

Maestría en Ingeniería Civil

Estudio de resiliencia estructural en puentes de concreto después de sufrir cargas impulsivas en los apoyos intermedios

Hugo Daniel Manzano Celedón

Bogotá, D.C., 26 de enero de 2024



**Estudio de resiliencia estructural en puentes de concreto
después de sufrir cargas impulsivas en los apoyos intermedios**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en estructuras**

Pedro Nel Quiroga Saavedra

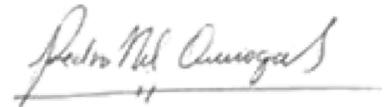
Jaime Erasmo Garzón Moreno

Directores

Bogotá, D.C., 26 de enero de 2024

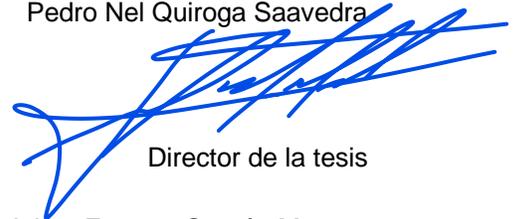


La tesis de maestría titulada “Estudio de resiliencia estructural en puentes de concreto después de sufrir cargas impulsivas en los apoyos intermedios”, presentada por Hugo Daniel Manzano Celedón, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras.



Director de la tesis

Pedro Nel Quiroga Saavedra



Director de la tesis

Jaime Erasmo Garzón Moreno

Jurado

Diego Ernesto Dueñas Puentes

Jurado

Edison Osorio B.

Bogotá, D.C., 26 de enero de 2024

Dedicatoria

“Si he logrado ver más lejos, ha sido porque he subido a hombros de gigantes”

Isaac Newton.

Inicialmente dedico esta tesis a Dios quien ha sido mi más grande apoyo y sustento en cada paso que he dado.

A mis padres Rafaela Celedón y Hermides Manzano, quienes incansablemente han sabido darme lo mejor de cada uno en cada etapa de mi vida y son quienes me han brindado las herramientas para convertirme en el hombre que hoy soy.

A mi “*Escuela*” que ha sido la institución que me brindó momentos maravillosos y me abrió las puertas hacia algo más grande. Es el lugar donde me preparé para afrontar la vida y me brindó las pruebas finales necesarias para enfrentarme al mundo.

Agradecimientos

A mis directores de tesis, Pedro Nel Quiroga y Jaime Erasmo Garzón quienes me han acompañado en el desarrollo de mi formación profesional y han sido parte importante de este proceso. Estoy seguro que no tienen idea del impacto que han ocasionado en mi vida y mi formación como ingeniero. A ellos, gracias.

Ha sido un honor ser su alumno.

Índice general

Dedicatoria	4
Agradecimientos.....	5
Índice general.....	6
Resumen.....	15
1. Justificación	16
2. Introducción	17
3. Objetivos.....	18
3.1. Objetivo general	18
3.2. Objetivos específicos	18
4. Antecedentes.....	19
4.1. Antecedentes históricos de impactos vehiculares contra puentes en Colombia.....	19
5. Estado del arte.....	23
5.1 Efectos de los impactos de camiones sobre las pilas de los puentes (Agrawal, A. K., Liu, G., & Alampalli, S., 2013)	24
5.1.1. Modelación matemática.....	24
5.1.2. Resultados obtenidos	25
5.2. Resistencia al impacto de pilas de puentes diseñadas sísmicamente (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F., 2020).	27
5.2.1. Modelación matemática.....	27
5.2.2. Resultados obtenidos	29
5.3. Estudio de los efectos de colisiones vehiculares sobre pilas de concreto reforzado de sección circular. (Gomez, N. L., & Alipour, A., 2014).	31
5.3.1. Modelación matemática.....	31
5.3.2. Resultados obtenidos	32
6. MARCO TEÓRICO	33
6.1. Hipótesis	33
6.2. Resiliencia estructural	34
6.3. Los puentes en Colombia y sus tipologías.	35
6.3.1. Puentes en sistema viga-tablero.....	37
6.3.2. Puentes en arco.....	38
6.3.3. Puentes de viga-cajón.	40
6.3.4. Puentes atirantados.....	41
6.4. Puentes y sus componentes	42
6.5. Disposiciones normativas sobre el diseño de puentes.....	43
6.5.1. Cargas de diseño de puentes: Impacto vehicular	43
6.5.2. Consideraciones de diseño de puentes.	45
6.5.2.1. Pilas de puente – Sección 11 CCP-14	46

6.5.3.	Recomendaciones para el diseño y detallamiento del refuerzo en los elementos de un puente: Apoyos centrales.....	46
6.6.	Comportamiento plástico de estructuras.....	47
6.6.1.	Modelos de confinamiento en el concreto.....	48
6.6.1.1.	Modelo de confinamiento de Mander.....	49
6.6.1.2.	Modelo de confinamiento de Spolestra y Monti.....	50
6.6.2.	Rótulas plásticas y mecanismos de falla.....	52
6.7.	Carga de análisis.....	53
6.7.1.	Cargas dinámicas.....	53
6.7.2.	Cargas de tipo impulsivo.....	54
6.7.3.	Respuesta de las estructuras ante cargas de impacto.....	55
7.	DESARROLLO.....	55
7.1.	Metodología.....	55
7.1.1.	Definición y caracterización de las estructuras.....	56
7.1.1.1.	Elementos de superestructura.....	58
7.1.1.2.	Elementos de subestructura.....	60
7.1.2.	Definición y caracterización de la carga.....	62
7.1.2.1.	Vehículo de carga liviana.....	62
7.1.2.2.	Vehículo de carga pesada.....	64
7.1.3.	Comparativo de definiciones con las condiciones reales.....	65
7.1.4.	Esquematización geométrica del modelo estructural.....	70
7.1.4.1.	Superestructura.....	70
7.1.4.2.	Subestructura.....	71
7.1.5.	Conformación paramétrica y metodológica del modelo.....	73
7.1.6.	Conformación y construcción del modelo global y refinamiento del modelo.80	
8.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	83
8.1.	Pórtico de 2 columnas.....	84
8.2.	Pórtico de 3 columnas.....	95
8.3.	Pila tipo muro.....	105
9.	ANÁLISIS DE RESILIENCIA.....	115
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	130
11.	CONCLUSIONES.....	141
12.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144

Ilustraciones

Ilustración 1 Esquema de modelación matemática.	25
Ilustración 2 Esquema de hipótesis de impacto vehicular y vehículo.	25
Ilustración 3 Curva de desplazamiento máximo contra velocidad de impacto.....	26
Ilustración 4 Geometría y refuerzo empleado en las pilas en la modelación matemática.	27
Ilustración 5 Descripción esquemática de modelo matemático.	28
Ilustración 6 Vehículos considerados para la modelación.	28
Ilustración 7 Energía del evento y fuerza transmitida.	29
Ilustración 8 Modos de falla presentes frente a impactos vehiculares.....	30
Ilustración 9 Daños presentados en las pilas.	30
Ilustración 10 Modelo computacional.	31
Ilustración 11 Modelo de vehículo de impacto.....	32
Ilustración 12 Fuerza de impacto resultante.....	32
Ilustración 13 Impactos vehiculares sobre pila de puente	33
Ilustración 14 Puente viga – tablero Intersección Calle 134 con autopista norte – Bogotá D.C.....	37
Ilustración 15 Puente viga – tablero Intersección Calle 116 con autopista norte – Bogotá D.C.....	38
Ilustración 16 Puente en arco Puente Guayaquil sobre el río Medellín – Medellín – Antioquia.	39
Ilustración 17 Puente en arco metálico con tablero suspendido La Perdiz – Florencia – Caquetá.....	39
Ilustración 18 Puente en sistema viga cajón intersección Av. Suba con Av. Boyacá – Bogotá D.C.....	40
Ilustración 19 Puente Juananbú – Carretera Popayán – Pasto.....	41
Ilustración 20 Puente Hisgaura, Via Curos - Málaga.....	41
Ilustración 21 Componentes típicos de los puentes.	42

Ilustración 22 Protección de la estructura ante fuerza de colisión vehicular CCP-14.	46
Ilustración 23 Mecanismos de falla en pórticos.	53
Ilustración 24 Metodología	56
Ilustración 25 Definición geométrica de vigas	58
Ilustración 26 Corte transversal de la superestructura.	59
Ilustración 27 Alzado de la estructura.....	59
Ilustración 28 Vista transversal de la estructura aporticada.	60
Ilustración 29 Refuerzo empleado en las columnas de sección circular.....	60
Ilustración 30 Vista transversal de la estructura tipo muro.	61
Ilustración 31 Refuerzo empleado en soporte tipo muro.	61
Ilustración 32 Vehículo liviano	62
Ilustración 33 Vistas de vehículo liviano	63
Ilustración 34 Dimensiones de vehículo liviano	63
Ilustración 35 Vehículo pesado.	64
Ilustración 36 Vistas de vehículo pesado.	64
Ilustración 37 Dimensiones de vehículo pesado.	65
Ilustración 38 Planta y perfil de puente con apoyo de tipo muro	66
Ilustración 39 Vista frontal de apoyo de tipo muro.....	66
Ilustración 40 Perfil de apoyo de tipo muro	67
Ilustración 41 Alzado de puente con apoyo de tipo pórtico.	67
Ilustración 42 Planta y perfil de puente con apoyo de tipo pórtico.....	68
Ilustración 43 Datos técnicos – Camión pesado.....	68
Ilustración 44 Datos técnicos – Camión liviano.	69
Ilustración 45 Elementos de superestructura	70
Ilustración 46 Vista 3D de superestructura.....	70
Ilustración 47 Definición de elementos tipo “Beam”	71
Ilustración 48 Asignación de elementos tipo “Beam”	71
Ilustración 49 Asignación de elementos tipo “Beam” para refuerzo transversal	72
Ilustración 50 Conformación de subestructuras	72

Ilustración 51 Definición de concreto no lineal ($f'_c = 28\text{MPa}$)	73
Ilustración 52 Definición de acero de refuerzo	74
Ilustración 53 Definición de material para elementos tipo vehículo	74
Ilustración 54 Peso asignado a vehículo liviano	75
Ilustración 55 Peso asignado a vehículo pesado	76
Ilustración 56 Elementos tipo refuerzo.	77
Ilustración 57 Contacto entre sólidos	77
Ilustración 58 Apoyos fijos.....	78
Ilustración 59 Apoyos fijos en subestructura	79
Ilustración 60 Condiciones de contorno para los vehículos.....	79
Ilustración 61 Refinamiento del modelo de elementos finitos.....	81
Ilustración 62 Calidad general del mallado.....	82
Ilustración 63 Coeficiente de aspecto.....	82
Ilustración 64 Coeficiente jacobiano	83
Ilustración 65 Pila de tipo pórtico de dos columnas con vehículo liviano.....	84
Ilustración 66 Pila de tipo pórtico de dos columnas con vehículo pesado	84
Ilustración 67 Comparativo de falla producida – Camión liviano.	89
Ilustración 68 Daños en el elemento impactado – Camión pesado.....	92
Ilustración 69 Secuencia de impactos para $V = 80\text{ km/h}$	94
Ilustración 70 Pila de tipo pórtico de tres columnas con vehículo liviano	95
Ilustración 71 Pila de tipo pórtico de tres columnas con vehículo pesado.....	95
Ilustración 72 Daños en el elemento impactado – Camión pesado.....	101
Ilustración 73 Secuencia de impactos para $V = 80\text{ km/h}$	103
Ilustración 74 Pila de tipo muro con vehículo liviano	105
Ilustración 75 Pila de tipo muro con vehículo pesado	105
Ilustración 76 Fenómeno de impacto en el apoyo tipo muro – Camión pesado. .	112
Ilustración 77 Secuencia de impactos para $V = 80\text{ km/h}$	114
Ilustración 78 Definición de elementos de apoyo en modelo de contraste.....	115
Ilustración 79 Aplicación de carga unitaria a los modelos estructurales de contraste	116

Ilustración 80 Aplicación de carga unitaria a los modelos estructurales de contraste	117
Ilustración 81 Definición de elementos de apoyo en modelo de contraste con inercias reducidas.....	121
Ilustración 82 Aplicación de carga unitaria a los modelos estructurales de contraste – Inercias reducidas	122
Ilustración 83 Aplicación de carga unitaria a los modelos estructurales de contraste – Inercias reducidas	123
Ilustración 84 Sección de columna circular	125
Ilustración 85 Definición de propiedades para modelo de Mander.....	125
Ilustración 86 Curva de concreto confinado – Modelo de Mander.....	126
Ilustración 87 Curva de concreto confinado – Modelo de Mander.....	127

Gráficas

Gráfica 1 Parámetros de la curva de Mander.....	49
Gráfica 2 Parámetros del modelo de Spolesta y Monti.....	51
Gráfica 3 Gráfico de aceleración vs. tiempo – Camión ligero.....	85
Gráfica 4 Gráfico de aceleración vs. tiempo – Camión pesado.....	85
Gráfica 5 Gráfico de Fuerza Vs tiempo – Camión ligero.	86
Gráfica 6 Gráfico de Fuerza Vs tiempo – Camión pesado.	87
Gráfica 7 Gráfico de Fuerza máxima Vs velocidad – Camión ligero.	87
Gráfica 8 Gráfico de Fuerza máxima Vs velocidad – Camión pesado.	88
Gráfica 9 Gráfico de Esfuerzo Vs Deformación – Camión liviano.	90
Gráfica 10 Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión pesado.	90
Gráfica 11 Gráfico de Deformación Total Vs Tiempo – Camión Liviano.....	91
Gráfica 12 Gráfico de Deformación Total Vs Tiempo – Camión pesado.	91
Gráfica 13 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión ligero.	93
Gráfica 14 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado. ...	93
Gráfica 15 Gráfico de aceleración Vs tiempo – Camión ligero.	96
Gráfica 16 Gráfico de aceleración Vs tiempo – Camión pesado.	96

Gráfica 17 Gráfico de Fuerza Vs tiempo – Camión ligero.	97
Gráfica 18 Gráfico de fuerza vs tiempo – Camión pesado.	98
Gráfica 19 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión ligero.	98
Gráfica 20 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado.	99
Gráfica 21 Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión liviano.	99
Gráfica 22 Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión pesado.	100
Gráfica 23 Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión Liviano.	100
Gráfica 24 Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión pesado.	101
Gráfica 25 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión ligero. ...	102
Gráfica 26 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado. ...	102
Gráfica 27 Gráfico de aceleración vs tiempo – Camión ligero.	106
Gráfica 28 Gráfico de aceleración vs tiempo – Camión pesado.	106
Gráfica 29 Gráfico de fuerza vs tiempo – Camión ligero.	107
Gráfica 30 Gráfico de fuerza vs tiempo – Camión pesado.	108
Gráfica 31 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión ligero.	108
Gráfica 32 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado.	109
Gráfica 33 Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión liviano.	109
Gráfica 34 Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión pesado.	110
Gráfica 35 Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión Liviano.	110
Gráfica 36 Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión pesado.	111
Gráfica 37 Gráfico de Desplazamiento máximo Vs velocidad – Camión ligero. ...	113
Gráfica 38 Gráfico de Desplazamiento máximo Vs velocidad – Camión pesado. ...	113
Gráfica 39 Gráfico de Fuerza máxima Vs velocidad – Camión ligero.	131
Gráfica 40 Gráfico de Fuerza máxima Vs velocidad – Camión pesado.	131
Gráfica 41 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado – P. 2 Columnas.	131
Gráfica 42 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado – P- 3 Columnas.	132
Gráfica 43 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado - Muro.	132
Gráfica 44 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión ligero. ...	133

Gráfica 45 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado.	134
Gráfica 46 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado – P. 2 Columnas.	135
Gráfica 47 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado – P. 3 Columnas.	135
Gráfica 48 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado - Muro.	135
Gráfica 49 Rigidez residual en sistemas impactados – Camión liviano.....	136
Gráfica 50 Rigidez residual en sistemas impactados – Camión pesado.	137
Gráfica 51 Comparativo de curvas esfuerzo deformación - Camión Liviano.....	138
Gráfica 52 Comparativo de curvas esfuerzo deformación - Camión Pesado.	139

Listado de tablas

Tabla 1. Puentes afectados por impactos vehiculares en Colombia.	19
Tabla 2. Puentes afectados por impactos vehiculares fuera de Colombia.	21
Tabla 3. Masa acelerada en el modelo de elementos finitos.	86
Tabla 4. Masa acelerada en el modelo de elementos finitos.	97
Tabla 5. Masa acelerada en el modelo de elementos finitos.	107
Tabla 6. Cálculo de inercias para modelo de Pórtico de 3 columnas.	119
Tabla 7. Cálculo de inercias para modelo de Pórtico de 2 columnas.	119
Tabla 8. Cálculo de inercias para modelo de apoyo tipo Muro.	120
Tabla 9. Cálculo de rigidez residual en estructuras.	124
Tabla 10. Módulos de resiliencia.	128
Tabla 11. Diferencias porcentuales en módulos de resiliencia.	128
Tabla 12. Cálculo de secciones equivalentes	129
Tabla 13. Módulos de resiliencia para pilas post-impacto comparado contra módulos teóricos iniciales	129
Tabla 14. Porcentaje de pérdida de resiliencia.	130

Resumen

Son numerosas las causas que afectan la seguridad e integridad de los puentes, la mayoría de ellas son de origen natural como los sismos, derrumbes o arrastre cuando el obstáculo por salvar es un cauce natural, sin embargo; dado el uso y el impacto de la actividad humana sobre estas estructuras, se da origen a otras causas que son igual de catastróficas para los puentes. Un ejemplo claro de esto es el efecto que tienen los impactos vehiculares sobre los puentes.

Existe una vulnerabilidad representativa ante los impactos vehiculares, el presente estudio aborda un primer acercamiento a los efectos locales y generales producidos por el impacto de dos tipos de vehículos (catalogados como liviano y pesado) a tres distintas velocidades (40 km/h, 60 km/h y 80 km/h) en un puente apoyado por tres tipos de pila (Muro, pórtico de tres columnas y pórtico de dos columnas), definidas según las construcciones actuales en Colombia, a partir de modelos computacionales en el software de elementos finitos ANSYS. De acuerdo con el número de parámetros variables involucrados en el estudio, se construyeron un total de 18 modelos.

La perspectiva que se pretende abordar es la de determinar la resiliencia del sistema de apoyo del puente una vez ha sido impactado por el vehículo y, a partir de los resultados obtenidos, calcular la reducción que se presenta en esta propiedad a partir de la rigidez de la pila. Con ello analizar qué sistema de los estudiados es el óptimo para soportar o mantenerse en pie ante este tipo de cargas.

1. Justificación

En la última década se han realizado algunos estudios (Cusba M., 2011) (Muñoz D., 2011) enfocados a determinar cuáles son las causas que afectan desfavorablemente a los puentes, a partir de los cuales se ha encontrado que las cargas de tipo impulsiva, específicamente los impactos vehiculares, han afectado históricamente la integridad y durabilidad de un número considerable de puentes en el país (Cusba M., 2011) (Muñoz D., 2011), siendo esta carga la causante del colapso total o parcial de los mismos. Generalmente, los daños en los puentes ocasionados por el **hombre** producen condiciones desfavorables en sus elementos, estos daños debido a la naturaleza de la carga son inmediatos, pero a su vez generan deterioro en función del tiempo en la estructura, lo que ocasiona que ésta quede en un estado inoperable o peor aún, su colapso. A pesar de que esta es una situación histórica y repetitiva, las regulaciones locales de diseño de puentes no contemplan en un marco global, parámetros que provean al puente con un grado de resistencia mayor contra este tipo de eventos que finalmente se convierte en una solicitud de diseño al generar una configuración de cargas crítica y reducir la resistencia de los elementos individuales que conforman al puente. (Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP14, 2015).

Los impactos vehiculares sufridos por un puente pueden ser analizados desde varias perspectivas, dependiendo del tipo de puente, su localización y su uso. Un caso típico de este evento es cuando los vehículos de transporte de carga pesada, por ejemplo, las “cama baja”, impactan las vigas longitudinales de los puentes. Estos vehículos sobre los cuales se transportan maquinarias de construcción muchas veces no cumplen los gálibos mínimos reglamentarios con los cuales se construyen los puentes, de modo que se acomoda este equipo de forma inadecuada y a la hora de ser transportados golpean a los puentes en la zona inferior, generando rompimiento de las vigas principales o en algunos casos, el colapso si el puente no tiene las restricciones laterales suficientes.

Estas solicitudes producen la destrucción parcial o total de los elementos afectados en la estructura cuyos efectos iniciales y finales a modo global son evidentes, pero no hay una base documental que, bajo casos típicos de ocurrencia de estos tipos de carga, indique cual es el efecto o el grado de reducción de la resistencia en los elementos estructurales del puente. Se pretende entonces estudiar la magnitud de los efectos ocasionados por los impactos vehiculares en puentes con el fin de determinar a partir de unas tipologías de puentes bien parametrizadas, cuáles son los elementos estructurales de mayor afectación con el objeto de dar un primer acercamiento al estudio de estos efectos.

2. Introducción

La resiliencia es una propiedad que puede ser encontrada en cualquier material o mecanismo que cuente con cierto grado de elasticidad, en principio; se puede hablar de resiliencia cuando dicho material o mecanismo es sometido a una perturbación de su estado original y una vez ésta ha cesado, es capaz de recuperar dicho estado. En general, las estructuras se ven sometidas a “perturbaciones” que cambian o modifican su estado de equilibrio, entonces; ellas responden a éstas transmitiendo esfuerzos entre los elementos que las conforman y deformándose y así encuentran un nuevo equilibrio en cada instante de tiempo.

La resiliencia estructural entonces es la capacidad que tiene una estructura para recuperar su condición de equilibrio luego de recibir cargas, sin embargo; existen dos situaciones: La primera de ellas es el caso en que la carga que recibe la estructura no la somete a esfuerzos y deformaciones tales que supere su límite elástico, en cuyo caso la estructura es capaz de disipar toda la energía que recibe de dicho evento y de regresar a su condición inicial, la otra situación es más crítica y es el caso en el que la carga somete a la estructura a una condición de esfuerzos y deformaciones tal que se supera el límite elástico de sus materiales y sus elementos estructurales empiezan a plastificarse y, una vez retirada la carga; la estructura ha encontrado un nuevo equilibrio, es probable que luego de plastificarse, la estructura recupere cierto grado de deformación, pero a pesar de ello, ésta tendrá daños permanentes.

Este estudio se centra en la respuesta obtenida en sistemas estructurales típicos en la construcción de puentes ante cargas de impacto vehicular con el fin de determinar su resiliencia ante estas cargas, a través de un modelo computacional de elementos finitos. En esta investigación se usará la rigidez de la estructura como base para determinar su resiliencia ante las sollicitaciones generadas por el impacto.

Se emplea en el estudio tres tipos de apoyos, una pila tipo pórtico con 3 columnas, otra con dos columnas y una pila de tipo muro, las cuales se someten a los impactos de dos vehículos, uno de carga liviana y otro de carga pesada, a velocidades de 40 km/h, 60 km/h y 80 km/h, lo que da un total de 18 modelos de elementos finitos; de los cuales se extraen las respuestas de la estructura y a partir de estos y las propiedades geométricas y condiciones de contorno de los modelos se alcanza una medida de resiliencia para cada uno de los sistemas propuestos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Determinar la resiliencia de puentes, cuya resistencia se ha visto afectada por impactos vehiculares, en términos de parámetros de interés para el diseño estructural como rigidez, sección efectiva de elementos estructurales y tipo de material empleado, utilizando análisis por elementos finitos con el programa ANSYS-

3.2. Objetivos específicos

1. Determinar qué parámetros afectan la respuesta de la estructura en función del daño que se presenta luego de la aplicación de la carga de impacto vehicular, en función de su geometría, condiciones de apoyo, restricciones, entre otros, realizando un comparativo entre configuraciones típicas de los parámetros ya mencionados empleadas para el diseño y construcción de puentes en Colombia.
2. Analizar los efectos en los elementos de la estructura luego de recibir un impacto vehicular en función de las fallas que presente, la reducción de su rigidez o resistencia y la respuesta de la estructura y relacionarlo con la constitución de sus elementos realizando un comparativo entre configuraciones típicas de los parámetros ya mencionados empleadas para el diseño y construcción de puentes en Colombia.
3. Determinar la resiliencia de la estructura a partir de su funcionalidad y su capacidad con respecto a la carga aplicada a partir de las configuraciones comparadas midiendo su funcionalidad como una pérdida de su capacidad de proveer seguridad a los usuarios al relacionarlo con la pérdida de su resistencia.

4. Antecedentes

4.1. Antecedentes históricos de impactos vehiculares contra puentes en Colombia

Desde que existen los vehículos impulsados por un motor, los puentes se han visto afectados por impactos de estos y sus afectaciones son mayores en función de la envergadura del vehículo. Colombia no es la excepción en la ocurrencia de estos eventos y de allí la importancia de esta investigación. A continuación, se muestran algunos de los impactos de este tipo ocurridos dentro de los últimos 5 años:

Tabla 1. Puentes afectados por impactos vehiculares en Colombia.

PUENTES CON AFECTACIONES POR IMPACTOS - COLOMBIA					
No.	Nombre	Ubicación	Año	Descripción	Referencia
1	Puente vehicular Calle 116	Bogotá - Colombia	2017	Tractomula impacta contra una viga del puente la cual fue afectada gravemente. Se reporta que el puente ya presentaba deterioros de tipo estructural	Cierres viales en la Autopista Norte de Bogotá por choque de una tractomula. (2017, Octubre 29). Recuperado de: https://www.lafm.com.co/bogota/cierres-viales-la-autopista-norte-bogota-choque-una-tractomula
2	Puente Variante Ciénaga	Variante de Ciénaga - Magdalena	2019	Las vigas de superestructura, en etapa constructiva, sufren un particular impacto cuando una de estas vuelca y termina golpeando a la siguiente generando un efecto dominó que terminó con el colapso del tramo de puente. Estas no contaban con restricción lateral en sus apoyos. Los apuntalamientos colapsaron.	Dos muertos y tres heridos deja el colapso de puente en construcción en Ciénaga. (2019, Diciembre 21). Recuperado de: https://www.eluniversal.com.co/colombia/dos-muertos-y-tres-heridos-deja-colapso-de-puente-en-construccion-en-cienaga-FY2166263
3	Puente peatonal - Calle 5 con Cra 23	Cali - Valle del Cauca/Colombia	2016	Un tractocamión impacta contra la viga principal del tablero desplazándolo de sus apoyos y partiéndolo en 2.	Camión partió en dos puentes peatonales en la Calle 5. (2016, Julio 18). Recuperado de: https://www.bluradio.com/blu360/pacifico/camion-partio-en-dos-puente-peatonal-en-la-calle-5
4	Puente peatonal Granada	Granada - Cundinamarca/Colombia	2018	Tracto camión impacta contra la superestructura del puente peatonal derribándola totalmente.	Habilitada la vía Bogotá - Girardot, Luego de derrumbe de puente peatonal. (2018, Enero 23). Recuperado de: https://caracol.com.co/emisora/2018/01/24/bogota/1516752247_349817.html

PUENTES CON AFECTACIONES POR IMPACTOS - COLOMBIA					
No.	Nombre	Ubicación	Año	Descripción	Referencia
5	Puente sobre Av. 2 Norte	Cali - Valle del Cauca/Colombia	2020	El contenedor de un tractocamión se estrella contra la superestructura del puente vehicular generando daños importantes a dos de las vigas longitudinales.	Contenedor de un tractocamión se estrelló con el puente aledaño al club Colombia, en Cali. (2020, Octubre 20). Recuperado de: https://www.elpais.com.co/california/contenedor-de-un-tractocamion-se-estrello-con-puente-aledaño-al-club-colombia-en.html
6	Puente de circunvalar con 51B	Barranquilla - Atlántico	2020	Carro tanque impacta contra muro de contención en uno de los apoyos del puente. No se indican que daños sufre la estructura.	Carro tanque se estrella contra muro del puente de circunvalar con 51B. (2020, Marzo 24). Recuperado de: https://canaltropical.co/?p=41679
7	Puente peatonal Carrera 30 con calle 40	Bogotá D.C.	2022	Vehículo impacta contra uno de los apoyos intermedios de un Puente peatonal	https://www.eltiempo.com/bogota/carro-choco-contra-puente-peatonal-y-dejo-seis-heridos-bogota-678903
8	Puente vehicular Carrera 30 con Av. Américas	Bogotá D.C.	2017	Camioneta impacta contra puente vehicular en la carrera 30 con Av. Las Américas.	https://www.eltiempo.com/bogota/camioneta-choco-contra-puente-vehicular-de-las-americas-con-carrera-30-148568

A continuación, se listan los puentes identificados en la tabla 1:

1. Puente vehicular Calle 116 (Bogotá D.C.)
2. Puente Variante Ciénaga (Variante de Ciénaga – Magdalena)
3. Puente peatonal - Calle 5 con Cra 23 (Cali - Valle del Cauca/Colombia)
4. Puente peatonal Granada (Granada - Cundinamarca/Colombia)
5. Puente sobre Av. 2 Norte (Cali - Valle del Cauca/Colombia)
6. Puente de circunvalar con 51B (Barranquilla – Atlántico)
7. Puente peatonal Carrera 30 con calle 40 (Bogotá D.C.)
8. Puente Vehicular carrera 30 con Av. Las Américas (Bogotá D.C.)

4.2. Antecedentes históricos de impactos vehiculares contra puentes en otros países.

Al igual que en el numeral anterior, se muestra a continuación un breve listado de puentes que se han visto afectados por este tipo de evento, fuera de Colombia:

Tabla 2. Puentes afectados por impactos vehiculares fuera de Colombia.

PUENTES CON AFECTACIONES POR IMPACTOS - EL MUNDO					
No.	Nombre	Ubicación	Año	Descripción	Referencia
1	Puente sobre Río Moju	Estado de Pará - Brasil	2019	Una embarcación impacta en la infraestructura del puente Río Moju, lo que resulta con cuatro pilas colapsadas junto con un tramo del puente. Ya había sido impactado tiempo atrás.	Buscan desaparecidos tras derrumbe de puente en río de Brasil. (2019, Abril 6). Recuperado de: https://www.eluniversal.com.co/mundo/buscan-a-desaparecidos-tras-derrumbe-de-puente-en-rio-de-brasil-XY1001426
2	Puente peatonal Caja de Agua	El Agustino - Perú	2020	Un camión mixer impacta contra el puente peatonal causando severos daños estructurales. Para proveer soporte se instala una grúa que sirve de apoyo provisional al puente.	Vía de Evitamiento: Camión choca contra puente peatonal y podría colapsar por daños severos. (2020, Enero 31). Recuperado de: https://larepublica.pe/sociedad/2020/01/31/via-de-evitamiento-camion-choca-contra-puente-peatonal-y-podria-colapsar-por-danos-severos-lamsac-accidentes-de-transito-video/
3	Puente peatonal km 15	Cuenca - Ecuador	2020	Un camión transportador de maquinaria (cama baja) impacta contra la viga principal del puente y lo desprende de su apoyo, generando el colapso de la superestructura.	Colapsa puente por choque de tráiler en Cuenca. (2020, Enero 22). Recuperado de: https://www.eluniverso.com/noticias/2020/01/22/nota/7703934/colapsa-puente-choque-trailer-cuenca
4	Puente Agua Sucia	Sarandí del Yí - Uruguay	2019	Camión de transporte agropecuario impacta contra la cabecera del puente causando colapso parcial de la estructura.	Un camión impactó contra la cabecera de un puente en Ruta 6 y provocó su derrumbe. (2019, Enero 10). Recuperado de: https://www.teledoce.com/telemundo/nacionales/un-camion-impacto-contra-la-cabecera-de-un-puente-en-ruta-6-y-provoco-su-derrumbe/

PUENTES CON AFECTACIONES POR IMPACTOS - EL MUNDO					
No.	Nombre	Ubicación	Año	Descripción	Referencia
5	Puente peatonal Carretera Panamericana	Apaseo del alto - Mexico	2020	Tractocamión impacta contra la viga principal del puente generando su colapso.	Tractocamión choca contra puente peatonal y lo derriba. (2020, Enero 7). Recuperado de: https://www.am.com.mx/guanajuato/noticias/Tractocamion-choca-contra-puente-peatonal-y-lo-derriba-20200107-0037.html
6	Puente Av. Venustiano	Monterrey - Mexico	2020	Camión de transporte de materiales impacta contra uno de los apoyos intermedios del puente. No hay un claro registro de daños a la estructura.	Camión se impacta contra la base de un puente en Monterrey. (2020, Octubre 10). Recuperado de: https://www.multimedios.com/en-alerta/camion-se-impacta-contra-la-base-de-un-puente-en-monterrey
7	Puente del Óvalo de Higuiereta	Miraflores - Perú	2020	Camión mezclador impacta contra una de las vigas del puente en el ingreso. Se presentan grietas y desprendimiento de material en el elemento el cual será reforzado con una viga metálica la cual también presenta daños.	Surco: chofer de camión impacta contra puente del Óvalo Higuiereta al no respetar la altura del túnel. (2020, Febrero 1). Recuperado de: https://larepublica.pe/sociedad/2020/02/01/surco-camion-impacta-contra-puente-del-oval-higuiereta-accidente-de-transito-mdga/

A continuación, se listan los puentes identificados en la tabla 2:

1. Puente sobre Río Moju (Estado de Pará – Brasil)
2. Puente peatonal Caja de Agua (El agustino – Perú)
3. Puente peatonal km 15 (Cuenca – Ecuador)
4. Puente Agua Sucia (Sarandí del Yí – Uruguay)
5. Puente peatonal Carretera Panamericana (Apaseo del alto – México)
6. Puente Av. Venustiano (Monterrey – México)
7. Puente del Óvalo de Higuiereta (Miraflores – Perú)

5. Estado del arte

Actualmente existen numerosos estudios que se enfocan en identificar los efectos de las cargas de impacto vehicular en los puentes. Estos trabajos relacionan las características geométricas, propiedades de materiales, estado actual de la estructura, condiciones de apoyo y parámetros de la carga para determinar la resiliencia del puente y la pérdida de su funcionalidad, sin embargo; no profundizan demasiado en variaciones geométricas de los elementos de estudio sino, en aproximaciones del comportamiento del material frente a la carga.

En general, los estudios realizados coinciden en varios puntos de análisis, estos generan un modelo global de la carga, modelando el vehículo a nivel tridimensional en el software LS-DYNA, involucrando los puntos de concentración de masa que impactan contra la estructura, los cuales son el chasis, el motor y la carga transportada por el vehículo, llegando a concluir que son 3 los impactos que sufre el puente en un lapso de tiempo muy corto (Fan, W., Shen, D., Huang, X., & Sun, Y., 2020), del mismo modo, se modelan los elementos vulnerables del puente, algunos acompañados por análisis de impacto a través de pruebas de laboratorio (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F., 2020), (Demartino, C., Wu, J. G., & Xiao, Y., 2017).

Algunos otros de los estudios se centran en el análisis de la respuesta de la estructura ante eventos sísmicos, con el fin de evaluar la resiliencia y la funcionalidad de la estructura. (Baker, J. W., 2007), (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F., 2020).

En cuando a las conclusiones, se encuentran varios puntos en los que convergen los estudios, por ejemplo y sin limitarse a estos, existe una relación entre la fuerza máxima de impacto transmitida a la estructura y la energía cinética con la que esta impacta (velocidad), las condiciones de apoyo del elemento impactado inciden directamente en la ocurrencia de daños en la estructura y que la falla por cizallamiento es la que gobierna en la respuesta de la estructura.

Realmente, son numerosas las limitaciones que inciden directamente en el desarrollo de este tipo de estudios, algunas de estas limitaciones están alineadas con factores económicos dado que no siempre es posible simular en un laboratorio impactos o llevar el experimento a una escala real debido a su costo, por otro lado; otra limitante puede hallarse en el recurso computacional requerido cuando el estudio obedece un análisis mucho más profundo como el estudio mostrado en el numeral 5.2, este nivel de análisis y comparación exige equipos potentes con componentes de alto nivel los cuales muchas veces son construidos bajo pedido, por ello, el aporte al estado del arte desde las distintas perspectivas en las que el problema de las fallas en los puentes ocasionadas por impactos vehiculares puede ser estudiado es fundamental para la profundización y el entendimiento de los fenómenos que se entrelazan una vez ocurre el evento, entonces, se resalta a continuación algunos de los principales estudios realizados sobre este fenómeno, sobre estos se pretende dar continuidad al análisis del fenómeno desde una nueva perspectiva involucrando la resiliencia de los distintos sistemas estructurales que son de uso típico para soportar puentes.

A continuación, se presentan los estudios en mención:

5.1 Efectos de los impactos de camiones sobre las pilas de los puentes (Agrawal, A. K., Liu, G., & Alampalli, S., 2013)

De acuerdo con este estudio, el impacto de camiones contra los puentes es la tercera causa de falla en estas estructuras en USA llegando ser los causantes del 20% del total de las fallas en los puentes. Normativas como la AASHTO proporcionan criterios de diseño para los elementos vulnerables del puente. Estos deben diseñarse para resistir una fuerza estática equivalente de 400 kip (1800 kN) en dirección de cualquier plano horizontal a una distancia de 4.0 pies (1.20 m) sobre el nivel del suelo.

5.1.1. Modelación matemática

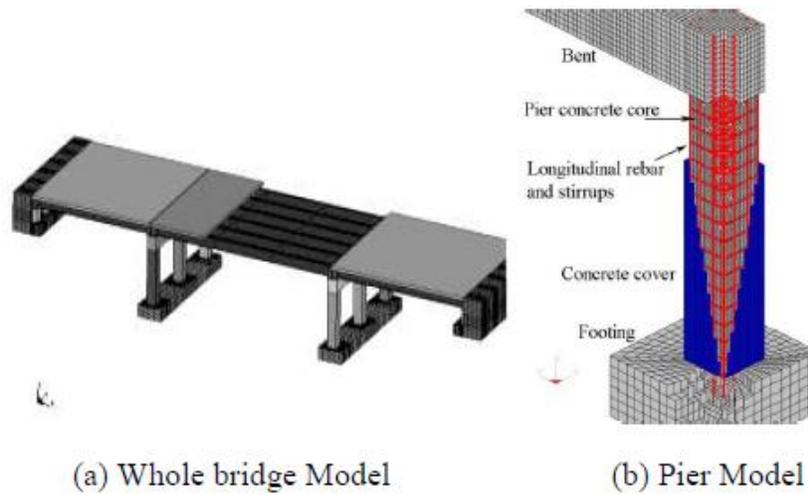
El modelo desarrollado en este estudio consiste en un puente de vigas en acero no continuas, resuelto en tres vanos. Los elementos de apoyo como estribos, tablero y viga cabezal se modelan mediante elementos sólidos mientras que los largueros y cimbras son modelados como elementos de tipo Shell. Las pilas de concreto y su refuerzo son modelados como elementos independientes, asignando a estos las propiedades de los materiales que los constituyen, asignando una geometría de 90x90 cm de sección aproximada para la columna y 4.90 m de altura con barras de una pulgada de diámetro y armadura de confinamiento.

El vehículo se ha modelado como un camión de peso medio de 66 kN con 8.20 m de longitud aproximada, 2.40 m de ancho y 3.10 m de altura. Se generó un modelo independiente para cada una de las partes que componen el vehículo que luego se importan al software de cálculo de elementos finitos para los cuales se asigna a cada pieza un modelo de material. Finalmente, el vehículo se discretiza a través de un mallado de elementos finitos.

El impacto del vehículo contra el puente se modela con la cabeza del camión desplazándose hacia la pila del puente en un ángulo de 20° con respecto a la línea media del eje perpendicular al eje del puente, a partir de datos estadísticos se determinan que las velocidades de colisión están entre las 40 y las 65 mph (64 y 104 km/h), con base en esto, las velocidades de impacto del camión se fijan en 70 mph, 50 mph y 30 mph (113, 80 y 48 km/h) y un tiempo de simulación de 300 ms.

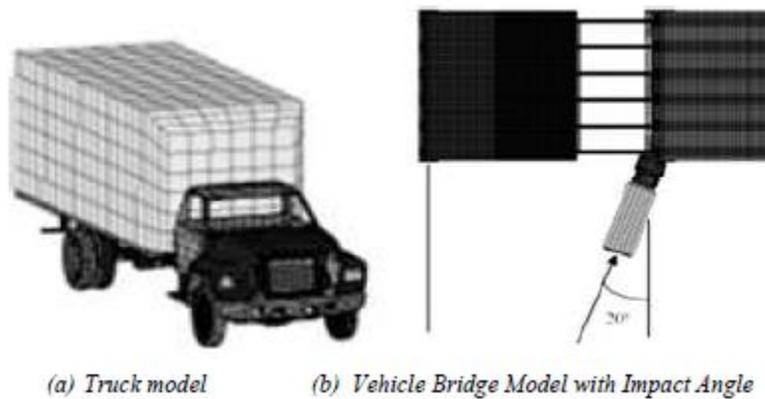
Para los elementos del modelo se ha empleado una malla de tipo lagrangiana y se ha resuelto con el software LS-DYNA.

Ilustración 1 Esquema de modelación matemática.



Fuente: (Agrawal, A. K., Liu, G., & Alampalli, S. (2013). Finite element modelo f the bridge [Figure]).

Ilustración 2 Esquema de hipótesis de impacto vehicular y vehículo.



Fuente: (Agrawal, A. K., Liu, G., & Alampalli, S. (2013). Model of the ford tuck and bridge vehicle impact [Figure]).

5.1.2. Resultados obtenidos

A la velocidad de 113 km/h (70 mph) se hacen evidentes mecanismos de falla en el sistema de soporte del puente. Se observan daños de tipo agrietamiento y desprendimiento de las barras de refuerzo de la matriz de concreto hasta llegar al rompimiento.

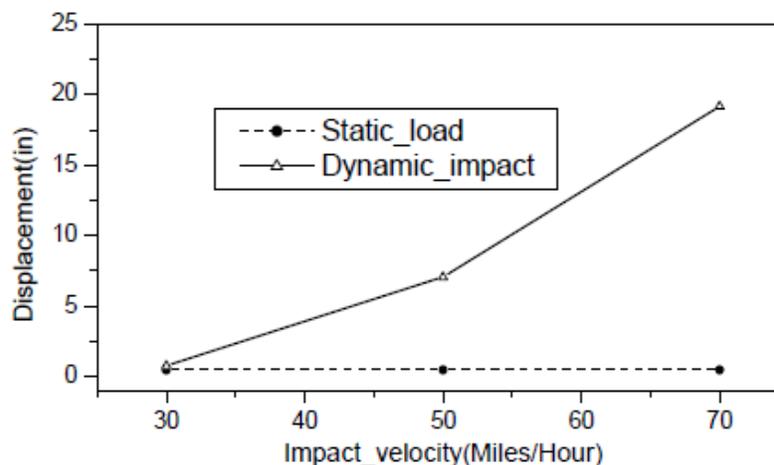
La columna impactada pierde su capacidad después de la ruptura de las barras de refuerzo longitudinal. El modelo muestra daños a tal grado que partes de concreto son desprendidas del elemento, se aprecia concentración de corte en el dado de soporte y formación de rótulas plásticas.

Se observan desplazamientos del elemento impactado de hasta el orden de 20 cm a una velocidad de impacto de 70 mph (113 km/h), que, al compararlo con los resultados obtenidos con respecto a velocidades de 50 mph (80 km/h), se obtiene una diferencia del 50%, dejando como el caso más crítico el impacto a 70 mph (113 km/h).

Se aprecia que, para los casos de 50 mph (80 km/h) y 70 mph (113km/h), la fuerza transferida al puente presenta dos picos, el primero ocurre en el momento que el camión impacta directamente contra el puente y el segundo cuando la inercia de la carga transportada por el camión es transferida a la columna, adicionalmente, en el caso de la mayor velocidad de impacto, el segundo pico de fuerza alcanza una magnitud de casi el doble que el generado por el primer impacto. (Agrawal, A. K., Liu, G., & Alampalli, S. (2013))

En un comparativo de los resultados obtenidos en el estudio y los valores recomendados por la normativa AASHTO en un modelo matemático, se aprecia que para la carga estática la estructura no sufre grandes daños ni deformaciones, sino que más bien se mantienen constante y corresponde de manera más próxima a los resultados obtenidos bajo el impacto a 30 mph, para los demás casos, la carga estática dista bastante de reflejar los daños apreciados en los resultados del modelo dinámico.

Ilustración 3 Curva de desplazamiento máximo contra velocidad de impacto.



Fuente: (Agrawal, A. K., Liu, G., & Alampalli, S. (2013). Comparison between peak displacement because of static and dynamic truck impact loads at different speeds [Figure]).

5.2. Resistencia al impacto de pilas de puentes diseñadas sísmicamente (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F., 2020).

Este estudio evalúa la resistencia al impacto vehicular de los puentes correlacionándola con la resistencia principal de su sistema estructural, la cual está concebida para la disipación de energía sísmica, las cuales “rara vez se estudia su correlación”. (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F., 2020).

El estudio se centra en los fuertes impactos que reciben los puentes por parte de los vehículos cuya magnitud es tal que pueden ocasionar colapsos repentinos gracias a los efectos generados por este tipo de cargas y estos van desde pérdidas económicas, hasta la pérdida de vidas humanas en los casos más catastróficos.

A partir de las modelaciones realizadas, se evidencia que los modos de falla del sistema de soporte del puente bajo carga de colisión vehicular son gobernados por dos factores: la fuerza de impacto vehicular y la resistencia al impacto del sistema.

5.2.1. Modelación matemática

La modelación matemática consistió en realizar modelos numéricos de puentes con distinta capacidad de disipación de energía sísmica, teniendo en cuenta que, para eventos sísmicos, estos no deben colapsar. Se modelan entonces puentes apoyados en pórticos de dos columnas con cuatro niveles de demanda sísmica. Un aspecto importante para resaltar de este estudio es que se emplearon barras cuyo esfuerzo de fluencia es de apenas 360 MPa.

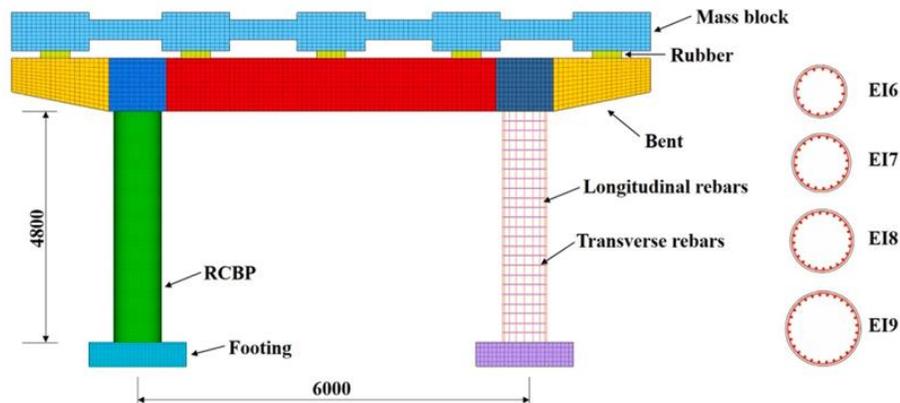
Ilustración 4 Geometría y refuerzo empleado en las pilas en la modelación matemática.

Designation	Earthquake Intensity level	Cross-section	Diameter (mm)	Height (mm)	Longitudinal rebars (mm)	Transverse rebars (mm)
EI6	6		1000	4800	16D20 ($\rho_l = 0.64\%$)	D10@200 ($\rho_t = 5.19\%$)
EI7	7		1100	4800	20D22 ($\rho_l = 0.80\%$)	D12@200 ($\rho_t = 6.76\%$)
EI8	8		1200	4800	24D25 ($\rho_l = 1.04\%$)	D14@200 ($\rho_t = 8.40\%$)
EI9	9		1400	4800	28D35 ($\rho_l = 1.75\%$)	D14@150 ($\rho_t = 9.54\%$)

Fuente: (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F. (2020). Geometry and rebar detailing of double-pier RC bridge models with various seismic provisions [Figure]).

El modelo matemático tuvo en cuenta el carácter inelástico del concreto, lo que incluye la acumulación de daños y el confinamiento. Adicionalmente, se adopta un algoritmo de erosión para describir el proceso físico de fractura y fallo del concreto

Ilustración 5 Descripción esquemática de modelo matemático.



Fuente: (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F. (2020). Schematic view of double-pier RC bridge models [Figure]).

Los vehículos empleados (modelados) fueron una camioneta Pick up Ford 800 y un tracto camión. Las consideraciones de camión ligero no incluyen una carga transportada, mientras que para los camiones pesados se consideran cargas de 4.8 t y 12.8 t.

Ilustración 6 Vehículos considerados para la modelación.

Vehicle models	Length (m)	Width (m)	Engine weight (t)	Full weight of vehicle (t)	Number of total elements
Light truck 	5.9	2.0	0.34	3.0	723,329
Medium truck 	8.5	2.4	0.87	10.0	41,255
Heavy truck 	19.5	2.4	1.52	30.0	86,721

Fuente: (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F. (2020). Detailed information of truck models. [Figure]).

El estudio se realizó considerando un total de 108 escenarios de colisión a velocidades de impacto de 60 km/h, 100 km/h y 120 km/h y una duración total del tiempo de cálculo de todos los modelos de 250 ms, además, se registran las historias temporales de la fuerza de impacto del vehículo, la demanda dinámica de cizallamiento y el desplazamiento lateral del

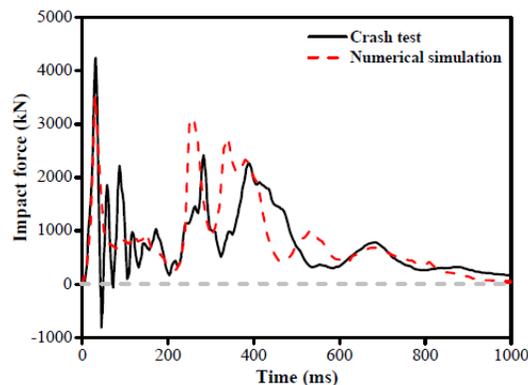
sistema de apoyo del puente. Se identifican tres picos de fuerza transmitida por el vehículo correspondientes al contacto del parachoques, el motor y la carga transportada. Luego del impacto, se identificaron daños en el refuerzo y en la pila subsiguiente debida la transmisión de fuerzas.

5.2.2. Resultados obtenidos

A partir de las evaluaciones realizadas para los 108 escenarios estudiados, se identificaron cinco tipos de modo de fallo, los cuales reflejan desde el daño local hasta el daño total y colapso del puente. Estos se identificaron como:

- FM-1: Desprendimiento del concreto no confinado.
- FM-2: Formación de rótula plástica en el soporte del concreto.
- FM-3: Rotura de la columna.
- FM-4: Fractura de las barras de acero de la columna.
- FM-5: Colapso total del puente.

Ilustración 7 Energía del evento y fuerza transmitida.



Fuente: (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F. (2020). Comparison between prototype crash test and numerical simulations. [Figure]).

El modo de fallo que se presentó dependía de la capacidad sísmica del sistema, la velocidad de impacto y el peso del camión.

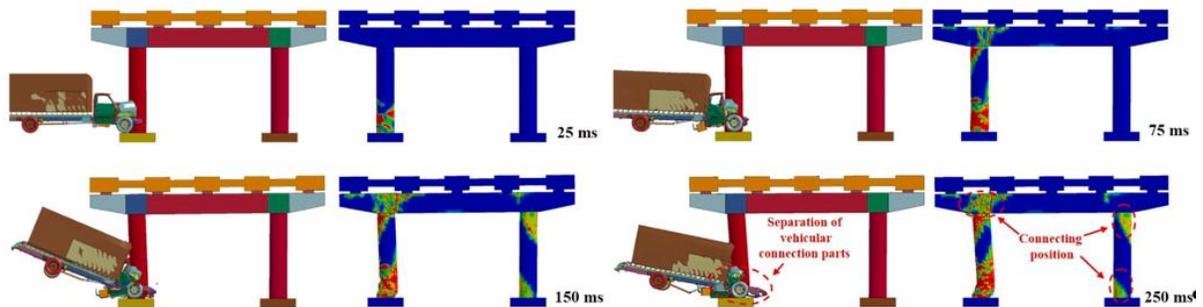
- Bajo velocidades de impacto de entre 40 a 70 km/h, las fallas que se presentan son de tipo FM-1.
- Para velocidades de entre 70 y 100 km/h, se presentan fallas de tipo FM-3 y FM-4.

- Para velocidades superiores a los 100 km/h, se produce el colapso total del puente debido a la rotura de la pila.

Bajo las características encontradas en cada tipo de falla se encuentra una fuerte correlación entre esta y la capacidad sísmica del sistema, observando que la gravedad del daño es menor a mayor capacidad de resistencia ante el sismo. (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F. (2020))

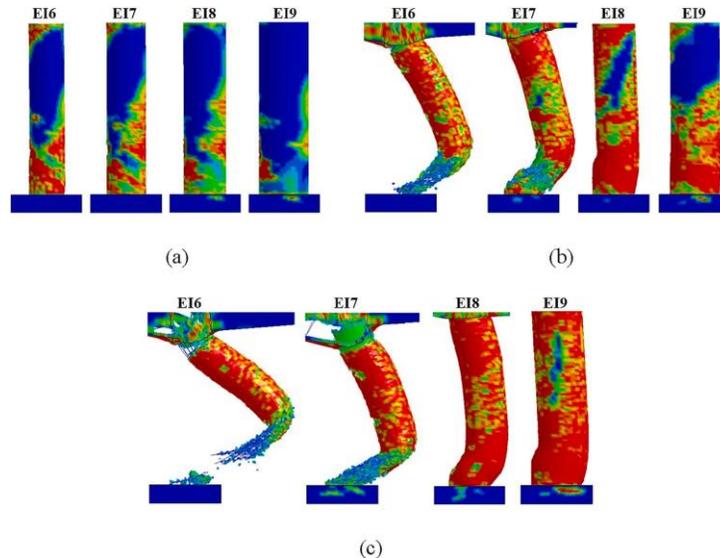
Se encuentra también un alto grado de daño debido al cizallamiento debido al impacto del vehículo, particularmente en la zona donde este golpea al puente, estableciendo una relación entre la deformación y la capacidad a corte.

Ilustración 8 Modos de falla presentes frente a impactos vehiculares.



Fuente: (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F. (2020). Overall impact process and dynamic responses of the case of E16-MT-V100. [Figure]).

Ilustración 9 Daños presentados en las pilas.



Fuente: (Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F. (2020). Failure modes of RCNPs under heavy truck impact. [Figure]).

5.3. Estudio de los efectos de colisiones vehiculares sobre pilas de concreto reforzado de sección circular. (Gomez, N. L., & Alipour, A., 2014).

El estudio desarrolló un modelo detallado de elementos finitos que permitía establecer niveles de desempeño en función de los daños presentados debido a impactos vehiculares.

5.3.1. Modelación matemática

La modelación numérica se resolvió mediante el software de elementos finitos LS-Dyna y consiste en dos componentes, el componente estructural que consiste en un sistema de pila, su apoyo de cimentación y una parte de la superestructura y el vehículo de impacto que será un camión Ford F800.

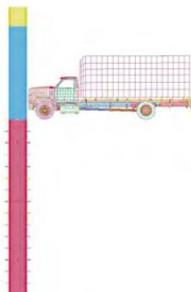
La pila modelada contó con una altura libre de 4.90 m y un diámetro de 0.92 m, está reforzada con barras longitudinales #9 y barras #5 para el refuerzo transversal con espaciamientos entre 5 cm y 45.7 cm. El concreto no confinado se modeló con una resistencia a la compresión de 42 MPa y recubrimientos de 7.5 cm.

La superestructura fue representada por una masa de 240 toneladas colocadas encima del pórtico, se hizo un ajuste del material asignado a dicha masa para que esta representara de manera adecuada al puente.

El modelo del vehículo consta de una masa de 8 toneladas y se evaluaron los efectos del impacto vehicular a una velocidad de 80 km/h con un frente de ataque perpendicular al eje del pórtico.

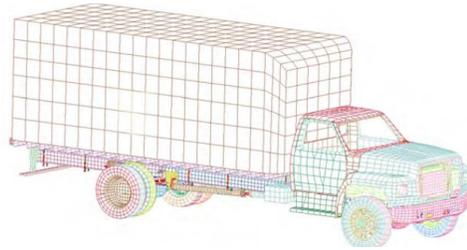
El estudio se enfocó en observar la resistencia de las pilas de concreto ante impactos vehiculares a distintas separaciones de refuerzo transversal.

Ilustración 10 Modelo computacional.



Fuente: (Gomez, N. L., & Alipour, A. (2014). Numerical model of the bridge pier and impact vehicle. [Figure]).

Ilustración 11 Modelo de vehículo de impacto



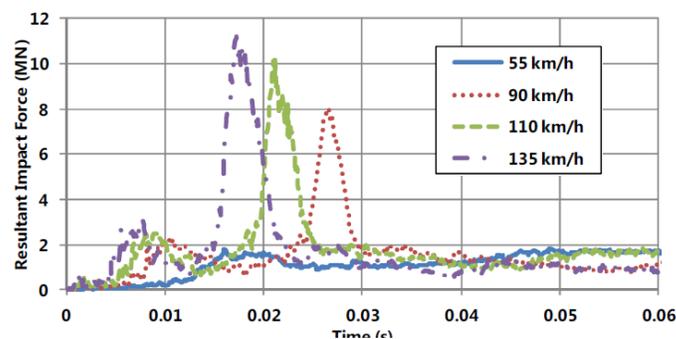
Fuente: (Gomez, N. L., & Alipour, A. (2014). Finite element model of a 1996 Ford F800 single-unit truck. [Figure]).

5.3.2. Resultados obtenidos

El estudio ha analizado las separaciones de barras de refuerzo transversal en una pila de sección circular para separaciones de 5, 15, 30 y 45 cm. Para los casos analizados se ha encontrado un alto nivel de fuerzas de corte y flexión, sin embargo, la falla por corte es la principal amenaza de estos elementos. Las pilas cuya separación de estribos fue de 5 cm sufrieron daños muy leves, aunque si incluyeron desprendimientos del recubrimiento de los refuerzos. A medida la separación de los flejes aumenta, se aprecian mayores desprendimientos de las capas de concreto y, por ende, una mayor exposición del refuerzo longitudinal e incluso el pandeo de este último. (Gomez, N. L., & Alipour, A. (2014))

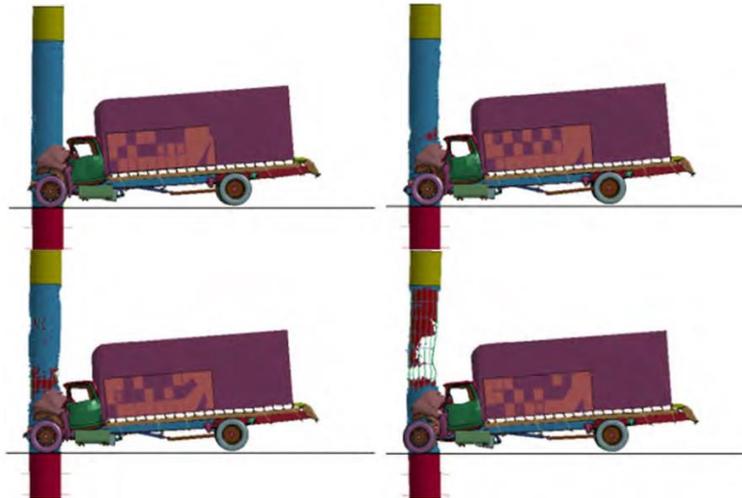
A partir de los resultados obtenidos de las modelaciones se evaluó la capacidad operativa del puente estudiado, encontrando que para las separaciones de flejes que van entre los 5.0 cm y los 30.5 cm permite una operatividad del puente con restricciones de carga hasta que se restituyera su capacidad, mientras que para el caso de flejes separados a 47.2 cm, la pila del puente ante el impacto evaluado ha perdido gran parte de su capacidad y, por ende, el puente es inoperable con riesgo de colapso.

Ilustración 12 Fuerza de impacto resultante.



Fuente: (Gomez, N. L., & Alipour, A. (2014). Raw resultant impact force data for the F800 SUT at various impact velocities. [Figure]).

Ilustración 13 Impactos vehiculares sobre pila de puente



Fuente: (Gomez, N. L., & Alipour, A. (2014). Impact results at 0.10 second for hoop spacing of 5.0 cm (top left), 15.2 cm (top right), 30.5 cm (bottom left), and 45.7 cm (bottom right). [Figure]).

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Hipótesis

Las cargas de impacto vehicular son cargas de corta duración, pero de gran magnitud, características que las catalogan como fuerzas impulsivas y sus implicaciones en las estructuras son variables en función de su punto de aplicación, las propiedades dinámicas de la estructura y las características mencionadas inicialmente. El cambio en la cantidad de movimiento inducido por este tipo de fuerzas a la estructura, es capaz de generar daños sobre la misma, que dependiendo de sus propiedades puede llevar a la estructura al deterioro o a su colapso al reducir su resistencia o su capacidad global para resistir las cargas de servicio y eventos de baja ocurrencia para los cuales fueron diseñadas, sin embargo, las estructuras en su mayoría son capaces de seguir operativas luego de eventos desfavorables o en otros casos, logran mantenerse estables de modo que pueden entrar en una etapa de reparación, esto debido a una característica inherente a cada estructura llamada resiliencia. El grado de esta propiedad, estará determinado por su geometría, redundancia y propiedades tanto estáticas como dinámicas.

En general, las normas de diseño de puentes de todos los países incluyen criterios en sus estados límite que permiten incluir cargas de impacto como un caso estático de análisis, sin embargo, existen estudios que concluyen que el efecto dinámico producido por un impacto

vehicular, genera mayores sollicitaciones en los elementos estructurales, lo que implica que ante estos eventos desfavorables los puentes tienen un margen de inseguridad que puede ser elevado, a partir de esta incertidumbre, nace el interrogante : *¿Cuáles son los efectos producidos en el puente luego de la ocurrencia de impactos vehiculares sobre sus elementos estructurales y como se relacionan estos efectos con sus características?*

6.2. Resiliencia estructural

De acuerdo con la definición dada por la real academia española, resiliencia es: *“Capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometida”* (Real academia española. Citación. En el diccionario rae.es. Recuperado el 15 de septiembre, 2023, en <https://dle.rae.es/resiliencia.>). Por lo tanto, la resiliencia es una propiedad con la que cuentan las estructuras desde el momento de su construcción.

La resiliencia estructural entonces es la capacidad que tiene una estructura para recuperar su condición de equilibrio luego de recibir cargas, bajo este mismo concepto, una vez que una estructura es sometida a cargas tales que puedan generar deformaciones y daños permanentes a sus elementos, sus características y propiedades son afectadas y por lo tanto su capacidad es reducida, entonces; se aborda la resiliencia estructural como aquella capacidad con la que cuenta una estructura de recuperar el equilibrio una vez la carga que ha llevado a sus elementos al daño ha cesado, manteniendo su integridad con su capacidad residual.

La resiliencia como característica producto de la capacidad residual de una estructura, se ha convertido en un tema importante a la hora de caracterizar y proveer a las estructuras de medidas de respuesta y soporte ante los eventos desfavorables que ocurren en un puente durante su vida útil.

Aunque el foco de varias investigaciones es la determinación de la resiliencia en puentes luego de la ocurrencia de eventos sísmicos representativos, esta propiedad puede ser analizada desde la perspectiva de cargas impulsivas/arbitrarias como lo son los impactos vehiculares, previendo que estos impactos generan daños instantáneos a los puentes dada la magnitud de la carga que transmiten (Abdelkarim, O. I., & ElGawady, M. A., 2017), Gholipour, G., Zhang, C., & Mousavi, A. A., 2018). Es bien conocido que el concreto no es un material resistente a la tensión ni a los impactos, por consiguiente, el resultado esperado es que una vez ocurra la transmisión de esfuerzos del vehículo a un elemento estructural de un puente de concreto una parte de este sea desprendida, estas pérdidas de sección o material en un elemento estructural inciden directamente en una pérdida de la resistencia del elemento y por ende de la estructura global. El grado o porcentaje de pérdida de resistencia con respecto a su resistencia inicial dependerá de la magnitud de la carga que impacta contra la estructura y su rigidez, y esta condición modificará su funcionalidad hasta el momento de la reparación de los daños ocasionados, (Baker, J. W., 2007), lo que dará una medida general de la resiliencia de la estructura ante este tipo de cargas. Hay que tener en cuenta que de este evento resultará una modificación de las propiedades tanto estáticas

como dinámicas de la estructura, por lo tanto, su rigidez se verá afectada; lo que hace inferir que existe una relación entre estos parámetros.

De acuerdo con la sección 3 del CCP-14, en los comentarios del numeral C.3.6.5.1, las pilas con diámetro menor de 760 mm son las más vulnerables ante las cargas de impacto vehicular. (Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP14, 2015).

En esta investigación se usará la rigidez de la estructura como base para determinar su resiliencia ante las sollicitaciones generadas por un impacto vehicular. Se ha seleccionado esta propiedad debido a que las características de las cuales ésta depende son las mismas que, a partir del estudio del estado del arte, se ha observado afectan directamente a la capacidad de mitigación o sobreposición al efecto adverso que representa la carga, haciendo mención, pero sin limitarse a: condiciones de apoyo y configuración geométrica de los elementos.

6.3. Los puentes en Colombia y sus tipologías.

De acuerdo con la definición dada por Muñoz (2011), un puente es “Una estructura destinada a salvar obstáculos naturales, como ríos, valles, lagos o brazos de mar; y obstáculos artificiales, como vías férreas o carreteras, con el fin de unir caminos de viajeros y proporcionar transporte de animales y mercancías, entre otras” (Muñoz D., 2011). Con el pasar de los años, las tecnologías constructivas han permitido desarrollar nuevas tipologías de puentes que permiten abarcar grandes luces, mayor tráfico vehicular, mayores alturas para el paso de transporte marítimo, etc.

Históricamente, la necesidad del ser humano de conectar ágilmente asentamientos, ciudades y puntos de interés permitió la construcción de caminos y rutas que dieron alcance a este deseo, sin embargo; en su construcción se identificaron problemas puntuales que requirieron de soluciones de ingenio. Particularmente, la solución puente es característica cuando el relieve natural impide o dificulta un paso ágil y seguro, ya sea de personas, transporte o mercancías, por lo tanto, el identificar materiales y organizarlos de una manera armónica previendo siempre el equilibrio estático de las fuerzas que interactúan en el elemento que se construye y la seguridad de sus usuarios, da origen a lo que llamamos puente. Con base en esta premisa, el puente es una solución de ingeniería que ha evolucionado a lo largo del tiempo según las necesidades y quizá la osadía del hombre, previendo una configuración particular de sus elementos según las condiciones naturales in situ, esto da origen a las tipologías de un puente, luego estas van a exigir cierto nivel de resistencia de sus componentes y por lo tanto de los materiales que los constituyen para resistir las sollicitaciones generadas por la interacción con su entorno y su uso. Los parámetros mencionados son la base que permite estimar las dimensiones y la solución palpable de la estructura y son estos quienes han servido históricamente para materializar las grandes obras de ingeniería de puentes que se han visto desde el mundo antiguo.

Con el entendimiento de la naturaleza y su aprovechamiento para el beneficio común del hombre, se descubrieron varios usos para los materiales que se pueden obtener,

inicialmente la madera fue el material por excelencia para la construcción de puentes, la versatilidad de este material en conjunto con la roca o la cuerda dieron origen a los puentes de alineamiento recto y a puentes colgantes.

Con el crecimiento de los imperios, las necesidades bélicas y económicas de cada era y los descubrimientos en las ciencias de los materiales, dieron un salto con el uso de rocas y los primeros concretos de la historia, los cuales eran capaces de resistir tanto cargas como las acciones naturales como la lluvia, la erosión causada por el cauce y el viento, estos permitieron el surgimiento de los puentes en arco y con ellos la capacidad de salvar grandes distancias con la consecución de esta geometría, es decir, el uso de varios arcos continuos. El desarrollo de esta tipología de puentes fue particular para cada región, sin embargo; fueron los Romanos los más avanzados en estas tecnologías al punto de que hoy en día aún están en pie muchos de los puentes construidos por ellos. Luego de este salto en las tecnologías de construcción, ocurre un gran silencio en el desarrollo de los puentes relacionado con la caída del imperio Romano, no fue hasta la revolución industrial que se establecerían procesos constructivos industrializados y la introducción del hierro y posteriormente el acero como material de construcción, brindando un avance gigantesco a la ingeniería de puentes presentando entonces el origen de la celosía como tipología estructural en la construcción de puentes, esta nueva tipología permite salvar luces mayores, reducir el peso del puente, aumentar la resistencia del puente y el número de acciones que puede soportar el mismo y aunque el uso de la madera para la construcción de celosías ya había sido planteado con mucha anterioridad, no despertó gran interés hasta siglos más tarde. Durante la misma revolución, a finales del siglo XIX, se presentó de igual manera el redescubrimiento de las lechadas cementantes, las cuales en conjunto con las tecnologías de la época y la elaboración del acero dieron origen al concreto reforzado, esto permitió el desarrollo de nuevas tipologías de puentes más durables y de mayor facilidad constructiva en la mayoría de los casos. Con el surgimiento de este material, se retoman conceptos planteados por ingenieros como Freyssinet, como lo fue el concreto pretensado, que permite controlar la fisuración en el concreto prolongando entonces las luces construibles y reduciendo el número de apoyos intermedios en los puentes y, además, permitiendo la prefabricación y posterior montaje de los elementos horizontales del puente lo que permitió el surgimiento de los puentes pretensados y todos los tipos que conocemos hoy en día como lo son los puentes en viga cajón, en construcción de voladizos sucesivos o incluso los puentes extradados. (Muñoz D., 2011).

Existen otras numerosas tipologías de puentes en el mundo, que surgen de los avances en materiales y procesos constructivos, sin embargo, no se alejan de los principios de diseño que se establecieron en los periodos anteriores a la revolución industrial y se afinaron durante esta, se destacan entonces los puentes colgantes los cuales constan de dos tiros parabólicos de un elemento portante, originalmente cuerdas posteriormente cables de acero de alta resistencia, de los cuales se desprenden péndolas las cuales se encargan de soportar el tablero y los puentes atirantados, en estos el tablero se suspende de sus pilones mediante cables que se originan a lo largo de este, estos pueden contar con un soporte monotirante o con sistemas de múltiples cables en distinta disposición como lo son en arpa o abanico, las cuales son las más usuales.

La evolución de los puentes ha marcado notoriamente la historia y los avances de la humanidad, a partir de todos estos desarrollos cada región en el mundo impone su estilo y estética en la construcción de puentes, esto según la topografía donde la estructura va a

erigirse. Colombia no es la excepción, a lo largo del tiempo la construcción de puentes en el país ha ido adoptando las técnicas y desarrollos de otros países y adaptándolas a las condiciones locales, esto ha permitido conservar las tipologías de puentes que mejor se han comportado en el territorio nacional, según el nivel de cargas presentes en el país y su topografía particular, entre estas se resaltan:

6.3.1. Puentes en sistema viga-tablero

Es de la tipología de puentes más comúnmente empleada debido su versatilidad y facilidad constructiva. Consiste en el montaje de vigas prefabricadas de sección doble T, en concreto presforzado, sobre los apoyos que consisten en estribos y pilas, sobre las vigas simplemente apoyadas, se fundirá el tablero en concreto reforzado. El número de apoyos será función de la longitud que se requiera salvar y por lo tanto el número de luces a emplear.

También es común la construcción de puentes de esta tipología con un sistema de tablero nervado en cuyo caso las vigas son reforzadas y es común encontrar que para esta tipología el puente adquiere un alineamiento vertical en arco lo cual aumenta la capacidad a compresión del sistema favoreciendo la acción y resistencia del concreto, del mismo modo y bajo la misma metodología se pueden encontrar puentes con vigas tipo U o artesa, para los cuales, por lo general se emplean dos o más vigas de este tipo tal como si se tratase de vigas presforzadas.

Ilustración 14 Puente viga – tablero Intersección Calle 134 con autopista norte – Bogotá D.C.



Fuente: Google Earth [Fotografía Street view Puente calle 134 con autopista norte. Bogotá D.C., Colombia]

Descripción: Puente de intersección vial resuelto en 6 luces apoyadas en pilas intermedias con sistema de pórtico con 2 columnas para puente sentido oriente occidente y 3 columnas para puente en sentido occidente – oriente. Las vigas se resolvieron mediante sistema de postensionamiento.

Ilustración 15 Puente viga – tablero Intersección Calle 116 con autopista norte – Bogotá D.C.



Fuente: Google Earth [Fotografía Street view Puente calle 116 con autopista norte. Bogotá D.C., Colombia]

Descripción: Puente de intersección vial resuelto en 10 luces apoyadas en pilas intermedias con sistema de pórtico con 2 columnas. El tablero se resuelve mediante un sistema nervado con vigas reforzadas.

6.3.2. Puentes en arco.

Un puente en arco es una estructura cuyo tablero está dispuesto sobre una estructura en forma de arco, esta geometría es óptima para la transferencia de esfuerzos de compresión y es esta la manera en la que transfiere las cargas a los apoyos. Actualmente la tecnología de materiales ha permitido desarrollar los puentes de tal manera que en algunos casos el puente puede estar colgado en el arco en vez de sobrepuesto, dando una estética más llamativa a las estructuras.

Los materiales típicamente empleados en estos puentes ofrecen una gran durabilidad hasta el punto de que hoy en día aún existen alrededor del mundo puentes antiguos en arco. En el país se pueden encontrar puentes de esta tipología de más de 100 años

Ilustración 16 Puente en arco Puente Guayaquil sobre el río Medellín – Medellín – Antioquia.



Fuente: Google Earth [Fotografía Street view Puente Guayaquil, Medellín, Colombia]

Descripción: Puente en arco construido en mampostería en el año 1879 y repotenciado en 1996.

Ilustración 17 Puente en arco metálico con tablero suspendido La Perdiz – Florencia – Caquetá.



Fuente: Vargas, K. (2021). Puente La Perdiz, Caquetá – Florencia [Fotografía]. Recuperado de: <https://www.radionacional.co/noticias-colombia/irregularidades-en-obras-del-puente-de-la-quebrada-la-perdiz-en-florencia>

Descripción: Puente en arco metálico disposición inferior del tablero resuelto en una luz.

6.3.3. Puentes de viga-cajón.

Un puente de viga cajón es básicamente un puente cuya sección tiene una parte hueca conformando un cajón en su interior. La viga se construye de tal manera que se conforma por tabiques que adicionando el tablero pueden tener una forma rectangular o trapezoidal en su área vacía.

Dependiendo del método constructivo y el o los obstáculos a salvar esta sección puede tener variaciones que representan una optimización en el uso del material en función de su longitud, por ejemplo, para una luz pequeña de 20 a 25 m, si se empleara esta tipología, la variación puede ser únicamente en el espesor de sus tabiques y su método constructivo puede ser relativamente sencillo y convencional, sin embargo, para recorrer longitudes mayores, empleando luces representativamente mayores, se podría resolver con secciones variables en función de su longitud, conformando numerosas dovelas e incluso aplicando la metodología de voladizos sucesivos. La variabilidad de la sección de acuerdo con la longitud emplea también el arco como geometría que favorece las condiciones de esfuerzos internos en el puente y permite un ahorro significativo en el uso de materiales y por lo tanto en el peso del puente.

Ilustración 18 Puente en sistema viga cajón intersección Av. Suba con Av. Boyacá – Bogotá D.C.



Fuente: Google Earth [Fotografía Street view Puente Av. Suba con Av. Boyacá. Bogotá D.C., Colombia]

Descripción: Puente en sistema viga cajón apoyado sobre pilas tipo muro de sección ovalada

Ilustración 19 Puente Juanabú – Carretera Popayán – Pasto.



Fuente: Google Earth [Fotografía Street view Puente Juanabú. Popayán, Colombia]

Descripción: Puente construido en la década del 70, está resuelto en 4 luces apoyadas sobre pilas de sección variable, apoyadas sobre las laderas que conforman el valle del río Juanabú.

6.3.4. Puentes atirantados.

En Colombia se han construido numerosos puentes atirantados como el puente Hisgaura. Un puente atirantado soporta su tablero mediante tirantes conformados por cables metálicos anclados en pilonas que pueden ser intermedias o extremas permitiendo un atirantado simétrico o asimétrico en formaciones que pueden ir desde monotirante hasta formación de abanico con atirantamientos concéntricos o excéntricos.

Ilustración 20 Puente Hisgaura, Via Curos - Málaga.



Fuente: Google Earth [Fotografía Street view Puente Hisgaura. Vía Curos - Málaga, Colombia]

Descripción: Puente atirantado resuelto en 580 m de longitud, los tirantes tienen una disposición tipo estrella.

6.4. Puentes y sus componentes

Los puentes son constituidos por distintos elementos que trabajan en conjunto para asegurar su estabilidad, resistencia y seguridad a los usuarios, estos elementos pueden agruparse en dos grandes categorías; *La superestructura y la subestructura*; dentro de la superestructura podemos encontrar todos los elementos que trabajan en conjunto para salvar el obstáculo natural permitiendo el paso seguro de personas y vehículos sobre el mismo, allí están las vigas, la losa, carpeta de rodadura, riostras, arco, tirantes y demás elementos que sirven de soporte superficial en el puente, para el caso de la subestructura, se encuentran todos los elementos de apoyo, aquellos que reciben las cargas y las transmiten al terreno, pero que además, se encargan de proveer resistencia ante todas las cargas horizontales que afectan al puente en general, estos elementos son los estribos, pilas, dados, aletas, pilotes, contrafuertes y demás elementos localizados por debajo del nivel inferior del sistema principal que soporte el tablero.

De acuerdo con su tipología y condiciones de apoyo, los puentes podrán un número mayor o menor de componentes involucrados en su funcionamiento, sin embargo; de manera genérica se resaltan los siguientes elementos:

Ilustración 21 Componentes típicos de los puentes.



Fuente: Muñoz Díaz, E. E. (2011). *Ingeniería de puentes, Reseña histórica, tipología, diagnósticos y recuperación – Tomo 1*. Colombia. Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

6.5. Disposiciones normativas sobre el diseño de puentes.

Colombia tiene un código de diseño fundamentado en las bases y criterios actualmente empleados en el análisis y diseño de puentes que a su vez se soportan en la experiencia y en ensayos de laboratorio en los cuales las normas internacionales se sostienen y en las condiciones particulares de amenaza sísmica y geomorfológicas de este territorio, este código lleva por nombre *NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO DE PUENTES CCP-14* y es esta la base de diseño estructural y análisis de comportamiento de los puentes empleada por los ingenieros dentro del territorio nacional.

Esta norma detallada contiene en sus prescripciones todas las indicaciones referentes a cuales son las cargas que afectan a los puentes y como deben aplicarse en el diseño, cuáles son las ecuaciones resultado de estudios para el análisis y diseño estructural de cada uno de los elementos que componen el puente, como deben detallarse los armados de refuerzos en elementos de concreto y requerimientos mínimos en diseños con estructura metálica, especificaciones de materiales y demás criterios necesarios y rigurosos para realizar diseños estructurales que sean confiables y construir puentes estables y seguros, todo fundamentado en la metodología LRFD (factores de carga y resistencia) con algunos casos particulares que se analizan aún por el método ASD.

6.5.1. Cargas de diseño de puentes: Impacto vehicular

Son numerosas las cargas que pueden afectar a un puente en función de su tipología y localización geográfica, la norma de diseño facilita el trabajo de los ingenieros listando cuales son y de qué manera deben calcularse y/o considerarse, estas se resumen a continuación:

- *Cargas permanentes:*
 - CR: Fuerzas debidas al flujo plástico.
 - DD: Fuerza de fricción negativa.
 - DC: Peso propio de componentes estructurales y accesorios.
 - DW: Peso propio de carpeta de rodamiento y de las instalaciones.
 - EH: Empuje horizontal del suelo.
 - EL: Fuerzas misceláneas resultantes del proceso de construcción.
 - ES: Sobrecarga del suelo.
 - EV: Presión vertical del peso propio del suelo de relleno.
 - PS: Fuerzas secundarias debidas al pretensado.
 - SH: Fuerzas debidas a retracción.

- *Cargas transitorias:*
 - BL: Carga de explosión.
 - BR: Fuerza de frenado vehicular.
 - CE: Fuerza centrífuga vehicular.
 - CT: Fuerza de colisión vehicular.
 - CV: Fuerza de colisión de embarcaciones.
 - EQ: Carga sísmica.
 - FR: Carga de fricción.
 - IC: Carga de Hielo.
 - IM: Incremento de carga dinámica vehicular.
 - LL: Carga viva vehicular.
 - LS: Sobrecarga de carga viva.
 - PL: Carga viva peatonal.
 - SE: Fuerzas debidas a asentamiento.
 - TG: Fuerzas debidas a gradiente de temperatura.
 - TU: Fuerza debida a temperatura uniforme.
 - WA: Carga de agua y presión de la corriente.
 - WL: Carga de viento sobre la carga viva.
 - WS: Carga de viento sobre la estructura.

Con respecto al enfoque de esta investigación, son las cargas denominadas como *Fuerza de colisión vehicular* las que generan interés. Con respecto a este tipo de fuerzas la norma la ubica en las cargas transitorias y presenta una definición para este grupo como *cargas y fuerzas que pueden variar en cortos intervalos de tiempo comparados con la vida útil de la estructura* (Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP14, 2015) pero no se da alcance a las incidencias particulares que algunas de las cargas transitorias representan como es el caso de la carga debida a impactos vehicular. Sobre el impacto vehicular, y situándose en el numeral 3.6.5, se encuentra que no hay una definición formal de la carga, pero sí se indican ciertos criterios a considerar a la hora del diseño de puentes como opciones para la protección o consideración de este evento:

1. Investigar contra colisión los estribos y los pilares localizados dentro de una distancia de 9 m del borde de la calzada. La colisión debe atenderse proporcionando resistencia estructural o reorientando o absorbiendo la carga de colisión. (Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP14, 2015).
2. Donde la opción de diseño sea proporcionar resistencia estructural, las pilas o estribos deben diseñarse para una fuerza estática equivalente de 2600 kN, la cual se supone que actúa en una dirección de cero a 15 grados con respecto al borde del pavimento en un plano horizontal a una distancia de 1500 mm por encima del terreno. (Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP14, 2015).
3. Donde la opción de diseño sea reorientar o absorber la carga de colisión, la protección debe consistir en una de las siguientes:
 - a. Un terraplén.
 - b. Una barrera estructuralmente independiente, resistente a choques montada sobre el terreno de 1400 mm de altura, localizada dentro de 3000 mm del componente que se quiera proteger.

- c. Una barrera de 1000 mm de altura a más de 3000 mm del componente que se quiere proteger.

Tal barrera debe ser estructural y geoméricamente capaz de sobrevivir el impacto de choque para el nivel de ensayo 5. (Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP14, 2015).

También indica que existe cierta vulnerabilidad ante esta carga para las columnas que tienen un diámetro menor o igual que 760 mm, indicando que la falla principal de los elementos que sufren de impacto es debido a cortante, entonces la carga en magnitud definida debería considerarse como carga puntual.

Para el caso de los muros, la carga puede distribuirse “*sobre un área considerada adecuada para el tamaño de la estructura y el vehículo previsto para el choque, pero no mayor de 1500 mm de ancho por 1200 mm de altura*” (Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP14, 2015). y a pesar que se indica que las dimensiones son tomadas con base en las dimensiones del marco de un camión, las prescripciones dadas por la norma en este numeral abren un amplio campo a discusiones sobre si realmente son adecuadas o suficientes para abarcar el amplio espectro de posibles formas que tiene un vehículo para impactar en un soporte de un puente, adicionalmente, se ignora un factor de gran incidencia en la afección que tiene una carga transitoria sobre las estructuras, el tiempo de aplicación de la carga y más allá de esto, la respuesta dinámica de la estructura que puede o no ser representativa.

El sustento técnico que indica la norma de puentes colombiana con respecto a la carga de impacto es la mención o cita a información de ensayos de choques a escala real de columnas rígidas impactadas por tracto-camiones, sin entrar en más detalles ni presentar citas precisas de los estudios, sin embargo; muchos otros estudios (como los indicados en el capítulo 5 o las referencias en el capítulo 11) indican que las normativas no son lo suficientemente rigurosas a la hora de indicar parámetros seguros a considerar en el diseño de los puentes con respecto a estas cargas y que la falla por cortante e incluso la respuesta dinámica de las estructuras tienden a amplificar los esfuerzos internos en otros elementos del puente, generando plastificaciones, mecanismos de falla dúctil o el colapso de la estructura.

6.5.2. Consideraciones de diseño de puentes.

El enfoque de este estudio se centra en los elementos tipo pila que sirven de apoyo intermedio en la gran mayoría de los puentes urbanos, siguiendo esta directriz se resumen los requisitos mínimos de diseño de estos elementos en Colombia, a continuación:

6.5.2.1. Pilas de puente – Sección 11 CCP-14

El numeral 11.7.2.1. Colisiones, indica que, “cuando exista una posibilidad de que se produzca la colisión de vehículos de carretera o embarcaciones contra la pila, se debe realizar un análisis de riesgos adecuado para determinar el grado de resistencia al impacto a proveer y/o el sistema de protección adecuado. Las fuerzas de colisión se deben determinar cómo se especifica en los artículos 3.6.5 y 3.14.” (Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP14, 2015). Al extraer estos numerales se identifica que, la carga aplicable para la consideración de este fenómeno en el diseño de puentes no brinda una completa cobertura de los efectos que esta misma puede llegar a producir sobre la estructura, así mismo, aunque se estén dando recomendaciones sobre el uso de barreras de protección para estos elementos, la recomendación no siempre es cumplida.

Ilustración 22 Protección de la estructura ante fuerza de colisión vehicular CCP-14.

3.6.5 — Fuerza de Colisión Vehicular: CT

3.6.5.1 — Protección de Estructuras — A menos que el Propietario determine que las condiciones del sitio indiquen otra cosa, deben investigarse contra colisión los estribos y los pilares localizados dentro de una distancia de 9000 mm al borde de la calzada. La colisión debe atenderse proporcionando resistencia estructural o reorientando o absorbiendo la carga de colisión. Se deben aplicar las disposiciones del Artículo 2.3.2.2.1 como sea apropiado.

Donde la opción de diseño es proporcionar resistencia estructural, las pilas o los estribos deben diseñarse para una fuerza estática equivalente de 2 600 kN, la cual se supone que actúa en una dirección de cero a 15 grados con respecto al borde del pavimento en un plano horizontal, a una distancia de 1500 mm por encima del terreno

Donde la opción de diseño sea reorientar o absorber la carga de colisión, la protección debe consistir en una de las siguientes:

- Un terraplén;
- Una barrera estructuralmente independiente, resistente a choques montada sobre el terreno de 1400 mm de altura, localizada dentro de 3000 mm del componente que se quiere proteger; o
- Una barrera de 1000 mm de altura localizada a más de 3000 mm del componente que se quiere proteger.

Tal barrera debe ser estructural y geoméricamente capaz de sobrevivir el ensayo de choque para el Nivel de Ensayo 5, como se especifica en la Sección 13.

Fuente: Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP14, 2015.

6.5.3. Recomendaciones para el diseño y detallamiento del refuerzo en los elementos de un puente: Apoyos centrales.

La norma CCP-14 da las siguientes recomendaciones para la selección adecuada del refuerzo a emplear para la sección de concreto cuya principal sollicitación será a compresión axial como es el caso de las pilas:

- a. En el comentario C.5.7.4.2 se indica que el área de refuerzo longitudinal para elementos no presforzados no debería ser menor del 1% del área bruta de la sección.

- b. La cuantía máxima de refuerzo longitudinal presforzado y no presforzado para elementos a compresión obedece a la relación:

$$\frac{A_s}{A_g} + \frac{A_{ps} f_{pu}}{A_g f_y} \leq 0.08$$

- c. El número mínimo de barras de refuerzo longitudinal en el cuerpo de una columna debe ser de 6 en secciones circulares y 4 en secciones rectangulares, con un tamaño mínimo de barra de No. 5.

Estos criterios para los casos de puentes ubicados en zonas sísmicas 2,3 o 4 serán remplazados por lo contenido en el numeral 5.10.11, que indica:

- a. El recubrimiento del concreto tendrá que ser acorde con las especificaciones indicadas en 5.12.3.
- b. El espaciado mínimo del refuerzo será el menor entre 1.5 veces el diámetro nominal de la barra, 1.5 veces el tamaño máximo del agregado grueso o 38 mm.
- c. El refuerzo longitudinal debe estar confinado por estribos laterales equivalentes a:
 - i. Barras No. 3 para barras No. 10 o menores.
 - ii. Barras No. 4 para barras No. 11 o mayores.
 - iii. Barras No. 4 para paquetes de barras.
- d. La separación de los estribos cerrados no debe ser mayor que la menor dimensión del elemento comprimido o 300 mm.
- e. Los núcleos de columnas deben confinarse en sus zonas extremas en una longitud no menor que el mayor valor entre la máxima dimensión transversal de la columna, un sexto de la altura libre de la columna o 450 mm.
- f. El refuerzo transversal de confinamiento debe prolongarse hacia las conexiones superior e inferior.
- g. La separación entre centros del refuerzo transversal de confinamiento no debe ser mayor que un cuarto de la mínima dimensión del elemento, ni 100mm.

Los requisitos para las pilas tipo muro se encuentran en el numeral 5.10.11.4.2.

- a. La cuantía mínima de refuerzo horizontal o vertical en cualquier pila no debe ser menor a 0.25% y la cuantía de refuerzo vertical no debe ser menor a la de refuerzo horizontal.
- b. El espaciamiento del refuerzo, horizontal o vertical no debe exceder 450 mm.

6.6. Comportamiento plástico de estructuras.

Los diseños estructurales, se realizan con la intención de construir estructuras seguras, funcionales, visualmente agradables y económicamente sostenibles, sin embargo; lograr

una combinación óptima de estos factores y que resulte en una solución práctica para la ingeniería no siempre es posible, pues aunque se ha logrado profundizar en el estudio del comportamiento de materiales, aún no se establecen métodos prácticos que faciliten su análisis desde el punto de vista de la mecánica de materiales, esto excluye un número considerable de métodos que bien permitirían optimizar el diseño en función de todos los parámetros anteriormente mencionados.

En la práctica, la mayoría de las estructuras son diseñadas para que durante su vida útil su comportamiento se mantenga siempre dentro del rango elástico y, por consiguiente, bajo condiciones de servicio, entonces, las deformaciones generadas por la acción de las cargas que actúan sobre esta son recuperadas. Son las cargas de eventos extremos las que pueden generar que la estructura diseñada en el rango elástico pase a un estado plástico y en la mayoría de los casos no es posible conocer cuándo y cómo sucederá un evento tal que logre esforzar a los materiales hasta ese punto. Con base en esto, las estructuras son configuradas de tal manera que puedan comportarse dúctilmente ante esta categoría de eventos, permitiendo deformaciones que disipen la energía de dichas cargas sin generar la falla para esta condición; una vez la carga ha sido retirada, la estructura podrá recuperar cierto grado de deformación modificando su condición inicial y desplazando sus propiedades elásticas hacia un nuevo rango. No obstante, esta condición también puede generar daños en las estructuras en forma de rótulas plásticas que de estar contemplados en el diseño se localizarán en lugares deseables y controlados los cuales no necesariamente representarán el colapso de la estructura, pero sí una pérdida de la funcionalidad.

De acuerdo con las condiciones bajo las cuales se diseñe una estructura, esta podrá estar en capacidad de desarrollar rótulas plásticas, con esto se evidenciará que la estructura habrá superado su rango elástico y por lo tanto las condiciones iniciales de funcionamiento y operación de esta se verán modificadas. Bajo la hipótesis de ocurrencia de un evento extremo, es claro que las condiciones iniciales de la estructura serán afectadas de sobremanera, si estas condiciones son llevadas al rango inelástico, la capacidad de modificar sus condiciones a un nuevo estado de cargas tal que genere un equilibrio en sus elementos de manera que pueda obtenerse un lapso suficiente ya sea para evacuar la estructura o suspender su uso, evaluar y repotenciar o reparar a un grado tal que se mejore su comportamiento a un punto aceptable o superior a la inicial, es determinante a la hora de evaluar si un sistema estructural es resiliente o no. Si una estructura presenta un bajo nivel de deformación con relación a la carga aplicada, se habla de una estructura rígida, pero si, además, bajo esa misma carga presenta la falla, se dirá que la estructura no es resiliente.

6.6.1. Modelos de confinamiento en el concreto.

La condición constitutiva del concreto le da la característica de ser un material heterogéneo, sin embargo; es capaz de comportarse como un material homogéneo. El concreto es un material que cuenta con un excelente comportamiento a compresión, lo que indica que es capaz de adquirir resistencia mecánica siempre que los elementos que lo componen o sus

partículas se encuentran más unidas. Numerosas investigaciones han intentado describir el comportamiento tanto elástico como inelástico a partir de una curva esfuerzo deformación, partiendo de ensayos de laboratorio se ha logrado obtener curvas teóricas que modelan de una manera muy aproximada los resultados, al contrastar los resultados se ha llegado a demostrar que proveer al concreto de elementos que lo confinen (estribos) no solo aumenta su resistencia a cortante sino que al conformar una zona de concreto encerrada por barras de acero, a la que se le llama zona confinada, su resistencia puede llegar a ser significativamente mayor a la especificada por el diseño.

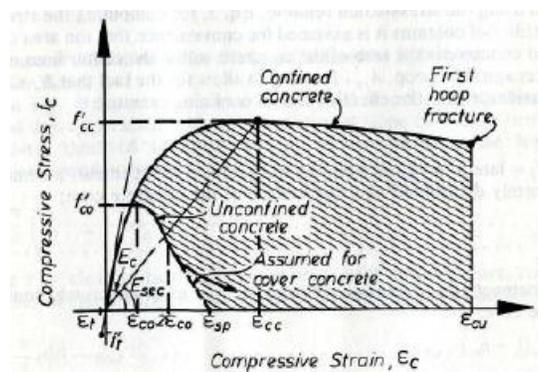
6.6.1.1. Modelo de confinamiento de Mander.

Es un modelo esfuerzo - deformación para concreto reforzado tanto longitudinalmente como transversalmente el cual fue desarrollado a partir de ensayos sobre probetas de concreto bajo carga de compresión uniaxial. El modelo es de carácter generalizado por lo cual es válido para secciones de concreto tanto circulares como rectangulares. (Modelos de confinamiento, 2010)

Los ensayos ejecutados demostraron que las propiedades mecánicas del material presentan un aumento, reflejándose en su ductilidad y resistencia.

El modelo de Mander describe una curva esfuerzo-deformación subdividida en varios puntos que ocurren en momentos críticos en la deformación del elemento.

Gráfica 1 Parámetros de la curva de Mander.



Fuente: Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1988). "Theoretical stress-strain model for confined concrete." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 114(8), 1804–1826.

Estos puntos críticos son marcados por la fisuración de las secciones no confinada y confinada del elemento que se esté estudiando, los parámetros que definen esta curva son:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r - 1 + x^r}$$

Donde:

f_c = tensión de compresión longitudinal.

f'_{cc} = Resistencia a compresión de hormigón confinado.

$x = \epsilon_c / \epsilon_{cc}$

ϵ_c = Deformación longitudinal del hormigón a compresión

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right]$$

f'_{co} = Resistencia no confinada del hormigón.

ϵ_{co} = Deformación de concreto no confinado en el punto de máxima resistencia. (generalmente 0.002)

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

$E_c = 5000 * f'_{cc}{}^{0.5}$ (Módulo de elasticidad tangente).

$E_{sec} = f'_{cc} / \epsilon_{cc}$ (Módulo de elasticidad secante).

El valor correspondiente a la resistencia a la compresión del concreto confinado se calcula a partir de un modelo constitutivo que abarca una envolvente de resistencia última para tensiones a compresión multiaxiales.

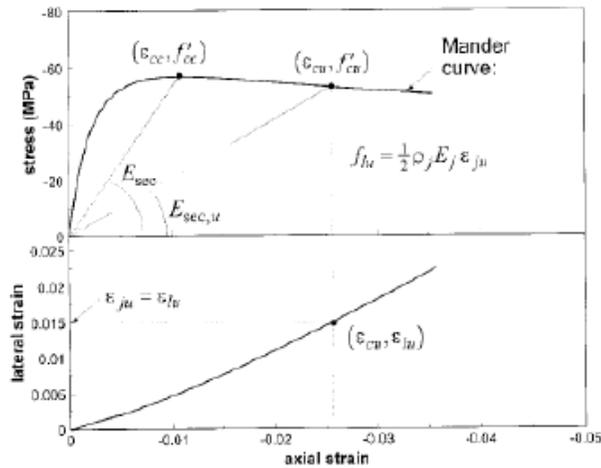
$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 * \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_{l'}}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_{l'}}{f'_{co}} \right)$$

Fuente: Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1988). "Theoretical stress-strain model for confined concrete." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 114(8), 1804–1826.

6.6.1.2. Modelo de confinamiento de Spolestra y Monti.

Es un modelo que considera concreto confinado con fibras reforzadas con polímeros (FRP), sin embargo, es válido para concreto confinado con acero en disposición transversal. El modelo considera la interacción continua entre el concreto y el sistema de confinamiento debido la deformación lateral del concreto. (Modelos de confinamiento, 2010).

Gráfica 2 Parámetros del modelo de Spolesta y Monti



Fuente: Spoelstra, M. R., Monti, G. (1999). "FRP-Confined Concrete Model." Journal of composites for construction Vol. 3., ASCE).

La manera para determinar los parámetros teóricos del modelo es la siguiente:

1. Presión última de confinamiento:

$$f_{lu} = \frac{2t f_{ju}}{D}$$

2. Parámetros de la curva tensión-deformación de Mander correspondientes a la presión última de deformación:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_{lu}}{f'_{co}}} - \frac{2 f_{lu}}{f'_{co}} \right)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right]$$

3. Módulo último secante de elasticidad:

$$E_{sec,u} = \frac{E_c}{1 + 2\beta \varepsilon_{ju}}$$

Donde:

$$\beta = \frac{E_C}{|f'_{co}|} - \frac{1}{|\varepsilon_{co}|}$$

$$\varepsilon_{co} = -0.002$$

$$E_C = 5700 \sqrt{|f'_{co}|}$$

Fuente: Spoelstra, M. R., Monti, G. (1999). "FRP-Confined Concrete Model." Journal of composites for construction Vol. 3., ASCE).

6.6.2. Rótulas plásticas y mecanismos de falla.

Una rótula plástica es un mecanismo de deformación que se presenta en los elementos estructurales cuando estos sobrepasan sus esfuerzos de plastificación, más allá del límite elástico, una vez se ven sometidos a esfuerzos que exigen del sistema estructural un mayor desempeño. Estos mecanismos logran la disipación de energía mediante la deformación del elemento estructural en puntos localizados, que pueden y deben ser controlados por el diseñador.

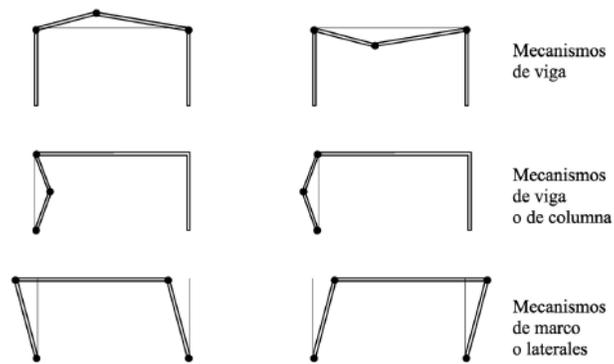
La presencia de rótulas plásticas en un sistema estructural genera mecanismos de falla a medida se presentan los puntos localizados de plastificación de manera secuencial, de modo que los momentos internos y externos actuantes sobre los elementos son redistribuidos de formas que no pueden ser precisadas del todo, pero si se puede llegar a un análisis aproximado de cómo se comportará la estructura durante la ocurrencia del fenómeno.

Los fenómenos de plastificación en estructuras son, bajo cargas críticas, inevitables. A pesar de ello el fenómeno puede ser controlado a favor de la estructura de tal manera que pueda asegurarse un comportamiento dúctil y que además se pueda redirigir el lugar donde las rótulas van a ocurrir con el fin de asegurar la estabilidad de la estructura y la protección de las vidas que dan uso a esta, debido a esto, existen numerosos criterios que pretenden controlar el fenómeno de falla de un sistema estructural, entre estos se destaca el de "Columna fuerte – viga débil" mediante el cual se verifica que la falla ocurra inicialmente en las vigas del sistema inducidas como rótulas plásticas, precisamente para evitar un mecanismo de colapso completo.

Para que el comportamiento de un sistema estructural sea acorde con los análisis de plastificación del sistema se debe asegurar una continuidad o más bien una integridad entre los elementos del sistema, es decir, las uniones viga-columna deben ser capaces de transferir momentos de manera satisfactoria, por lo tanto, el desempeño, la funcionalidad y la resiliencia del sistema va a ser dependiente de la correcta interacción de los elementos mediante el tipo de unión que se esté planteando entre ellos, por ende, los posibles mecanismos de colapso de un sistema será dependiente de estos mismos criterios., sin

embargo, también dependerán del tipo de carga que actúe en el sistema, su dirección y su magnitud.

Ilustración 23 Mecanismos de falla en pórticos.



Fuente: Dalmau M. R., Vilardell J. (2003). Análisis plástico de estructuras introducción. Ediciones UPC. www.edicionsupc.es

6.7. Carga de análisis.

Las cargas que interactúan en una estructura son diversas, así como sus efectos. Estas se pueden clasificar en cargas estáticas y cargas dinámicas.

6.7.1. Cargas dinámicas

De acuerdo con la definición del profesor Genner Villarreal, las cargas dinámicas son aquellas cargas actuantes en la estructura, cuya magnitud, dirección o posición varía en un intervalo de tiempo relativamente pequeño (Villarreal G., 2016).

Las cargas dinámicas actuantes en las estructuras son responsables de aceleraciones en estas, las que tienen como efecto resultante la generación de fuerzas inerciales resultantes de la movilización de las masas presentes en la estructura y su peso propio (Villarreal G., 2016).

Las cargas dinámicas se pueden catalogar en:

1. Cargas de impacto: Se generan como el efecto posterior a la transmisión de esfuerzos generados por la colisión de una masa sobre un elemento estructural. Los

efectos generados por estas cargas son proporcionales a las propiedades inerciales y la calidad de los materiales que conforman la estructura.

2. Cargas móviles: Son cargas cuya ubicación es variable en función del tiempo mientras que su magnitud se mantiene generalmente constante.
3. Carga de viento: Son presiones que actúan perpendicularmente a las superficies sobre las que hacen contacto y cuyos efectos pueden generar succiones en las caras opuestas de dichas superficies.
4. Carga sísmica: Son cargas generadas en las estructuras debido a los desplazamientos horizontales del terreno las cuales no obedecen a una función determinada pues son arbitrarias tanto en magnitud como en duración.
5. Carga explosiva: Son presiones generadas por la onda que transmite el estallido de una carga o elemento combustible que impactan sobre la estructura.

6.7.2. Cargas de tipo impulsivo.

La carga cuyos efectos dan origen a esta investigación es de tipo impulsiva. Una carga de este tipo es simplemente una fuerza cuya magnitud es grande en comparación con su duración y que su aplicación en la estructura representa un cambio en su cantidad de movimiento; dicho en otras palabras, induce una velocidad inicial en su movimiento. La magnitud de este impulso será igual a la magnitud del cambio en la velocidad, multiplicado por la masa de la estructura. (Garcia Reyes, 1998).

La carga de impacto producida por la colisión de un vehículo, contra un elemento estructural de un puente, es una carga que ocurre con cierta frecuencia y por ello ha sido contemplada en los manuales de diseño dentro de sus estados límites, haciendo relevante la importancia de la inclusión de esta en los análisis y diseños estructurales, sin embargo, este criterio ha sido definido desde una percepción estática de la carga bajo condiciones de circulación normal sobre la estructura, sin tomar en cuenta que existen puntos de impacto que generan solicitaciones mucho mayores sobre los elementos del puente, con lo cual se podría estar incurriendo en un análisis no conservador debido a que los efectos reales del impacto vehicular, los cuales son de tipo dinámico, pueden llegar a ser mayores debido a la respuesta de la estructura, la cual puede sufrir una amplificación debido al fenómeno descrito anteriormente.

Muchas investigaciones describen que cuando un impacto ocurre con un vehículo de tipo camión, son en realidad 3 los eventos de colisión contra el elemento estructural. El primero es cuando el parachoques del vehículo impacta contra el elemento, el segundo cuando la inercia del cuerpo lleva al motor al impacto y el tercero cuando la carga transportada induce una fuerza sobre el elemento estructural. Esto ocurre en fracciones de segundo, sin embargo, será importante a la hora del detallamiento en el modelo de análisis. (Gomez & Alipour, 2014), (Severino & El-Tawil, 2003), (Cao et al., 2019).

Cabe resaltar que, para algunas de las estructuras vulnerables a sufrir de impactos vehiculares dada la alta circulación de estos, se han implementado sistemas de protección

como muros trapezoidales adosados a las pilas de los puentes para reducir el impacto transmitido a la estructura o en casos menos drásticos, cunetas.

6.7.3. Respuesta de las estructuras ante cargas de impacto.

Antes de hablar de la respuesta de una estructura ante las cargas de impacto, se debe dar una definición de que es una respuesta dinámica. La respuesta dinámica son los esfuerzos y deformaciones resultantes de una carga dinámica (García Reyes, L. E. (1998)), como lo es el impacto vehicular sobre las pilas de un puente.

Las características del concreto lo enmarcan como un material cuya resistencia a los impactos es pobre, a tal punto que al recibirlos toda su constitución es afectada al perder partes importantes de su matriz y, además, como efecto anexo al descrito, ser fisurado en su sección restante, lo que afecta su transmisibilidad de esfuerzos internos. Los efectos físicos visibles en el concreto una vez ha recibido una carga de impacto evidencia que el material ha alcanzado por mucho sus esfuerzos elásticos y de rotura dejando un elemento que no es apto para cumplir con la tarea para la que fue previsto.

Si se enmarca el comportamiento del material dentro de los parámetros de diseño estructural, un elemento impactado por este tipo de cargas estará sometido a esfuerzos que fácilmente van a exceder sus esfuerzos de diseño. Los efectos de estas cargas han sido observados tanto en la realidad como en numerosos estudios como se ha indicado en el presente documento, vistos desde la perspectiva de respuesta dinámica de la estructura, se listan los efectos a continuación:

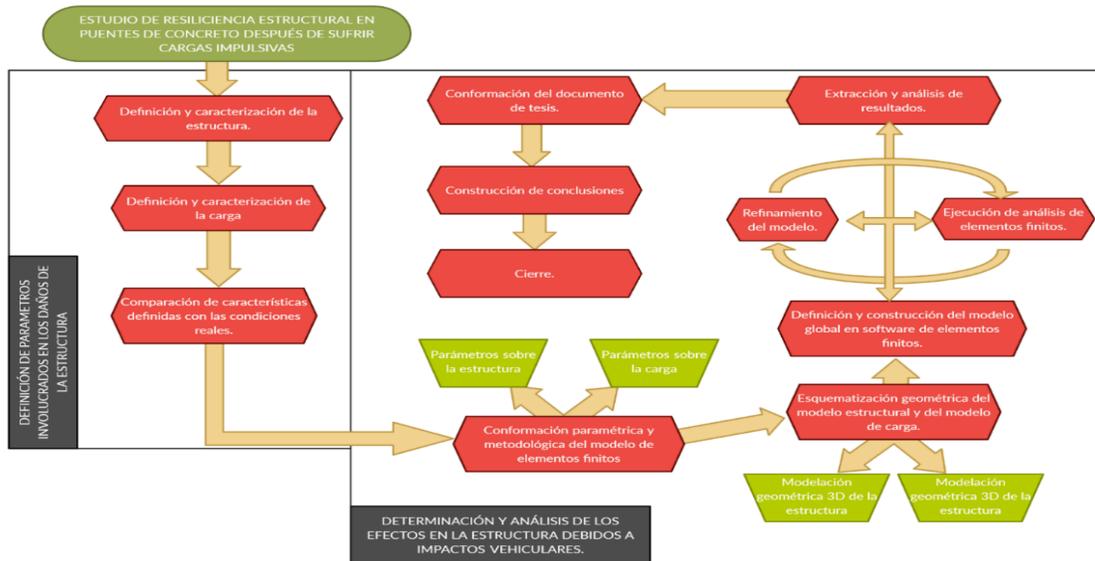
1. Aumento inmediato de esfuerzos de corte tanto en el punto de apoyo del elemento como en la zona impactada.
2. Rotura del concreto.
3. Amplificación dinámica de la respuesta en la estructura.
4. Formación de rótulas plásticas y mecanismos de colapso.
5. Fluencia y/o rompimiento de las barras de refuerzo del elemento estructural.

7. DESARROLLO

7.1. Metodología

Para el desarrollo del presente estudio se siguió la metodología ilustrada en la figura 20. Cada uno de los ítems describe la manera como se fue consolidando el estudio y como se obtuvieron los resultados. La manera como se desarrolló cada uno de los ítems presentes en el flujograma se describe a continuación:

Ilustración 24 Metodología



Fuente: Elaboración propia.

7.1.1. Definición y caracterización de las estructuras.

El diseño y la construcción de puentes en Colombia se rigen bajo los criterios que aparecen en el CCP-14, sin embargo, el cumplimiento de esta normativa no es del todo obligatoria, y en varios aspectos deja al “dueño” o “cliente” la libertad de decisión sobre algunos parámetros que, bajo ciertas circunstancias, la incorrecta escogencia de ellos puede llevar a acortar la vida útil de la estructura debido a eventos no previstos.

En el desarrollo de este estudio ya se han dado numerosos ejemplos de lo perjudicial que puede llegar a ser la accidentalidad de los vehículos al hacer contacto con los puentes y que los daños van más allá que la destrucción de propiedades, pero sobre todo, que el foco de concentración de estos eventos es en las ciudades, lo que tiene sentido debido que, en vías nacionales los puentes existentes generalmente salvan obstáculos naturales y aunque existen puentes en vía nacional que cruzan otra carretera, los casos de impacto vehicular sobre sus soportes son menos frecuentes por su tipología, porque se respetan criterios de distancia entre borde de carretera y apoyo o porque el gálibo empleado es mucho mayor.

A diferencia de lo anteriormente mencionado, si se han visto desplomes de puentes peatonales en vía nacional tras impactos vehiculares, sin embargo; estos puentes están por fuera del alcance de este estudio y además la ausencia de redundancia en el sistema hace que el efecto esperado sea evidente.

En vista de los puntos expuestos, se ha determinado que la tipología de puentes en la que se enfoca este estudio es de carácter urbano y más cuando estos puentes no solo deben obedecer criterios adecuados de diseño, sino que existen más componentes que intervienen en una obra de infraestructura urbana de este tipo como lo son arquitectónicos, paisajísticos, redes húmedas, redes secas, comunicaciones, tránsito, entre otros, los cuales velan por que la obra no impacte demasiado negativamente a las ciudades y sus habitantes antes, durante y después de construido el puente. Armonizar todos los criterios que deben ser cumplidos no es una labor sencilla, por ello, en muchas ocasiones se puede “escapar” el cumplimiento de muchos criterios de funcionalidad y seguridad de los puentes como lo es el guardar bermas adecuadas, proveer de protección a la estructura, e incluso gálibos, y esto eleva la posibilidad de riesgo de los puentes ante la carga de impacto vehicular.

En los puentes urbanos se observan tipologías típicas para resolver los problemas de ingeniería de conectividad para el tránsito y de esta manera redistribuirlo para mejorar la movilidad en las ciudades. Generalmente, se resuelven puentes de varias luces con lo que surge la necesidad de generar apoyos intermedios para cubrir las distancias requeridas. Estos apoyos, llamados pilas, pueden resolverse de distintas maneras, pero siempre contando con los mismos elementos: un elemento enterrado de transferencia de cargas al terreno comúnmente llamados dados, un elemento (o varios) en disposición vertical que conforman las columnas de las pilas y un elemento de corona que conecta a las columnas en disposición horizontal y colocado perpendicularmente a la luz del puente en el que se apoyarán las vigas longitudinales. De acuerdo con las soluciones observadas de forma común para los puentes urbanos, se determinan las siguientes tipologías de apoyo para los puentes del estudio:

1. Puente viga-tablero, apoyado en pórtico de 2 columnas.
2. Puente viga-tablero, apoyado en pórtico de 3 columnas.
3. Puente viga-tablero, apoyado en pila tipo muro.

Para los tipos de puente apoyados en pórticos se va a limitar el diámetro de las pilas que los conforman a 800 mm debido a que, según la sección 3, en los comentarios del numeral C.3.6.5.1 los diámetros menores a 760 mm son las más vulnerables ante las cargas de impacto vehicular. (Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP14, 2015). Para los muros, la sección escogida se describe en el numeral 9.1.1.2.

Se proporcionará al modelo un elemento de cimentación tal que las condiciones de frontera aseguren un adecuado empotramiento de las columnas por lo cual ya no se hará necesario considerar condiciones típicas del terreno, además, el considerar la interacción suelo-estructura en el modelo extendería el tiempo de cómputo por una mayor exigencia de recursos y no está demostrado que el considerar estos efectos aporten una diferencia sustancial al análisis con respecto a considerar un empotramiento completo en los apoyos.

A continuación, se provee el soporte de cálculo a nivel geométrico con el cual se delimitaron y dispusieron los elementos de la estructura involucrados en el análisis.

7.1.1.1. Elementos de superestructura

La superestructura, compuesta por vigas longitudinales, tablero y elementos misceláneos como barreras de protección lateral, se define a partir de criterios geométricos de cumplimiento normativo como se resume en la siguiente imagen:

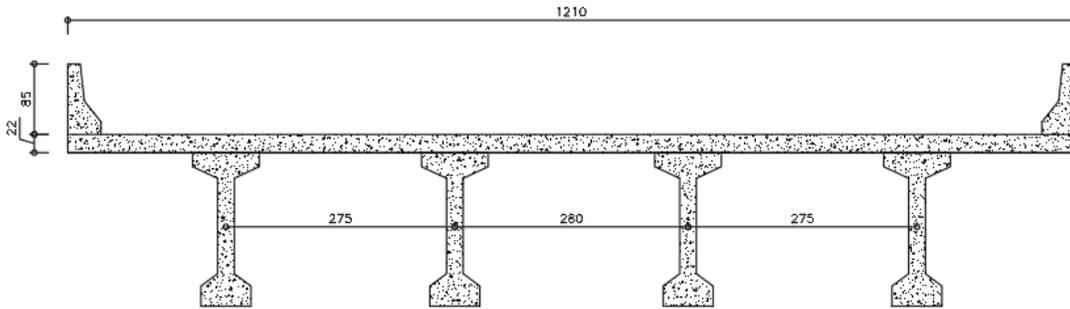
Ilustración 25 Definición geométrica de vigas



Se escoge una geometría de vigas con un patín superior de 0.80 m, una altura de 1.85 m y un patín inferior de 0.60 m. El alma de la viga cuenta con un espesor de 0.50 m. El tablero estará apoyado en 4 vigas longitudinales de 20.0 m de longitud por luz para una longitud total de 40.0 m para el puente modelado. El tablero cuenta con un espesor de 0.22 cm y las vigas se encuentran espaciadas 2.75 m aproximadamente. La superestructura guarda un gálibo de 5.00 m respetando los requerimientos mínimos de CCP-14 para puentes urbanos.

El ancho de tablero se escoge de 12.10 m considerando el espacio suficiente para el tránsito vehicular por 3 carriles y pasos peatonales como es típico en las principales ciudades del país.

Ilustración 26 Corte transversal de la superestructura.

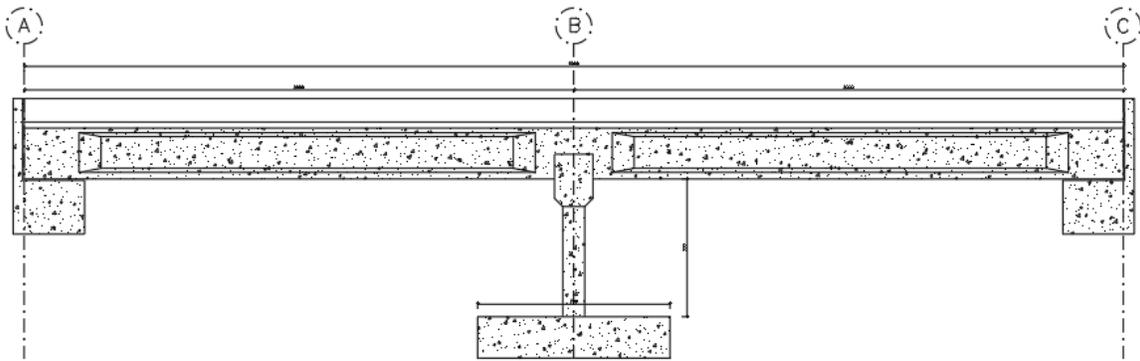


Fuente: Elaboración propia.

A los elementos de la superestructura no se le asignan ni se modelan refuerzos debido que estos elementos no son el foco del análisis de este estudio, pese a ello, son modelados para la obtención de resultados que se aproximen en gran medida a los que se obtendrían en situaciones reales.

Las tipologías de estructuras en estudio no varían en cuando a la superestructura.

Ilustración 27 Alzado de la estructura.



Fuente: Elaboración propia.

7.1.1.2. Elementos de subestructura

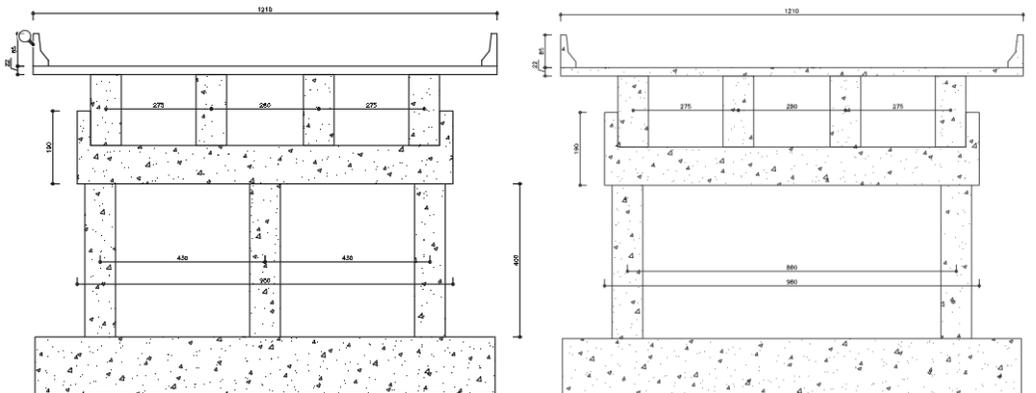
Se desarrollan tres tipos de subestructura para el análisis comparativo:

1. Pórtico con tres columnas de sección circular.
2. Pórtico con dos columnas de sección circular.
3. Estructura de soporte de tipo muro.

Cada una de estas estructuras cuentan con una viga de corona que recibe las vigas longitudinales en el punto de apoyo central del puente, esta viga transfiere las cargas sobre las que se ve sometida la estructura durante su vida útil a cada una de las columnas.

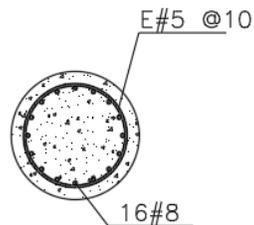
Para el caso de subestructuras aporticadas se toman columnas de un diámetro de 0.80 m y una longitud de 4.0 m. El refuerzo longitudinal está conformado por 16 barras N°8, mientras que el refuerzo transversal se conforma por barras N°5 espaciadas cada 10 cm en sus tercios extremos para asegurar el confinamiento y cada 20 cm en su tercio central, de acuerdo con el armado típico del refuerzo de estos elementos, el cual se basa en las recomendaciones del CCP-14.

Ilustración 28 Vista transversal de la estructura aporticada.



Fuente: Elaboración Propia.

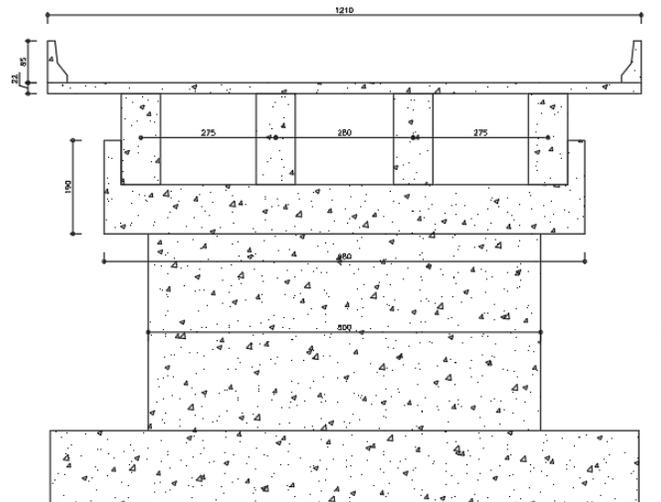
Ilustración 29 Refuerzo empleado en las columnas de sección circular.



Fuente: Elaboración propia.

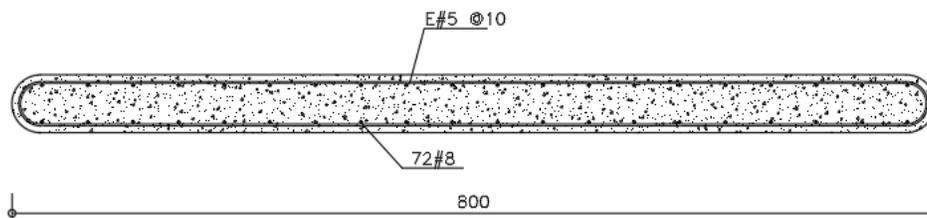
En el caso de la subestructura de tipo muro se tiene un elemento con una sección de 0.50x8.00 m con una longitud de 4.0 m. El refuerzo longitudinal está conformado por 72 barras N°8, mientras que el refuerzo transversal se conforma por barras N°5 espaciadas cada 10 cm en sus tercios extremos para asegurar el confinamiento y cada 20 cm en su tercio central.

Ilustración 30 Vista transversal de la estructura tipo muro.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 31 Refuerzo empleado en soporte tipo muro.



Fuente: Elaboración propia.

Para todos los modelos se define una viga cabezal de 1.0 m de altura con 9.80 m de longitud.

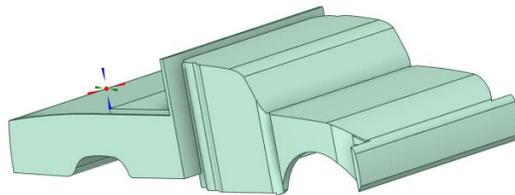
7.1.2. Definición y caracterización de la carga.

Tal como se describe en el numeral 6.7, el carácter de la carga aplicada sobre la estructura en estudio es de tipo dinámico. La carga será inducida en la estructura a partir de dos tipos de vehículos, los cuales por simplicidad se enmarcarán en vehículo de carga liviana y vehículo de carga pesada.

7.1.2.1. Vehículo de carga liviana.

Se escoge un vehículo que tenga la capacidad de transportar carga adicional a su propio peso, en este caso una camioneta con “platón”. Se toman fichas técnicas de fabricantes para escoger adecuadamente sus dimensiones y se geometrizan en la interfaz “SpaceClaim” de ANSYS.

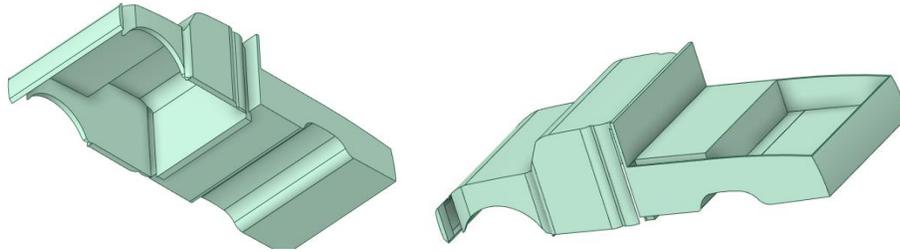
Ilustración 32 Vehículo liviano



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Dado que las características particulares de los vehículos no son del alcance de este estudio, el modelo de vehículo solo engloba la geometría general del mismo sin gastar demasiados recursos computacionales modelando puertas, ventanas y demás elementos que componen al vehículo. El modelo geométrico más bien se centra en generar un “casarón” que permita asignar al elemento de tipo vehículo una masa que permita suministrar la fuerza del impacto a la estructura. Adicionalmente, se involucran masas adicionales que simularán las cargas transportadas.

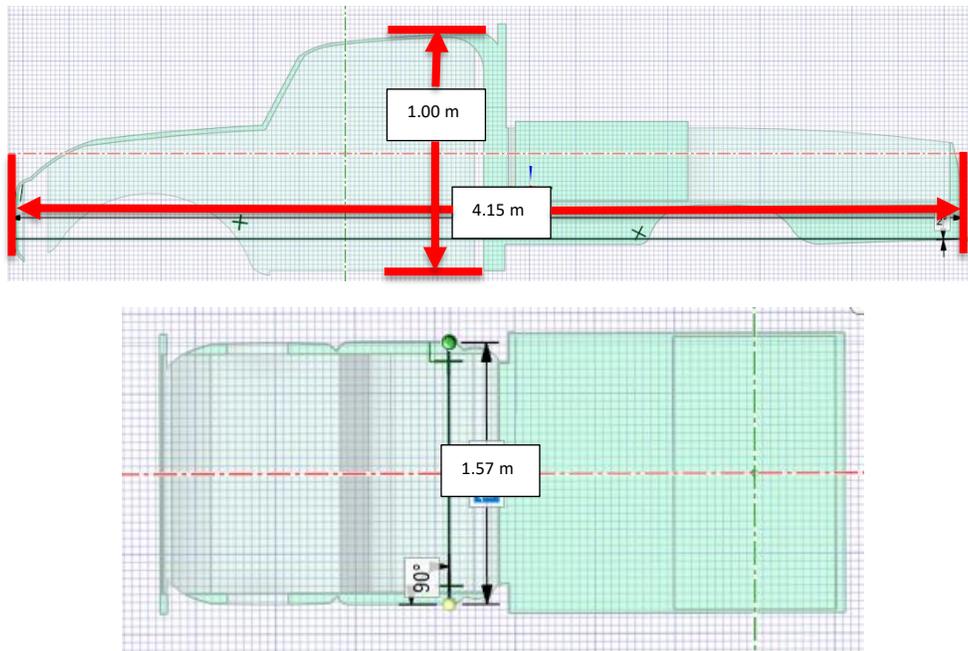
Ilustración 33 Vistas de vehículo liviano



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

La longitud total del vehículo es de 4.15 m, cuenta con una altura en su cabina de 1.0 m y un ancho de 1.55 m aproximadamente. No se están modelando los rodamientos, sin embargo; la elevación dada al vehículo debido a estos es tenida en cuenta durante la ejecución del programa.

Ilustración 34 Dimensiones de vehículo liviano

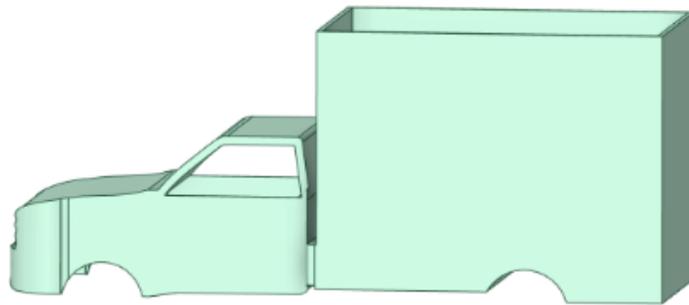


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

7.1.2.2. Vehículo de carga pesada

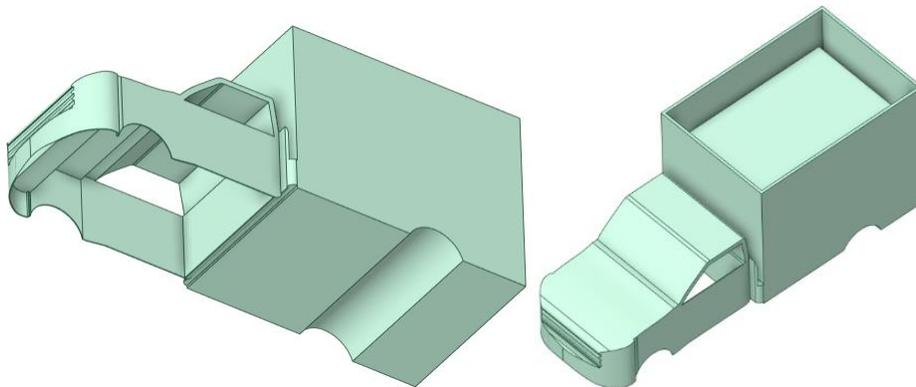
Al igual que con el vehículo de carga liviana, se escoge un vehículo que permita transportar carga, en este caso una capacidad mucho mayor, se escogen adecuadamente las dimensiones y se geometrizan en la interfaz “SpaceClaim” de ANSYS.

Ilustración 35 Vehículo pesado.



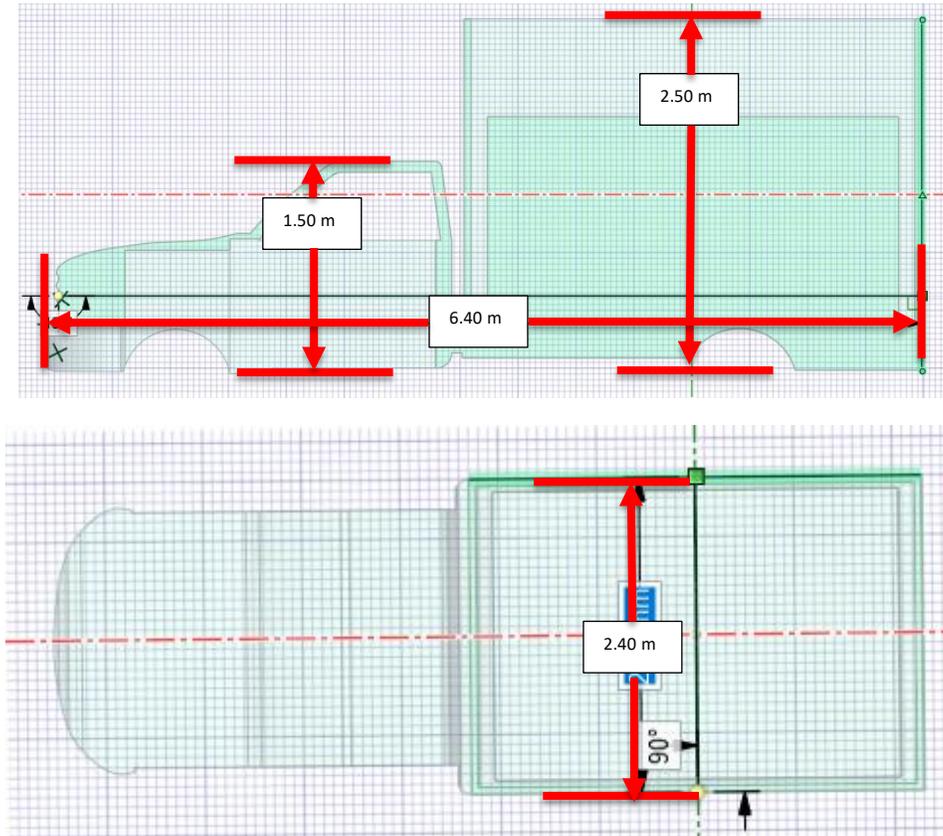
Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Ilustración 36 Vistas de vehículo pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Ilustración 37 Dimensiones de vehículo pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

La longitud total del vehículo es de 6.40 m, cuenta con una altura en su cabina de 1.50 m y una altura de vagón de 2.50 m, cuenta con un ancho de 2.40 m aproximadamente. No se están modelando los rodamientos, sin embargo; la elevación dada al vehículo debido a estos es tenida en cuenta durante la ejecución del programa.

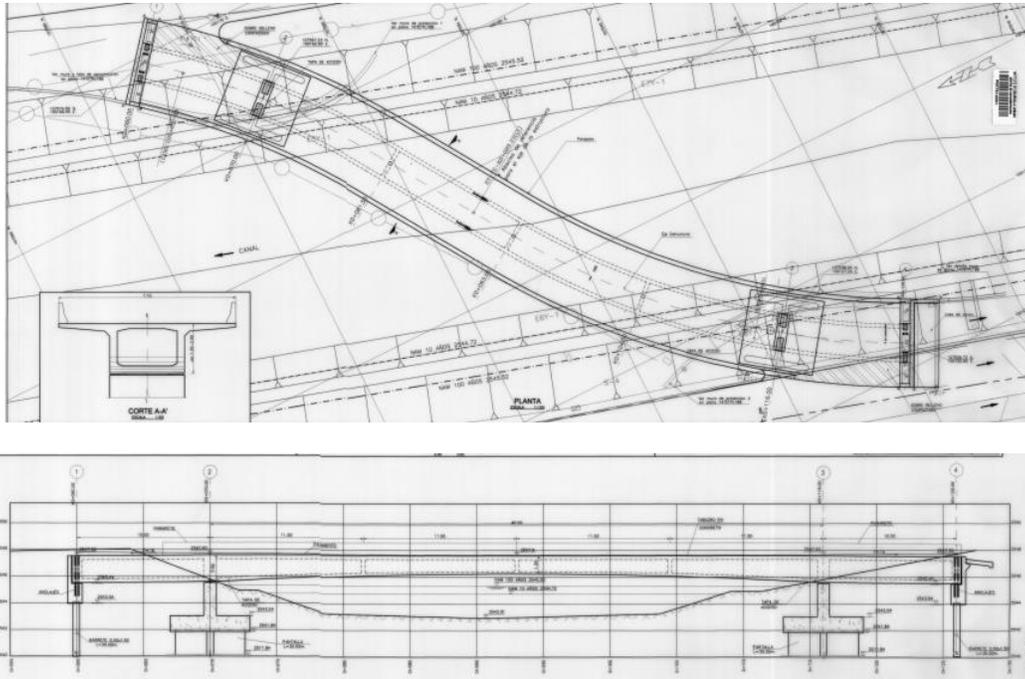
7.1.3. Comparativo de definiciones con las condiciones reales.

Las características definidas para la estructura y los vehículos que transmitirán la carga son modelados a partir de las características típicas de puentes en Colombia y así mismo los vehículos que circulan en el país. A continuación, se muestran imágenes de referencia que permiten validar la configuración escogida para modelar tanto los vehículos como las estructuras.

En el caso de los puentes se presentan, como ejemplo, planos extraídos del repositorio IDU en los que se cuentan con una configuración típica en puentes dentro de la ciudad de

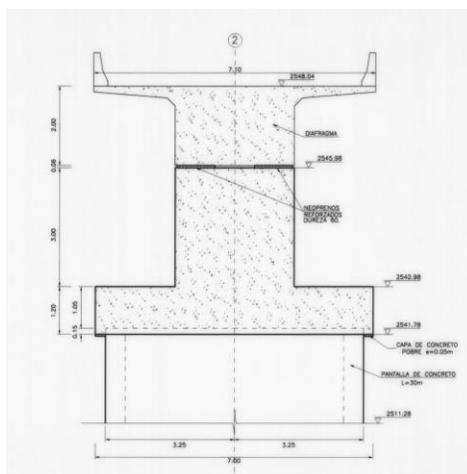
Bogotá cuyos apoyos son conformados por pilas de tipo muro o pórticos con columnas de sección circular.

Ilustración 38 Planta y perfil de puente con apoyo de tipo muro



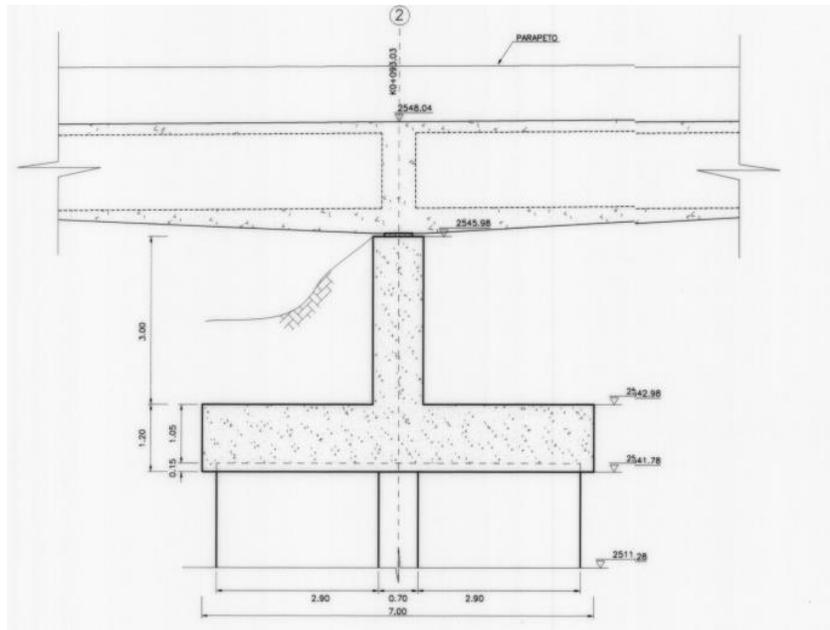
Fuente: Repositorio IDU [ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA TRONCAL NORTE QUITO SUR, DESDE LA AVENIDA PASEO DE LOS LIBERTADORES AL LÍMITE DEL DISTRITO CON SOACHA, EN BOGOTÁ D.C. – DISEÑO ESTRUCTURAL]. Recuperado el 15 de septiembre 2023 de <https://webidu.idu.gov.co/jspui/handle/123456789/76743>

Ilustración 39 Vista frontal de apoyo de tipo muro



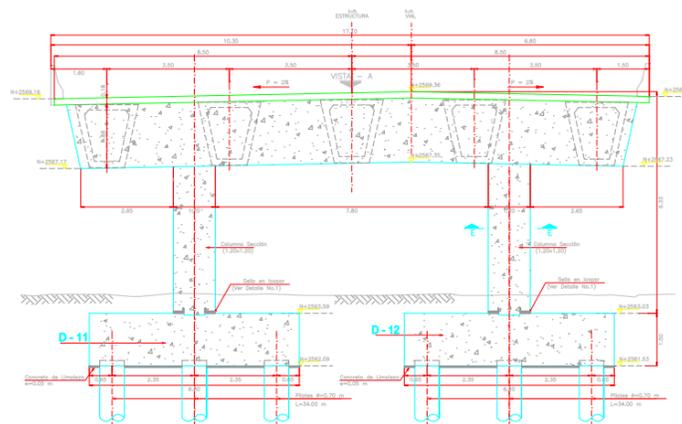
Fuente: Repositorio IDU [ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA TRONCAL NORTE QUITO SUR, DESDE LA AVENIDA PASEO DE LOS LIBERTADORES AL LÍMITE DEL DISTRITO CON SOACHA, EN BOGOTÁ D.C. –

Ilustración 40 Perfil de apoyo de tipo muro



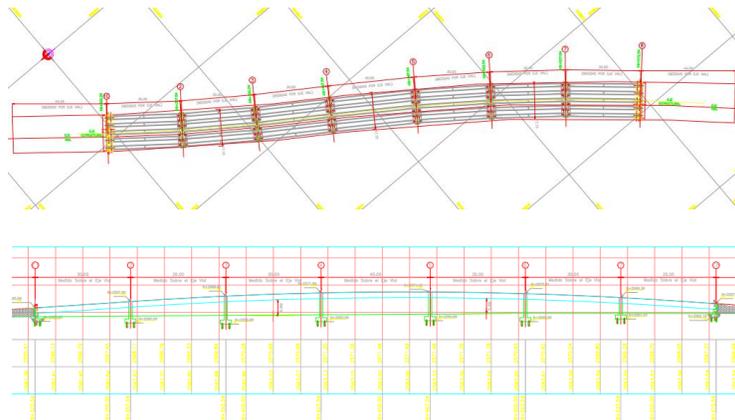
Fuente: Repositorio IDU [ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA TRONCAL NORTE QUITO SUR, DESDE LA AVENIDA PASEO DE LOS LIBERTADORES AL LÍMITE DEL DISTRITO CON SOACHA, EN BOGOTÁ D.C. – DISEÑO ESTRUCTURAL]. Recuperado el 15 de septiembre 2023 de <https://webidu.idu.gov.co/jspui/handle/123456789/76743>

Ilustración 41 Alzado de puente con apoyo de tipo pórtico.



Fuente: Repositorio IDU [ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA TRONCAL NORTE QUITO SUR, DESDE LA AVENIDA PASEO DE LOS LIBERTADORES AL LÍMITE DEL DISTRITO CON SOACHA, EN BOGOTÁ D.C. –

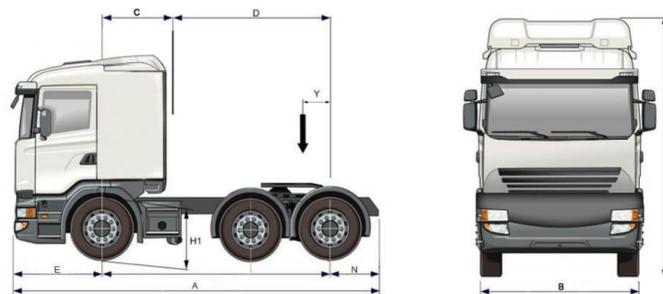
Ilustración 42 Planta y perfil de puente con apoyo de tipo pórtico



Fuente: Repositorio IDU [ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA TRONCAL NORTE QUITO SUR, DESDE LA AVENIDA PASEO DE LOS LIBERTADORES AL LÍMITE DEL DISTRITO CON SOACHA, EN BOGOTÁ D.C. – DISEÑO ESTRUCTURAL]. Recuperado el 15 de septiembre 2023 de <https://webidu.idu.gov.co/jspui/handle/123456789/76743>

En el caso de los vehículos, se extrae fracciones de las fichas técnicas en las que se presentan las dimensiones típicas y los pesos de los vehículos, que al compararlos con los parámetros tomados para la modelación se observa que estos son congruentes con las características reales.

Ilustración 43 Datos técnicos – Camión pesado.

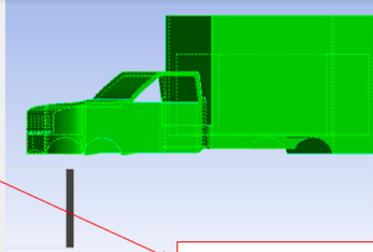


	High Sleeper cab		
Modelo	32	34	37
A / Longitud total	6,740 m	6,940 m	7,240 m
B / Anchura	2,450 m		

Masas

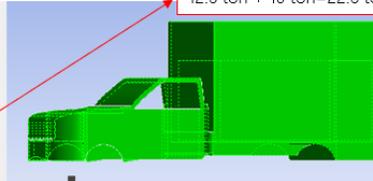
	High Sleeper cab		
Modelo	32	34	37
Peso total	8 504 kg	8 549 kg	8 577 kg
Carga útil	17 571 kg	17 526 kg	17 498 kg

Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Reference Frame	Lagrangian
Material	
Assignment	Aluminum Alloy
Bounding Box	
Properties	
Volume	4,5406 m ³
Mass	12577 kg
Centroid X	40,834 m
Centroid Y	-9,8791 m
Centroid Z	2,5046 m
Moment of Inertia Ip1	49004 kg·m ²
Moment of Inertia Ip2	12896 kg·m ²
Moment of Inertia Ip3	50635 kg·m ²



12.6 ton + 10 ton=22.6 ton

Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Reference Frame	Lagrangian
Material	
Assignment	Carga
Bounding Box	
Properties	
Volume	9,9698 m ³
Mass	9969,8 kg
Centroid X	41,145 m



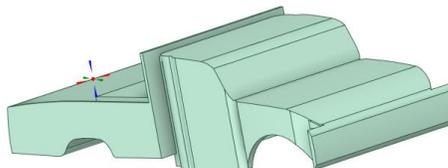
Fuente: Europa-Camiones.com. Ficha técnica Renault cabeza tractora T HIGH T 520 T6X2 TAG E6.
<https://www.europa-camiones.com/ficha-tecnica-gama/renault-t-high-520-t-6x2-tag-e6>

Ilustración 44 Datos técnicos – Camión liviano.

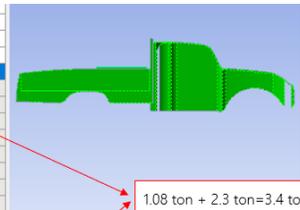


Dist. Ejes 3096 (mm)
 Ancho 2132 (mm) con espejos
 Largo 5356 (mm)

DIMENSIONES Y CAPACIDADES		ORIGEN
Trocha (delantera / trasera) (mm)	1570/1570	
Díámetro de giro (m)	12,7	
Altura mínima al piso (mm)	222	
Ángulo de ataque	28,8	
Ángulo de salida	23,3	
Capacidad del tanque de combustible (litros)	76	
Peso neto (kg)	2036	
Peso Bruto (kg)	3100	
Capacidad de carga total (kg)	1064	
Peso autorizado para remolque - Remolque con frenos (kg)	3500	
Dimensiones internas de la caja de carga - Largo (mm)	1484	
Dimensiones internas de la caja de carga - Ancho (mm)	1534	
Dimensiones internas de la caja de carga - Altura (mm)	465	
Dimensiones internas de la caja de carga - Ancho entre rueda (mm)	1122	
Volumen de caja de carga (m ³)	1061	
Cabina	Cabina Doble	
Carrocería	Pick Up con platin	

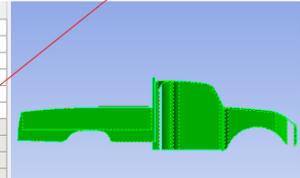


Material	
Assignment	Aluminum Alloy
Bounding Box	
Properties	
Volume	0,39036 m ³
Mass	1081,3 kg
Centroid X	38,495 m
Centroid Y	-7,645 m
Centroid Z	2,2523 m
Moment of Inertia ...	61,358 kg·m ²
Moment of Inertia ...	216,77 kg·m ²
Moment of Inertia ...	256,79 kg·m ²



1.08 ton + 2.3 ton=3.4 ton

Material	
Assignment	Aluminum Alloy
Bounding Box	
Properties	
Volume	0,82167 m ³
Mass	2276, kg
Centroid X	38,543 m
Centroid Y	-7,5759 m



Fuente: Chevrolet (2023). Ficha técnica Chevrolet silverado trailboss Z71.
<https://www.chevrolet.com.co/fichas-tecnicas>

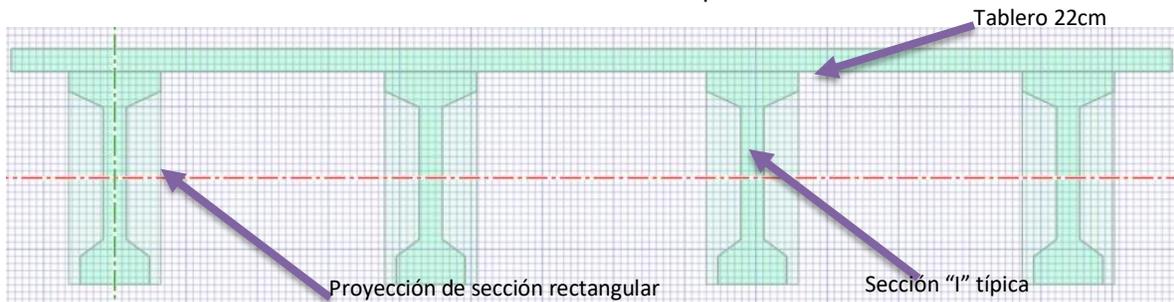
7.1.4. Esquematización geométrica del modelo estructural.

7.1.4.1. Superestructura.

De acuerdo con las definiciones geométricas de los elementos estructurales que conforman el puente, así como sus refuerzos, se procede a digitalizar estos parámetros en modelos tridimensional de elementos “sólidos”. Dado que el análisis comparativo gira en torno a tres tipos de soporte estructural intermedio en los puentes se requirieron de tres modelos estructurales independientes pero parametrizados bajo las mismas condiciones de frontera.

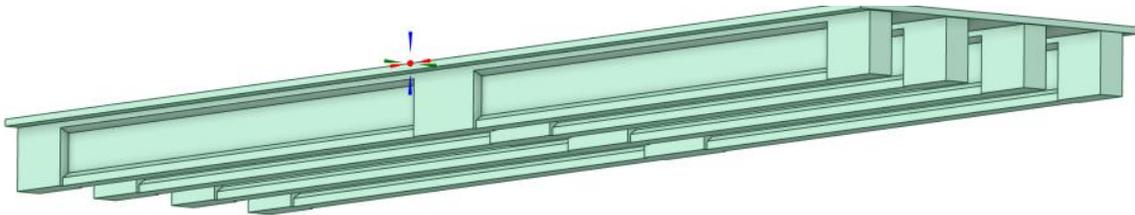
Para la modelación de la superestructura, se tomó inicialmente la altura total del puente y desde el plano $Z=0$ m se midió tal distancia, modelando en dicha posición un tablero de 20 cm de espesor. Anexo a la cara posterior del tablero se modelaron las vigas de acuerdo con las dimensiones definidas en el numeral 7.1.1.1. del presente documento, considerando los puntos de apoyo de la viga, es decir; el inicio, el centro de la luz y el fin del puente, se hace una transición de la sección “I” típica a una sección rectangular, tal como se hace en la construcción de vigas postensadas. Las vigas se modelaron continuas para la longitud total del puente.

Ilustración 45 Elementos de superestructura



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Ilustración 46 Vista 3D de superestructura

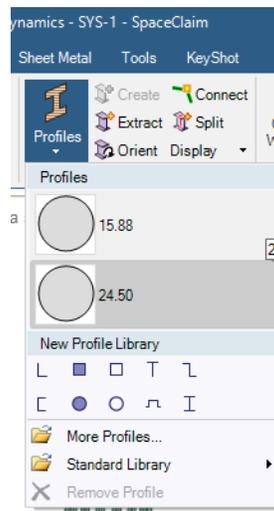


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

7.1.4.2. Subestructura.

La construcción del modelo de subestructura aporricada requirió de un grado mayor de complejidad. Para éste se requirió la modelación de líneas a las cuales se les asigna elementos de tipo “beam” dentro de la interfaz del space claim de ANSYS, allí se define una sección transversal típica que posteriormente se le asigna a la “línea” dibujada la cual sirve de eje central del elemento final, el cual se verá posteriormente como una sección extruida. Estas líneas fueron dibujadas en AutoCAD 3D para luego ser importadas en ANSYS.

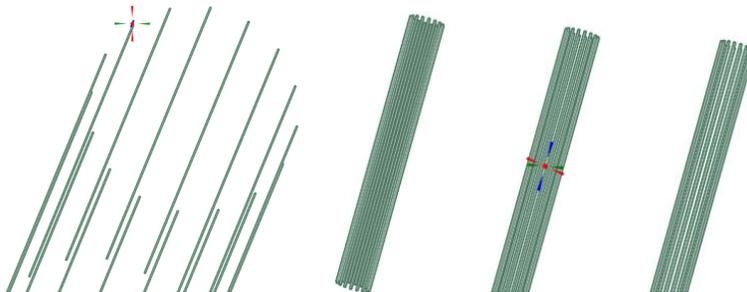
Ilustración 47 Definición de elementos tipo “Beam”



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Se definen como elementos “beam” las secciones transversales de las barras de refuerzo, tal como se ilustra en la imagen anterior y una vez insertadas las líneas desde AutoCAD 3D se asignan dichas secciones.

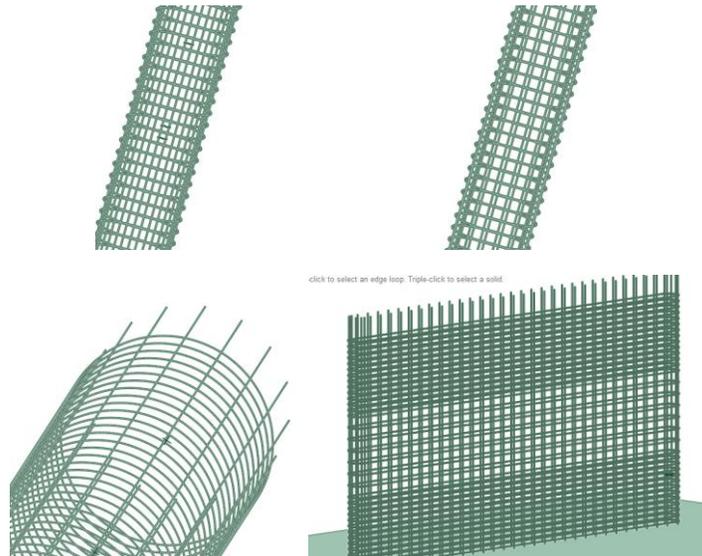
Ilustración 48 Asignación de elementos tipo “Beam”



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Para el refuerzo transversal, se generan circunferencias bajo el mismo procedimiento que el refuerzo longitudinal, para estas se tienen en cuenta los espaciamientos de secciones confinadas en las columnas.

Ilustración 49 Asignación de elementos tipo “Beam” para refuerzo transversal

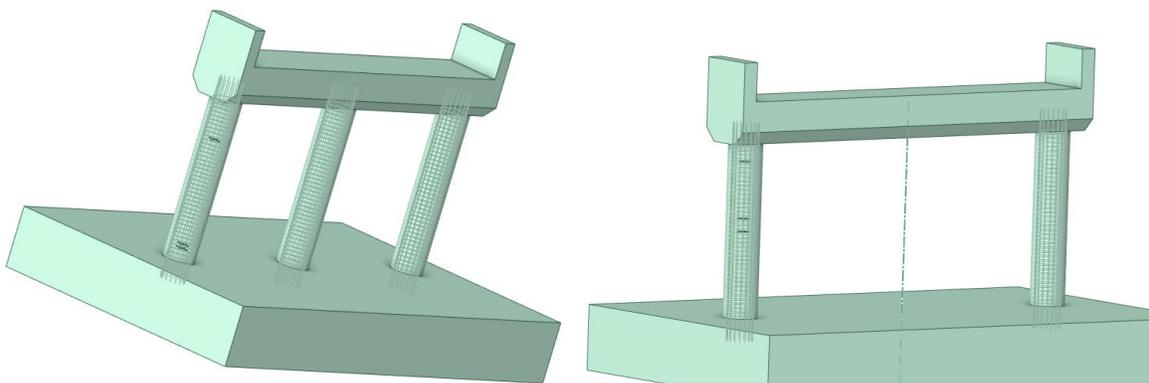


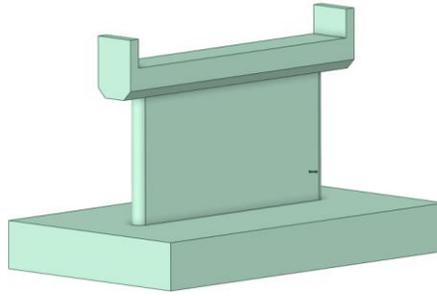
Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Se procede a generar un plano de “extrusión” con el diámetro definido para las columnas circulares. En el caso particular del soporte de tipo muro se genera un plano con la sección definida para el muro. Con estos planos, se generan los sólidos que conformarán el sistema de pórtico. Con esta base se define el dado y la viga cabezal del pórtico de tal manera que los refuerzos se anclan a estos elementos, asegurando la integridad de la estructura.

Para los elementos tipo dado y tipo viga del pórtico no se modelan refuerzos.

Ilustración 50 Conformación de subestructuras





Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

7.1.5. Conformación paramétrica y metodológica del modelo.

Se conforman los parámetros y condiciones de frontera de los modelos a partir de las características de los materiales de cada uno de los componentes y elementos dentro de la simulación, condiciones de apoyo, restricciones de desplazamiento, velocidad de desplazamiento del elemento “móvil” y sentido del desplazamiento de este y se escoge un ángulo de ataque para el impacto sobre la subestructura.

Inicialmente se ingresan los datos precargados dentro de ANSYS a la librería de materiales que estarán disponibles para asignarlos a los elementos del modelo, una vez ingresados se verifican sus propiedades. Para el acero de refuerzo y el concreto se consideran materiales que involucren dentro de sus propiedades la capacidad de deformarse no linealmente.

Ilustración 51 Definición de concreto no lineal ($f'_c = 28\text{MPa}$)

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
					Ricciol, et al. "Numerical Assessment for Impact Strength" LIIIE 36 (2009) pp283.
7	Concrete		General		
8	Concrete NL		General		
9	Motor		D-13.ESC		
10	RebarNonLinear		D-13.ESC		
11	Structural Steel		General		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2300	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Mo...			
6	Young's Modulus	24870	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,2			
8	Bulk Modulus	1,3817E+10	Pa		
9	Shear Modulus	1,0363E+10	Pa		
10	Drucker-Prager Strength Piecewise	Tabular			
11	Scale	1			
12	Offset	0	Pa		
13	Tensile Pressure Failure				
14	Maximum Tensile Pressure	-1E+06	Pa		

Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Ilustración 52 Definición de acero de refuerzo

The screenshot shows the 'Contents of Engineering Data' table with 'RebarIronLinear' selected. Below it, the 'Properties of Outline Row 10: RebarIronLinear' table is displayed.

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7853,1	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Mo...	
Young's Modulus	2E+05	MPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
Bilinear Isotropic Hardening		
Yield Strength	420	MPa
Tangent Modulus	315	MPa

Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Aunque el acero es el material más ampliamente usado en la fabricación de autos, también existe la fabricación de estos con aleaciones de aluminio. Este último material es especialmente usado en camiones de transporte dado a la abundancia del material, los bajos costos de fabricación, su peso ligero el cual permite transportar más carga y particularmente la facilidad de imprimir anuncios en él. Muchos mercados prefieren y fabrican los camiones de transporte en aleaciones de aluminio con paneles interiores, ejemplos claros son camiones frigoríficos, cisternas, remolques, etc (*Chalco Aluminium. Aluminio en la industria del transporte. Recuperado el 18 de octubre, 2023, en <https://www.chalcoaluminum.com/es/application/aluminum-in-transportation/#veh%C3%ADculos%20comerciales>*)., por ende; se emplea el aluminio como material para la modelación de los vehículos dentro del análisis, teniendo en cuenta el comportamiento “no lineal” en cuanto a las deformaciones que sufriría un vehículo en la vida real debido al impacto contra la estructura.

Ilustración 53 Definición de material para elementos tipo vehículo

The screenshot shows the 'Contents of Engineering Data' table with 'Aluminum Alloy' selected. Below it, the 'Properties of Outline Row 4: Aluminum Alloy' table is displayed.

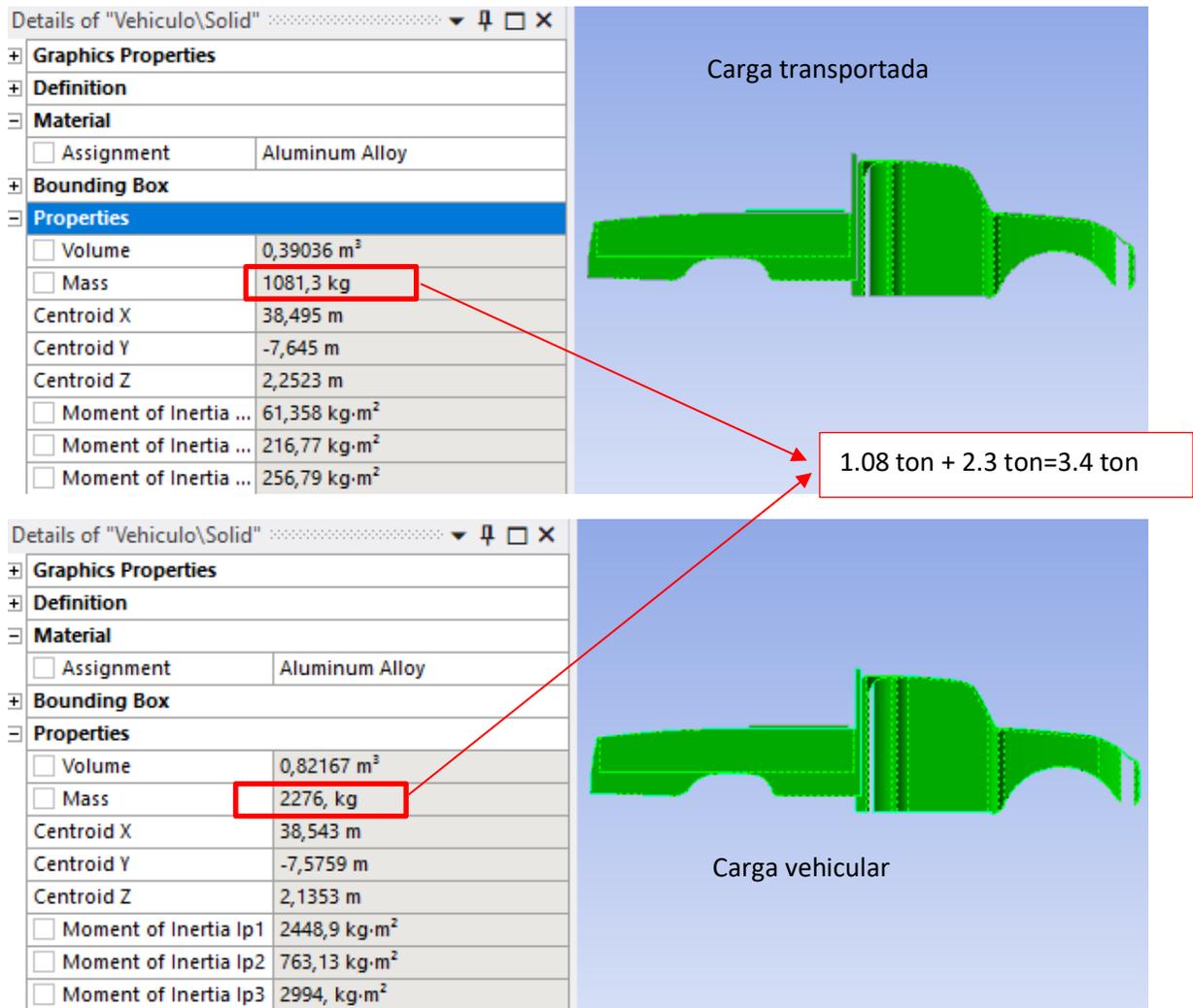
Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	2770	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Mod...	
Young's Modulus	7,1E+10	Pa
Poisson's Ratio	0,33	
Bulk Modulus	6,9608E+10	Pa
Shear Modulus	2,6692E+10	Pa
Bilinear Isotropic Hardening		
Yield Strength	250	MPa
Tangent Modulus	1450	MPa
Specific Heat Constant Pressure, C _p	875	J kg ⁻¹ C ⁻¹

Table of Properties Row 2: Aluminum Alloy Field Variables					
	A	B	C	D	E
1	Variable Name	Unit	Default Data	Lower Limit	Upper Limit
2	Temperature	C	22	Program Controlled	Program Controlled
3	R-Ratio		-1	Program Controlled	Program Controlled

Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

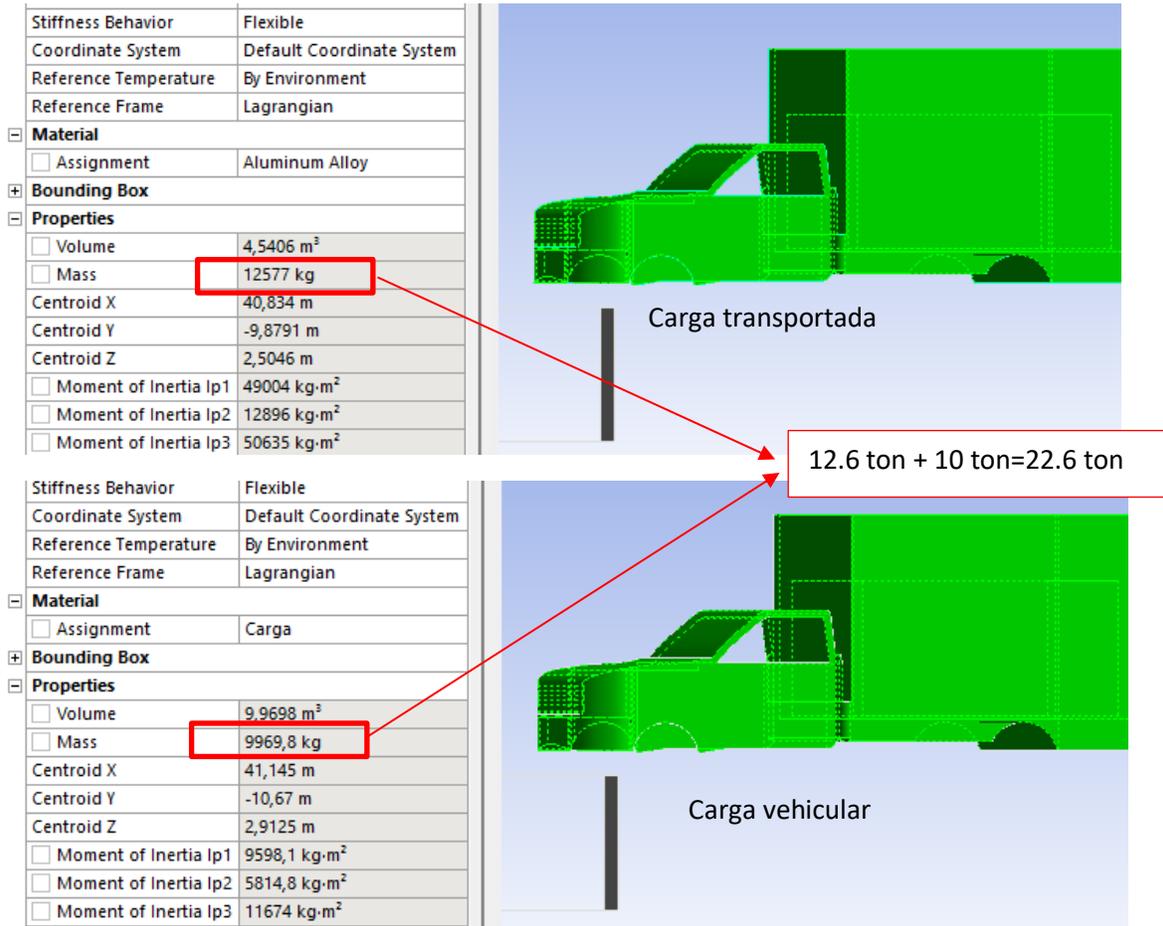
Con la asignación de materiales a las geometrías creadas, se verifican los volúmenes y pesos de los vehículos para asegurar que se está aportando una carga acorde con las condiciones reales.

Ilustración 54 Peso asignado a vehículo liviano



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Ilustración 55 Peso asignado a vehículo pesado

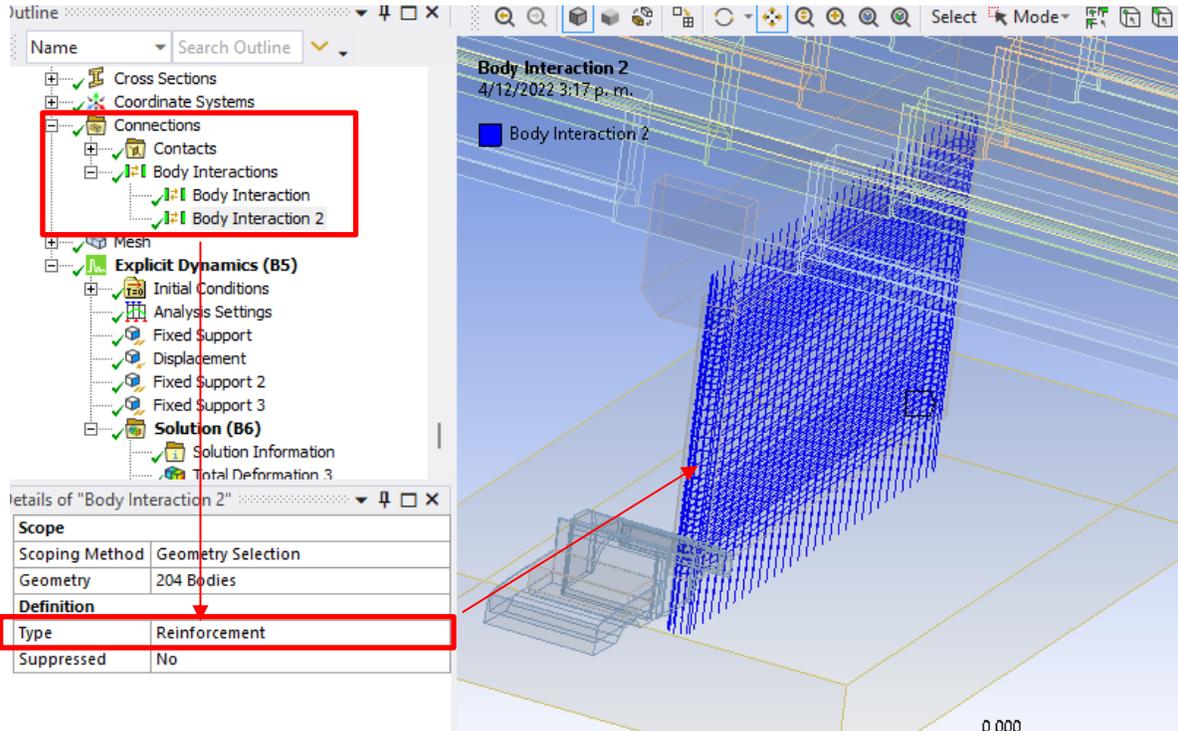


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Se tiene entonces una carga de 3.40 ton para el vehículo ligero y 22.60 ton para el vehículo pesado. Como se apreciará en las imágenes, el elemento de “carga transportada” es significativamente más pesado que los vehículos, esta condición se modela de esta manera para compensar los componentes del vehículo que no están modelados como sillas, rodamientos, sistemas, etc.

Para una correcta interacción de los elementos independientes que en conjunto conforman el modelo de análisis, se debe modelar el contacto entre sus superficies, para ello, los elementos que se encargan de representar el acero de refuerzo se les asigna una definición tipo “reinforcement”.

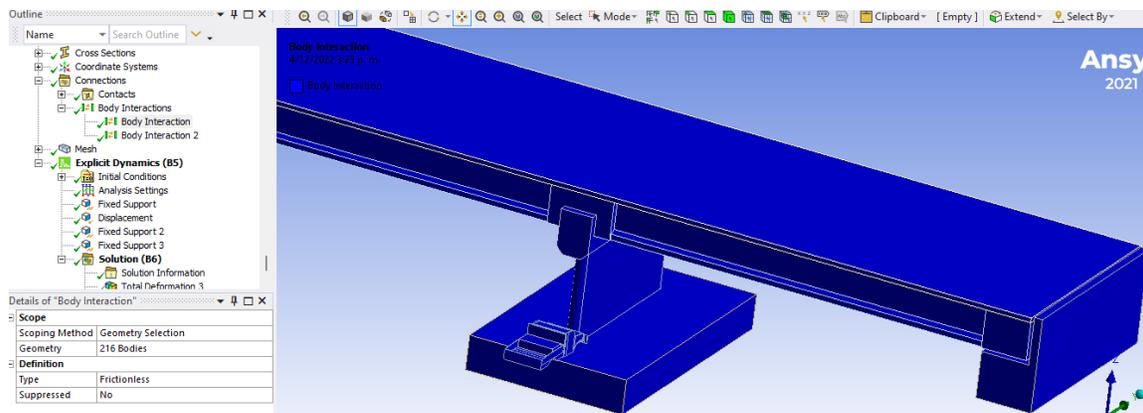
Ilustración 56 Elementos tipo refuerzo.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Por otro lado, el resto de los elementos van a interactuar a través de las caras que se encuentran en contacto o las que en determinado instante de tiempo lo estarán, como lo es el caso del vehículo en el instante que impacte con la estructura. Para simular esta condición se asigna a los elementos una condición de "fricción" con ello el programa entiende que se trata de sólidos que tendrán contacto durante la simulación.

Ilustración 57 Contacto entre sólidos

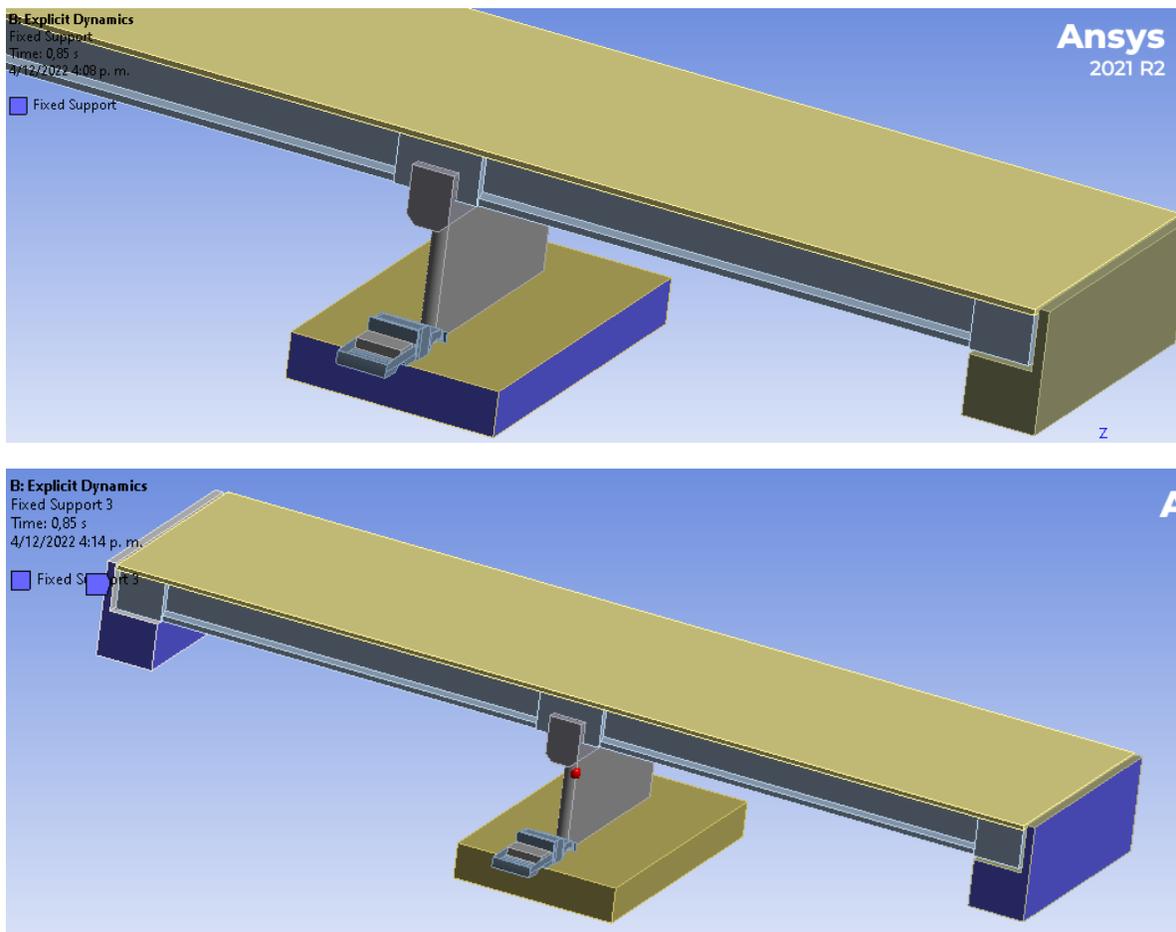


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Para simular la correcta interacción de los elementos contenidos en el modelo de análisis y la adecuada respuesta de la estructura una vez recibido el impacto, se debe ingresar la información con respecto a los grados de libertad de cada uno de los puntos y/o áreas de apoyo y las direcciones espaciales en los cuales el vehículo podrá desplazarse.

Sobre los puntos de apoyo del puente, en el área de contacto de las vigas con estribos y apoyos intermedios, ya se está considerando la fricción entre las superficies de contacto, por lo tanto, se tienen restricciones en ejes x e y, z negativo y ninguna restricción al giro. Sobre los estribos y dado, al estar enterrados se asigna un apoyo empotrado.

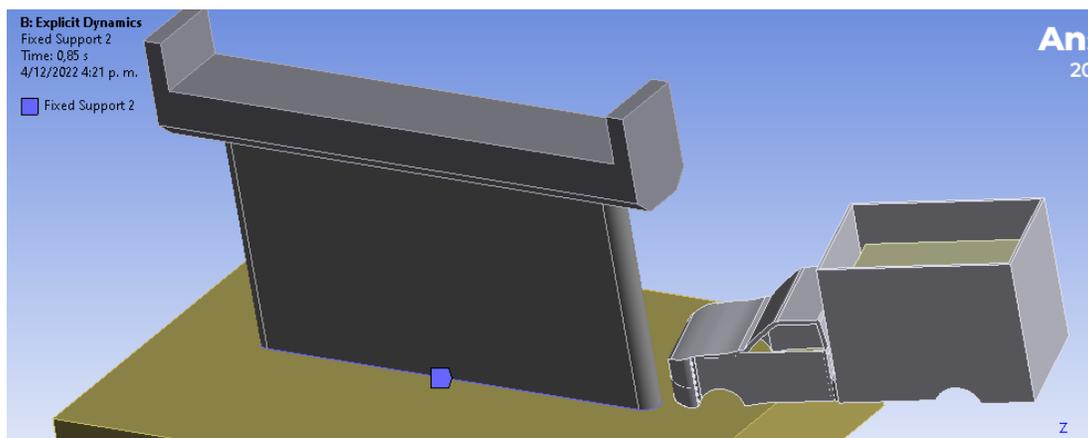
Ilustración 58 Apoyos fijos



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Sobre la interacción entre las columnas y el dado, en el borde de contacto de estos dos elementos también se define una condición de empotramiento para asegurar el adecuado comportamiento del conjunto de subestructura.

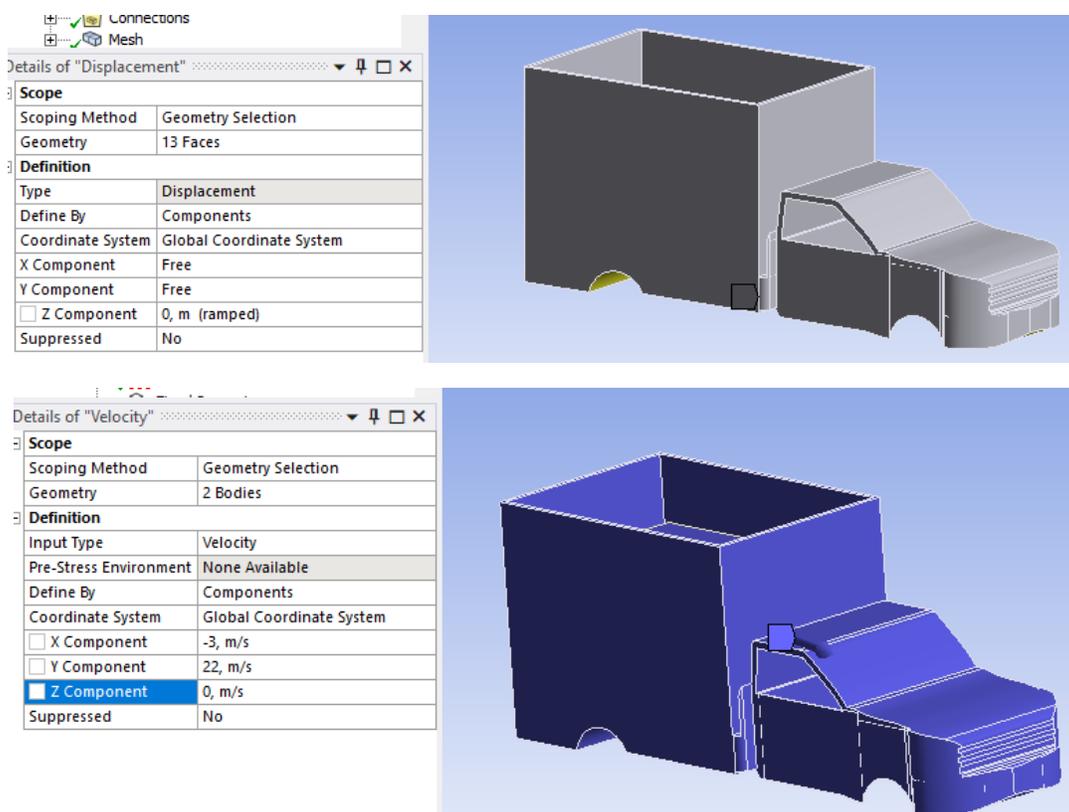
Ilustración 59 Apoyos fijos en subestructura

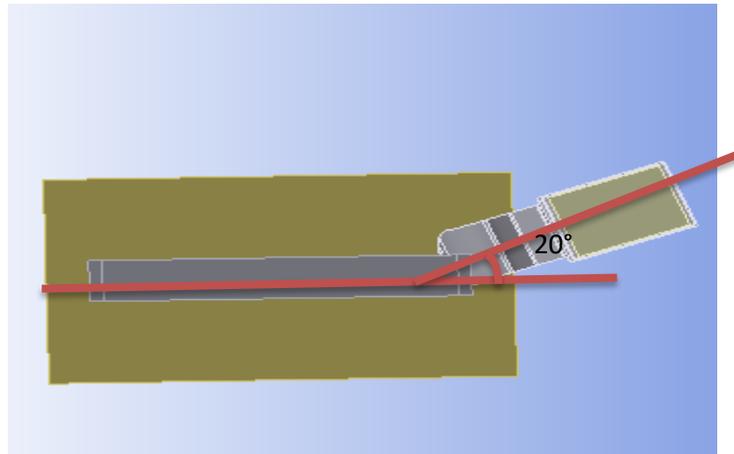


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Para asegurar el sentido del desplazamiento del vehículo se restringe el movimiento en su eje z y se libera su movimiento en los ejes x e y. Además, se asigna un ángulo de ataque de 20° con respecto al eje de columnas y las respectivas velocidades de impacto para cada uno de los modelos.

Ilustración 60 Condiciones de contorno para los vehículos.





Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

7.1.6. Conformación y construcción del modelo global y refinamiento del modelo.

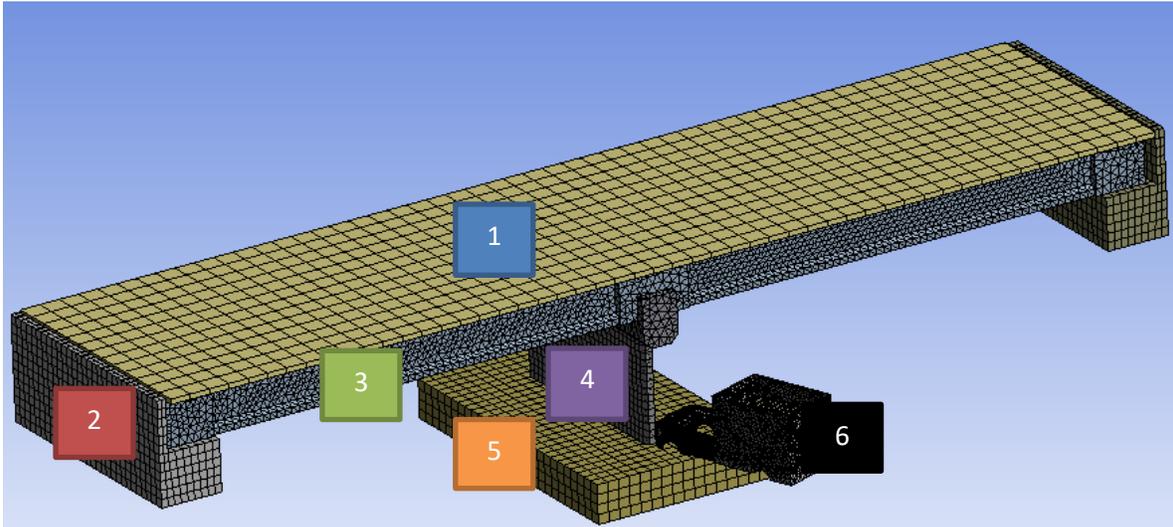
Una vez definidas la geometría y condiciones de contorno de modelo de análisis se procede a definir las condiciones de análisis y mallado de la estructura y elementos tipo vehículo y carga.

En el módulo “Explicit Dynamics” de ANSYS, la mayoría de las condiciones de análisis se dejan por defecto debido que son adecuados para la solución del sistema propuesto, únicamente se intervienen en los siguientes parámetros:

1. Se define un tiempo de terminación de cálculo de 0.85 seg. Cabe aclarar que este tiempo corresponde al tiempo “real” en el cual suceden los eventos mas no al tiempo que le toma al software realizar los cálculos. Si la convergencia de cálculo ocurre antes de este tiempo se obtendrá una menor cantidad de resultados.
2. Se activan los denominados por el programa como “Erosion Controls”. Esta opción permite ver sobre el modelo la degradación del material debido al impacto, como lo es el concreto destruido o la aparición de rótulas plásticas.

Finalmente, se realiza asigna el refinamiento del modelo, que es de las etapas más importantes de todo el análisis, puesto que la calidad de los resultados depende de la calidad del mallado que se asigne a los elementos de interés en el estudio. Mientras más fino el mallado, es decir, mientras más pequeños, mayor precisión se obtendrá, sin embargo; el tamaño de la malla va de la mano con la precisión esperada en los resultados por lo que, si se tiene un mallado muy fino pero un error “admisibles” en los cálculos muy alto, el programa no encontrará una convergencia y el modelo no dará buenos resultados. De acuerdo con la importancia del elemento al análisis se le asigna un refinamiento de malla.

Ilustración 61 Refinamiento del modelo de elementos finitos



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

1. El tablero cuenta con un mallado con geometría tipo paralelepípedo, no requiere de un refinamiento demasiado detallado por lo que sus elementos son los de mayor tamaño en todo el modelo. En el modelo, este elemento únicamente cumple con la función de integrar la superestructura y compatibilizar las deformaciones en las vigas en caso de que se presenten, además de transferir carga.
2. Los elementos tipo estribo cumplen con la función de apoyar y restringir las vigas del puente, este elemento tampoco requiere de un mallado muy fino puesto que la carga de impacto no será transferida a estos como tampoco se verán afectados en gran medida. Cuenta con un mallado de geometría cuadrada.
3. Las vigas cuentan con una geometría de mallado de tipo poliedro triangular. Este mallado se asigna a las vigas debido que cuentan con zonas en las que su sección cambia. La geometría triangular permite una mejor adaptación a los cambios geométricos presentes en el sólido modelado. Su refinamiento es bastante fino si se compara con su envergadura.
4. Los elementos tipo pila son los que cuentan con un mayor refinamiento. Estos elementos reciben en su totalidad la carga del impacto vehicular, son quienes sufren las mayores deformaciones, las cuales son de carácter inelástico y también sufren de la aparición de rótulas plásticas. La geometría del mallado empleado es de tipo rectangular debido que, a pesar de presentar curvaturas, su geometría es bastante regular por lo que se adapta muy bien a la forma del sólido que representa las columnas y permite un mallado muy fino.
5. Al igual que el tablero, los dados son mallados con una geometría cuadrada y no requieren de mucha finura en su refinamiento puesto que este elemento, si bien absorbe parte del impacto vehicular, no es del objeto de este estudio.

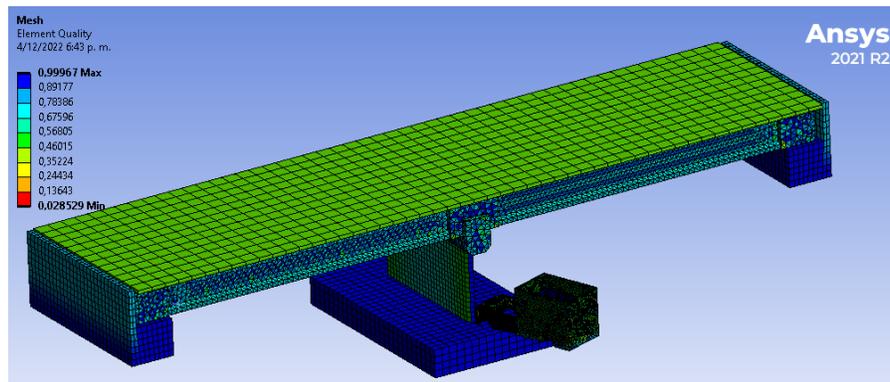
6. El vehículo es la otra parte fundamental del estudio, es de vital importancia que esté presente un nivel de deformación aceptable y que además represente muy bien la transmisión del impacto. Debido a lo irregular de su geometría y que, además; esta parte de un solo bloque, el modelo exige una geometría triangular en su refinamiento y que este sea muy fino.

Existen parámetros que miden la calidad del mallado de la modelación, los principales de estos son:

- a. Coeficiente de aspecto: Corresponde con la relación que hay entre el lado más largo y el lado más pequeño del elemento finito. El valor óptimo para este coeficiente es el de la unidad.
- b. Coeficiente Jacobiano: es una representación de que tan irregular es el elemento finito, guarda relación con que tanto se adapta la malla a la geometría del elemento en análisis. Cuanto mayor sea el valor, peor será la calidad de la malla.

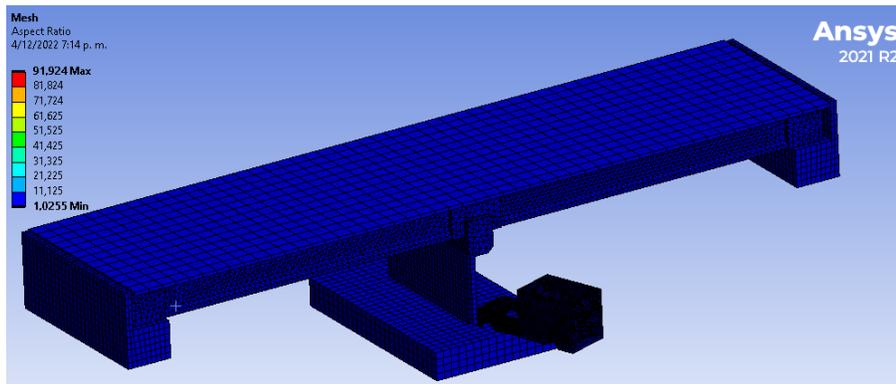
Se presenta a continuación imágenes de la calidad lograda para el mallado.

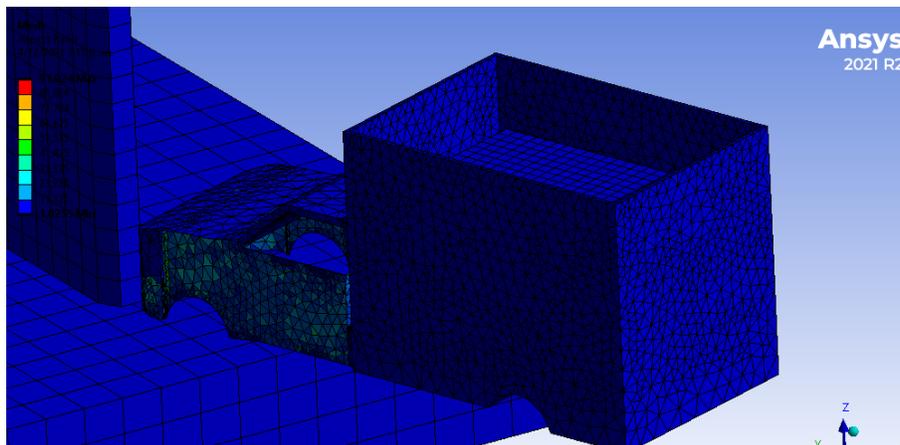
Ilustración 62 Calidad general del mallado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

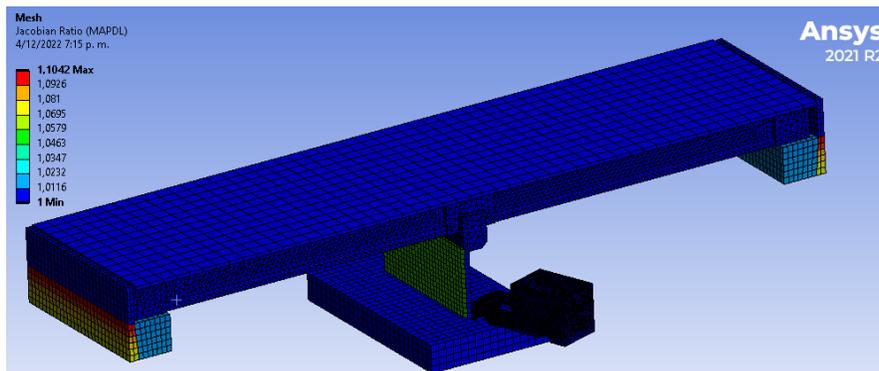
Ilustración 63 Coeficiente de aspecto





Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Ilustración 64 Coeficiente jacobiano



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Nótese que, para el coeficiente Jacobiano, los elementos finitos se alejan del parámetro ideal tan solo en un 10% en los elementos no representativos para el estudio, por lo tanto, se considera que el mallado cumple con la calidad suficiente para obtener resultados confiables.

8. RESULTADOS OBTENIDOS

Debida la cantidad de parámetros de entrada involucrados en el estudio, los resultados se obtuvieron a partir de un gran número de modelos. De acuerdo con esto, en resumen, se cuenta con 3 tipologías de pilas de puentes, 3 velocidades de análisis y 2 tipos de vehículos para un total de 18 modelos. En cada uno de estos modelos se simula el impacto vehicular sobre cada estructura variando el tipo de vehículo y la velocidad de impacto, cada

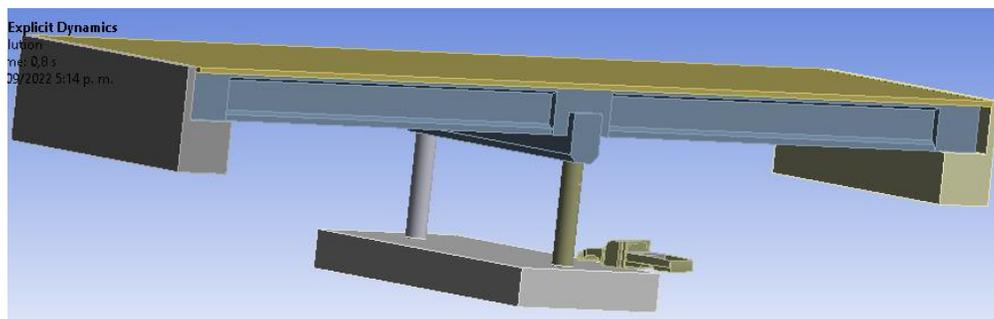
simulación requiere de una gran cantidad de recurso computacional por lo que cada una de ellas se toma un tiempo real de cálculo que va de los 7 a los 15 días de modelación continua.

De las simulaciones se obtiene información detallada de la respuesta de la estructura ante la carga de impacto, esta respuesta es medida a través de valores de aceleración, deformación, deformación unitaria, esfuerzo y otros parámetros que pueden ser de interés para el estudio, con estos resultados se pueden establecer curvas comparativas entre las distintas cargas y distintos tipos de estructura y con ello evaluar la resiliencia de cada una de ellas.

8.1. Pórtico de 2 columnas.

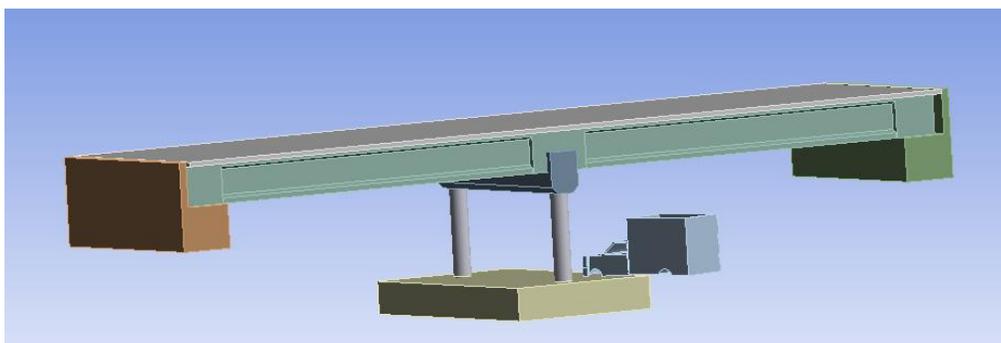
Se somete a modelación la estructura del puente soportada por el pórtico de dos columnas como pila central, impactada por velocidades de 40 km/h, 60 km/h y 80 km/h por cada vehículo, para un total de 6 modelos para esta estructura.

Ilustración 65 Pila de tipo pórtico de dos columnas con vehículo liviano



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

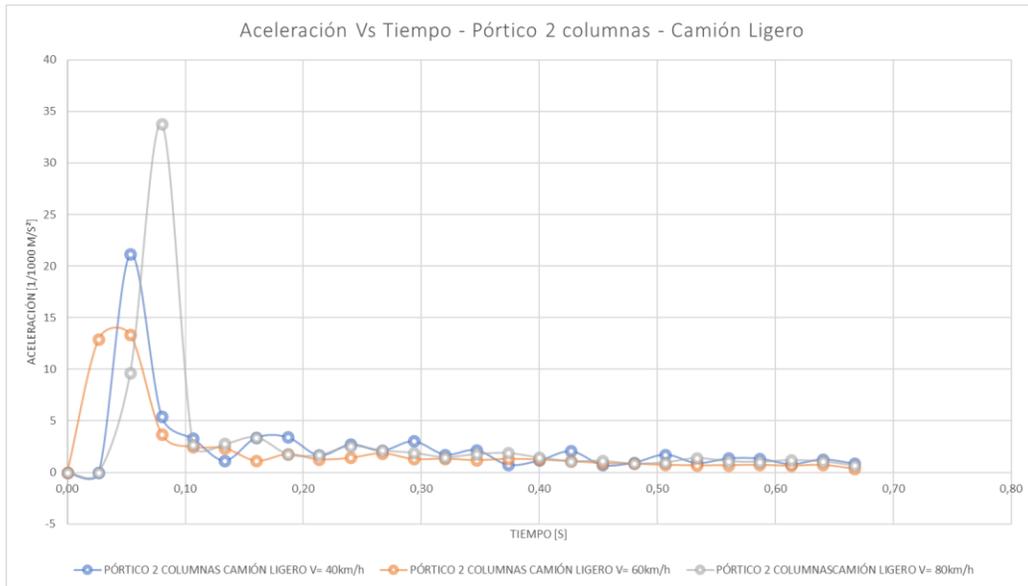
Ilustración 66 Pila de tipo pórtico de dos columnas con vehículo pesado



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

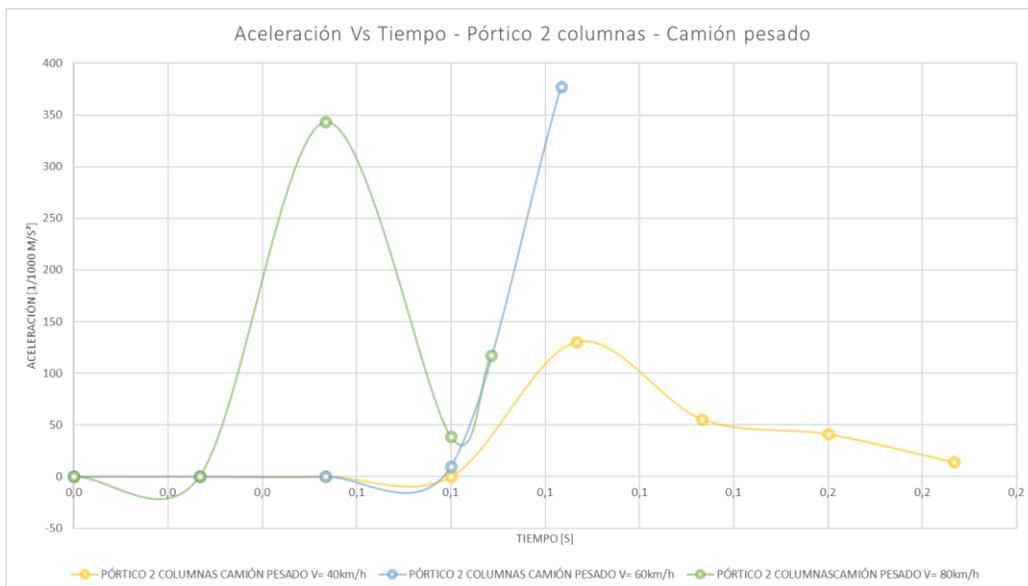
De esta modelación se obtienen gráficos de la aceleración de la estructura dada la carga aplicada, se muestran estos gráficos a continuación:

Gráfica 3 Gráfico de aceleración vs. tiempo – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 4 Gráfico de aceleración vs. tiempo – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

La curva marcada en color azul (impacto a 60 km/h) se corta antes de “retirada la carga” dado que el programa termina la ejecución, posiblemente porque se presenta un mecanismo de falla en la estructura que genera que el programa converja en sus resultados en ese instante.

Estos valores de aceleración reflejan parte de la respuesta de la estructura en función del cambio en la cantidad de movimiento generado por el impulso recibido del vehículo, teniendo en cuenta que, de acuerdo con la segunda ley de Newton, existe una proporcionalidad entre el producto de la masa del sólido y su cambio en la cantidad de movimiento con respecto a la fuerza, se puede calcular la fuerza generada en la estructura conociendo su masa.

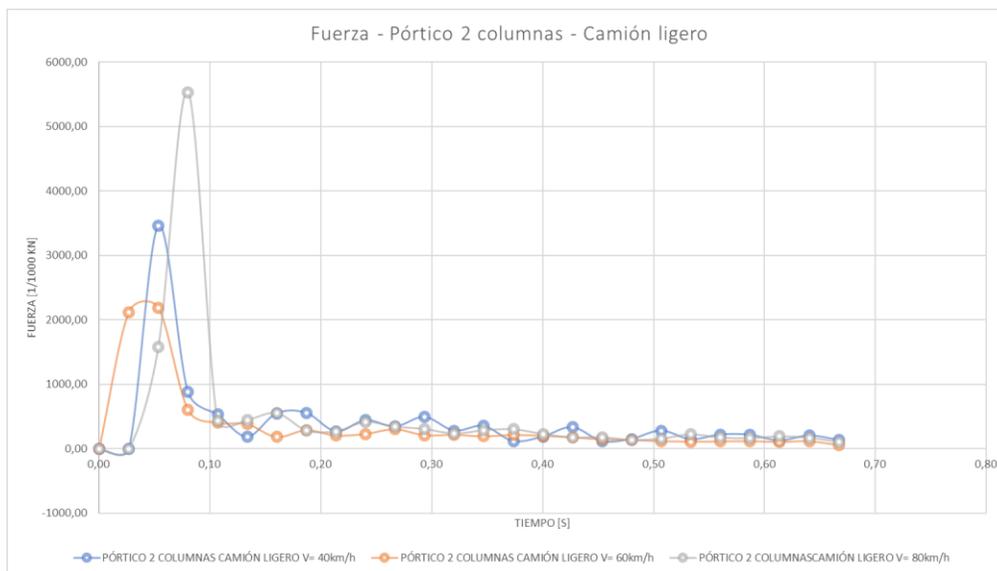
Tabla 3. Masa acelerada en el modelo de elementos finitos.

<i>Avalúo de PP</i>	<i>Carga [kg]</i>	<i>Carga [kN]</i>
Vigas	36009	353
Tablero	93290	915
Viga Cabezal	31556	310
Columnas/2	6359	62
Total	167214	1640

Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Con base en esto, se obtienen los gráficos de fuerza en la estructura.

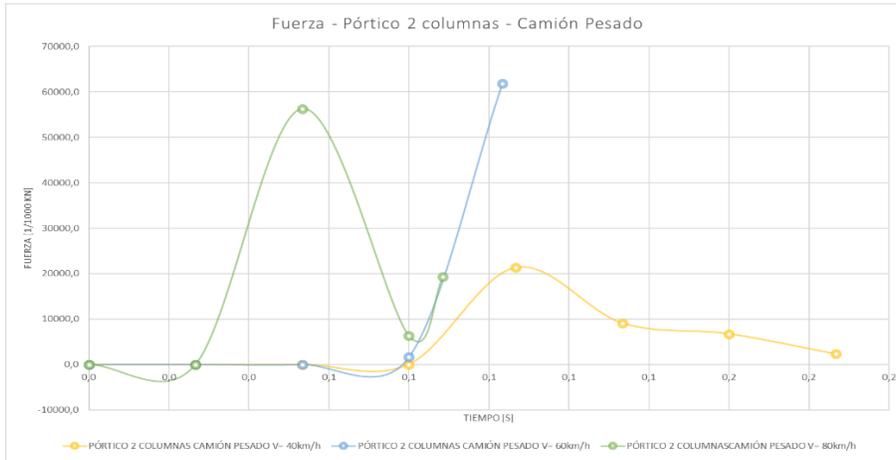
Gráfica 5 Gráfico de Fuerza Vs tiempo – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En el caso del camión liviano, la máxima fuerza es generada en la estructura cuando este impacta a 80 km/h, sin embargo; la menor fuerza con la que responde la estructura al impacto es generada para 60 km/h.

Gráfica 6 Gráfico de Fuerza Vs tiempo – Camión pesado.

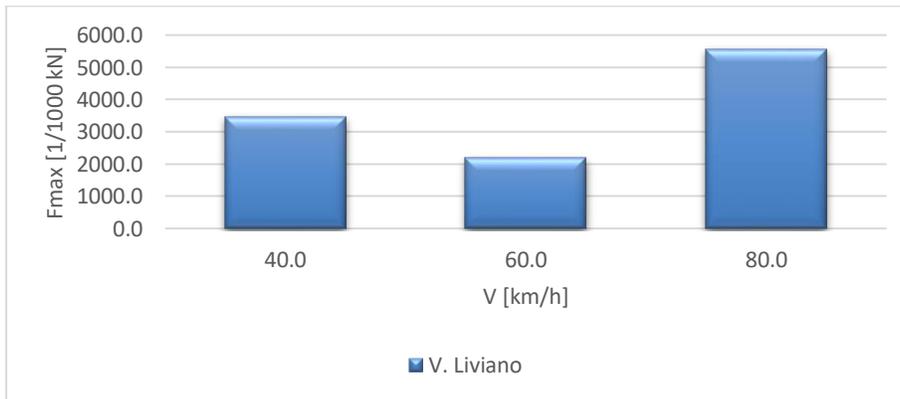


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En el caso en que la estructura es impactada por el camión pesado, la máxima fuerza generada en la estructura ocurre cuando el camión transita a 60 km/h y la mínima fuerza cuando transita a 40 km/h.

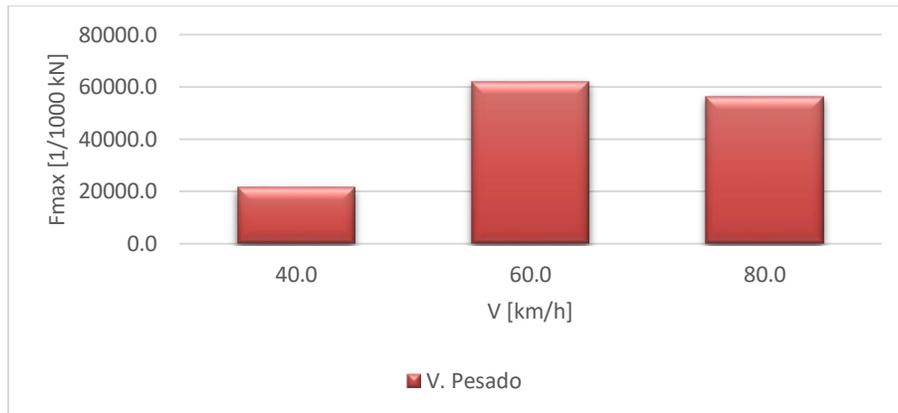
Si se extraen únicamente las fuerzas máximas de los gráficos anteriores, se obtiene:

Gráfica 7 Gráfico de Fuerza máxima Vs velocidad – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 8 Gráfico de Fuerza máxima Vs velocidad – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

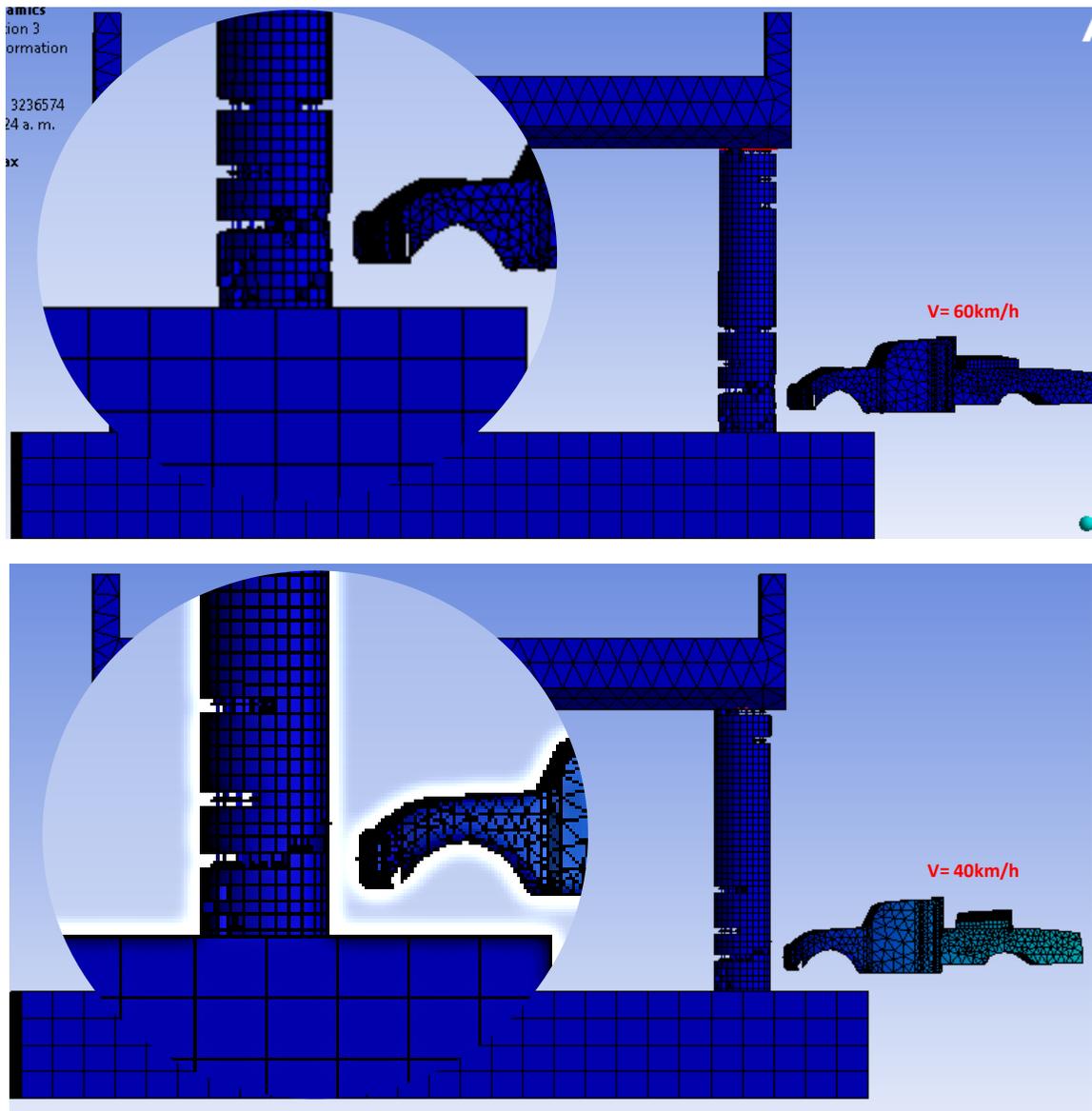
En estas gráficas se observa un fenómeno particular, en el caso del vehículo liviano, cuando se impacta a 60 km/h se obtiene la fuerza mínima en la estructura, sin embargo; para el vehículo pesado se obtiene la fuerza máxima. Son diversas las situaciones que pueden llevar a este resultado debido el gran número de factores involucrados como lo son el ángulo de impacto, la condición geométrica tanto del vehículo como de la estructura y el mecanismo de falla que desarrolla la columna, una vez recibido el impacto. Se han fijado la mayoría de estos valores; sin embargo; el mecanismo de falla que desarrolla la estructura es un fenómeno arbitrario que puede afectar directamente la respuesta de la estructura.

La estructura es alterada de su condición inicial ($V=0$ y $x=0$), desde el punto de vista físico, lo que se le está imprimiendo en la estructura es una velocidad inicial, como respuesta se genera entonces una vibración amortiguada como es observable en los gráficos de aceleración, donde la cantidad de movimiento se ve reducida de manera importante en función del tiempo, se entiende entonces que, la respuesta de la estructura es un reflejo de su resiliencia, vista en términos de que la respuesta puede ser elástica o plástica.

Debido al movimiento en la estructura, la fuerza inercial sobre la masa de análisis se ve amplificada, es decir; aunque la fuerza impresa en la estructura es de una magnitud conocida, el efecto de la rigidez de la estructura permite que ocurra un desplazamiento en ésta, teniendo como efecto un aumento en la aceleración de la estructura y, por lo tanto; en las fuerzas inerciales actuantes.

Con base en esta premisa, observando los daños presentes en la columna impactada por el vehículo a 60 km/h en comparación con el impacto a 40 km/h, se evidencia que el nivel de daño presente en el elemento es mucho mayor, además, se aprecia un nivel mayor de deformación permanente en el elemento impactado a 60 km/h.

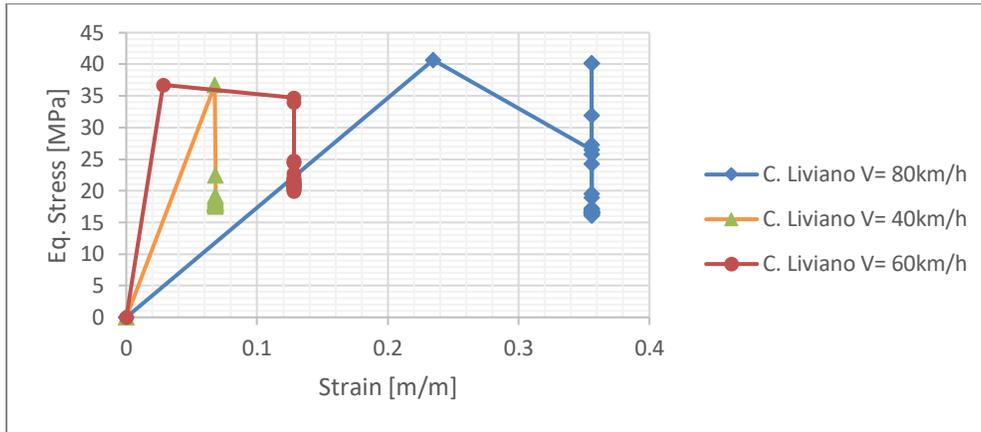
Ilustración 67 Comparativo de falla producida – Camión liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Si se concentra el análisis en el elemento columna que recibe todo el impacto, se pueden obtener curvas de esfuerzo – deformación:

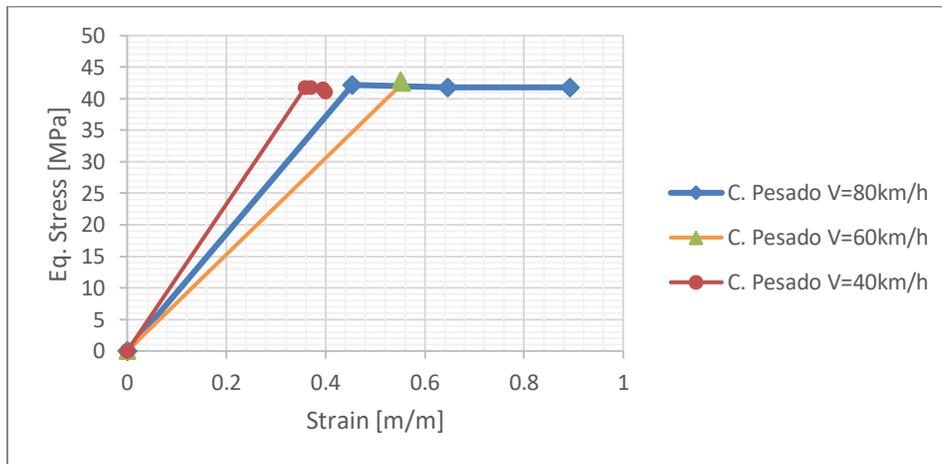
Gráfica 9 Gráfico de Esfuerzo Vs Deformación – Camión liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

De las curvas esfuerzo deformación se puede extraer información importante antes de profundizar en el análisis de los resultados obtenidos. En el caso del impacto a 60 km/h para el camión liviano se observa que la estructura es susceptible a esta carga puesto que se ha comportado de manera frágil en comparación con los otros dos impactos, así mismo, ante el impacto a 80 km/h la estructura se ha deformado en gran medida, indicando un comportamiento dúctil. Para todos los casos se alcanza un esfuerzo superior al valor de f_c especificado para este estudio, sin embargo; la tendencia de los datos obtenidos evidencia un comportamiento que obedece a la teoría de los modelos de confinamiento del concreto.

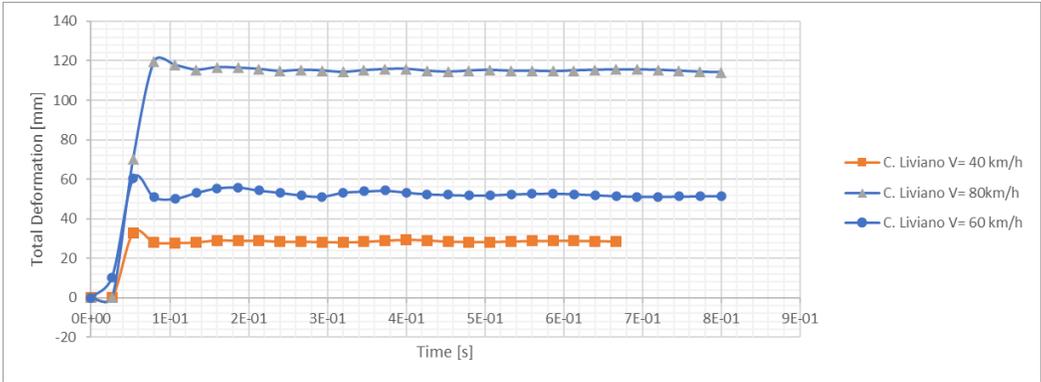
Gráfica 10 Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

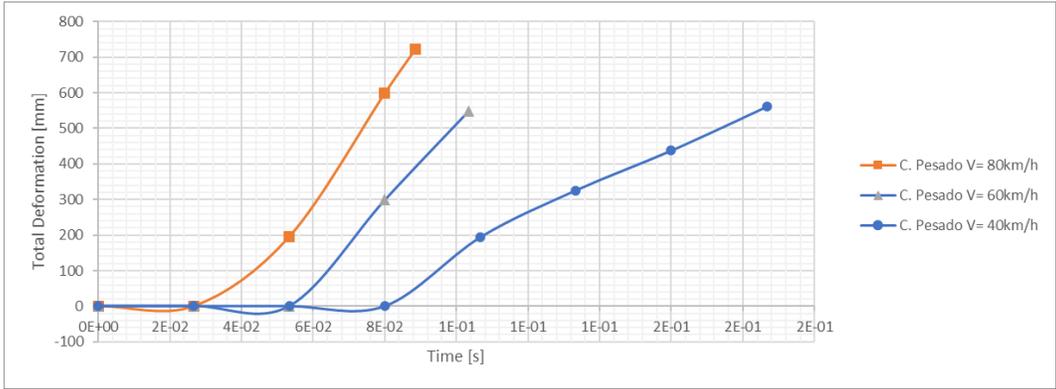
En el caso del camión pesado, los valores de esfuerzo alcanzados por la estructura son similares para las tres velocidades a pesar de que la magnitud de la fuerza de respuesta de la estructura difiere en gran medida entre los 3 impactos evaluados, esto indica que, en el caso de una carga de gran magnitud, la velocidad parece no ser un factor determinante, es evidente que siempre se presenta la falla. Sin importar la velocidad de impacto, en los 3 casos estudiados para el camión pesado la estructura ha alcanzado la falla. También se puede observar que la resistencia que la matriz confinada de concreto representa una mejora en cuanto a la resistencia para este tipo de eventos que, aunque se alcanza la falla, el esfuerzo alcanzado es mucho mayor que el especificado en el diseño y, como se mostrará más adelante, esta mejora representa un margen importante en la resiliencia del puente manteniéndose sin colapsar en algunos casos.

Gráfica 11 Gráfico de Deformación Total Vs Tiempo – Camión Liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 12 Gráfico de Deformación Total Vs Tiempo – Camión pesado.

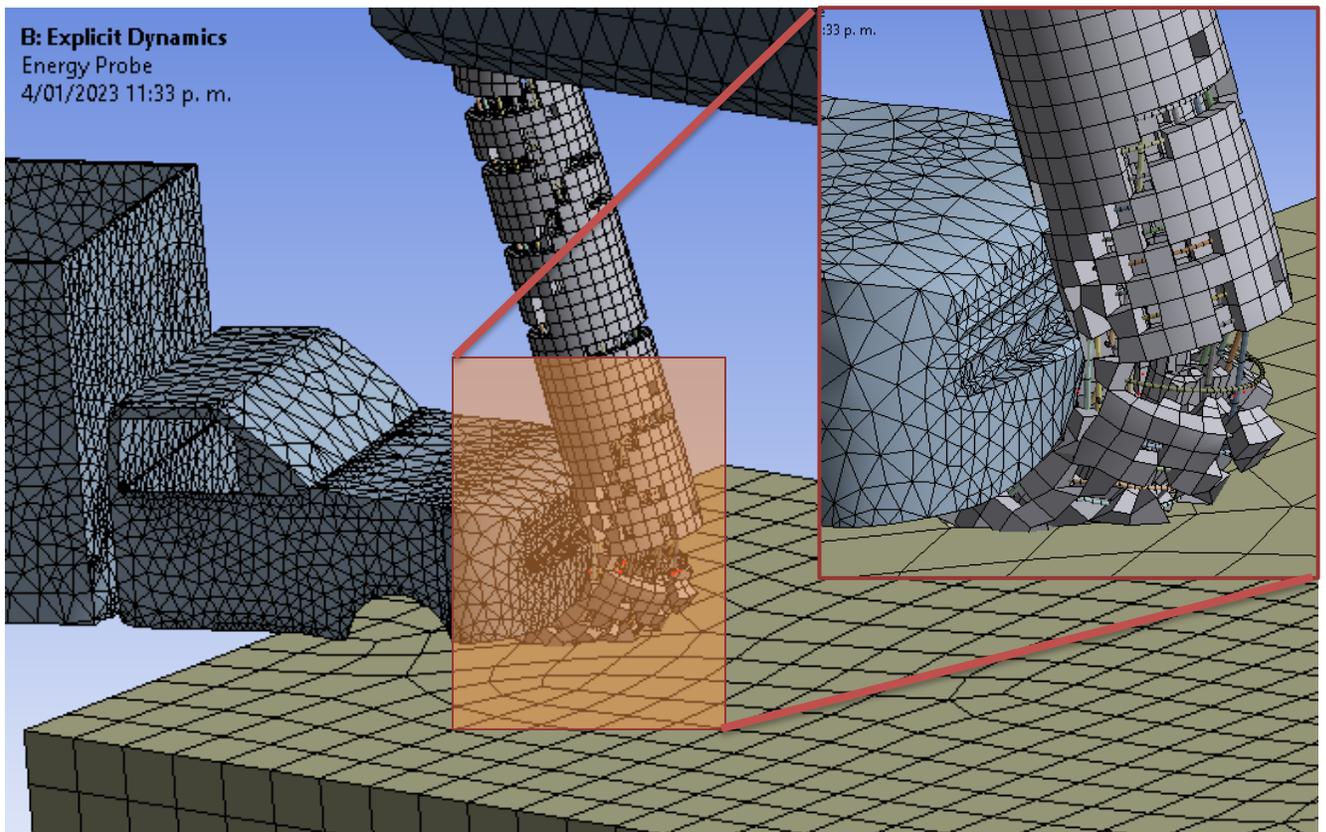


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En cuanto a las deformaciones, todos los impactos inducidos a la estructura producen una respuesta inelástica en ella, por lo cual se observa en todos los casos de análisis deformaciones permanentes.

En el caso de los impactos inducidos con el camión liviano, durante los primeros instantes se aprecia una pequeña recuperación de la deformación, con leves variaciones transcurridos unos segundos. A diferencia de esto, en el caso del camión pesado, si se observa el eje horizontal de tiempo se podrá apreciar que el elemento se deforma en un lapso muy reducido hasta alcanzar la falla del elemento casi instantáneamente.

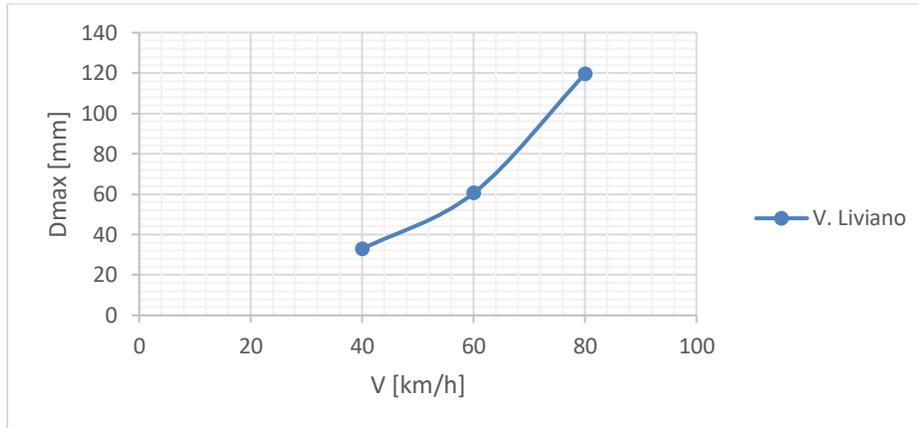
Ilustración 68 Daños en el elemento impactado – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

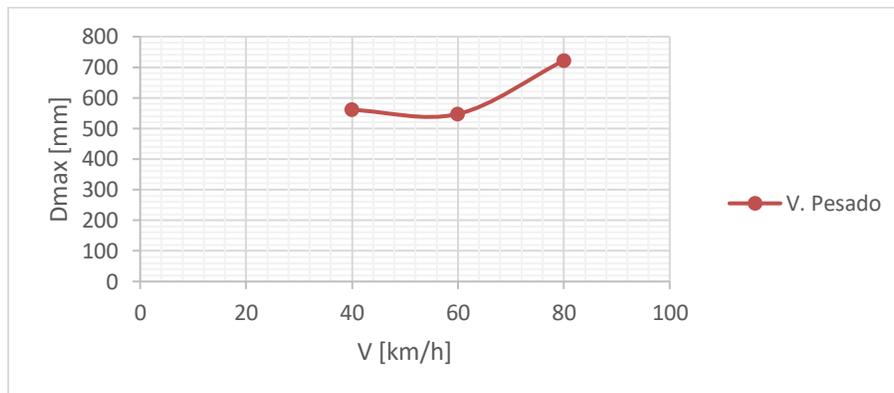
A continuación, se toman los valores máximos de deformación de cada uno de los casos estudiados y se colocan en un gráfico comparativo contra velocidad:

Gráfica 13 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 14 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado.



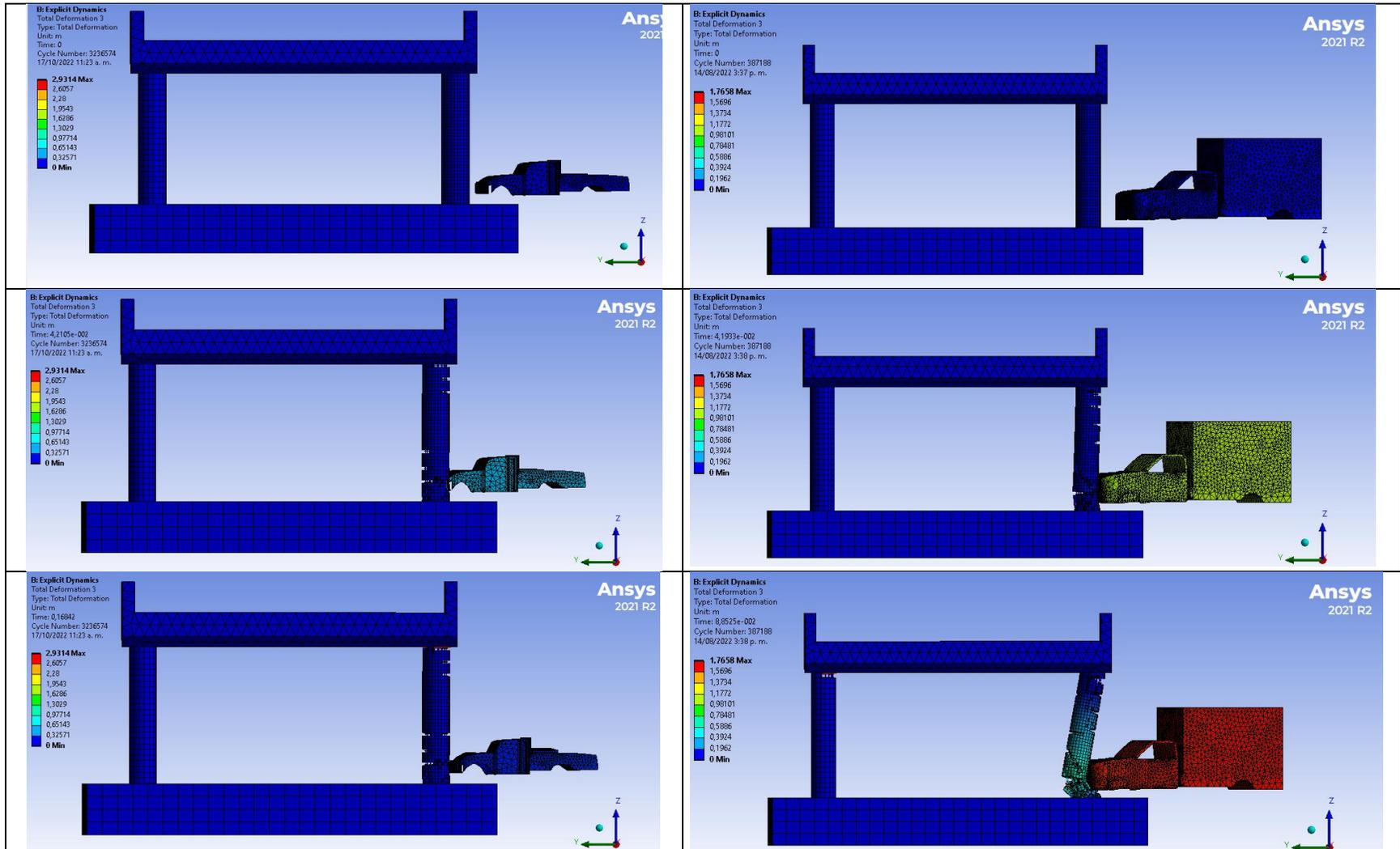
Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Las deformaciones máximas se presentan para ambos tipos de camión cuando estos impactan a 80 km/h, sin embargo; para el camión liviano la deformación alcanzada cuando este impacta a esta velocidad es el cuádruple que la alcanzada a 40 km/h y el doble a la alcanzada a 60 km/h.

En el caso del camión pesado, los valores de deformación alcanzados a 40 km/h y 60 km/h son muy próximos, sin embargo; la deformación alcanzada por la estructura cuando es impactada a 80 km/h es aproximadamente un 25% mayor que las dos anteriores.

A continuación, se presentan los instantes transcurridos durante la secuencia de impacto para ambos casos de carga a la velocidad de 80 km/h.

Ilustración 69 Secuencia de impactos para V= 80 km/h

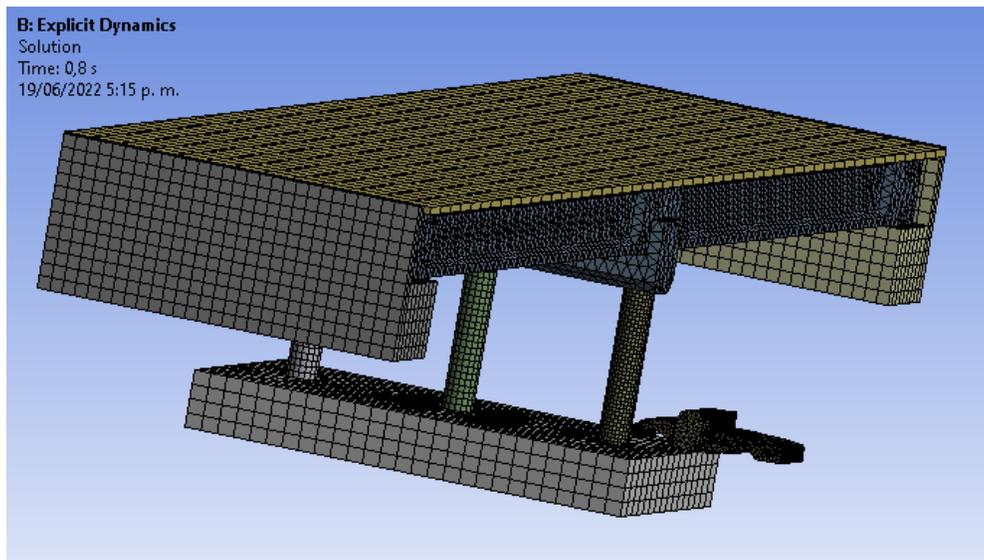


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

8.2. Pórtico de 3 columnas.

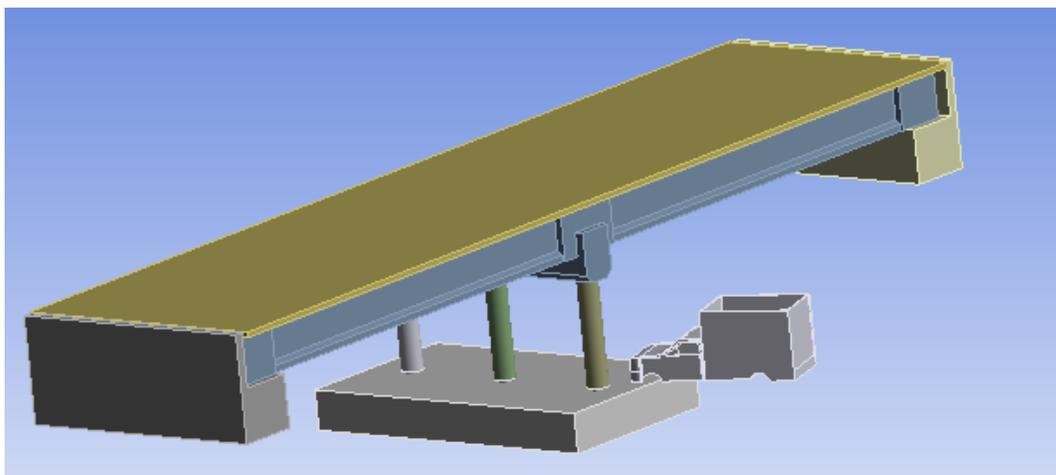
Al igual que con la tipología anterior, se somete a modelación la estructura del puente, en este caso soportada por el pórtico de tres columnas impactada por las mismas tipologías de camión, bajo las mismas velocidades.

Ilustración 70 Pila de tipo pórtico de tres columnas con vehículo liviano



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

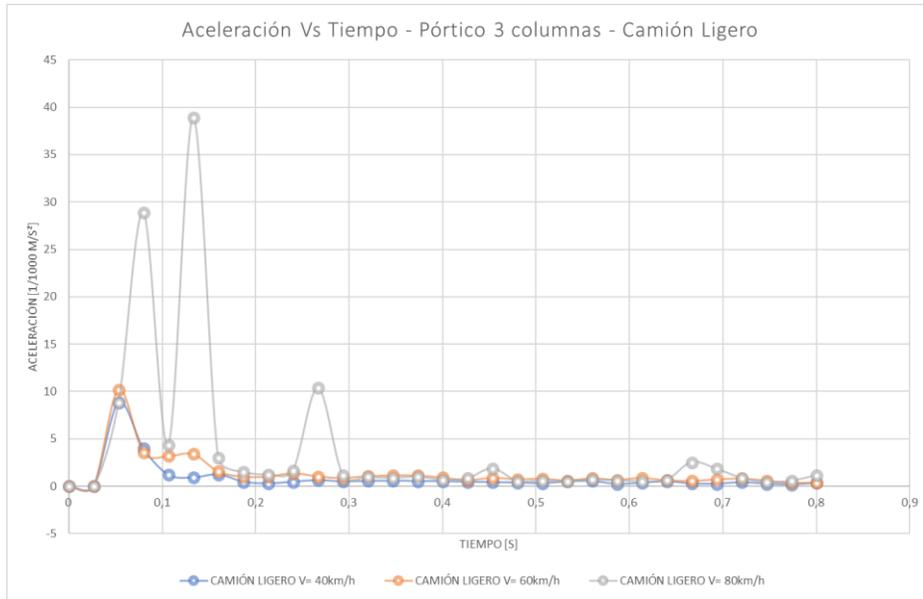
Ilustración 71 Pila de tipo pórtico de tres columnas con vehículo pesado



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

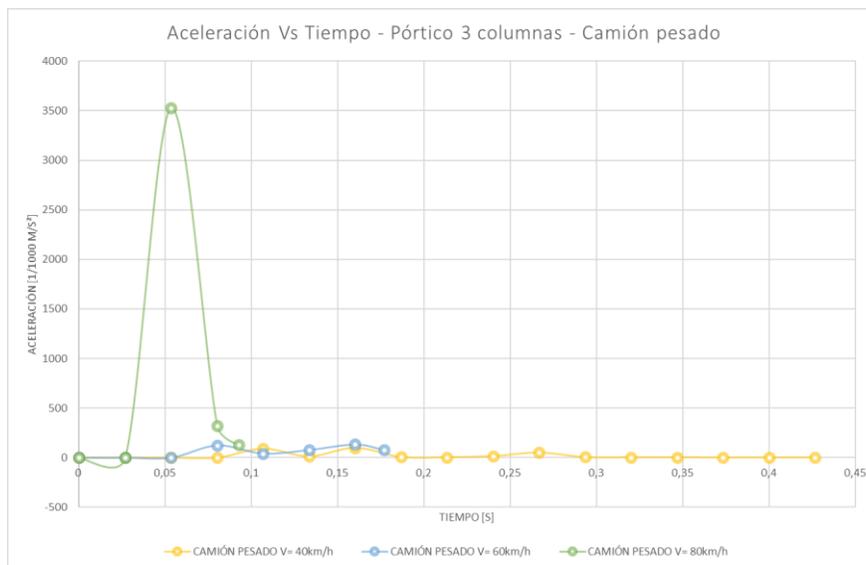
De esta modelación se obtienen gráficos de la aceleración de la estructura dada la carga aplicada, se muestran estos gráficos a continuación:

Gráfica 15 Gráfico de aceleración Vs tiempo – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 16 Gráfico de aceleración Vs tiempo – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Al igual que en el numeral 8.1 se toman los valores de aceleración y se calcula la fuerza generada en la estructura de acuerdo con la masa acelerada.

En los dos casos estudiados es notoria la respuesta por parte de esta tipología de apoyo a los impactos a 80 km/h, la diferencia entre las aceleraciones alcanzadas por la estructura ante impactos de esta magnitud con respecto a los otros casos de estudio marcan una diferencia en su magnitud evidente.

Para el cálculo de fuerzas, se replica el procedimiento realizado para la tipología anterior.

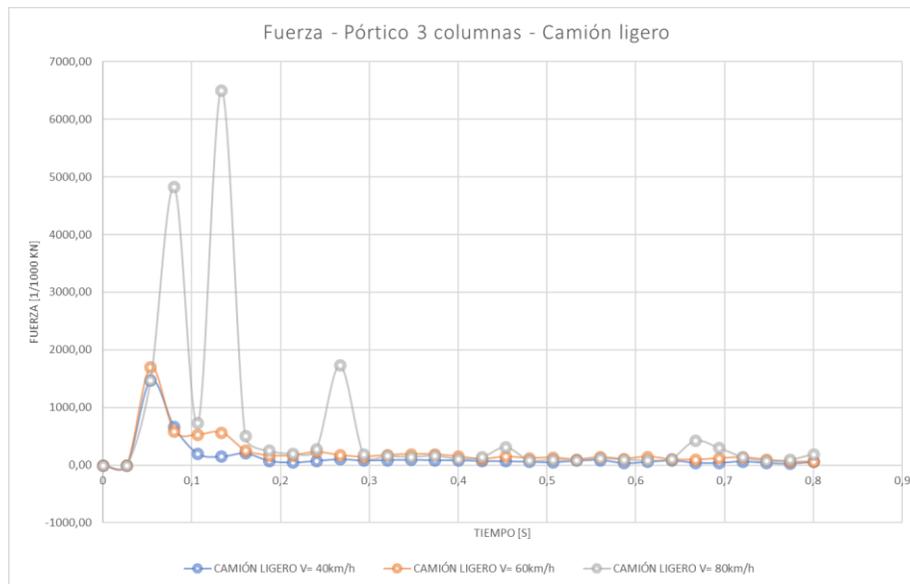
Tabla 4. Masa acelerada en el modelo de elementos finitos.

Avalúo de PP	Carga [kg]	Carga [kN]
Vigas	36009	353
Tablero	93290	915
Viga Cabezal	31556	310
Columnas/2	9538	94
Total	170393	1672

Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Con base en esto, se obtienen los gráficos de fuerza en la estructura.

Gráfica 17 Gráfico de Fuerza Vs tiempo – Camión ligero.

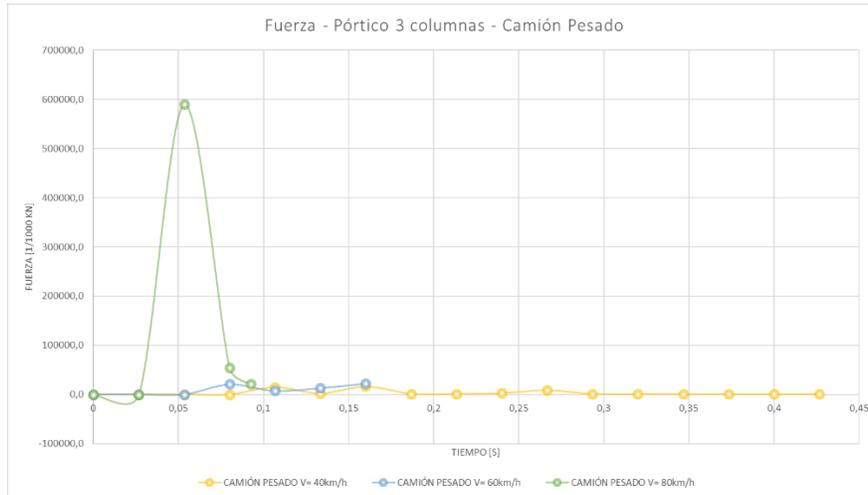


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En el caso del camión liviano, la máxima fuerza es generada en la estructura cuando este impacta a 80 km/h, además, se identifican tres picos de impacto en la curva obtenida para esta velocidad, esto puede evidenciar un efecto de amplificación dinámica que obedece el mecanismo de falla desarrollado por la estructura luego del impacto. Por otro lado, las fuerzas obtenidas para las velocidades de 40 km/h y 60 km/h tienen magnitudes muy

próximas que, aunque son de grandes magnitudes (del orden de los 1500 MN) no son representativas al compararlos con la magnitud de la respuesta obtenida para 80 km/h (del orden de los 6500 MN).

Gráfica 18 Gráfico de fuerza vs tiempo – Camión pesado.

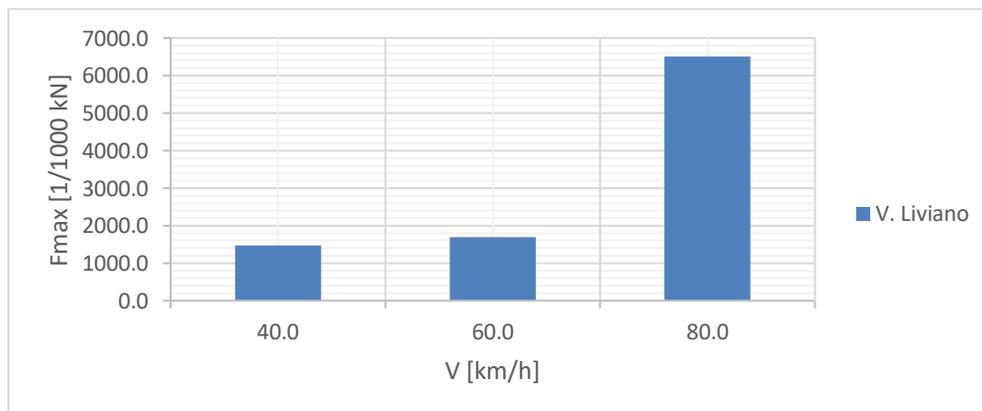


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Para este caso también se obtiene la máxima fuerza para el impacto a 80 km/h, sin embargo; la diferencia en magnitud en comparación con los otros dos casos es mucho más marcada. Con toda seguridad esto se debe a que a esta velocidad se genera la destrucción total de la columna impactada al igual que lo observado en el caso del pórtico de dos columnas.

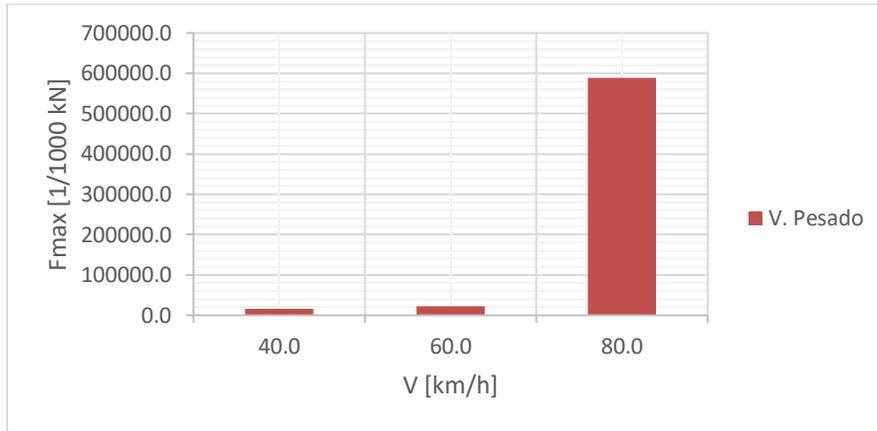
Si se extraen únicamente las fuerzas máximas de los gráficos anteriores, se obtiene:

Gráfica 19 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 20 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado.

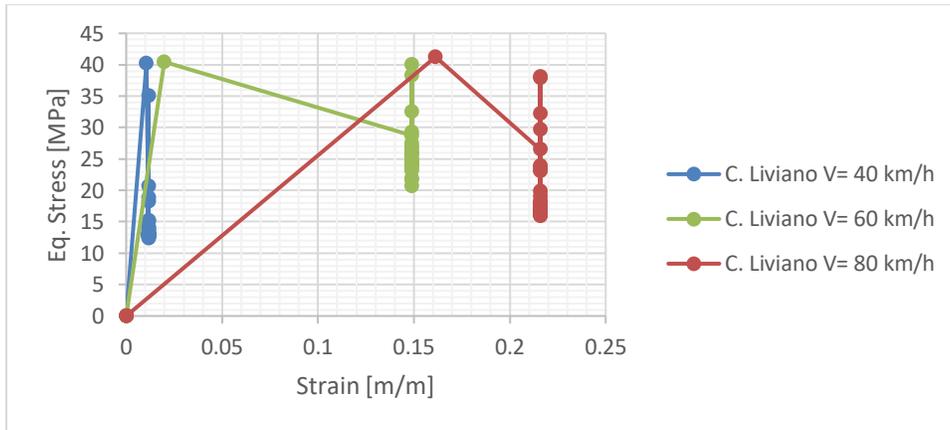


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

De los gráficos se observa que las máximas fuerzas obtenidas para los dos tipos de estructura se obtienen cuando se impactan vehículos a 80 km/h, sin embargo; este tipo de pórtico muestra una respuesta más agresiva en esta magnitud de velocidad si se compara con la tendencia de los datos obtenidos para las otras estructuras.

Si se concentra el análisis en el elemento columna que recibe todo el impacto, se pueden obtener curvas de esfuerzo – deformación:

Gráfica 21 Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión liviano.



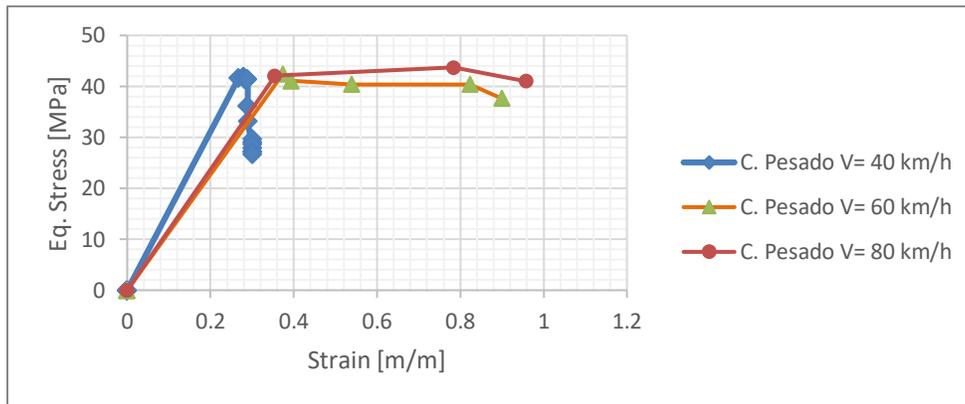
Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

De las curvas esfuerzo-deformación para el análisis con carga de vehículo liviano, se observa que para los tres impactos se alcanza un valor máximo de esfuerzo muy parecido entre sí, además, luego de cada valor máximo se observa una caída vertical del esfuerzo aplicado bajo un valor de deformación constante, es decir; la carga ya ha sido retirada de manera rápida y la máxima deformación alcanzada ya no es recuperable por la estructura,

por lo tanto; ha desarrollado una deformación permanente que, si se observa el fenómeno del mecanismo de falla se identificarán las rótulas plásticas formadas.

La tendencia de los datos indica que obedecen la teoría indicada por los modelos de confinamiento y, en este caso, a medida que aumenta la velocidad de impacto, la estructura reacciona más dúctilmente. Esto demuestra que, a baja velocidad de impacto, la mayor parte del esfuerzo es absorbida por el concreto y a medida que se aumenta la velocidad, la fracción de esfuerzo absorbida por el acero será mayor y de allí se refleja la ductilidad del elemento.

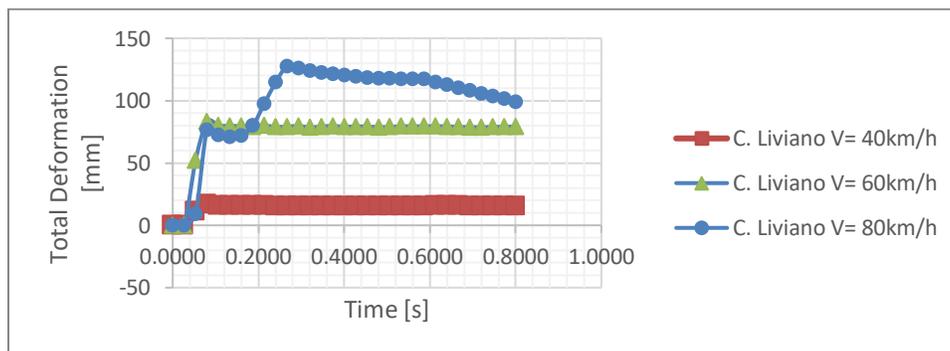
Gráfica 22 Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

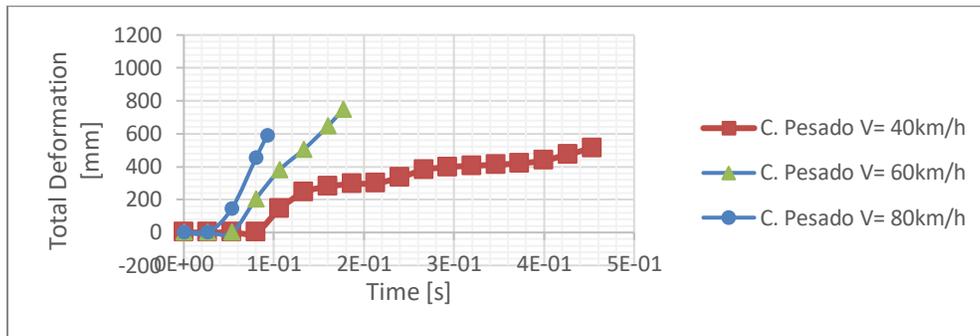
En el caso del camión pesado, los valores de esfuerzo alcanzados por la estructura son similares para las tres velocidades, sin embargo, la tendencia de las curvas obtenidas para los impactos a 60 km/h y 80 km/h guardan una mayor similitud con una curva esfuerzo-deformación del acero. La ductilidad presente en el comportamiento de la curva para los impactos a 60 km/h y 80 km/h indica que la matriz de concreto ya ha sido destruida y es solo el acero el que está deteniendo el avance del camión.

Gráfica 23 Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión Liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 24 Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión pesado.

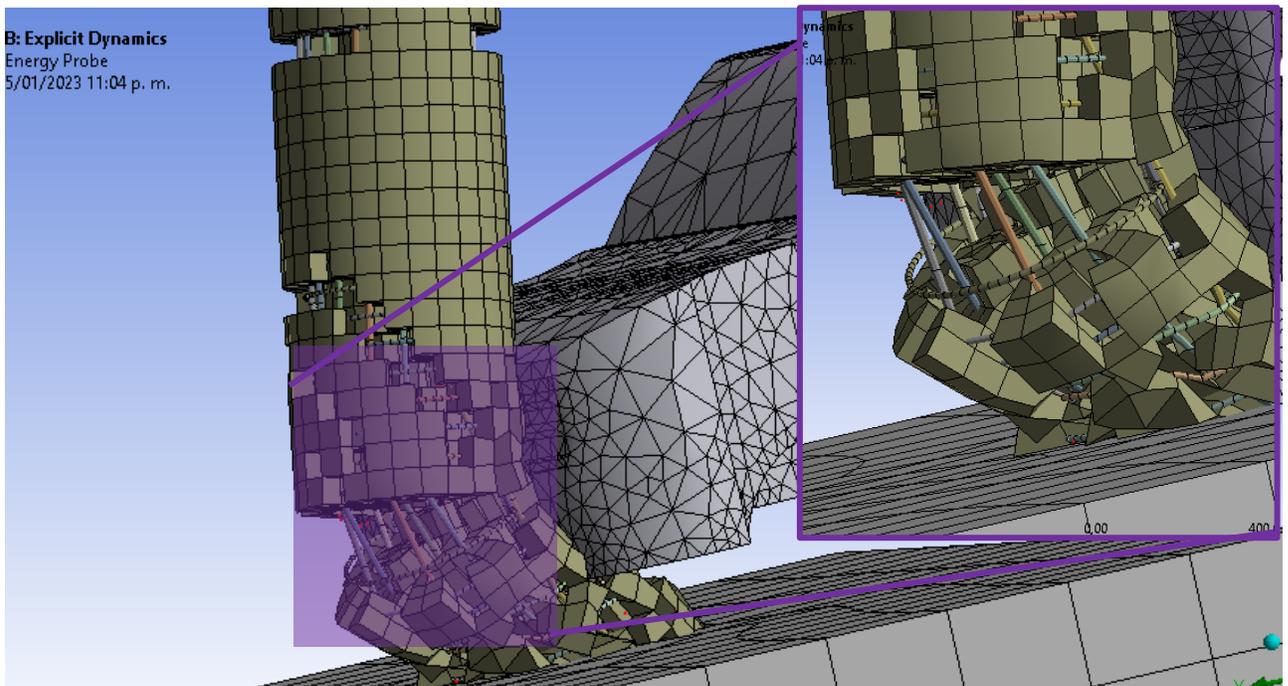


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En los gráficos de deformación contra tiempo se evidencia la respuesta inelástica de la estructura en todos los impactos. Una vez el vehículo tiene contacto con la estructura se produce un daño a la matriz de concreto, que induce una respuesta en deformación que supera el rango elástico del material. En el caso del camión liviano que impacta a 80 km/h se aprecia un segundo pico de deformación, esto muestra un efecto de amplificación en la estructura tal como se registra en los gráficos de aceleración obtenidos.

En el caso del camión pesado las deformaciones ocurren en un lapso muy corto y a medida la velocidad de impacto es mayor, se obtiene un menor número de datos debido que se alcanza la falla de la estructura.

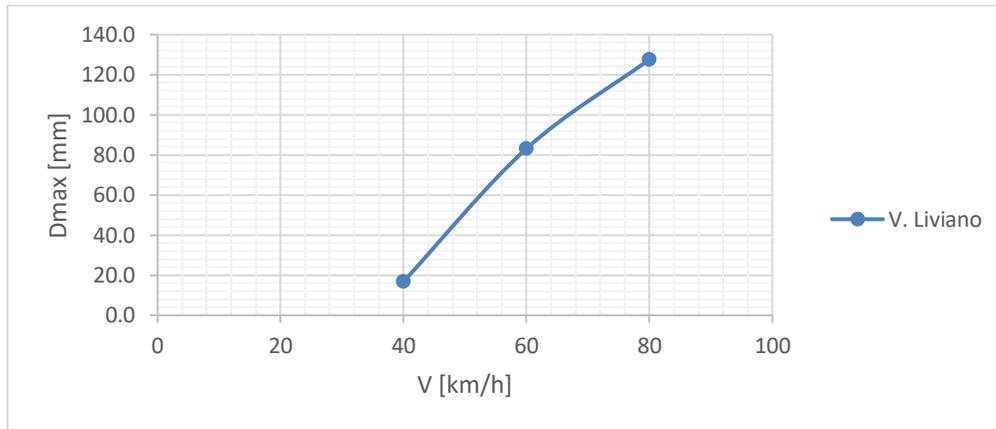
Ilustración 72 Daños en el elemento impactado – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

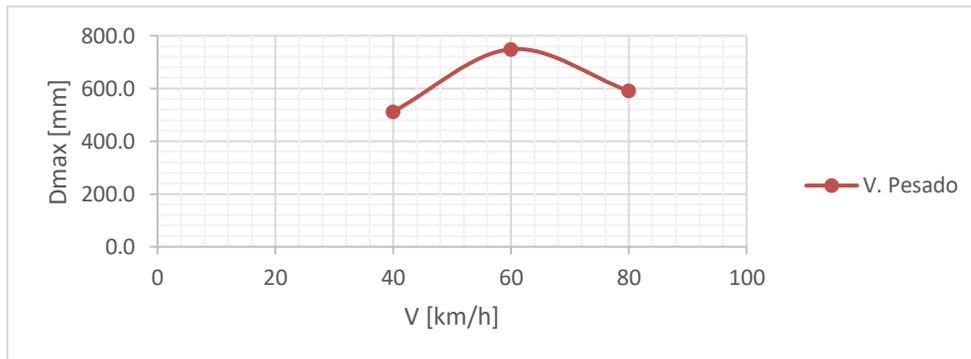
A continuación, se toman los valores máximos de deformación de cada uno de los casos estudiados y se colocan en un gráfico comparativo contra velocidad:

Gráfica 25 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

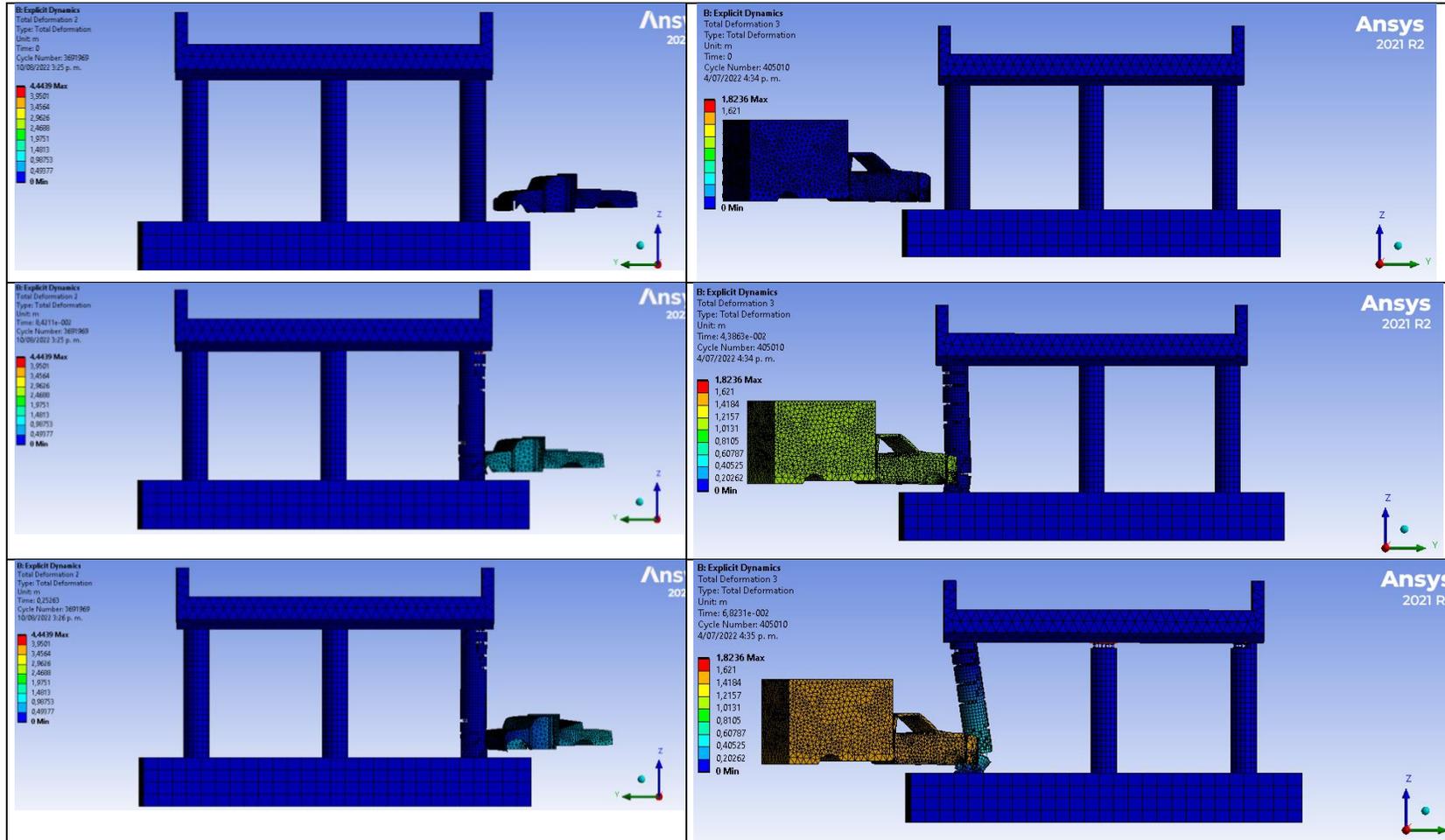
Gráfica 26 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado.

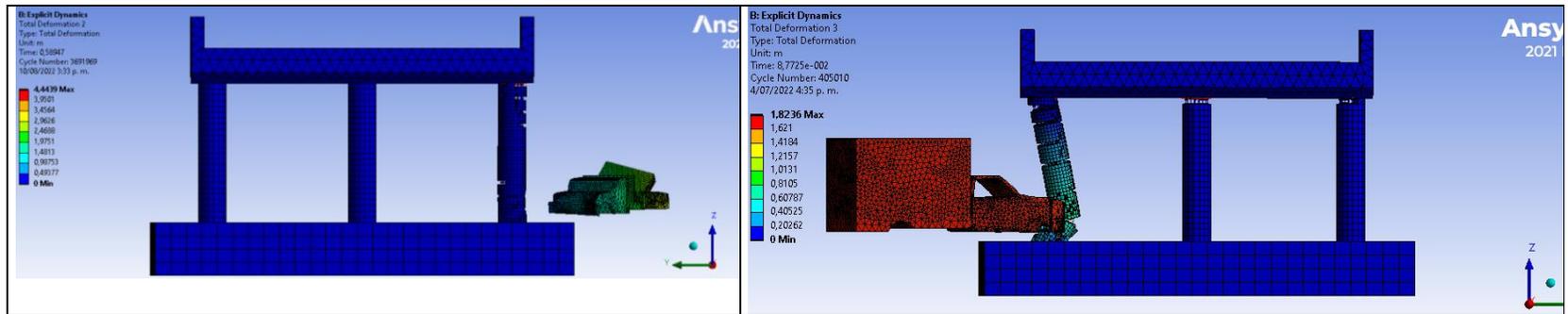


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

A continuación, se presentan los instantes transcurridos durante la secuencia de impacto para ambos casos de carga a la velocidad de 80 km/h.

Ilustración 73 Secuencia de impactos para V= 80 km/h



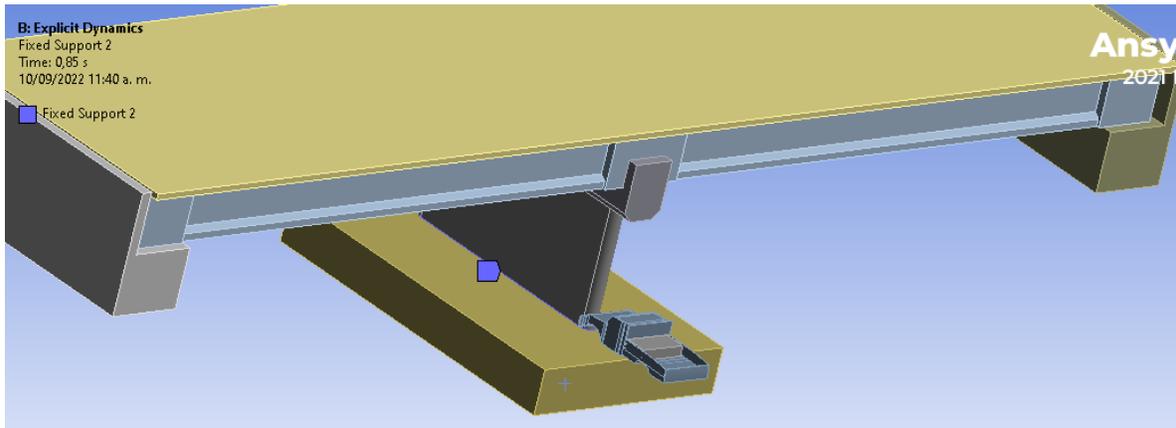


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

8.3. Pila tipo muro

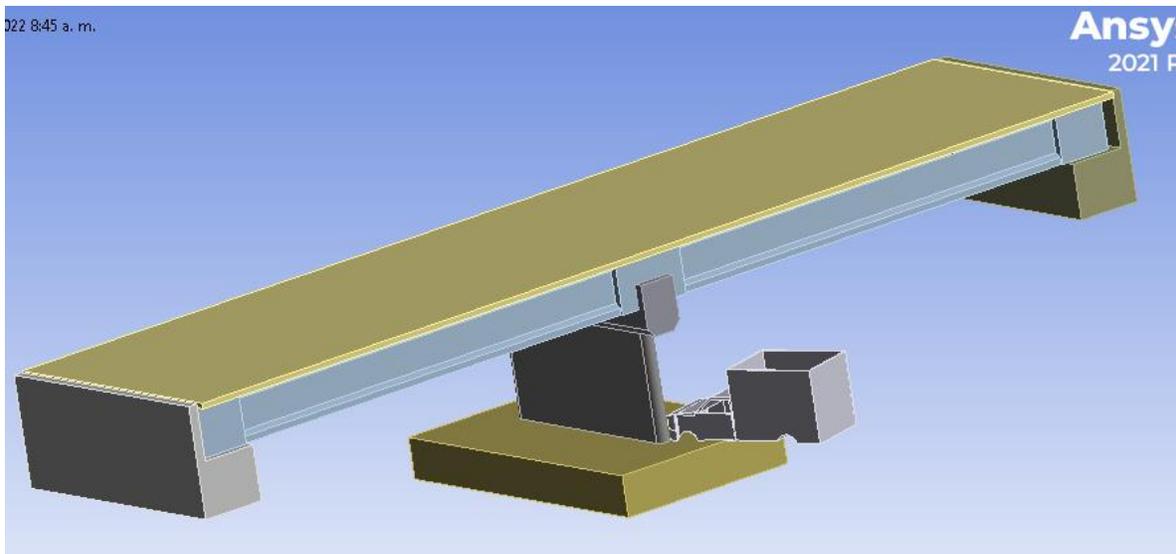
Al igual que con la tipología anterior, se somete a modelación la estructura del puente, en este caso soportada por un muro en concreto reforzado, impactada por las mismas tipologías de camión, bajo las mismas velocidades.

Ilustración 74 Pila de tipo muro con vehículo liviano



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

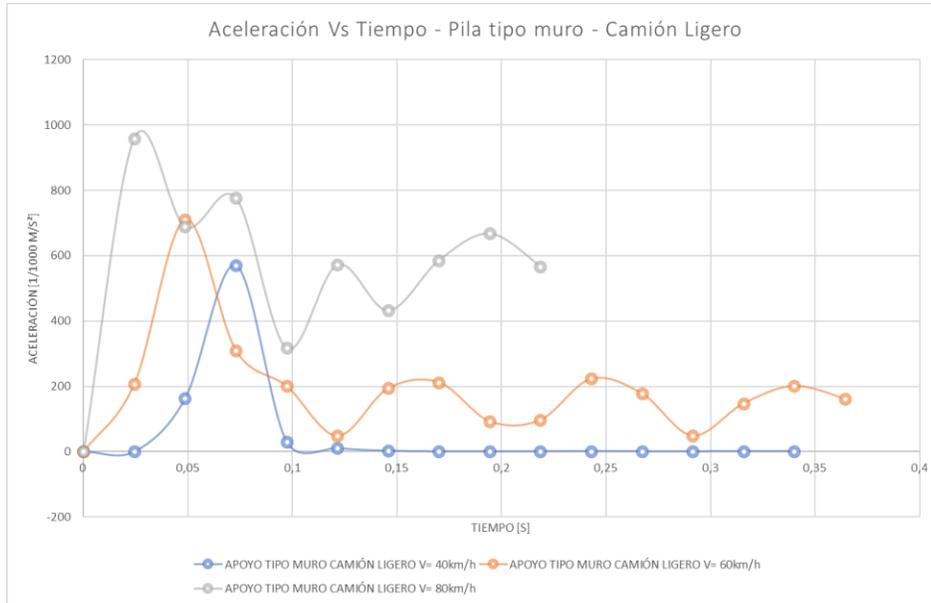
Ilustración 75 Pila de tipo muro con vehículo pesado



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

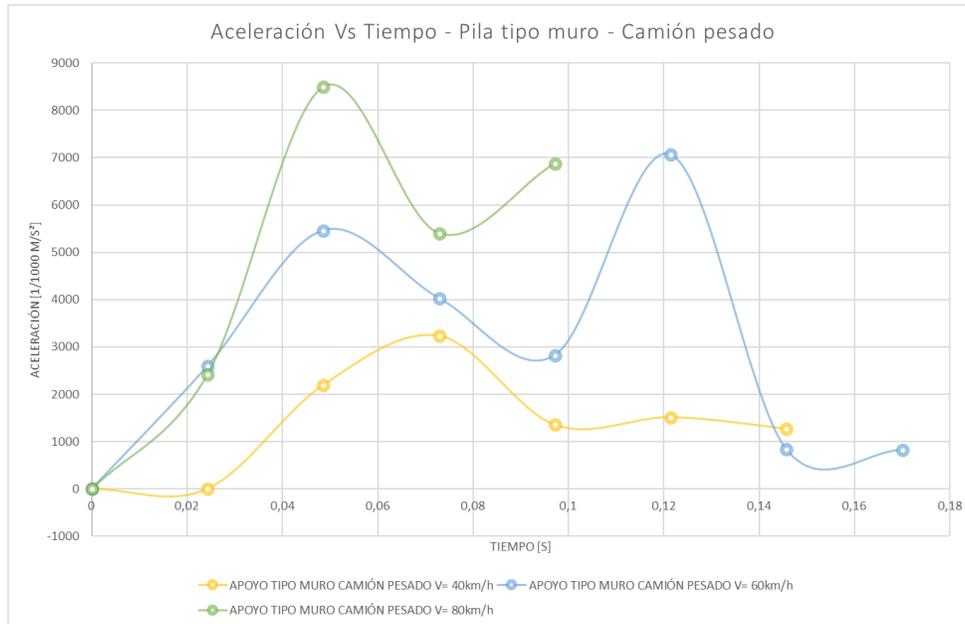
De esta modelación se obtienen gráficos de la aceleración de la estructura dada la carga aplicada, se muestran estos gráficos a continuación:

Gráfica 27 Gráfico de aceleración vs tiempo – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 28 Gráfico de aceleración vs tiempo – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En este caso se aprecia que la respuesta de la estructura, en términos de aceleración, es proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada, es decir; la estructura se ve sometida a una aceleración mayor cuando el vehículo impacta a 80 km/h y a una menor cuando impacta a 40 km/h. Bajo el mismo criterio empleado para las tipologías anteriores, se calcula la fuerza generada en la estructura conociendo su masa.

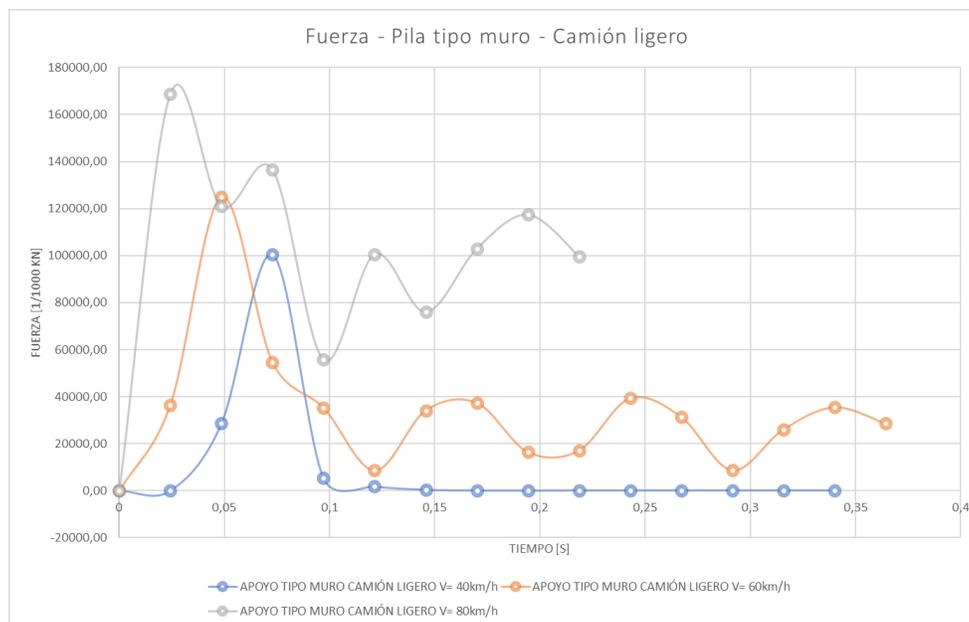
Tabla 5. Masa acelerada en el modelo de elementos finitos.

<i>Avalúo de PP</i>	<i>Carga [kg]</i>	<i>Carga [kN]</i>
Vigas	36009	353
Tablero	93290	915
Viga Cabezal	31556	310
Columnas/2	18383	180
Total	179238	1758

Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Con base en esto, se obtienen los gráficos de fuerza en la estructura.

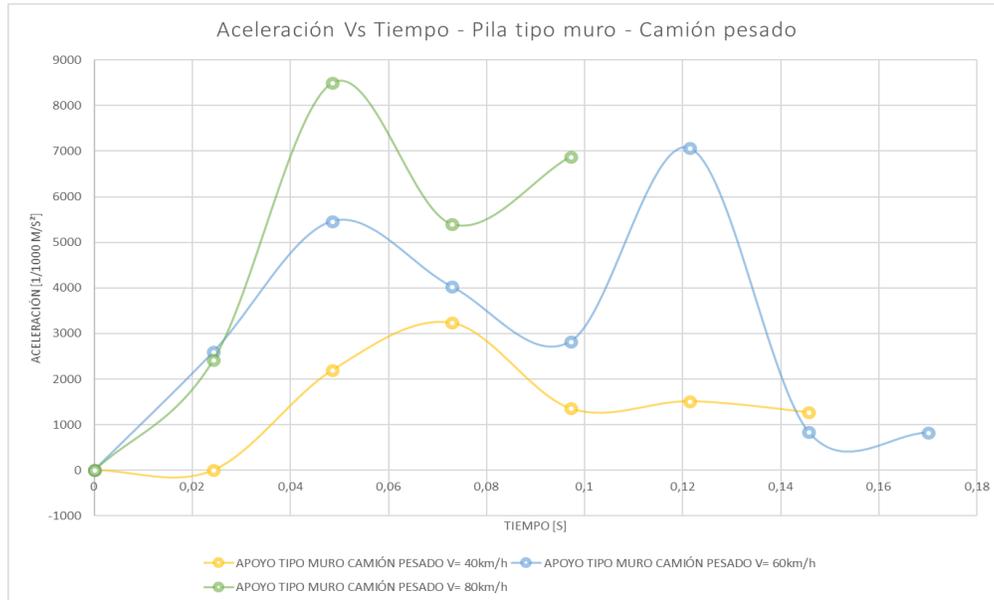
Gráfica 29 Gráfico de fuerza vs tiempo – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En el caso del camión liviano, la máxima fuerza es generada en la estructura cuando este impacta a 80 km/h, sin embargo; la menor fuerza con la que responde la estructura al impacto es generada para 40 km/h.

Gráfica 30 Gráfico de fuerza vs tiempo – Camión pesado.

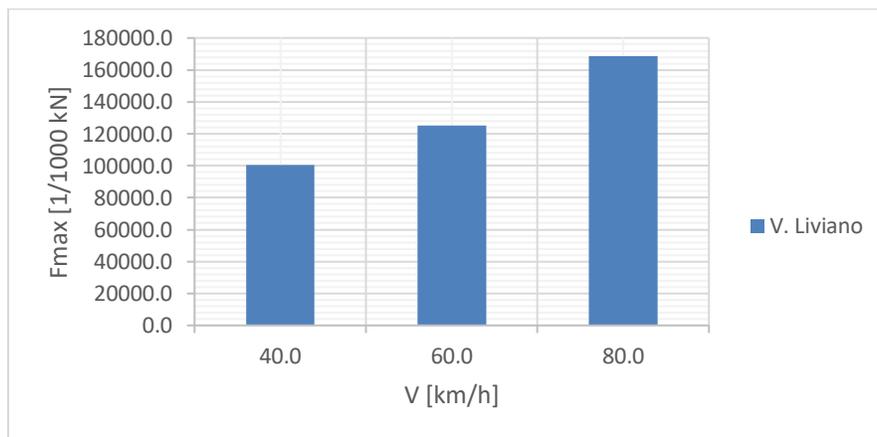


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En el caso en que la estructura es impactada por el camión pesado, la máxima fuerza generada en la estructura ocurre cuando el camión impacta a 80 km/h y la mínima fuerza cuando transita a 40 km/h.

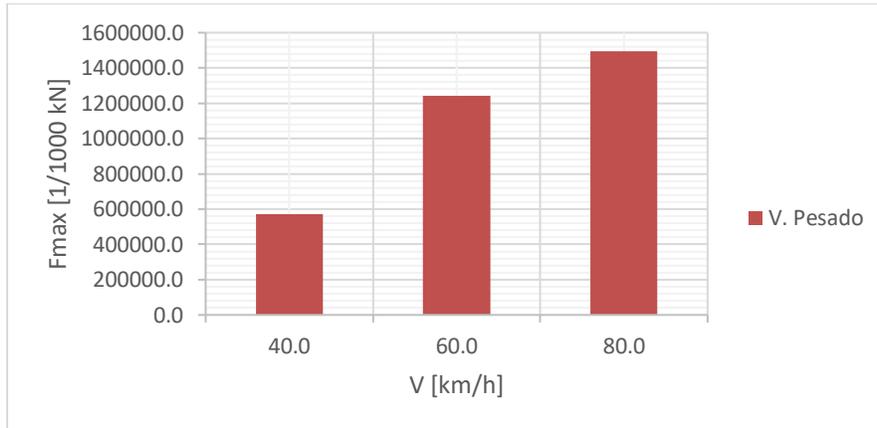
Si se extraen únicamente las fuerzas máximas de los gráficos anteriores, se obtiene:

Gráfica 31 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 32 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado.

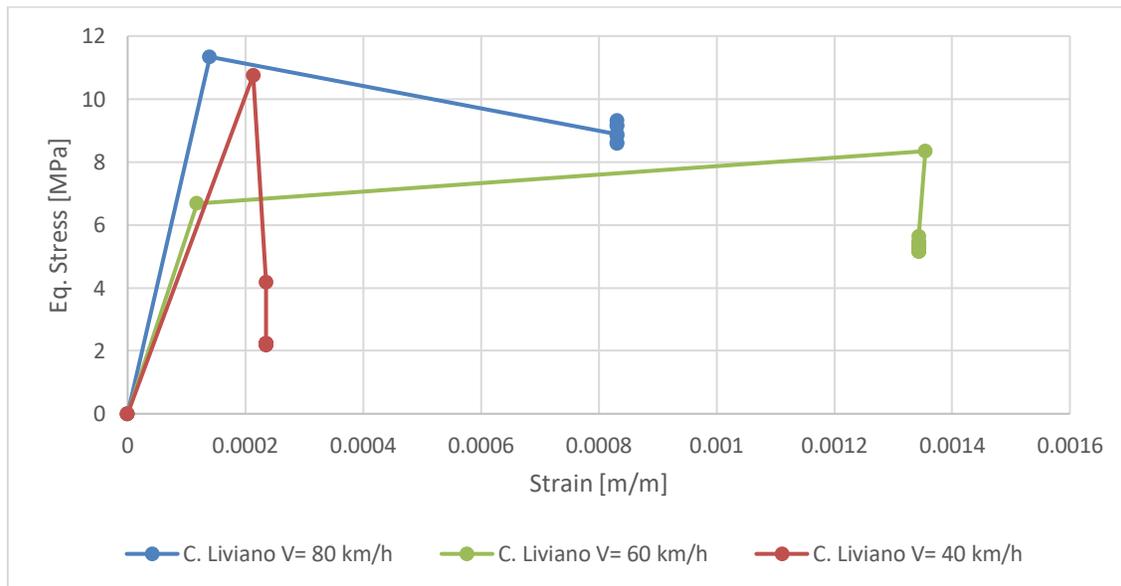


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

De los gráficos se observa que, para las dos cargas de impacto, la fuerza máxima como respuesta de la estructura, obtenida en cada modelación, es proporcional a la fuerza inducida por el vehículo de acuerdo con la velocidad a la que impacta, entonces; se observa que, a mayor velocidad, la respuesta de la estructura será mayor.

Si se concentra el análisis en el elemento columna que recibe todo el impacto, se pueden obtener curvas de esfuerzo – deformación:

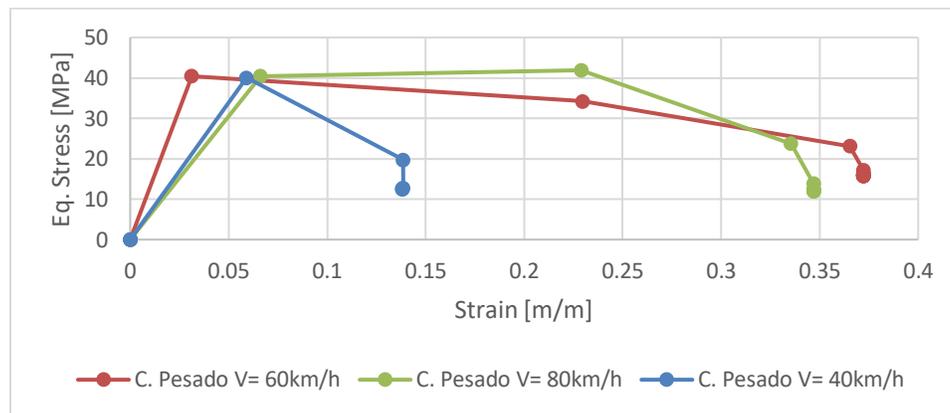
Gráfica 33 Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

De las curvas esfuerzo-deformación para el análisis con carga de vehículo liviano, se observa en la magnitud del esfuerzo que esta carga no es suficiente para llevar a la estructura al rango inelástico, a pesar de ello, si se aprecia un leve nivel de deformación permanente en la estructura, esto seguramente es debido al daño instantáneo generado por el impacto en el volumen no confinado de concreto. El rompimiento de la matriz externa de concreto es evidenciado en las imágenes secuenciales del impacto las cuales se presentan al final de este numeral. En este ítem también se evidencia un mayor nivel de deformación o “daño” en la estructura para la carga de impacto a 60 km/h.

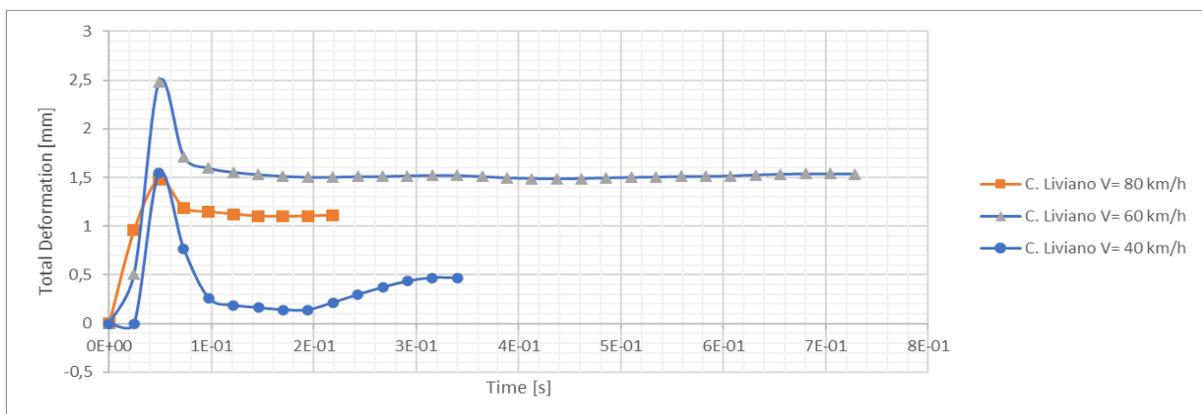
Gráfica 34 Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

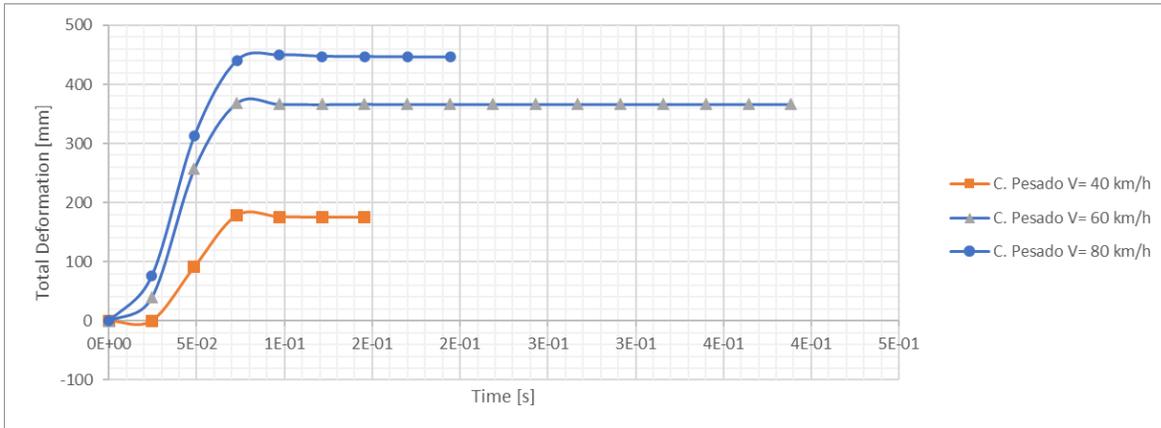
Desde los resultados obtenidos para la carga inducida por el camión pesado, se observa que para los 3 impactos los valores de esfuerzo son mayores a f'_c y que las deformaciones obtenidas como respuesta de la estructura son representativas a pesar de la rigidez del muro, la tendencia de los datos obedece al comportamiento teórico indicado por los modelos de confinamiento y, además; ante las tres velocidades la estructura se comporta de manera dúctil.

Gráfica 35 Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión Liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 36 Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión pesado.

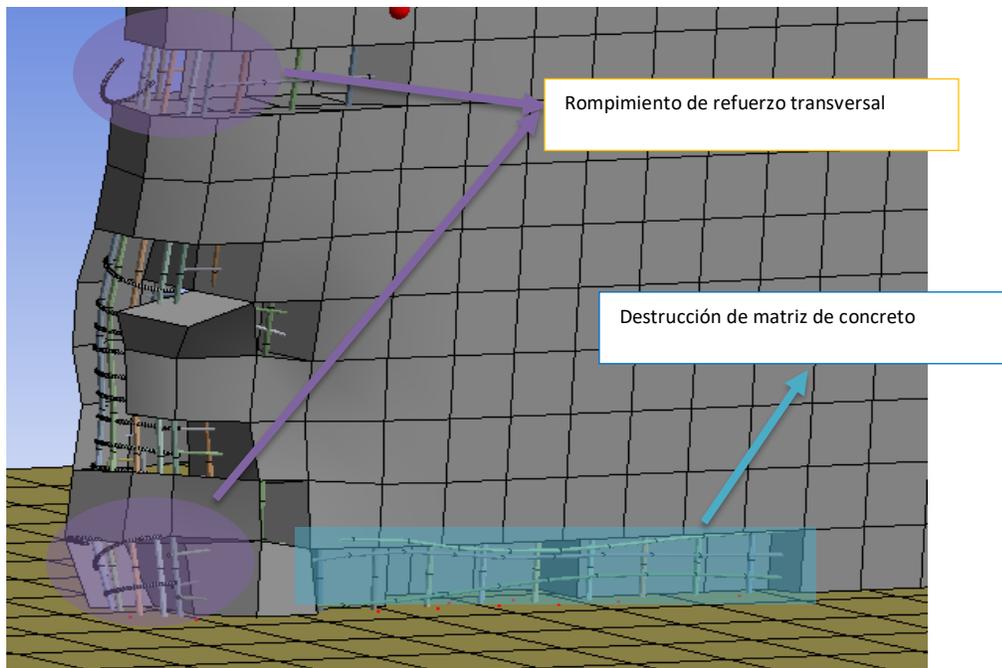
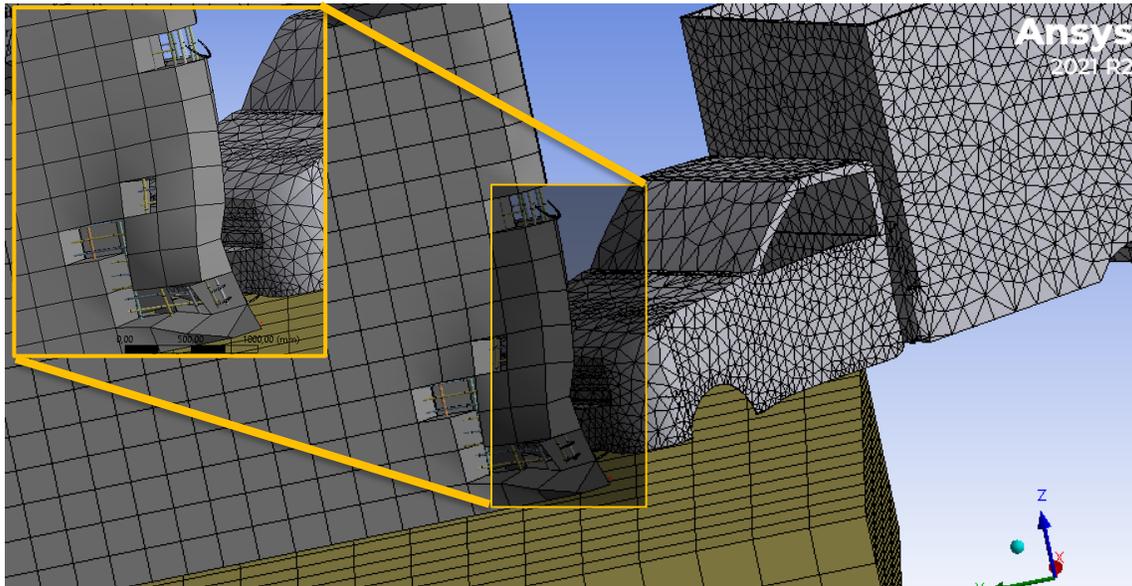


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En cuanto a las deformaciones, para el caso del vehículo liviano, este tipo de pila no es susceptible en términos de respuesta de la estructura a un impacto con estas características, si bien pueden ocurrir situaciones en un marco real que ocasionen daños mucho mayores, bajo las condiciones de estudio y parámetros bien definidos, la estructura es perfectamente capaz de resistir un impacto de categoría “menor” por lo menos en el rango de velocidades utilizado en este estudio. Las deformaciones observadas son de bajo impacto para la estructura pues obedecen el orden de magnitud de un máximo alcanzado de 2.5 mm, sin embargo; se observa que la estructura es más susceptible al impacto vehicular a 60 km/h.

En el caso del vehículo pesado se observa una afectación importante, las deformaciones obtenidas en la estructura son del orden de los 18 cm aproximadamente para el caso de impacto a 40 km/h, sin que haya una recuperación en estas deformaciones. A partir de este punto las condiciones siguen siendo desfavorables para la estructura en función de la velocidad, alcanzando un máximo de deformación de 45 cm aproximadamente para el impacto a 80 km/h. Parte de este desplazamiento guarda relación con el futuro desarrollo de un mecanismo de falla en el apoyo del puente debido que el avance del vehículo no es detenido por competo por la estructura. Se ilustran los daños a continuación:

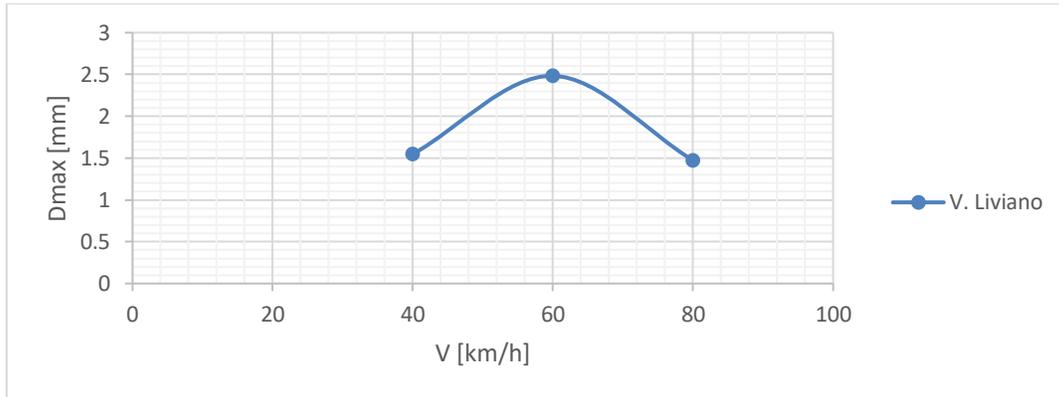
Ilustración 76 Fenómeno de impacto en el apoyo tipo muro – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

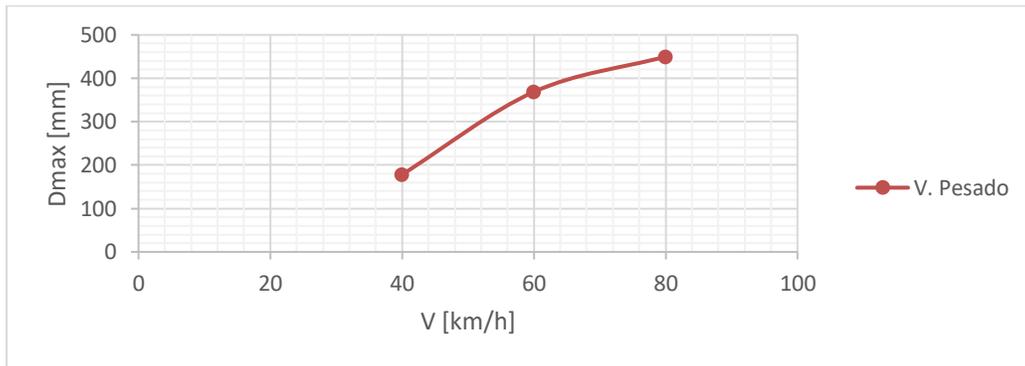
A continuación, se toman los valores máximos de deformación de cada uno de los casos estudiados y se colocan en un gráfico comparativo contra velocidad:

Gráfica 37 Gráfico de Desplazamiento máximo Vs velocidad – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 38 Gráfico de Desplazamiento máximo Vs velocidad – Camión pesado.

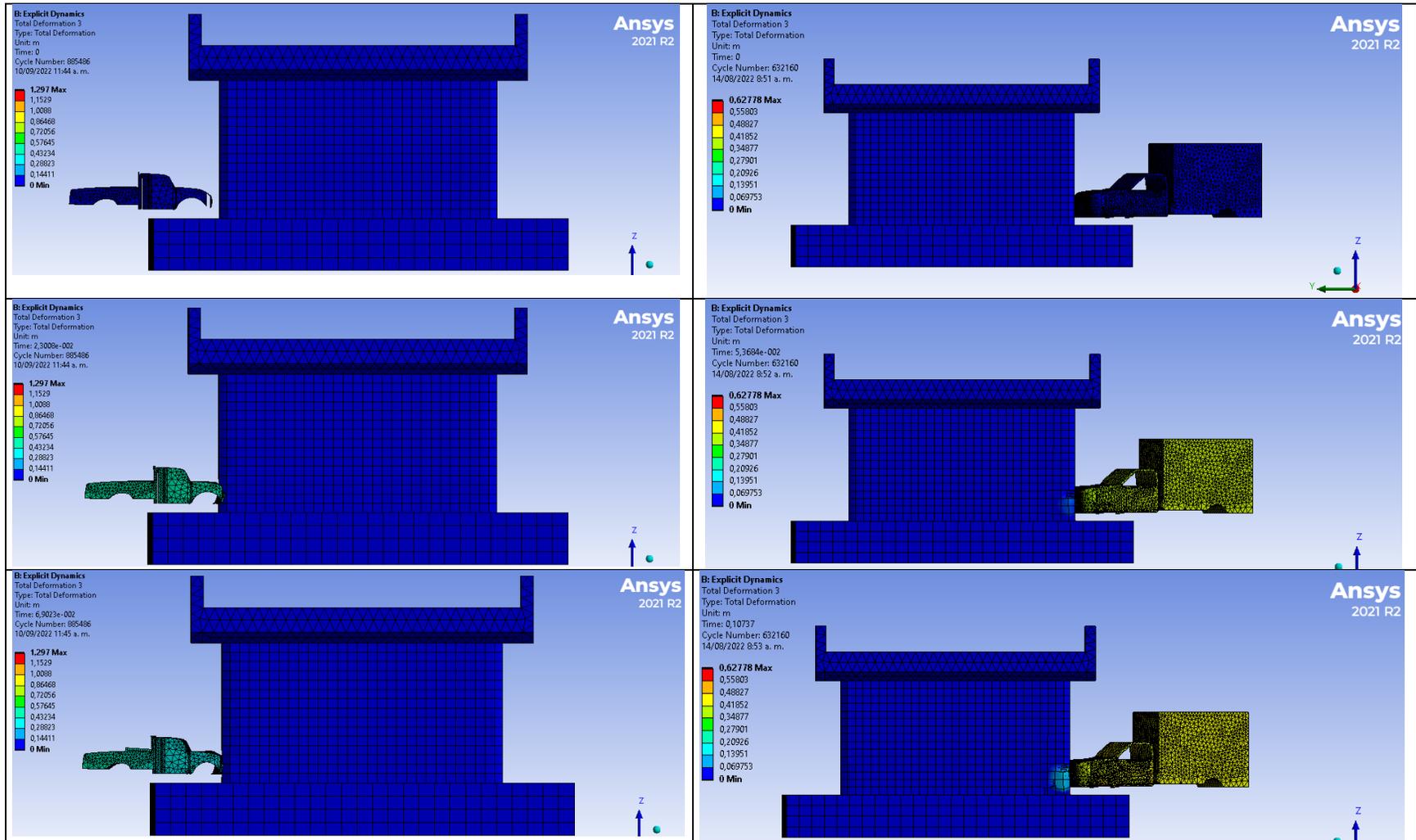


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Las deformaciones máximas se presentan para el caso del camión pesado cuando este impacta a 80 km/h, y para el camión liviano cuando el impacto ocurre a 60 km/h, particularmente en este caso, las deformaciones máximas que ocurren en los impactos a 40 km/h y 80 km/h son bastante próximos, sin embargo; el efecto importante a estas velocidades se ve reflejado en el gráfico de deformación contra tiempo, donde la deformación obtenida a 40 km/h es recuperada en un gran porcentaje y la obtenida a 80 km/h no.

A continuación, se presentan los instantes transcurridos durante la secuencia de impacto para ambos casos de carga a la velocidad de 80 km/h.

Ilustración 77 Secuencia de impactos para V= 80 km/h



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

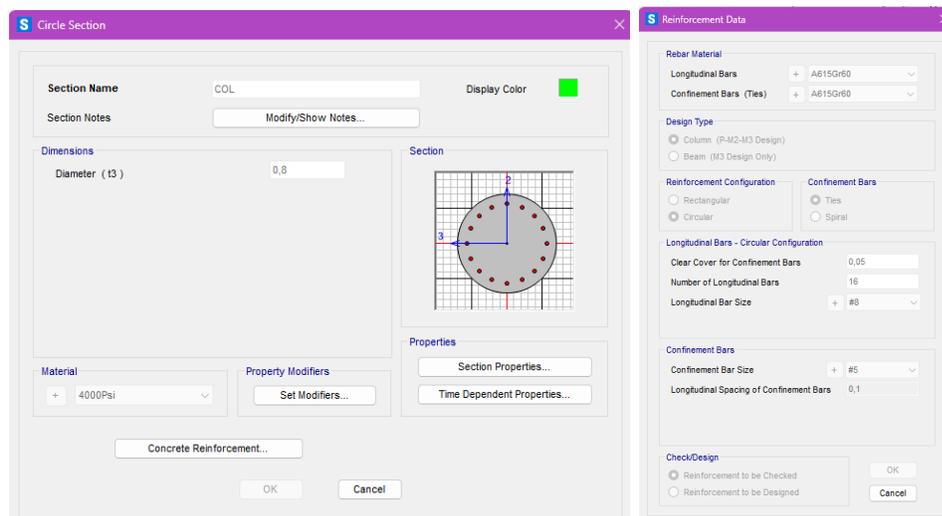
9. ANÁLISIS DE RESILIENCIA

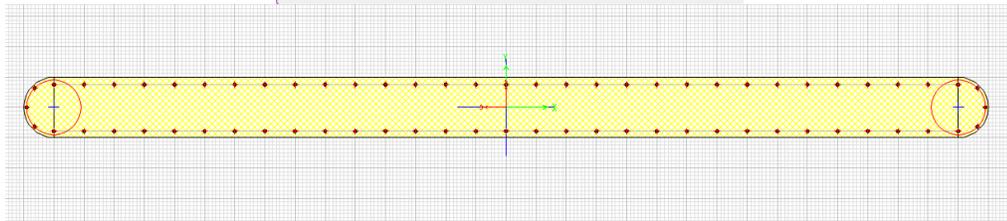
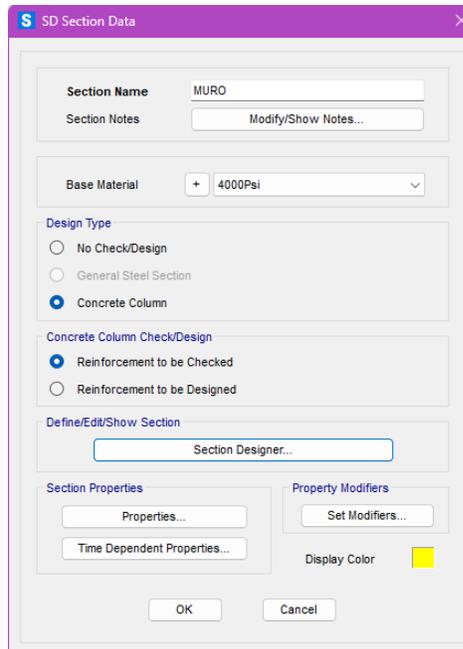
De acuerdo con los resultados obtenidos, se analiza la resiliencia de la estructura a partir del siguiente procedimiento:

1. Se determina la rigidez para cada uno de los sistemas a partir de un cálculo analítico apoyado en un modelo estructural en el software SAP2000 sobre el cual se definen los elementos estructurales con las mismas características que en el modelo ANSYS, se aplica una carga unitaria y a partir del desplazamiento obtenido para la carga unitaria se utiliza la ley de Hooke ($F = k \cdot x$) para el cálculo de la rigidez. A partir de la rigidez obtenida mediante el procedimiento descrito, se toman los resultados extraídos de los modelos para comparar la rigidez residual del sistema con respecto a su rigidez inicial. Este último procedimiento se ejecuta a partir de las curvas esfuerzo – deformación, obtenidas del modelo ANSYS. Se calcula el módulo de elasticidad a partir de los datos obtenidos, en función de este módulo se calcula la inercia residual del elemento impactado y se calcula el porcentaje de inercia restante para incluirlo en los modelos SAP2000 y determinar la rigidez residual.
2. Se compara la teoría de los modelos de confinamiento, con los resultados obtenidos en cuanto a las curvas esfuerzo – deformación.
3. Se calcula el área bajo la curva esfuerzo – deformación en su rango elástico tanto para el modelo de confinamiento como para las curvas obtenidas a partir del modelo de elementos finitos, para medir la energía por unidad de volumen generada por el impacto, y compararla con la esperada de acuerdo con el modelo de Mander y definir en cuales casos esta es superada y en cuales no, esto permitirá determinar el grado de vulnerabilidad sobre el cual la estructura está expuesta ante las cargas estudiadas. Cabe resaltar que el área bajo la curva esfuerzo – deformación dentro de su rango elástico corresponde al Módulo de resiliencia.

Según el procedimiento descrito, se inicia el análisis con lo indicado en el ítem 1.

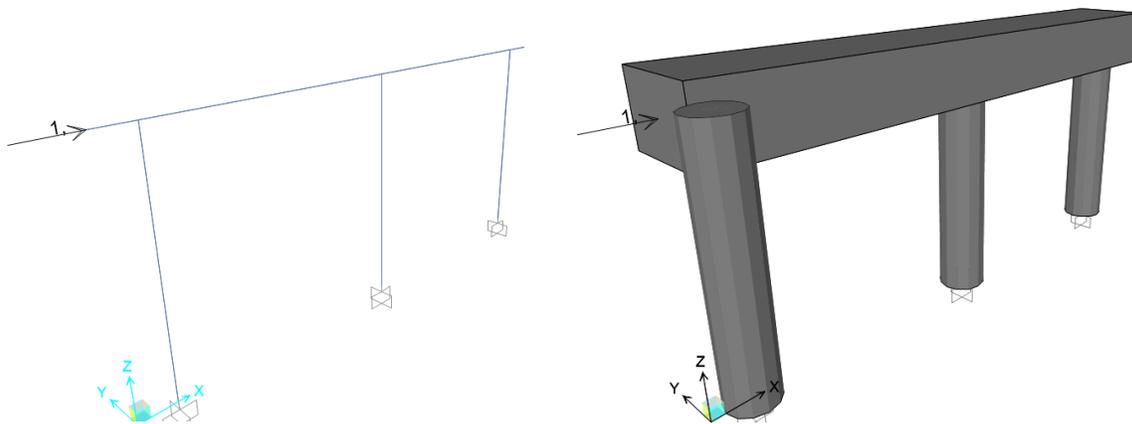
Ilustración 78 Definición de elementos de apoyo en modelo de contraste.

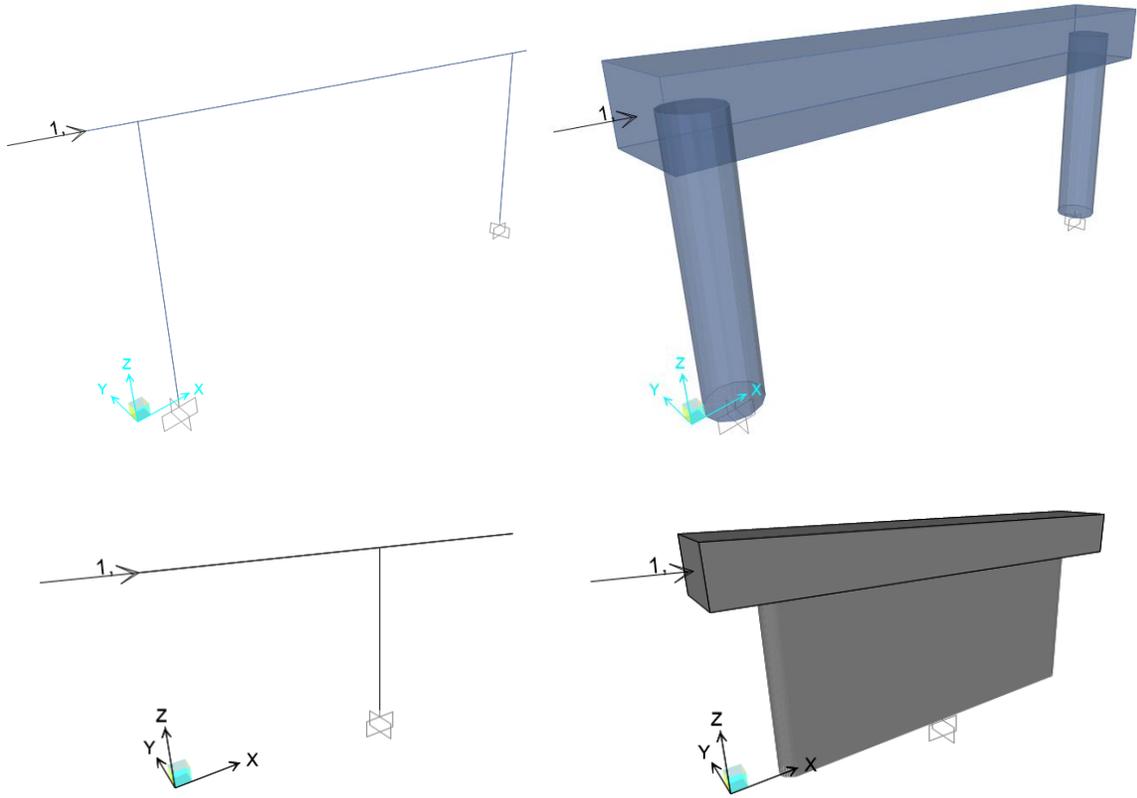




Fuente: Elaboración propia – SAP2000

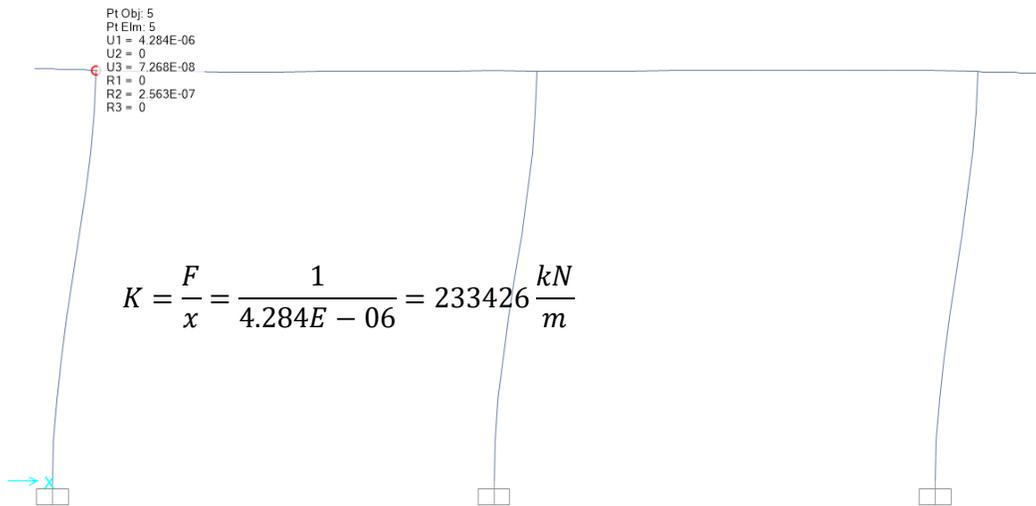
Ilustración 79 Aplicación de carga unitaria a los modelos estructurales de contraste

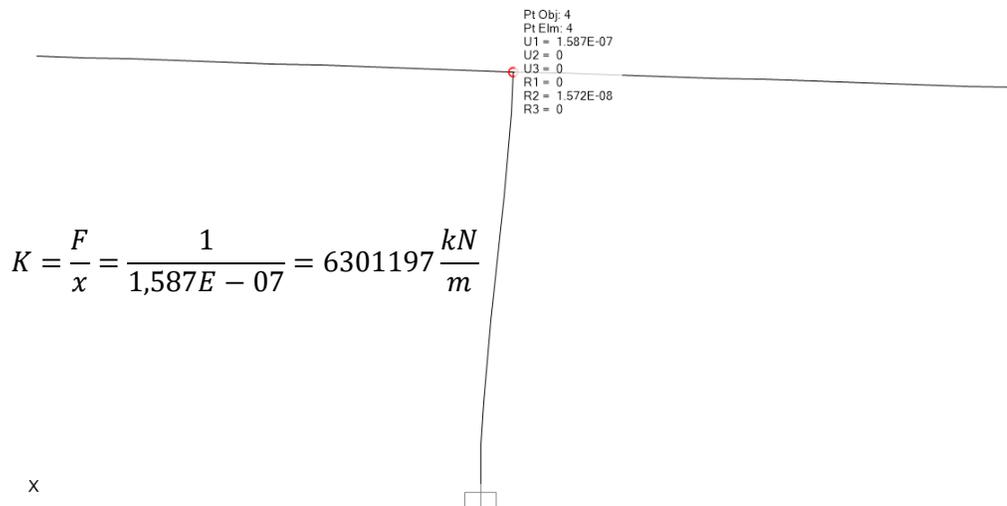
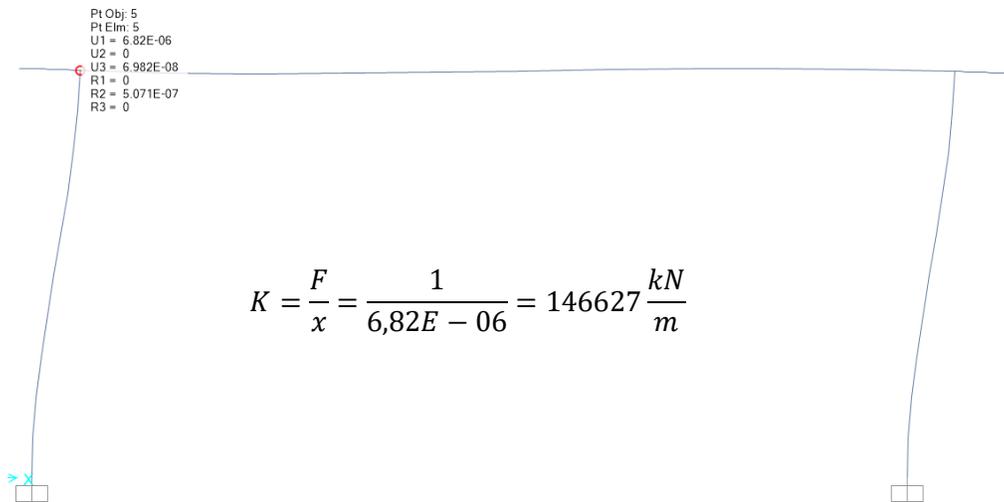




Fuente: Elaboración propia – SAP2000

Ilustración 80 Aplicación de carga unitaria a los modelos estructurales de contraste





Fuente: Elaboración propia – SAP2000

En función de los resultados obtenidos en los modelos ANSYS, se escogen los puntos en el tiempo donde se presentan las fuerzas máximas en el elemento impactado para cada uno de los modelos, luego; a partir de la deformación obtenida en dicho punto y su respectivo esfuerzo, se calcula el módulo de elasticidad secante, el cual permite aproximar el valor del módulo de elasticidad real de la estructura en el instante de tiempo estudiado. En muchos de los instantes estudiados se ha fracturado y/o ha fallado el elemento impactado.

A partir de esto, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6. Cálculo de inercias para modelo de Pórtico de 3 columnas.

PÓRTICO 3 COLUMNAS							
Camión Liviano							
40 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,05	11,05	0,01	40,19	1475,72	3849,70	12372141402	62%
60 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,13	79,72	0,15	29,24	566,82	196,27	1789386999	9%
80 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,19	79,90	0,22	29,72	254,04	137,69	1138051693	6%
Camión Pesado							
40 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,13	244,37	0,28	41,90	2182,05	150,26	957518126,9	5%
60 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,11	381,98	0,39	41,09	6999,63	104,22	1812559986	9%
80 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,09	590,63	0,96	41,03	21354,11	42,80	5631414494	28%

Nota: En el caso del impacto a 80 km/h el modelo finaliza antes de lo esperado debido la falla total del elemento, se toma un valor de 0 como %I

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Cálculo de inercias para modelo de Pórtico de 2 columnas.

PÓRTICO 2 COLUMNAS							
Camión Liviano							
40 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,08	28,02	0,07	22,41	884,65	328,15	13519024181	67%
60 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,08	50,86	0,13	34,04	608,18	265,51	3486444934	17%
80 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,19	116,36	0,22	31,94	289,03	148,00	567938531,3	2,82%

Camión Pesado							
40 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,16	437,38	0,39	41,49	6728,45	105,11	1317610712	6,55%
60 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,08	298,58	0,55	42,45	1628,92	76,54	939982444,2	4,68%
80 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	20106192983	
0,08	599,03	0,65	41,76	6334,93	64,58	1076370312	5,35%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Cálculo de inercias para modelo de apoyo tipo Muro.

MURO							
Camión Liviano							
40 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	2,048E+13	
0,12	0,19	0,00	2,23	1839,38	9474,02	2,148E+13	105%
60 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	2,048E+13	
0,24	1,51	0,00	5,25	39288,01	3905,62	1,737E+13	84,8%
80 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	2,048E+13	
0,10	1,15	0,00	8,59	55754,72	10342,94	1,608E+13	78,5%
Camión Pesado							
40 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	2,048E+13	
0,07	178,23	0,14	19,73	569415,90	142,41	1,026E+13	50,11%
60 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	2,048E+13	
0,05	256,98	0,23	34,27	960432,16	149,29	1,145E+13	55,92%
80 km/h							
T [s]	δ [mm]	ϵ	σ [MPa]	F [kN]	E [MPa]	I [mm ²]	%I
0,00				0,00	24870,06	2,048E+13	
0,19	446,34	0,35	12,50	356482,8	36,03	1,014E+13	49,51%

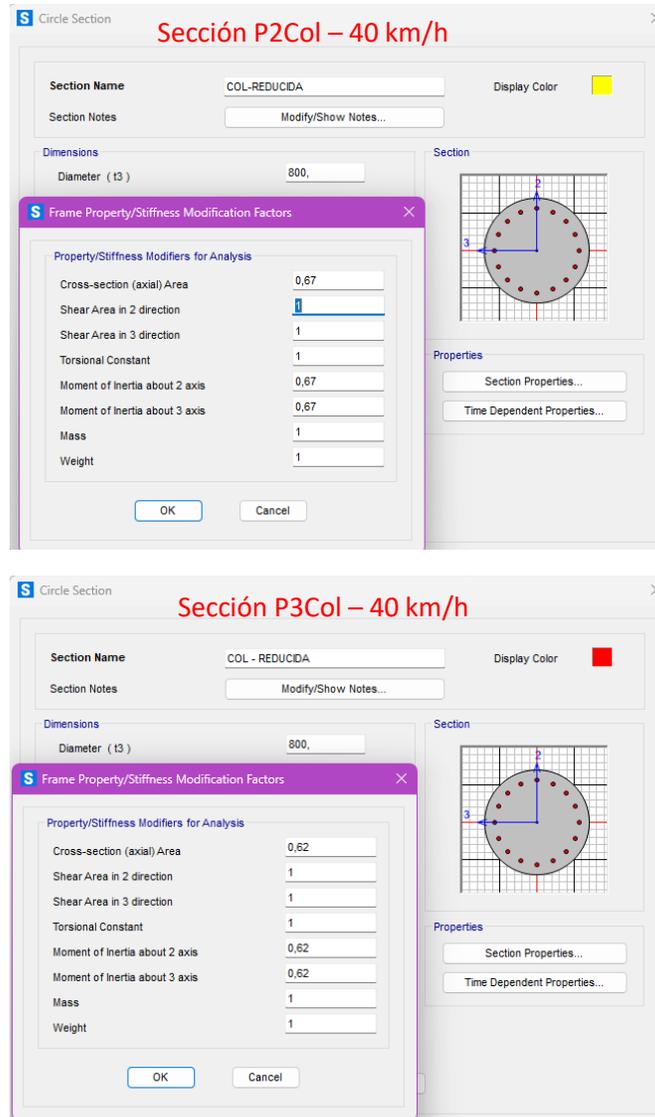
Fuente: Elaboración propia

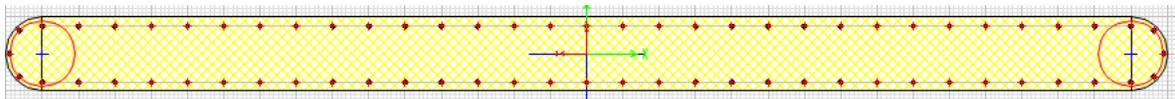
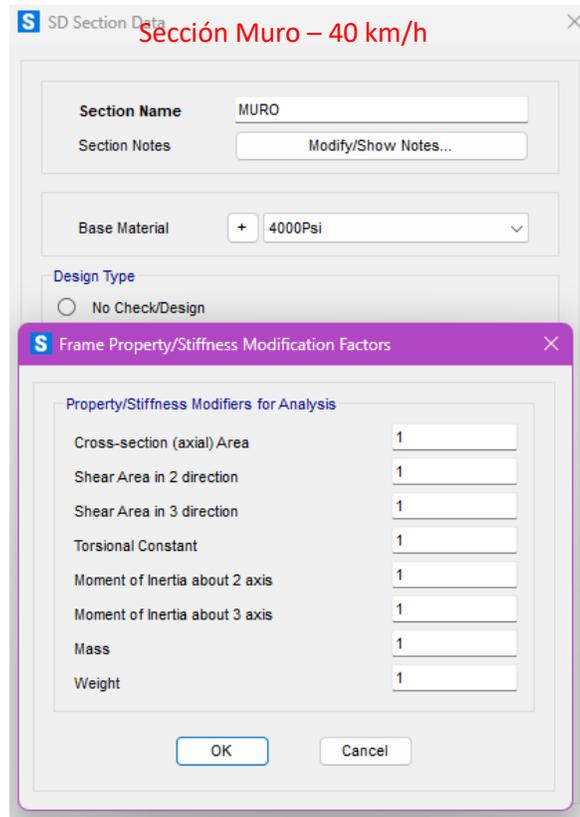
Se ingresan los porcentajes de inercia residual calculados en los modelos SAP, en el caso de los porcentajes menores a 10%, los factores asignados a la sección toman un valor de cero. A continuación, se repite el procedimiento ejecutado para calcular las rigideces de las estructuras con las nuevas inercias en el elemento afectado. Con estos valores se obtiene

un valor comparativo de Rigidez final en la estructura para evaluar la pérdida de este parámetro y con ello determinar la resiliencia de la estructura.

Dada la cantidad de modelos en SAP2000 por validar a partir de los resultados, se muestra el procedimiento solo con uno de los casos en cada modelo y al final se mostrará el comparativo de los resultados obtenidos.

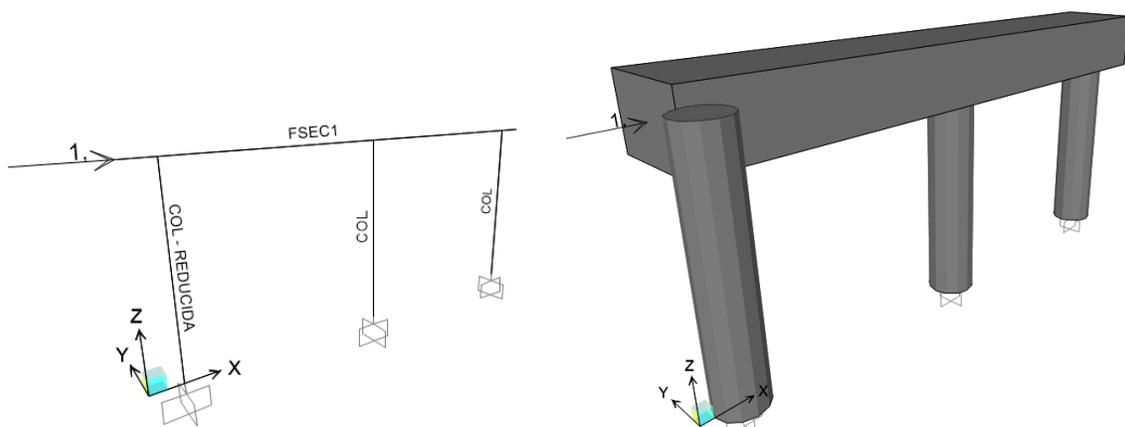
Ilustración 81 Definición de elementos de apoyo en modelo de contraste con inercias reducidas.

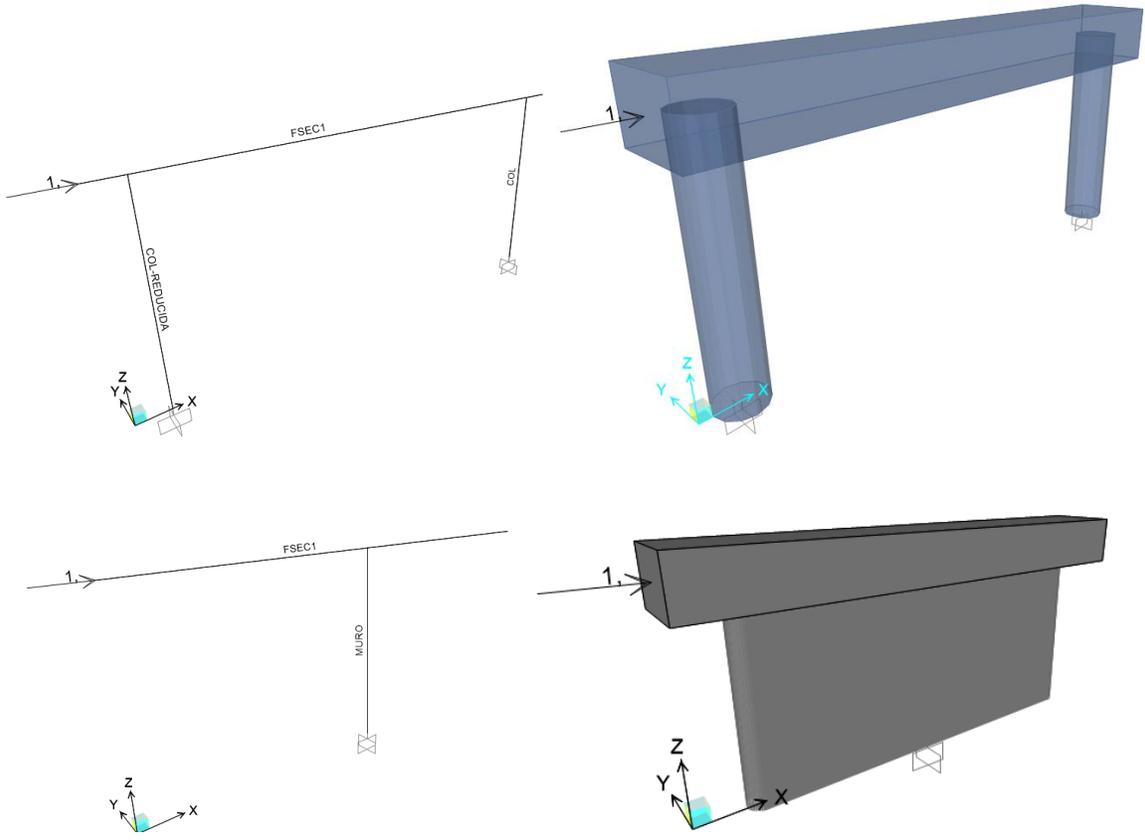




Fuente: Elaboración propia

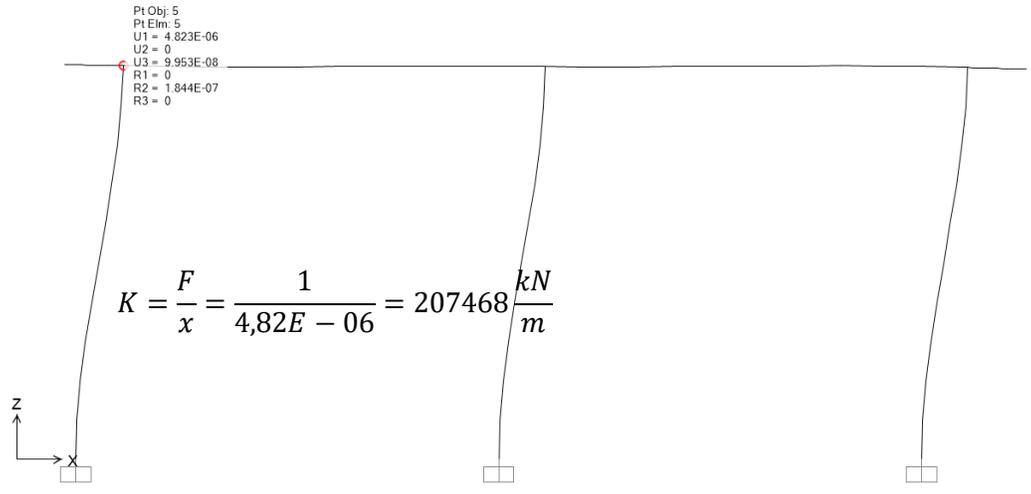
Ilustración 82 Aplicación de carga unitaria a los modelos estructurales de contraste – Inercias reducidas

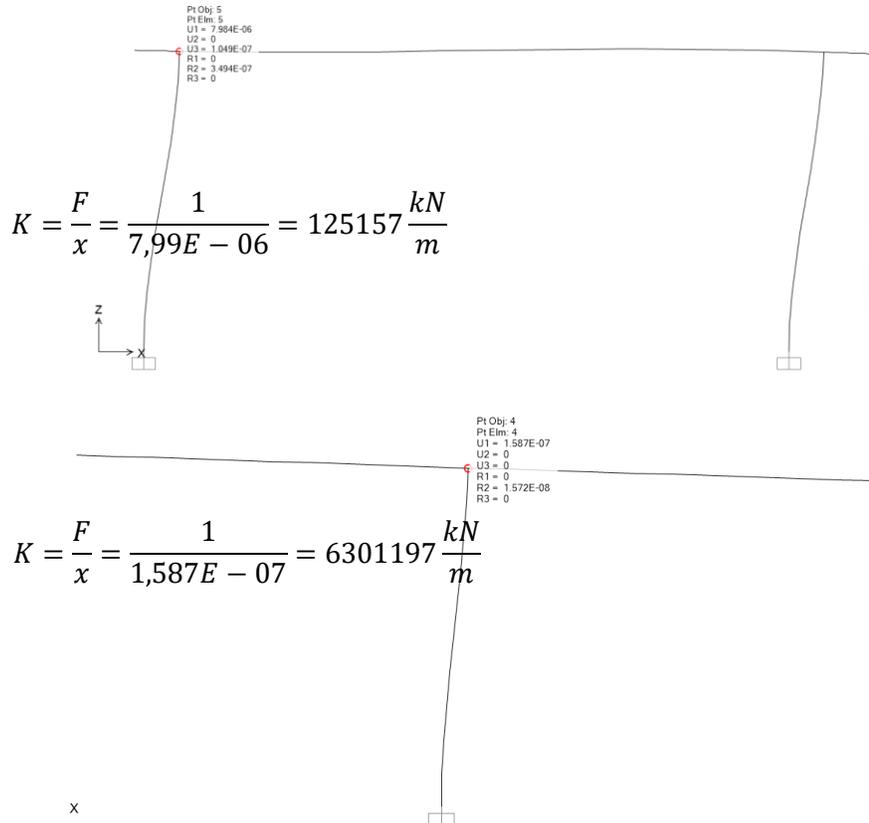




Fuente: Elaboración propia – SAP2000

Ilustración 83 Aplicación de carga unitaria a los modelos estructurales de contraste – Inercias reducidas





Fuente: Elaboración propia – SAP2000

Este procedimiento se repite con todos los valores de inercia obtenidos a partir el módulo de elasticidad secante. Los valores de rigidez se comparan en la siguiente tabla:

Tabla 9. Cálculo de rigidez residual en estructuras.

CAMIÓN LIVIANO					
ESTRUCTURA	V [km/h]	Ko [kN/m]	Kf [kN/m]	%K	%Perdida K
Pórtico 3 Columnas	40	233426	207468	88,9%	11,1%
	60		162601	69,7%	30,3%
	80		151194	64,8%	35,2%
Pórtico 2 Columnas	40	146627	125157	85,4%	14,6%
	60		82644	56,4%	43,6%
	80		22826	15,6%	84,4%
Apoyo tipo muro	40	6301197	6301197	100,0%	0,0%
	60		6024096	95,6%	4,4%
	80		5882352	93,4%	6,6%

CAMIÓN PESADO					
ESTRUCTURA	V [km/h]	Ko [kN/m]	Kf [kN/m]	%K	%Perdida K
Pórtico 3 Columnas	40	233426	151194	64,8%	35,2%
	60		151194	64,8%	35,2%
	80		151194	64,8%	35,2%
Pórtico 2 Columnas	40	146627	22826	15,6%	84,4%
	60		22826	15,6%	84,4%
	80		22826	15,6%	84,4%
Apoyo tipo muro	40	6301197	4987531	79,2%	20,8%
	60		5213764	82,7%	17,3%
	80		4962779	78,8%	21,2%

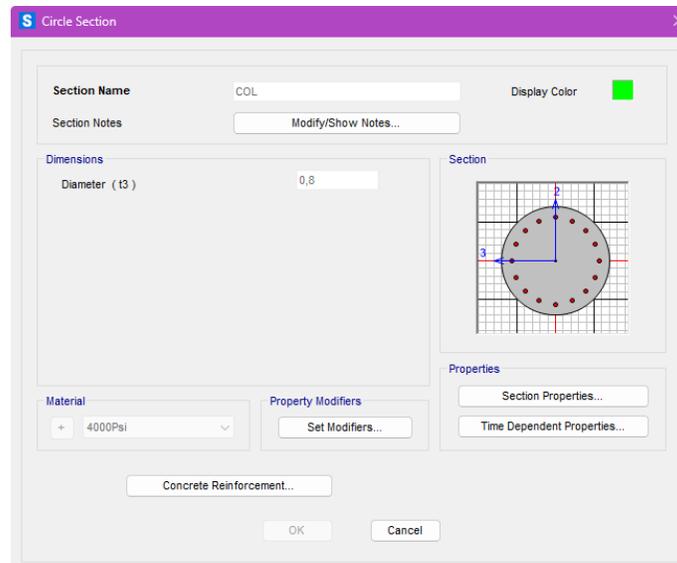
Modelos con Inercia cero en elemento

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos presentados en la tabla anterior; se resumen en el capítulo 10 con gráficos:

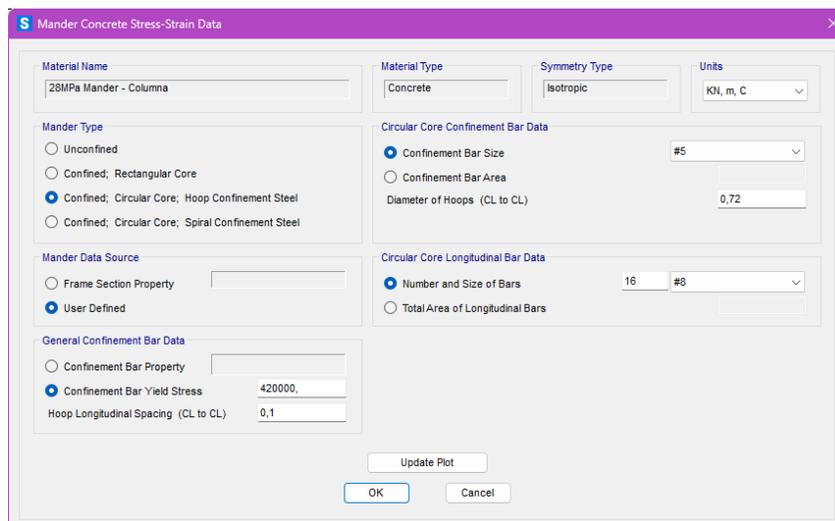
A continuación, se aborda lo descrito en el ítem 2 y, con base en los modelos SAP generados, se crean las curvas de concreto confinado según la teoría de Mander, descrita en el numeral 6.6.1 del presente documento.

Ilustración 84 Sección de columna circular



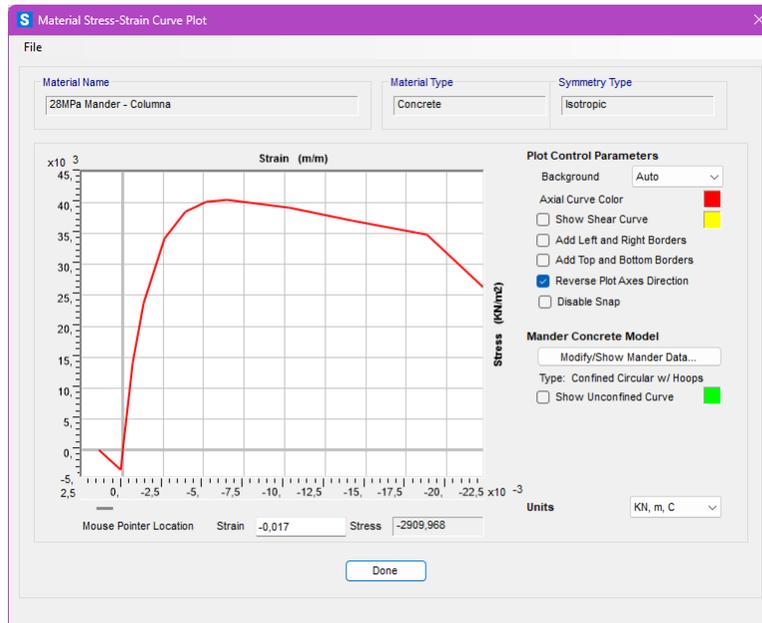
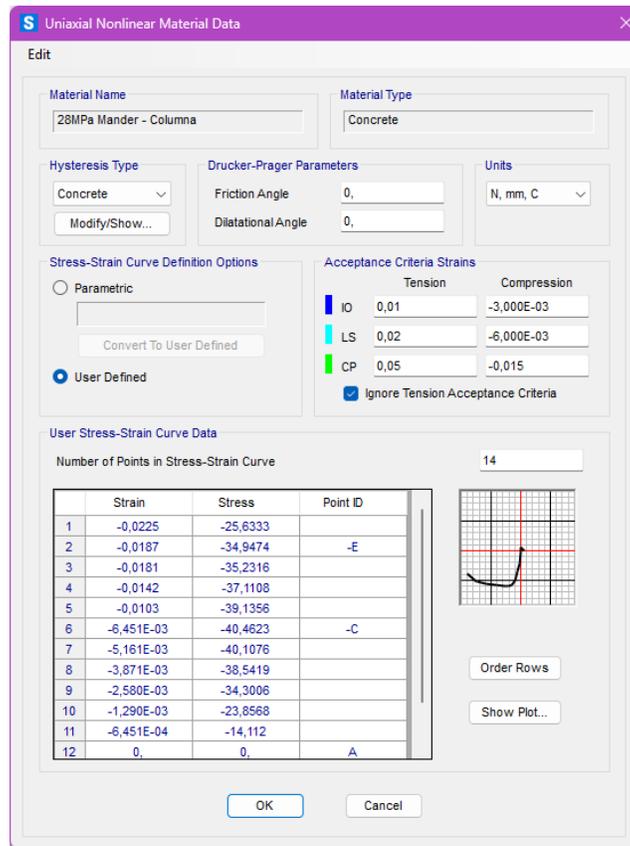
Fuente: Elaboración propia – SAP2000

Ilustración 85 Definición de propiedades para modelo de Mander



Fuente: Elaboración propia – SAP2000

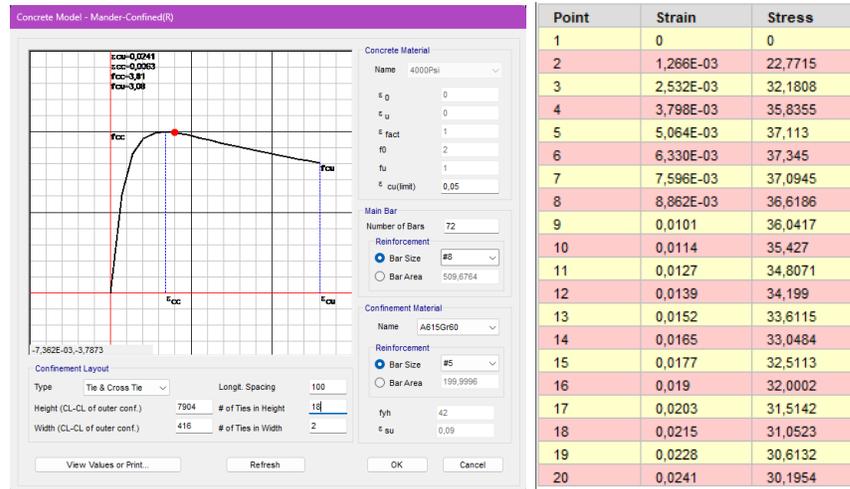
Ilustración 86 Curva de concreto confinado – Modelo de Mander



Fuente: Elaboración propia – SAP2000

Así mismo, se calcula la curva de concreto confinado, de manera simplificada, para la sección del muro.

Ilustración 87 Curva de concreto confinado – Modelo de Mander



Fuente: Elaboración propia – SAP2000

Estas curvas teóricas son extraídas y comparadas con las curvas esfuerzo deformación obtenidas a través de los modelos. Esta comparación podrá ser vista a profundidad en el capítulo 10.

Para el ítem 3, se realiza un comparativo de los módulos de resiliencia teóricos que se obtienen a partir de las curvas esfuerzo – deformación, calculadas con el modelo de Mander, y las curvas esfuerzo – deformación, obtenidas de los modelos. El módulo de resiliencia hace referencia a la cantidad de energía por unidad de volumen necesaria para generar deformaciones permanentes en un material (*William D. Callister, David G. Rethwisch, 2013*). Bajo la premisa de la definición del módulo de resiliencia, se analiza el grado de vulnerabilidad de las estructuras modeladas en función de la energía generada por el impacto y la energía máxima que es capaz de resistir el elemento estructural dentro de su rango elástico.

Dentro de los resultados obtenidos se encuentra que, para el 100% de los casos estudiados en las estructuras de pórticos, el módulo de resiliencia es excedido en su valor teórico en porcentajes muy elevados. Los valores alcanzados indican que cualquier tipo de impacto tiene la capacidad de generar deformaciones permanentes en esta configuración estructural.

Del nivel de energía alcanzado se puede observar que la curva esfuerzo – deformación tiene una forma más tendida, esto indica que la energía transferida por el impacto, absorbida por la estructura, se manifiesta a través de altas deformaciones laterales, agrietamiento y destrucción de la matriz de concreto, sin embargo; los valores alcanzados de módulo de resiliencia solo tienen sentido debida la acción del refuerzo del elemento estructural. Al ser el concreto un material con una resistencia a la tracción muy pobre, es el acero quien está asumiendo, en su mayoría, la responsabilidad de disipar esa energía, además que, en el punto de impacto y su área circundante, la resistencia es completamente nula pues ya no hay integridad del material, únicamente se tienen las barras de acero.

Por otro lado, en el caso del apoyo tipo muro, los impactos de camión liviano no logran desarrollar en el elemento general una energía tal que se produzca el esfuerzo a compresión máximo, por lo tanto, el fenómeno ocurre más bien de manera local y es allí donde está la mayor afectación de la estructura. En el caso del impacto de camión pesado, los valores de módulo de resiliencia alcanzados exceden considerablemente el calculado a partir de la curva teórica, considerando que el fenómeno es similar a lo que ocurre en los pórticos y, como se ha evidenciado; hay destrucción de la matriz de concreto, entonces es el acero de refuerzo quien asume la responsabilidad de disipar el impacto cuando el concreto ha sido destruido.

El resumen de módulos de resiliencia calculados se presenta a continuación.

Tabla 10. Módulos de resiliencia.

	Velocidad [km/h]	Mod. Resiliencia [kJ/m ³]				
		P. 3 columnas	P. 2 columnas	Muro	Teórico Colmuna	Teórico Muro
C. Liviano	40	209,8	1242,6	1,1	208,0	370,8
	60	400,4	4578,2	9,3		
	80	3323,4	4774,2	7,0		
C. Pesado	40	5586,0	7489,7	1181,2		
	60	7927,6	11769,1	629,3		
	80	7464,5	9567,3	1337,5		

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan sus diferencias porcentuales.

Tabla 11. Diferencias porcentuales en módulos de resiliencia.

	Velocidad [km/h]	Mod. Resiliencia [kJ/m ³]				
		P. 3 columnas	P. 2 columnas	Muro	Teórico Colmuna	Teórico Muro
C. Liviano	40	101%	597%	0%	208,0	370,8
	60	192%	2201%	3%		
	80	1597%	2295%	2%		
C. Pesado	40	2685%	3600%	319%		
	60	3811%	5657%	170%		
	80	3588%	4599%	361%		

Fuente: Elaboración propia

La diferencia de magnitudes obtenidas entre la teoría y el modelo computacional muestra la cantidad de energía que es capaz de absorber el acero de refuerzo ya que las deformaciones en la estructura siguen ocurriendo.

Luego de obtener un valor aproximado de la pérdida de rigidez de cada una de las estructuras, se puede proyectar cual es la resiliencia residual de las estructuras una vez que ha cesado el impacto y sus efectos inmediatos (se menciona para diferenciarlo del hecho que la estructura a largo plazo puede seguirse deformando y perder su equilibrio en

muchos casos). Para esto, se toma la inercia residual en las secciones post-impacto para calcular una sección equivalente que permita proyectar nuevas curvas esfuerzo – deformación y así comparar los valores teóricos iniciales con los finales y dar un valor aproximado a un índice que permita medir la resiliencia de las estructuras evaluadas.

A continuación, se presenta el cálculo de las secciones equivalentes para las estructuras impactadas en todos los modelos:

Tabla 12. Cálculo de secciones equivalentes

CAMIÓN LIVIANO							
ESTRUCTURA	V [km/h]	If (%)	If (%)	I [mm ²]	If [mm ²]	B [mm]	H [mm]
Pórtico 3 Columnas	40	61,5%	61,5%	20106192983	12372141402	354,3	354,3
	60	8,9%	8,9%	20106192983	1789386999	218,5	218,5
	80	5,7%	0,0%	20106192983	0	0	0
Pórtico 2 Columnas	40	67,2%	67,2%	20106192983	13519024181	362,2	362,2
	60	17,3%	17,3%	20106192983	3486444934	258,1	258,1
	80	2,8%	0,0%	20106192983	0	0	0
Apoyo tipo muro	40	104,9%	104,9%	2,048E+13	2,14783E+13	8018,1	500
	60	84,8%	84,8%	2,048E+13	1,73692E+13	7470,2	500
	80	78,5%	78,5%	2,048E+13	1,60775E+13	7280,2	500
CAMIÓN PESADO							
ESTRUCTURA	V [km/h]	If (%)	If (%)	I [mm ²]	If [mm ²]	B [mm]	H [mm]
Pórtico 3 Columnas	40	4,8%	0,0%	20106192983	0	0	0
	60	9,0%	0,0%	20106192983	0	0	0
	80	28,0%	0,0%	20106192983	0	0	0
Pórtico 2 Columnas	40	6,6%	0,0%	20106192983	0	0	0
	60	4,7%	0,0%	20106192983	0	0	0
	80	5,4%	0,0%	20106192983	0	0	0
Apoyo tipo muro	40	50,1%	50,1%	2,048E+13	1,02626E+13	6268,4	500
	60	55,9%	55,9%	2,048E+13	1,14524E+13	6501,8	500
	80	49,5%	49,5%	2,048E+13	1,01396E+13	6243,2	500

Fuente: Elaboración propia

Las casillas marcadas con ceros indican que la columna impactada fue destrozada completamente. A continuación, se muestran los resultados de resiliencia para las nuevas configuraciones en los pórticos y muro, comparados con los valores teóricos iniciales. En ese sentido, se muestra una clara reducción en la capacidad de las pilas para absorber y disipar energía de deformación.

Tabla 13. Módulos de resiliencia para pilas post-impacto comparado contra módulos teóricos iniciales

	Velocidad [km/h]	Mod. Resiliencia [kJ/m ³]				
		P. 3 columnas	P. 2 columnas	Muro	Teórico Columna	Teórico Muro
C. Liviano	40	112,1	122,2	370,8	208,0	370,8
	60	114,4	113,6	284,9		
	80	148,2	0,0	236,6		
C. Pesado	40	148,2	0,0	254,0		
	60	148,2	0,0	230,1		
	80	148,2	0,0	214,7		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Porcentaje de pérdida de resiliencia.

	Velocidad [km/h]	%Pérdida de resiliencia.		
		P. 3 columnas	P. 2 columnas	Muro
C. Liviano	40	32%	41%	0%
	60	31%	45%	23%
	80	43%	0%	36%
C. Pesado	40	43%	0%	31%
	60	43%	0%	38%
	80	43%	0%	42%

Nota: Los valores marcados con el valor cero indica que la estructura ha fallado completamente

Fuente: Elaboración propia

Cuando el sistema estructural aún conserva la capacidad de mantenerse en pie luego del impacto, en función de la magnitud de este, puede perder hasta el 46% de su capacidad de absorber energía de deformación en el caso de los pórticos. Si se habla de los casos en los que la columna queda destruida en el pórtico de tres columnas, este es capaz de conservar el 71% de su resiliencia, es decir; pierde el 29%. Para el caso del pórtico de dos columnas en el que la columna impactada ha sido destruida, dado la pérdida de estabilidad se espera el colapso, por lo tanto; se asigna un valor de cero.

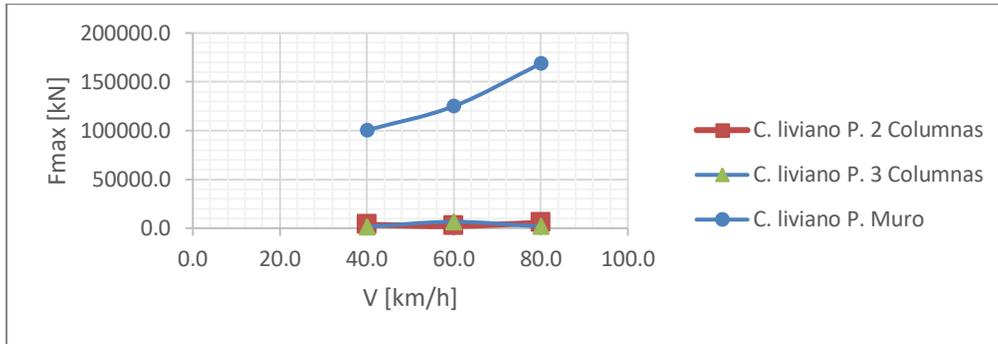
Si de la pila de tipo muro se trata, se observa en los resultados que los impactos a 40 km/h no son representativos para esta configuración estructural, por consiguiente, no hay una modificación en su resiliencia, mientras que; para impactos de vehículos livianos a 80 km/h son susceptibles al punto de perder poco más del 35% de su capacidad de resiliencia. Así mismo, Los impactos de vehículos pesados para esta pila son capaces de afectar enormemente su capacidad de resiliencia con una reducción hasta del 42%.

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se analizará en conjunto las respuestas máximas obtenidas para los distintos tipos de apoyo, se revisarán puntos no profundizados en el capítulo de Análisis de resiliencia y se analizará el comportamiento de las estructuras a partir de las cargas aplicadas.

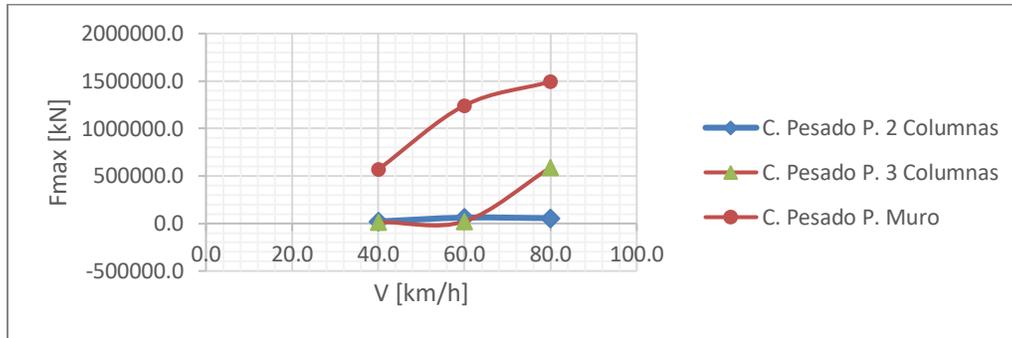
Sobre las fuerzas generadas en la estructura se encuentra una proporcionalidad directa de ésta con la velocidad a la que la estructura recibe el impacto por parte de los vehículos, sin embargo; al comparar las fuerzas obtenidas para los dos tipos de camiones, teniendo en cuenta cada velocidad y cada estructura se puede corroborar que la fuerza generada es directamente proporcional a la rigidez de la estructura; entonces, el nivel de respuesta generada en la estructura, medido en fuerza, es mayor para el apoyo de tipo muro y menor para el pórtico de dos columnas. Esta condición obedece la ley de Hooke, con ello no solo se logra simular un evento real dentro de un programa de computador, sino que demuestra que las condiciones de contorno bajo las cuales se ha representado el fenómeno han sido bien escogidas y parametrizadas.

Gráfica 39 Gráfico de Fuerza máxima Vs velocidad – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 40 Gráfico de Fuerza máxima Vs velocidad – Camión pesado.



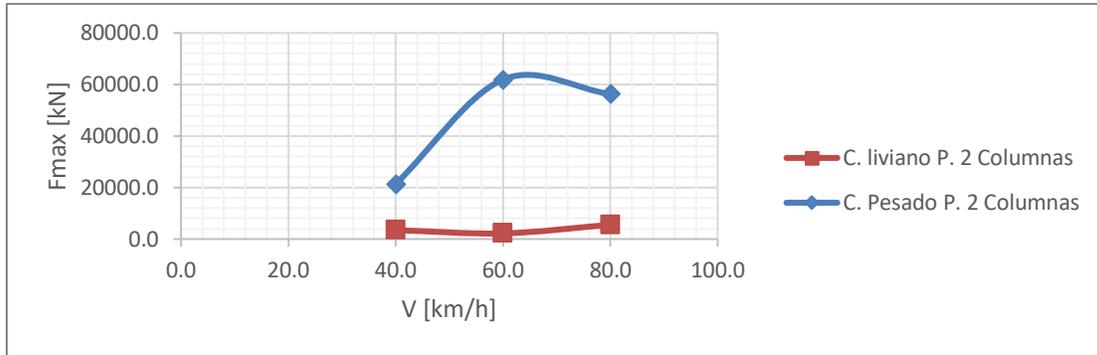
Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Se ha comparado los resultados obtenidos en cuanto a la respuesta de la estructura medida como fuerza para un mismo tipo estructural y se han revisado las diferencias porcentuales obtenidas, con respecto a esto, se encuentra lo siguiente:

- 1 Todos los casos de estudio comparados para un mismo tipo estructural tienen variaciones porcentuales siempre superiores al 80%.
- 2 Para los casos de pórtico de 3 Columnas y soporte de tipo Muro la velocidad que presenta una mayor variación en su resultado entre el impacto con vehículos liviano y pesado es para el caso de impacto a 60 km/h.
- 3 La menor variación entre la respuesta obtenida para impactos con vehículo liviano y pesado es observada para la pila de tipo muro tanto entre los pesos de los vehículos como en sus velocidades, para este caso particular todas las variaciones porcentuales calculadas se mantienen por debajo del 90%.

Gráfica 41 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado – P. 2 Columnas.

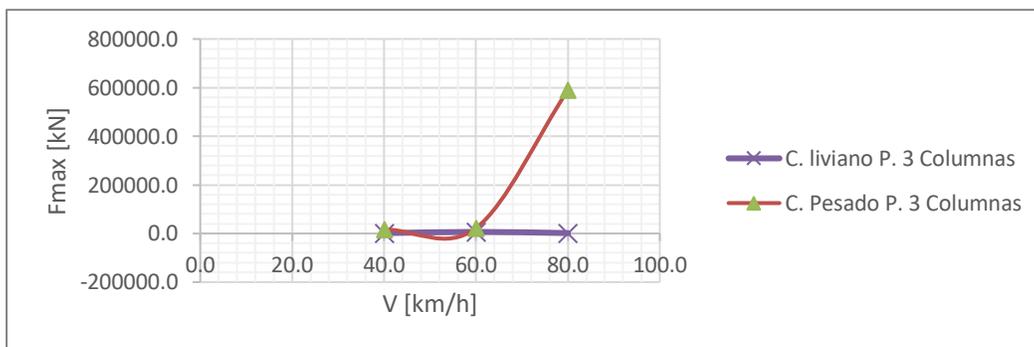
V [km/h]	V. Liviano	V. Pesado	E%
	Fmax [1/1000 kN]	Fmax [1/1000 kN]	
40,0	3466	21336	84%
60,0	2188	61906	96%
80,0	5538	56292	90%



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 42 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado – P- 3 Columnas.

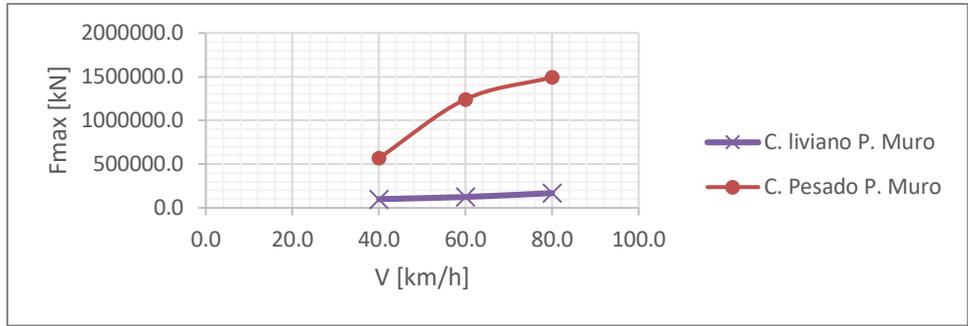
V [km/h]	V. Liviano	V. Pesado	E%
	Fmax [1/1000 kN]	Fmax [1/1000 kN]	
40,0	1476	16322	91%
60,0	1701	22225	92%
80,0	6504	589674	99%



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 43 Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado - Muro.

V [km/h]	V. Liviano	V. Pesado	E%
	Fmax [1/1000 kN]	Fmax [1/1000 kN]	
40,0	100381	569416	82%
60,0	124992	1242169	90%
80,0	168685	1493310	89%

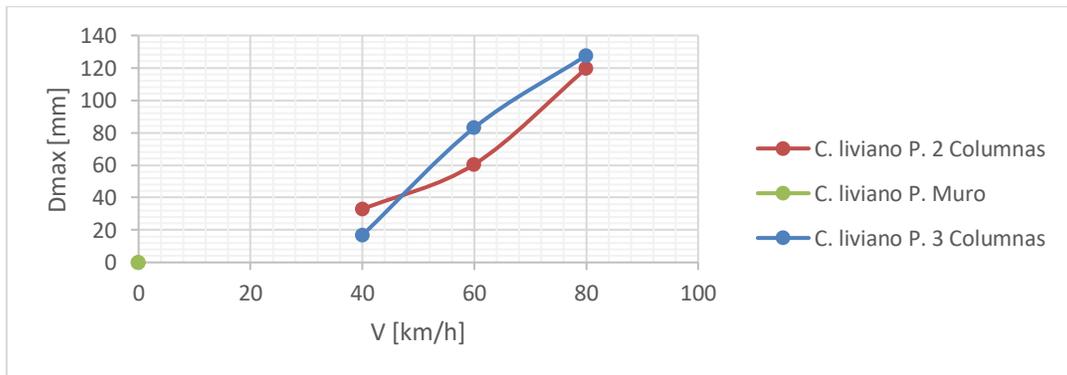


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

De acuerdo con la ecuación que describe la ley de Hooke, la fuerza generada en el sistema es directamente proporcional a la rigidez del mismo sistema, tal como se observa en las gráficas anteriores, del mismo modo y según la teoría, se espera entonces que la respuesta de la estructura medida en términos de desplazamiento sea inversa a la rigidez de esta. En ese sentido, se pudo corroborar a partir de los modelos matemáticos la condición esperada dentro del rango elástico, es decir; a mayor rigidez la estructura tendrá un desplazamiento menor. En ese sentido, la estructura que presenta el menor desplazamiento es la de pila tipo muro, sin embargo; los resultados no son secuenciales, sino que también dependen de la velocidad a la que impacta el vehículo y el peso de este último.

En los gráficos se muestra que, para el caso del vehículo de carga liviana a 40 km/h, el pórtico de dos columnas presenta el mayor desplazamiento, sin embargo; para las velocidades de impacto a 60 km/h y 80 km/h es el pórtico de tres columnas el que presenta los desplazamientos máximos entre las estructuras comparadas, aunque los valores entre los soportes de tipo pórtico son bastante próximos. Ante este hallazgo se puede pensar que, para impactos vehiculares de carga liviana, en términos de desplazamiento, un pórtico de 2 o 3 columnas no marca una diferencia notable en el corto plazo. Valdría la pena profundizar el análisis estudiando los mecanismos de falla en las estructuras ya debilitadas por el impacto para evaluar su comportamiento post-impacto. Cabe mencionar que esa evaluación se sale del alcance de este estudio y, además; requiere de un recurso computacional mucho más potente.

Gráfica 44 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión ligero.

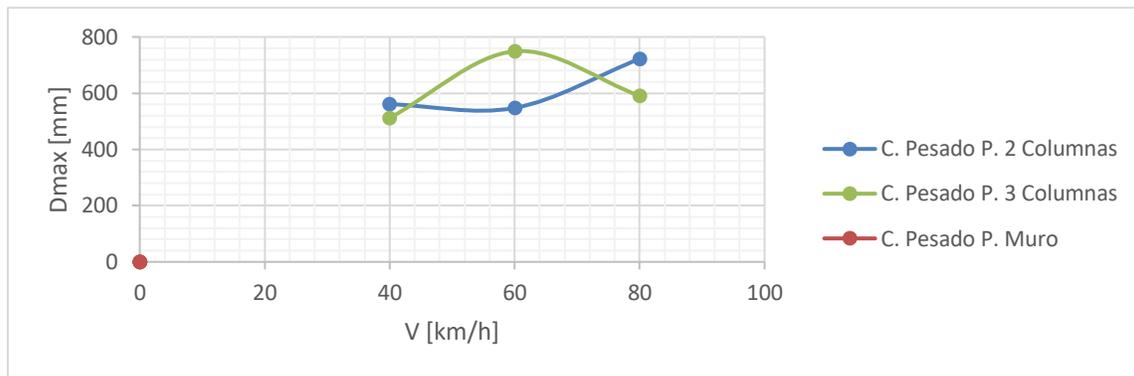


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En el caso del vehículo de carga pesada la tendencia de los resultados es similar, para los casos de impactos a 40 km/h y 80 km/h el pórtico de dos columnas presenta los desplazamientos máximos entre las tipologías comparadas. En el caso de la velocidad de impacto a 60 km/h el pórtico de tres columnas presenta el desplazamiento máximo.

En el caso de los desplazamientos que se presenta en el apoyo de tipo muro, estos se aprecian en la gráfica como un punto gris cercano al origen porque son muy pequeños en comparación con los gráficos azul y naranja.

Gráfica 45 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En el caso de los desplazamientos que se presenta en el apoyo de tipo muro, estos se aprecian en la gráfica como un punto naranja cercano al origen porque son muy pequeños en comparación con los gráficos azul y gris.

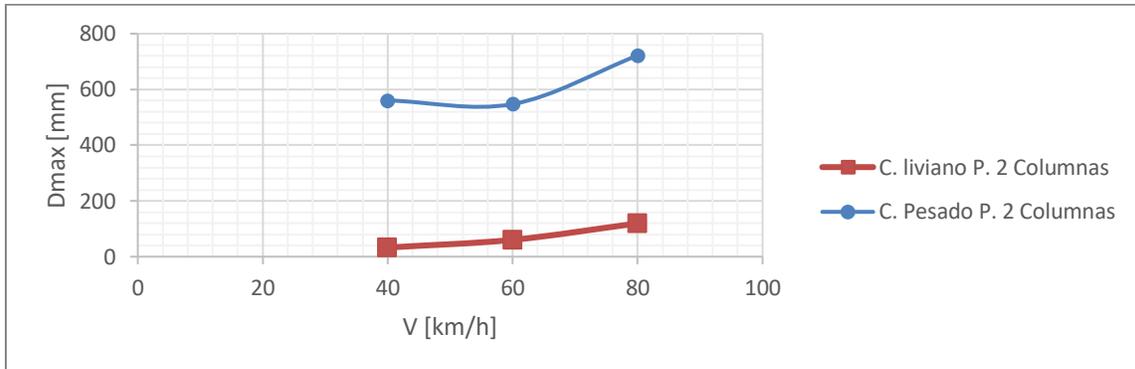
Al igual que para la respuesta de las estructuras en términos de fuerza, se calcula la variación entre las respuestas en términos de desplazamiento para cada tipología estructural, se encuentra lo siguiente:

- 1 Para los apoyos de tipo pórtico se encuentra que la tendencia de las variaciones obtenidas es similar, se observa que para impactos a 40 km/h la diferencia calculada entre el vehículo pesado y el vehículo liviano ronda el 95% en ambos casos. Para 60 km/h la diferencia ronda el 88% y, finalmente; a 80 km/h se observa una diferencia porcentual muy próxima al 80%.
- 2 En términos de desplazamiento, si la carga de impacto es pesada, la velocidad de 60 km/h representa la condición más crítica para el pórtico de 3 columnas, el resto de los casos de carga pesada, sin importar el tipo estructural; el desplazamiento máximo ocurre a 80 km/h
- 3 Para el caso del apoyo de tipo muro, la condición de máximo desplazamiento cuando la carga de impacto es liviana ocurre a los 60km/h.
- 4 Dada la magnitud de los desplazamientos obtenidos en todos los casos de impacto con vehículo liviano para sistema de soporte de tipo muro, se puede inferir que el efecto en este tipo de respuesta es casi despreciable. Considerando que el impacto se genera en el sentido en el cual su sección tiene mayor inercia, valdría la pena

estudiar el impacto de vehículos por su sentido de menor inercia, es decir; impactos perpendiculares a la dirección actualmente estudiada.

Gráfica 46 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado – P. 2 Columnas.

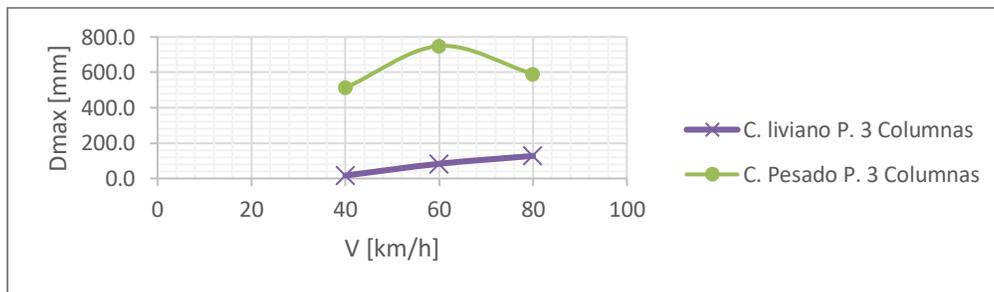
	V. Liviano	V. Pesado	
V [km/h]	Dmax [mm]	Dmax [mm]	E%
40	33	561	94%
60	61	547	89%
80	120	722	83%



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 47 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado – P. 3 Columnas.

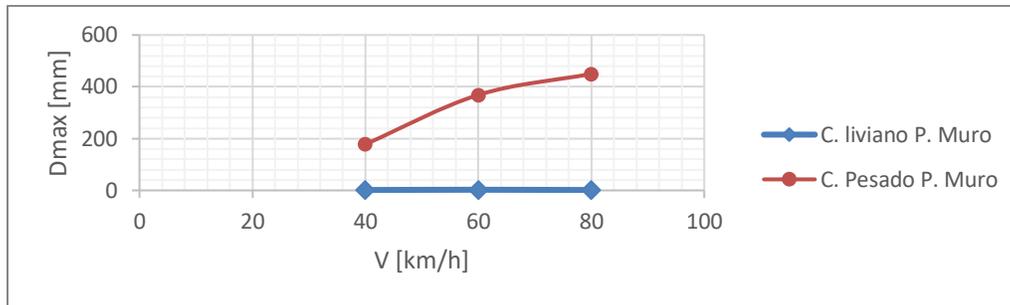
	V. Liviano	V. Pesado	
V [km/h]	Dmax [mm]	Dmax [mm]	E%
40	17	512	97%
60	83	749	89%
80	128	591	78%



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gráfica 48 Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado - Muro.

	V. Liviano	V. Pesado	
V [km/h]	Dmax [mm]	Dmax [mm]	E%
40	2	178	99%
60	2	369	99%
80	1	450	100%

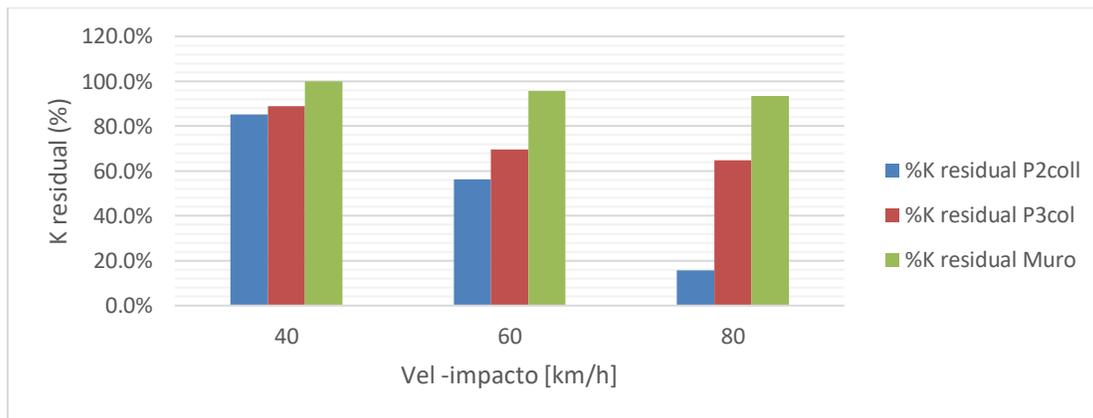


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Según los resultados obtenidos en el capítulo 9, se profundizará el análisis en los ítems correspondientes a la rigidez residual y las curvas esfuerzo deformación obtenidas.

Con respecto a las rigideces obtenidas, se tienen los siguientes gráficos:

Gráfica 49 Rigidez residual en sistemas impactados – Camión liviano.

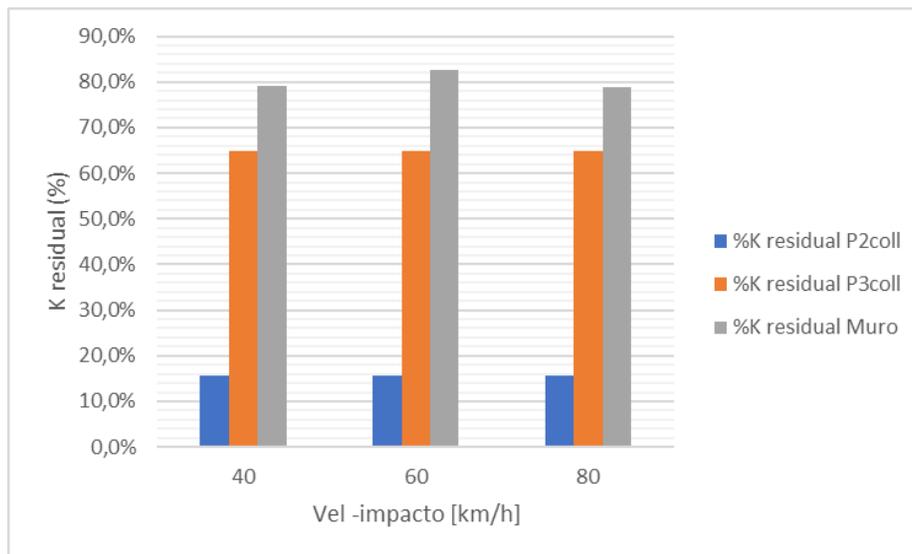


Fuente: Elaboración propia

Según los datos obtenidos es claro que el sistema estructural más resiliente ante las cargas de impacto es el de soporte tipo muro. Cuando este sistema es impactado por un vehículo liviano, es capaz de conservar en un valor mucho más que aceptable su rigidez (por encima del 90%). La mayor afectación se presenta durante el impacto vehicular a 80 km/h, sin embargo; con base en los gráficos esfuerzo – deformación obtenidos se observa que los impactos de camión liviano al soporte de tipo muro no generan esfuerzos representativos en función de f'_c , es decir; el esfuerzo a compresión del concreto no es excedido y la estructura no presenta deformaciones plásticas, sin embargo; si se evidencian daños locales en la zona del impacto. Por otro lado, el sistema estructural más afectado es el de pórticos con dos columnas, este sistema presenta una reducción de su rigidez, para el impacto con camión liviano, que va desde el 85,4% hasta el 15,6%, mostrando una reducción representativa de la rigidez del sistema, sin embargo; una evidente capacidad para resistir sin colapsar impactos livianos a velocidades bajas, a pesar de ello, este sistema es propenso a desarrollar mecanismos de falla que impidan una reparación inmediata de la estructura y se tenga que recurrir a demoliciones o peor aún, que la estructura llegue al colapso justo después del evento de impacto.

Sobre el sistema de pórtico de tres columnas, los resultados obtenidos para impactos con camión liviano a 40 km/h y 60 km/h no distan demasiado de los obtenidos en el caso de pórtico de dos columnas, la diferencia es notoria en el resultado obtenido para impacto vehicular a 80 km/h, sobre el cual el pórtico de tres columnas no se ve tan afectado, en este caso; aún conserva un 64,8% de su rigidez lo cual no es muy lejano de lo obtenido en el impacto a 60 km/h (69,7%). En términos de los resultados obtenidos, los sistemas de dos y tres columnas tienen una capacidad de resistir impactos vehiculares de baja magnitud (velocidades menores a 40 km/h hasta 60 km/h) y mantenerse en pie en el corto plazo (instantes posteriores al fenómeno), sin embargo; en términos de comportamiento este estudio no tiene manera de revelar como sucedería el colapso o que tanto tiempo sería capaz de resistir la estructura en pie luego de la ocurrencia del impacto.

Gráfica 50 Rigidez residual en sistemas impactados – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia

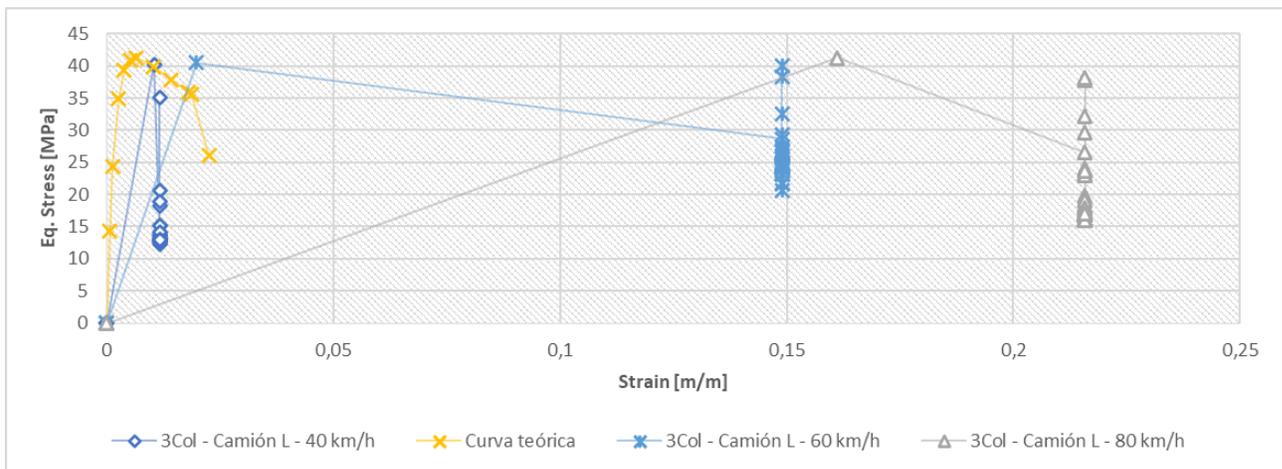
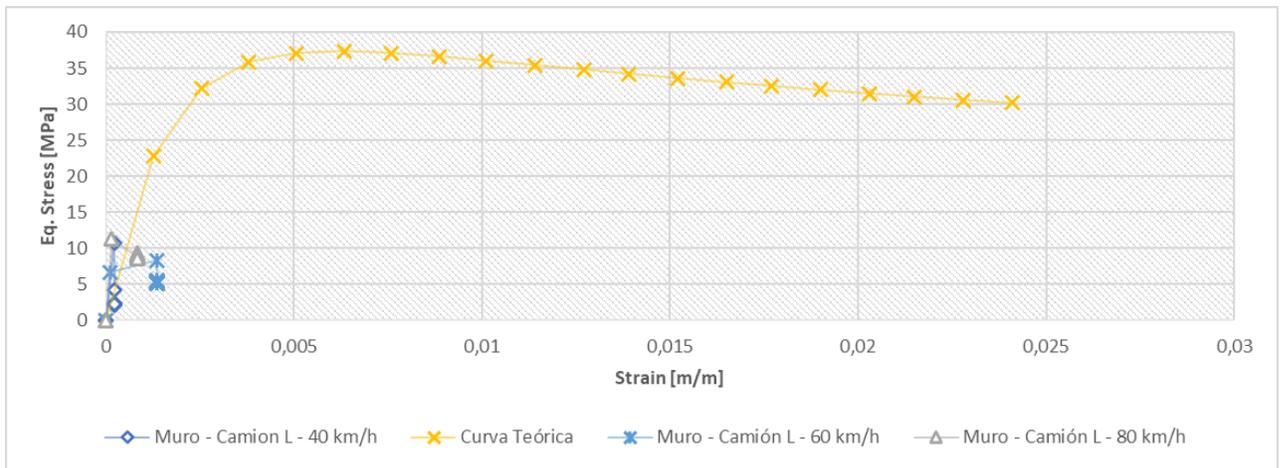
Como se observa en las ilustraciones 66 y 82, para los casos de impacto de camión pesado en los pórticos de dos y tres columnas, el elemento que recibe toda la carga es completamente destruido, por lo tanto; como parte del análisis se considera que estos elementos ya no aportan rigidez al sistema para el análisis post-impacto. En el gráfico de la ilustración 119, se observa que para el caso de pórtico de dos columnas la estructura ha perdido la totalidad de su capacidad de soporte, es decir, una de sus columnas ha sido derribada por completo, por lo tanto; al no ser un sistema redundante, no existe la posibilidad de una redistribución de momentos en el sistema, por lo tanto; está destinado al colapso.

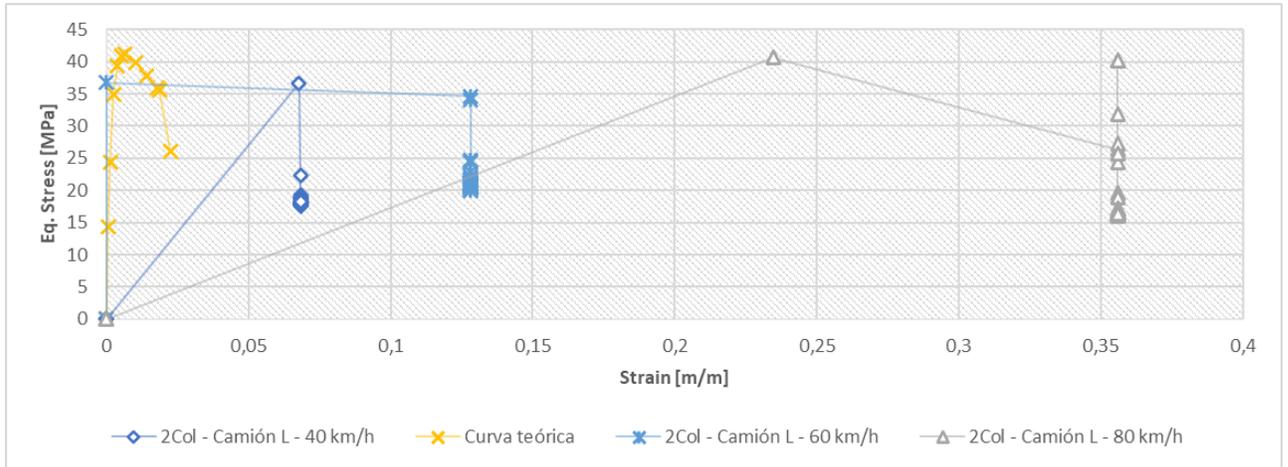
Si se compara ambos sistemas de pórticos, la diferencia es notable. Un sistema redundante tiene una mayor capacidad de soportar impactos vehiculares seguramente gracias al efecto de redistribución de momentos. Dada la capacidad limitada de cómputo empleada en este estudio, no es posible evaluar el efecto posterior al impacto (como por ejemplo el colapso del puente), sin embargo; gracias a los resultados obtenidos, es fácil predecir que el pórtico de 3 columnas tiene capacidad para mantenerse en pie para una intervención inmediata para la prevención del colapso y posterior reparación de la estructura.

Partiendo del hecho de que la estructura de pórtico de dos columnas no es resiliente ante cargas de impacto de camión pesado, a ninguna velocidad, solo queda comparar el pórtico de tres columnas y el apoyo de tipo muro. En la gráfica se observa lo siguiente:

1. Los resultados en gráficos indican que a medida el sistema de pórticos es más redundante, su comportamiento ante cargas de impacto es más similar al de un muro. Entonces, en el diseño de puentes se podría pensar en hacer un sistema de columnas consecutivas cuando exista un alto riesgo de impacto vehicular en la localización del puente, con ello; se obtiene un alto grado de redundancia y podría representar un margen económico importante.
2. Los valores obtenidos para el soporte tipo muro muestran un resultado atípico en el caso de impacto a 60 km/h. Al parecer este impacto sería el que genera menores afectaciones a la estructura, sin embargo; todos los impactos de camión pesado, indistintamente de su velocidad, rondan el 50% de rigidez residual.

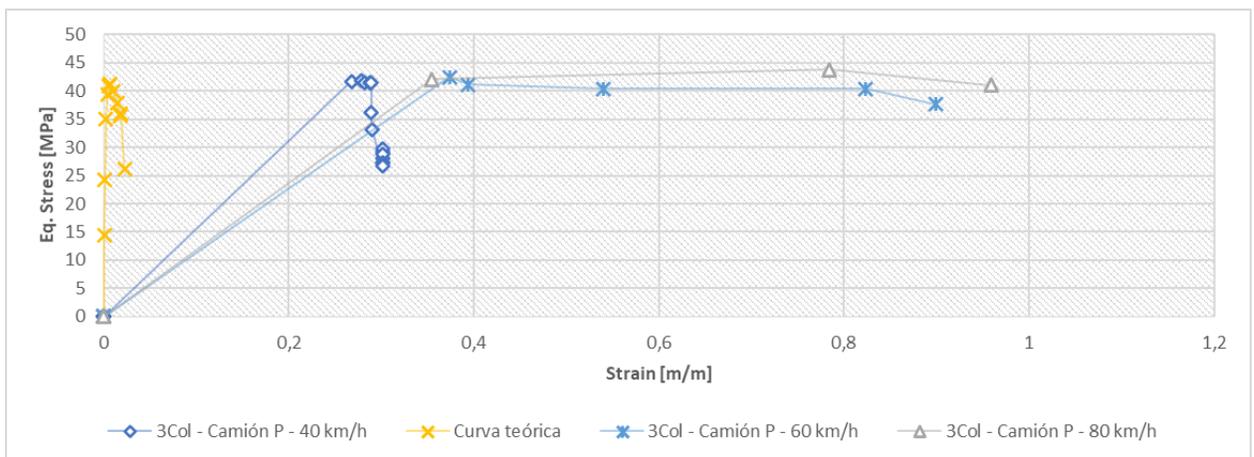
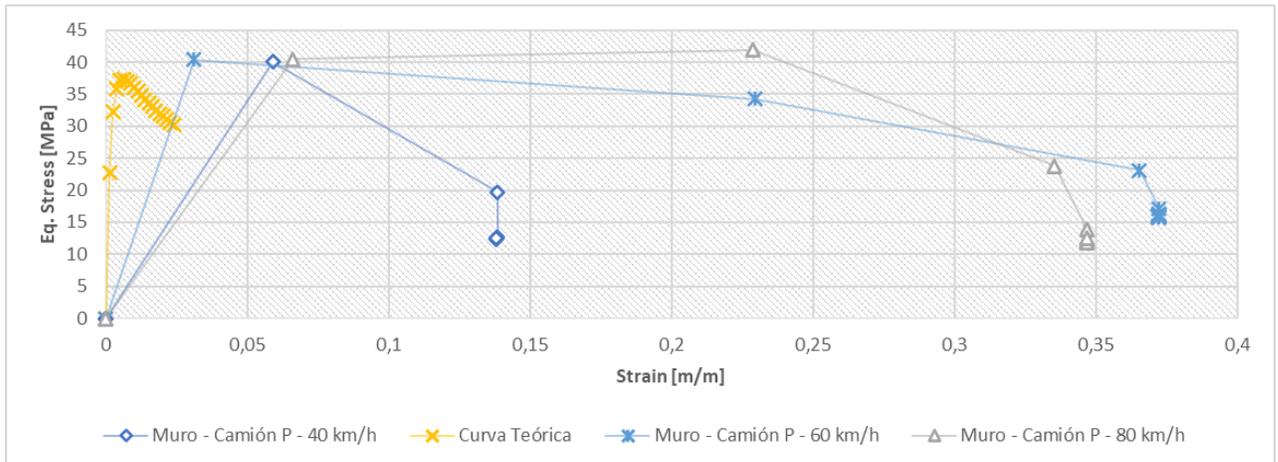
Gráfica 51 Comparativo de curvas esfuerzo deformación - Camión Liviano

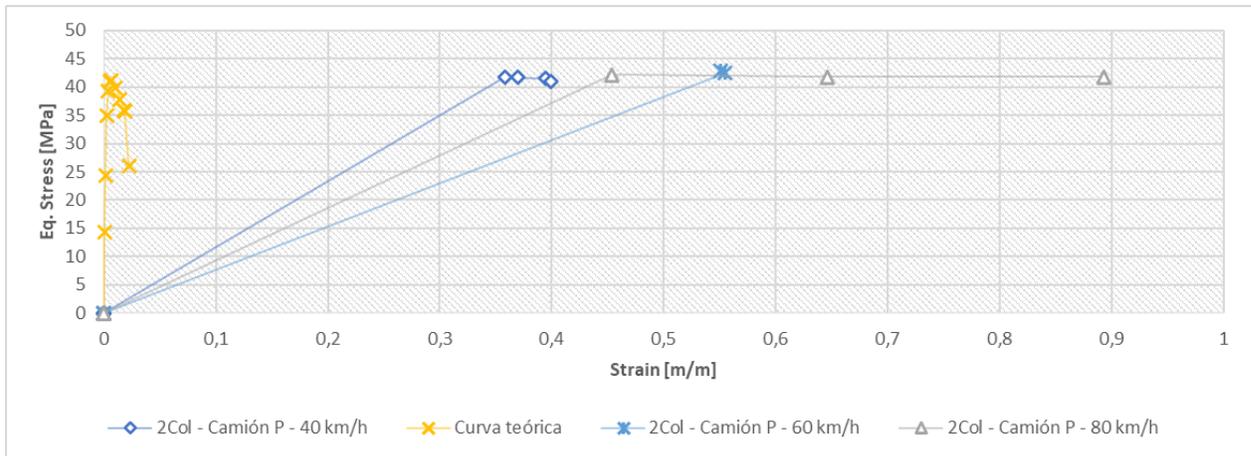




Fuente: Elaboración propia

Gráfica 52 Comparativo de curvas esfuerzo deformación - Camión Pesado.





Fuente: Elaboración propia

Al comparar la curva obtenida del modelo de Mander, lo primero que se observa es que la magnitud del esfuerzo máximo para el concreto (37.40 MPa para muro y 40.60 MPa para columna) es bastante aproximada a lo obtenido a partir del modelo ANSYS (41.80 MPa para muro y 42.10 MPa para columna), A pesar de ello; el nivel de deformación obtenido en las modelaciones es bastante superior que lo marcado en la teoría a excepción de los impactos de camión liviano cuando $V= 40$ km/h en el pórtico de tres columnas y el apoyo tipo muro. Hay que tener en cuenta que las diferencias en cuanto a la deformación se deben al hecho de que la carga de impacto no actúa axialmente sobre el elemento sino más bien en la dirección donde este es más esbelto, es decir; lateralmente, además; la forma como se aplica la carga es inmediata y violenta, entonces dicho impacto ocasiona que las secciones más esforzadas del elemento en el instante del impacto alcancen su máxima resistencia en cuestión de segundos al tiempo que toda la inercia transferida por el impacto genera altos desplazamientos en la estructura.

En cuanto a la magnitud de los desplazamientos, se aprecia que dichos valores hacen alusión a un fenómeno “físico” importante en el sentido de que son magnitudes que marcan un desplazamiento que, si bien ocurre en la modelación, lo que realmente indican es que la estructura ha dejado de ser funcional, un ejemplo claro de esto se encuentra en el gráfico 12: Gráfico de Deformación Total Vs Tiempo – Camión pesado para el caso del pórtico de dos columnas. Para este caso, las curvas esfuerzo – deformación no muestran ninguna recuperación en la estructura, entonces; se da por entendido que esta próxima al colapso.

Para los casos del pórtico de 3 columnas y apoyo tipo muro, en los impactos de camión pesado a la velocidad mínima, y algunos casos de impacto de camión liviano; se aprecia una caída del esfuerzo hasta el punto final de la simulación (dado que el camión ha perdido contacto con la estructura en la mayoría de los casos), y en algunos casos se identifica una leve recuperación de la deformación presentada, se podría pensar entonces que la estructura se ha “recuperado” dentro de su nuevo rango elástico, es decir; luego de alcanzar la plastificación. Esto da espacio para considerar que la estructura se mantiene funcional luego del impacto, por lo cual se muestra que, hasta cierto punto, la estructura puede seguir en pie y funcional y que su nivel puede ser determinado a partir de los parámetros estructurales enfoque de este estudio.

11. CONCLUSIONES

1. El presente estudio es un primer acercamiento hacia los efectos que puede generar el impacto de vehículos sobre las pilas de los puentes. Dado el costo y tiempo que requiere realizar modelos a escala real de este fenómeno, la elaboración de modelos de elementos finitos en softwares computacionales permite una representación muy aproximada de lo que ocurre en los elementos estructurales a partir de idealizaciones, sin embargo; estos modelos exigen un recurso computacional importante, el cual no siempre está disponible y por ello se hace necesario fijar varios parámetros en el estudio. A partir de que se tenga un equipo con mejores características se podrá involucrar más parámetros variables en el estudio como lo es el ángulo de ataque, posición de las columnas, alturas de vehículos o calidad de materiales.
2. Cuando se revisan las curvas esfuerzo – deformación en los impactos de camión liviano, se observa que los esfuerzos se mantienen entre 35 MPa y 40 MPa, pero las deformaciones obtenidas aumentan a medida que la velocidad de impacto es mayor, entonces; se puede concluir de este comportamiento que el concreto toma la mayor parte del esfuerzo a “bajas velocidades” disipando la energía al fracturarse, sin embargo; a mayor velocidad de impacto, el concreto es incapaz de asumir mayores deformaciones y es el acero quien toma la responsabilidad de disipar toda la energía, entonces, se puede decir que a velocidades bajas la falla obedece un comportamiento frágil, mientras que a velocidades iguales o mayores a 80 km/h la falla es dúctil debido al acero.
3. En los 18 modelos analizados se observa que las estructuras desarrollan mecanismos de falla particulares, inducidos por la velocidad y masa de impacto. A pesar de que cada mecanismo es único, guardan entre si la similitud de que se desarrollan rótulas plásticas tanto en el apoyo de la columna impactada como en el nodo viga-columna.
4. Al analizar las variaciones obtenidas en las respuestas de las estructuras como desplazamientos, se encuentra que para los apoyos de tipo pórtico la tendencia de las variaciones obtenidas es similar. En ese sentido se observa que para impactos a 40 km/h la diferencia calculada entre el vehículo pesado y el vehículo liviano ronda el 95% en ambos casos. Para 60 km/h la diferencia ronda el 88% y, finalmente; a 80 km/h se observa una diferencia porcentual muy próxima al 80%.
5. Dada la magnitud de los desplazamientos obtenidos en todos los casos de impacto con vehículo liviano para sistema de soporte de tipo muro, se puede inferir que el efecto en este tipo de respuesta es casi despreciable mostrando en la modelación solo daños locales en el sector impactado de la pila. Considerando que el impacto se genera en el sentido en el cual su sección tiene mayor inercia, valdría la pena estudiar el impacto de vehículos por su sentido de menor inercia, es decir; impactos perpendiculares a la dirección actualmente estudiada. Sin embargo; esta observación permite dar un acercamiento hacia la efectividad de un elemento para soportar este tipo de cargas cuando es masivo, entonces; se puede inferir desde este punto que el uso de barreras de protección para los puentes es una alternativa que puede ser efectiva si se trata de salvaguardar la integridad de la estructura. Si se profundiza un poco más en esta alternativa se entiende también que la geometría que tendrá la barrera también sería un factor determinante para su eficiencia y, por supuesto, la economía de quien ejecute la obra.

6. De acuerdo con los resultados obtenidos, la pila tipo muro es el sistema estructural con mayor capacidad resiliente ante cargas de impacto. Dada su configuración geométrica, es un elemento que cuenta con propiedades mucho más elevadas que el resto de las estructuras, en ese sentido; el muro cuenta con mayor inercia en el eje de su sección sobre el cual se evalúa en este estudio (sentido longitudinal), por lo tanto, la diferencia es notable. La posición evaluada podría ser la más común, sin embargo; si se evalúa el impacto en el sentido débil del muro, esta estructura se encuentra en una clara desventaja ante las estructuras aporticadas, para las cuales la inercia del elemento individual es la misma en todas sus direcciones ortogonales. Claramente, como lo mencionan las normas CCP-14 y AASHTO, los impactos ortogonales en las pilas de los puentes son poco probables (aunque no imposibles) y por ello, se fija el ángulo de impacto en este estudio a un parámetro constante en todos los modelos. El haberlo dejado variable habría representado el duplicar o triplicar la cantidad de modelos.
7. En términos de rigidez, el sistema estructural más afectado es el de pórtico de dos columnas, sin embargo; este sistema es capaz de resistir sin colapsar impactos livianos a velocidades bajas, a pesar de ello, este sistema es propenso a desarrollar mecanismos de falla que impedirían una reparación inmediata de la estructura, más bien está propensa al colapso dada la falta de redundancia en el sistema.
8. Sobre el sistema de pórtico de tres columnas, los resultados obtenidos a velocidad baja y media no distan demasiado de los obtenidos para el pórtico de dos columnas, pero cuando ocurre el impacto a 80 km/h es cuando se observa la mejoría en los resultados, mostrando que el pórtico de 3 columnas tiene una mayor capacidad de conservar su rigidez, es decir; es más resiliente que su contraparte.
9. La redundancia del sistema estructural del apoyo del puente es un factor determinante a la hora de resistir impactos vehiculares. Si bien el elemento que recibe el impacto puede verse destruido, contar con numerosos elementos permite que las cargas puedan redistribuirse y así reequilibrar el sistema estructural. Aunque el puente modelado no cuenta con un gran número de columnas, si se logra observar que a medida el sistema de pórticos cuenta con mayor redundancia, su comportamiento ante cargas de impacto es más similar al de un muro. Entonces, en el diseño de puentes se podría pensar en hacer un sistema de columnas consecutivas cuando exista un alto riesgo de impacto vehicular en la localización del puente, con ello; se obtiene un alto grado de redundancia y podría representar un margen económico importante con respecto a la alternativa de construir muros. Además, los soportes de tipo muro son pilas que afectan considerablemente la visibilidad.
10. Dentro de los resultados obtenidos se encuentra que, para el 100% de los casos estudiados en las estructuras de pórticos, el módulo de resiliencia es excedido en su valor teórico en porcentajes elevados. Los valores alcanzados indican que cualquier tipo de impacto tiene la capacidad de generar deformaciones permanentes en estas configuraciones estructurales. A pesar de ello, el muro es el sistema estructural cuya configuración geométrica ofrece un mejor desempeño ante las cargas de impacto vehicular al perder únicamente alrededor del 35% y el 45% de la resiliencia cuando se impactan vehículos a 80 km/h, a partir de allí el sistema es mucho más resiliente ante el resto de los impactos modelados. Detrás de este sistema, sigue el de pórticos de tres columnas sobre el cual la totalidad de los impactos genera una pérdida de resiliencia en la estructura mayor al 40% pero menor siempre al 45%. Se pudo determinar que cuando la columna impactada es

destruida, este evento representa una pérdida del 43% de la resiliencia de la estructura, conservando un 57% de su resiliencia gracias al efecto del resto del sistema. En el caso del pórtico de dos columnas se puede concluir que el sistema no es óptimo ante las cargas de impacto. Pierde un porcentaje de resiliencia tal que, cuando la columna no es destruida, es improbable que la estructura pueda mantenerse en pie el tiempo necesario para pensar en repararlo.

11. Sobre las consideraciones normativas, el CCP-14 en su capítulo 3.6.5.1, da recomendaciones sobre como considerar los efectos de un posible impacto vehicular y cuando considerarlo. Indica que cuando las pilas estén dentro de una distancia de 9.0 m del borde de la calzada se debe considera una carga estática de 2.6 MN a 1.5m del borde del terreno. Esta carga al ser de carácter estático no es capaz de simular los efectos que una carga dinámica provoca sobre la estructura, mucho menos capaz de ofrecer una respuesta acertada, así mismo; no es posible obtener una magnitud de fuerzas internas en el elemento que sea representativa ante lo que ocurre realmente durante el fenómeno estudiado. Aunque este estudio es un primer acercamiento hacia los efectos generados por el impacto vehicular, si se puede poner en evidencia que este tipo de carga resulta en sollicitaciones de grandes magnitudes y que proteger a las estructuras para este tipo de eventos puede ser una solución más viable que diseñarlas para tal fin.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agrawal, A. K., Liu, G., & Alampalli, S. (2013). Effects of truck impacts on bridge piers. *Advanced Materials Research*, 639–640(1), 13–25. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.639-640.13>
- [2] Li, R. W., Wu, H., Yang, Q. T., & Wang, D. F. (2020). Vehicular impact resistance of seismic designed RC bridge piers. *Engineering Structures*, 220(April). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111015>
- [3] Gomez, N. L., & Alipour, A. (2014). Study of circular reinforced concrete bridge piers subjected to vehicular collisions. *Structures Congress 2014 - Proceedings of the 2014 Structures Congress, 2003*, 577–587. <https://doi.org/10.1061/9780784413357.052>
- [4] Sharma, H., Hurlebaus, S., & Gardoni, P. (2012). Performance-based response evaluation of reinforced concrete columns subject to vehicle impact. *International Journal of Impact Engineering*, 43, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.11.007>
- [5] Severino, E., & El-Tawil, S. (2003). Collision of vehicles with bridge piers. *Computational Fluid and Solid Mechanics 2003*, 10(3), 637–640. <https://doi.org/10.1016/B978-008044046-0.50156-1>
- [6] Baker, J. W. (2007). Measuring bias in structural response caused by ground motion scaling. *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, 056, 1–6. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- [7] Dong, Y., & Frangopol, D. M. (2015). Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties. *Engineering Structures*, 83, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.050>
- [8] Cao, R., Agrawal, A. K., El-Tawil, S., Xu, X., & Wong, W. (2019). Performance-Based Design Framework for Bridge Piers Subjected to Truck Collision. *Journal of Bridge Engineering*, 24(7), 04019064. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001423](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001423)
- [9] Demartino, C., Wu, J. G., & Xiao, Y. (2017). Response of shear-deficient reinforced circular RC columns under lateral impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 109, 196–213. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.06.011>
- [10] Gholipour, G., Zhang, C., & Mousavi, A. A. (2018). Effects of axial load on nonlinear response of RC columns subjected to lateral impact load: Ship-pier collision. *Engineering Failure Analysis*, 91(April), 397–418. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.055>
- [11] Abdelkarim, O. I., & ElGawady, M. A. (2017). Performance of bridge piers under vehicle collision. *Engineering Structures*, 140, 337–352. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.054>
- [12] Wan, Y., Zhu, L., Fang, H., Liu, W., & Mao, Y. (2019). Experimental testing and numerical simulations of ship impact on axially loaded reinforced concrete piers. *International Journal of Impact Engineering*, 125(December 2018), 246–262. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.11.016>

- [13] Fan, W., Shen, D., Huang, X., & Sun, Y. (2020). Reinforced concrete bridge structures under barge impacts: FE modeling, dynamic behaviors, and UHPFRC-based strengthening. *Ocean Engineering*, 216(July), 108116. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108116>
- [14] Garcia Reyes, L. E. (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*.
- [15] Muñoz Diaz, E. E. (2011). *Ingeniería de puentes, Reseña histórica, tipología, diagnósticos y recuperación – Tomo 1*. Colombia. Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- [16] Muñoz Diaz, E. E. (2011). *Ingeniería de puentes, Reseña histórica, tipología, diagnósticos y recuperación – Tomo 2*. Colombia. Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- [17] Cusba M. (2011). *Estudio de causas y soluciones estructurales del colapso total o parcial de los Puentes vehiculares de Colombia desde 1989 al 2011, y la evaluación de las consecuencias del derrumbamiento de uno de ellos (Tesis de pregrado)*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C.
- [18] *Norma Colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP 14*. Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica – AIS, Bogotá D.C., Colombia, 26 de Junio de 2015.
- [19] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1988). "Theoretical stress-strain model for confined concrete." *J. Struct. Engrg., ASCE*, 114(8), 1804–1826.
- [20] Spoelstra, M. R., Monti, G. (1999). "FRP-Confined Concrete Model." *Journal of composites for construction* Vol. 3., ASCE,.
- [21] Dalmau M. R., Vilardell J. (2003). *Análisis plástico de estructuras introducción*. Edicions UPC. www.edicionsupc.es.
- [22] William D. Callister, David G. Rethwisch. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: Introducción 9ª Edición*, Wiley; 9a edición (4 de diciembre de 2013), ISBN-13: 978-1118324578.
- [23] Repositorio IDU [ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA TRONCAL NORTE QUITO SUR, DESDE LA AVENIDA PASEO DE LOS LIBERTADORES AL LÍMITE DEL DISTRITO CON SOACHA, EN BOGOTÁ D.C. – DISEÑO ESTRUCTURAL]. Recuperado el 15 de septiembre 2023 de <https://webidu.idu.gov.co/jspui/handle/123456789/76743>
- [24] (Chalco Aluminium. Aluminio en la industria del transporte. Recuperado el 18 de octubre, 2023, en <https://www.chalcoaluminum.com/es/application/aluminum-in-transportation/#veh%C3%ADculos%20comerciales>).