

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95.



GUSTAVO ADOLFO GONZÁLEZ MERCHÁN

JOSÉ MANUEL DE CASTRO PASSEGA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

ABRIL 2010

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95.



GUSTAVO ADOLFO GONZÁLEZ MERCHÁN
JOSÉ MANUEL DE CASTRO PASSEGA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR: ING. FEDERICO NÚÑEZ MORENO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
ABRIL 2010

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de estructuras y el laboratorio de suelos de la Pontificia Universidad Javeriana bajo la dirección del ingeniero Daniel Ruiz Valencia, por todos los recursos físicos, humanos, operativos y logísticos prestado durante la realización de las pruebas para este proyecto de grado.

A la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, en especial al ingeniero Jorge López Jaramillo por el espacio, maquinaria y personal facilitados para la realización del trabajo en campo.

A la facultad de Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana, en especial al Ingeniero Jorge Luis Sánchez Téllez, Director del Departamento de Ingeniería Electrónica y al Ing. Camilo Otálora quienes fueron de gran ayuda en el desarrollo del proyecto de investigación.

Al ingeniero Federico Núñez Moreno profesor del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana por guiarnos durante la realización y ejecución del proyecto.

Al ingeniero Luis Eduardo Clavijo quien nos colaboró con la fundida del montaje.

Al ingeniero Gustavo González Torres por sus ideas y colaboración durante todo el proceso de trabajo.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo de este trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	18
2 JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
3 OBJETIVOS.....	23
3.1 GENERAL.....	23
3.2 ESPECÍFICOS.....	23
4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	24
4.1 TEORÍAS ELÁSTICAS DE DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES A TRAVÉS DE SUELOS ...	27
4.2 NORMATIVAS DE DISEÑO DE PUENTES	30
4.3 DEFINICIÓN DE CAMIONES DE DISEÑO.....	31
4.3.1 Referentes nacionales.....	31
4.3.2 Referentes Internacionales	33
4.4 PISADA O HUELLA DEL CAMIÓN ESTÁNDAR:	35
4.4.1 Referentes nacionales:.....	35
4.4.2 Referentes internacionales:	36
4.5 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS:	36
4.5.1 Referentes nacionales.....	36
4.5.2 Referentes internacionales	37
4.6 COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS TEÓRICAS EN LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS A TRAVÉS DE SUELO.	38
5 DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE	40
6 PARTES DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	44
6.1 CELDAS DE CARGA	44
6.2 ADQUISIDOR DE DATOS TEXAS NATIONAL INSTRUMENTS	45
6.3 MÓDULO DE CONEXIÓN	46
6.4 SOFTWARE.....	46
7 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	47

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

8 DESARROLLO DE LAS ACTIVIDADES EN CAMPO Y ADQUISICIÓN DE DATOS	55
8.1 UBICACIÓN EN CAMPO	55
8.2 ORGANIGRAMA DE LABORES EN CAMPO	56
8.3 MAQUINARIA Y EQUIPOS	56
8.3.1 Prestados por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá	56
8.3.2 Prestados por la Pontificia Universidad Javeriana	56
8.4 ETAPAS DE CAMPO.....	57
8.4.1 Resumen de trabajos en campo	57
8.4.2 Descripción del relleno.....	58
8.4.3 Excavación.....	59
8.4.4 Bases de trabajo	59
8.4.5 Compactación.....	60
8.4.6 Pesaje de la rueda doble de la volqueta	60
8.4.7 Adquisición de datos.....	61
8.4.8 Medida de la pisada de la volqueta	63
9 ENSAYOS DE LABORATORIO RESULTADOS Y ANÁLISIS	65
9.1 GRANULOMETRÍA I.N.V.E-123	65
9.1.1 Resultados del ensayo de granulometría.....	65
9.1.2 Análisis de resultados del ensayo de granulometría.....	66
9.2 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA I.N.V.E 121:	66
9.2.1 Resultado del ensayo de contenido de materia orgánica	67
9.2.2 Análisis de resultados del ensayo de cantidad de materia orgánica.....	67
9.3 LÍMITE LÍQUIDO I.N.V.E-125:	68
9.3.1 Resultados del ensayo de límite líquido	69
9.3.2 Análisis de resultados del ensayo de límite líquido	69
9.4 LÍMITE PLÁSTICO I.N.V.E-126.....	69
9.4.1 Resultados de límite plástico	70
9.4.2 Análisis de resultados de límite plástico	70
10 POST-PROCESO DE LAS SEÑALES OBTENIDAS EN CAMPO	71

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

11	MODELACIÓN DE BOX CULVERT.....	78
11.1	DATOS INICIALES PARA LA MODELACIÓN Y CARGAS IMPUESTAS AL MODELO	79
11.2	SOLICITACIONES A MOMENTO	81
11.2.1	Solicitaciones a momento Box Culvert 1	81
11.2.2	Solicitaciones a momento Box Culvert 2	83
11.3	SOLICITACIONES A CORTANTE.....	85
11.3.1	Solicitaciones a cortante Box Culvert 1	85
11.3.2	Solicitaciones a cortante Box Culvert 2	87
11.4	DISEÑO A FLEXIÓN.....	89
11.4.1	Cuantías requeridas Box Culvert 1	89
11.4.2	Cuantías requeridas Box Culvert 2	90
11.5	REVISIÓN DEL DISEÑO A CORTANTE	90
11.6	PROYECTO LINEAL DE 100m DE BOX CULVERT	92
11.6.1	Carga viva de diseño para las diferentes metodologías.....	93
11.6.2	Diseño y presupuesto Box Culvert 1	94
11.6.3	Diseño y presupuesto Box Culvert 2	97
12	CONCLUSIONES	102
13	RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS.....	104
14	ANEXOS.	105
	ANEXO.1. CÓDIGO DE FILTRADO DE REGISTROS DE LAS CELDAS PARA SU APLICACIÓN EN MATLAB.....	105
	ANEXO.2. PLANO MONTAJE.	108
	ANEXO.3. JUSTIFICACIÓN AUMENTO ESPESOR DEL PLATO DE CARGA.....	109
15	BIBLIOGRAFÍA.....	109

LISTA DE ECUACIONES

<i>Ecuación 4.1: Incremento de esfuerzos bajo carga lineal [10].....</i>	<i>27</i>
<i>Ecuación 4.2: Incremento en el centro bajo carga circular [10].....</i>	<i>28</i>
<i>Ecuación 4.3: Incremento bajo la esquina de una superficie rectangular cargada uniformemente [10].....</i>	<i>28</i>
<i>Ecuación 4.4: Variable l para la ecuación 4.3 [10].....</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación 4.5: Variable m para la ecuación 4.4 [10].....</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación 4.6: Variable n para la ecuación 4.4 [10].....</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación 4.7: Incremento bajo cargas rectangulares método 2:1 [5].....</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación 7.1: Ecuación base para el motor del filtrado en el software MATLAB 7.5.0.....</i>	<i>49</i>
<i>Ecuación 7.2 de la carga en función del registro.....</i>	<i>67</i>
<i>Ecuación 10.1: Esfuerzo calculado para diferentes profundidades.....</i>	<i>74</i>
<i>Ecuación 11.1: Combinación de cargas Grupo I CCDSP-95.....</i>	<i>80</i>
<i>Ecuación 11.2: Ecuación A.7-38 (CCDSP-95).....</i>	<i>90</i>
<i>Ecuación 11.3: Ecuación A.7-39 (CCDSP-95).....</i>	<i>91</i>
<i>Ecuación Anexo.3.1: Deformación del suelo.....</i>	<i>110</i>
<i>Ecuación Anexo.3.2: Relación rigidez plato de carga (1/2'') y suelo.....</i>	<i>110</i>
<i>Ecuación Anexo.3.3: Relación rigidez plato de carga (1'') y suelo.....</i>	<i>111</i>

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1: Relación entre esfuerzo aplicado en superficie y espesor del relleno [22].....26

Gráfica 4.2: Distribución de esfuerzos para camión estándar con base en las diferentes teorías.....39

Gráfica 7.1 Registro de prueba: Registro V.S. Número de Datos, donde se evidencia el ruido en la adquisición de datos.....49

Gráfica 7.2: Registro de prueba filtrado: Registro V.S. Número de Datos.....50

Gráfica 7.3: Calibración del Montaje: Carga (kg) V.S. Registro52

Gráfica 10.1: Disipación de la carga con la profundidad en campo: Carga (kg) V.S. Altura de Relleno (m).....73

Gráfica 10.2: Disipación del esfuerzo con la profundidad en campo: Esfuerzo (ton/m²) V.S. Altura de Relleno (m).....73

Gráfica 10.3: Disipación del esfuerzo con la profundidad teórica: Esfuerzo (ton/m²) V.S. Altura de Relleno (m).....74

Gráfica 10.4: Disipación del esfuerzo con la profundidad en campo y teórica: Esfuerzo (ton/m²) V.S. Altura de Relleno (m).....75

Gráfica 10.5: Disipación del esfuerzo con la profundidad teórica, en campo y su franja de error: Esfuerzo (ton/m²) V.S. Altura de Relleno (m).....76

Gráfica 10.6: Distribución de esfuerzos para pisada y carga medida en campo para diferentes teorías y medida en campo.....77

Gráfica 11.1: Carga Viva para una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....93

Gráfica 11.2: Carga Viva para una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....93

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Gráfica 11.3: Solicitaciones a momento máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....94

Gráfica 11.4: Solicitaciones a cortante máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....95

Gráfica 11.5: Costos comparativos de la armadura de refuerzo de la losa superior para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....95

Gráfica 11.6: Solicitaciones a momento máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....96

Gráfica 11.7: Solicitaciones a cortante máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....96

Gráfica 11.8: Costos comparativos de la armadura de refuerzo de la losa superior para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....97

Gráfica 11.9: Solicitaciones a momento máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....98

Gráfica 11.10: Solicitaciones a cortante máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....98

Gráfica 11.11: Costos comparativos de la armadura de refuerzo de la losa superior para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....99

Gráfica 11.12: Solicitaciones a momento máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....99

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Gráfica 11.13: Solicitaciones a cortante máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....100

Gráfica 11.14: Costos comparativos de la armadura de refuerzo de la losa superior para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....100

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 4.1: Esfuerzo vertical en un punto A causado por carga puntual en superficie [10].....27

Imagen 4.2: Incremento de la presión bajo superficie circular cargada uniformemente [10].....28

Imagen 4.3: Esfuerzos bajo la esquina de una superficie uniformemente cargada [10].....29

Imagen 4.4 Descripción gráfica del método 2:1 [5].....30

*Imagen 4.5: Dimensiones y cargas máximas para los camiones
C 40-95 y C 32-95 de acuerdo [8].....32*

Imagen 4.6: Dimensiones y cargas máximas para los camiones H 20-44 y H 15-44 [6].....33

Imagen 4.7: Dimensiones y carga máxima para los camiones HS 20-44 y HS 15-44 [6].....34

*Imagen 4.8: Área de contacto Load Model 1, la dirección X es el sentido de movimiento de los
vehículos [12].....34*

*Imagen 4.9 Área de contacto Load Model 2, la dirección X es el sentido de movimiento de los
vehículos [12]35*

Imagen 4.10: Área de contacto Load Model 1. Unidades en metros [12].....36

Imagen 4.11: Área de contacto Load Model 2. Unidades en metros [12].....36

Imagen 4.12: Esquema de la distribución de esfuerzos a través del suelo [4].....38

Imagen 5.1 Esqueleto-Formaleta usado para fundir el concreto del montaje experimental.....40

Imagen 5.2: Celda de Carga tipo LOADTRON.....41

Imagen 5.3: Mecanismo de trabajo en voladizo de una Celda de Carga tipo LOADTRON.....41

Imagen 5.4: Anillo con refuerzo y varillas roscadas previo a la fundida.....41

Imagen 5.5: Anillo fundido en obra.....41

Imagen 5.6: Anillo envuelto con polietileno para su curado.....42

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

<i>Imagen 5.7: Anillo con Celdas de Carga tipo LOADTRON en Laboratorio.....</i>	<i>42</i>
<i>Imagen 5.8: Montaje final de las celdas de carga.....</i>	<i>43</i>
<i>Imagen 5.9: Corte del esquema de trabajo para las distintas profundidades.....</i>	<i>43</i>
<i>Imagen 6.1: Partes del sistema de adquisición de datos.....</i>	<i>44</i>
<i>Imagen 6.2: Celda de Carga tipo LOADTRON LSB-23 referencia 9253.....</i>	<i>44</i>
<i>Imagen 6.3: Adquisidor de datos: NI-SCXI-1000.....</i>	<i>45</i>
<i>Imagen 6.4 Módulo de conexión NI-SCXI-1520 conectado al adquisidor de datos NI-SCXI-1000.....</i>	<i>46</i>
<i>Imagen 6.5: Computador conectado al adquisidor de datos con el software de registro instalado.....</i>	<i>46</i>
<i>Imagen 7.1 Tarjeta de adquisición de datos donde se conectan las celdas de carga.....</i>	<i>47</i>
<i>Imagen 7.2 Configuración del software para el registro de las celdas.....</i>	<i>47</i>
<i>Imagen 7.3 Registro de las celdas en el software durante las pruebas de la actividad de calibración.....</i>	<i>48</i>
<i>Imagen 7.4 Esquema representativo del ruido en los registros.....</i>	<i>49</i>
<i>Imagen 7.5: Maquina Universal Laboratorio Pontificia Universidad Javeriana.....</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 7.6: Montaje sobre la Maquina Universal.....</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 7.7: Registro original y filtrado de la calibración del montaje de las celdas de carga en el software MATLAB 7.5.0.....</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 7.8: Registro original y filtrado de la re-calibración en el software MATLAB 7.5.0.....</i>	<i>53</i>
<i>Imagen 8.1: Ubicación geográfica del lugar de trabajo. Última actualización 13-06-2009 [15].....</i>	<i>55</i>
<i>Imagen 8.2: Vista obra y espacio de trabajo de la EAAB en Bogotá D.C.....</i>	<i>55</i>
<i>Imagen 8.3: Organigrama de labores en campo.....</i>	<i>56</i>

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

<i>Imagen 8.4: Retroexcavadora cargando volqueta con material de trabajo.....</i>	<i>58</i>
<i>Imagen 8.5: Excavación mecánica realizada por la retroexcavadora.....</i>	<i>59</i>
<i>Imagen 8.6: Ayudantes rectificando la profundidad de trabajo.....</i>	<i>59</i>
<i>Imagen 8.7: Ayudantes realizando proceso de compactación y nivelación de la cota de trabajo</i>	<i>60</i>
<i>Imagen 8.8: Rueda acercándose al pistón de carga.....</i>	<i>61</i>
<i>Imagen 8.9: Pesaje de la rueda en el pistón de carga.....</i>	<i>61</i>
<i>Imagen 8.10: Rectificación de la ubicación de la rueda doble sobre relleno.....</i>	<i>62</i>
<i>Imagen 8.11: Rueda doble en posición para la medición.....</i>	<i>62</i>
<i>Imagen 8.12: Adquisición de datos, volqueta localizada sobre el área de prueba.....</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 8.13: Ilustración del significado de la pisada de una rueda doble de eje sencillo.....</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 8.14: Medición de la dimensión A de la pisada de la rueda.....</i>	<i>64</i>
<i>Imagen 8.15: Medición de la dimensión B de la pisada de la rueda.....</i>	<i>64</i>
<i>Imagen 10.1 Registro original y filtrado a una profundidad de 1.25m.....</i>	<i>71</i>
<i>Imagen 10.2: Registro original y filtrado a una profundidad de 0.70m.....</i>	<i>71</i>
<i>Imagen 10.3: Registro original y filtrado a una profundidad de 0.35m.....</i>	<i>72</i>
<i>Imagen 11.1: Corte del Box Culvert 1 acotado en metros.....</i>	<i>78</i>
<i>Imagen 11.2: Modelo Box Culvert 1 en SAP 2000.....</i>	<i>78</i>
<i>Imagen 11.3: Corte del Box Culvert 2 acotado en metros.....</i>	<i>78</i>
<i>Imagen 11.4: Modelo Box Culvert 2 en SAP 2000.....</i>	<i>79</i>

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Imagen 11.5: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según CCDSP-95.....81

Imagen 11.6: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según mediciones en CAMPO.....81

Imagen 11.7: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según CCDSP-95.....82

Imagen 11.8: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según mediciones en CAMPO.....82

Imagen 11.9: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según CCDSP-95.....83

Imagen 11.10: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según mediciones en CAMPO.....83

Imagen 11.11: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según CCDSP-95.....84

Imagen 11.12: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según mediciones en CAMPO.....84

Imagen 11.13: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según CCDSP-95.....85

Imagen 11.14: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según mediciones en CAMPO.....86

Imagen 11.15: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según CCDSP-95.....86

Imagen 11.16: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según mediciones en CAMPO.....87

Imagen 11.17: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según CCDSP-95.....87

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

<i>Imagen 11.18: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según mediciones en CAMPO.....</i>	<i>88</i>
<i>Imagen 11.19: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25 m y carga viva según CCDSP-95.....</i>	<i>88</i>
<i>Imagen 11.20: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según mediciones en CAMPO.....</i>	<i>89</i>
<i>Imagen Anexo.3.1: Modelo plato de carga en SAP 2000.....</i>	<i>109</i>
<i>Imagen Anexo.3. 2: Deformación máxima en el plato de ½" de espesor.....</i>	<i>109</i>
<i>Imagen Anexo.3.3: Deformación máxima en el plato de 1" de espesor.....</i>	<i>111</i>

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 7.1: Resultados de la re-calibración y errores.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 9.1 Resultados granulometría.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 9.2: Requisitos granulometría [11].....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 9.3: Resultados contenido materia orgánica.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 9.4: Requisitos contenido de materia orgánica [11].....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 9.5 Requisitos límite líquido [11]</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 9.6 Requisitos límite plástico [11].....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 10.1: Valores de carga para las profundidades trabajadas en campo.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 10.2: Valores de esfuerzo para las profundidades trabajadas en campo.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 10.3: Valores de esfuerzo según Ecuación 10.1.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 10.4: Valores del esfuerzo teórico y en campo y su diferencia para las profundidades trabajadas en campo.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 10.5 Valores del esfuerzo teórico, en campo, su diferencia y errores máximos para las profundidades trabajadas en campo.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 11.1: Datos iniciales para la cuantificación de las cargas y modelación de los Box Culvert en el software SAP 2000.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 11.2: Valores de carga viva para la altura de relleno de 0.70m según el CCDSP-95 y las registradas en campo.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 11.3: Valores de carga viva para la altura de relleno de 1.25m según el CCDSP-95 y las registradas en campo.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 11.4: Especificaciones materiales para el diseño de los Box Culvert.....</i>	<i>81</i>

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

<i>Tabla 11.5: Solicitaciones a momento losa superior Box Culvert 1 en puntos A, B, C para una altura de relleno de 0.70m.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 11.6: Solicitaciones a momento losa superior Box Culvert 1 en puntos A, B, C para una altura de relleno de 1.25m.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 11.7: Solicitaciones a momento losa superior Box Culvert 2 en puntos A, B para una altura de relleno de 0.70m.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 11.8: Solicitaciones a momento losa superior Box Culvert 2 en puntos A, B para una altura de relleno de 1.25m.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 11.9: Solicitación máxima a cortante losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 11.10: Solicitación máxima a cortante losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 11.10: Solicitación máxima a cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 11.11: Solicitación máxima a cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25m.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 11.12: Cuantía requerida para losa superior del Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 11.13: Cuantía requerida para losa superior del Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 11.14: Cuantía requerida para losa superior del Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 11.15: Cuantía requerida para losa superior del Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25m.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 11.16: Cálculo del esfuerzo resistente nominal a cortante del concreto para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en Ecuación 11.2.....</i>	<i>92</i>

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

<i>Tabla 11.17: Costo por kilogramo de acero de refuerzo y peso por metro de varillas de refuerzo [9].....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 11.18: Solicitaciones a momento máximo y cortante máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 11.19: Tabla comparativa de armadura y costos para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 11.20: Solicitaciones a momento máximo y cortante máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 11.21: Comparativa de armadura y costos para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 11.22: Costo por kilogramo de acero de refuerzo y peso por metro de varillas de refuerzo [9].....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 11.23: Solicitaciones a momento máximo y cortante máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 11.24: Tabla comparativa de armadura y costos para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 11.25: Solicitaciones a momento máximo y cortante máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 11.26: Tabla comparativa de armadura y costos para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.....</i>	<i>100</i>

1 INTRODUCCIÓN

Las implicaciones derivadas de los trabajos de investigación teóricos y prácticos que se han desarrollado en los dos últimos siglos en todas las áreas de la ingeniería han llevado a ésta a desarrollos inimaginables. El trabajo en los diversos campos de la ciencia ha puesto en marcha un ferrocarril imparable en donde cada idea, cada formulación, cada teórica, cada aplicación, cada grano de arena resultado del trabajo y dedicación se ha transformado en carga para los vagones de los diferentes énfasis de estudio. Sin embargo, cada vagón va amarrado al de adelante y al de atrás, y es por ello que la ingeniería civil tiene diversos campos de estudio y acción, complementarios unos con otros.

El trabajo de grado realizado fue una experiencia en donde se pudo mezclar la parte analítica con el laboratorio y toma de datos en campo. Un trabajo en equipo en donde participaron diferentes personas como profesores, ingenieros, constructores, técnicos de laboratorio, auxiliares de obra, etc. las cuales aportaron para que el desarrollo del mismo pudiese llegar a término con resultados y conclusiones importantes en el ámbito académico y práctico.

El estudio de los esfuerzos en el suelo y su disipación a través de rellenos, es uno de tantos temas de investigación en donde las estructuras y los suelos principalmente están relacionados. El hecho de trabajar sobre un material como lo son los suelos para luego hacer un diseño estructural de estructuras enterradas hace que la interdisciplinariedad entre estas dos ramas de estudio sea importante.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

La simple idea de trabajar una formulación teórica expuesta en el Código Colombiano de Diseño de Puentes de 1995 (CCDSP-95), que además es ley de la República de Colombia, hace que el estudio sea pertinente más allá de los ámbitos académicos. La gratificación del trabajo finalizado es indescriptible y el aprendizaje y experiencia adquiridos incontables.

La determinación en campo de la distribución de los esfuerzos debido a la acción de una carga aplicada en superficie a medida que la profundidad de relleno aumenta, fue para este trabajo la rueda doble del eje sencillo de una volqueta, es el trabajo práctico comparable con los resultados obtenidos por medio de diferentes metodologías teóricas.

El proyecto que se realizó consistió en la construcción de un montaje capaz de registrar carga, que por medio de relaciones matemáticas se expresó en términos de esfuerzo, a diferentes profundidades en campo. Con estos registros tomados en campo para las diferentes profundidades se pudo establecer una relación gráfica entre el esfuerzo medido en el terreno y la altura de relleno.

Este montaje requirió de una calibración en laboratorio previo a su posterior utilización en campo debido al ruido registrado por el sistema de adquisición de datos generado por las celdas de carga.

Gracias a la colaboración de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) la cual amablemente se sumó a la iniciativa de apoyo al proceso investigativo del Grupo de Estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana a través del ingeniero Jorge López Jaramillo, suministró para el desarrollo del trabajo de grado espacio, personal y maquinaria para que las diferentes actividades

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

en campo pudieran llevarse a cabo. La disposición y acompañamiento del personal de la empresa en obra fue fundamental para el buen desarrollo del trabajo en campo.

Las actividades realizadas en obra se basaron en la excavación del área de trabajo a varias profundidades establecidas para ubicar el montaje en la profundidad de estudio para luego rellenar y compactar sobre él con el material de relleno. Finalmente, en superficie se aplicó una carga controlada, la cual fue una rueda doble de volqueta de capacidad máxima de carga de 6m^3 . De esta manera, se registró por medio del adquisidor de datos electrónico las señales emitidas por las celdas de carga, cuando éstas sentían diferenciales de carga.

Los resultados obtenidos en campo muestran una similitud en cuanto a la magnitud de los esfuerzos registrados en campo y los obtenidos por medios teóricos, lo que sugiere que el montaje y la electrónica funcionaron de manera adecuada obteniendo resultados lógicos. Las diferencias entre los esfuerzos obtenidos en la práctica con los valores teóricos del CCDSP-95, en cuanto a que los primeros son mayores a los segundos, repercute en el diseño de las estructuras enterradas debido a que las sollicitaciones a momento y cortante aumentan como consecuencia a la carga viva aplicada mayor. Un diseño más exigente se resume en cuantías de refuerzo mayores y por ende mayores costos a cambio de la seguridad estructural de las estructuras.

2 JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudio de la distribución de esfuerzos a través de suelos se ha venido estudiando hace más de un siglo desde cuando Boussinesq (1885) desarrolló las relaciones matemáticas para la determinación de los esfuerzos normales y de corte en un punto cualquiera dentro de medios homogéneos, elásticos, e isotrópicos debido a una carga puntual concentrada localizada en la superficie [10] los cuales se han extrapolado para su uso en mecánica de suelos. De ahí en adelante se han desarrollado diferentes metodologías de evaluación de esfuerzos, siempre bajo las premisas adoptadas por Boussinesq [19].

Debido a que los suelos son materiales heterogéneos, inelásticos y anisotrópicos, estas aproximaciones, aunque sean de gran utilidad por su simpleza, no representan el comportamiento real de los suelos debido a la aplicación de cargas en superficie y pueden llevar a resultados erróneos en sus aplicaciones [26].

La importancia en poder determinar la distribución de esfuerzos verticales a través de suelos se fundamenta en que las estructuras enterradas, como conductos, alcantarillados, Box Culvert, etc. son instaladas debajo de materiales granulares compactados, de relleno, que cumplen una función tanto de protección como de reducción de sobrecargas [21].

En el diseño de este tipo de estructuras enterradas en el suelo, las presiones debidas a cargas móviles, en especial vehiculares, son de gran relevancia. La contribución de presión debida a esta carga viva en el total de presiones en el diseño de estas estructuras se vuelven factores determinantes, y más aun cuando los espesores de relleno disminuyen [26].

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

A raíz de la importancia en la determinación de la distribución de esfuerzos verticales a través de rellenos y la limitación teórica existente, se han realizado estudios experimentales que buscan alguna relación empírica entre el espesor del relleno y el esfuerzo vertical.

En Colombia, el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes 1995 (CCDSP-95) en el numeral A.12.5 reglamenta la manera como la carga viva se debe distribuir a través de rellenos para el diseño de conductos enterrados. Esta aproximación teórica fue adaptada de la especificación Norteamericana de diseño de puentes de la AASHTO Estándar, pasando las unidades a Sistema Internacional.

Debido a que la normativa Colombiana que reglamenta la distribución de esfuerzos verticales a través de suelos, en este caso particular de carga viva a través de rellenos, es tomada de un código extranjero se hace necesario el estudio experimental de dicha distribución para las cargas y los materiales típicos utilizados para este fin en el medio nacional. Con el estudio de dicha distribución se podrá dar un escenario experimental que sugiera la re-evaluación de la formulación reglamentada en el código y poder establecer la aplicabilidad de la misma en Colombia.

3 OBJETIVOS

3.1 GENERAL

- Determinar la distribución de esfuerzos verticales para diferentes espesores de rellenos compactados típicos para estructuras enterradas y establecer las diferencias con los resultados teóricos obtenidos del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes 1995 (CCDSP-95).

3.2 ESPECÍFICOS

- Establecer la relación existente entre el espesor del relleno compactado y el esfuerzo vertical medido en su base debido a la pisada de una llanta de rueda doble aplicada en superficie.
- Comparar los resultados obtenidos de la distribución de esfuerzos verticales experimentalmente con los valores teóricos a la luz del Código Colombiano De Diseño Sísmico de Puentes 1995 (CCDSP-95).

4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Como solución para conducción de aguas residuales y sistemas de control de agua en pasos naturales que cruzan proyectos viales, las estructuras enterradas han resultado ser buenas alternativas. La más popular de estas es el Box Culvert, estructura ampliamente utilizada en la conducción de fluidos (tubería-túnel) y el diseño de puentes, aunque ha funcionado bien para otras aplicaciones como pasos subterráneos o transporte de materiales. Como su nombre lo indica, ésta es una estructura en forma de caja o cajón generalmente construida en concreto reforzado. La caja puede cumplir la función de tubería-túnel en su interior y/o puente en su superficie. Las altas demandas de sus aplicaciones han hecho que los Box Culvert sean estructuras con muy buenas características de resistencia, deformabilidad y duración. En la actualidad se han hecho estudios sobre su comportamiento y respuesta ante distintas solicitaciones. En 1990 se completó un estudio en la Universidad de Nebraska en Estados Unidos [25] en el cual se instrumentó un Box Culvert de doble canal sometido a distintas condiciones de carga viva y de alturas de relleno variables. Los resultados mostrados por el estudio relacionan la validez de los datos con modelaciones obtenidas en computador y evalúan algunas consideraciones que presenta la normativa AASTHO Estándar para el diseño de estas estructuras.

En Colombia se han utilizado este tipo de estructuras durante las últimas dos décadas. En 1994 se publicó el Código Colombiano De Diseño Sísmico De Puentes que contiene un capítulo de estructuras enterradas, las consideraciones para el diseño y construcción de éstas. Tanto la AASTHO como el CCDSP-95 utilizan expresiones y consideraciones empíricas para cuantificar la disipación de esfuerzos generados por la carga viva a la que están expuestas estas estructuras. Hay varios estudios acerca de cómo las estructuras enterradas sienten el efecto de la carga viva que

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

aunque demuestran un conocimiento bastante avanzado acerca del comportamiento y respuesta sigue siendo una incertidumbre para los diseñadores el poder conocer las condiciones exactas a las que son sometidas éstas. Algunos de los trabajos realizados son los siguientes:

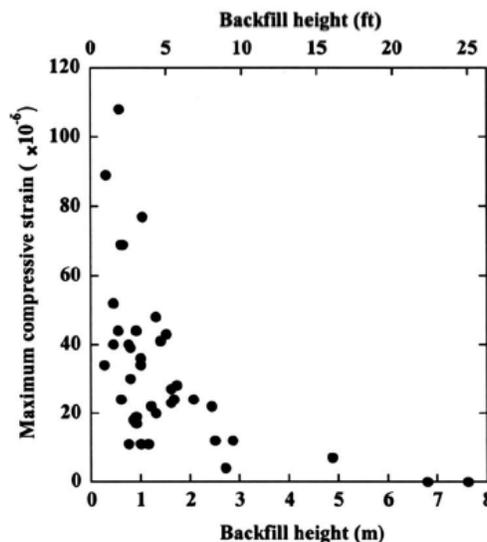
- Lawrence C Rude trabajó en la reducción de cargas para tuberías enterradas. Lawrence estudió la influencia del tamaño, la forma, la posición y la composición de los materiales de relleno en la reducción las cargas a la que las tuberías enterradas se encuentran expuestas. El resultado de esta investigación muestra que es posible obtener reducciones importantes de las cargas impuestas en superficie si se conoce bien las propiedades elásticas de los materiales de relleno, argumenta que el conocimiento de esta información permite una solución analítica más confiable que la que presentan las cartas de diseño, que generalmente son basadas en situaciones ideales. [21]
- En Noviembre de 1990 se termina un trabajo patrocinado por la Universidad de Nebraska en Estados Unidos en el cual se instrumenta un Box Culvert de doble canal para presión de suelo, momentos y deflexiones [26]. Esta investigación pretendía describir a gran escala la medición y el comportamiento y respuesta estructural del Box Culvert frente a cargas de suelo y cargas vehiculares. Estudios similares a éste son realizados por Arockiasamy [3] donde se estudiaron tuberías de distintos materiales y distintos diámetros sometidas a cargas vehiculares. Se utilizaron simulaciones numéricas para determinar la respuesta del sistema suelo-tubería bajo la aplicación de cargas vivas. El resultado de este estudio mostró que en general las tuberías flexibles que se encuentran embebidas con una

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

adecuada compactación de material limo-arenoso bien gradado exhiben buen desempeño sin presentar fisuras o separación de juntas visibles.

- Estudios sobre modelos físicos instrumentados a escala natural de la interacción suelo-estructura en la cimentación de una tubería rígida y una flexible fueron desarrollados en Colombia en el año 2006 en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Se aplicó una fuerza en dirección vertical sobre la tubería enterrada y se midieron las cargas y desplazamiento horizontales y verticales, tanto del terreno como de las tuberías, en diferentes puntos del modelo [20].
- En Ohio, con base en pruebas realizadas en 39 Box Culvert de acero corrugado se pudo establecer la existencia de una relación no lineal entre el esfuerzo aplicado en superficie versus el espesor del relleno el cual a su vez hace como disipador de esfuerzos [22]. La relación encontrada en el estudio se muestra a continuación:



Gráfica 4.1: Relación entre esfuerzo aplicado en superficie y espesor del relleno. [22].

4.1 TEORÍAS ELÁSTICAS DE DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES A TRAVÉS DE SUELOS

La primera persona que habló sobre distribución de esfuerzos verticales fue Boussinesq. En 1855 desarrolló una teoría para cuantificar el esfuerzo bajo una masa de suelo generada por una carga puntual ubicada en la superficie. El incremento propuesto está dado por la Ecuación 4.1:

$$\Delta p = \frac{3P}{2\pi z^2 \left[1 + \left(\frac{r}{z} \right)^2 \right]^{5/2}}$$

Ecuación 4.1: Incremento de esfuerzos bajo carga lineal [10].

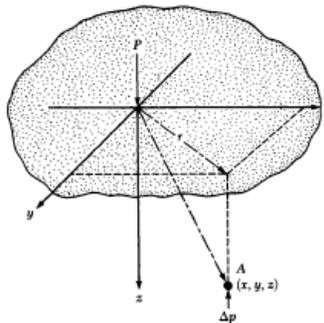


Imagen 4.1: Esfuerzo vertical en un punto A causado por carga puntual en superficie. [10].

Donde P es la carga puntual aplicada en superficie, r representa la distancia paralela al plano del suelo y z es la distancia en profundidad.

Esta ecuación relaciona la carga aplicada (P), con las coordenadas del punto donde se requiere hallar. Éstas son r , que es equivalente a $((x^2 + y^2)^{0.5})$ donde x y y son las coordenadas en los ejes paralelos al plano. La variable z al igual que x y y se refiere a la coordenada en profundidad del punto donde se desea calcular el incremento.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

La misma ecuación puede ser adecuada para determinar el esfuerzo bajo un área que se encuentre cargada de forma circular.

Entonces el incremento en el centro de dicho círculo a la profundidad deseada está dado por la ecuación 4.2:

$$\Delta p = q_0 \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{B}{2z} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\}$$

Ecuación 4.2: Incremento en el centro bajo carga circular [10].

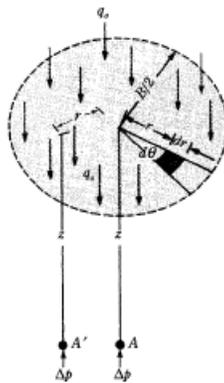


Imagen 4.2: Incremento de la presión bajo superficie circular cargada uniformemente [10].

Esta ecuación relaciona el esfuerzo aplicado en superficie (q_0), con la geometría del círculo (diámetro = B) y la coordenada z que es el punto donde se quiere calcular el incremento.

De igual forma la ecuación de Boussinesq puede ser utilizada para determinar el esfuerzo bajo la esquina de un área rectangular cargada (Imagen 4.3) [8].

El incremento en la esquina a la profundidad z está dado por la ecuación 4.3:

$$\Delta p = q_0 I_c$$

Ecuación 4.3: Incremento bajo la esquina de una superficie rectangular cargada uniformemente [10].

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Dónde I_c depende de:

$$I = \text{factor de influencia} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1} \cdot \frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} + \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+1-m^2n^2} \right)$$

Ecuación 4.4: Variable I para la ecuación 4.3 [10].

Donde m y n son relaciones entre el ancho del rectángulo (B) y la profundidad (z) y entre el largo (L) y la profundidad (z):

$$m = \frac{B}{z}$$

Ecuación 4.5: Variable m para la ecuación 4.4 [10].

$$n = \frac{L}{z}$$

Ecuación 4.6: Variable n para la ecuación 4.4 [10].

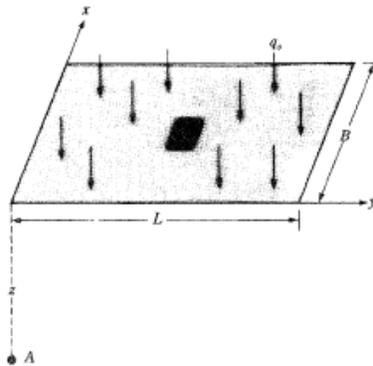


Imagen 4.3: Esfuerzos bajo la esquina de una superficie uniformemente cargada [10].

Para calcular esfuerzos bajo superficies rectangulares con carga distribuida existe también un método aproximado que supone un área rectangular cargada, la cual aumenta sus dimensiones en proporción 2 vertical y 1 horizontal, haciendo que aumente el área a la profundidad deseada lo que implica un menor esfuerzo [5].

El incremento está dado por la ecuación 4.7:

$$\Delta p = \frac{q_0 \times B \times L}{(B+z)(L+z)}$$

Ecuación 4.7: Incremento bajo cargas rectangulares método 2:1 [5].

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

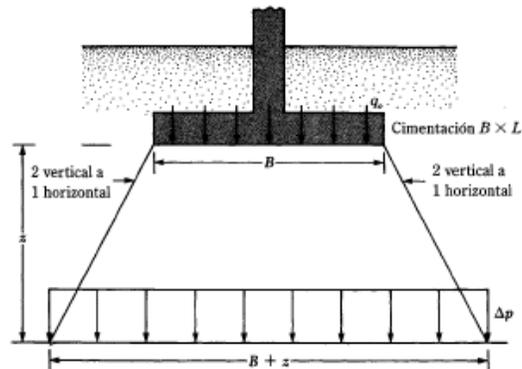


Imagen 4.4 Descripción gráfica del método 2:1 [5].

La determinación de la variable q que hace referencia a la carga aplicada en superficie que está explícita en todas las ecuaciones varía según la normativa y el código que se utilice.

4.2 NORMATIVAS DE DISEÑO DE PUENTES

A nivel internacional las diferentes normativas de diseño de puentes más importantes son:

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Standard Specifications for Highway Bridges.
- AASHTO LRFD (Load and Resistance Factor Design) Bridge Design Specifications.
- CALTRANS (California Transportation) Bridge Design Specifications.
- EURO-CODE 1 Part 2 Traffic loads on Bridges.

Todas éstas presentan diferencias en cuanto a la carga viva y su distribución a través de suelo se refiere.

En Colombia el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes de 1995 (CCDSP-95), es ley de la república por lo que su uso en el diseño y construcción de este tipo de estructuras es de orden obligatorio se basa en su totalidad en la AASTHO Estándar. Esta normativa norteamericana

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

actualmente cuenta con dos versiones de diseño de puentes: AASHTO Estándar y la AASHTO LRFD. La diferencia fundamental entre estos códigos es el método de diseño empleado en cada una. Por un lado, la AASHTO Estándar trabaja bajo la teoría de esfuerzos admisibles, en cuanto la AASHTO LRFD es un método de diseño por factores de carga y resistencia. Este método se basa en los conceptos de estados límites, condición en la que una estructura o parte de ella deja de cumplir su pretendida función [15]. Hoy en día la ingeniería de puentes se ha venido inclinando por el método LRFD en vez, como ha sido en los últimos 30 años, por la especificación estándar de diseño [14], debido al conocimiento experimental de los materiales involucrados.

4.3 DEFINICIÓN DE CAMIONES DE DISEÑO

4.3.1 Referentes nacionales

En relación a la definición de la carga viva en el diseño de puentes y estructuras enterradas en Colombia, esta determinación se realiza de acuerdo con el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes 1995 que hace referencia al peso de las cargas móviles aplicadas de los vehículos y peatones (CCDSP-95 A-3.4). Las cargas vehiculares están conformadas por camiones estándar o líneas de carga que son equivalentes a trenes de camiones (CCDSP-95 A.3.4.2.1.1). Las líneas de carga se utilizan para el diseño de estructuras con luces mayores a 24 metros, para el diseño a esfuerzos cortantes, y 28 metros, para el diseño a esfuerzos flectores.

Aunque existen diferentes tipos de configuraciones de camiones en la Red Nacional de Carreteras y a su vez diferentes pesos vehiculares (Resolución 004100 del 28 Dic. 2004 del Ministerio de Transporte) para el diseño de estructuras vehiculares están reglamentadas únicamente dos clases de cargas para diseño: C 40-95 y C 32-95 (CCDSP-95 A.3.4.2.2). La carga se designa con la letra C

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

seguida por un número que indica el peso del vehículo en toneladas (CCDSP-95 A.3.4.2.4). La carga C 40-95 consiste en un camión de tres ejes o en la línea de carga correspondiente, en cuanto la carga C 32-95 es el 80% de la carga C 40-95 (CCDSP-95 A.3.4.2.2).

Los puentes y estructuras que hagan parte o pueden llegar a ser de la Red Nacional de Carreteras y aquellos que se construyan con recursos del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) se deben diseñar para la carga del C 40-95 (CCDSP 95 A.3.4.2.3). Aquellos puentes y estructuras no contemplados en los numerales A.3.4.2.3.1 y A.3.4.2.3.2 del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes de 1995 (CCDSP-95) pueden diseñarse para la carga C 32-95.

La distancia entre los ejes y la separación perpendicular entre ruedas para los camiones estándar de diseño se ilustran en la Imagen 4.5.

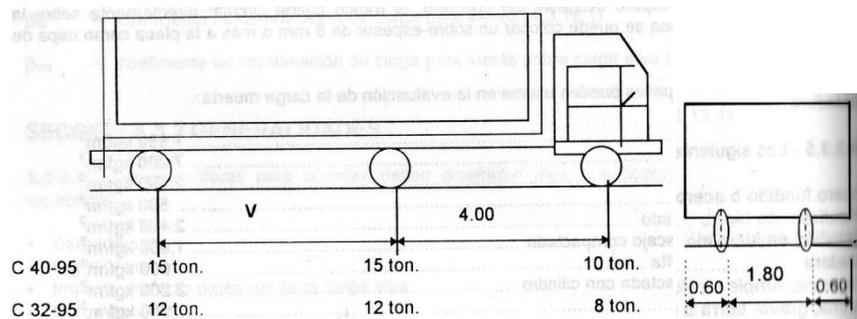


Figura A.3.4A
Camiones estándar

Imagen 4.5: Dimensiones y cargas máximas para los camiones C 40-95 y C 32-95 [8].

Las cargas aplicadas deben considerarse como una unidad y no se deben usar fracciones de los camiones (CCDSP-95 A.3.4.6.1). El número y posición de los mismos debe realizarse de tal forma que produzcan los esfuerzos máximos (CCDSP-95 A.3.4.6.2).

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

4.3.2 Referentes Internacionales

En cuanto a la carga viva de diseño de puentes en los Estados Unidos la normativa CALTRANS, AASHTO Estándar, y AASHTO LRFD, la define como la carga aplicada como consecuencia del paso de vehículos, carros, y peatones [6]. En cuanto a la carga vehicular ésta consiste en camiones estándar o líneas de carga equivalentes a trenes de camiones [6].

Existen tres sistemas de carga utilizados: H, HS, y cargas concentradas. El sistema de carga H hace referencia un camión de dos ejes (Imagen 4.6), en cuanto el sistema de carga HS consisten en un tractor con semi-remolque (Imagen 4.7). Tanto para el sistema de carga H como el HS existen dos tipos de camión, el #15 y el #20 que hacen referencia a su peso en toneladas inglesas. El sistema de cargas puntuales es para uso de cargas vehiculares especiales.

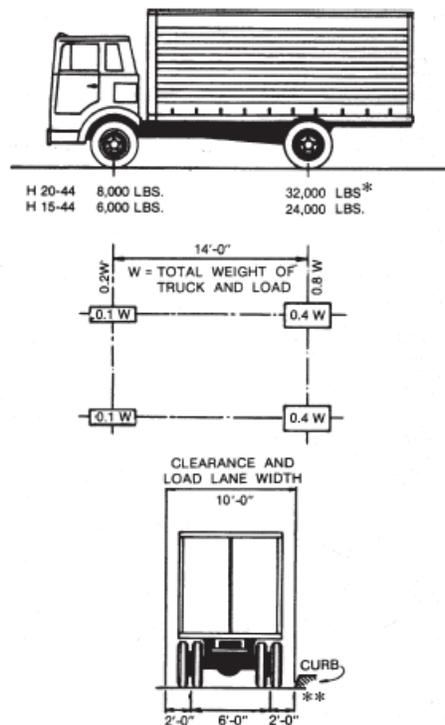


Imagen 4.6: Dimensiones y cargas máximas para los camiones H 20-44 y H 15-44 [6].

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

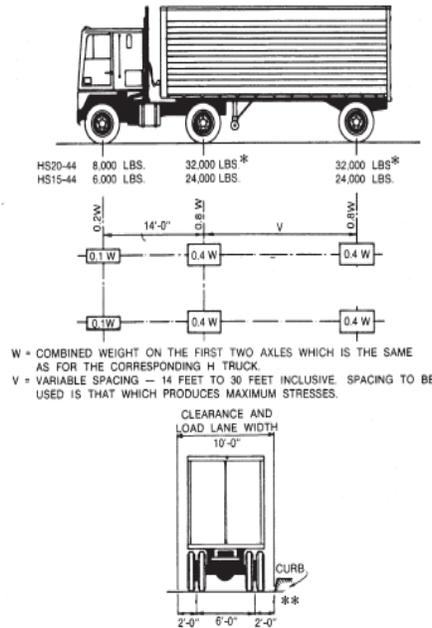


Imagen 4.7: Dimensiones y carga máxima para los camiones HS 20-44 y HS 15-44 [6].

El Euro-Código, por su parte, representa los efectos vehiculares sobre las estructuras asociados a los estados límites de resistencia y de servicio por medio de cuatro modelos de carga (EUROCODE 1: Part 2, 4.3.1, 2002):

- Load Model 1 (LM1): Cargas puntuales y uniformemente distribuidas, que cubren los efectos de la mayoría de camiones y carros utilizado para verificaciones de servicio generales y locales.

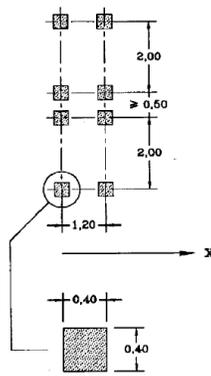


Imagen 4.8: Área de contacto Load Model 1, la dirección X es el sentido de movimiento de los vehículos [12].

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

- Load Model 2 (LM2): Un eje simple cargado sobre áreas de contacto especificadas (Imagen 4.9), que cubren el efecto dinámico del tráfico normal sobre elementos estructurales cortos.

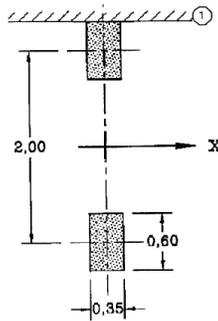


Imagen 4.9 Área de contacto Load Model 2, la dirección X es el sentido de movimiento de los vehículos [12].

- Load Model 3 (LM3): Consiste en un ensamblaje de ejes para la representación de vehículos especiales.
- Load Model 4 (LM4): Modelo de tráfico peatonal.

Dentro de estos cuatro modelos, LM1 y LM2 son los más generales en cuanto a diseño hace referencia. LM1 consiste en dos ejes tándem con una carga aproximada de 300 KN cada uno, en cuanto el LM2 es un solo eje con una carga aproximada de 400KN.

4.4 PISADA O HUELLA DEL CAMIÓN ESTÁNDAR:

4.4.1 Referentes nacionales:

El CCDSP-95 define el área de contacto de una llanta se como un rectángulo con una relación 1:2.5 y un área, en centímetros cuadrados, igual a $P/7$; donde P es la carga de la llanta en kilogramos (CCDSP-95 A.4.8).

4.4.2 Referentes internacionales:

Las Normativas de diseño de puentes Norteamericanas, AASHTO Estándar y CALTRANS definen el área de contacto de la rueda como un rectángulo cuya área equivale a 0.01 veces P , donde P es la carga de la llanta en libras, con una relación largo/ancho de 2.5 [6]. Por otro lado, el área de contacto de la rueda definida en la normativa AASHTO LRFD es un rectángulo de 10 in de ancho por 20 in de largo [4].

El área de contacto de la llanta en el Euro-Código depende del modelo de carga a utilizar. Para el Load Model 1 (LM1) el área de contacto es un cuadrado cuyos lados miden 0.40m (Imagen 4.10). Por su parte, el Load Model 2 (LM2) (Imagen 4.11) considera una huella de llanta rectangular cuyos lados son 0.35 m por 0.60 m (EUROCODE 1: Part 2, 4.3.2 - 4.3.3, 2002).

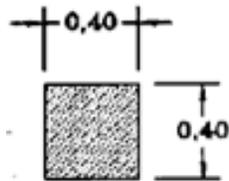


Imagen 4.10: Área de contacto Load Model 1.
Unidades en metros. [12].

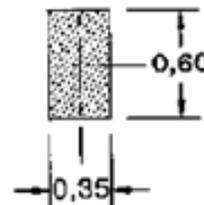


Imagen 4.11: Área de contacto Load Model 2.
Unidades en metros. [12].

4.5 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS:

Una vez determinadas las cargas de diseño, cada normativa trabaja de manera diferente la distribución de esfuerzos verticales a través de rellenos los cuales se amplían a continuación:

4.5.1 Referentes nacionales

Para el CCDSP-95 la distribución de la carga viva para conductos enterrados, conductos rígidos de concreto, enterrados bajo terraplenes o colocados en zanjas, se determina a partir del espesor del

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

suelo sobre el conducto (CCDSP-95 A.12.1). La distribución de la carga en superficie indica que cuando el espesor del lleno sobre el conducto es menor a 0.60m la carga de ruedas se debe distribuir como en los puentes de losa. Por otro lado, si el espesor del lleno sobre la estructura es mayor a 2.5m y mayor que la luz de la losa el efecto de la carga viva se puede despreciar. Para luces múltiples, puede omitirse en los cálculos la carga viva cuando el espesor del lleno exceda la distancia entre las caras de los soportes exteriores (CCDSP-95 A.12.5).

Para espesor de lleno entre 0.60m y 2.5m las cargas concentradas deben considerarse como uniformemente distribuidas sobre un cuadrado cuyos lados sean iguales a 1.75 veces el espesor del lleno. Cuando tales áreas se traslapen, la carga total debe considerarse uniformemente distribuida sobre el área definida por los bordes exteriores de las áreas individuales, sin que el ancho total sea superior al ancho de la losa (CCDSP-95 A.12.5).

4.5.2 Referentes internacionales

La AASTHO define distribución de la carga viva a través del suelo cuando el espesor del relleno es mayor a 2 ft se asume como uniformemente distribuida sobre un cuadrado cuyos lados son iguales a 1.75 veces el espesor del relleno tanto para la AASHTO Estándar [1] como para el CALTRANS [6]. En la normativa AASHTO LRFD la distribución de carga para espesores de suelo mayores a 2ft (AASHTO LRFD, Artículo 3.6.1.2.6, 2006) se debe distribuir sobre un área rectangular cuyos lados son iguales a los especificados para el área de contacto de la llanta (AASHTO LRFD, Artículo 3.6.1.2.5, 2006) incrementados 1.15 veces el espesor del relleno.

4.6 COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS TEÓRICAS EN LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS A TRAVÉS DE SUELO.

Las diferentes metodologías se basan metodologías es distribuir la carga producida por el contacto de la rueda con la superficie en un área mayor al área de contacto real. El área nueva depende fundamentalmente de la profundidad del relleno como se ilustra en la siguiente imagen:

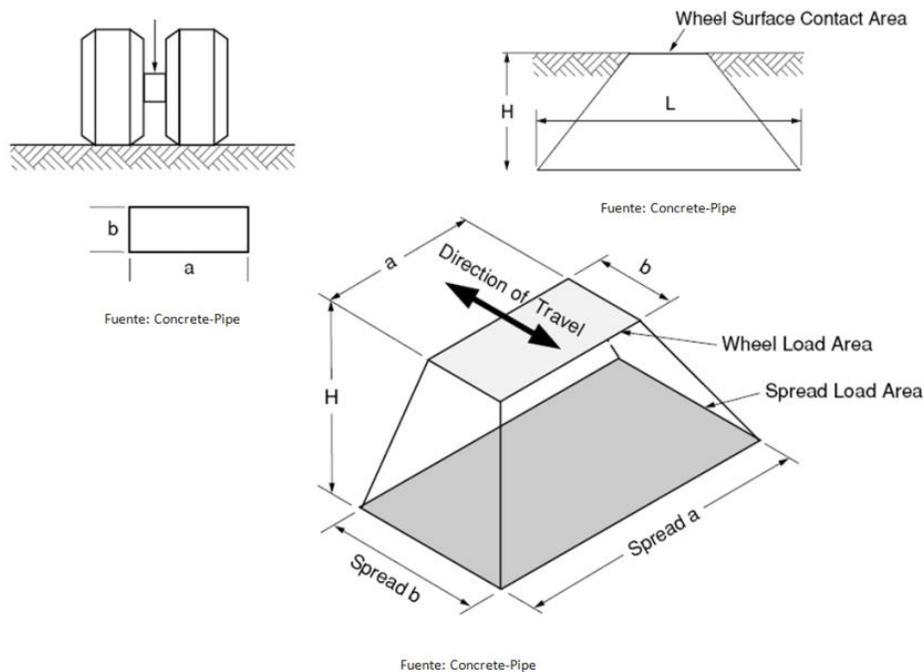
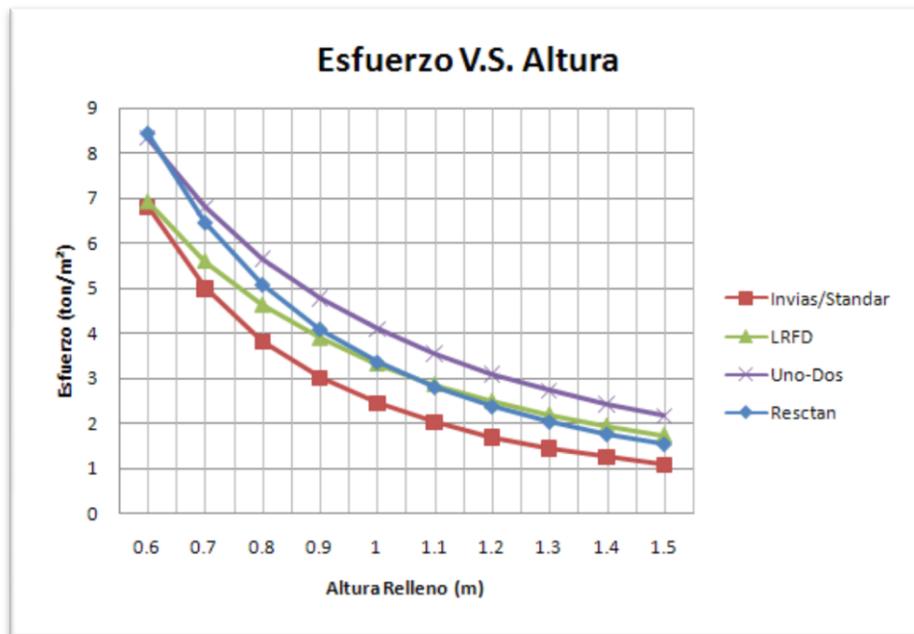


Imagen 4.12: Esquema de la distribución de esfuerzos a través del suelo. [4].

Donde a y b son las dimensiones de la huella en superficie y las nuevas dimensiones son Spread a y Spread b , respectivamente, lo mismo que la dimensión L .

Con base en las diferentes teorías y normativas es posible crear una gráfica en donde se pueda ver como es el comportamiento teórico del esfuerzo para diferentes alturas de relleno (Imagen 4.12). Para el caso en particular se tomó una carga en superficie de 7.5 toneladas distribuidas en una superficie rectangular de lados 0.52m y 0.21m.



Gráfica 4.2: Distribución de esfuerzos para camión estándar con base en las diferentes teorías.

De la gráfica anterior se puede ver como la normativa AASHTO Estándar, que es la misma estipulada en el CCDSP-95, es la menos conservadora de todas. Por otro lado son los métodos teóricos, basados en la teoría de Boussinesq del siglo XIX, los más conservadores de todos. Así, las variaciones en términos de esfuerzo están entre 0 ton/m² y 2 ton/m². Estos valores equivalen entre el 28% y 90% de error tomando como base la normativa AASHTO Estándar.

Por consiguiente, en los diseños estructurales de las estructuras enterradas dependiendo de la metodología que se utilice los valores de las cargas vivas pueden tener variaciones significativas reduciendo o aumentando tanto el refuerzo como las secciones de los elementos estructurales.

5 DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE

El montaje que permitió medir las presiones en campo, fue concebido por los autores y consistió en dos láminas cilíndricas en acero calibre 18 concéntricas de diámetro 25 cm y 50 cm respectivamente. En el anillo se dejaron tres espacios, donde iban a ir colocadas las celdas de carga, espaciadas cada una a 120° (Imagen 5.1). El plano del montaje utilizado en taller para su fabricación se encuentra en Anexo 2.



Imagen 5.1 Esqueleto-Formaleta usado para fundir el concreto del montaje experimental.

Debido a que las celdas de carga (Imagen 5.2) trabajan por medio del sistema en voladizo, y tienen dos puntos de fijación (Imagen 5.3), se colocaron dos varillas de acero roscada de $\frac{1}{2}$ " ($f_y=2530$ kg/cm²) en cada espacio las cuales iban ancladas al anillo. Lo anterior para permitir fijar cada una de las celdas al anillo. Además, el anillo se reforzó con varillas de acero de $\frac{1}{4}$ " (Imagen 5.4) como requerimiento mínimo de las cuantías para un elemento que trabaja tanto en compresión como en tensión anular.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



Imagen 5.2: Celda de Carga tipo LOADTRON.



Imagen 5.3: Mecanismo de trabajo en voladizo de una Celda de Carga tipo LOADTRON.



Imagen 5.4: Anillo con refuerzo y varillas roscadas previo a la fundida.

Por último, el anillo se fundió con concreto de 28 MPa (Imagen 5.5); el método de curado utilizado fue protección con plástico y rocío de agua permanentemente (Imagen 5.6).



Imagen 5.5: Anillo fundido en obra.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



Imagen 5.6: Anillo envuelto con polietileno para su curado.

Una vez que el concreto alcanzó su resistencia máxima a los 28 días, las celdas de carga fueron colocadas en su respectivo lugar y ajustadas al montaje por medio de las varillas roscadas apretadas con tuercas (Imagen 5.7).



Imagen 5.7: Anillo con Celdas de Carga tipo LOADTRON en Laboratorio.

Debido a que las celdas de carga, como su nombre lo indica, miden carga y no esfuerzo o presión, sobre éstas se colocó un plato de 24 cm de diámetro en acero de $\frac{1}{2}$ " de espesor (Imagen 5.8), con el fin de garantizar un espacio controlado de aplicación de carga.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



Imagen 5.8: Montaje final de las celdas de carga.

Así, la manera como se obtienen resultados en términos de presión y no de fuerza equivale a la relación entre la carga registrada por el sistema de celdas y el área del plato.

El esquema general de trabajo para las tres distintas profundidades consideradas se muestra a continuación:

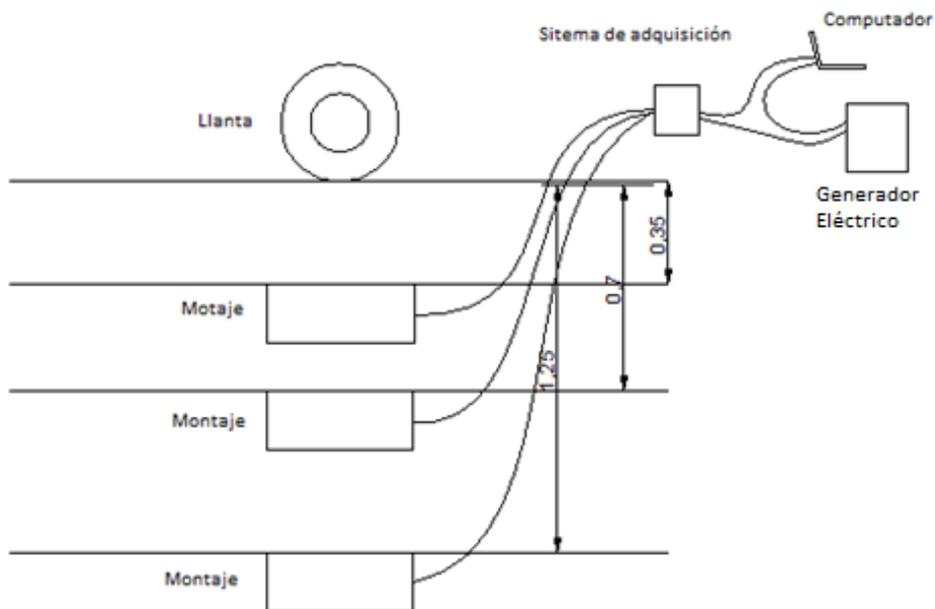


Imagen 5.9: Corte del esquema de trabajo para las distintas profundidades.

6 PARTES DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos consiste en los siguientes elementos (Imagen 6.1):

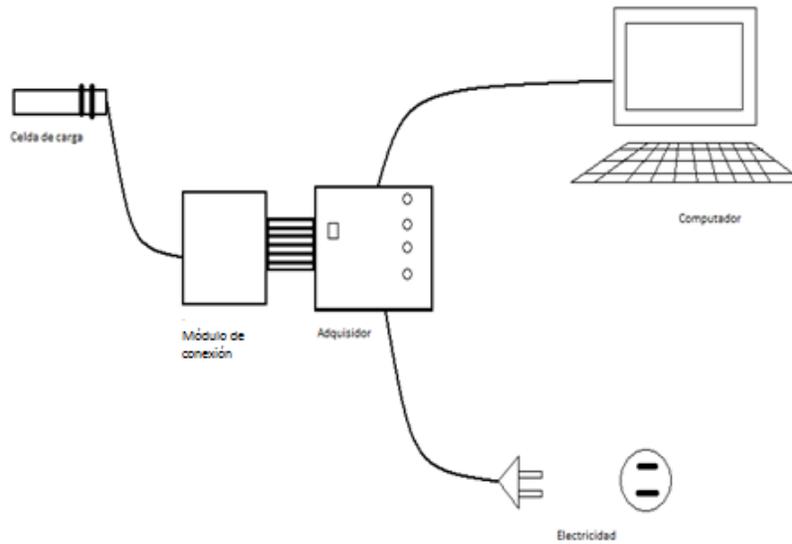


Imagen 6.1: Partes del sistema de adquisición de datos.

6.1 CELDAS DE CARGA



Imagen 6.2: Celda de Carga tipo LOADTRON LSB-23 referencia 9253.

- Datos Generales:
 - Modelo: LSB23-5K lbsSE.
 - Material: Acero Inoxidable.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

- Capacidad: 5KSE (5000 lb).
- Excitación: 10VDC (NOM). 15 VDC (MAX).
- Datos de Calibración:
 - Salida a Escala: 2.999 mv/v.
 - Sobrecarga Segura: 120% 6K lb.
 - Sobrecarga Ultima: 150% 7.5K lb.
 - Error Combinado: 0.017 % del FS.
 - Temperatura de Operación: -35C° +65C°.

6.2 ADQUISIDOR DE DATOS TEXAS NATIONAL INSTRUMENTS

Sistema de digitalización para la toma de datos, NI-SCXI-1000, el cual tiene módulos de acondicionamiento de señal para acelerómetros, para Strain Gages y entradas directas de voltaje. Éste se comunica con un computador a través de un puerto USB, con el cual se tiene control en la configuración de las entradas, frecuencias de muestreo, forma de almacenamiento y proceso en tiempo real de cada señal, si es necesario.



Imagen 6.3: Adquisidor de datos: NI-SCXI-1000 [14].

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

6.3 MÓDULO DE CONEXIÓN

Cada celda de carga tiene sus salidas de señal y alimentación las cuales van conectadas al módulo de conexión NI-SCXI-1520 el cual se conecta al adquirente de datos NI-SCXI-1000. El módulo de conexión es el puente entre las celdas de carga y el adquirente de datos.



Imagen 6.4 Módulo de conexión NI-SCXI-1520 conectado al adquirente de datos NI-SCXI-1000 [4].

6.4 SOFTWARE

Se utilizó el programa Measurements and Automation Explorer para el procesamiento y registro de las señales enviadas por las celdas.



Imagen 6.5: Computador conectado al adquirente de datos con el software de registro instalado.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

7 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Las celdas de carga son conectadas al adquirente de datos por medio del módulo de conexión al cual se conectan las señales de alimentación y señal (Imagen 7.1) de éstas. A su vez el dispositivo se conecta al adquirente de datos por medio de una entrada USB que está conectada al computador. El computador mediante un software especial suministrado por TEXAS NATIONAL INSTRUMENTS y mediante una configuración establecida (Imagen 7.2) es capaz de reconocer y registrar las señales eléctricas enviadas por la celda al adquirente (Imagen 7.3).

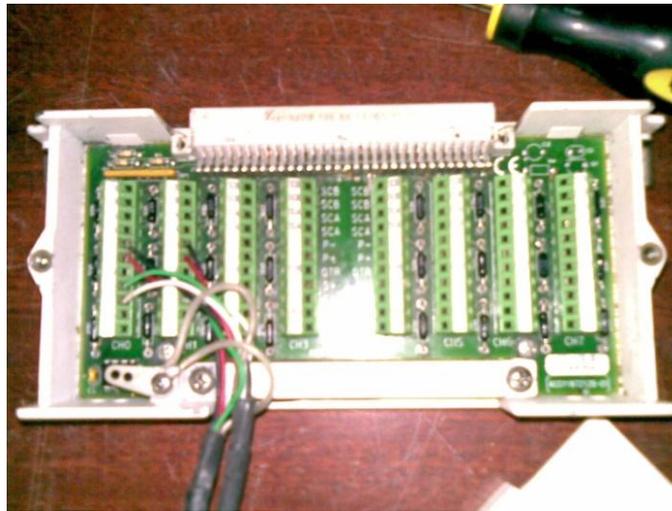


Imagen 7.1 Tarjeta de adquisición de datos donde se conectan las celdas de carga.

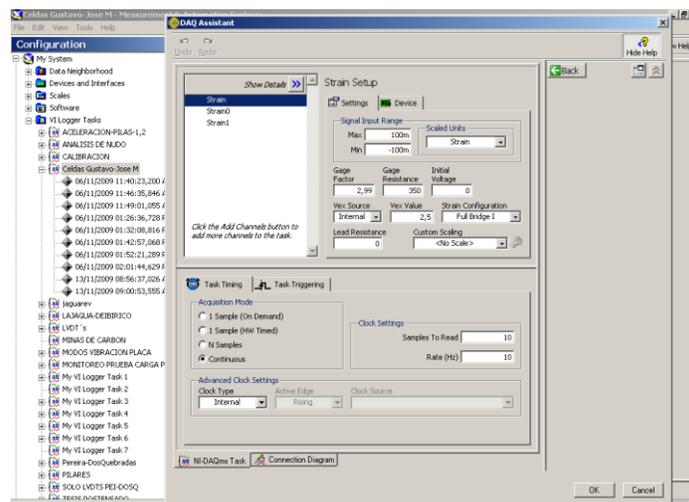


Imagen 7.2 Configuración del software para el registro de las celdas.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

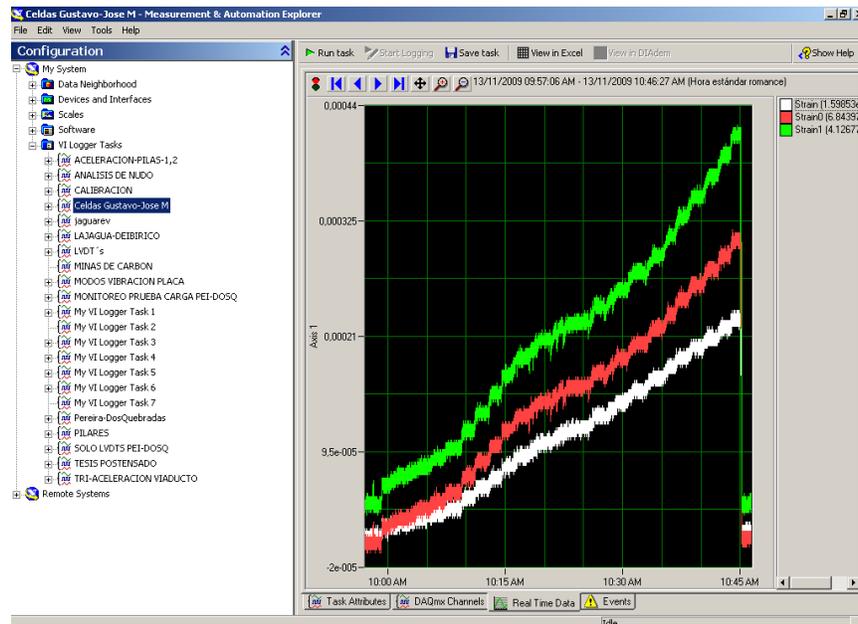
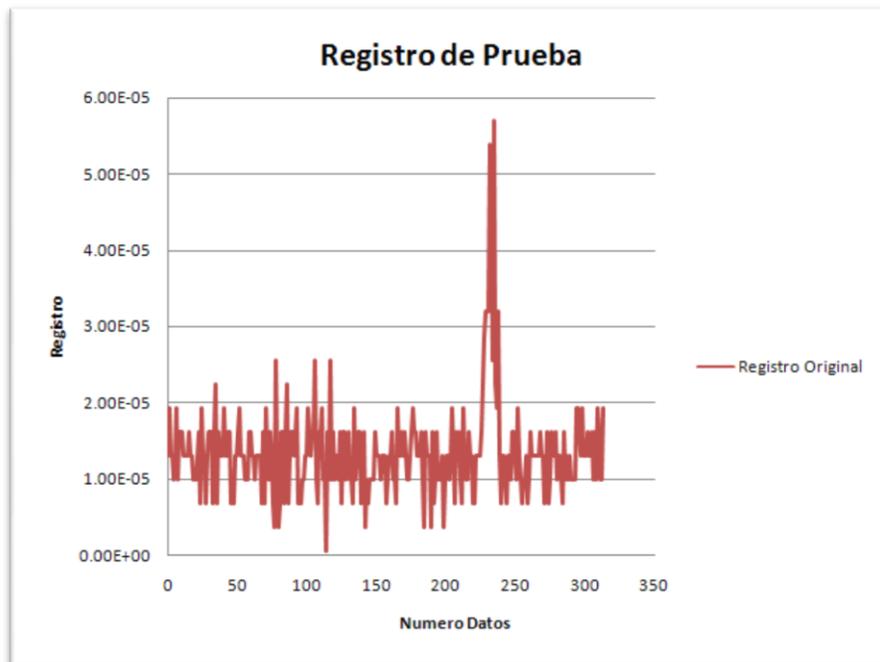


Imagen 7.3 Registro de las celdas en el software durante las pruebas de la actividad de calibración.

La manera como son registrados y presentados los datos por el software es mediante cambios en el voltaje de salida versus el tiempo transcurrido. Así, el sistema es capaz de registrar 1000 datos por segundo. Ya que los registros son señales electrónicas el software establece la línea de ceros para cada celda independientemente de las otras.

Debido a la electrónica de las celdas la adquisición de los datos presenta distorsiones o ruido (Gráfica 7.1), diferentes a los registrados por aumentos de carga. Dicho fenómeno fue filtrado haciendo uso del software MATLAB 7.5.0 (R2007B) mediante un código de programación propuesto por los autores (Anexo 1).



Gráfica 7.1 Registro de prueba: Registro V.S. Número de Datos, donde se evidencia el ruido en la adquisición de datos.

Este código consiste en hacer un doble promedio, hacia atrás y hacia delante de los datos registrados. Para cada valor registrado el código promedia los valores promedios de dicho registro con el anterior y el siguiente, obteniendo la línea base aproximada del registro.

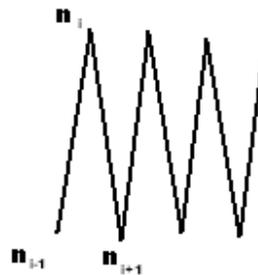


Imagen 7.4 Esquema representativo del ruido en los registros.

El valor definitivo sería:

$$d_i = \frac{\left[\frac{(n_{i-1} + n_i)}{2} + \frac{(n_i + n_{i+1})}{2} \right]}{2}$$

Ecuación 7.1: Ecuación base para el motor del filtrado en el software MATLAB 7.5.0.

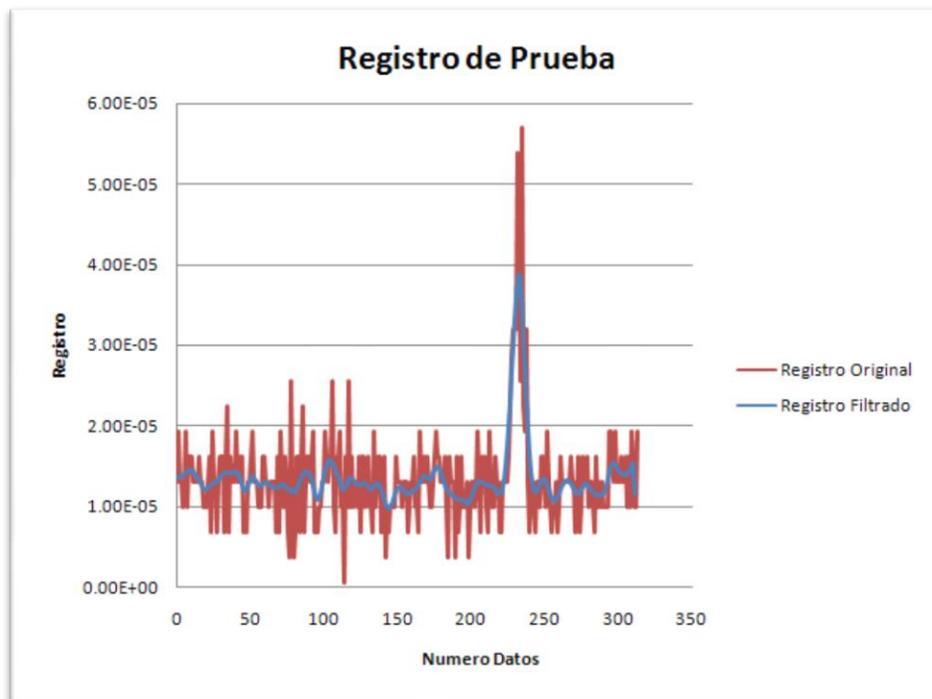
La precisión del código se asume como un valor predeterminado, ej 0.0005, el cual se define como la diferencia entre un registro y el siguiente. Así, el código filtra los datos hasta alcanzar la

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

precisión deseada eliminando el ruido. Lo anterior está sujeto a la calidad de procesamiento del computador disponible.

El resultado del post-proceso hecho a la señal con base en el criterio de ajuste anteriormente expuesto, se muestra en la línea azul de la gráfica 7.2.



Gráfica 7.2: Registro de prueba filtrado: Registro V.S. Número de Datos.

La manera como el software registra los aumentos de carga aplicados a las celdas, mediante incrementos en los valores registrados, hace necesario una calibración del sistema en donde se pueda establecer una relación entre el aumento de la carga y el diferencial de voltaje registrado por el sistema de adquisición de datos.

Esta calibración se realizó en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana haciendo uso de la maquina universal allí existente (Imagen 7.5).

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



Imagen 7.5: Maquina Universal Laboratorio Pontificia Universidad Javeriana.

El proceso de calibración consistió en aplicar carga controlada al montaje mediante un aditamento de la maquina universal (Imagen 7.6) y registrar los datos para las diferentes magnitudes de carga (Imagen 7.7).



Imagen 7.6: Montaje sobre la Maquina Universal.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Se tomaron 24 lecturas, entre 0 kg y 2000 kg. Los registros fueron filtrados mediante el proceso arriba descrito (Ecuación 7.1). El resultado del proceso de filtrado y control de carga fue una gráfica en donde se podía relacionar los valores registrados con la carga aplicada (Grafica 7.3):

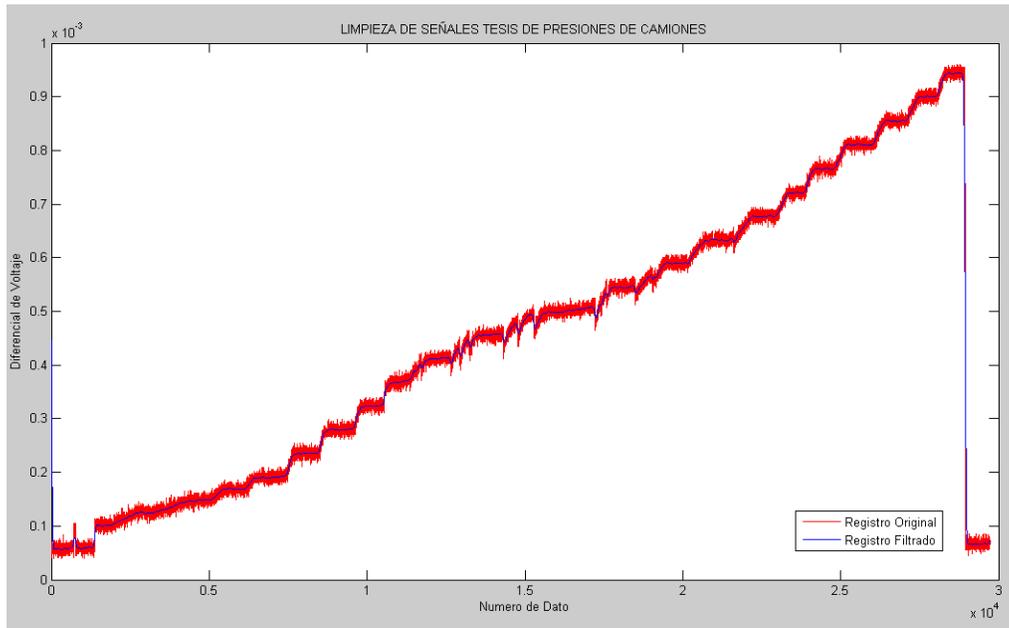
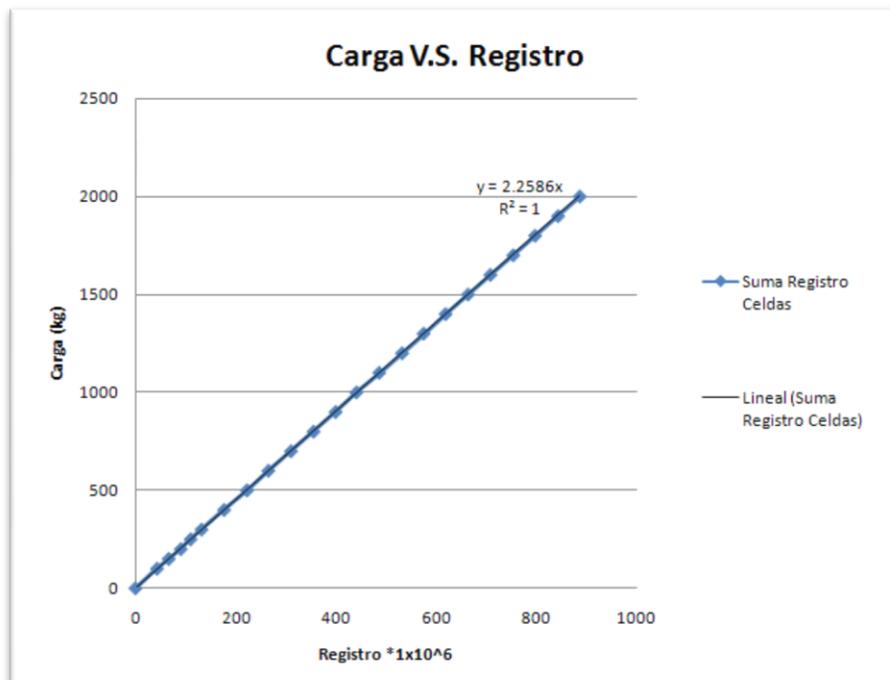


Imagen 7.7: Registro original y filtrado de la calibración del montaje de las celdas de carga en el software MATLAB 7.5.0.



Gráfica 7.3: Calibración del Montaje: Carga (kg) V.S. Registro.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

A los datos obtenidos y graficados en el espacio Registro V.S. Carga se les realizó una regresión lineal cuya ecuación fue:

$$Carga (kg) = 2.2586 \times 10^6 * Registro$$

Ecuación 7.2: de la carga en función del registro.

De esta manera es posible determinar para cada diferencial en la lectura del sistema de celdas en términos de voltaje su respectivo incremento o decremento de carga.

Para corroborar la precisión del trabajo de calibración, se volvió a probar el montaje en la máquina universal y se le aplicaron diferentes valores de carga, 12 en total. A los registros obtenidos luego del proceso de filtración (Imagen 7.8) se les aplicó la Ecuación 7.2 y los resultados están en la Tabla 7.1.

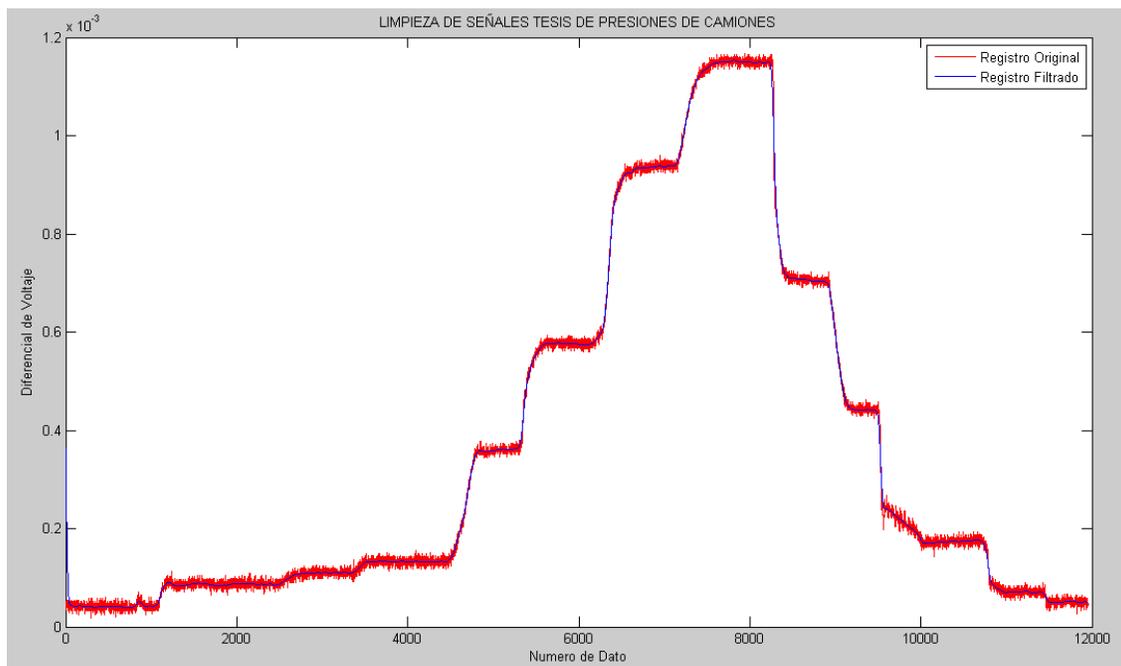


Imagen 7.8: Registro original y filtrado de la re-calibración en el software MATLAB 7.5.0.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Registro	Registro-Cero	Carga (kg)	Carga Real (kg)	Error (%)
4.19E-05	0.00E+00	0.00	0	0
8.82E-05	4.63E-05	104.48	100	4.48
1.10E-04	6.77E-05	152.84	150	1.89
1.33E-04	9.10E-05	205.46	200	2.73
3.60E-04	3.18E-04	718.84	700	2.69
5.74E-04	5.32E-04	1201.51	1200	0.13
9.37E-04	8.95E-04	2021.38	2000	1.07
1.15E-03	1.11E-03	2502.69	2500	0.11
7.07E-04	6.65E-04	1501.45	1500	0.10
4.41E-04	3.99E-04	901.57	900	0.17
1.74E-04	1.32E-04	297.62	300	0.79
7.07E-05	2.07E-05	46.69	50	6.63
			Promedio	1.73

Tabla 7.1: Resultados de la re-calibración y errores.

Los errores obtenidos en la re-calibración se deben básicamente al ruido en la electrónica, a las deformaciones de la celda y del anillo de carga durante la prueba. El error promedio registrado del total de 12 cargas aplicadas fue de 1.73% donde hubo un máximo de 6.63% y un mínimo de 0.10%. Como resultado de esta re-calibración se pudo establecer que a medida que las cargas aplicadas al sistema aumentan su error disminuye significativamente.

8.2 ORGANIGRAMA DE LABORES EN CAMPO

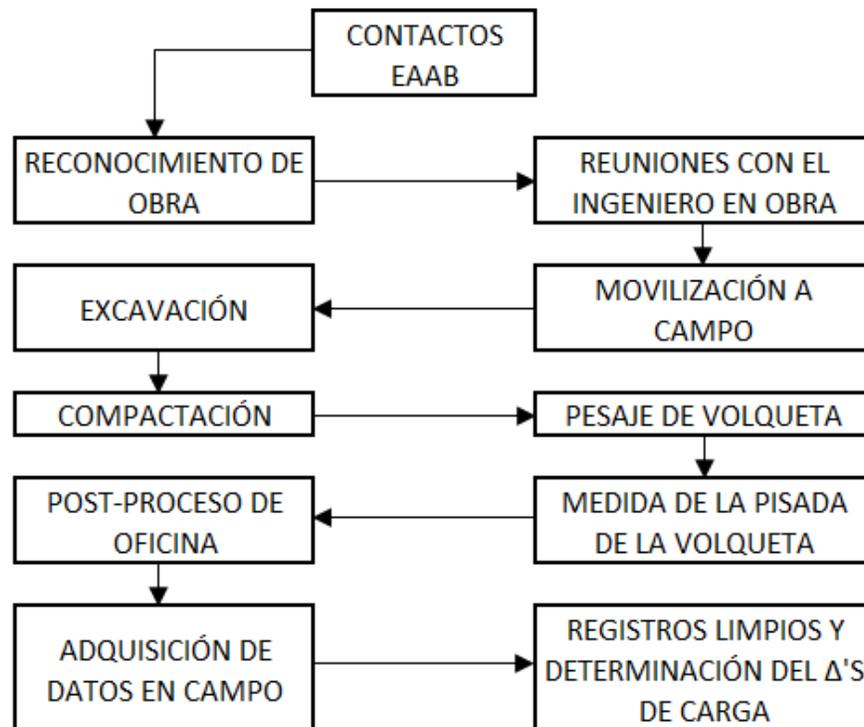


Imagen 8.3: Organigrama de labores en campo.

8.3 MAQUINARIA Y EQUIPOS

8.3.1 Prestados por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

- RETROEXCAVADORA CATERPILLAR 330.
- COMPACTADOR.
- 1 PICA.
- 2 PALAS.

8.3.2 Prestados por la Pontificia Universidad Javeriana

- SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.
- 3 CELDAS DE CARGA LOADTRON.
- CELDA DE CARGA PARA PESAJE DE VOLQUETA.

8.4 ETAPAS DE CAMPO

8.4.1 Resumen de trabajos en campo

- **DÍA 1**

En las horas de la mañana el Acueducto de Bogotá habilitó un lugar de trabajo al costado norte del canal a la altura de la Avenida Ciudad de Cali, donde se hizo entrega de una pala, una pica y un equipo de compactación. Además de esto una volqueta estuvo a nuestra disposición, se facilitó el material de relleno (Imagen 8.2), dos hombres (Imagen 8.4) y la ayuda una retroexcavadora (Imagen 8.2).

Lo primero que se hizo, con ayuda de la retroexcavadora, fue un hueco de aproximadamente 2 metros de profundidad, largo y ancho (Imagen 8.3). Luego se niveló el terreno hasta la cota deseada que fue de 1.25 metros de profundidad donde se instaló el montaje para medir la carga.

Posteriormente se fue rellinando el hueco manualmente compactando capas cada 20 centímetros aproximadamente.

Luego se realizó el pesaje de la volqueta, y se procedió a la medición de la carga.

- **DÍA 2**

En las horas de la mañana se procedió a desenterrar el montaje que se encontraba a 1.25 metros de profundidad. Luego el proceso fue el mismo, se relleno hasta alcanzar la cota deseada 0.70m, posteriormente se instaló el montaje y se volvió a rellenar el hueco compactando el material cada 20 centímetros.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Luego se procedió a pesar la volqueta y a continuación se realizó la medición de la carga a 0.7m de profundidad. Se repitió el mismo procedimiento una vez más solo que la última vez la cota de trabajo fue de 0.35m de profundidad.

8.4.2 Descripción del relleno



Imagen 8.4: Retroexcavadora cargando volqueta con material de trabajo.

El material facilitado en obra por la EAAB fue estudiado posteriormente al trabajo en campo, debido al tiempo y disposición del equipo y personal por parte de la empresa. Los resultados de laboratorio datan de un material arenoso con un tamaño máximo nominal de 2" y un contenido de materia orgánica cercana al 2%. En el capítulo 9 "Ensayos de Laboratorio Resultado y Análisis" se detalla más a fondo el material de relleno utilizado en campo.

8.4.3 Excavación



Imagen 8.5: Excavación mecánica realizada por la retroexcavadora.

Con ayuda de la retroexcavadora se realizó el hueco que se observa en la Imagen 8.5, inicialmente las dimensiones de éste fueron de unos dos metros de profundidad por dos metros de ancho por dos metros y medio de largo aproximadamente. Se pensó en estas dimensiones para que los bulbos de presiones se encontraran dentro del mismo material.

8.4.4 Bases de trabajo



Imagen 8.6: Ayudantes rectificando la profundidad de trabajo.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Por cuestiones de tiempo y disponibilidad únicamente se realizaron tres mediciones, las mínimas para poder graficar una curva. La primera se efectuó a 1.25 metros, la segunda a 0.70 metros y la tercera a 0.35 metros de profundidad.

8.4.5 Compactación



Imagen 8.7: Ayudantes realizando proceso de compactación y nivelación de la cota de trabajo.

La compactación se realizó en capas de aproximadamente 20 centímetros de espesor, por periodos de 10 minutos, donde se agregó agua en cuando el material se encontraba muy seco.

8.4.6 Pesaje de la rueda doble de la volqueta

El pesaje de la volqueta se realizó por medio de una de un pistón de carga que fue enterrado en el suelo. La volqueta utilizada fue de eje sencillo y rueda doble. Se apoyó la llanta sobre una platina metálica para asegurar precisión en la medida. Este mecanismo únicamente media la carga de una rueda por lo que el peso de la rueda doble se asume como el doble de este valor.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

El primer día el peso fue de 2916 kg y el segundo día fue de 3046 kg.



Imagen 8.8: Rueda acercándose al pistón de carga.



Imagen 8.9: Pesaje de la rueda en el pistón de carga.

8.4.7 Adquisición de datos

Los datos se tomaron utilizando un sistema de adquisición que estaba conectado por cables a las celdas de carga. Ese sistema de adquisición estaba vinculado a un computador que registró y guardó las señales enviadas por cada una de las celdas. Se utilizó una planta de generación

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

eléctrica por medio de gasolina para el suministro de energía, se ubicó la rueda doble del eje sencillo de la volqueta pesada sobre el relleno compactado en una posición tal que fuese la misma del montaje en planta y se adquirieron los datos registrados por las celdas.



Imagen 8.10: Rectificación de la ubicación de la rueda doble sobre relleno.



Imagen 8.11: Rueda doble en posición para la medición.



Imagen 8.12: Adquisición de datos, volqueta localizada sobre el área de prueba.

8.4.8 Medida de la pisada de la volqueta

Posterior a la adquisición de datos se registró la medida de la pisada de la rueda doble del eje sencillo de la volqueta. A continuación se muestra un esquema de las medidas obtenidas en campo.

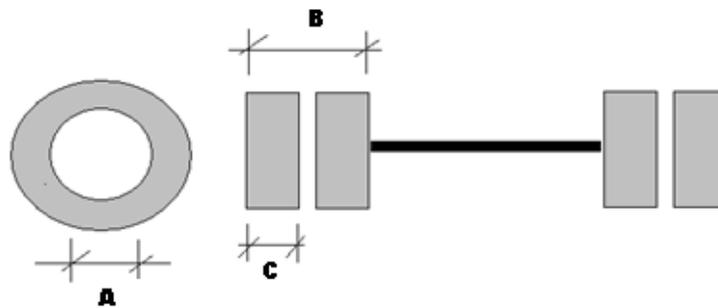


Imagen 8.13: Ilustración del significado de la pisada de una rueda doble de eje sencillo.

Datos medidos:

- A=32cm.
- B=56cm.
- C=25cm.



Imagen 8.14: Medición de la dimensión A de la pisada de la rueda.



Imagen 8.15: Medición de la dimensión B de la pisada de la rueda.

9 ENSAYOS DE LABORATORIO RESULTADOS Y ANÁLISIS

En campo se recogieron dos costales del material utilizado en el relleno para su caracterización. Se realizaron ensayos de límites (líquido E125 y plástico E126), granulometría E123 y contenido de materia orgánica E121 y se compararon los resultados con los requisitos que presenta el INVIAS en su artículo 220 del 2007 para Terraplenes.

9.1 GRANULOMETRÍA I.N.V.E-123

Este ensayo consiste en la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo. Para llevar este procedimiento a cabo se necesita una serie de tamices de distintos tamaños donde se determina el peso retenido con respecto al peso total de la muestra.

9.1.1 Resultados del ensayo de granulometría

Tamiz	% Pasa
3"	100.00
2"	98.31
1 1/2"	94.94
1"	90.81
3/4"	83.73
3/8"	72.71
#4	63.95
#10	57.99
#20	54.21
#40	45.08
#60	34.93
#140	21.71
#200	19.31
Fondo	0.00

Tabla 9.1: Resultados ensayo granulometría

Según esto y basados en la clasificación de la USCS tenemos que éste es un suelo SM-SC. (Arena limoarcillosa).

9.1.2 Análisis de resultados del ensayo de granulometría

El INVIAS en su artículo 610 de la Especificaciones y Normas de Construcción para Carreteras del 2007 remite al artículo 210 donde se presentan los requisitos que deben cumplir los materiales utilizados como rellenos para estructuras:

REQUISITOS DE LOS MATERIALES

Tipo de Material	Seleccionados	Adecuados	Tolerables
Tamaño máximo	75 mm	100 mm	150 mm
Pasa tamiz de 75 μ m (No.200)	$\leq 25\%$ en peso	$\leq 35\%$ en peso	$\leq 35\%$ en peso
C.B.R. de laboratorio	≥ 10	≥ 5	≥ 3
Expansión en prueba C.B.R.	0%	< 2%	< 2%
Contenido de materia orgánica	0%	< 1%	< 2%
Límite líquido	< 30	< 40	< 40
Índice plástico	< 10	< 15	-

Tabla 9.2: Requisitos granulometría [11].

Según los resultados obtenidos el tamaño máximo de la muestra fue de 2 pulgadas que es equivalente a 50.8 mm que es inferior a los 150mm que presenta la tabla 9.2

Así mismo el porcentaje en peso que pasa el tamiz número 200 fue del 19%, estando dentro del rango que exigen los requisitos del INVIAS (menor o igual al 35% en peso)

9.2 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA I.N.V.E 121:

Este ensayo consiste en la determinación del contenido orgánico por el método de “pérdida por ignición” y se hace para cuantificar la cantidad de materia vegetal relativamente no descompuesta ni deteriorada o materiales de plantas frescas como madera, raíces, pasto o materiales carbonáceos como lignito, carbón, etc. presentes en el suelo. Este método

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

sirve para determinar la oxidación cuantitativa de materia orgánica en tales materiales y proporciona una estimación válida del contenido orgánico.

9.2.1 Resultado del ensayo de contenido de materia orgánica

El contenido orgánico se expresa como un porcentaje del peso del suelo seco en el horno, se calcula de la siguiente forma:

$$\%Materia\ orgánica = \frac{A - B}{B - C} \times 100$$

Ecuación 9.1: Porcentaje de materia orgánica.

Donde:

A = Peso del crisol o plato de evaporación y del suelo seco al horno antes de la ignición.

B = Peso del crisol o plato de evaporación y del suelo seco después de la ignición.

C = Peso del crisol o plato de evaporación, con aproximación a 0.01. Gramos.

Los resultados de A, B y C son los siguientes:

A (g)	103.46
B (g)	102.76
C (g)	70.96
% Materia Orgánica	2.201

Tabla 9.3: Resultados contenido materia orgánica.

9.2.2 Análisis de resultados del ensayo de cantidad de materia orgánica

El INVIAS en su artículo 220 del 2007 presenta los siguientes requisitos para el ensayo de Cantidad de de materia orgánica:

REQUISITOS DE LOS MATERIALES

Tipo de Material	Seleccionados	Adecuados	Tolerables
Tamaño máximo	75 mm	100 mm	150 mm
Pasa tamiz de 75 μ m (No.200)	\leq 25% en peso	\leq 35% en peso	\leq 35% en peso
C.B.R. de laboratorio	\geq 10	\geq 5	\geq 3
Expansión en prueba C.B.R.	0%	< 2%	<2%
Contenido de materia orgánica	0%	<1%	<2%
Límite líquido	< 30	<40	<40
Índice plástico	<10	<15	-

Tabla 9.4: Requisitos contenido de materia orgánica [11].

Según estos requisitos, el % obtenido (2.2%) es ligeramente mayor que el límite que exige el INVIAS (menor a 2%).

9.3 LÍMITE LÍQUIDO I.N.V.E-125:

El ensayo de límite líquido expresa el contenido de humedad en porcentaje del suelo secado en horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. Este procedimiento se realiza por medio de la cazuela de Casagrande en la cual se ubica el material que ha sufrido un procedimiento previo de humedecimiento, en el cual se hace una separación y se cuenta el número de golpes que necesita la cazuela para que el material se cierre. Esto se realiza para tres muestras diferentes con distinta humedad donde el número de golpes tiene que ir cambiando a medida que se le agregue más o menos agua. Luego se calcula el contenido de humedad (el cociente entre el peso del agua y el peso de la muestra secada en horno *100) de cada una de las muestras.

9.3.1 Resultados del ensayo de límite líquido

El material no presentó límite líquido, a distintas humedades no fue posible realizar la separación en la cazuela de Casagrande sin evitar que el material se despegara y fraccionara al pasar el ranurador.

9.3.2 Análisis de resultados del ensayo de límite líquido

El INVIAS en su artículo 220 del 2007 presenta los siguientes requisitos para el ensayo de Límite Líquido:

REQUISITOS DE LOS MATERIALES

Tipo de Material	Seleccionados	Adecuados	Tolerables
Tamaño máximo	75 mm	100 mm	150 mm
Pasa tamiz de 75 μ m (No.200)	$\leq 25\%$ en peso	$\leq 35\%$ en peso	$\leq 35\%$ en peso
C.B.R. de laboratorio	≥ 10	≥ 5	≥ 3
Expansión en prueba C.B.R.	0%	< 2%	< 2%
Contenido de materia orgánica	0%	< 1%	< 2%
Límite líquido	< 30	< 40	< 40
Índice plástico	< 10	< 15	-

Tabla 9.5 Requisitos límite líquido [11].

Según esta tabla se puede ver que el resultado obtenido en el laboratorio es admisible en los requisitos del INVIAS, puesto que es menor a 40.

9.4 LÍMITE PLÁSTICO I.N.V.E-126

Este ensayo consiste en la determinación del límite plástico del suelo y el cálculo del índice de plasticidad conociendo el límite líquido del mismo. El procedimiento consiste en la realización de una serie de cilindros de diámetro de 3.2mm evitando el desmoronamiento.

9.4.1 Resultados de límite plástico

No fue posible realizar los cilindros del diámetro que requiere el ensayo sin que la muestra se desmoronara, por lo tanto no presenta límite plástico.

9.4.2 Análisis de resultados de límite plástico

El INVIAS en su artículo 220 del 2007 presenta los siguientes requisitos para el ensayo de Límite Plástico:

REQUISITOS DE LOS MATERIALES

Tipo de Material	Seleccionados	Adecuados	Tolerables
Tamaño máximo	75 mm	100 mm	150 mm
Pasa tamiz de 75 μ m (No.200)	$\leq 25\%$ en peso	$\leq 35\%$ en peso	$\leq 35\%$ en peso
C.B.R. de laboratorio	≥ 10	≥ 5	≥ 3
Expansión en prueba C.B.R.	0%	< 2%	< 2%
Contenido de materia orgánica	0%	< 1%	< 2%
Límite líquido	< 30	< 40	< 40
Índice plástico	< 10	< 15	-

Tabla 9.6 Requisitos límite plástico [11].

Según esta tabla, el INVIAS no presenta requisito de índice plástico para tipo de material tolerable, aunque se puede ver que entre más óptimo sea el material menor índice plástico debe tener, lo que significa que el resultado (no plástico) del material trabajado es beneficioso para la construcción de terraplenes.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

10 POST-PROCESO DE LAS SEÑALES OBTENIDAS EN CAMPO

La primera medida realizada en campo fue a una profundidad de 1.25m. La carga de la rueda doble del eje sencillo de la volqueta fue 2916 kg y el registro inicial y filtrado fue:

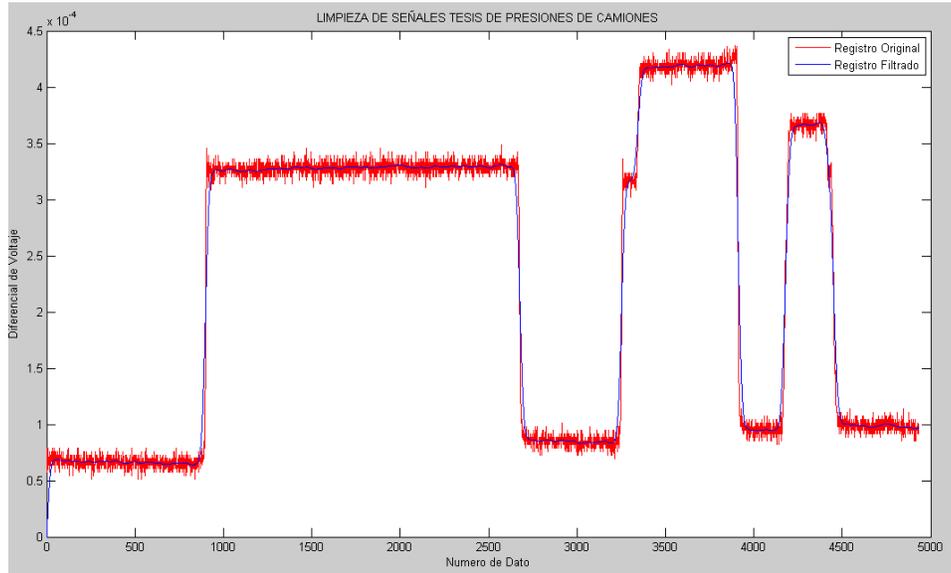


Imagen 10.1 Registro original y filtrado a una profundidad de 1.25m.

La segunda medida realizada en campo fue a una profundidad de 0.70m. La carga de la rueda doble del eje sencillo de la volqueta fue 3046 kg y el registro inicial y filtrado fue:

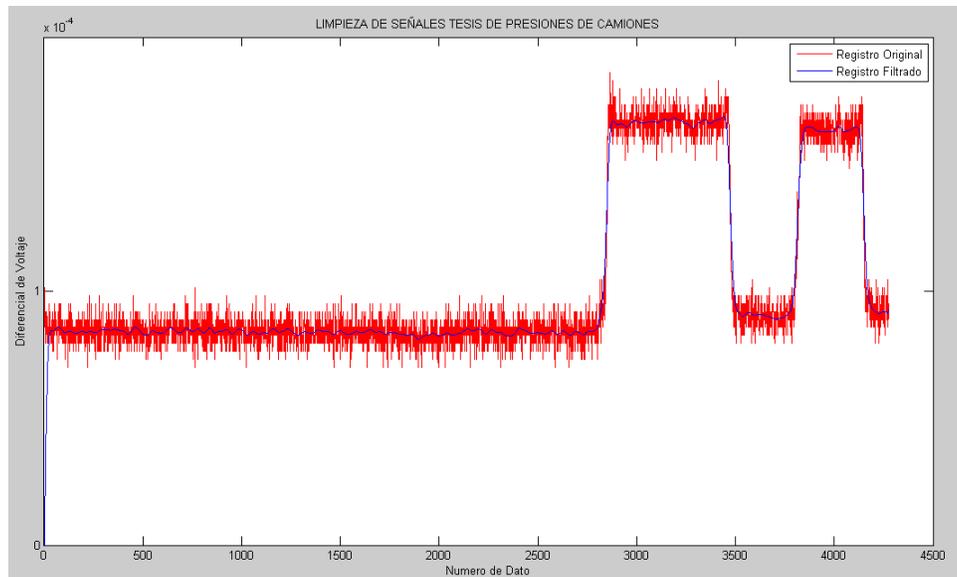


Imagen 10.2: Registro original y filtrado a una profundidad de 0.70m.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

La medida realizada en campo fue a una profundidad de 0.35m. La carga de la rueda doble del eje sencillo de la volqueta fue 3046 kg y el registro inicial y filtrado fue:

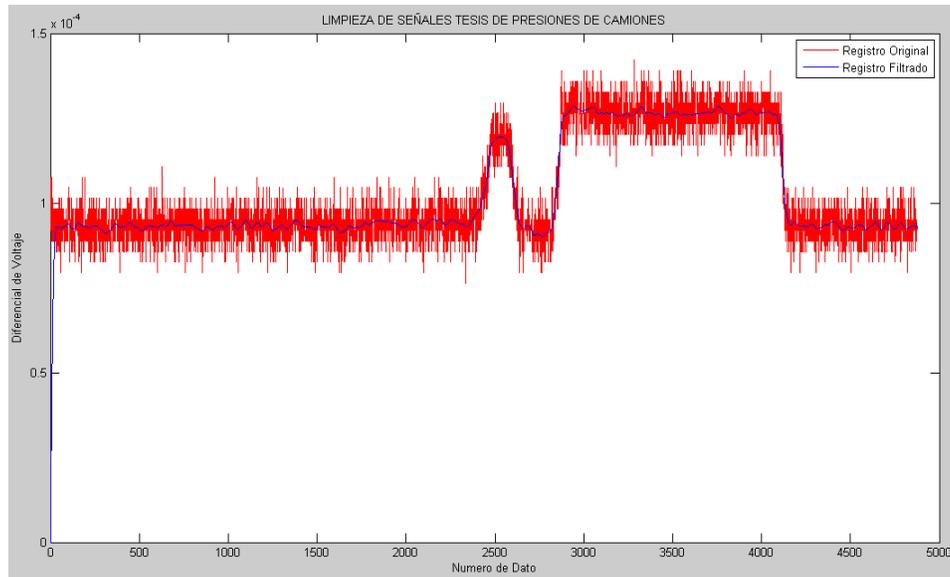


Imagen 10.3: Registro original y filtrado a una profundidad de 0.35m.

Luego de filtrar las señales para cada profundidad se obtuvieron datos para el cero registrado antes de localizar la volqueta en el área de prueba, equivalente al peso del suelo sobre el montaje, y el valor registrado efecto de la pisada de la volqueta. La diferencia entre los dos registros es la carga registrada por el montaje, efecto únicamente de la sobrecarga producida por la volqueta. Así, los valores de carga, obtenidos luego de aplicar la Ecuación 7.2, registrados fueron:

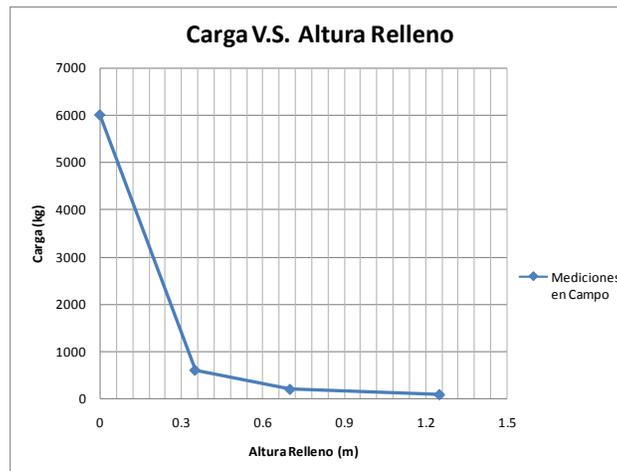
Altura Relleno (m)	Carga Registrada (kg)
0	6000
0.35	593.54
0.7	187.73
1.25	74.85

Tabla 10.1: Valores de carga para las profundidades trabajadas en campo.

Gráficamente se puede ver como la carga a medida que el montaje se localiza de manera más profunda se disipa:

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



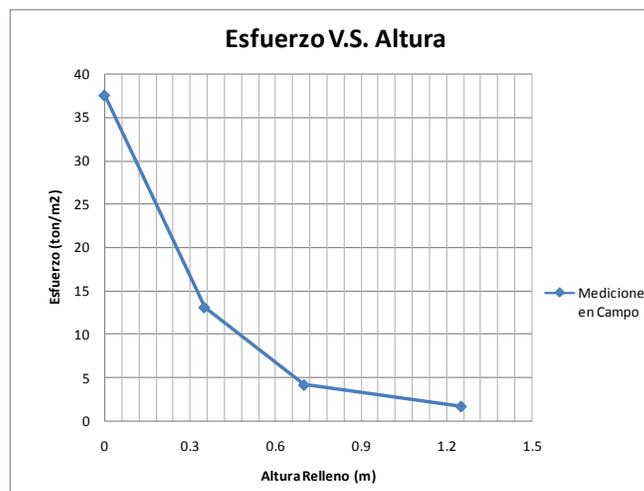
Gráfica 10.1: Disipación de la carga con la profundidad en campo: Carga (kg) V.S. Altura de Relleno (m).

Debido a que el CCDSP-95 establece la disipación de carga a través de rellenos por medio de esfuerzos y no de fuerzas, los valores obtenidos fueron divididos por el área del plato del montaje, 452 cm², obteniendo los siguientes resultados:

Altura Relleno (m)	Carga Registrada (kg)	Esfuerzo (ton/m ²)
0	6000	37.50
0.35	593.54	13.06
0.7	187.73	4.13
1.25	74.85	1.66

Tabla 10.2: Valores de esfuerzo para las profundidades trabajadas en campo.

Gráficamente estos resultados son:



Gráfica 10.2: Disipación del esfuerzo con la profundidad en campo: Esfuerzo (ton/m²) V.S. Altura de Relleno (m).

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Con los valores de carga medidos de la rueda doble del eje sencillo de la volqueta y aplicando la formulación teórica del CCDSP-95:

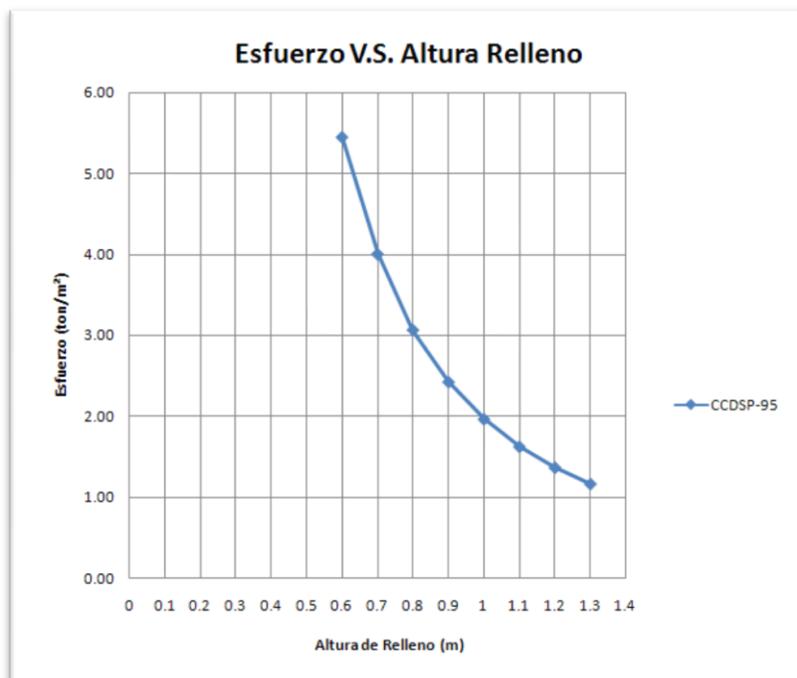
$$\text{Esfuerzo} \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right) = \frac{\text{Carga}(\text{ton})}{(1.75 * \text{altura relleno} (\text{m}))^2}$$

Ecuación 10.1: Esfuerzo calculado para diferentes profundidades.

Se obtiene la siguiente distribución de esfuerzos:

Altura Relleno (m)	CCDSP-95
0.3	NA
0.4	NA
0.5	NA
0.6	5.44
0.7	4.00
0.8	3.06
0.9	2.42
1	1.96
1.1	1.62
1.2	1.36
1.3	1.16

Tabla 10.3: Valores de esfuerzo según Ecuación 10.1.



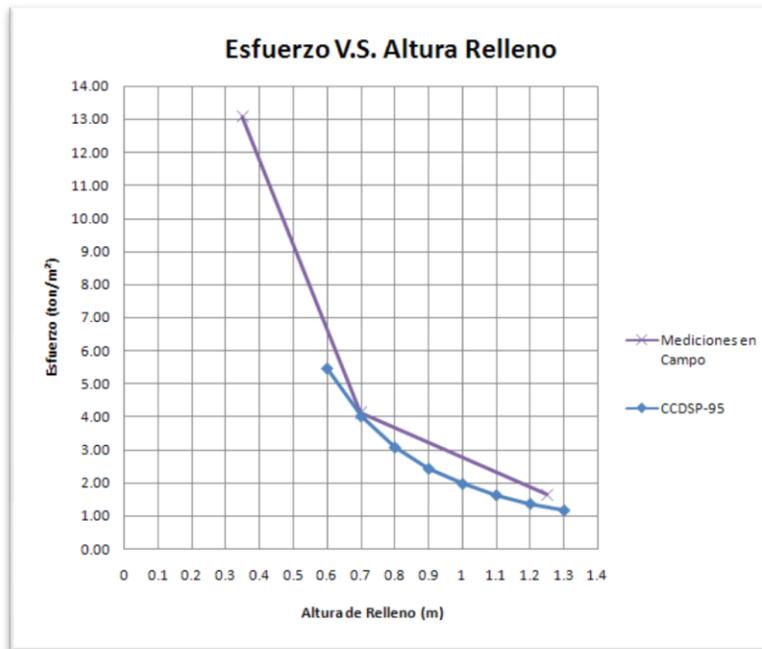
Gráfica 10.3: Disipación del esfuerzo con la profundidad teórica: Esfuerzo (ton/m²) V.S. Altura de Relleno (m).

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Cabe recordar que dicha teoría aplica únicamente para rellenos mayores a 0.60m y menores a 2.5m.

Gráficamente los esfuerzos registrados en campo en comparación con los obtenidos teóricamente con base en la medición realizada en campo de la rueda doble del eje sencillo de la volqueta son:



Gráfica 10.4: Disipación del esfuerzo con la profundidad en campo y teórica: Esfuerzo (ton/m²) V.S. Altura de Relleno (m).

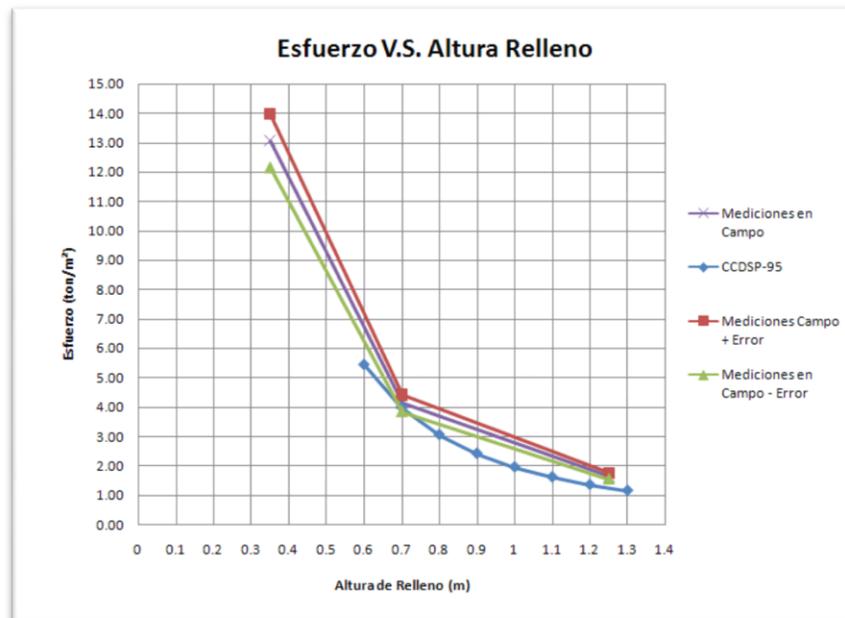
Altura Relleno (m)	Esfuerzo (ton/m ²)		Diferencia (ton/m ²)	Variación (%)
	Campo	CCDSP-95		
0.35	13.06	NA	NA	NA
0.7	4.13	4.00	0.13	3.34
1.25	1.66	1.25	0.41	32.63

Tabla 10.4: Valores del esfuerzo teórico y en campo y su diferencia para las profundidades trabajadas en campo.

Debido al error del sistema los resultados se pueden graficar en un rango probable de 7% más o menos el valor promedio, de la siguiente manera:

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



Gráfica 10.5: Disipación del esfuerzo con la profundidad teórica, en campo y su franja de error: Esfuerzo (ton/m²) V.S. Altura de Relleno (m).

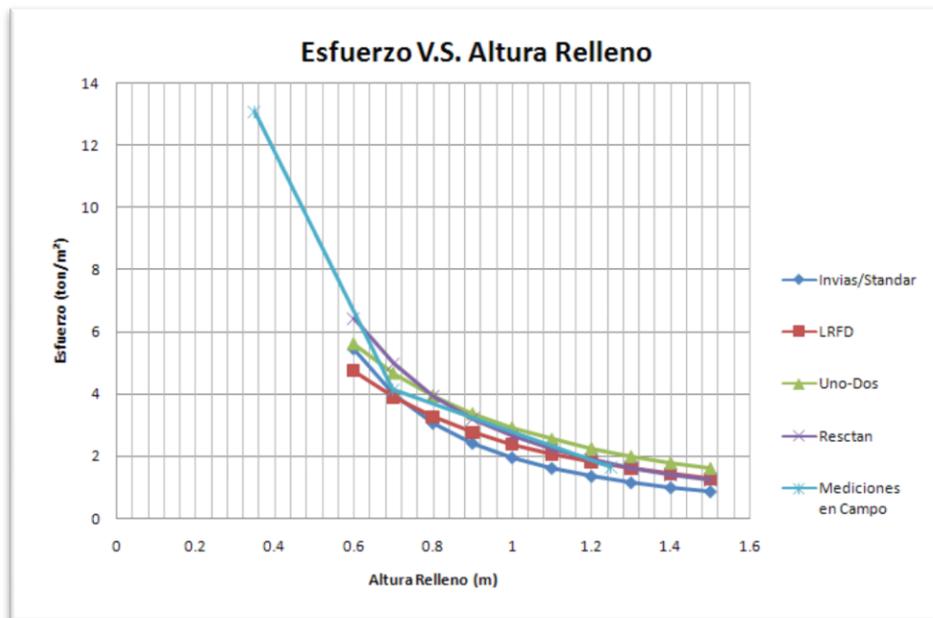
Altura Relleno (m)	Esfuerzo (ton/m ²)				Diferencia Máx (ton/m ²)	Variación Máx (%)
	Campo - Error	Campo	Campo + Error	CCDSP-95		
0.35	12.15	13.06	13.98	NA	NA	NA
0.7	3.84	4.13	4.42	4.00	0.42	10.57
1.25	1.54	1.66	1.77	1.25	0.52	41.91

Tabla 10.5 Valores del esfuerzo teórico, en campo, su diferencia y errores máximos para las profundidades trabajadas en campo.

Con base en los resultados obtenido en campo y aplicando las diferentes metodologías teóricas y estipuladas en las diferentes normativas se obtiene una gráfica comparativa de la disipación del esfuerzo aplicado en superficie a medida que la profundidad aumenta (Gráfica 10.6). Para cada aplicación teórica se utilizaron los valores de carga y área de contacto medidos en campo.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



Gráfica 10.6: Distribución de esfuerzos para pisada y carga medida en campo para diferentes teorías y medida en campo.

La carga para el cálculo de las curvas de Gráfica 10.6 fue de 6.000 kg distribuida en un área de contacto rectangular de 0.32m por 0.56m, área que fue medida en campo (Imagen 8.13)

De las diferentes metodologías teóricas para el cálculo de la distribución de esfuerzos en rellenos a medida que la altura de éste es mayor, tomando como datos de entrada las variables medidas en campo, la establecida por el CCDSP-95 es la menos conservadora de todas como se observa en la Gráfica 10.7, al disparar en mayor magnitud el esfuerzo inicial. De la misma gráfica también se puede observar que las mediciones en campo son muy similares a las obtenidas por la metodología AASTHO LRFD, y que las metodologías Resctan y Uno-Dos son las que mayores esfuerzos presentan para una misma altura de relleno en comparación con las demás metodologías, sino así las que en menor proporción reducen el esfuerzo aplicado en superficie.

11 MODELACIÓN DE BOX CULVERT

Con el fin de poder determinar la influencia del cambio en la magnitud de la carga viva para las dos profundidades trabajadas en campo, medidas V.S. teóricas, en el diseño de las estructuras enterradas, se modelaron dos tipo de Box Culvert en concreto reforzado en el software SAP 2000 cada uno para dos alturas de relleno distintas.

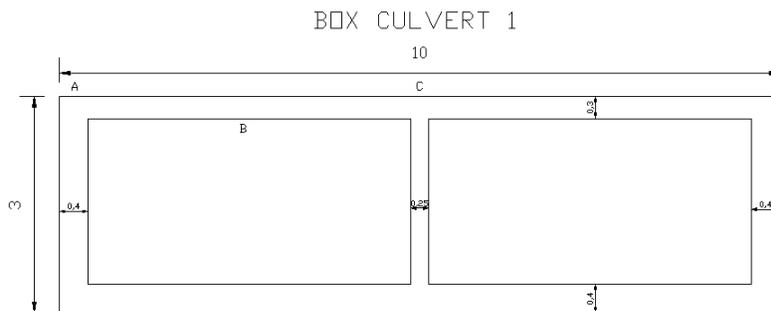


Imagen 11.1: Corte del Box Culvert 1 acotado en metros.

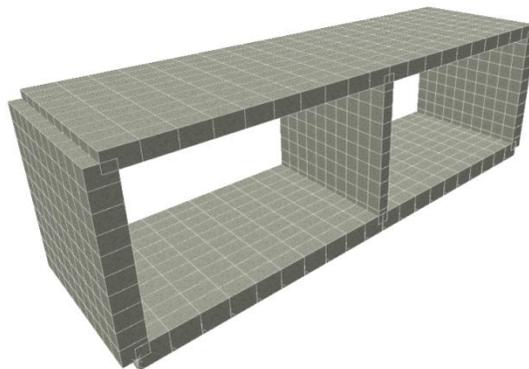


Imagen 11.2: Modelo Box Culvert 1 en SAP 2000.

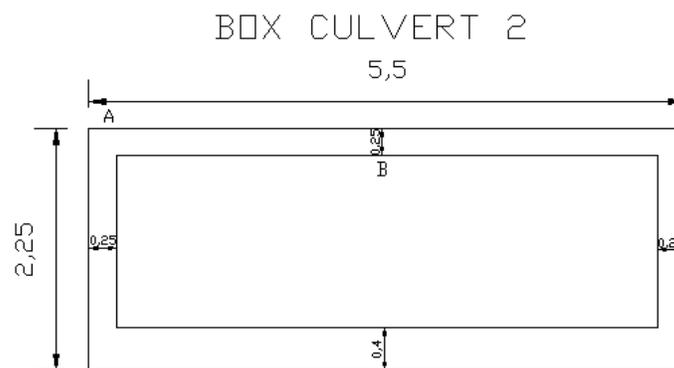


Imagen 11.3: Corte del Box Culvert 2 acotado en metros.

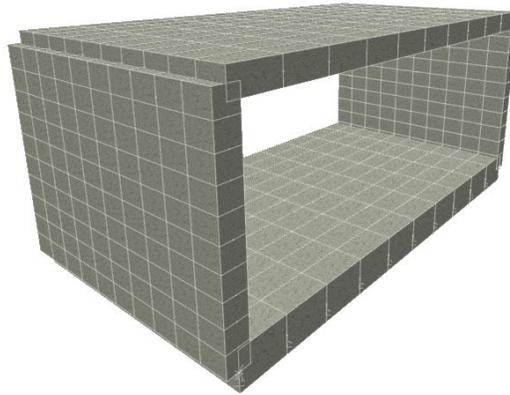


Imagen 11.4: Modelo Box Culvert 2 en SAP 2000.

11.1 DATOS INICIALES PARA LA MODELACIÓN Y CARGAS IMPUESTAS AL MODELO

Los datos iniciales requeridos para la cuantificación de las cargas como para la modelación en el software SAP 2000 se presentan en la siguiente tabla:

γ Suelo (ton/m ³)	1.8
γ Concreto (ton/m ³)	2.4
Ángulo Fricción Suelo (°)	30
Coefficiente Presión Tierra en Reposo (K ₀)	0.5
Módulo de Reacción del Suelo (KN/m ³)	200000

Tabla 11.1: Datos iniciales para la cuantificación de las cargas y modelación de los Box Culvert en el software SAP 2000.

Las alturas del relleno fueron de 0.70m y 1.25m.

Las cargas impuestas al modelo fueron las siguientes:

- Peso Propio del Box Culvert: Es la carga producto del peso de la estructura misma.
- Peso Suelo Superior: Es la carga producto del peso del relleno sobre el Box Culvert.
- Presión Lateral de Tierras: Es la carga producida en los muros laterales del suelo a causa de su empuje lateral.
- Carga Viva: Es el esfuerzo disipado por el relleno sobre la losa superior producto del paso de vehículos sobre el Box Culvert en superficie. Para cada modelo se tomó la carga viva

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

como resultado de la aplicación de la formulación estipulada en el CCDSP-95 y los valores de esfuerzo registrados en campo.

La carga viva para la altura de 0.70m fue:

Carga Viva CCDSP-95 (ton/m ²)	4.00
Carga Viva Campo (ton/m ²)	4.13
Variación (%)	3.25

Tabla 11.2: Valores de carga viva para la altura de relleno de 0.70m según el CCDSP-95 y las registradas en campo.

La carga viva para la altura de 1.25m fue:

Carga Viva CCDSP-95 (ton/m ²)	1.25
Carga Viva Campo (ton/m ²)	1.66
Variación (%)	32.8

Tabla 11.3: Valores de carga viva para la altura de relleno de 1.25m según el CCDSP-95 y las registradas en campo.

La combinación de carga estudiada es la del Grupo I de la Tabla A.3.12-1 del CCDSP-95:

$$\text{Grupo I: } 1.3 * (D + 1.67 * L + E)$$

Ecuación 11.1: Combinación de cargas Grupo I CCDSP-95.

Donde:

D: Carga Muerta, peso propio del box y peso del suelo superior.

L: Carga Viva, CCDSP-95 y medida en campo.

E: Empuje de Tierra, presión lateral de tierras.

La revisión del diseño se efectuó únicamente para la losa superior de los diferentes Box Culvert para solicitaciones a cortante y momento en los puntos especificados en los planos como resultado de la aplicación de las cargas respectivas y su combinación.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Los materiales utilizados para el diseño tienen las siguientes características:

Acero	
f_y (ton/m ²)	42000
Concreto	
f'_c (ton/m ²)	2100
E (ton/m ²)	1787205

Tabla 11.4: Especificaciones materiales para el diseño de los Box Culvert.

11.2 SOLICITACIONES A MOMENTO

11.2.1 Solicitaciones a momento Box Culvert 1

Altura Relleno: 0.70m

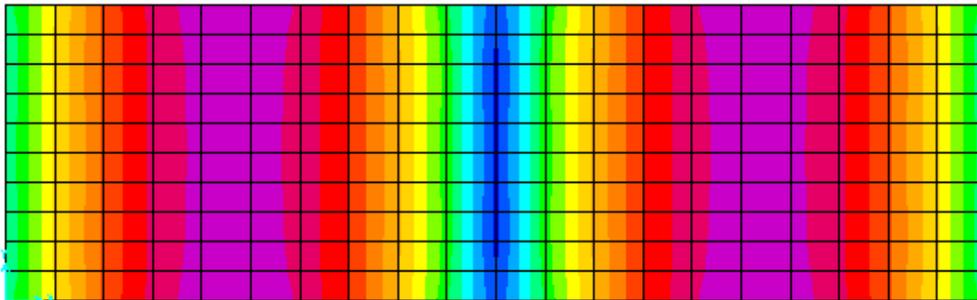


Imagen 11.5: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según CCDSP-95.
Unidades: ton-m.

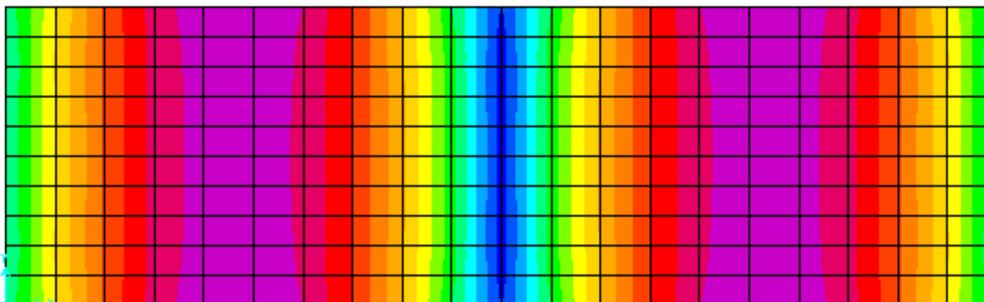


Imagen 11.6: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según mediciones en CAMPO.
Unidades: ton-m.

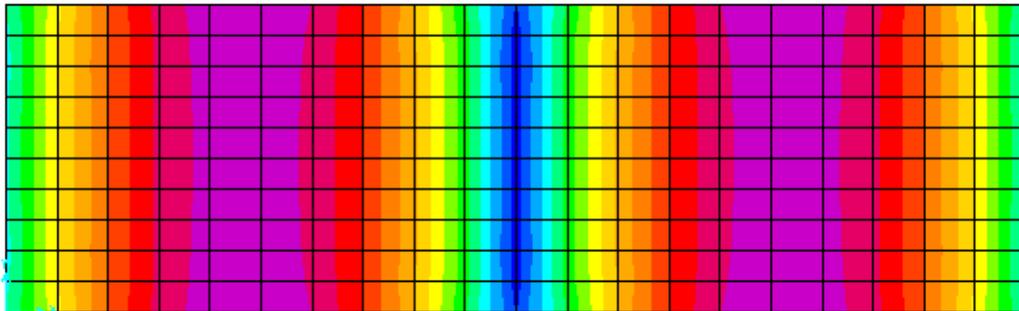
ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

	Momento (ton-m)		
	CCDSP-95	CAMPO	Variación (%)
Punto A (Borde)	14.75	15.13	2.58
Punto B (Centro)	10.70	10.95	2.34
Punto C (Medio)	21.17	21.67	2.36

Tabla 11.5: Solicitaciones a momento losa superior Box Culvert 1 en puntos A, B, C para una altura de relleno de 0.70m.

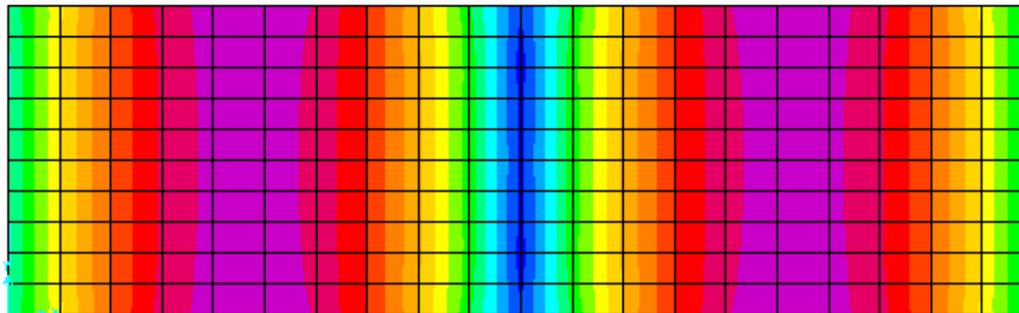
Altura Relleno: 1.25m



-6.0 -4.5 -3.0 -1.5 0.0 1.5 3.0 4.5 6.0 7.5 9.0 10.5 12.0 13.5

Imagen 11.7: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según CCDSP-95.

Unidades: ton-m.



-6.8 -5.1 -3.4 -1.7 0.0 1.7 3.4 5.1 6.8 8.5 10.2 11.9 13.6 15.3

Imagen 11.8: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según mediciones en CAMPO.

Unidades: ton-m.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

	<i>Momento (ton-m)</i>		
	CCDSP-95	CAMPO	Variación (%)
Punto A (Borde)	9.78	10.81	10.53
Punto B (Centro)	6.81	7.60	11.60
Punto C (Medio)	13.47	15.05	11.73

Tabla 11.6: Solicitaciones a momento losa superior Box Culvert 1 en puntos A, B, C para una altura de relleno de 1.25m.

11.2.2 Solicitaciones a momento Box Culvert 2

Altura Relleno: 0.70m

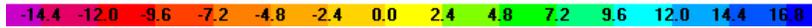
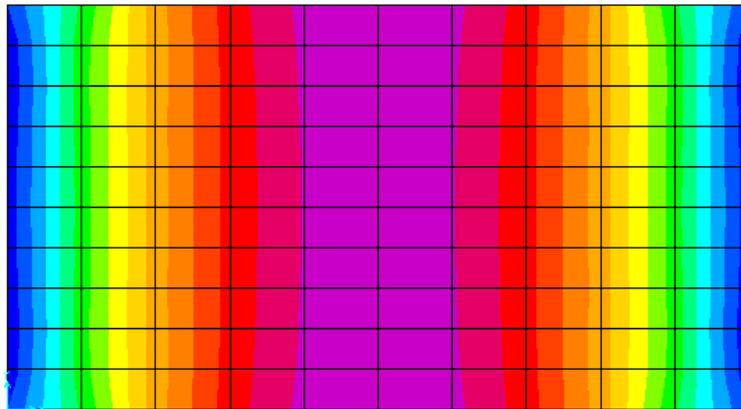


Imagen 11.9: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según CCDSP-95.

Unidades: ton-m.

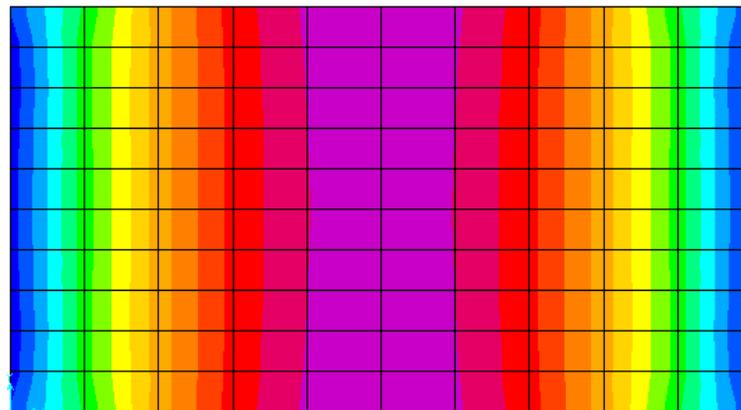


Imagen 11.10: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según mediciones en CAMPO.

Unidades: ton-m.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

	Momento (ton-m)		
	CCDSP-95	CAMPO	Variación (%)
Punto A (Borde)	18.18	18.44	1.43
Punto B (Centro)	15.94	16.33	2.45

Tabla 11.7: Solicitaciones a momento losa superior Box Culvert 2 en puntos A, B para una altura de relleno de 0.70m.

Altura Relleno: 1.25m

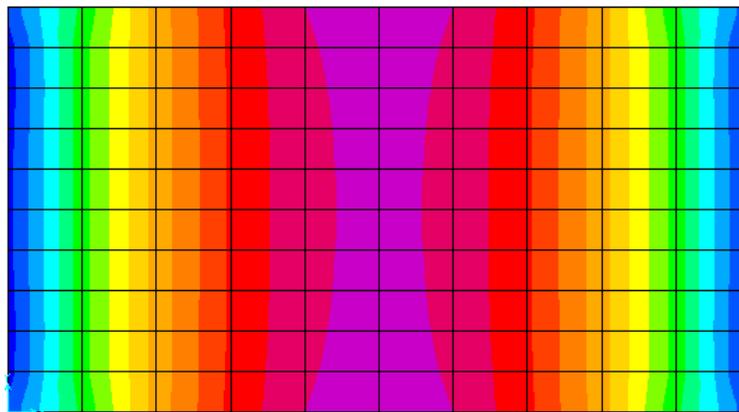


Imagen 11.11: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según CCDSP-95.

Unidades: ton-m.

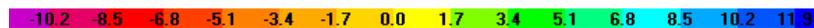
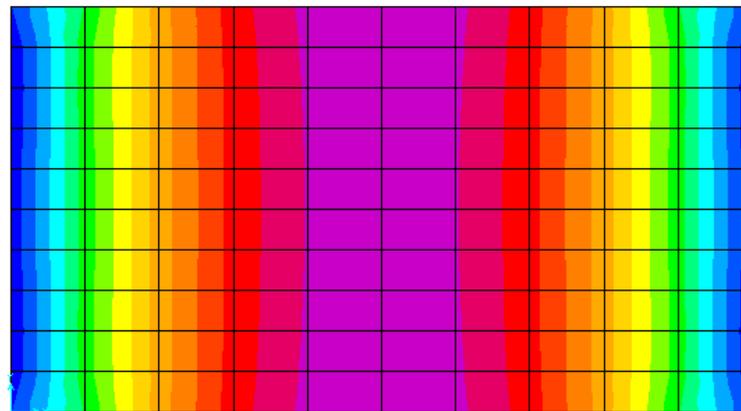


Imagen 11.12: Diagrama de momento losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según mediciones en CAMPO.

Unidades: ton-m.

	<i>Momento (ton-m)</i>		
	CCDSP-95	CAMPO	Variación (%)
Punto A (Borde)	11.6	12.94	11.55
Punto B (Centro)	10.1	11.31	11.98

Tabla 11.8: Solicitaciones a momento losa superior Box Culvert 2 en puntos A, B para una altura de relleno de 1.25m.

11.3 SOLICITACIONES A CORTANTE

La losa superior de los Box Culvert no lleva refuerzo a cortante por lo que el dato de revisión de diseño, específicamente la revisión del espesor, se realizó para el valor de sollicitación máxima para los diferentes casos de análisis.

11.3.1 Solicitaciones a cortante Box Culvert 1

Altura Relleno: 0.70m

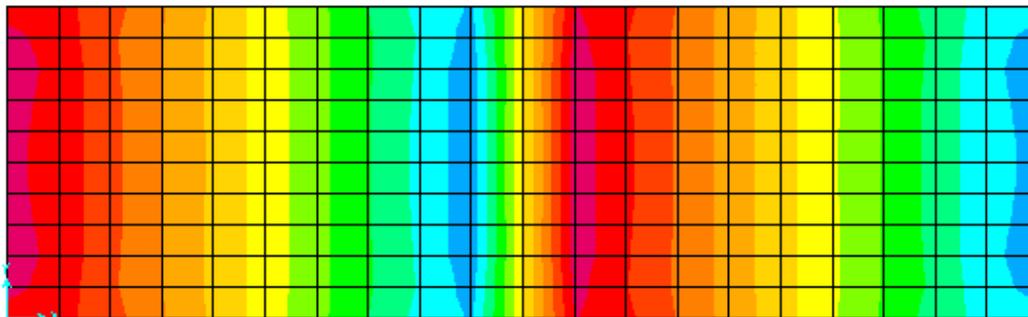


Imagen 11.13: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según CCDSP-95.

Unidades: ton/m².

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
 COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

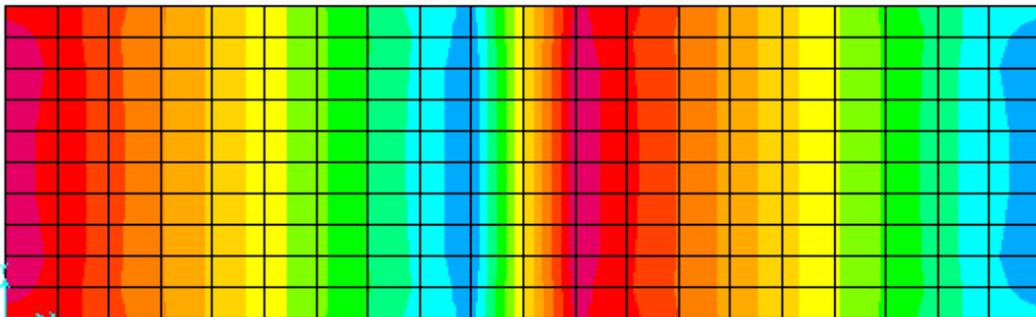


Imagen 11.14: Diagrama de corte losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según mediciones en CAMPO.
 Unidades: ton/m².

	Cortante Máx (ton/m ²)
CCDSP-95	66.78
CAMPO	68.34
Variación (%)	2.34

Tabla 11.9: Solicitación máxima a cortante losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m.

Altura Relleno: 1.25m

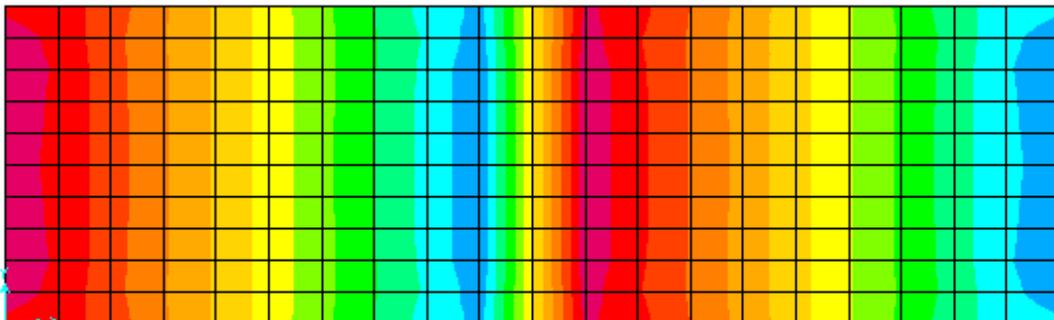


Imagen 11.15: Diagrama de corte losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según CCDSP-95.
 Unidades: ton/m².

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

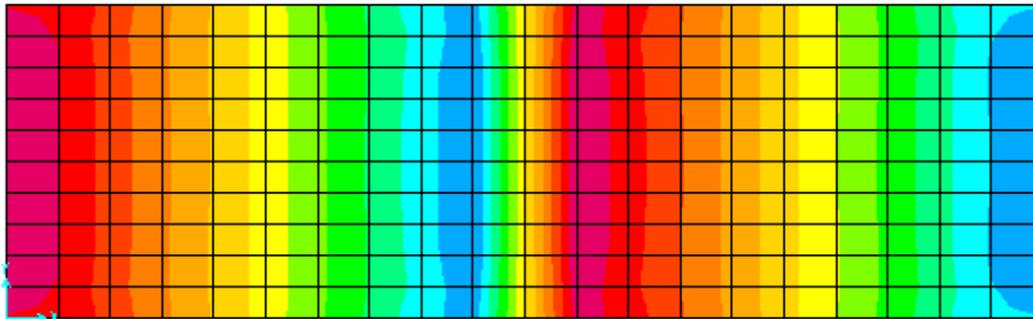


Imagen 11.16: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según mediciones en CAMPO.
Unidades: ton/m².

	Cortante Máx (ton/m ²)
CCDSP-95	42.65
CAMPO	47.68
Variación (%)	11.79

Tabla 11.10: Solicitación máxima a cortante losa superior Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m.

11.3.2 Solicitaciones a cortante Box Culvert 2

Altura Relleno: 0.70m

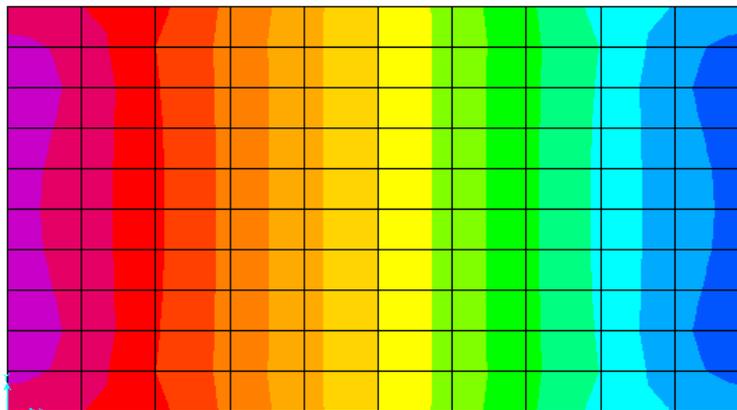
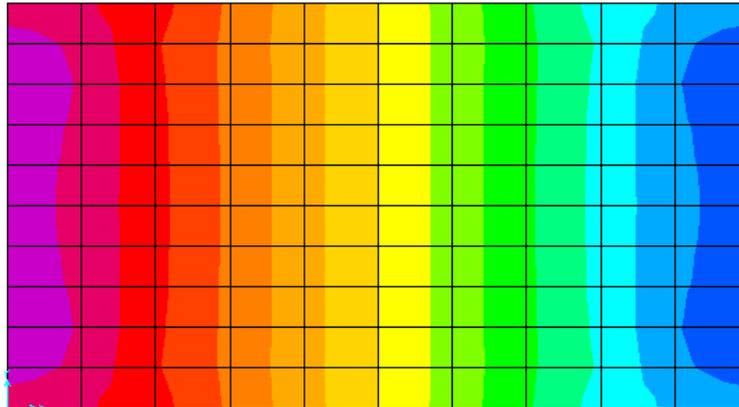


Imagen 11.17: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según CCDSP-95.
Unidades: ton/m².

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
 COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



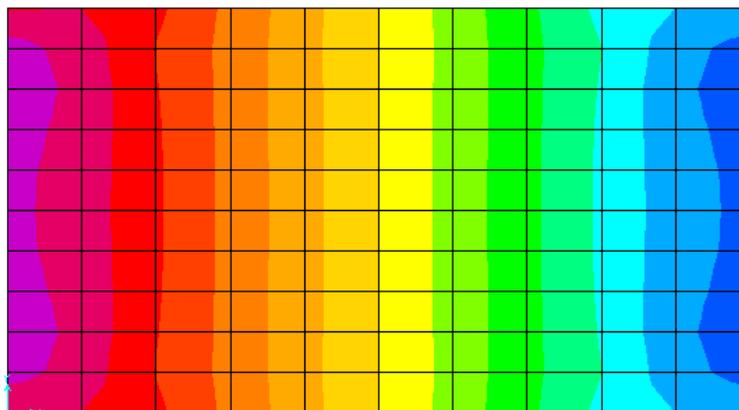
-84.0 -70.0 -56.0 -42.0 -28.0 -14.0 0.0 14.0 28.0 42.0 56.0 70.0 84.0 98.0

Imagen 11.18: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m y carga viva según mediciones en CAMPO.
 Unidades: ton/m².

	<i>Cortante Máx (ton/m²)</i>
CCDSP-95	88.56
CAMPO	90.55
Variación (%)	2.25

Tabla 11.10: Solicitación máxima a cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m.

Altura Relleno: 1.25m



-54.0 -45.0 -36.0 -27.0 -18.0 -9.0 0.0 9.0 18.0 27.0 36.0 45.0 54.0 63.0

Imagen 11.19: Diagrama de cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25 m y carga viva según CCDSP-95.
 Unidades: ton/m².

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

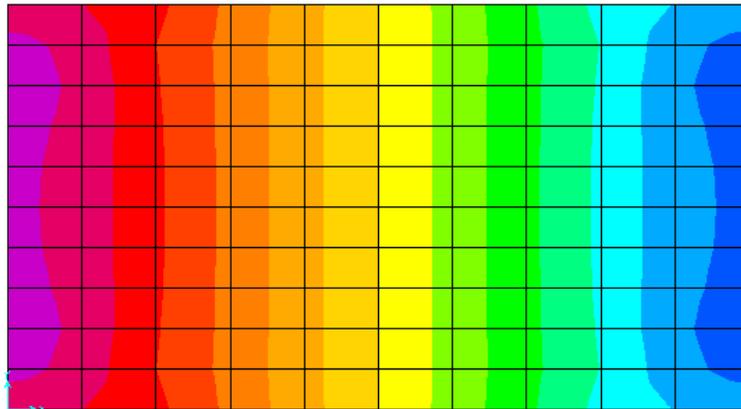


Imagen 11.20: Diagrama de corte losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25m y carga viva según mediciones en CAMPO.
Unidades: ton/m².

	<i>Cortante Máx (ton/m²)</i>
CCDSP-95	56.38
CAMPO	63.15
Variación (%)	12.01

Tabla 11.11: Solicitación máxima a cortante losa superior Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25m.

11.4 DISEÑO A FLEXIÓN

El diseño de la losa superior a flexión a causa de solicitaciones a momento para los dos modelos se realizó únicamente para la mayor sollicitación entre los diferentes puntos de análisis utilizando las formulaciones teóricas del CCDSP-95 para el diseño en concreto reforzado bajo el método de la resistencia última (Sección A.7.8, CCDSP-95).

11.4.1 Cuantías requeridas Box Culvert 1

Altura Relleno: 0.70m

	Momento (ton-m)	As (cm ² /m)
CCDSP-95	21.17	28.51
CAMPO	21.67	29.32
Variación (%)	2.36	2.86

Tabla 11.12: Cuantía requerida para losa superior del Box Culvert 1 para una altura de relleno de 0.70m.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Altura Relleno: 1.25m

	Momento (ton-m)	As (cm ² /m)
CCDSP-95	13.47	16.97
CAMPO	15.05	19.20
Variación (%)	11.73	13.14

Tabla 11.13: Cuantía requerida para losa superior del Box Culvert 1 para una altura de relleno de 1.25m.

11.4.2 Cuantías requeridas Box Culvert 2

Altura Relleno: 0.70m

	Momento (ton-m)	As (cm ² /m)
CCDSP-95	18.18	34.50
CAMPO	18.44	35.20
Variación (%)	1.43	2.03

Tabla 11.14: Cuantía requerida para losa superior del Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m.

Altura Relleno: 1.25m

	Momento (ton-m)	As (cm ² /m)
CCDSP-95	11.60	19.55
CAMPO	12.94	22.26
Variación (%)	11.55	13.86

Tabla 11.15: Cuantía requerida para losa superior del Box Culvert 2 para una altura de relleno de 1.25m.

Las solicitaciones a momento y por ende las cuantías requeridas por flexión en todos los casos analizados son mayores cuando la carga viva aplicada es la obtenida en campo. El área de refuerzo requerida por metro lineal de Box Culvert es mayor en términos porcentuales de variación con referencia al CCDSP-95 que las solicitaciones a momento. Sin embargo, estas variaciones porcentuales son mucho menores que las variaciones de carga viva expuestas en las tablas 11.2 y 11.3.

11.5 REVISIÓN DEL DISEÑO A CORTANTE

La resistencia a cortante únicamente suministrada por el concreto está dada por:

$$v_c = 0.53 * \sqrt{f'_c}$$

Ecuación 11.2: Ecuación A.7-38 (CCDSP-95).

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Así, el esfuerzo resistente nominal del concreto para los materiales especificados en la tabla 11.4 es de 76.80 ton/m². Con este valor de esfuerzo resistente nominal del concreto, todos los espesores cumplen para las solicitaciones máximas a cortante menos el caso del Box Culvert 2 para una altura de relleno de 0.70m donde las solicitaciones son de 88.56 ton/m² para la carga viva con base en el CCDSP-95 y 90.55 ton/m² para la carga viva medida en CAMPO. Sin embargo, la resistencia al esfuerzo cortante se ve contribuida por el refuerzo a flexión del concreto en placas en una dirección por lo que éste también se puede calcular según:

$$v_c = 0.50 * \sqrt{f'_c} + 176 * \rho_w * \frac{V_u * d}{M_u} \leq 0.93 * \sqrt{f'_c}$$

Ecuación 11.3: Ecuación A.7-39 (CCDSP-95).

Donde:

v_c : Esfuerzo resistente nominal del concreto expresada en kg/cm².

f'_c : Resistencia nominal especificada del concreto a la compresión expresada en kg/cm².

M_u : Momento flector mayorado que se presenta simultáneamente con V_u en la sección considerada.

V_u : Fuerza cortante mayorada en la sección, en kgf.

d : Distancia desde la fibra extrema sometida a compresión hasta el centroide del refuerzo sometido a tracción, expresada en metros.

ρ_w : Cuantía de refuerzo a tracción.

De esta manera, para el caso del Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m y adoptando un refuerzo de varillas #7 cada 11cm el cual cumple con la cuantía requerida para ambos casos el esfuerzo resistente nominal a cortante es:

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

	CCDSP-95		CAMPO
f'c (kg/cm ²)	210.00	f'c (kg/cm ²)	210.00
pw	0.0194	pw	0.0194
Vu (ton)	90.55	Vu (ton)	90.55
Mu (ton-m)	18.44	Mu (ton-m)	18.44
d (m)	0.25	d (m)	0.25
vc (ton/m ²)	114.37	vc (ton/m ²)	114.03
vc máx (ton/m ²)	134.77	vc máx (ton/m ²)	134.77

Tabla 11.16: Cálculo del esfuerzo resistente nominal a cortante del concreto para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en Ecuación 11.2.

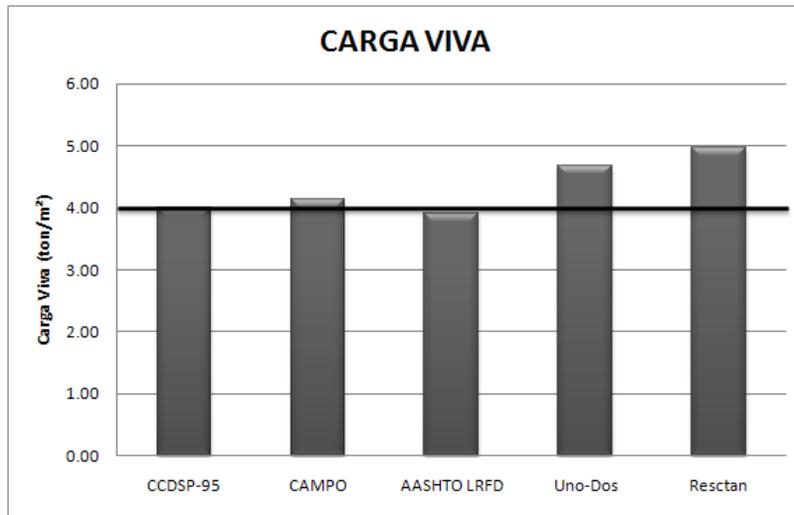
Con este valor de esfuerzo resistente nominal a cortante se verifica que el espesor de 0.25m de la losa superior del Box Culvert 2 es adecuado ya que las solicitaciones máximas a cortante, 88.56 ton/m² para la carga viva con base en el CCDSP-95 y 90.55 ton/m² para la carga viva medida en CAMPO, son menores que su resistencia nominal, 114.37 ton/m².

11.6 PROYECTO LINEAL DE 100m DE BOX CULVERT

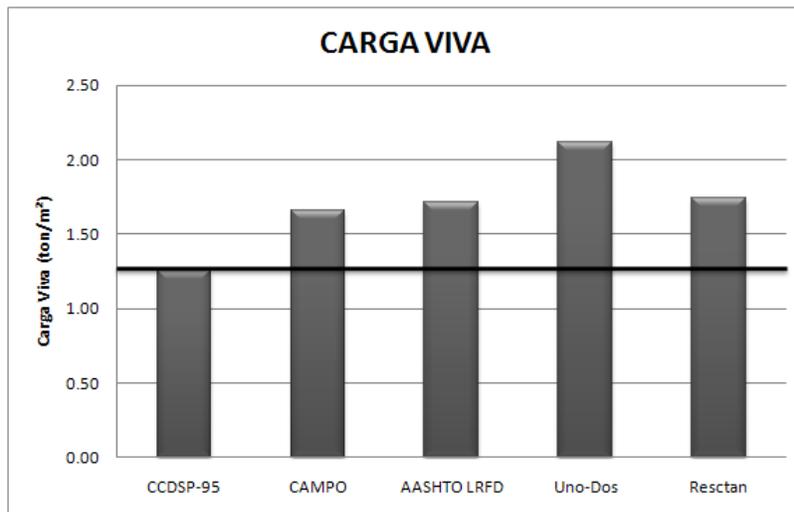
Con el objetivo de hacer una comparación en términos presupuestales se asumió un proyecto lineal de 100m de Box Culvert 1 y Box Culvert 2. La idea es ver la variación en términos económicos con respecto a la obtenida por medio del CCDSP-95 en lo referente al cálculo de la carga viva con las otras metodologías existentes cuantificando la armadura de refuerzo de la losa superior.

11.6.1 Carga viva de diseño para las diferentes metodologías

Los datos registrados en campo en cuanto a la carga y la pisada de la rueda doble de volqueta se refiere fueron utilizados en el cálculo de la carga viva para las profundidades de 0.70m y 1.25m aplicando las diferentes metodologías teóricas estudiadas. Los resultados de carga viva son:



Gráfica 11.1: Carga Viva para una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.



Gráfica 11.2: Carga Viva para una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

11.6.2 Diseño y presupuesto Box Culvert 1

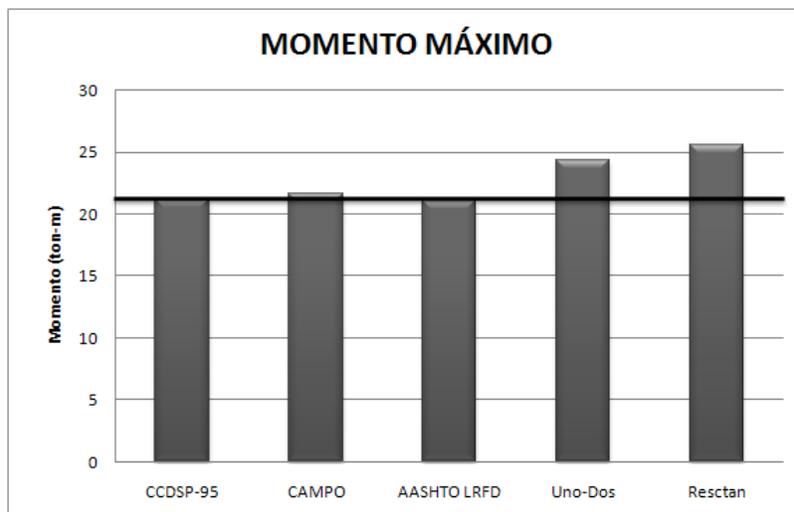
Precio (\$/kg)	\$ 1,775.00
Varilla #	Peso (kg/m)
6	2.235

Tabla 11.17: Costo por kilogramo de acero de refuerzo y peso por metro de varillas de refuerzo [9].

Altura Relleno: 0.70m

Metodología	Carga Viva (ton/m ²)	Momento Máx (ton-m)	Cortante Máx (ton/m ²)
CCDSP-95	4.00	21.17	66.78
CAMPO	4.13	21.67	68.34
AASHTO LRFD	3.91	21.13	65.63
Uno-Dos	4.67	24.37	74.82
Resctan	4.97	25.55	78.44

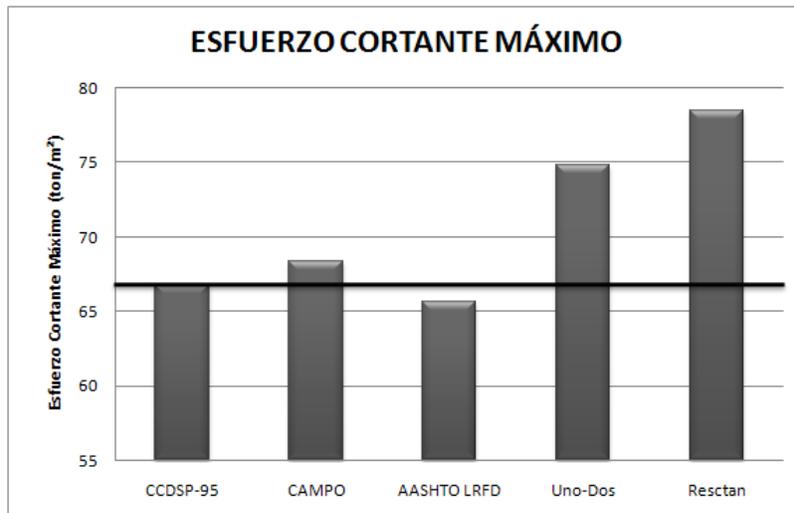
Tabla 11.18: Solicitaciones a momento máximo y cortante máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.



Gráfica 11.3: Solicitaciones a momento máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

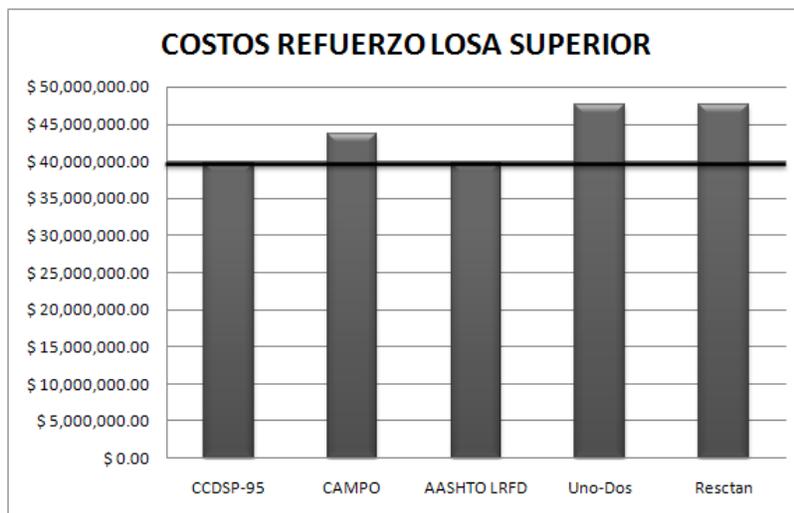
Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



Gráfica 11.4: Solicitaciones a cortante máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

Metodología	Variación Carga Viva (%)	# Varilla	Distancia (cm)	Precio 100 m (\$)	Diferencia Con CCDSP-95 (\$)	Variación (%)
CCDSP-95	0.00	6	10	\$ 39,671,250.00	\$ 0.00	0.00
CAMPO	3.25	6	9	\$ 43,638,375.00	\$ 3,967,125.00	10.00
AASHTO LRFD	-2.32	6	10	\$ 39,671,250.00	\$ 0.00	0.00
Uno-Dos	16.71	6	8	\$ 47,605,500.00	\$ 7,934,250.00	20.00
Resctan	24.35	6	8	\$ 47,605,500.00	\$ 7,934,250.00	20.00

Tabla 11.19: Tabla comparativa de armadura y costos para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.



Gráfica 11.5: Costos comparativos de la armadura de refuerzo de la losa superior para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

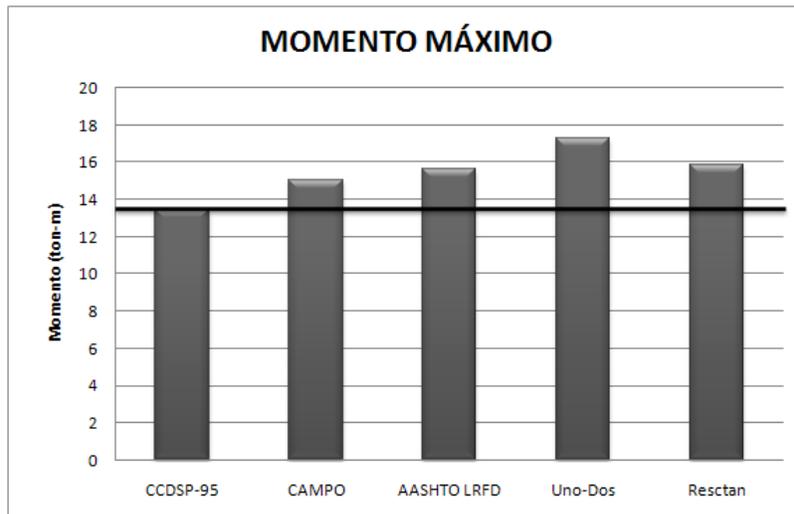
ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

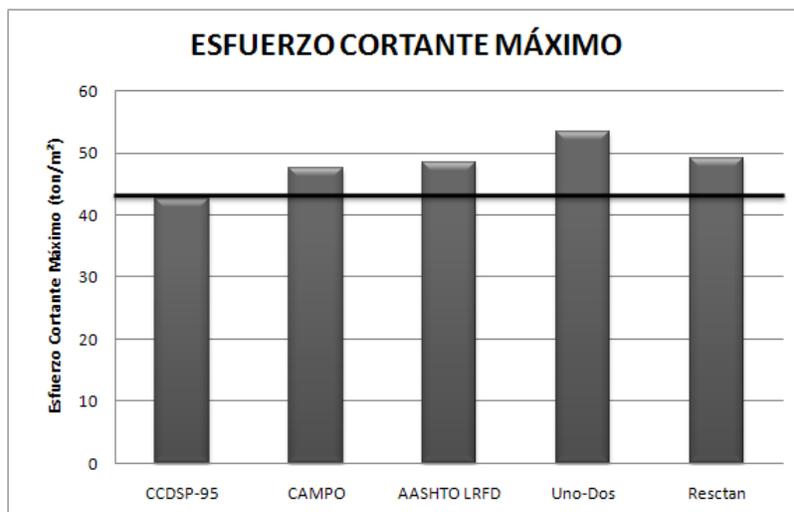
Altura Relleno: 1.25m

Metodología	Carga Viva (ton/m ²)	Momento Máx (ton-m)	Cortante Máx (ton/m ²)
CCDSP-95	1.25	13.47	42.65
CAMPO	1.66	15.05	47.68
AASHTO LRFD	1.71	15.62	48.36
Uno-Dos	2.12	17.31	53.33
Resctan	1.74	15.82	49.06

Tabla 11.20: Solicitaciones a momento máximo y cortante máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.



Gráfica 11.6: Solicitaciones a momento máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.



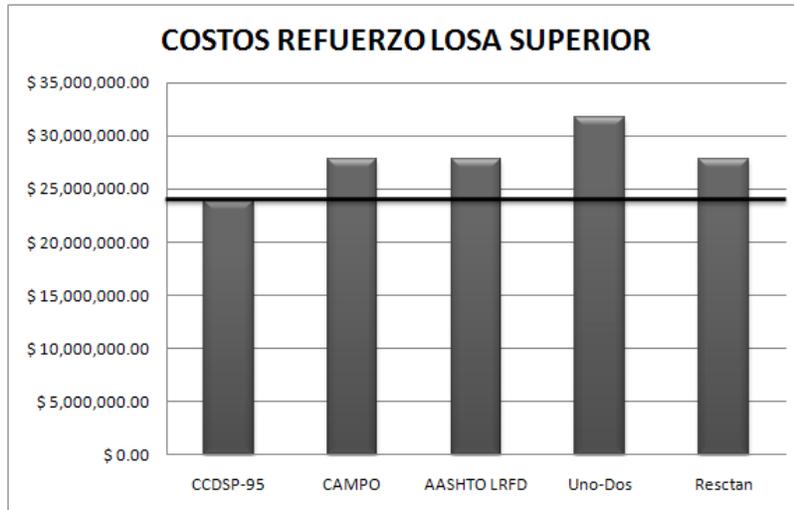
Gráfica 11.7: Solicitaciones a cortante máximo para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Metodología	Variación Carga Viva (%)	# Varilla	Distancia (cm)	Precio 100 m (\$)	Diferencia Con CCDSP-95 (\$)	Variación (%)
CCDSP-95	0.00	6	16	\$ 23,802,750.00	\$ 0.00	0.00
CAMPO	32.80	6	14	\$ 27,769,875.00	\$ 3,967,125.00	16.67
AASHTO LRFD	37.12	6	14	\$ 27,769,875.00	\$ 3,967,125.00	16.67
Uno-Dos	69.36	6	12	\$ 31,737,000.00	\$ 7,934,250.00	33.33
Resctan	39.58	6	14	\$ 27,769,875.00	\$ 3,967,125.00	16.67

Tabla 11.21: Comparativa de armadura y costos para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.



Gráfica 11.8: Costos comparativos de la armadura de refuerzo de la losa superior para el Box Culvert 1 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

11.6.3 Diseño y presupuesto Box Culvert 2

Precio (\$/kg)	\$ 1,775.00
Varilla #	Peso (kg/m)
6	2.235
7	3.042

Tabla 11.22: Costo por kilogramo de acero de refuerzo y peso por metro de varillas de refuerzo [9].

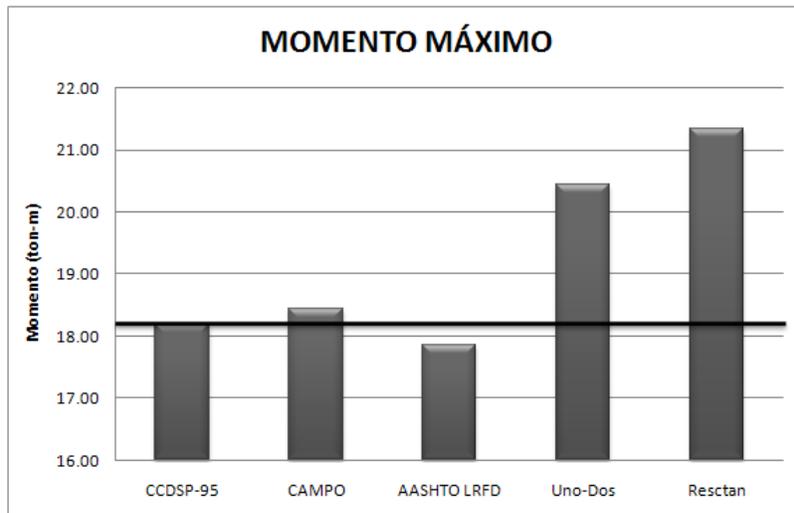
Altura Relleno: 0.70m

Metodología	Carga Viva (ton/m ²)	Momento Máx (ton-m)	Cortante Máx (ton/m ²)
CCDSP-95	4.00	18.18	88.56
CAMPO	4.13	18.44	90.55
AASHTO LRFD	3.91	17.85	87.45
Uno-Dos	4.67	20.45	99.45
Resctan	4.97	21.34	104.57

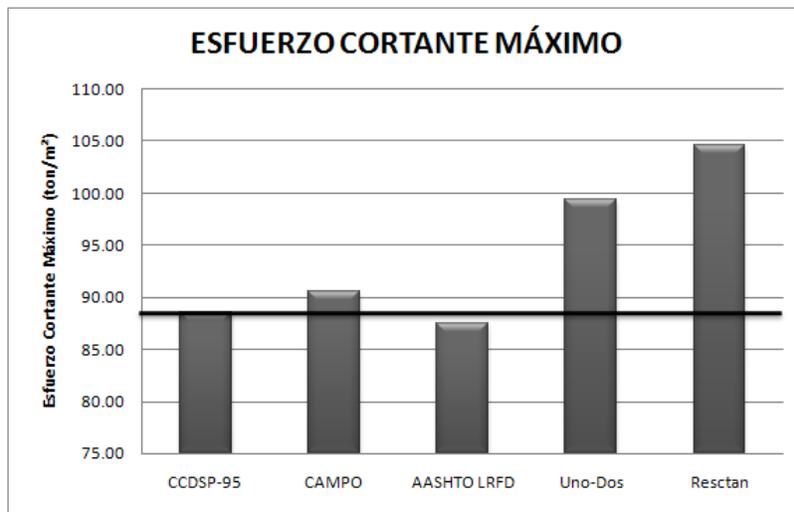
Tabla 11.23: Solicitaciones a momento máximo y cortante máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



Gráfica 11.9: Solicitaciones a momento máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.



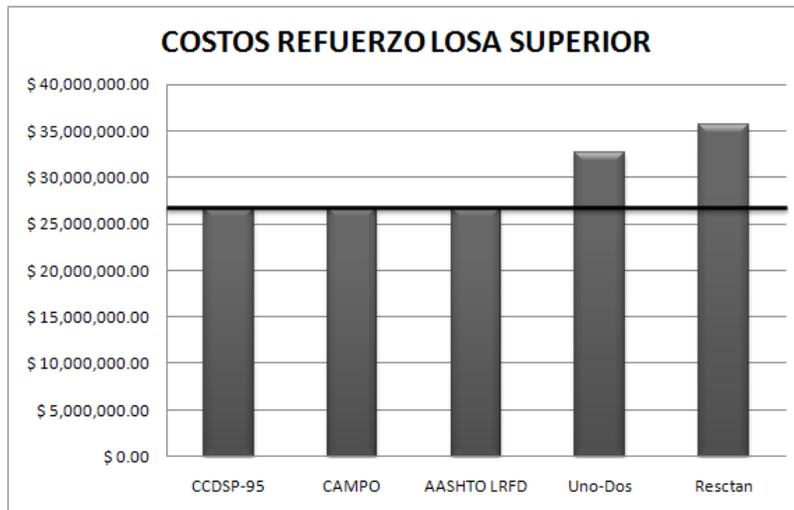
Gráfica 11.10: Solicitaciones a cortante máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

Metodología	Variación Carga Viva (%)	# Varilla	Distancia (cm)	Precio 100 m (\$)	Diferencia Con CCDSP-95 (\$)	Variación (%)
CCDSP-95	0.00	7	11	\$ 26,727,772.50	\$ 0.00	0.00
CAMPO	3.25	7	11	\$ 26,727,772.50	\$ 0.00	0.00
AASHTO LRFD	-2.32	7	11	\$ 26,727,772.50	\$ 0.00	0.00
Uno-Dos	16.71	7	9	\$ 32,667,277.50	\$ 5,939,505.00	22.22
Resctan	24.35	7	8	\$ 35,637,030.00	\$ 8,909,257.50	33.33

Tabla 11.24: Tabla comparativa de armadura y costos para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

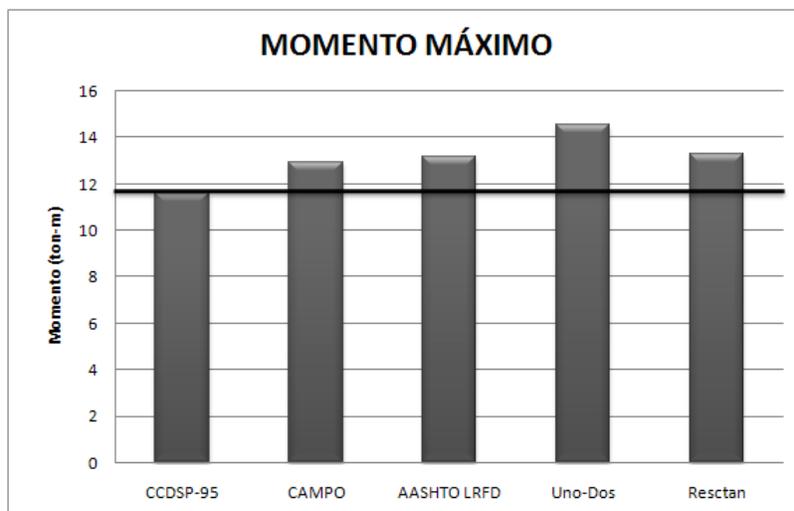


Gráfica 11.11: Costos comparativos de la armadura de refuerzo de la losa superior para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 0.70m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

Altura Relleno: 1.25m

Metodología	Carga Viva (ton/m ²)	Momento Máx (ton-m)	Cortante Máx (ton/m ²)
CCDS-95	1.25	11.6	56.38
CAMPO	1.66	12.94	63.15
AASHTO LRFD	1.71	13.14	63.86
Uno-Dos	2.12	14.55	71.86
Resctan	1.74	13.28	64.51

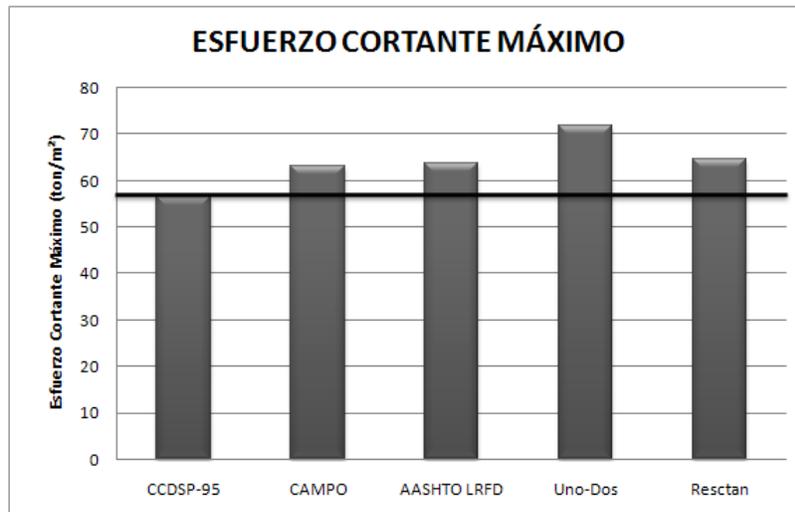
Tabla 11.25: Solicitaciones a momento máximo y cortante máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.



Gráfica 11.12: Solicitaciones a momento máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

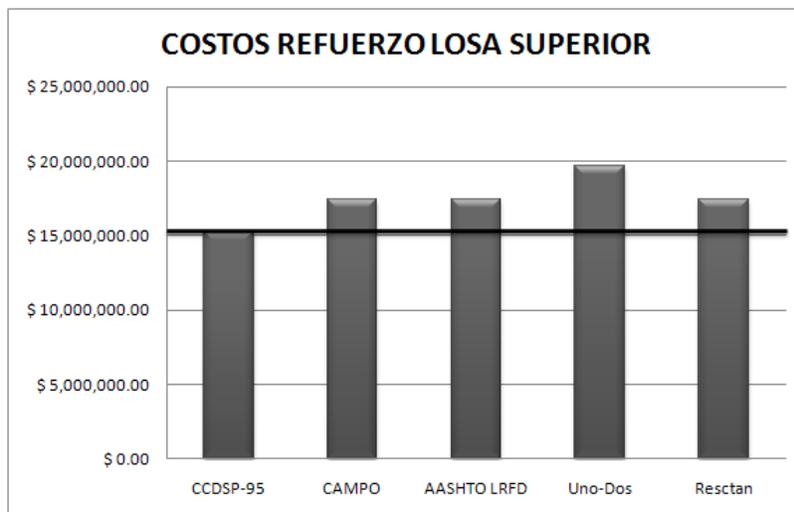
Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno



Gráfica 11.13: Solicitaciones a cortante máximo para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

Metodología	Variación Carga Viva (%)	# Varilla	Distancia (cm)	Precio 100 m (\$)	Diferencia Con CCDSP-95 (\$)	Variación (%)
CCDSP-95	0.00	6	14	\$ 15,273,431.25	\$ 0.00	0.00
CAMPO	32.80	6	12	\$ 17,455,350.00	\$ 2,181,918.75	14.29
AASHTO LRFD	37.12	6	12	\$ 17,455,350.00	\$ 2,181,918.75	14.29
Uno-Dos	69.36	6	11	\$ 19,637,268.75	\$ 4,363,837.50	28.57
Resctan	39.58	6	12	\$ 17,455,350.00	\$ 2,181,918.75	14.29

Tabla 11.26: Tabla comparativa de armadura y costos para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.



Gráfica 11.14: Costos comparativos de la armadura de refuerzo de la losa superior para el Box Culvert 2 con una altura de relleno de 1.25m con base en las diferentes metodologías teóricas y de trabajo en campo para la estimación de la carga viva.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

Los costos en términos de refuerzo de la losa superior para el Box Culvert 1 y Box Culvert 2 son superiores para las tres metodologías teóricas y la obtenida en campo en comparación con los costos derivados de la aplicación del CCDSP-95.

A medida que la carga viva es mayor las solicitaciones a cortante y momento aumentan, lo que hace necesario mayores cuantías de refuerzo las cuales derivan en mayores costos del proyecto.

El aumento de la carga viva se debe básicamente a la metodología utilizada para su estimación, ya sea por código, teoría, o campo, y por la altura del relleno sobre la estructura. Estos son los factores influyentes en el costo de los proyectos de Box Culvert.

Por otro lado, un aumento en la carga viva, aunque se refleje en mayores costos significa una confiabilidad estructural mayor que debe ser tomada en cuenta en los análisis Beneficio-Costo que se deben realizar en todo proyecto.

12 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en campo fueron comparables con la base teórica consignada en el CCDSP-95 y se puede concluir lo siguiente:

- Se pudo corroborar la calidad del montaje que permite registrar cargas en profundidad, ya que mostró consistencia en los resultados a medida que las profundidades de trabajo eran menores.
- De la re-calibración se puede concluir que el sistema utilizado para medición de carga tiene un error variable entre 0.5% y 7.0%. Sin embargo, en cuanto la carga se hace cada vez mayor los errores son menores.
- La experticia ganada en campo en cuanto la adquisición y puesta en funcionamiento del montaje electrónico fue acertada, básica para garantizar la calidad de los registros.
- El material utilizado como relleno en el trabajo en campo realizado cumple las especificaciones de la tabla 220.1 del artículo 220 al cual el artículo 610 de las Especificaciones y Normas de Construcción de Carretas del INVIAS sobre Rellenos para Estructuras hace mención.
- Comparando los resultados obtenidos después del post-proceso de los datos obtenidos en campo vs los valores sugeridos por el marco teórico incluido en el CCDSP-95, se puede afirmar que los resultados son comparables, obteniendo mayores esfuerzos, entre un 3% y 40%, en el terreno cuando se registran directamente con el sistema de adquisición.
- Lo anterior sugiere la revisión de la sensibilidad en el diseño de estructuras nuevas, para los esfuerzos flectores y de cortante, los cuales son principales en el diseño de estructuras enterradas.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

- Debido a que las diferentes teorías de distribución de esfuerzo a través de rellenos son independientes del tipo y características del suelo, para tener en cuenta este factor en la manera como se disipan los esfuerzos a través de rellenos se requiere de estudios más especializados en donde esta variable pudiese ser controlada mejor.
- El aumento de la carga viva en el diseño de estructuras enterradas produce mayores solicitaciones a momento y esfuerzos de cortante sobre los elementos estructurales. A su vez, la cuantía requerida es mayor por lo que la armadura de refuerzo requerida es superior.
- El incremento de la carga viva no es directamente proporcional al aumento en las solicitaciones a cortante y momento, por lo que un aumento significativo de ésta no se traduce en sobrecostos en el diseño de las estructuras pero si en su confiabilidad operacional y vida útil.

13 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS

- Aunque el material utilizado en el presente estudio cumple con las características establecidas por las especificaciones del INVIAS en cuanto a rellenos para estructuras hace referencia, se recomienda utilizar material de relleno de mejores calidades y caracterizado previo al trabajo en campo.
- Debido a que la densidad en campo no se pudo controlar, pues no se disponía del ensayo para determinar esta variable que es sumamente importante cuando se hace compactación de rellenos en obra, ya que el tiempo de préstamo del personal y maquinaria estaba sujeto a las necesidades de la obra, se recomienda para estudios futuros hacer control sobre esta variable.
- La humedad del suelo y la energía de compactación tampoco se controlaron en el presente estudio, y debido a su importancia en cuanto a compactación de rellenos se refiere, su control y medición se hacen necesarios en trabajos futuros.
- Con el fin de obtener una relación entre la rigidez del plato de carga y el suelo cercana a 300, para garantizar una distribución de esfuerzos uniforme sobre el plato, el espesor de éste debe ser mayor o igual a 1" (Ver Anexo 3).
- A menos que se realicen futuros estudios donde las variables de carga, material y medición sean tenidas en cuenta y trabajadas de una manera más exacta se recomienda la actualización de la Sección A.12.5 del CCDSP-95 por el Artículo 3.6.1.2.6 de la normativa AASHTO LRFD de 2006.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

14 ANEXOS.

ANEXO.1. CÓDIGO DE FILTRADO DE REGISTROS DE LAS CELDAS PARA SU APLICACIÓN EN MATLAB.

```
%PROGRAMA PARA LIMPIEZA DE SEÑALES
clear
clc
raw=uigetfile
[c3,c4,c5]=textread(raw,'%f%f%f');
c54=c3+c4+c5;
contador11=(size(c3));
PREC=.000005;
DIFER=1;
Q=1;
while DIFER>PREC
    %ESTE TRABAJO SE HARÁ PARA CADA REGISTRO CAPTURADO DESDE LA TERCERA
    %COLUMNA DE ADQUISICIÓN.
    sumc3=sum(c3);
    sumc4=sum(c4);
    sumc5=sum(c5);
    contador1=(size(c3));
    contador=contador1(:,1)-Q;
    mediac3=mean(c3);
    mediac4=mean(c4);
    mediac5=mean(c5);
    mediac54=mean(c54);
    %CONTADOR DEL NÚMERO DE DATOS TOTALES EN EL REGISTRO.
    c3i=c3'-mediac3;
    c4i=c4'-mediac4;
    c5i=c5'-mediac5;
    c54i=c54'-mediac54;

    %LOS VECTORES ANTERIORES CONTIENEN LAS SEÑALES CORREGIDAS A LINEA
    BASE.

    for i=2:contador-Q
        C3L(:,i)=(((c3i(:,i)+ c3i(:,i-1)))/2) + ((c3i(:,i)+ c3i(:,i+1)))/2)
    );/2;
    end %DIAGONAL DE ENTRADA

    for w=2:contador-2
        ERRC3A(:,w)= abs(C3L(:,w) - C3L(:,w-1));
    end

    DIFERA=max(ERRC3A);
```

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%
```

```
for ii=2:contador-Q  
    C4L(:,ii)=(((c4i(:,ii)+    c4i(:,ii-1)))/2)    +    ((c4i(:,ii)+  
c4i(:,ii+1))/2) )/2;  
end
```

```
for w=2:contador-2  
    ERRC4A(:,w)= abs(C4L(:,w) - C4L(:,w-1));  
end
```

```
DIFERB=max(ERRC4A);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%
```

```
for iii=2:contador-Q  
    C5L(:,iii)=(((c5i(:,iii)+    c5i(:,iii-1)))/2)    +    ((c5i(:,iii)+  
c5i(:,iii+1))/2) )/2;  
end
```

```
for w=2:contador-2  
    ERRC5A(:,w)= abs(C5L(:,w) - C5L(:,w-1));  
end
```

```
DIFERC=max(ERRC5A);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%
```

```
for iiii=2:contador-Q  
    C54L(:,iiii)=(((c54i(:,iiii)+    c54i(:,iiii-1)))/2)    +  
((c54i(:,iiii)+ c54i(:,iiii+1))/2) )/2;  
end
```

```
for w=2:contador-2  
    ERRC54A(:,w)= abs(C54L(:,w) - C54L(:,w-1));  
end
```

```
DIFERD=max(ERRC54A);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%
```

```
DIFERENCIA=[DIFERA DIFERB DIFERC];  
DIFER=max(DIFERENCIA);
```

```
if DIFER>PREC  
    C3LC=C3L';
```

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

```
c3=C3LC;
C4LC=C4L';
c4=C4LC;
C5LC=C5L';
c5=C5LC;
C54LC=C54L';
c54=C54LC;
Q=1;
else
    disp('PRESICION ALCANZADA, SEÑALES LIMPIAS')
end

end %END DEL COMANDO WHILE.
C3LC=C3L';
C4LC=C4L';
C5LC=C5L';
C54LC=C54L';
contador11=(size(C3LC));
%cpor es el porcentaje de cada celda en el registro en conjunto
(sistema
    %a tres puntos)
    for iiii=1:contador11
        c3por(iiii,:) =
C3LC(iiii, :)/(C3LC(iiii, :)+C4LC(iiii, :)+C5LC(iiii, :))*100;
        c4por(iiii,:) =
C4LC(iiii, :)/(C3LC(iiii, :)+C4LC(iiii, :)+C5LC(iiii, :))*100;
        c5por(iiii,:) =
C5LC(iiii, :)/(C3LC(iiii, :)+C4LC(iiii, :)+C5LC(iiii, :))*100;
    end
    [c3,c4,c5]=textread(raw, '%f%f%f');
    C541=c3+c4+c5;
    mediac541=mean(C541);
    %C541 es la suma de los tres registros crudos
    %c54 es el filtro de la suma de los tres registros
    c54=C54LC+mediac541;
    mediac3=mean(c3);
    mediac4=mean(c4);
    mediac5=mean(c5);
    %ss es la suma de el filtro de las tres celdas independiente
    ss=C3LC+mediac3+C4LC+mediac4+C5LC+mediac5;
    plot(C5LC+mediac5, 'b')
    hold

title('LIMPIEZA DE SEÑALES TESIS DE PRESIONES DE CAMIONES')
save RESULTADOLIMPIO.txt ss -ASCII -DOUBLE -TABS
```

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

ANEXO.2. PLANO MONTAJE.

ANEXO.3. JUSTIFICACIÓN AUMENTO ESPESOR DEL PLATO DE CARGA.

Con el fin de obtener la relación de rigidez entre el suelo y el plato de carga utilizado en el montaje, se realizó una modelación del plato en el SAP 2000 (Imagen Anexo.3.1).

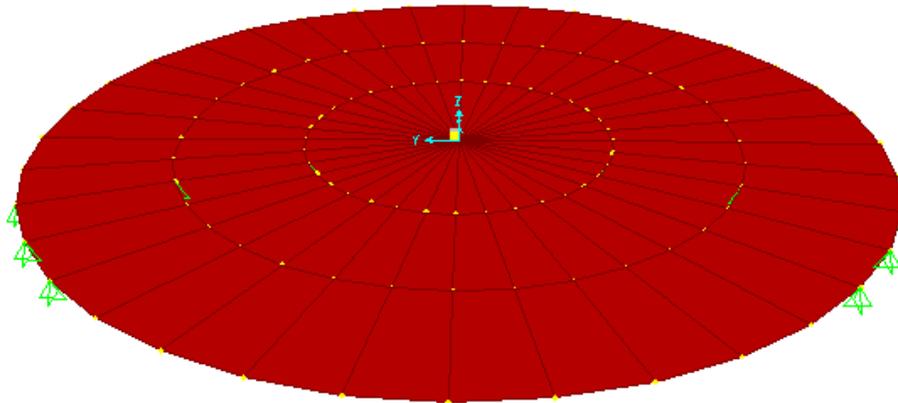


Imagen Anexo.3.1: Modelo plato de carga en SAP 2000.

El esfuerzo aplicado sobre éste fue de 38 ton/m² equivalente al esfuerzo aplicado en superficie por la rueda doble del eje sencillo de la volqueta medido en campo.

Para el espesor de ½" la deformación máxima del plato fue de 3.710E-05m (Imagen Anexo.3.2).

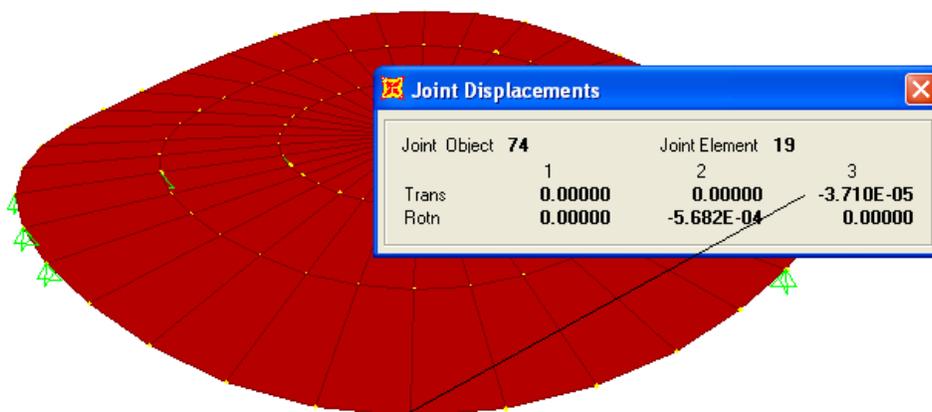


Imagen Anexo.3. 2: Deformación máxima en el plato de ½" de espesor.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

La relación entre la deformación máxima del suelo y la deformación máxima del plato nos define la relación entre la rigidez del plato y del suelo.

Para calcular la deformación del suelo se asumió un modulo de elasticidad de 10000 ton/m², un esfuerzo aplicado de 38 ton/m² y una altura de columna de 35cm, equivalente a la profundidad de la menor altura de relleno registrado.

Así:

$$\Delta = L * \frac{\sigma}{E} = 0.35m * \frac{38 \frac{ton}{m^2}}{10000 \frac{ton}{m^2}} = 0.00133m$$

Ecuación Anexo.3.1: Deformación del suelo.

Con los valores de deformación calculados la rigidez plato suelo es:

$$Relación Rigidez = \frac{\Delta Suelo}{\Delta Plato} = \frac{0.00133m}{3.75E^{-5}} = 36$$

Ecuación Anexo.3.2: Relación rigidez plato de carga (1/2'') y suelo.

Este valor indica que debido a la baja relación de rigidez entre el plato y el suelo se podrían presentar distorsiones en la distribución uniforme de esfuerzos en el plato, dando como resultado mediciones erróneas del montaje.

Para aumentar esta rigidez hasta un valor superior a 200 el espesor del plato debe de ser al menos de 1''. Con este valor la deformación máxima del plato es de 4.65E-06m (Imagen Anexo.3.3).

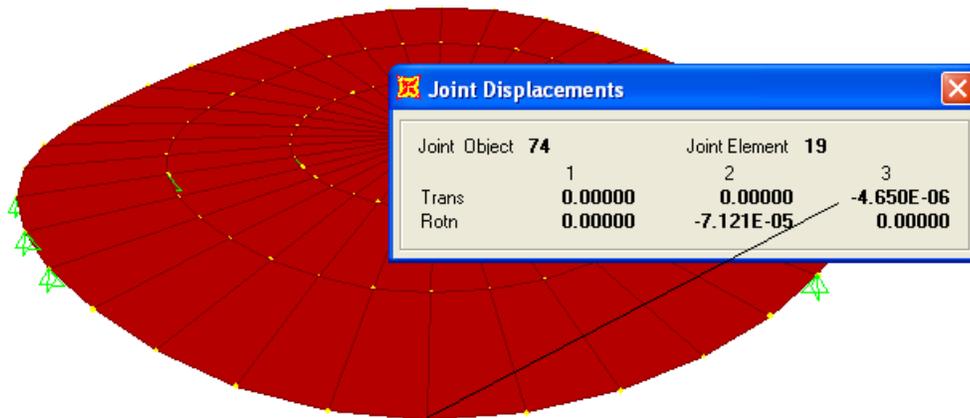


Imagen Anexo.3.3: Deformación máxima en el plato de 1" de espesor.

Para esta deformación del plato y la del suelo anteriormente calculada la nueva relación de rigidez:

$$\text{Relación Rigidez} = \frac{\Delta Suelo}{\Delta Plato} = \frac{0.00133m}{4.65E^{-6}} = 286$$

Ecuación Anexo.3.3: Relación rigidez plato de carga (1") y suelo.

Así, para garantizar la rigidez del montaje en comparación con la del suelo se recomienda aumentar el espesor del plato a 1".

15 BIBLIOGRAFÍA

- [1] AASHTO (2002) AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Ed., Washington, D.C.
- [2] AASHTO (2000). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Washington, D.C.
- [3] Arockiasamy M., Chaallal O., and Limpeteepakarn T. (2006) Full-Scale Field Tests on Flexible Pipes Under Live Load Application. Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 20, No. 1, February 1, 2006. ©ASCE.
- [4] American Concrete Pipe Association. Highway Live Loads on Concrete Pipes. Design Data 1M, Octubre, 2007.
- [5] Bowles, J. E (1996). Foundation analysis and design, 5th Ed., McGraw-Hill, New York. pp 286-289
- [6] CALTRANS, BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS, APRIL 2004.
- [7] Colombia (2007) I.N.V.E-123-121-125-126.
- [8] CÓDIGO COLOMBIANO DE DISEÑO SÍSMICO DE PUENTES 1995. Ministerio De Transporte, Instituto Nacional de Vías. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Impreso en Diciembre 9, 1995.
- [9] CONSTRUCTOR, SODIMAC, Consulta vía telefónica el día 17 de Marzo de 2010
- [10] Das, B.M. (2004) Principles of Foundations Engineering, 4th Ed., Thomson, California. pp. 220-224
- [11] Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Procesos Constructivos, IDU –ET- 2005

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

- [12]EUROCODE (1997), English Version. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 1990:2002.
- [13]INVIAS (2007), Especificaciones y Normas de Construcción de Carreteras. Terraplenes. Especificaciones Artículo 220-07.
- [14]INFORME FINAL PUENTE CAJAMARCA PROYECTO Aunar esfuerzos técnicos y financieros para incrementar la seguridad y estabilidad del viaducto Cesar Gaviria Trujillo de la carretera solución vial - Pereira - Dos quebradas (Ruta 29 RSA) y del puente Cajamarca en la carretera La Línea – Ibagué.
- [15]Keyhole Inc., Google Inc. Google Earth 2009 [Software de cómputo]
- [16]Larry J. Miller, Stephan A. Durham. (2002) “Comparison of Standard Load and Load and Resistance Factor Bridge Design Specifications for Buried Concrete Structures.” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, 2002.
- [17]McCormac, Jack C, Nelson, James K. (2002) Diseño de Estructuras de Acero, Método LRFD. 2da Edición, Editorial Alfaomega, México.
- [18]Nt-102 (EAAB-ESP) (<http://sistec.acueducto.com.co/sistec/consultas.nsf> (N-102 4.3.3.3))
- [19]Poulos, H. G., and Davis, E. H. (1974). Elastic solutions for soil and rock mechanics. John Wiley and Sons, New York, N.Y.
- [20]Rodríguez, J. Ruiz D. Coral, A. y Pereira M. (2007). “Análisis Mediante Modelos Físicos de Interacción Suelo-Estructura en Tuberías Enterradas”. Ingeniería. Universidad de Costa Rica. Volumen 17, Enero/Julio 2007.
- [21]Rude (1983). Load Reduction on Buried Rigid Pipe. M.ASCE.

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN RELLENOS
COMPACTADOS EN COMPARACIÓN CON LA ESTABLECIDA EN EL CCDSP-95

Gustavo González Merchán – José Manuel De Castro Passega – Federico Núñez Moreno

- [22]Sezen, H., Yeau, K., and Fox, P. J. (2008). "In-situ load testing of corrugated steel pipe-arch culverts." J. Perform. Constr. Facil., Vol. 22, No. 4, 245–252.
- [23]Sezen, H., Yeau, K., and Fox, P. J. (2009). "Load Performance of In Situ Corrugated Steel Highway Culverts" Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 23, No. 1, January/February 2009, pp. 32-39.
- [24]Tadros, M. K., Benak, J. V., Abdel-Karim, A. M., and Bexten, K. A. (1988). "Field testing of a concrete box culvert." Transp. Res. Record No. 1231, 49-55.
- [25]Tadros, M. K., and Benak, J. V. (1990). "Load distribution on box culverts." Res.Rep., Nebraska Department of Roads, Omaha, Nebr.
- [26]Tadros, M. K., Benak, J. V., Abdel-Karim, A. M. (1994) "Structural Response of Full-Scale Concrete Box Culvert" Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 11, November 1993, pp. 3238-3254.