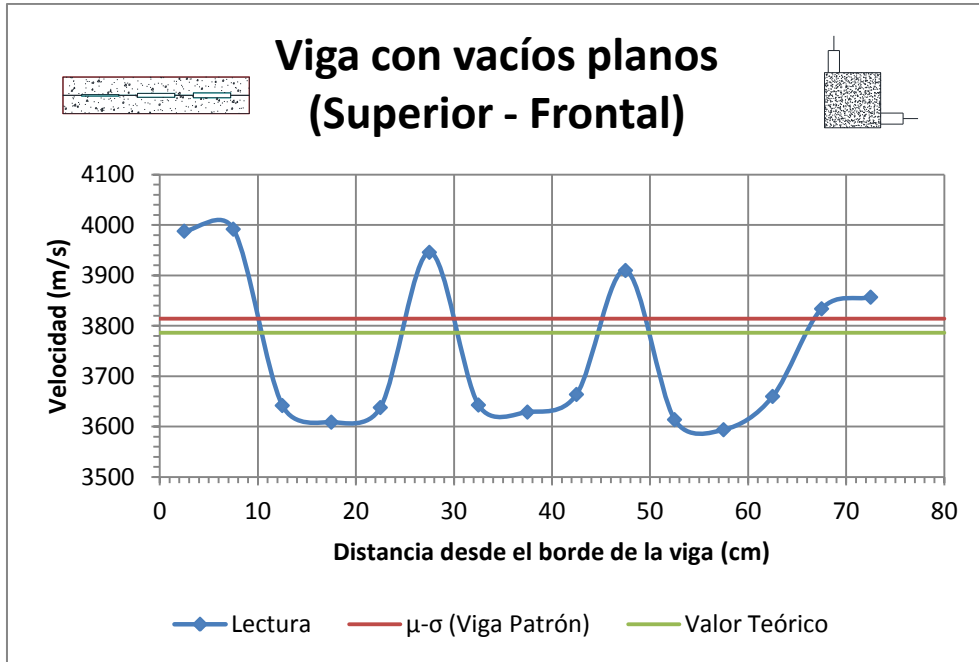


Gráfico 29. Viga con vacíos planos (Superior – Frontal) 1/2.

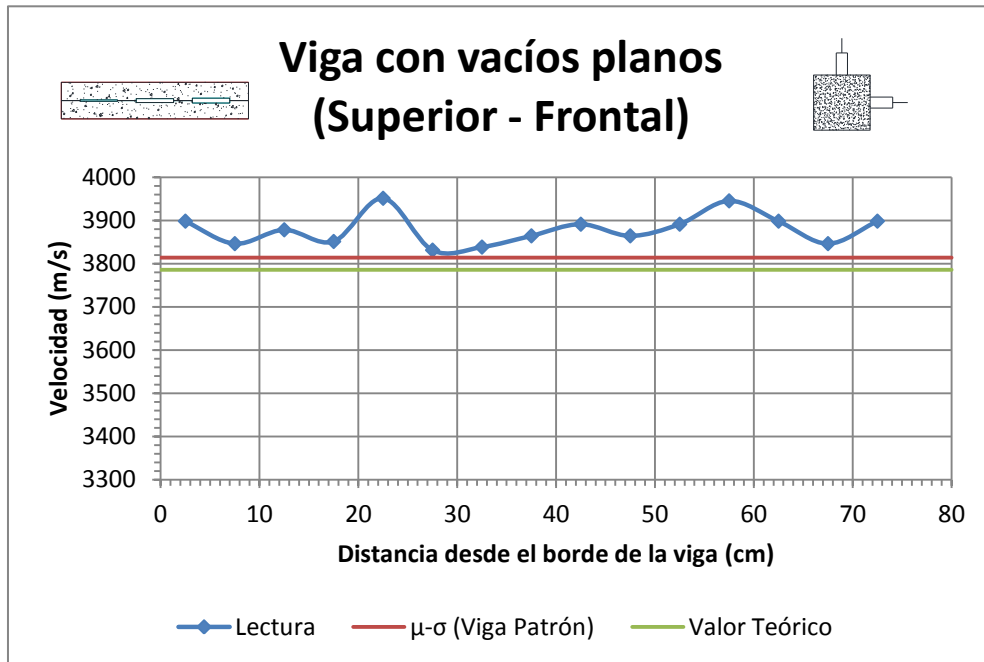


Gráfico 30. Viga con vacíos planos (Superior - Frontal) 2/2.

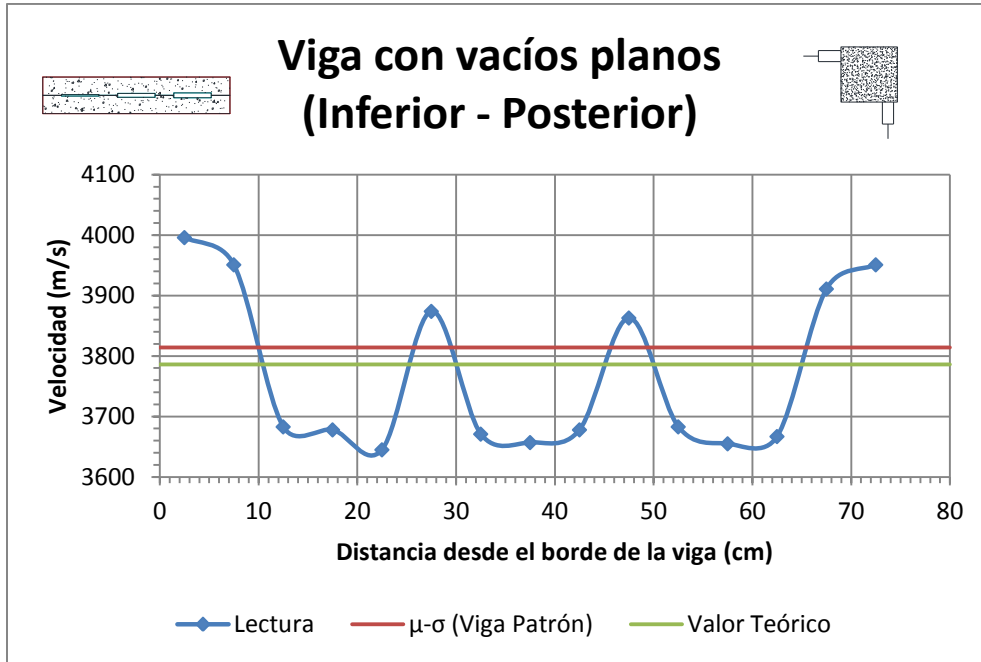


Gráfico 31. Viga con vacíos planos (Inferior - Posterior) 1/2.

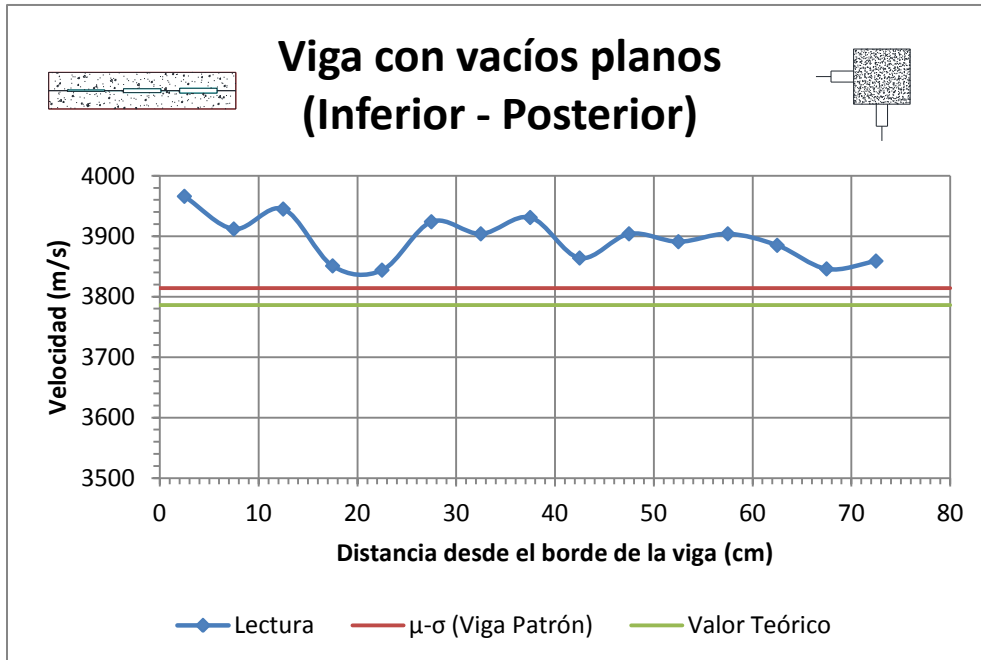


Gráfico 32. Viga con vacíos planos (Inferior - Posterior) 2/2.

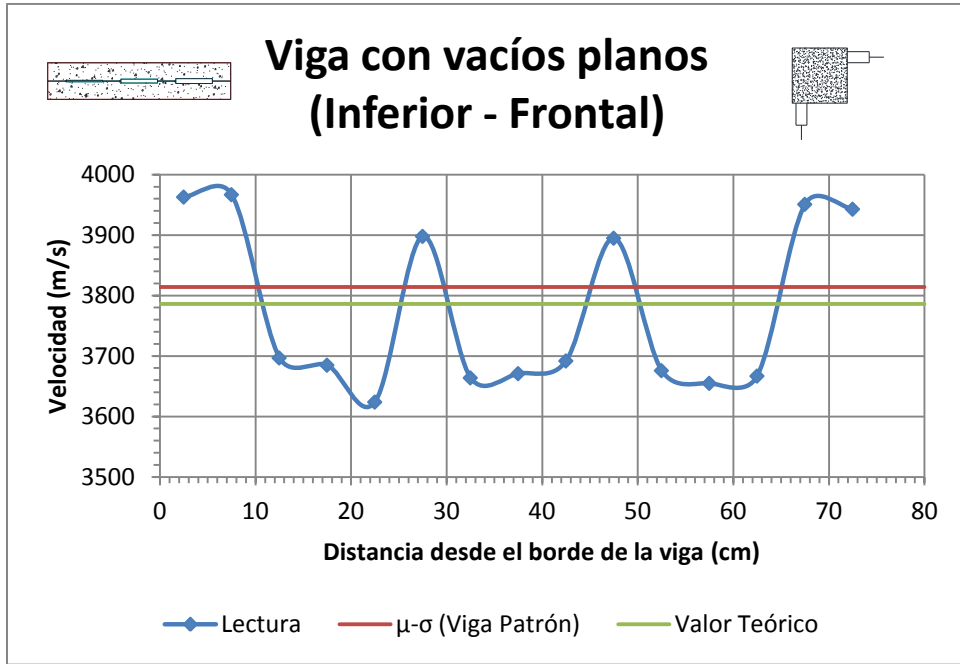


Gráfico 33. Viga con vacíos planos (Inferior - Frontal) 1/2.

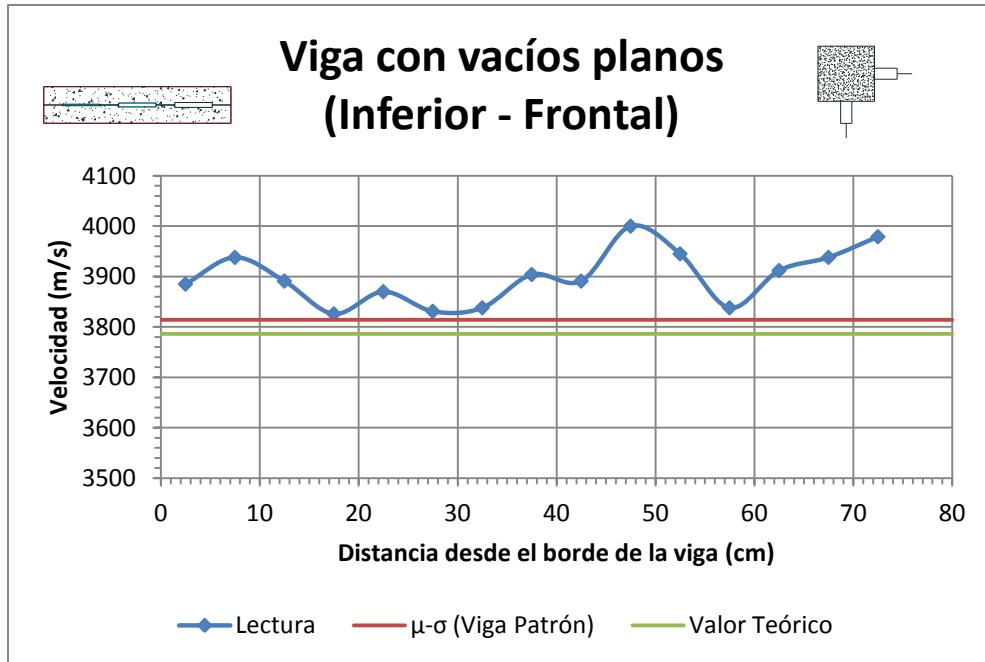


Gráfico 34. Viga con vacíos planos (Inferior - Frontal) 2/2.

4.5.4. Viga con vacío tubular continuo.

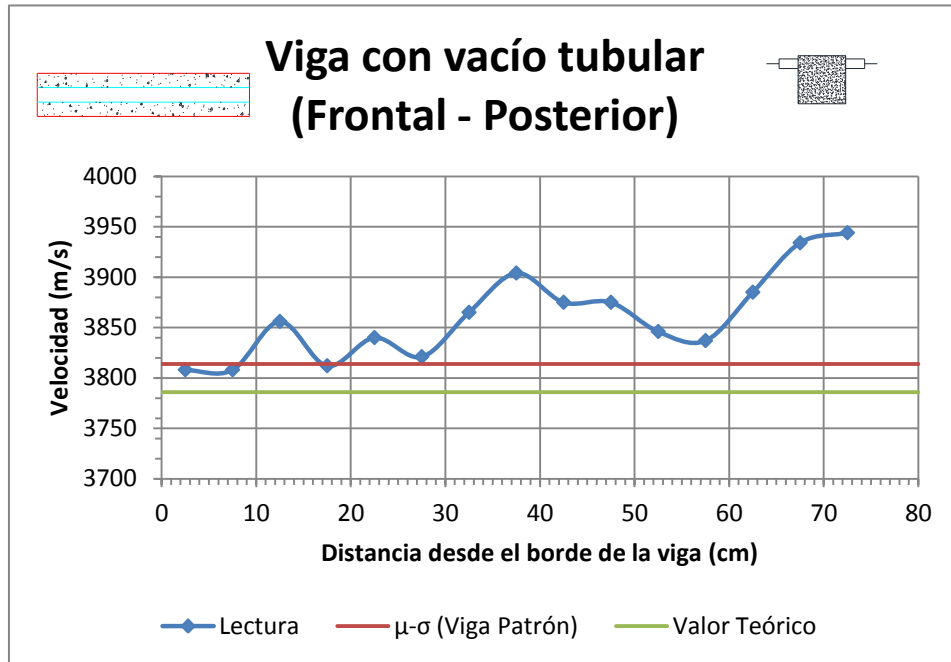


Gráfico 35. Viga con vacío tubular continuo (Frontal – Posterior) 1/3.

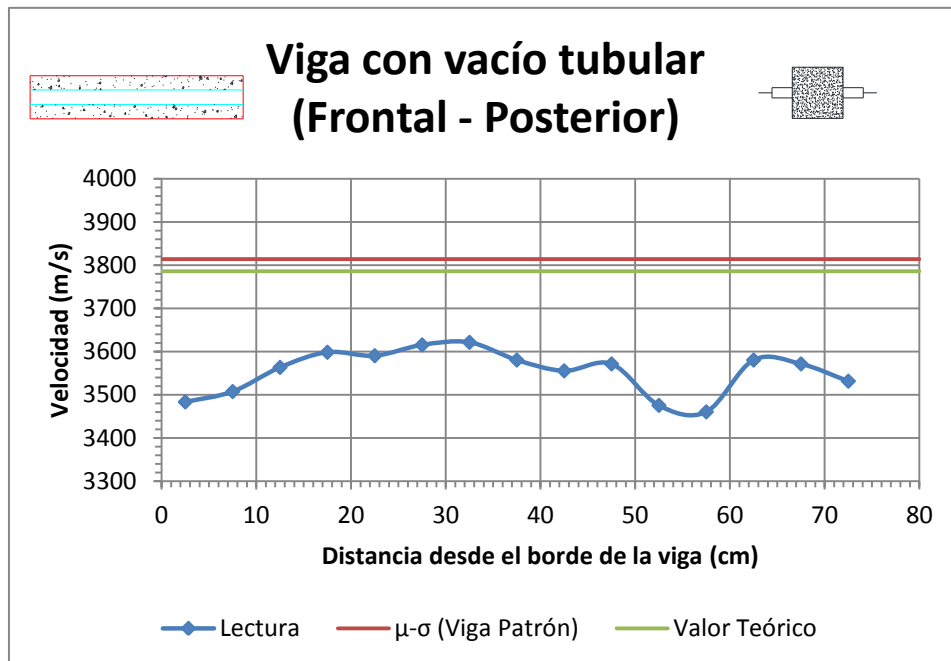


Gráfico 36. Viga con vacío tubular continuo (Frontal – Posterior) 2/3.

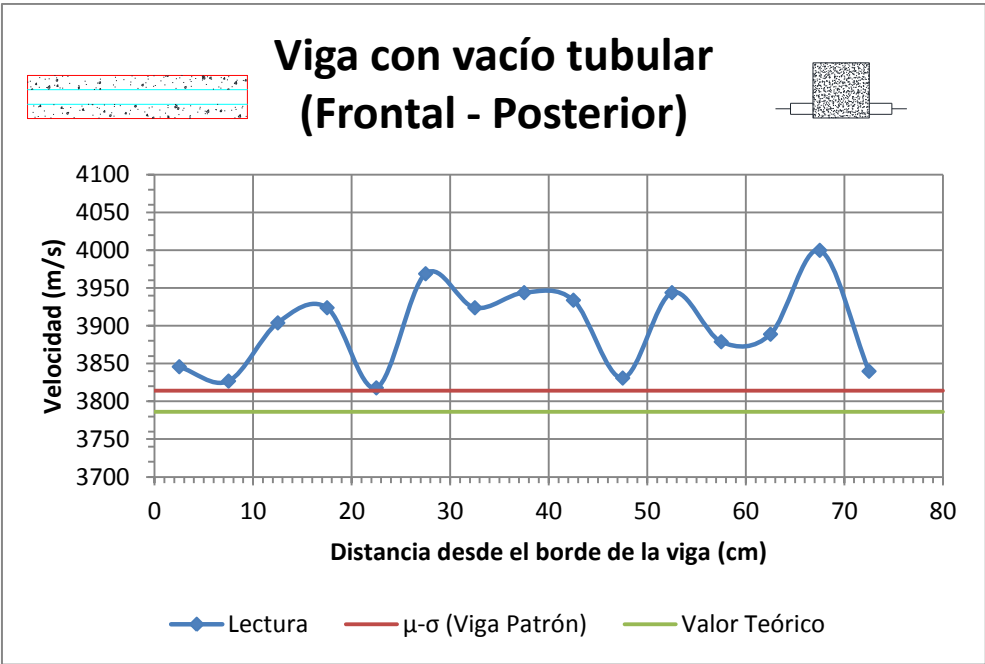


Gráfico 37. Viga con vacío tubular continuo (Frontal – Posterior) 3/3.

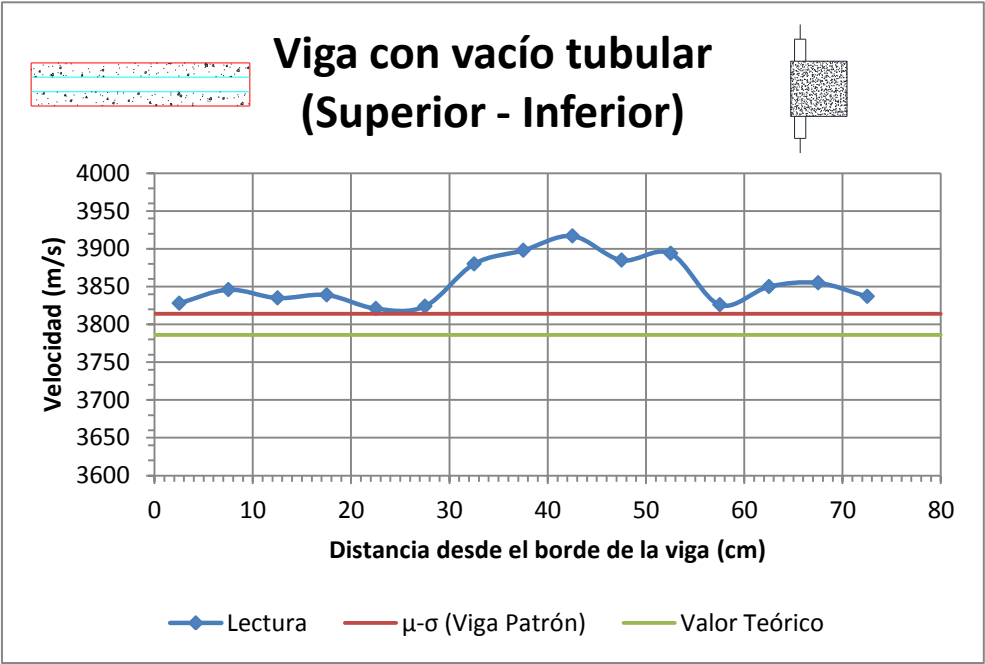


Gráfico 38. Viga con vacío tubular continuo (Superior – Inferior) 1/3.

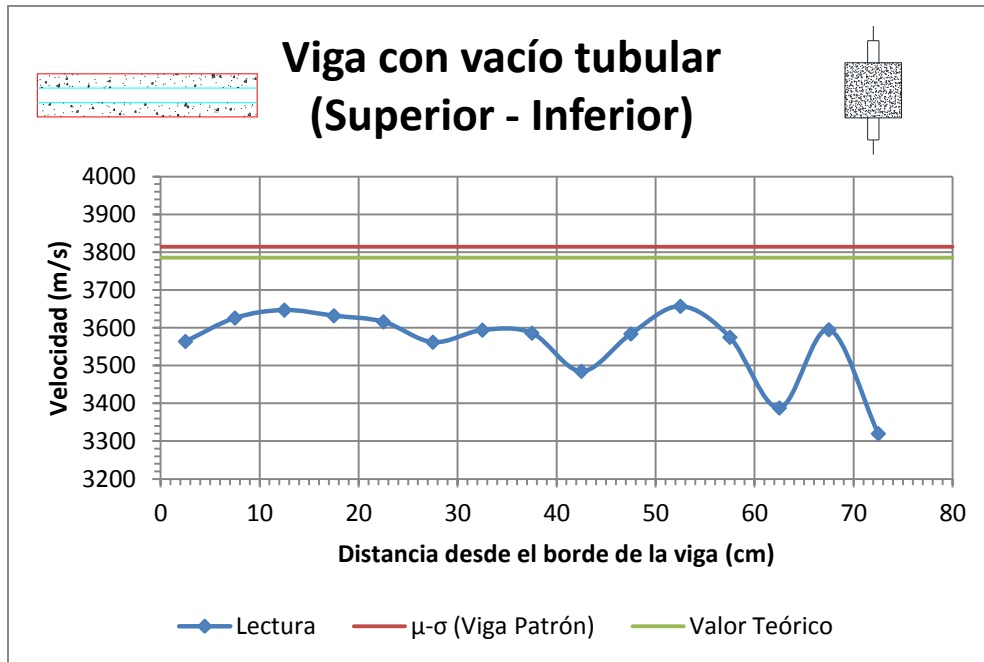


Gráfico 39. Viga con vacío tubular continuo (Superior – Inferior) 2/3.

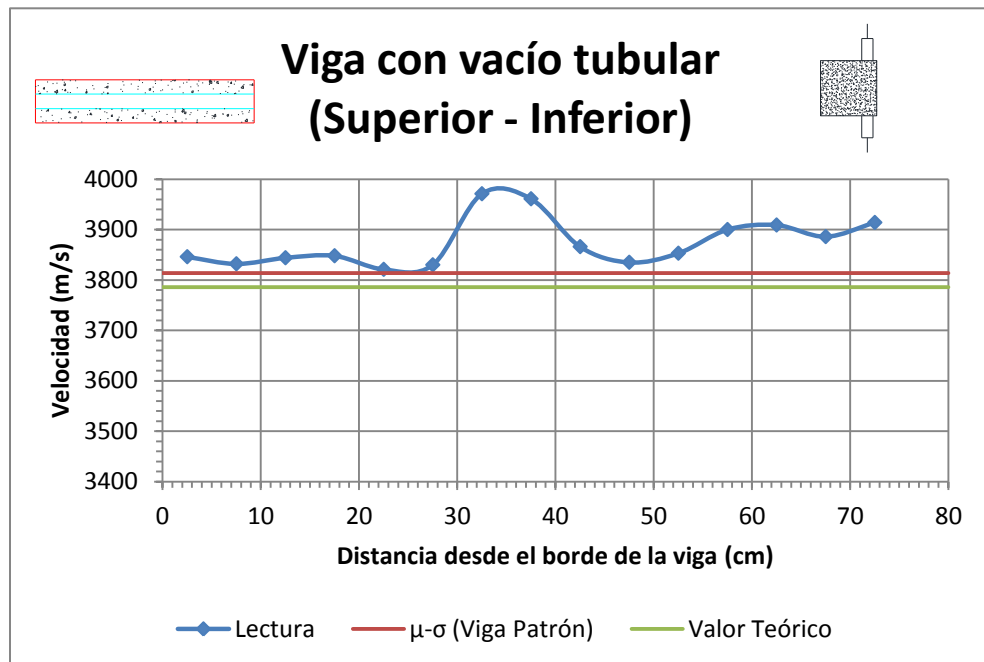


Gráfico 40. Viga con vacío tubular continuo (Superior - Inferior) 3/3.

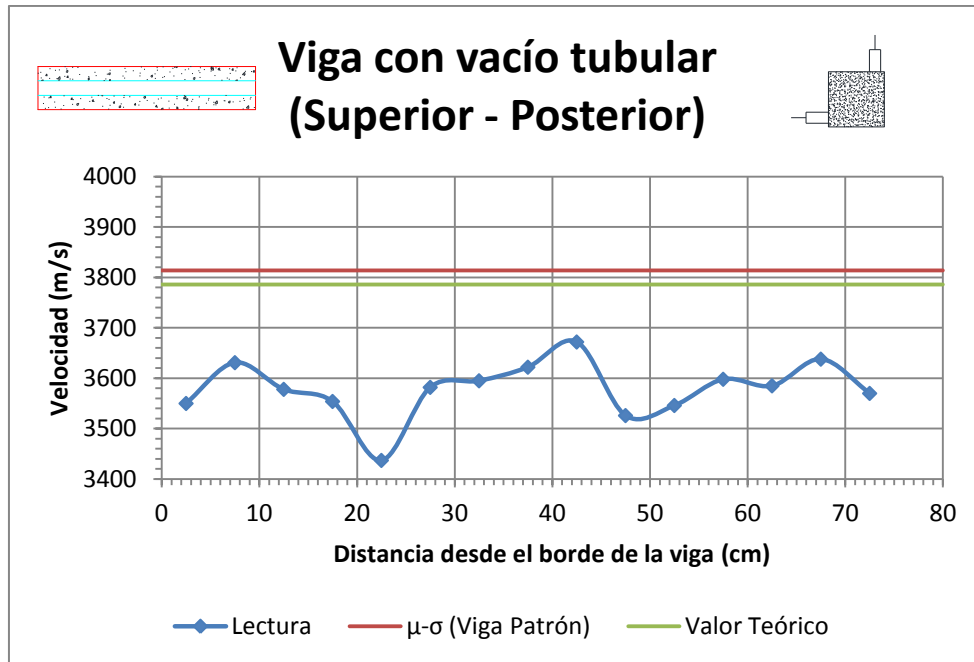


Gráfico 41. Viga con vacío tubular continuo (Superior - Posterior) 1/2.

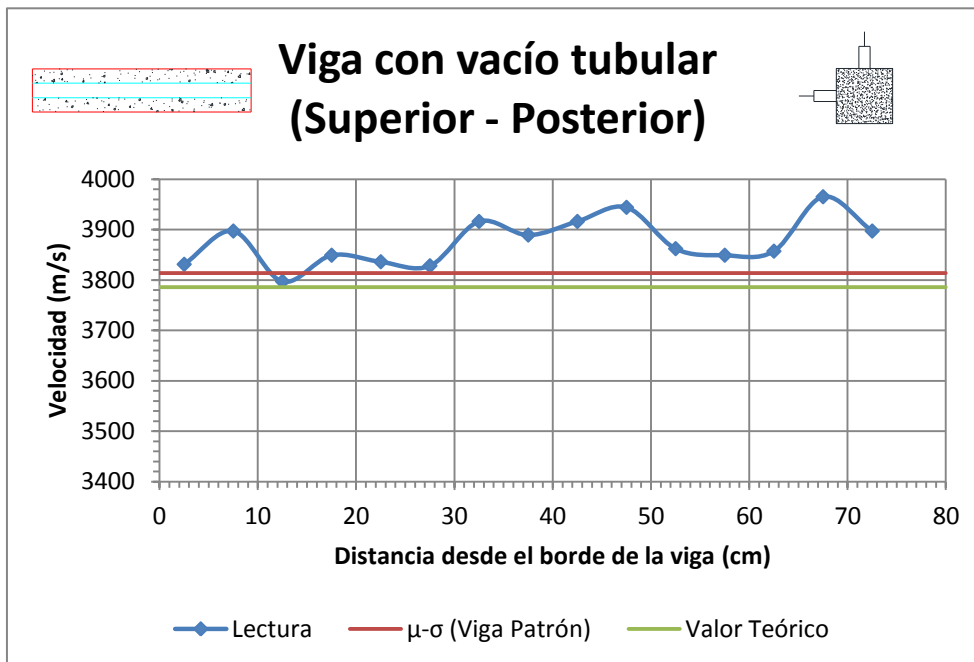


Gráfico 42. Viga con vacío tubular continuo (Superior - Posterior) 2/2.

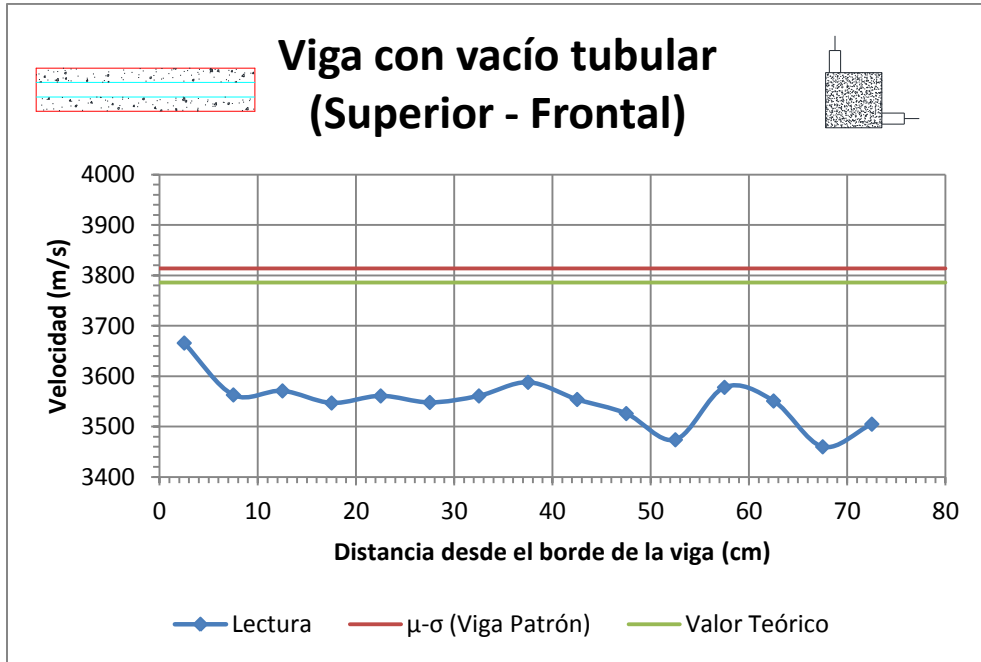


Gráfico 43. Viga con vacío tubular continuo (Superior – Frontal) 1/2.

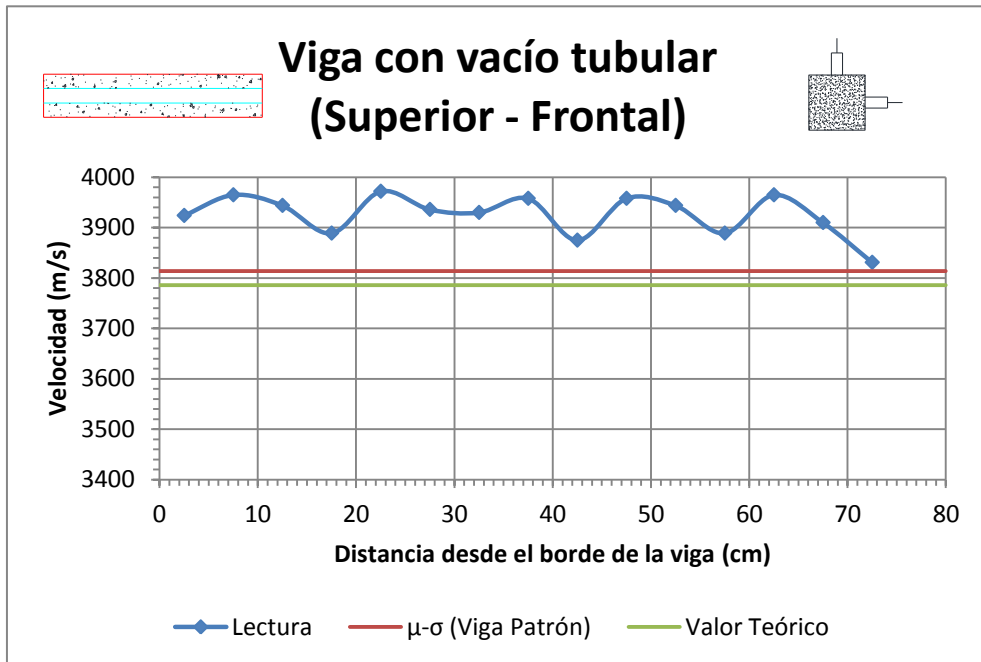


Gráfico 44. Viga con vacío tubular continuo (Superior - Frontal) 2/2.

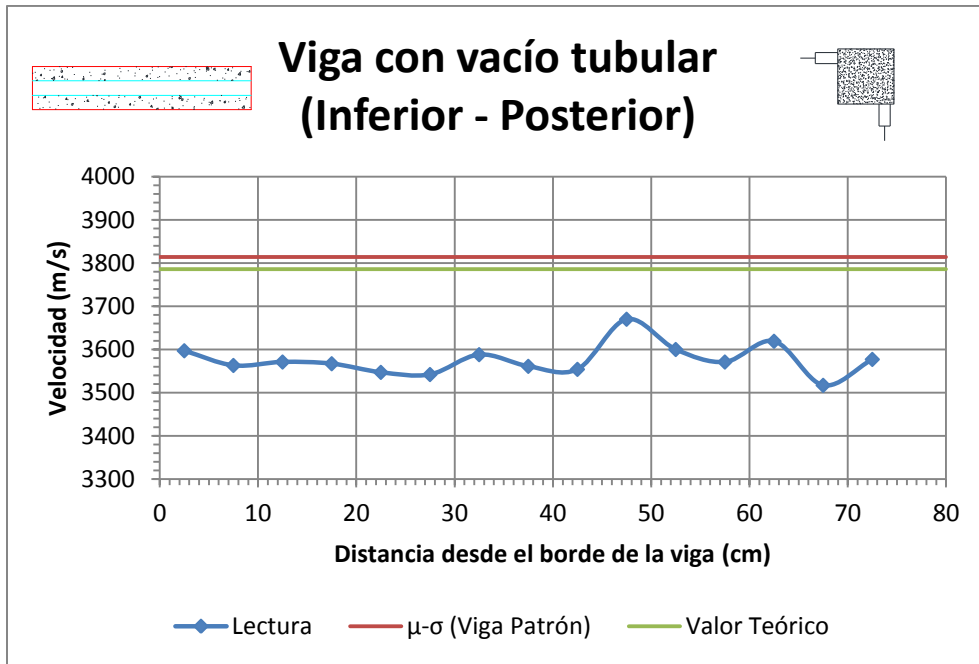


Gráfico 45. Viga con vacío tubular continuo (Inferior - Posterior) 1/2.

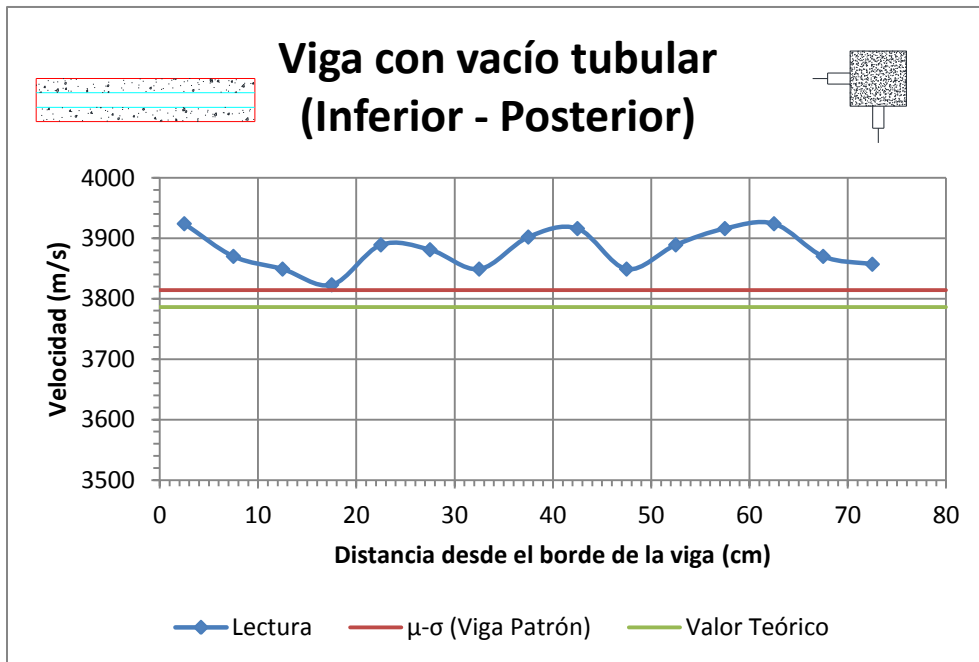


Gráfico 46. Viga con vacío tubular continuo (Inferior - Posterior) 2/2.

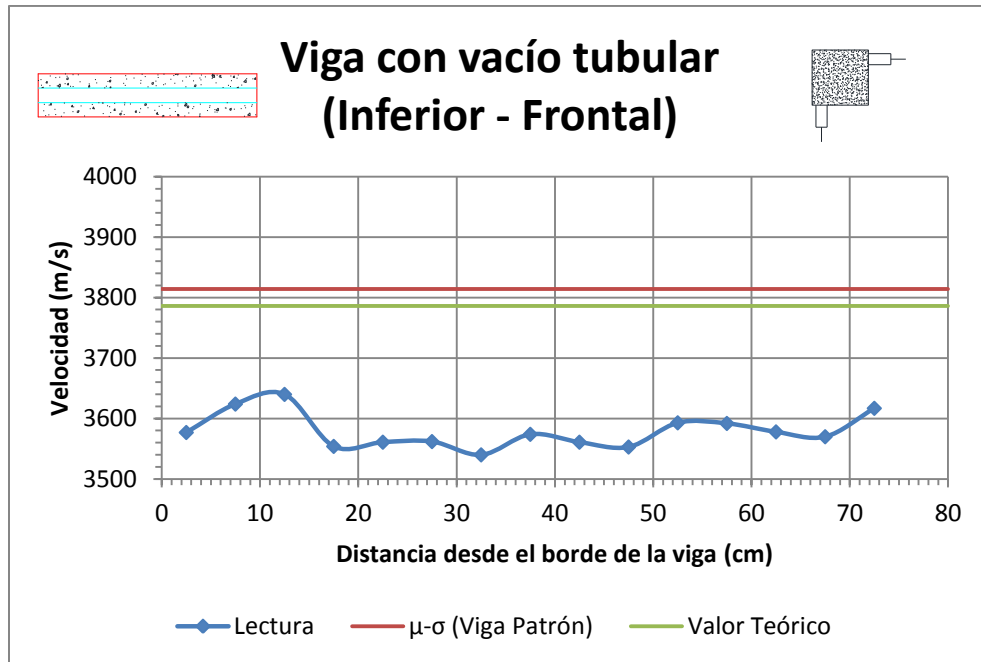


Gráfico 47. Viga con vacío tubular continuo (Inferior - Frontal) 1/2.

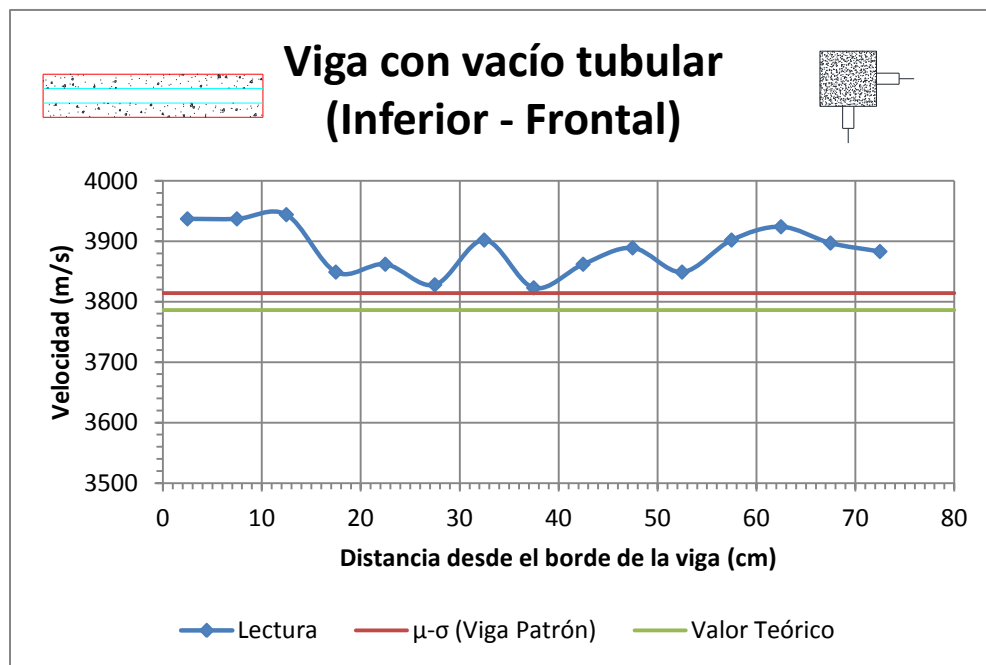


Gráfico 48. Viga con vacío tubular continuo (Inferior - Frontal) 2/2.

4.5.5. Viga con junta en su capa central.

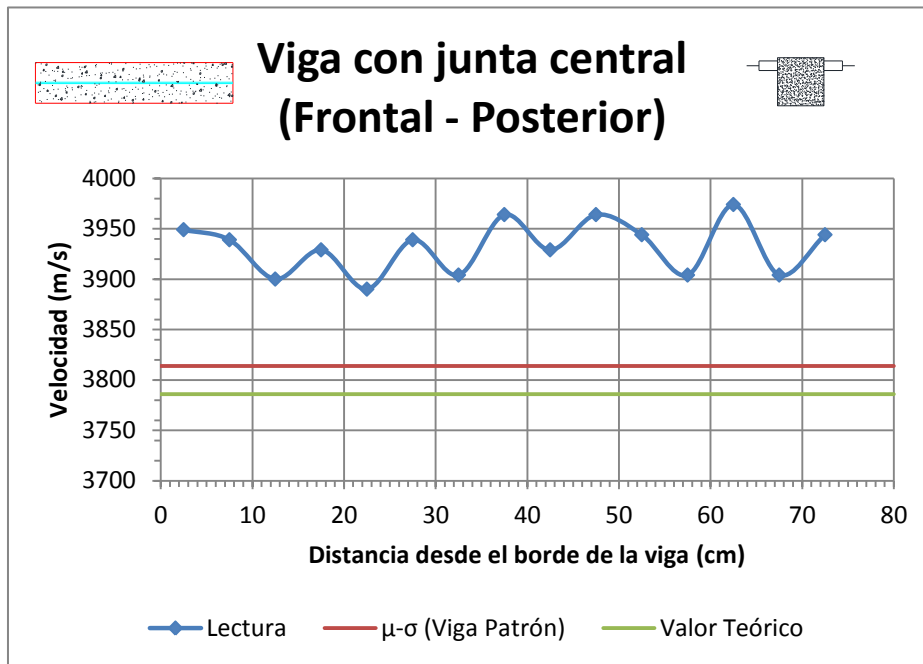


Gráfico 49. Viga con junta en su capa central (Frontal – Posterior) 1/2.

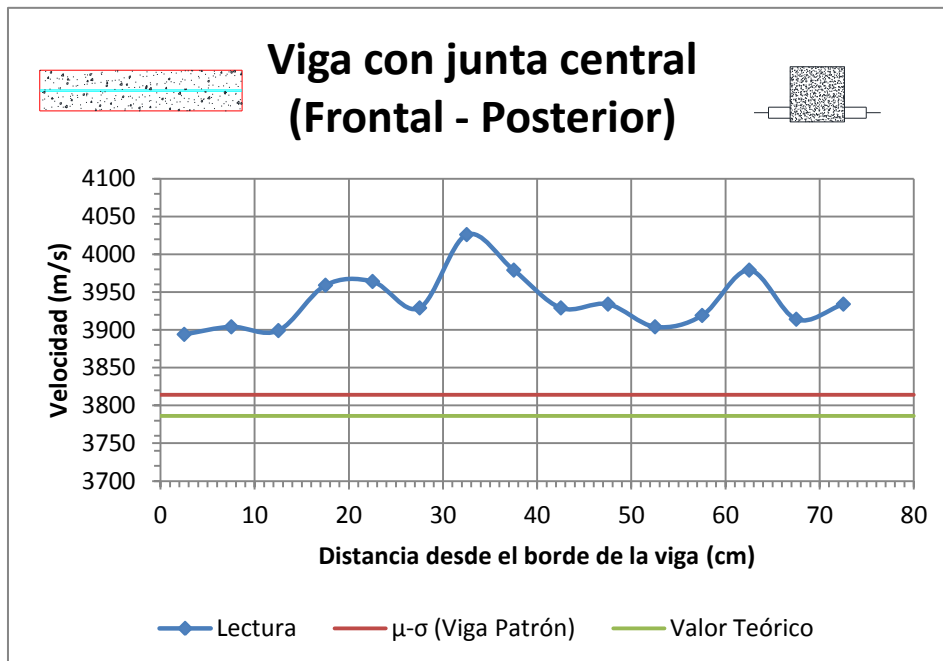


Gráfico 50. Viga con junta en su capa central (Frontal – Posterior) 2/2.

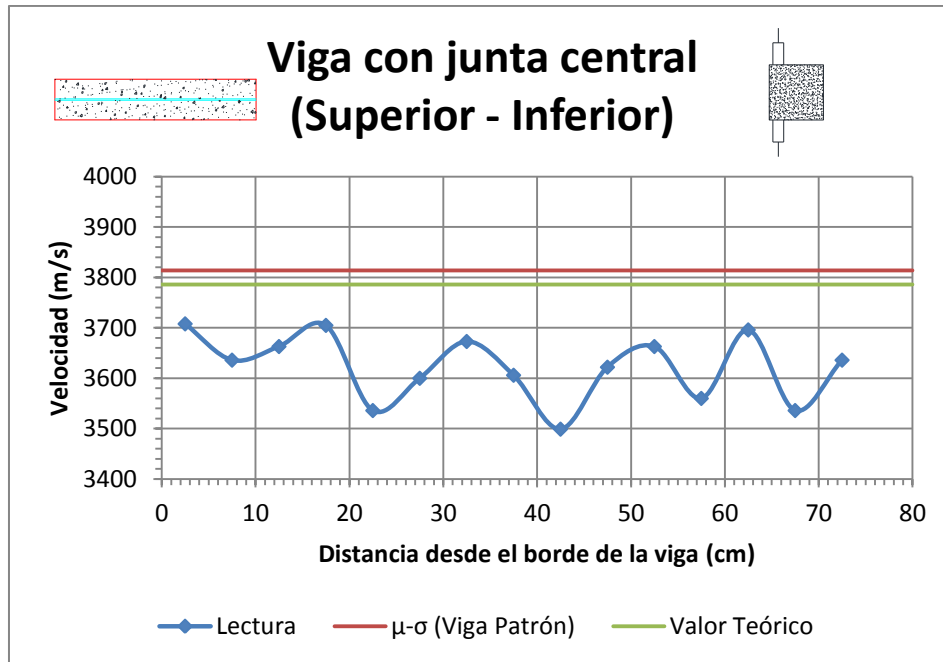


Gráfico 51. Viga con junta en su capa central (Superior – Inferior) 1/3.

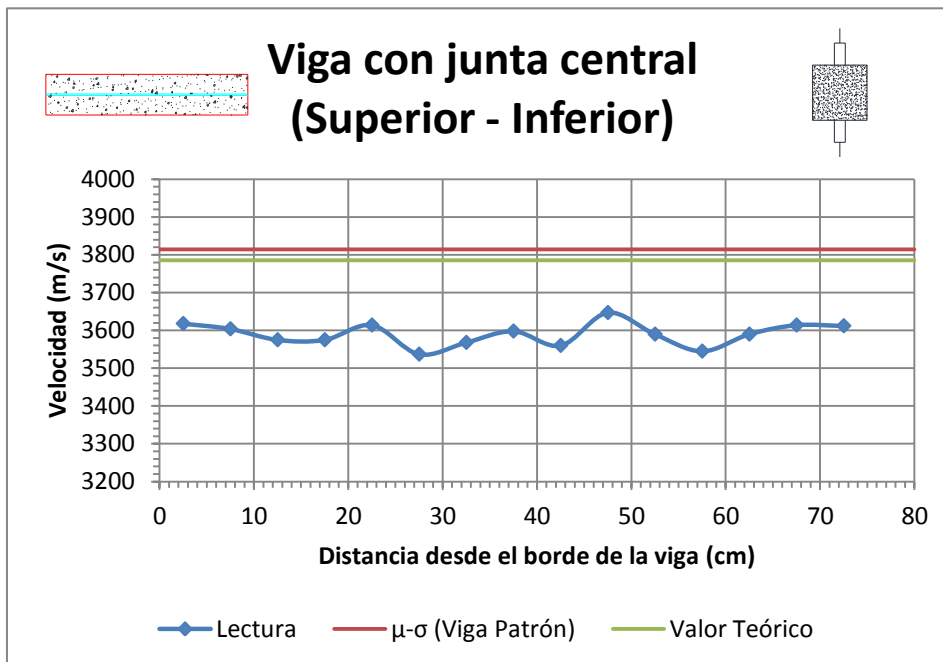


Gráfico 52. Viga con junta en su capa central (Superior – Inferior) 2/3.

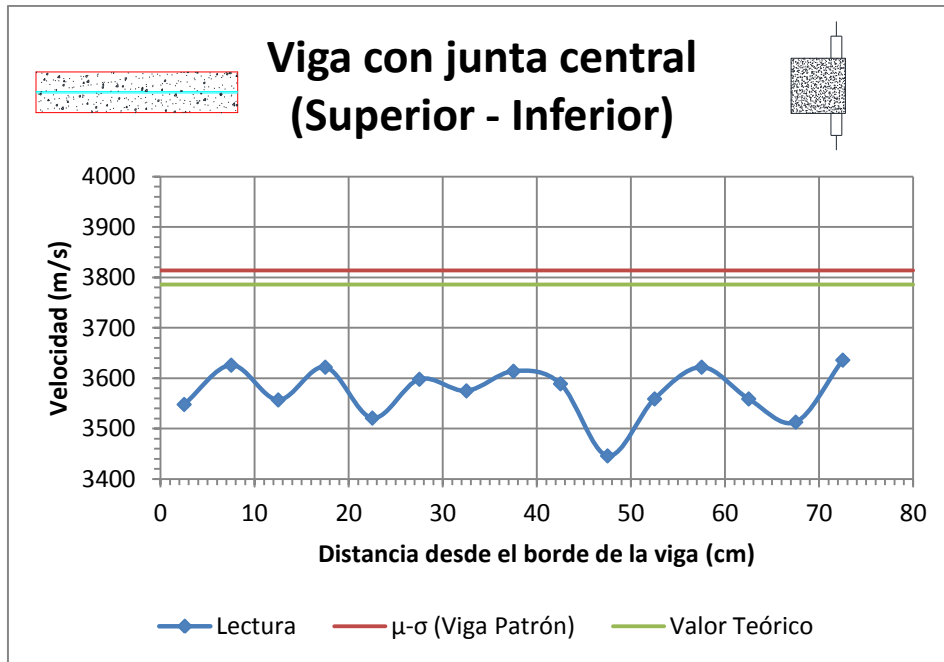


Gráfico 53. Viga con junta en su capa central (Superior - Inferior) 3/3.

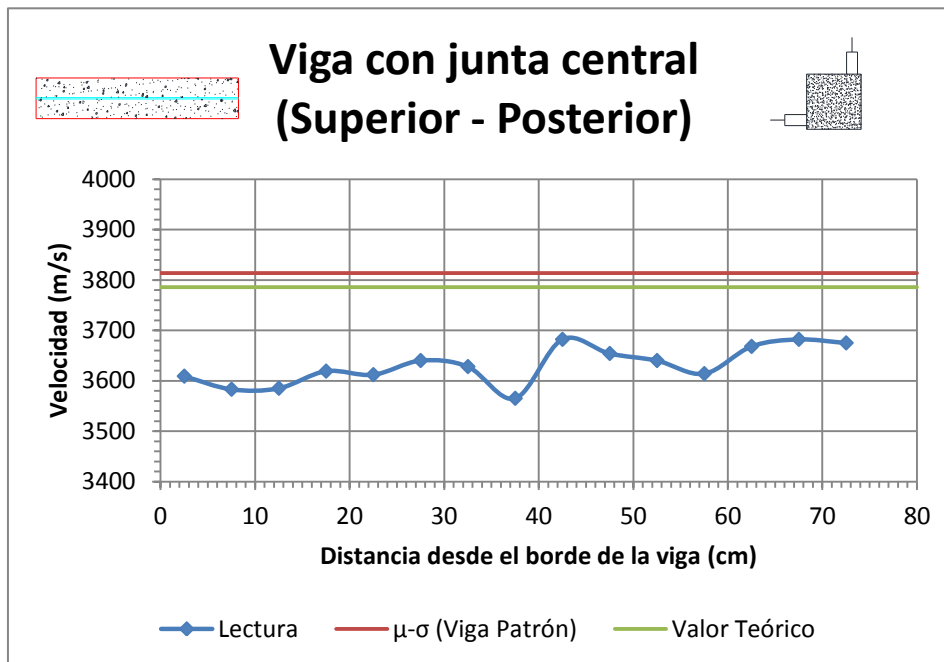


Gráfico 54. Viga con junta en su capa central (Superior - Posterior) 1/1.

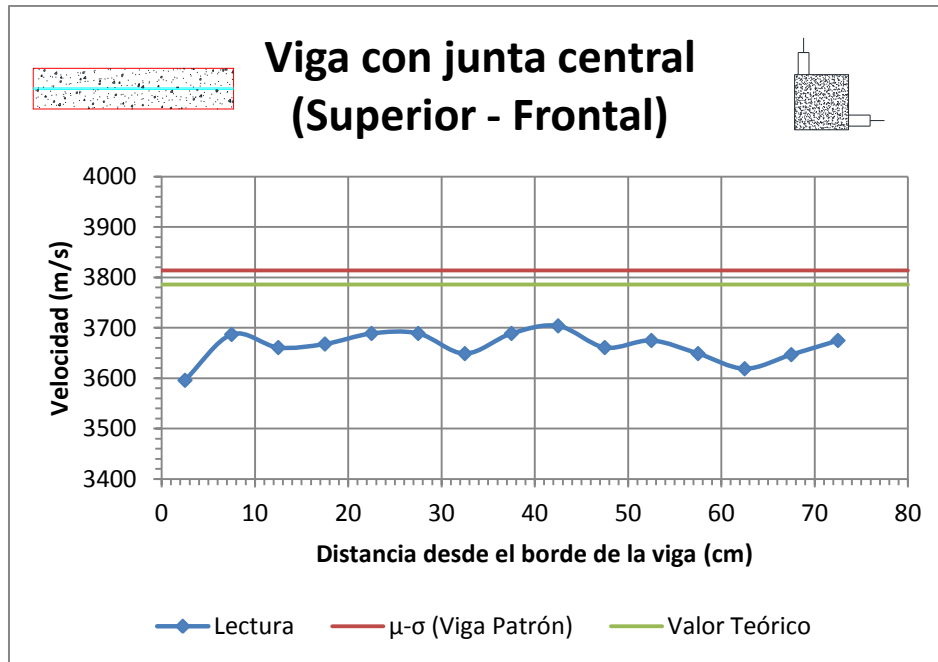


Gráfico 55. Viga con junta en su capa central (Superior – Frontal) 1/1.

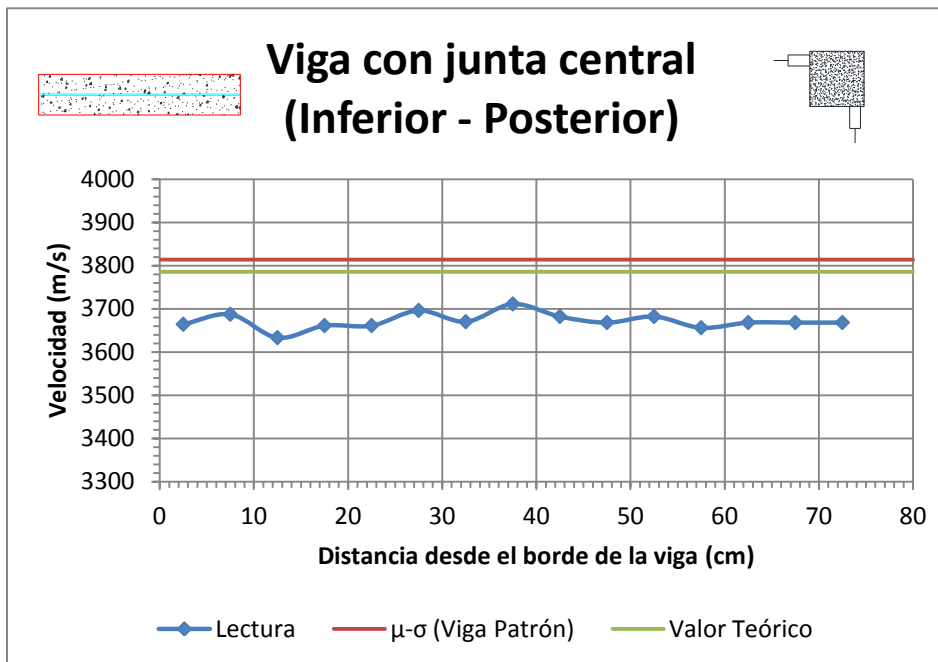


Gráfico 56. Viga con junta en su capa central (Inferior - Posterior) 1/1.

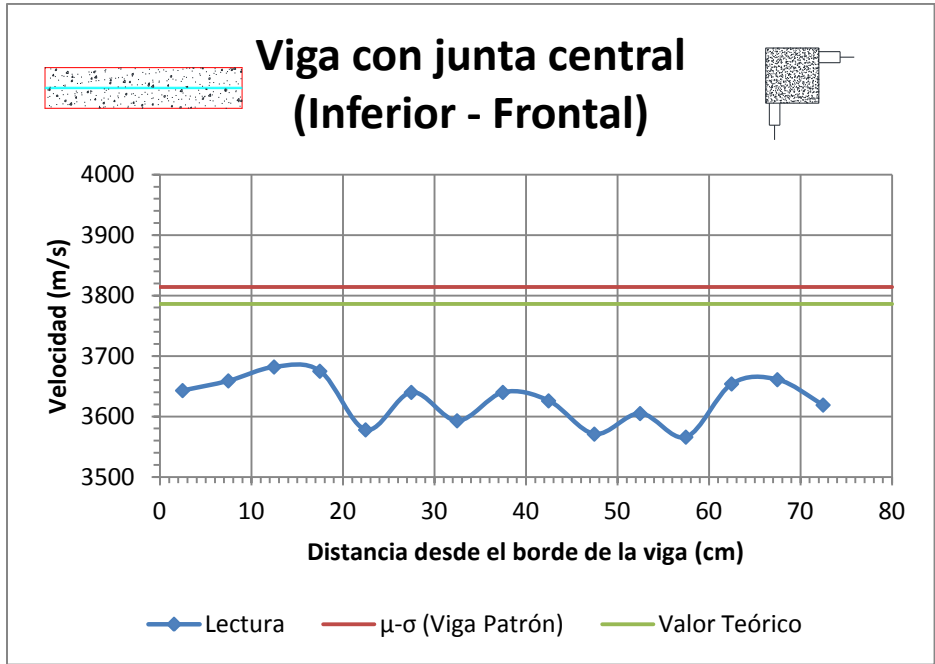


Gráfico 57. Viga con junta en su capa central (Inferior - Frontal) 1/1.

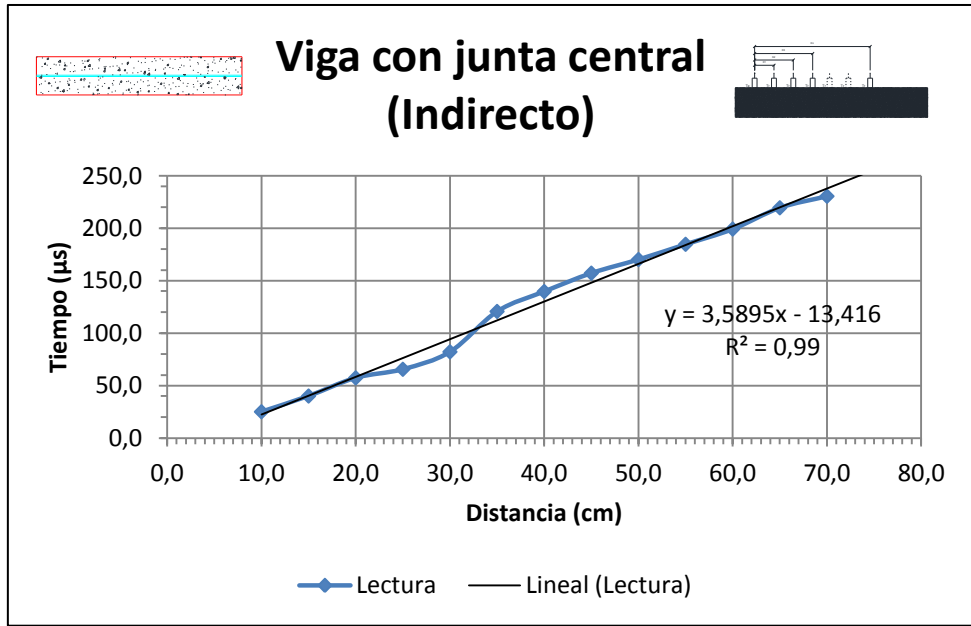


Gráfico 58. Viga con junta en su capa central (Indirecto) 1/3.

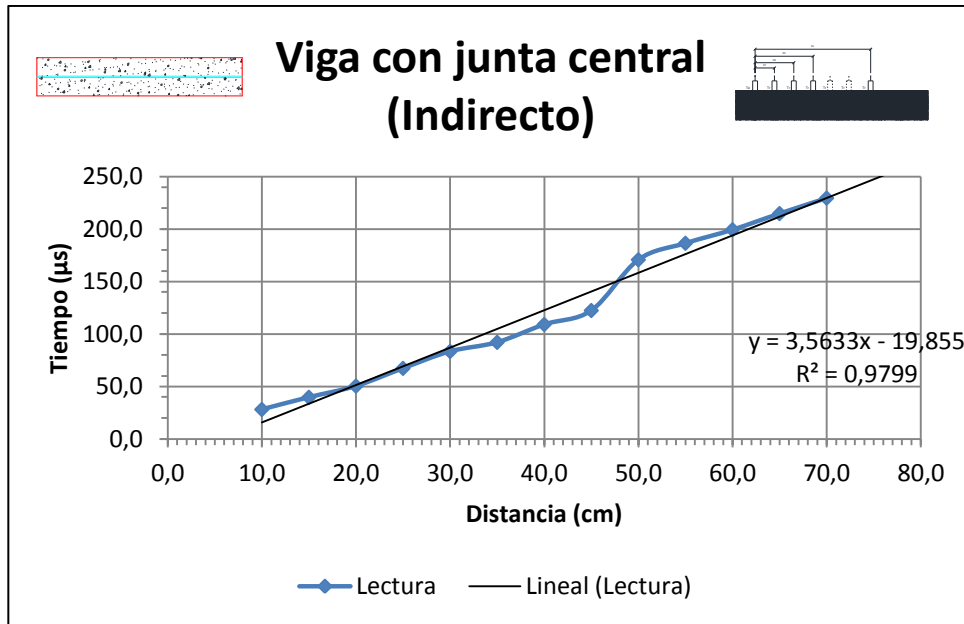


Gráfico 59. Viga con junta en su capa central (Indirecto) 2/3.

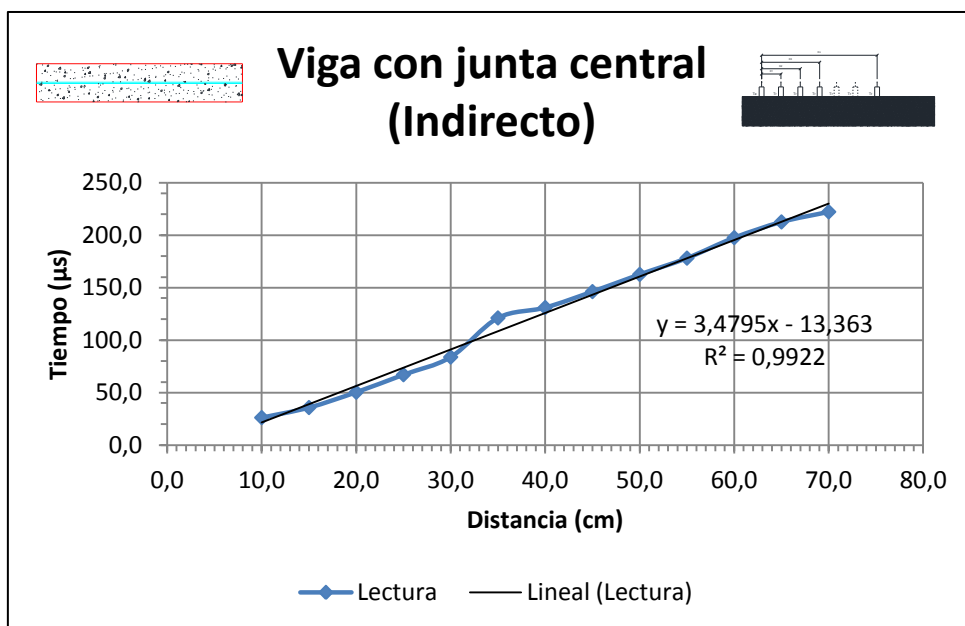


Gráfico 60. Viga con junta en su capa central (Indirecto) 3/3.

4.6. Comparación de los resultados obtenidos del ensayo con el planteamiento inicial.

Tabla 33. Comparación de los resultados obtenidos en la viga con vacíos esféricos, tomando en cuenta los centros de los vacíos.

"X" Lecturas del ensayo (cm)	"X" Promedio (cm)	"X" Centro de vacíos (cm)	Δ "X" (cm)	Diametro del vacío (cm)	Exactitud (%)	Promedio de la exactitud (%)
7,50	10,00	10,25	0,25	6,50	96,2	97,56
12,50						
22,50	25,00	24,91	0,09	6,35	98,6	
27,50						
37,50	37,50	37,50	0,00	6,50	100,0	
47,50	50,00	50,18	0,18	6,21	97,1	
52,50						
62,50	65,00	64,73	0,27	6,64	95,9	
67,50						

Tabla 34. Comparación de los resultados obtenidos en la viga con vacíos esféricos, tomando en cuenta los alrededores de los vacíos.

Tipo de vacío	"X" Inicio y fin de los vacíos (cm)		"X" Lecturas del ensayo (cm)	Δ "X" (cm)	Diametro del vacío (cm)	Exactitud (%)	Exactitud promedio (%)
Periodico	Inicio del vacío	7	7,5	0,50	6,5	92,31	88,94
	Fin del vacío	13,5	12,5	1,00		84,62	
Anime	Inicio del vacío	21,73	22,5	0,77	6,35	87,87	
	Fin del vacío	28,08	27,5	0,58		90,87	
Plastico	Inicio del vacío	34,25	-	-	6,5	-	
	Fin del vacío	40,75	-	-		-	
Tenis	Inicio del vacío	47,07	47,5	0,43	6,21	93,08	
	Fin del vacío	53,28	52,5	0,78		87,44	
Globo	Inicio del vacío	61,41	62,5	1,09	6,64	83,58	
	Fin del vacío	68,05	67,5	0,55		91,72	

Tabla 35. Comparación de los resultados obtenidos en la viga con vacíos planos en los alrededores de los vacíos.

Tipo de vacío	"X" Inicio y fin de los vacíos (cm)		"X" Lecturas del ensayo (cm)	Δ "X" (cm)	Diametro del vacío (cm)	Exactitud (%)	Exactitud promedio (%)
Ladrillo	Inicio del vacío	7,5	12,5	5,00	15	66,67	83,33
	Fin del vacío	22,5	22,5	0,00		100,00	
Anime	Inicio del vacío	30	32,5	2,50	15	83,33	
	Fin del vacío	45	42,5	2,50		83,33	
Madera	Inicio del vacío	52,5	52,5	0,00	15	100,00	
	Fin del vacío	67,5	62,5	5,00		66,67	

Tabla 36. Velocidades promedios en la viga con junta central a partir de la disposición indirecto.

Lectura	Velocidad (m/s)	Velocidad Promedio (m/s)		Disminucion de la velocidad (%)
		Del ensayo	Viga patrón	
1 - n	3590	3544	3895	9,01
16 - n	3563			
31 - n	3480			

CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1. Caracterización de los agregados.

5.1.1. Granulometría.

Partiendo de los resultados obtenidos en la tabla 14 se determinó que el tamaño máximo para la piedra picada fue de 1" ya que es la abertura del cedazo de mayor tamaño que deja pasar el 95% o más del material. En este caso el valor del porcentaje pasante fue de 80 % para el cedazo de una pulgada.

5.1.2. Desgaste Los Ángeles.

El porcentaje de desgaste obtenido para este ensayo fue de 30% tal como se muestra en la tabla 15 de este documento. Tomando en cuenta que las Normas suelen permitir un límite máximo de desgaste del 50% los resultados obtenidos cumplen con los requisitos normativos.

5.1.3. Absorción y peso específico.

Para el agregado grueso y el agregado fino se obtuvieron densidades de 2,53 y 2,51 g/ml respectivamente, las cuales se encuentran dentro del rango de los valores usuales de densidad establecido por Porrero (2009) y otros. En cuanto a la absorción, los valores obtenidos del ensayo para el agregado grueso y el agregado fino fueron de 3,24 y 2,52 %, los cuales pueden considerarse valores bajos, evitando que los granos puedan absorber parte del agua de la mezcla.

5.2. Caracterización del concreto fresco.

5.2.1. Medición de asentamiento.

El asentamiento establecido para el diseño de mezcla fue de 8,5 cm y el valor obtenido durante el mezclado del material fue de 9,0 cm, manteniéndose cercano al valor del diseño.

5.3. Caracterización del concreto endurecido.

5.3.1. Peso unitario.

Aun cuando los valores del peso unitario se encuentran cercanos a 2300 kg/m³ se pudo observar una pequeña disminución del peso unitario esto es atribuido a variaciones en geométricas en los cilindros.

5.3.2. Ensayo a compresión.

Las resistencias de los cilindros normalizados fueron incrementando con el tiempo tal como se esperaba. Para los cilindros ensayados a los 7 y 14 días se obtuvo un 85,2 y 95,6 % de la resistencia de diseño respectivamente, mientras que en los cilindros ensayados a las 28 días se obtuvo un 5,6 % más de la resistencia de diseño. Si bien estos valores son mayores a los valores esperados, la resistencia del concreto fue aumentando con el tiempo y la resistencia de diseño fue alcanzada. Las fallas que se presentaron en los cilindros fueron fallas por corte de forma diagonal, tal como se muestra en el anexo II de este documento.

5.3.3. Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros.

La velocidad alcanzada en los cilindros ensayados a los 28 días fue mayor a la velocidad teórica calculada a partir de la ecuación 10 (3786 m/s), lo que nos indica que no se encontraban vacíos en su interior, por lo tanto, la compactación fue adecuada.

5.4. Velocidad de pulso ultrasónico en vigas.

5.4.1. Viga patrón.

La velocidad promedio obtenida en la viga patrón (3895 m/s) a partir de 210 mediciones en diferentes direcciones fue mayor a la velocidad teórica (3786 m/s) pero menor al promedio obtenido en los cilindros. Esta variación de los resultados

se debe a que los cilindros fueron curados directamente bajo agua saturada de cal, mientras que las vigas no recibieron ningún tipo de curado.

La velocidad mínima aceptable para considerar que no se encuentran vacíos en el resto de las vigas fue de 3814 m/s, la cual a pesar de ser mayor a la velocidad teórica es el valor representativo para el diseño de mezcla y condiciones del concreto vaciado.

Es importante señalar que se realizaron ensayos de velocidad de pulso ultrasónico 35 días luego del vaciado, pero los valores obtenidos arrojaron una dispersión y desviación estándar muy elevada, lo cual es atribuido a la humedad de la probeta a esta edad. Los ensayos fueron realizados nuevamente 56 días después del vaciado obteniendo resultados satisfactorios.

5.4.2. Viga con vacíos esféricos.

Se puede observar que para todas las mediciones realizadas a este elemento se obtuvieron graficas similares tal como se observa en las gráficas 7 - 20, registrando vacíos en zonas particulares del elemento. Esto es atribuido a que durante la compactación de la capa superior del elemento se observó que los vacíos al tener menor densidad que el concreto, se desplazaron verticalmente hacia arriba, dejando aire atrapado entre la capa inferior y el vacío desplazado. Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos del ensayo con la geometría inicialmente planteada se obtuvo una exactitud de 97,56 % respecto al diámetro de los vacíos en la ubicación del centro de los vacíos y una exactitud del 88,94 % en la ubicación de los extremos de los vacíos.

5.4.3. Viga con vacíos planos.

En el caso de la viga con vacíos planos se puede observar que en las gráficas 21, 23, 24, 26, 28, 30, 32 y 34 no se observó disminución de la velocidad, descartando la presencia de vacíos en la zona superior, inferior y diagonalmente

en la dirección más corta. En el resto de las gráficas se observó que existen tres velocidades bajas de forma consecutiva y comparando los puntos de inicio y fin de los vacíos en su disposición inicial con los puntos de inicio y fin obtenidos a través del ensayo, se pudo determinar una exactitud de 83,33 %.

5.4.4. Viga con vacío tubular continuo.

Para la viga con vacío tubular continuo, tomando en cuenta que en las gráficas 35, 37, 38, 40, 42, 44, 46 y 48 no se observaron disminuciones de las velocidades se considera que en estas zonas no se determinaron vacíos. Mientras que en el resto de las gráficas, donde la trayectoria de la onda pasaba por el centro de la viga, se observó una disminución de la velocidad de pulso. Si bien no se puede definir las dimensiones de la tubería, ni se pueden contrastar los resultados de forma análoga a las vigas anteriores debido a que el diámetro de la tubería es prácticamente igual a la discretización utilizada en las vigas se puede asegurar que en el centro de la viga se encuentra un vacío a lo largo de todo el elemento.

5.4.5. Viga con junta en su capa central.

Para la viga con junta en su capa central, en las gráficas 49 y 50 no se detectaron velocidades menores a la velocidad mínima aceptable, por lo tanto no se encuentran vacíos en la zona superior e inferior de la viga. Sin embargo, en el resto de las gráficas se pudo observar una disminución en las velocidades lo que nos indica que existe un vacío en el interior de la viga aun cuando no podamos definir su geometría, espesor o profundidad.

En las gráficas 59 y 60 no se observó un cambio evidente en la pendiente de la curva, por lo que no se pudo determinar el espesor de la capa de concreto limitada con aserrín ubicada en el centro de la viga, sin embargo se observó una disminución en la velocidad de un 9,01 % respecto a la velocidad promedio en la viga patrón, por lo tanto se encuentra dentro del rango aceptable para

disposiciones de transmisión indirecta tal como se indica en el punto 2.20.4 del capítulo II de este documento.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

Siempre que se conozca la resistencia de diseño del elemento a ser ensayado se podrá utilizar la velocidad teórica de forma referencial, teniendo en cuenta que los ensayos realizados en este trabajo especial de grado fueron hechos en un tiempo no mayor a 3 meses luego del vaciado del concreto y recordando que a medida que el concreto se deteriora, ocurren cambios en sus propiedades los cuales pueden verse reflejados en una disminución de la velocidad de pulso ultrasónico.

Al contrastar los resultados obtenidos a través del ensayo de pulso ultrasónico con la geometría planteada inicialmente se determinó que al discretizar el elemento a ser ensayado en cuadrículas de aproximadamente 5 cm de lado es posible ubicar defectos esféricos con un exactitud de 88,94 %, respecto al diámetro del vacío, en sus alrededores y es posible ubicar el centro de dichos vacíos con una exactitud de 97,56 % respecto al diámetro de dicho vacío.

Si bien la exactitud o confiabilidad del ensayo para determinar la ubicación de vacíos planos en elementos de concreto discretizados en cuadrículas de aproximadamente 5 cm de lado es menor que en los vacíos esféricos, con un porcentaje de 83,33 % respecto a la longitud del vacío estos tipos de vacíos no son comunes en elementos de concreto, ya que en caso de que exista segregación de los agregados la geometría irregular de los granos genera formas relativamente esféricas, en donde la aglomeración de los agregados y el aire atrapado entre ellos genera una disminución de la velocidad del pulso en el concreto.

Tanto para la viga con vacío tubular continuo como para la viga con junta en su capa central no se pudo realizar una estimación de la exactitud de la ubicación

del vacío ya que el vacío se encuentra a todo lo largo del elemento y en el caso de particular del vacío tubular el diámetro de la tubería es prácticamente igual a las dimensiones utilizadas en la discretización del elemento.

Se puede decir entonces que la confiabilidad del ensayo de pulso ultrasónico para determinar vacíos en elementos de concreto de resistencia de diseño de 250 kgf/cm² discretizados en cuadrículas de aproximadamente 5 cm de lado y utilizando una frecuencia de 50 KHz para el ensayo, es de 86,14 % en los alrededores de los vacíos, respecto a las dimensiones de los mismos.

Si bien mayores discretizaciones en el elemento a ser estudiado pueden arrojar porcentajes de exactitud mayores, a nivel profesional no resulta práctico realizar tantas mediciones en un mismo elemento. Sin embargo se recomienda realizar la mayor cantidad de mediciones, con el fin de obtener datos suficientes para graficar el comportamiento de la velocidad a lo largo del elemento y definir la ubicación de los vacíos en el mismo.

6.2. Recomendaciones.

Con el fin de dar continuidad a la línea de investigación se recomienda:

1. Realizar estudios de pulso ultrasónico en elementos de concreto que contengan vacíos en su interior utilizando para el diseño de mezcla resistencias mayores.
2. Realizar estudios de pulso ultrasónico en elementos de concreto que contengan vacíos en su interior utilizando un mismo diseño de mezcla y varios tipos de acoplantes, determinando la influencia del acoplante en este ensayo.
3. Realizar estudios de pulso ultrasónico en elementos que contengan vacíos en su interior utilizando un mismo diseño de mezcla y métodos de

compactación distintos, determinando la influencia del método de compactación para este ensayo.

4. Realizar estudios de pulso ultrasónico en elementos de concreto que contengan vacíos del mismo material en su interior con el fin de determinar correlaciones entre las dimensiones de los vacíos y la velocidad de pulso ultrasónico.
5. Realizar ensayos de pulso ultrasónico a los elementos elaborados en esta investigación a edades de 1 y 5 años con el fin de determinar correlaciones entre la edad y la velocidad de la onda.

En cuanto a la aplicación del ensayo de manera profesional se recomienda:

1. Si se conoce la resistencia utilizada para el diseño de mezcla del elemento a ser ensayado, tomar como referencia la velocidad teórica.
2. Siempre utilizar acoplante para realizar el ensayo, si bien la superficie del concreto debe ser lisa, se debe garantizar un adecuado acoplamiento acústico entre el concreto los transductores.
3. Al momento de inspeccionar un elemento en específico realizar la mayor cantidad de mediciones en todas las direcciones que sea. De esta forma se obtienen una data lo suficientemente extensa como para determinar ubicación de vacíos en el elemento.
4. Una vez obtenidos los resultados de todas las mediciones graficarlos en base a uno de los extremos del elemento y graficar la velocidad teórica esperada para el tipo de concreto ensayado.
5. Realizar no menos de 20 mediciones de forma directa por metro lineal del elemento a ser ensayado y no menos de 20 mediciones de forma semi – directa por metro lineal del elemento a ser ensayado.

CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

International Atomic Energy Agency (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures.

Norma COVENIN 28:1993. Cemento Portland. Especificaciones. (5ta revisión).

Norma COVENIN 255:1998. Agregados. Determinación de la composición granulométrica. (1ra revisión).

Norma COVENIN 258:1977. Método de ensayo para la determinación por lavado del contenido de materiales más finos que el cedazo COVENIN 74 micras en agregados minerales.

Norma COVENIN 266:1977. Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste de agregados gruesos de menores de 38,1 mm (1 ½") por medio de la máquina de Los Ángeles.

Norma COVENIN 268:1998. Agregado Fino. Determinación de la densidad y la absorción. (1ra revisión).

Norma COVENIN 269:1998. Agregado Grueso. Determinación de la densidad y la absorción. (1ra revisión).

Norma COVENIN 338:2002. Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto. (2da revisión).

Norma COVENIN 339:1994. Concreto. Método para la medición del asentamiento con el Cono de Abrams. (1ra revisión).

Norma COVENIN 340:2004. Elaboración y curado de probetas en el laboratorio para ensayos a flexión.

Norma COVENIN 354:2001. Concreto. Método para el mezclado en el laboratorio. (1ra revisión).

Norma COVENIN 1375:1979. Método de ensayo para determinar por secado el contenido de humedad total y superficial en el agregado.

Norma COVENIN 1681:1980. Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto.

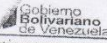
Norma COVENIN 1753:1987. Estructuras de concreto armado para edificaciones análisis y diseño.

Norma COVENIN 1976:2003. Evaluación y métodos de ensayo. (3ra revisión).

Porrero S., J., Ramos R., Grases G., J., y Velazco, G. J. (2009). Manual del Concreto Estructural. (3ra Edición). Caracas: Editorial Sidetur.

CAPÍTULO VIII. ANEXOS

Anexo I. Certificado de calidad enviado por BZS CONSTRUCCIÓN, S.A.



Gobierno Bolivariano de Venezuela
Venezolana de Cementos S.A.C.A.
 DIRECCIÓN DE CALIDAD Y AMBIENTE

ANÁLISIS Y ENSAYOS

INFORME DE LABORATORIO
(DESPACHO DE CEMENTO)

MUESTRA DE CEMENTO: PORTLAND GRIS TIPO I		Certificado N°	CLM-05
M/N: ICOA	DESPACHO: 07/02/2014	Fecha:	07-Feb-14

ANÁLISIS QUÍMICO:


SiO ₂	20,80 %	SO ₃	2,42 %	C ₃ S	60,7	Módulo Silíceo	2,28
Al ₂ O ₃	5,58 %	P.F.	0,60 %	C ₂ S	13,9	Módulo Férrico	1,57
Fe ₂ O ₃	3,56 %	R.J.	0,16 %	C ₃ A	8,8	Módulo Hidráulico	2,14
CaO	65,89 %	K ₂ O	0,67 %	C ₄ A _F	10,8	Saturación	96,0
MgO	1,00 %	Na ₂ O	0,10 %	CaSO ₄	4,1		
		Alcalis T.	0,54 %	(Na ₂ O+0,658*K ₂ O)			

ENSAYOS FÍSICO:

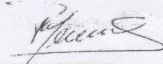
FINEZAS		FRAGUADO.	
45 um (Tamiz N°325):	89,2 %	Agua para consistencia normal:	24,8 %
75 um (Tamiz N°200):	98,8 %		
SUPERFICIE ESPECÍFICA		GILLMORE.	
BLAINE	338,0 m ² /Kg	Inicial:	140 min.
		Final:	230 min.
ESTABILIDAD DE VOLUMEN AL AUTOCLAVE		VICAT.	
	%	Inicial:	125 min.
		Final:	215 min.
CONTENIDO DE AIRE EN MORTERO		RESISTENCIAS.	
	%	(COVENIN 484-89 ASTM C109-01)	
FALSO FRAGUADO		1 Día	122 Kg/cm ² 12,0 MPa
	84,4 %	3 Días	224 Kg/cm ² 22,0 MPa
CALOR DE HIDRATACION		14-Feb 7 Días	Kg/cm ² MPa
		07-Mar 28 Días	Kg/cm ² MPa
7 Días	Cal/gr	(1Kg/cm ² = 0.098066 MPa)	

Clasificación: Cemento Portland Tipo I Cumple con los requisitos de la Norma COVENIN 28 Vigente.

Observaciones:



Gobierno Bolivariano de Venezuela
VENEZOLANA DE CEMENTOS, S.A.
 RIF. J-00038839 3



Gerente de Calidad y Ambiente
 P-GAC-C-03-F7

Anexo II. Fallas de cilindros ensayados.

Ensayos a los 7 días:

P-1:



P-2:



P-3:



Ensayos a los 14 días:

P-1



P-2:



P-3:



Ensayos a los 14 días:

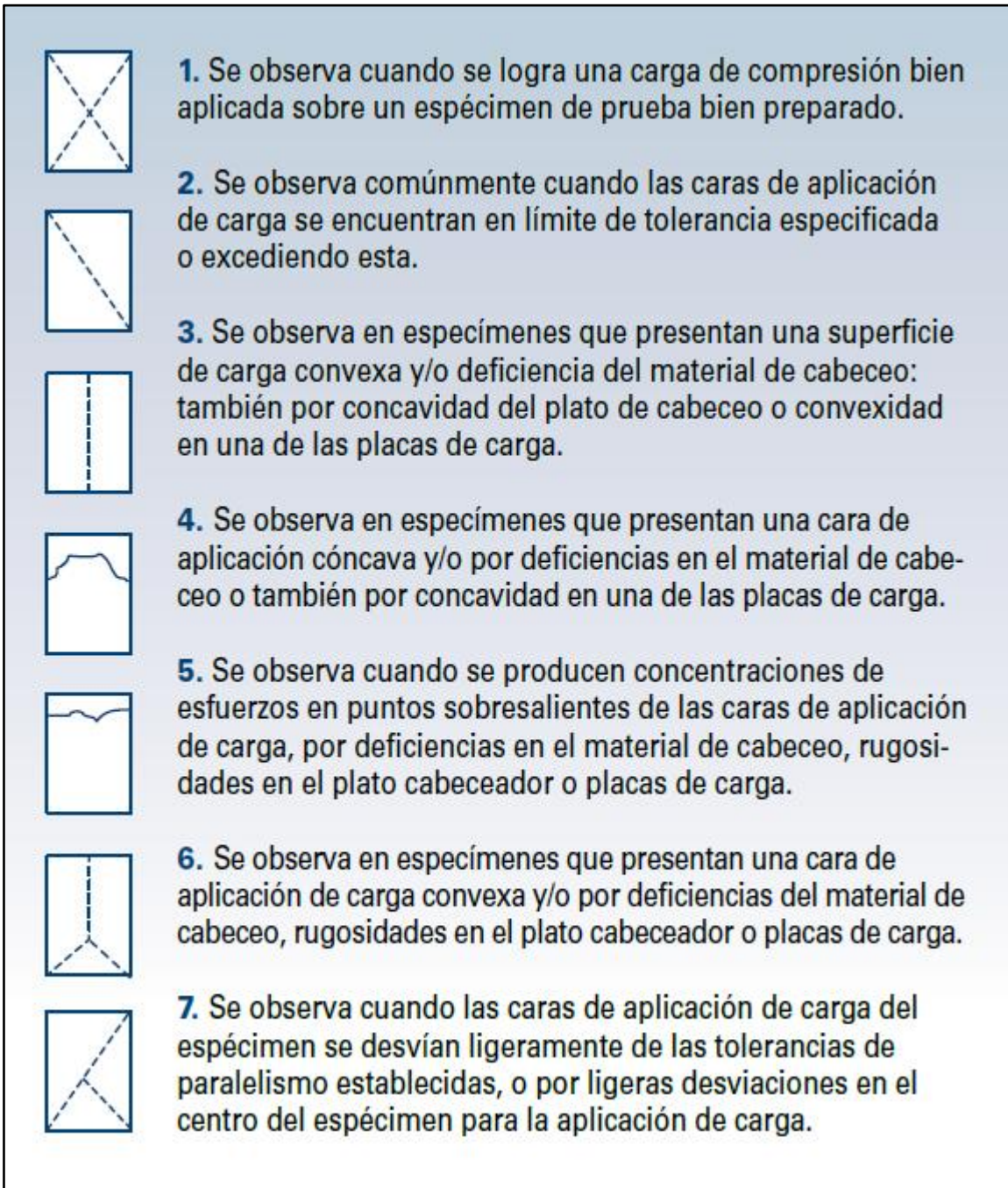
P-1:



P-3:



Anexo III. Diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión.



Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2008.

Anexo IV. Resultados del ensayo de pulso ultrasónico.

Tipo de ensayo:	Directo
Dirección:	Frontal - Posterior
Viga:	Patrón

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 F - 31 P	15,6	41,4	3768	
2 F - 32 P	15,7	41,5	3783	
3 F - 33 P	15,6	40,4	3861	
4 F - 34 P	15,6	41,6	3750	
5 F - 35 P	15,6	40,5	3852	
6 F - 36 P	15,7	40,5	3877	
7 F - 37 P	15,7	40,4	3886	
8 F - 38 P	15,8	40,8	3873	
9 F - 39 P	15,7	40,7	3857	
10 F - 40 P	15,6	40,8	3824	
11 F - 41 P	15,6	40	3900	
12 F - 42 P	15,6	40,7	3833	
13 F - 43 P	15,7	41	3829	
14 F - 44 P	15,7	42	3738	
15 F - 45 P	15,8	40,5	3901	

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 F - 16 P	15,6	40,8	3824	
17 F - 17 P	15,7	41,4	3792	
18 F - 18 P	15,6	40,4	3861	
19 F - 19 P	15,6	38,1	4094	
20 F - 20 P	15,6	39,7	3929	
21 F - 21 P	15,7	39,9	3935	
22 F - 22 P	15,7	41,1	3820	
23 F - 23 P	15,8	40,5	3901	
24 F - 24 P	15,7	40,4	3886	
25 F - 25 P	15,6	39,8	3920	
26 F - 26 P	15,6	40,5	3852	
27 F - 27 P	15,6	40,5	3852	
28 F - 28 P	15,7	40,5	3877	
29 F - 29 P	15,7	40,8	3848	
30 F - 30 P	15,8	39,9	3960	

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 F - 1 P	16,3	41,8	3900	
32 F - 2 P	16,0	40,8	3922	
33 F - 3 P	15,9	40,6	3916	
34 F - 4 P	16,1	41,5	3880	
35 F - 5 P	16,1	41,5	3880	
36 F - 6 P	16,1	40,2	4005	
37 F - 7 P	16,0	41,1	3893	
38 F - 8 P	16,1	41,3	3898	
39 F - 9 P	16,1	39,7	4055	
40 F - 10 P	16,0	41,5	3855	
41 F - 11 P	16,1	40,8	3946	
42 F - 12 P	16,3	40,8	3995	
43 F - 13 P	15,9	41,5	3831	
44 F - 14 P	15,9	39,4	4036	
45 F - 15 P	15,9	41,0	3878	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Superior - Inferior
Viga:	Patrón

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 S - 31 I	16,5	43,5	3793	
2 S - 32 I	16,5	43,7	3776	
3 S - 33 I	16,4	43,9	3736	
4 S - 34 I	16,4	43,7	3753	
5 S - 35 I	16,4	43,2	3796	
6 S - 36 I	16,4	43,4	3779	
7 S - 37 I	16,4	43,2	3796	
8 S - 38 I	16,4	44,7	3669	
9 S - 39 I	16,3	43,5	3747	
10 S - 40 I	16,3	42,5	3835	
11 S - 41 I	16,4	43,4	3779	
12 S - 42 I	16,5	44,5	3708	
13 S - 43 I	16,5	42,5	3882	
14 S - 44 I	16,5	43,7	3776	
15 S - 45 I	16,5	44,4	3716	

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 I	16,5	43,4	3802	
17 S - 17 I	16,5	42,2	3910	
18 S - 18 I	16,4	43,6	3761	
19 S - 19 I	16,4	42,1	3895	
20 S - 20 I	16,4	42,8	3832	
21 S - 21 I	16,4	42,5	3859	
22 S - 22 I	16,4	42,9	3823	
23 S - 23 I	16,4	43,4	3779	
24 S - 24 I	16,3	42,8	3808	
25 S - 25 I	16,3	42	3881	
26 S - 26 I	16,4	42,3	3877	
27 S - 27 I	16,5	43	3837	
28 S - 28 I	16,5	41,4	3986	
29 S - 29 I	16,5	43,9	3759	
30 S - 30 I	16,5	43,7	3776	

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 S - 1 I	16,5	43,6	3784	
32 S - 2 I	16,5	42,8	3855	
33 S - 3 I	16,4	42,1	3895	
34 S - 4 I	16,4	43,0	3814	
35 S - 5 I	16,4	41,8	3923	
36 S - 6 I	16,4	42,9	3823	
37 S - 7 I	16,4	43,8	3744	
38 S - 8 I	16,4	43,4	3779	
39 S - 9 I	16,3	43,8	3721	
40 S - 10 I	16,3	42,9	3800	
41 S - 11 I	16,4	41,2	3981	
42 S - 12 I	16,5	44,1	3741	
43 S - 13 I	16,5	42,6	3873	
44 S - 14 I	16,5	43,4	3802	
45 S - 15 I	16,5	42,9	3846	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Superior - Posterior
Viga:	Patrón

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 S - 1 P	19,2	49,8	3855	
32 S - 2 P	19,2	48,1	3992	
33 S - 3 P	19,1	49,9	3828	
34 S - 4 P	19,1	47	4064	
35 S - 5 P	19,1	48,4	3946	
36 S - 6 P	19,2	48,3	3975	
37 S - 7 P	19,2	48,2	3983	
38 S - 8 P	19,2	48,6	3951	
39 S - 9 P	19,1	49,1	3890	
40 S - 10 P	19,0	47,6	3992	
41 S - 11 P	19,1	48,1	3971	
42 S - 12 P	19,2	49,4	3887	
43 S - 13 P	19,2	48,6	3951	
44 S - 14 P	19,2	49,2	3902	
45 S - 15 P	19,3	48,7	3963	

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 P	11,4	29,8	3826	
17 S - 17 P	11,4	29,9	3813	
18 S - 18 P	11,3	29,4	3844	
19 S - 19 P	11,3	29	3897	
20 S - 20 P	11,3	28,3	3993	
21 S - 21 P	11,4	28,6	3986	
22 S - 22 P	11,4	29	3931	
23 S - 23 P	11,4	28,5	4000	
24 S - 24 P	11,3	29,3	3857	
25 S - 25 P	11,3	28,8	3924	
26 S - 26 P	11,3	29,1	3883	
27 S - 27 P	11,4	29,2	3904	
28 S - 28 P	11,4	29	3931	
29 S - 29 P	11,4	28,8	3958	
30 S - 30 P	11,4	28,6	3986	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Superior - Frontal
Viga:	Patrón

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 S - 31 F	19,2	48,9	3926	
2 S - 32 F	19,2	48	4000	Superficie Irregular
3 S - 33 F	19,1	48,7	3922	
4 S - 34 F	19,1	48,7	3922	
5 S - 35 F	19,1	48,5	3938	
6 S - 36 F	19,2	48,6	3951	Superficie Irregular
7 S - 37 F	19,2	48,2	3983	
8 S - 38 F	19,2	49,5	3879	
9 S - 39 F	19,1	47,5	4021	
10 S - 40 F	19,0	47,4	4008	
11 S - 41 F	19,1	47,8	3996	
12 S - 42 F	19,2	48,4	3967	
13 S - 43 F	19,2	49	3918	
14 S - 44 F	19,2	48,4	3967	
15 S - 45 F	19,3	48,7	3963	

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 F	11,4	28,7	3972	
17 S - 17 F	11,4	29,1	3918	
18 S - 18 F	11,3	29,3	3857	
19 S - 19 F	11,3	28,5	3965	
20 S - 20 F	11,3	29,8	3792	
21 S - 21 F	11,4	28,8	3958	
22 S - 22 F	11,4	29,6	3851	
23 S - 23 F	11,4	29,7	3838	
24 S - 24 F	11,3	28,9	3910	
25 S - 25 F	11,3	28,3	3993	
26 S - 26 F	11,3	28,6	3951	
27 S - 27 F	11,4	29,2	3904	
28 S - 28 F	11,4	29,9	3813	
29 S - 29 F	11,4	29,1	3918	
30 S - 30 F	11,4	29	3931	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Inferior - Posterior
Viga:	Patrón

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 I - 31 P	19,2	49,1	3910	
2 I - 32 P	19,2	49	3918	
3 I - 33 P	19,1	48,9	3906	
4 I - 34 P	19,1	48,7	3922	
5 I - 35 P	19,1	48,2	3963	
6 I - 36 P	19,2	48,2	3983	
7 I - 37 P	19,2	49,2	3902	
8 I - 38 P	19,2	49,8	3855	
9 I - 39 P	19,1	49,7	3843	
10 I - 40 P	19,0	48,5	3918	
11 I - 41 P	19,1	49,3	3874	
12 I - 42 P	19,2	50,4	3810	
13 I - 43 P	19,2	48,8	3934	
14 I - 44 P	19,2	48,7	3943	
15 I - 45 P	19,3	48,6	3971	

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 I - 16 P	11,4	28,8	3958	
17 I - 17 P	11,4	28,8	3958	
18 I - 18 P	11,3	29,7	3805	
19 I - 19 P	11,3	28,9	3910	
20 I - 20 P	11,3	28,3	3993	
21 I - 21 P	11,4	28,6	3986	
22 I - 22 P	11,4	28,6	3986	
23 I - 23 P	11,4	28,7	3972	
24 I - 24 P	11,3	29,7	3805	
25 I - 25 P	11,3	28,5	3965	
26 I - 26 P	11,3	29,6	3818	
27 I - 27 P	11,4	28,8	3958	
28 I - 28 P	11,4	28,6	3986	
29 I - 29 P	11,4	29,7	3838	
30 I - 30 P	11,4	29,5	3864	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Dirección:	Inferior - Frontal
Viga:	Patrón

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 - 1 F	19,2	47,3	4059	
32 - 2 F	19,2	48,4	3967	
33 - 3 F	19,1	48,1	3971	
34 - 4 F	19,1	48	3979	
35 - 5 F	19,1	47,9	3987	
36 - 6 F	19,2	47,8	4017	
37 - 7 F	19,2	47,3	4059	
38 - 8 F	19,2	48,4	3967	
39 - 9 F	19,1	48,1	3971	
40 - 10 F	19,0	48,5	3918	
41 - 11 F	19,1	47,9	3987	
42 - 12 F	19,2	49,3	3895	
43 - 13 F	19,2	48,6	3951	
44 - 14 F	19,2	49	3918	
45 - 15 F	19,3	47	4106	

N° de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 - 16 F	11,4	29,1	3918	
17 - 17 F	11,4	29	3931	
18 - 18 F	11,3	29,1	3883	
19 - 19 F	11,3	29,1	3883	
20 - 20 F	11,3	29,1	3883	
21 - 21 F	11,4	28,7	3972	
22 - 22 F	11,4	29,6	3851	
23 - 23 F	11,4	29,7	3838	
24 - 24 F	11,3	28,3	3993	
25 - 25 F	11,3	28,9	3910	
26 - 26 F	11,3	28,4	3979	
27 - 27 F	11,4	29,8	3826	
28 - 28 F	11,4	28,7	3972	
29 - 29 F	11,4	29,2	3904	
30 - 30 F	11,4	29,3	3891	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Frontal - Posterior
Viga:	Vacios Esféricos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 F - 31 P	15,5	40,4	3837	
2 F - 32 P	15,5	42,6	3638	
3 F - 33 P	15,6	42,7	3653	
4 F - 34 P	15,6	40,8	3824	
5 F - 35 P	15,6	43,4	3594	
6 F - 36 P	15,6	42,5	3671	
7 F - 37 P	15,6	40,8	3824	
8 F - 38 P	15,7	47,3	3319	
9 F - 39 P	15,7	39,9	3935	
10 F - 40 P	15,7	46,3	3391	
11 F - 41 P	15,7	44,2	3552	
12 F - 42 P	15,7	40,7	3857	
13 F - 43 P	15,7	42,9	3660	
14 F - 44 P	15,7	44,4	3536	
15 F - 45 P	15,7	41,0	3829	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 F - 16 A	15,5	40,6	3818	
17 F - 17 A	15,5	42,2	3673	
18 F - 18 A	15,6	42,6	3662	
19 F - 19 A	15,6	40,1	3890	
20 F - 20 A	15,6	43,1	3619	
21 F - 21 A	15,6	42,8	3645	
22 F - 22 A	15,6	40,6	3842	
23 F - 23 A	15,7	45,2	3473	
24 F - 24 A	15,7	41,3	3801	
25 F - 25 A	15,7	42,4	3703	
26 F - 26 A	15,7	42,1	3729	
27 F - 27 A	15,7	39,8	3945	
28 F - 28 A	15,7	44,2	3552	
29 F - 29 A	15,7	43,7	3593	
30 F - 30 A	15,7	39,4	3985	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 F - 1 P	15,5	40,0	3875	
32 F - 2 P	15,5	41,9	3699	
33 F - 3 P	15,5	41,4	3744	
34 F - 4 P	15,5	39,1	3964	
35 F - 5 P	15,5	42,1	3682	
36 F - 6 P	15,5	42,0	3690	
37 F - 7 P	15,5	39,3	3944	
38 F - 8 P	15,5	44,0	3523	
39 F - 9 P	15,5	39,2	3954	
40 F - 10 P	15,4	41,7	3693	
41 F - 11 P	15,4	41,1	3747	
42 F - 12 P	15,4	38,8	3969	
43 F - 13 P	15,3	41,5	3687	
44 F - 14 P	15,3	41,0	3732	
45 F - 15 P	15,3	40,0	3825	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Superior - Inferior
Viga:	Vacios Esféricos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 S - 31 I	15,6	40,6	3842	
2 S - 32 I	15,6	42,2	3697	
3 S - 33 I	15,7	42,2	3720	
4 S - 34 I	15,7	40,5	3877	
5 S - 35 I	15,6	42,2	3697	
6 S - 36 I	15,7	42,7	3677	
7 S - 37 I	15,7	40,1	3915	
8 S - 38 I	15,7	43,1	3643	
9 S - 39 I	15,7	40,5	3877	
10 S - 40 I	15,7	42,3	3712	
11 S - 41 I	15,7	42,2	3720	
12 S - 42 I	15,7	40,8	3848	
13 S - 43 I	15,6	41,4	3768	
14 S - 44 I	15,7	41,7	3765	
15 S - 45 I	15,6	39,9	3910	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 I	15,6	40,7	3833	
17 S - 17 I	15,6	42,6	3662	
18 S - 18 I	15,7	42,5	3694	
19 S - 19 I	15,7	40,7	3857	
20 S - 20 I	15,6	43,3	3603	
21 S - 21 I	15,7	43,0	3651	
22 S - 22 I	15,7	40,3	3896	
23 S - 23 I	15,7	44,5	3528	
24 S - 24 I	15,7	41,0	3829	
25 S - 25 I	15,7	42,1	3729	
26 S - 26 I	15,7	42,8	3668	
27 S - 27 I	15,7	41,0	3829	
28 S - 28 I	15,6	43,7	3570	
29 S - 29 I	15,7	44,4	3536	
30 S - 30 I	15,6	40,3	3871	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 S - 1 I	15,6	40,6	3842	
32 S - 2 I	15,6	43,2	3611	
33 S - 3 I	15,7	42,8	3668	
34 S - 4 I	15,7	41,0	3829	
35 S - 5 I	15,6	42,9	3636	
36 S - 6 I	15,7	42,7	3677	
37 S - 7 I	15,7	40,7	3857	
38 S - 8 I	15,7	45,4	3458	
39 S - 9 I	15,7	40,8	3848	
40 S - 10 I	15,7	42,9	3660	
41 S - 11 I	15,7	43,9	3576	
42 S - 12 I	15,7	40,6	3867	
43 S - 13 I	15,6	45,1	3459	
44 S - 14 I	15,7	44,8	3504	
45 S - 15 I	15,6	40,8	3824	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Superior - Posterior
Viga:	Vacios Esféricos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 S - 1 P	18,5	48,3	3830	
32 S - 2 P	18,5	49,5	3737	
33 S - 3 P	18,6	50,5	3683	
34 S - 4 P	18,6	48,5	3835	
35 S - 5 P	18,5	53,9	3432	
36 S - 6 P	18,6	49,9	3727	
37 S - 7 P	18,6	48,3	3851	
38 S - 8 P	18,7	54,7	3419	
39 S - 9 P	18,7	47,7	3920	
40 S - 10 P	18,7	51,7	3617	
41 S - 11 P	18,7	49,6	3770	
42 S - 12 P	18,7	47,8	3912	
43 S - 13 P	18,6	50,6	3676	
44 S - 14 P	18,7	52,4	3569	
45 S - 15 P	18,6	47,6	3908	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 P	11,0	28,6	3846	
17 S - 17 P	11,0	29,6	3716	
18 S - 18 P	11,1	30,6	3627	
19 S - 19 P	11,1	29,0	3828	
20 S - 20 P	11,0	30,5	3607	
21 S - 21 P	11,1	30,4	3651	
22 S - 22 P	11,1	28,1	3950	
23 S - 23 P	11,1	32,2	3447	
24 S - 24 P	11,1	28,6	3881	
25 S - 25 P	11,1	29,8	3725	
26 S - 26 P	11,1	30,2	3675	
27 S - 27 P	11,1	28,6	3881	
28 S - 28 P	11,1	31,8	3491	
29 S - 29 P	11,1	30,8	3604	
30 S - 30 P	11,1	28,0	3964	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Superior - Frontal
Viga:	Vacios Esféricos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 S - 31 F	18,5	48,2	3838	
2 S - 32 F	18,5	50,3	3678	
3 S - 33 F	18,6	50,0	3720	
4 S - 34 F	18,6	48,6	3827	
5 S - 35 F	18,5	51,3	3606	
6 S - 36 F	18,6	50,2	3705	
7 S - 37 F	18,6	47,7	3899	
8 S - 38 F	18,7	51,1	3659	
9 S - 39 F	18,7	47,8	3912	
10 S - 40 F	18,7	50,2	3725	
11 S - 41 F	18,7	50,7	3688	
12 S - 42 F	18,7	48,5	3856	
13 S - 43 F	18,6	50,1	3713	
14 S - 44 F	18,7	50,4	3710	
15 S - 45 F	18,6	48,6	3827	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 F	11,0	28,5	3860	
17 S - 17 F	11,0	29,2	3767	
18 S - 18 F	11,1	29,7	3737	
19 S - 19 F	11,1	28,4	3908	
20 S - 20 F	11,0	32,8	3354	
21 S - 21 F	11,1	32,6	3405	
22 S - 22 F	11,1	28,7	3868	
23 S - 23 F	11,1	31,5	3524	
24 S - 24 F	11,1	28,6	3881	
25 S - 25 F	11,1	30,9	3592	
26 S - 26 F	11,1	32,1	3458	
27 S - 27 F	11,1	28,9	3841	
28 S - 28 F	11,1	30,3	3663	
29 S - 29 F	11,1	30,9	3592	
30 S - 30 F	11,1	28,6	3881	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Inferior - Posterior
Viga:	Vacios Esféricos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 I - 31 P	18,5	46,7	3961	
2 I - 32 P	18,5	54,3	3407	
3 I - 33 P	18,6	50,1	3713	
4 I - 34 P	18,6	47,5	3916	
5 I - 35 P	18,5	50,4	3671	
6 I - 36 P	18,6	51,1	3640	
7 I - 37 P	18,6	46,9	3966	
8 I - 38 P	18,7	53,1	3522	
9 I - 39 P	18,7	47,9	3904	
10 I - 40 P	18,7	51,1	3659	
11 I - 41 P	18,7	50,7	3688	
12 I - 42 P	18,7	46,9	3987	
13 I - 43 P	18,6	52,0	3577	
14 I - 44 P	18,7	52,3	3576	
15 I - 45 P	18,6	47,5	3916	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 I - 16 P	11,0	28,7	3833	
17 I - 17 P	11,0	31,1	3537	
18 I - 18 P	11,1	31,0	3581	
19 I - 19 P	11,1	28,9	3841	
20 I - 20 P	11,0	30,3	3630	
21 I - 21 P	11,1	30,6	3627	
22 I - 22 P	11,1	28,8	3854	
23 I - 23 P	11,1	30,8	3604	
24 I - 24 P	11,1	28,5	3895	
25 I - 25 P	11,1	30,9	3592	
26 I - 26 P	11,1	31,0	3581	
27 I - 27 P	11,1	28,4	3908	
28 I - 28 P	11,1	30,4	3651	
29 I - 29 P	11,1	30,1	3688	
30 I - 30 P	11,1	28,5	3895	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Dirección:	Inferior - Frontal
Viga:	Vacios Esféricos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 - 1 F	18,5	47,5	3895	
32 - 2 F	18,5	51,0	3627	
33 - 3 F	18,6	51,5	3612	
34 - 4 F	18,6	47,2	3941	
35 - 5 F	18,5	50,6	3656	
36 - 6 F	18,6	51,2	3633	
37 - 7 F	18,6	47,2	3941	
38 - 8 F	18,7	51,9	3603	
39 - 9 F	18,7	47,2	3962	
40 - 10 F	18,7	51,5	3631	
41 - 11 F	18,7	52,2	3582	
42 - 12 F	18,7	47,7	3920	
43 - 13 F	18,6	50,9	3654	
44 - 14 F	18,7	51,5	3631	
45 - 15 F	18,6	47,6	3908	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 - 16 F	11,0	28,5	3860	
17 - 17 F	11,0	30,2	3642	
18 - 18 F	11,1	30,6	3627	
19 - 19 F	11,1	28,4	3908	
20 - 20 F	11,0	30,6	3595	
21 - 21 F	11,1	30,7	3616	
22 - 22 F	11,1	28,7	3868	
23 - 23 F	11,1	33,7	3294	
24 - 24 F	11,1	28,9	3841	
25 - 25 F	11,1	31,7	3502	
26 - 26 F	11,1	31,4	3535	
27 - 27 F	11,1	28,2	3936	
28 - 28 F	11,1	30,5	3639	
29 - 29 F	11,1	30,6	3627	
30 - 30 F	11,1	28,8	3854	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Frontal - Posterior
Viga:	Vacíos Planos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 F - 31 P	15,9	40,8	3897	
2 F - 32 P	15,9	40,5	3926	
3 F - 33 P	15,9	40,3	3945	
4 F - 34 P	15,8	40,3	3921	
5 F - 35 P	15,8	40,5	3901	
6 F - 36 P	15,8	40,0	3950	
7 F - 37 P	15,8	40,5	3901	
8 F - 38 P	15,8	40,3	3921	
9 F - 39 P	15,8	40,4	3911	
10 F - 40 P	15,8	40,7	3882	
11 F - 41 P	15,8	40,7	3882	
12 F - 42 P	15,8	40,9	3863	
13 F - 43 P	15,8	41,1	3844	
14 F - 44 P	15,8	41,1	3844	
15 F - 45 P	15,8	41,3	3826	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 F - 16 A	15,9	40,6	3916	
17 F - 17 A	15,9	41,4	3841	
18 F - 18 A	15,9	43,0	3698	
19 F - 19 A	15,8	42,7	3700	
20 F - 20 A	15,8	43,2	3657	
21 F - 21 A	15,8	40,2	3930	
22 F - 22 A	15,8	42,6	3709	
23 F - 23 A	15,8	42,9	3683	
24 F - 24 A	15,8	43,2	3657	
25 F - 25 A	15,8	40,2	3930	
26 F - 26 A	15,8	42,9	3683	
27 F - 27 A	15,8	42,7	3700	
28 F - 28 A	15,8	42,8	3692	
29 F - 29 A	15,8	41,0	3854	
30 F - 30 A	15,8	40,3	3921	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Frontal - Posterior
Viga:	Vacíos Planos

N de Ensayo	Distancia (m)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 F - 1 P	15,9	41,6	3822	
32 F - 2 P	15,9	41,3	3850	
33 F - 3 P	15,9	40,9	3888	
34 F - 4 P	15,8	39,8	3970	
35 F - 5 P	15,8	39,5	4000	
36 F - 6 P	15,8	40,4	3911	
37 F - 7 P	15,8	39,7	3980	
38 F - 8 P	15,9	39,9	3985	
39 F - 9 P	15,9	41,6	3822	
40 F - 10 P	15,8	41,3	3826	
41 F - 11 P	15,9	40,4	3936	
42 F - 12 P	15,8	39,9	3960	
43 F - 13 P	15,8	40,1	3940	
44 F - 14 P	15,9	40,5	3926	
45 F - 15 P	15,9	40,4	3936	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Superior - Inferior
Viga:	Vacíos Planos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 S - 31 I	16,6	42,9	3869	
2 S - 32 I	16,5	43,2	3819	
3 S - 33 I	16,4	42,3	3877	
4 S - 34 I	16,4	41,2	3981	
5 S - 35 I	16,2	42,1	3848	
6 S - 36 I	16,2	41,9	3866	
7 S - 37 I	16,3	42,1	3872	
8 S - 38 I	16,4	42,8	3832	
9 S - 39 I	16,4	42,6	3850	
10 S - 40 I	16,4	42,8	3832	
11 S - 41 I	16,5	43,0	3837	
12 S - 42 I	16,5	43,2	3819	
13 S - 43 I	16,6	43,2	3843	
14 S - 44 I	16,6	43,5	3816	
15 S - 45 I	16,6	43,1	3852	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 I	16,6	43,0	3860	
17 S - 17 I	16,5	42,8	3855	
18 S - 18 I	16,4	44,3	3702	
19 S - 19 I	16,4	44,2	3710	
20 S - 20 I	16,2	43,5	3724	
21 S - 21 I	16,2	41,6	3894	
22 S - 22 I	16,3	45,1	3614	
23 S - 23 I	16,4	45,0	3644	
24 S - 24 I	16,4	45,3	3620	
25 S - 25 I	16,4	42,8	3832	
26 S - 26 I	16,5	47,2	3496	
27 S - 27 I	16,5	47,7	3459	
28 S - 28 I	16,6	47,7	3480	
29 S - 29 I	16,6	43,2	3843	
30 S - 30 I	16,6	42,9	3869	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Superior - Inferior
Viga:	Vacíos Planos

N de Ensayo	Distancia (m)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 S - 1 I	16,5	42,6	3873	
32 S - 2 I	16,5	42,2	3910	
33 S - 3 I	16,4	42,5	3859	
34 S - 4 I	16,3	42,6	3826	
35 S - 5 I	16,2	41,8	3876	
36 S - 6 I	16,2	41,1	3942	
37 S - 7 I	16,3	41,6	3918	
38 S - 8 I	16,3	41,4	3937	
39 S - 9 I	16,4	41,7	3933	
40 S - 10 I	16,4	42,2	3886	
41 S - 11 I	16,4	42,6	3850	
42 S - 12 I	16,5	42,2	3910	
43 S - 13 I	16,6	42,5	3906	
44 S - 14 I	16,5	42,8	3855	
45 S - 15 I	16,6	42,6	3897	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Superior - Posterior
Viga:	Vacíos Planos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 S - 1 P	19,5	49,4	3947	
32 S - 2 P	19,4	48,8	3975	
33 S - 3 P	19,3	51,8	3726	
34 S - 4 P	19,2	51,8	3707	
35 S - 5 P	19,1	51,5	3709	
36 S - 6 P	19,1	49,2	3882	
37 S - 7 P	19,2	52,9	3629	
38 S - 8 P	19,2	52,1	3685	
39 S - 9 P	19,2	52,9	3629	
40 S - 10 P	19,2	49,5	3879	
41 S - 11 P	19,3	52,9	3648	
42 S - 12 P	19,3	52,8	3655	
43 S - 13 P	19,4	52,8	3674	
44 S - 14 P	19,4	50,3	3857	
45 S - 15 P	19,4	49,9	3888	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 P	11,5	29,7	3872	
17 S - 17 P	11,5	29,3	3925	
18 S - 18 P	11,4	28,7	3972	
19 S - 19 P	11,4	28,6	3986	
20 S - 20 P	11,3	29,1	3883	
21 S - 21 P	11,3	29,2	3870	
22 S - 22 P	11,4	29,2	3904	
23 S - 23 P	11,4	29,5	3864	
24 S - 24 P	11,4	29,3	3891	
25 S - 25 P	11,4	29,5	3864	
26 S - 26 P	11,4	29,7	3838	
27 S - 27 P	11,4	29,5	3864	
28 S - 28 P	11,5	29,8	3859	
29 S - 29 P	11,5	29,9	3846	
30 S - 30 P	11,5	29,7	3872	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Dirección:	Superior - Frontal
Viga:	Vacíos Planos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 S - 31 F	19,5	48,9	3988	
2 S - 32 F	19,4	48,6	3992	
3 S - 33 F	19,3	53,0	3642	
4 S - 34 F	19,2	53,2	3609	
5 S - 35 F	19,1	52,5	3638	
6 S - 36 F	19,1	48,4	3946	
7 S - 37 F	19,2	52,7	3643	
8 S - 38 F	19,2	52,9	3629	
9 S - 39 F	19,2	52,4	3664	
10 S - 40 F	19,2	49,1	3910	
11 S - 41 F	19,3	53,4	3614	
12 S - 42 F	19,3	53,7	3594	
13 S - 43 F	19,4	53,0	3660	
14 S - 44 F	19,4	50,6	3834	
15 S - 45 F	19,4	50,3	3857	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 F	11,5	29,5	3898	
17 S - 17 F	11,5	29,9	3846	
18 S - 18 F	11,4	29,4	3878	
19 S - 19 F	11,4	29,6	3851	
20 S - 20 F	11,3	28,6	3951	
21 S - 21 F	11,3	29,5	3831	
22 S - 22 F	11,4	29,7	3838	
23 S - 23 F	11,4	29,5	3864	
24 S - 24 F	11,4	29,3	3891	
25 S - 25 F	11,4	29,5	3864	
26 S - 26 F	11,4	29,3	3891	
27 S - 27 F	11,4	28,9	3945	
28 S - 28 F	11,5	29,5	3898	
29 S - 29 F	11,5	29,9	3846	
30 S - 30 F	11,5	29,5	3898	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Inferior - Posterior
Viga:	Vacíos Planos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 I - 31 P	19,5	48,8	3996	
2 I - 32 P	19,4	49,1	3951	
3 I - 33 P	19,3	52,4	3683	
4 I - 34 P	19,2	52,2	3678	
5 I - 35 P	19,1	52,4	3645	
6 I - 36 P	19,1	49,3	3874	
7 I - 37 P	19,2	52,3	3671	
8 I - 38 P	19,2	52,5	3657	
9 I - 39 P	19,2	52,2	3678	
10 I - 40 P	19,2	49,7	3863	
11 I - 41 P	19,3	52,4	3683	
12 I - 42 P	19,3	52,8	3655	
13 I - 43 P	19,4	52,9	3667	
14 I - 44 P	19,4	49,6	3911	
15 I - 45 P	19,4	49,1	3951	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 I - 16 P	11,5	29,0	3966	
17 I - 17 P	11,5	29,4	3912	
18 I - 18 P	11,4	28,9	3945	
19 I - 19 P	11,4	29,6	3851	
20 I - 20 P	11,3	29,4	3844	
21 I - 21 P	11,3	28,8	3924	
22 I - 22 P	11,4	29,2	3904	
23 I - 23 P	11,4	29,0	3931	
24 I - 24 P	11,4	29,5	3864	
25 I - 25 P	11,4	29,2	3904	
26 I - 26 P	11,4	29,3	3891	
27 I - 27 P	11,4	29,2	3904	
28 I - 28 P	11,5	29,6	3885	
29 I - 29 P	11,5	29,9	3846	
30 I - 30 P	11,5	29,8	3859	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Inferior - Frontal
Viga:	Vacíos Planos

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 - 1 F	19,5	49,2	3963	
32 - 2 F	19,4	48,9	3967	
33 - 3 F	19,3	52,2	3697	
34 - 4 F	19,2	52,1	3685	
35 - 5 F	19,1	52,7	3624	
36 - 6 F	19,1	49,0	3898	
37 - 7 F	19,2	52,4	3664	
38 - 8 F	19,2	52,3	3671	
39 - 9 F	19,2	52,0	3692	
40 - 10 F	19,2	49,3	3895	
41 - 11 F	19,3	52,5	3676	
42 - 12 F	19,3	52,8	3655	
43 - 13 F	19,4	52,9	3667	
44 - 14 F	19,4	49,1	3951	
45 - 15 F	19,4	49,2	3943	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 - 16 F	11,5	29,6	3885	
17 - 17 F	11,5	29,2	3938	
18 - 18 F	11,4	29,3	3891	
19 - 19 F	11,4	29,8	3826	
20 - 20 F	11,3	29,2	3870	
21 - 21 F	11,3	29,5	3831	
22 - 22 F	11,4	29,7	3838	
23 - 23 F	11,4	29,2	3904	
24 - 24 F	11,4	29,3	3891	
25 - 25 F	11,4	28,5	4000	
26 - 26 F	11,4	28,9	3945	
27 - 27 F	11,4	29,7	3838	
28 - 28 F	11,5	29,4	3912	
29 - 29 F	11,5	29,2	3938	
30 - 30 F	11,5	28,9	3979	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Frontal - Posterior
Viga:	Vacíos tubular continuo

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 F - 31 P	15,5	40,7	3808	
2 F - 32 P	15,5	40,7	3808	
3 F - 33 P	15,5	40,2	3856	
4 F - 34 P	15,4	40,4	3812	
5 F - 35 P	15,4	40,1	3840	
6 F - 36 P	15,4	40,3	3821	
7 F - 37 P	15,5	40,1	3865	
8 F - 38 P	15,5	39,7	3904	
9 F - 39 P	15,5	40,0	3875	
10 F - 40 P	15,5	40,0	3875	
11 F - 41 P	15,5	40,3	3846	
12 F - 42 P	15,5	40,4	3837	
13 F - 43 P	15,5	39,9	3885	
14 F - 44 P	15,5	39,4	3934	
15 F - 45 P	15,5	39,3	3944	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 F - 16 A	15,5	44,5	3483	
17 F - 17 A	15,5	44,2	3507	
18 F - 18 A	15,5	43,5	3563	
19 F - 19 A	15,4	42,8	3598	
20 F - 20 A	15,4	42,9	3590	
21 F - 21 A	15,4	42,6	3615	
22 F - 22 A	15,5	42,8	3621	
23 F - 23 A	15,5	43,3	3580	
24 F - 24 A	15,5	43,6	3555	
25 F - 25 A	15,5	43,4	3571	
26 F - 26 A	15,5	44,6	3475	
27 F - 27 A	15,5	44,8	3460	
28 F - 28 A	15,5	43,3	3580	
29 F - 29 A	15,5	43,4	3571	
30 F - 30 A	15,5	43,9	3531	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 F - 1 P	15,5	40,3	3846	
32 F - 2 P	15,5	40,5	3827	
33 F - 3 P	15,5	39,7	3904	
34 F - 4 P	15,5	39,5	3924	
35 F - 5 P	15,5	40,6	3818	
36 F - 6 P	15,4	38,8	3969	
37 F - 7 P	15,5	39,5	3924	
38 F - 8 P	15,5	39,3	3944	
39 F - 9 P	15,5	39,4	3934	
40 F - 10 P	15,4	40,2	3831	
41 F - 11 P	15,5	39,3	3944	
42 F - 12 P	15,4	39,7	3879	
43 F - 13 P	15,4	39,6	3889	
44 F - 14 P	15,4	38,5	4000	
45 F - 15 P	15,4	40,1	3840	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Superior - Inferior
Viga:	Vacíos tubular continuo

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 S - 31 I	16,5	43,1	3828	
2 S - 32 I	16,5	42,9	3846	
3 S - 33 I	16,3	42,5	3835	
4 S - 34 I	16,2	42,2	3839	
5 S - 35 I	16,2	42,4	3821	
6 S - 36 I	16,1	42,1	3824	
7 S - 37 I	16,1	41,5	3880	
8 S - 38 I	16,1	41,3	3898	
9 S - 39 I	16,1	41,1	3917	
10 S - 40 I	16,2	41,7	3885	
11 S - 41 I	16,2	41,6	3894	
12 S - 42 I	16,3	42,6	3826	
13 S - 43 I	16,4	42,6	3850	
14 S - 44 I	16,5	42,8	3855	
15 S - 45 I	16,5	43,0	3837	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 I	16,5	46,3	3564	
17 S - 17 I	16,5	45,5	3626	
18 S - 18 I	16,3	44,7	3647	
19 S - 19 I	16,2	44,6	3632	
20 S - 20 I	16,2	44,8	3616	
21 S - 21 I	16,1	45,2	3562	
22 S - 22 I	16,1	44,8	3594	
23 S - 23 I	16,1	44,9	3586	
24 S - 24 I	16,1	46,2	3485	
25 S - 25 I	16,2	45,2	3584	
26 S - 26 I	16,2	44,3	3657	
27 S - 27 I	16,3	45,6	3575	
28 S - 28 I	16,4	48,4	3388	
29 S - 29 I	16,5	45,9	3595	
30 S - 30 I	16,5	49,7	3320	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 S - 1 I	16,5	42,9	3846	
32 S - 2 I	16,4	42,8	3832	
33 S - 3 I	16,3	42,4	3844	
34 S - 4 I	16,2	42,1	3848	
35 S - 5 I	16,2	42,4	3821	
36 S - 6 I	16,2	42,3	3830	
37 S - 7 I	16,2	40,8	3971	
38 S - 8 I	16,2	40,9	3961	
39 S - 9 I	16,2	41,9	3866	
40 S - 10 I	16,3	42,5	3835	
41 S - 11 I	16,3	42,3	3853	
42 S - 12 I	16,3	41,8	3900	
43 S - 13 I	16,3	41,7	3909	
44 S - 14 I	16,4	42,2	3886	
45 S - 15 I	16,4	41,9	3914	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Superior - Posterior
Viga:	Vacíos tubular continuo

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 S - 1 P	19,1	53,8	3550	
32 S - 2 P	19,1	52,6	3631	
33 S - 3 P	19,0	53,1	3578	
34 S - 4 P	18,8	52,9	3554	
35 S - 5 P	18,8	54,7	3437	
36 S - 6 P	18,7	52,2	3582	
37 S - 7 P	18,8	52,3	3595	
38 S - 8 P	18,8	51,9	3622	
39 S - 9 P	18,8	51,2	3672	
40 S - 10 P	18,9	53,6	3526	
41 S - 11 P	18,9	53,3	3546	
42 S - 12 P	19,0	52,8	3598	
43 S - 13 P	19,0	53,0	3585	
44 S - 14 P	19,1	52,5	3638	
45 S - 15 P	19,1	53,5	3570	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 P	11,3	29,5	3831	
17 S - 17 P	11,3	29,0	3897	
18 S - 18 P	11,2	29,5	3797	
19 S - 19 P	11,2	29,1	3849	
20 S - 20 P	11,2	29,2	3836	
21 S - 21 P	11,1	29,0	3828	
22 S - 22 P	11,2	28,6	3916	
23 S - 23 P	11,2	28,8	3889	
24 S - 24 P	11,2	28,6	3916	
25 S - 25 P	11,2	28,4	3944	
26 S - 26 P	11,2	29,0	3862	
27 S - 27 P	11,2	29,1	3849	
28 S - 28 P	11,3	29,3	3857	
29 S - 29 P	11,3	28,5	3965	
30 S - 30 P	11,3	29,0	3897	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Superior - Frontal
Viga:	Vacíos tubular continuo

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 S - 31 F	19,1	52,1	3666	
2 S - 32 F	19,1	53,6	3563	
3 S - 33 F	19,0	53,2	3571	
4 S - 34 F	18,8	53,0	3547	
5 S - 35 F	18,8	52,8	3561	
6 S - 36 F	18,7	52,7	3548	
7 S - 37 F	18,8	52,8	3561	
8 S - 38 F	18,8	52,4	3588	
9 S - 39 F	18,8	52,9	3554	
10 S - 40 F	18,9	53,6	3526	
11 S - 41 F	18,9	54,4	3474	
12 S - 42 F	19,0	53,1	3578	
13 S - 43 F	19,0	53,5	3551	
14 S - 44 F	19,1	55,2	3460	
15 S - 45 F	19,1	54,5	3505	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 F	11,3	28,8	3924	
17 S - 17 F	11,3	28,5	3965	
18 S - 18 F	11,2	28,4	3944	
19 S - 19 F	11,2	28,8	3889	
20 S - 20 F	11,2	28,2	3972	
21 S - 21 F	11,1	28,2	3936	
22 S - 22 F	11,2	28,5	3930	
23 S - 23 F	11,2	28,3	3958	
24 S - 24 F	11,2	28,9	3875	
25 S - 25 F	11,2	28,3	3958	
26 S - 26 F	11,2	28,4	3944	
27 S - 27 F	11,2	28,8	3889	
28 S - 28 F	11,3	28,5	3965	
29 S - 29 F	11,3	28,9	3910	
30 S - 30 F	11,3	29,5	3831	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Inferior - Posterior
Viga:	Vacíos tubular continuo

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 I - 31 P	19,1	53,1	3597	
2 I - 32 P	19,1	53,6	3563	
3 I - 33 P	19,0	53,2	3571	
4 I - 34 P	18,8	52,7	3567	
5 I - 35 P	18,8	53,0	3547	
6 I - 36 P	18,7	52,8	3542	
7 I - 37 P	18,8	52,4	3588	
8 I - 38 P	18,8	52,8	3561	
9 I - 39 P	18,8	52,9	3554	
10 I - 40 P	18,9	51,5	3670	
11 I - 41 P	18,9	52,5	3600	
12 I - 42 P	19,0	53,2	3571	
13 I - 43 P	19,0	52,5	3619	
14 I - 44 P	19,1	54,3	3517	
15 I - 45 P	19,1	53,4	3577	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 I - 16 P	11,3	28,8	3924	
17 I - 17 P	11,3	29,2	3870	
18 I - 18 P	11,2	29,1	3849	
19 I - 19 P	11,2	29,3	3823	
20 I - 20 P	11,2	28,8	3889	
21 I - 21 P	11,1	28,6	3881	
22 I - 22 P	11,2	29,1	3849	
23 I - 23 P	11,2	28,7	3902	
24 I - 24 P	11,2	28,6	3916	
25 I - 25 P	11,2	29,1	3849	
26 I - 26 P	11,2	28,8	3889	
27 I - 27 P	11,2	28,6	3916	
28 I - 28 P	11,3	28,8	3924	
29 I - 29 P	11,3	29,2	3870	
30 I - 30 P	11,3	29,3	3857	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Dirección:	Inferior - Frontal
Viga:	Vacíos tubular continuo

N de Ensayo	Distancia (m)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 - 1 F	19,1	53,4	3577	
32 - 2 F	19,1	52,7	3624	
33 - 3 F	19,0	52,2	3640	
34 - 4 F	18,8	52,9	3554	
35 - 5 F	18,8	52,8	3561	
36 - 6 F	18,7	52,5	3562	
37 - 7 F	18,8	53,1	3540	
38 - 8 F	18,8	52,6	3574	
39 - 9 F	18,8	52,8	3561	
40 - 10 F	18,9	53,2	3553	
41 - 11 F	18,9	52,6	3593	
42 - 12 F	19,0	52,9	3592	
43 - 13 F	19,0	53,1	3578	
44 - 14 F	19,1	53,5	3570	
45 - 15 F	19,1	52,8	3617	

N de Ensayo	Distancia (m)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 - 16 F	11,3	28,7	3937	
17 - 17 F	11,3	28,7	3937	
18 - 18 F	11,2	28,4	3944	
19 - 19 F	11,2	29,1	3849	
20 - 20 F	11,2	29,0	3862	
21 - 21 F	11,1	29,0	3828	
22 - 22 F	11,2	28,7	3902	
23 - 23 F	11,2	29,3	3823	
24 - 24 F	11,2	29,0	3862	
25 - 25 F	11,2	28,8	3889	
26 - 26 F	11,2	29,1	3849	
27 - 27 F	11,2	28,7	3902	
28 - 28 F	11,3	28,8	3924	
29 - 29 F	11,3	29,0	3897	
30 - 30 F	11,3	29,1	3883	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Frontal - Posterior
Viga:	Junta Central

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 F - 31 P	15,6	39,5	3949	
2 F - 32 P	15,6	39,6	3939	
3 F - 33 P	15,6	40,0	3900	
4 F - 34 P	15,6	39,7	3929	
5 F - 35 P	15,6	40,1	3890	
6 F - 36 P	15,6	39,6	3939	
7 F - 37 P	15,5	39,7	3904	
8 F - 38 P	15,5	39,1	3964	
9 F - 39 P	15,6	39,7	3929	
10 F - 40 P	15,5	39,1	3964	
11 F - 41 P	15,5	39,3	3944	
12 F - 42 P	15,5	39,7	3904	
13 F - 43 P	15,5	39,0	3974	
14 F - 44 P	15,5	39,7	3904	
15 F - 45 P	15,5	39,3	3944	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 F - 1 P	15,5	39,8	3894	
32 F - 2 P	15,5	39,7	3904	
33 F - 3 P	15,4	39,5	3899	
34 F - 4 P	15,4	38,9	3959	
35 F - 5 P	15,5	39,1	3964	
36 F - 6 P	15,4	39,2	3929	
37 F - 7 P	15,5	38,5	4026	
38 F - 8 P	15,4	38,7	3979	
39 F - 9 P	15,4	39,2	3929	
40 F - 10 P	15,5	39,4	3934	
41 F - 11 P	15,5	39,7	3904	
42 F - 12 P	15,4	39,3	3919	
43 F - 13 P	15,4	38,7	3979	
44 F - 14 P	15,5	39,6	3914	
45 F - 15 P	15,5	39,4	3934	

Tipo de ensayo:	Directo
Direccion:	Superior - Inferior
Viga:	Junta Central

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 S - 31 I	16,5	44,5	3708	
2 S - 32 I	16,4	45,1	3636	
3 S - 33 I	16,3	44,5	3663	
4 S - 34 I	16,3	44,0	3705	
5 S - 35 I	16,3	46,1	3536	
6 S - 36 I	16,2	45,0	3600	
7 S - 37 I	16,2	44,1	3673	
8 S - 38 I	16,3	45,2	3606	
9 S - 39 I	16,2	46,3	3499	
10 S - 40 I	16,3	45,0	3622	
11 S - 41 I	16,3	44,5	3663	
12 S - 42 I	16,2	45,5	3560	
13 S - 43 I	16,3	44,1	3696	
14 S - 44 I	16,3	46,1	3536	
15 S - 45 I	16,4	45,1	3636	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 I	16,5	45,6	3618	
17 S - 17 I	16,4	45,5	3604	
18 S - 18 I	16,3	45,6	3575	
19 S - 19 I	16,3	45,6	3575	
20 S - 20 I	16,3	45,1	3614	
21 S - 21 I	16,2	45,8	3537	
22 S - 22 I	16,2	45,4	3568	
23 S - 23 I	16,3	45,3	3598	
24 S - 24 I	16,2	45,5	3560	
25 S - 25 I	16,3	44,7	3647	
26 S - 26 I	16,3	45,4	3590	
27 S - 27 I	16,2	45,7	3545	
28 S - 28 I	16,3	45,4	3590	
29 S - 29 I	16,3	45,1	3614	
30 S - 30 I	16,4	45,4	3612	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 S - 1 I	16,5	46,5	3548	
32 S - 2 I	16,5	45,5	3626	
33 S - 3 I	16,4	46,1	3557	
34 S - 4 I	16,3	45,0	3622	
35 S - 5 I	16,3	46,3	3521	
36 S - 6 I	16,3	45,3	3598	
37 S - 7 I	16,3	45,6	3575	
38 S - 8 I	16,3	45,1	3614	
39 S - 9 I	16,4	45,7	3589	
40 S - 10 I	16,3	47,3	3446	
41 S - 11 I	16,3	45,8	3559	
42 S - 12 I	16,3	45,0	3622	
43 S - 13 I	16,3	45,8	3559	
44 S - 14 I	16,3	46,4	3513	
45 S - 15 I	16,4	45,1	3636	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Superior - Posterior
Viga:	Junta Central

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 S - 1 P	19,2	53,2	3609	
32 S - 2 P	19,1	53,3	3583	
33 S - 3 P	19,0	53,0	3585	
34 S - 4 P	19,0	52,5	3619	
35 S - 5 P	19,0	52,6	3612	
36 S - 6 P	19,0	52,2	3640	
37 S - 7 P	18,9	52,1	3628	
38 S - 8 P	19,0	53,3	3565	
39 S - 9 P	19,0	51,6	3682	
40 S - 10 P	19,0	52,0	3654	
41 S - 11 P	19,0	52,2	3640	
42 S - 12 P	18,9	52,3	3614	
43 S - 13 P	19,0	51,8	3668	
44 S - 14 P	19,0	51,6	3682	
45 S - 15 P	19,0	51,7	3675	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 P	11,4	32,9	3465	
17 S - 17 P	11,3	32,5	3477	
18 S - 18 P	11,3	32,8	3445	
19 S - 19 P	11,3	32,6	3466	
20 S - 20 P	11,3	32,6	3466	
21 S - 21 P	11,2	32,3	3467	
22 S - 22 P	11,2	32,9	3404	
23 S - 23 P	11,2	31,5	3556	
24 S - 24 P	11,2	32,0	3500	
25 S - 25 P	11,2	30,9	3625	
26 S - 26 P	11,2	30,9	3625	
27 S - 27 P	11,2	32,6	3436	
28 S - 28 P	11,2	31,2	3590	
29 S - 29 P	11,2	32,8	3415	
30 S - 30 P	11,3	31,7	3565	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Superior - Frontal
Viga:	Junta Central

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 S - 31 F	19,2	53,4	3596	
2 S - 32 F	19,1	51,8	3687	
3 S - 33 F	19,0	51,9	3661	
4 S - 34 F	19,0	51,8	3668	
5 S - 35 F	19,0	51,5	3689	
6 S - 36 F	19,0	51,5	3689	
7 S - 37 F	18,9	51,8	3649	
8 S - 38 F	19,0	51,5	3689	
9 S - 39 F	19,0	51,3	3704	
10 S - 40 F	19,0	51,9	3661	
11 S - 41 F	19,0	51,7	3675	
12 S - 42 F	18,9	51,8	3649	
13 S - 43 F	19,0	52,5	3619	
14 S - 44 F	19,0	52,1	3647	
15 S - 45 F	19,0	51,7	3675	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 S - 16 F	11,4	31,1	3666	
17 S - 17 F	11,3	31,0	3645	
18 S - 18 F	11,3	31,5	3587	
19 S - 19 F	11,3	31,7	3565	
20 S - 20 F	11,3	31,0	3645	
21 S - 21 F	11,2	31,7	3533	
22 S - 22 F	11,2	31,5	3556	
23 S - 23 F	11,2	31,9	3511	
24 S - 24 F	11,2	31,1	3601	
25 S - 25 F	11,2	31,3	3578	
26 S - 26 F	11,2	31,5	3556	
27 S - 27 F	11,2	31,1	3601	
28 S - 28 F	11,2	31,9	3511	
29 S - 29 F	11,2	31,3	3578	
30 S - 30 F	11,3	31,1	3633	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Inferior - Posterior
Viga:	Junta Central

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 I - 31 P	19,2	52,4	3664	
2 I - 32 P	19,1	51,8	3687	
3 I - 33 P	19,0	52,3	3633	
4 I - 34 P	19,0	51,9	3661	
5 I - 35 P	19,0	51,9	3661	
6 I - 36 P	19,0	51,4	3696	
7 I - 37 P	18,9	51,5	3670	
8 I - 38 P	19,0	51,2	3711	
9 I - 39 P	19,0	51,6	3682	
10 I - 40 P	19,0	51,8	3668	
11 I - 41 P	19,0	51,6	3682	
12 I - 42 P	18,9	51,7	3656	
13 I - 43 P	19,0	51,8	3668	
14 I - 44 P	19,0	51,8	3668	
15 I - 45 P	19,0	51,8	3668	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 I - 16 P	11,4	31,5	3619	
17 I - 17 P	11,3	32,0	3531	
18 I - 18 P	11,3	31,8	3553	
19 I - 19 P	11,3	31,1	3633	
20 I - 20 P	11,3	31,7	3565	
21 I - 21 P	11,2	31,6	3544	
22 I - 22 P	11,2	31,8	3522	
23 I - 23 P	11,2	32,3	3467	
24 I - 24 P	11,2	32,4	3457	
25 I - 25 P	11,2	31,5	3556	
26 I - 26 P	11,2	31,1	3601	
27 I - 27 P	11,2	31,6	3544	
28 I - 28 P	11,2	31,7	3533	
29 I - 29 P	11,2	31,9	3511	
30 I - 30 P	11,3	31,1	3633	

Tipo de ensayo:	Semidirecto
Direccion:	Inferior - Frontal
Viga:	Junta Central

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 - 1 F	19,2	52,7	3643	
32 - 2 F	19,1	52,2	3659	
33 - 3 F	19,0	51,6	3682	
34 - 4 F	19,0	51,7	3675	
35 - 5 F	19,0	53,1	3578	
36 - 6 F	19,0	52,2	3640	
37 - 7 F	18,9	52,6	3593	
38 - 8 F	19,0	52,2	3640	
39 - 9 F	19,0	52,4	3626	
40 - 10 F	19,0	53,2	3571	
41 - 11 F	19,0	52,7	3605	
42 - 12 F	18,9	53,0	3566	
43 - 13 F	19,0	52,0	3654	
44 - 14 F	19,0	51,9	3661	
45 - 15 F	19,0	52,5	3619	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 - 16 F	11,4	32,7	3486	
17 - 17 F	11,3	31,4	3599	
18 - 18 F	11,3	32,6	3466	
19 - 19 F	11,3	31,7	3565	
20 - 20 F	11,3	31,6	3576	
21 - 21 F	11,2	31,4	3567	
22 - 22 F	11,2	31,1	3601	
23 - 23 F	11,2	32,3	3467	
24 - 24 F	11,2	30,9	3625	
25 - 25 F	11,2	31,9	3511	
26 - 26 F	11,2	32,4	3457	
27 - 27 F	11,2	32,5	3446	
28 - 28 F	11,2	31,4	3567	
29 - 29 F	11,2	32,2	3478	
30 - 30 F	11,3	32,1	3520	

Tipo de ensayo:	Indirecto
Viga:	Junta Central

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1 F - 3 F	10,0	25,1	3984	
1 F - 4 F	15,0	40,1	3741	
1 F - 5 F	20,0	57,4	3484	
1 F - 6 F	25,0	65,6	3811	
1 F - 7 F	30,0	82,2	3650	
1 F - 8 F	35,0	120,7	2900	
1 F - 9 F	40,0	139,7	2863	
1 F - 10 F	45,0	157,2	2863	
1 F - 11 F	50,0	170,2	2938	
1 F - 12 F	55,0	184,7	2978	
1 F - 13 F	60,0	199,2	3012	
1 F - 14 F	65,0	219,5	2961	
1 F - 15 F	70,0	230,5	3037	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
16 F - 18 F	10,0	28,2	3546	
16 F - 19 F	15,0	39,8	3769	
16 F - 20 F	20,0	50,5	3960	
16 F - 21 F	25,0	67,4	3709	
16 F - 22 F	30,0	83,5	3593	
16 F - 23 F	35,0	92,2	3796	
16 F - 24 F	40,0	109,2	3663	
16 F - 25 F	45,0	122,5	3673	
16 F - 26 F	50,0	170,9	2926	
16 F - 27 F	55,0	186,6	2947	
16 F - 28 F	60,0	199,5	3008	
16 F - 29 F	65,0	214,9	3025	
16 F - 30 F	70,0	229,6	3049	

N de Ensayo	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)	Observaciones
31 F - 33 F	10,0	26,2	3817	
31 F - 34 F	15,0	35,8	4190	
31 F - 35 F	20,0	50,4	3968	
31 F - 36 F	25,0	67,1	3726	
31 F - 37 F	30,0	83,9	3576	
31 F - 38 F	35,0	121,2	2888	
31 F - 39 F	40,0	131,1	3051	
31 F - 40 F	45,0	146,3	3076	
31 F - 41 F	50,0	162,7	3073	
31 F - 42 F	55,0	178,2	3086	
31 F - 43 F	60,0	197,7	3035	
31 F - 44 F	65,0	212,7	3056	
31 F - 45 F	70,0	222,3	3149	