

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

Hugo Daniel Manzano Celedón.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Bogotá D.C., Colombia.

[hugo.manzano@mail.escuelaing.edu.co](mailto:hugo.manzano@mail.escuelaing.edu.co).

**Resumen** – 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.

**Palabras clave** – Impacto vehicular, Resiliencia, Pila, Puente, Capacidad.

## I. INTRODUCCIÓN.

La resiliencia es una propiedad que puede ser encontrada en cualquier material o mecanismo que cuente con cierto grado de elasticidad. 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.

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.

## II. METODOLOGÍA

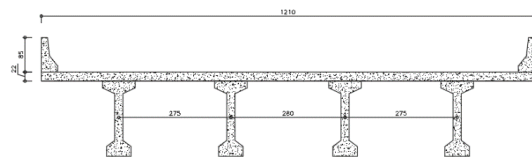
### Definición y caracterización de las estructuras.

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.

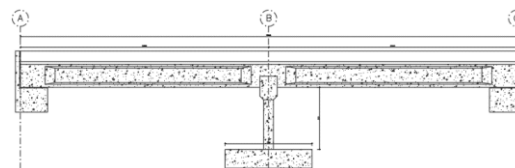
Se escoge una geometría de vigas con un patín superior de 0.80 m, una altura de 1.85 m y un patín inferior de 0.60 m. El alma de la viga cuenta con un espesor de 0.50 m. El tablero estará apoyado en 4 vigas longitudinales de 20.0 m de longitud por luz para una longitud total de 40.0 m para el puente modelado. El tablero cuenta con un espesor de 0.22 m 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.

Fig 1. Corte transversal de la superestructura.



Fuente: Elaboración propia.

Fig 2. Alzado de la estructura



Fuente: Elaboración propia.

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.

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.

**Definición y caracterización de la carga.**

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.

**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”.

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.

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. El vehículo se modela con un peso de 3.4 toneladas.

**Vehículo de carga pesada**

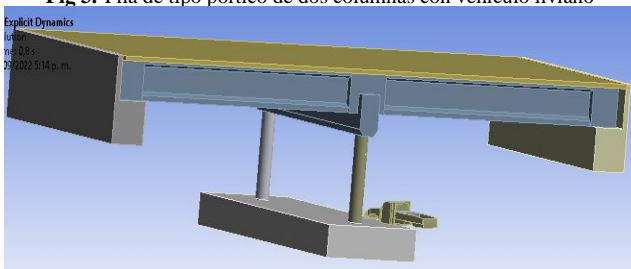
La longitud total del vehículo es de 6.40 m, cuenta con una altura en su cabina de 1.50 m y una altura de vagón de 2.50 m, cuenta con un ancho de 2.40 m aproximadamente. No se están modelando los rodamientos. El vehículo se modela con un peso de 22.6 toneladas.

**III. RESULTADOS.**

**Pórtico de 2 columnas**

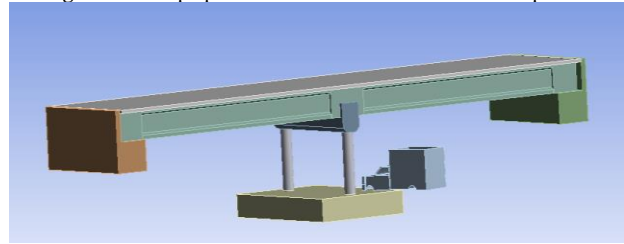
Se somete a modelación la estructura del puente soportada por el pórtico de dos columnas como pila central, impactada por velocidades de 40 km/h, 60 km/h y 80 km/h por cada vehículo, para un total de 6 modelos para esta estructura.

**Fig 3.** Pila de tipo pórtico de dos columnas con vehículo liviano



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

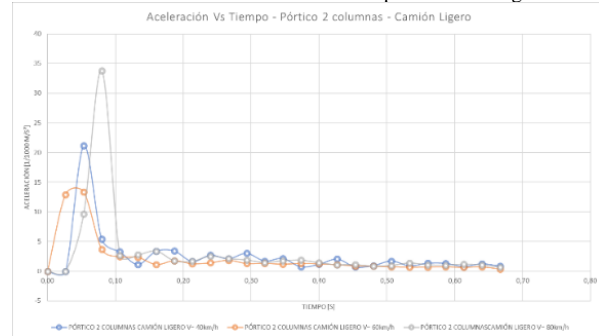
**Fig 4.** Pila de tipo pórtico de dos columnas con vehículo pesado



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

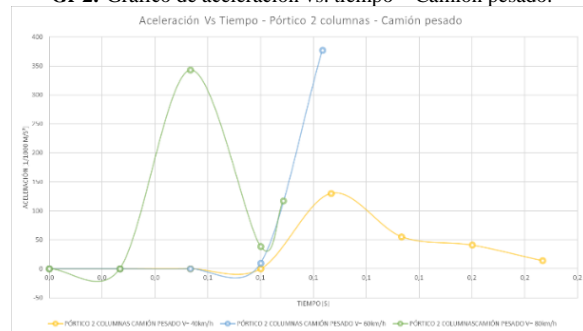
De esta modelación se obtienen gráficos de la aceleración de la estructura dada la carga aplicada, se muestran estos gráficos a continuación:

**Gr 1.** Gráfico de aceleración vs. tiempo – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

**Gr 2.** Gráfico de aceleración vs. tiempo – Camión pesado.

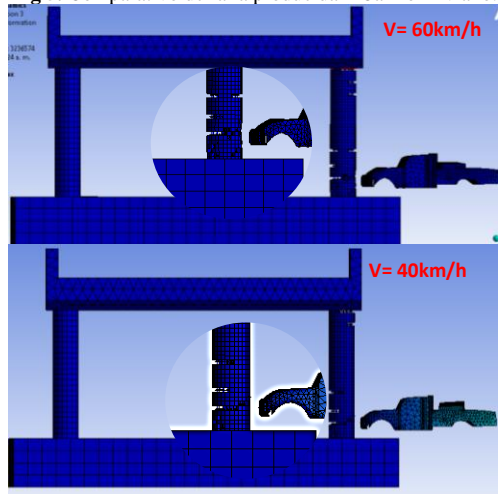


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

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.

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 respuesta 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.

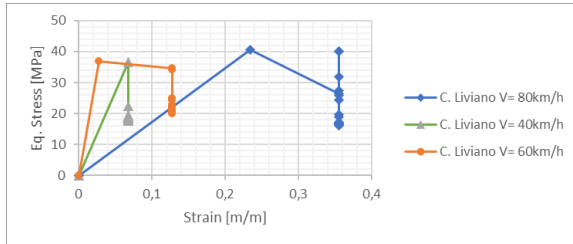
**Fig 5.** Comparativo de falla producida – Camión liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Se obtienen curvas de esfuerzo – deformación para cada caso analizado:

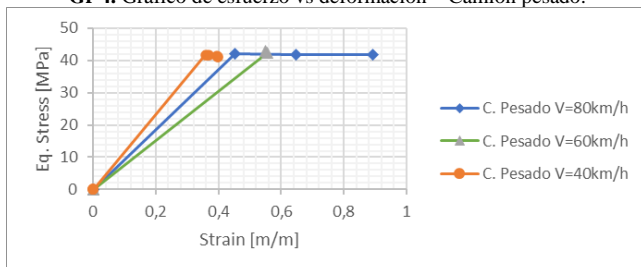
**Gr 3.** Gráfico de Esfuerzo Vs Deformación – Camión liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

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.

**Gr 4.** Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión pesado.

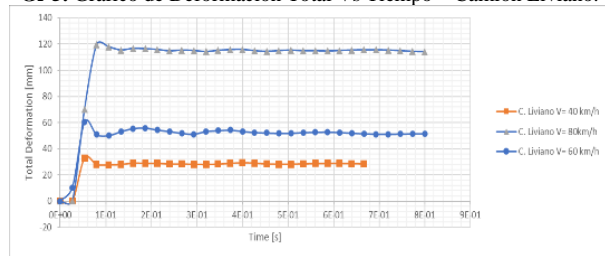


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

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

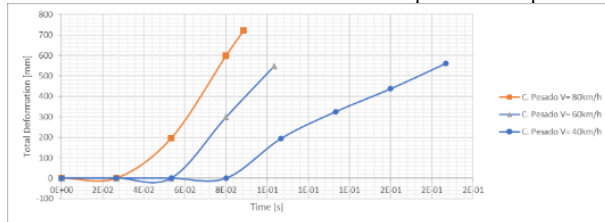
impactos evaluados, esto indica que, en el caso de una carga de gran magnitud, la velocidad parece no ser un factor determinante, es evidente que siempre se presenta la falla.

**Gr 5.** Gráfico de Deformación Total Vs Tiempo – Camión Liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

**Gr 6.** Gráfico de Deformación Total Vs Tiempo – Camión pesado.

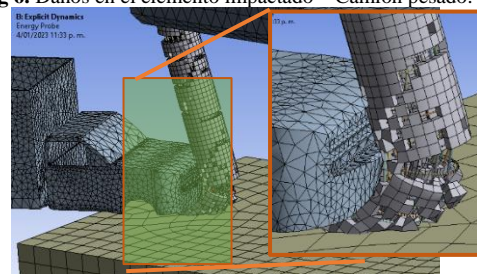


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En cuanto a las deformaciones, todos los impactos inducidos a la estructura producen una respuesta inelástica en ella.

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.

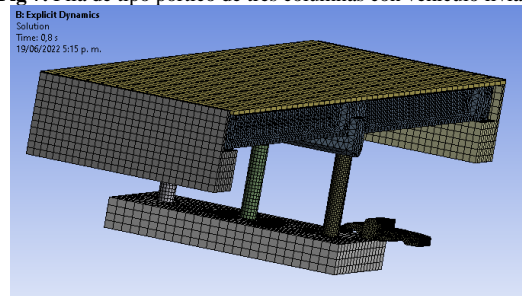
**Fig 6.** Daños en el elemento impactado – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

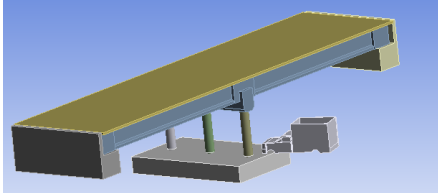
### Pórtico de 3 columnas

**Fig 7.** Pila de tipo pórtico de tres columnas con vehículo liviano



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

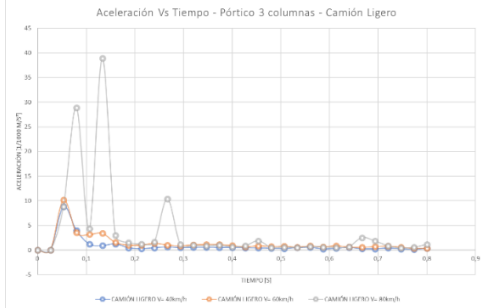
**Fig 8.** Pila de tipo pórtico de tres columnas con vehículo pesado



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

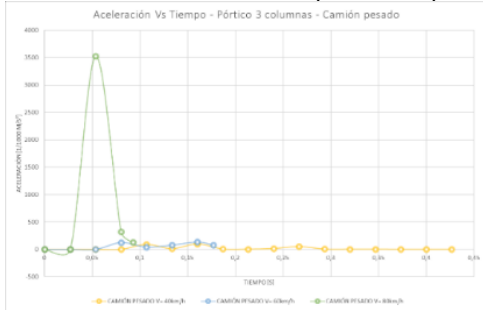
De esta modelación se obtienen gráficos de la aceleración de la estructura dada la carga aplicada, se muestran estos gráficos a continuación:

**Gr 7.** Gráfico de aceleración Vs tiempo – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

**Gr 8.** Gráfico de aceleración Vs tiempo – Camión pesado.

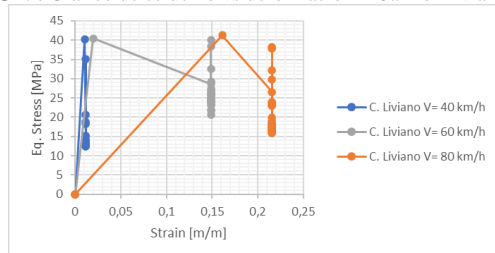


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

De los resultados obtenidos 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:

**Gr 9.** Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión liviano.



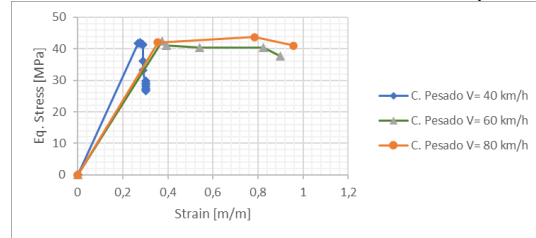
Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

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 donde se identifica la formación de rótulas plásticas.

La tendencia de los datos indica que obedecen la teoría de 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.

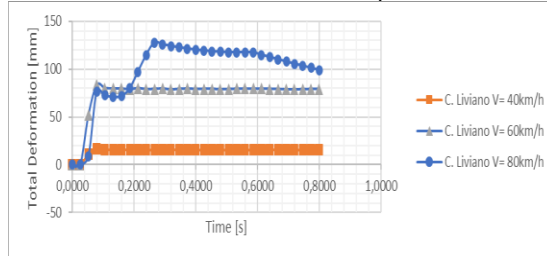
**Gr 10.** Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

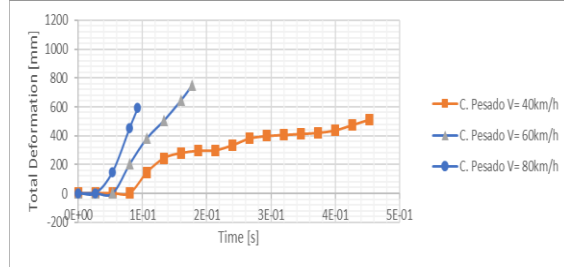
En el caso del camión pesado, los valores de esfuerzo alcanzados por la estructura son similares para las tres velocidades, sin embargo, la tendencia de las curvas obtenidas para los impactos a 60 km/h y 80 km/h guardan una mayor similitud con una curva esfuerzo-deformación del acero. La ductilidad presente 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.

**Gr 11.** Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión Liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

**Gr 12.** Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión pesado.

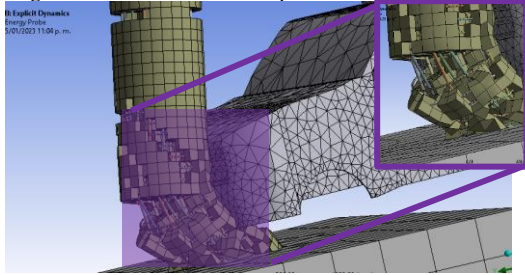


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

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.

**Fig 9.** Daños en el elemento impactado – Camión pesado.

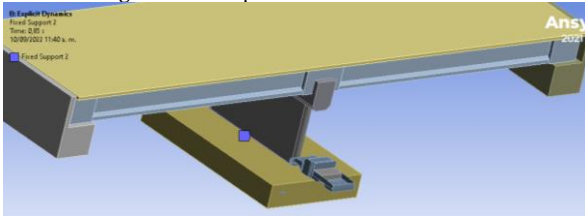


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

### Pila tipo muro

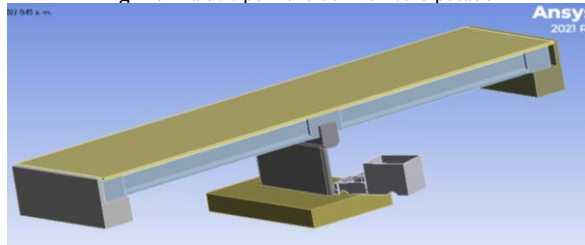
Al igual que con la tipología anterior, se somete a modelación la estructura del puente, en este caso soportada por un muro en concreto reforzado, impactada por las mismas tipologías de camión, bajo las mismas velocidades.

**Fig 10.** Pila de tipo muro con vehículo liviano



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

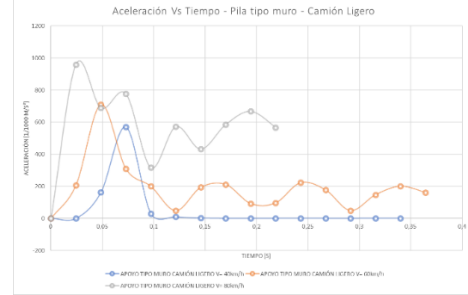
**Fig 11.** Pila de tipo muro con vehículo pesado



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

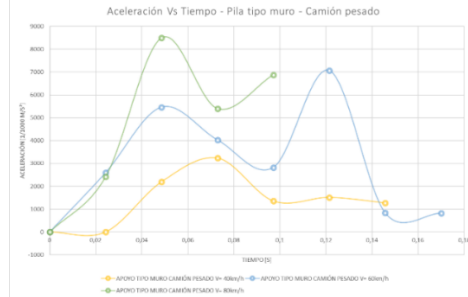
De esta modelación se obtienen gráficos de la aceleración de la estructura dada la carga aplicada, se muestran estos gráficos a continuación:

**Gr 13.** Gráfico de aceleración vs tiempo – Camión ligero.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

**Gr 14.** Gráfico de aceleración vs tiempo – Camión pesado.

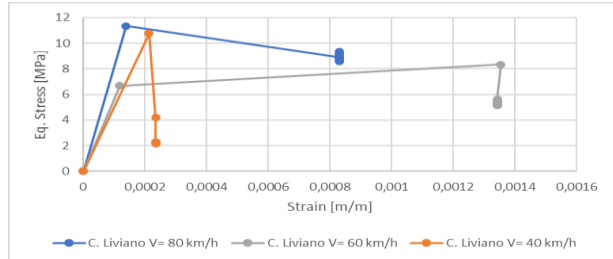


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

En este caso se aprecia que la respuesta de la estructura, 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.

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

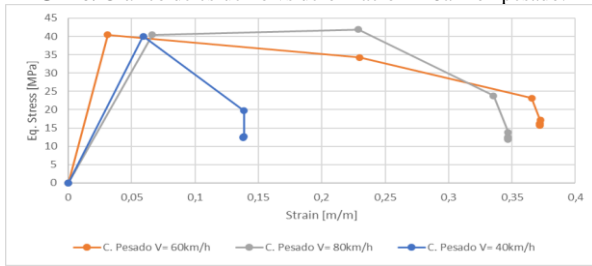
**Gr 15.** Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión liviano.



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.

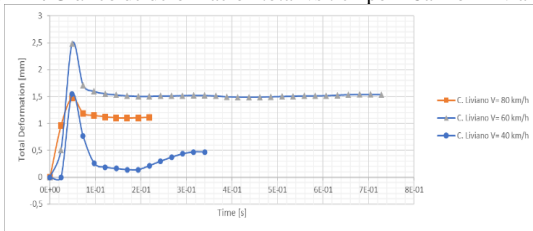
Gr 16. Gráfico de esfuerzo vs deformación – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

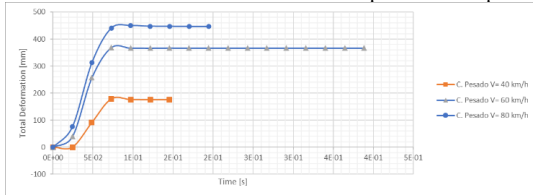
Desde los resultados obtenidos para la carga inducida por el camión pesado, se observa que para los 3 impactos los valores de esfuerzo son mayores a  $f_c$  y que las deformaciones obtenidas como respuesta de la estructura son representativas a pesar de la rigidez del muro, la tendencia de los datos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

Gr 17. Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión Liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Gr 18. Gráfico de deformación total vs tiempo – Camión pesado.



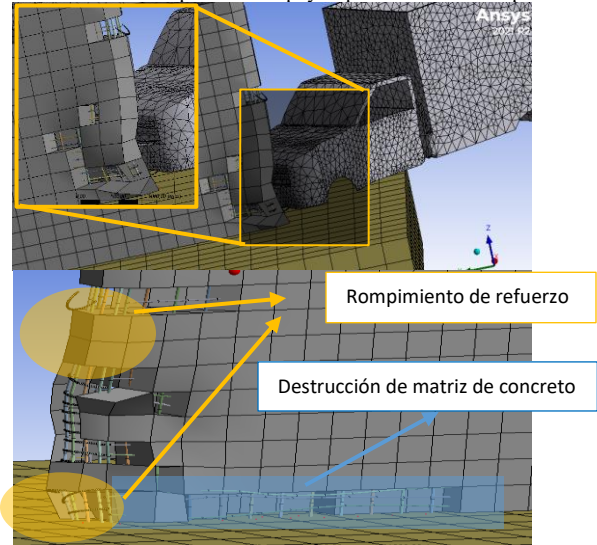
Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

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 completo por la estructura. Se ilustran los daños a continuación:

Fig 12. Fenómeno de impacto en el apoyo tipo muro – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

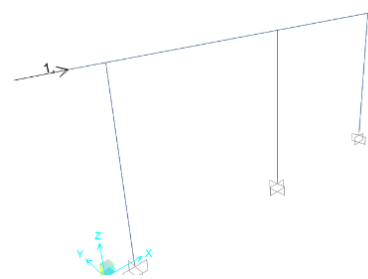
#### IV. ANÁLISIS DE RESILIENCIA

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.
1. Se compara la teoría de los modelos de confinamiento, con los resultados obtenidos en cuanto a las curvas esfuerzo – deformación.
2. Se calcula el área bajo la curva esfuerzo – deformación en su rango elástico tanto para el modelo de confinamiento como para las curvas obtenidas para obtener y comparar módulos de resiliencia

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

Fig 13. Aplicación de carga unitaria a los modelos estructurales de contraste



Fuente: Elaboración propia – SAP2000

En función de los resultados obtenidos, se calcula el módulo de elasticidad secante en las curvas esfuerzo deformación, el cual permite aproximar el valor del módulo de elasticidad real de la estructura en el instante de tiempo estudiado.

A partir de esto, se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 1.** 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 <sup>2</sup> ]	%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							
0,00				0,00	24870,06	20106192983	%I
0,13	79,72	0,15	29,24	566,82	196,27	1789386999	9%
80 km/h							
0,00				0,00	24870,06	20106192983	%I
0,19	79,90	0,22	29,72	254,04	137,69	1138051693	6%
Camión Pesado							
40 km/h							
0,00				0,00	24870,06	20106192983	%I
0,13	244,37	0,28	41,90	2182,05	150,26	957518126,9	5%
60 km/h							
0,00				0,00	24870,06	20106192983	%I
0,11	381,98	0,39	41,09	6999,63	104,22	1812559986	9%
80 km/h							
0,00				0,00	24870,06	20106192983	%I
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 a la falla total del elemento, se toma un valor de 0 como %I

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.** 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 <sup>2</sup> ]	%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							
0,00				0,00	24870,06	20106192983	%I
0,08	50,86	0,13	34,04	608,18	265,51	3486444934	17%
80 km/h							
0,00				0,00	24870,06	20106192983	%I
0,19	116,36	0,22	31,94	289,03	148,00	567938531,3	2,82%
Camión Pesado							
40 km/h							
0,00				0,00	24870,06	20106192983	%I
0,16	437,38	0,39	41,49	6728,45	105,11	1317610712	6,55%
60 km/h							
0,00				0,00	24870,06	20106192983	%I
0,08	298,58	0,55	42,45	1628,92	76,54	939982444,2	4,68%
80 km/h							
0,00				0,00	24870,06	20106192983	%I
0,08	599,03	0,65	41,76	6334,93	64,58	1076370312	5,35%

Fuente: Elaboración propia

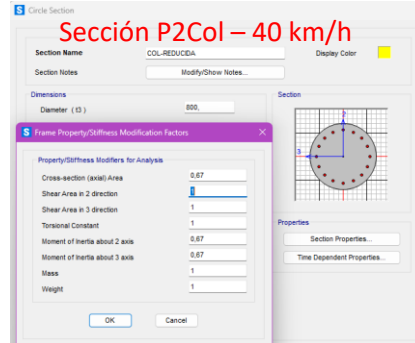
**Tabla 3.** Cálculo de inercias para modelo de apoyo tipo Muro.

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

Fuente: Elaboración propia

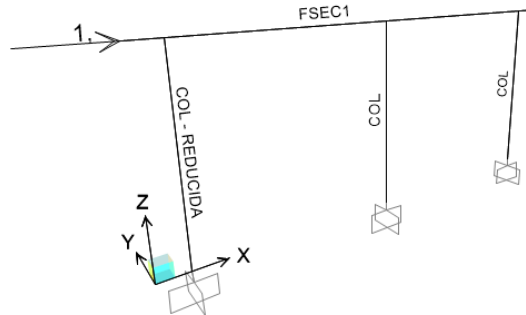
Se ingresan los porcentajes de inercia residual calculados en los modelos SAP, en el caso de los porcentajes menores a 10%, los factores asignados a la sección toman un valor de cero. A continuación, se repite el procedimiento ejecutado para calcular las rigideces de las estructuras con las nuevas inercias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

**Fig 14.** Definición de elementos de apoyo en modelo de contraste con inercias reducidas.



Fuente: Elaboración propia

**Fig 15.** 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 4.** 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%

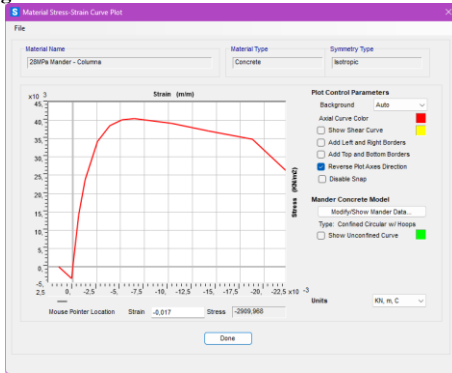
CAMIÓN PESADO					
ESTRUCTURA	V [km/h]	Ko [kN/m]	Kf [kN/m]	%K	%Perdida K
Pórtico 3 Columnas	40	233426	151194	64,8%	35,2%
	60		151194	64,8%	35,2%
	80		151194	64,8%	35,2%
Pórtico 2 Columnas	40	146627	22826	15,6%	84,4%
	60		22826	15,6%	84,4%
	80		22826	15,6%	84,4%
Apoyo tipo muro	40	6301197	4987531	79,2%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

Modelos con Inercia cero en elemento

Fuente: Elaboración propia

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.

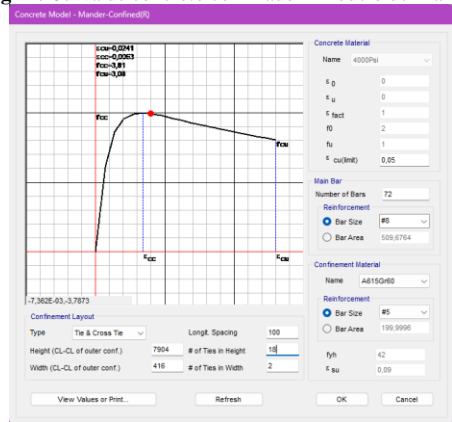
Fig 16. Curva de concreto confinado – Modelo de Mander



Fuente: Elaboración propia – SAP2000

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

Fig 17. 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. 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 5. Módulos de resiliencia.

	Velocidad [km/h]	Mod. Resiliencia [kJ/m <sup>3</sup> ]			Teórico Columna	Teórico Muro
		P. 3 columnas	P. 2 columnas	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	208,0	370,8
	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 6. Diferencias porcentuales en módulos de resiliencia.

	Velocidad [km/h]	Mod. Resiliencia [kJ/m <sup>3</sup> ]			Teórico Columna	Teórico Muro
		P. 3 columnas	P. 2 columnas	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%	208,0	370,8
	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. 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 7.** Cálculo de secciones equivalentes

CAMIÓN LIVIANO							
ESTRUCTURA	V [km/h]	If (%)	If (%)	I [mm <sup>2</sup> ]	If [mm <sup>2</sup> ]	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	256,1	256,1
	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 <sup>2</sup> ]	If [mm <sup>2</sup> ]	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 8.** Módulos de resiliencia para pilas post-impacto comparado contra módulos teóricos iniciales

	Velocidad [km/h]	Mod. Resiliencia [kJ/m <sup>3</sup> ]				Teórico Columna	Teórico Muro
		P. 3 columnas	P. 2 columnas	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	208,0	370,8	
	60	148,2	0,0	230,1			
	80	148,2	0,0	214,7			

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 9.** Porcentaje de reducción 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%. 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

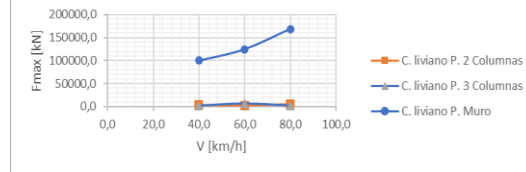
capaces de afectar enormemente su capacidad de resiliencia con una reducción hasta del 42%.

## V. ANALISIS 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.

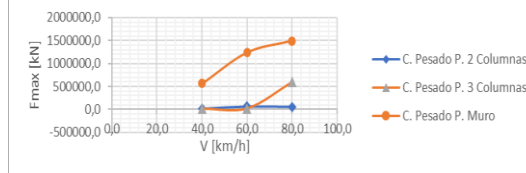
Sobre las fuerzas generadas en la estructura se encuentra una proporcionalidad directa de ésta con la velocidad a la que la estructura recibe el impacto por parte de los vehículos, sin embargo; al comparar las fuerzas obtenidas para los dos tipos de camiones, teniendo en cuenta cada velocidad y cada 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.

**Gr 19** Gráfico de Fuerza máxima Vs velocidad – Camión liviano.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

**Gr 20** Gráfico de Fuerza máxima Vs velocidad – Camión pesado.



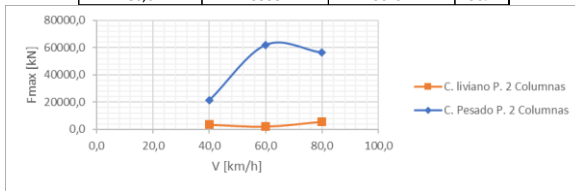
Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

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%.

**Gr 21** Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado – P. 2 Columnas.

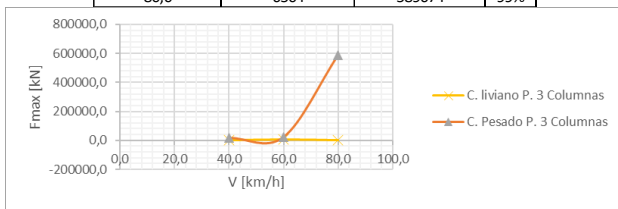
V [km/h]	V. Liviano	V. Pesado	E%
	Fmax [1/1000 kN]	Fmax [1/1000 kN]	
40,0	3466	21336	84%
60,0	2188	61906	96%
80,0	5538	56292	90%



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

**Gr 22** Gráfico de fuerza máxima vs velocidad – Camión pesado – P- 3 Columnas.

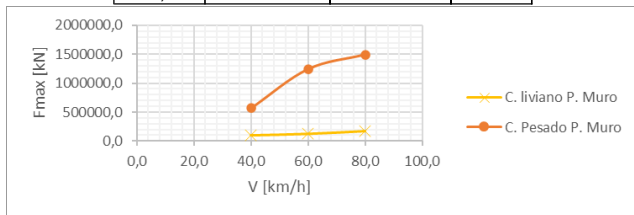
V [km/h]	V. Liviano	V. Pesado	E%
	Fmax [1/1000 kN]	Fmax [1/1000 kN]	
40,0	1476	16322	91%
60,0	1701	22225	92%
80,0	6504	589674	99%



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

**Gr 23.** 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%



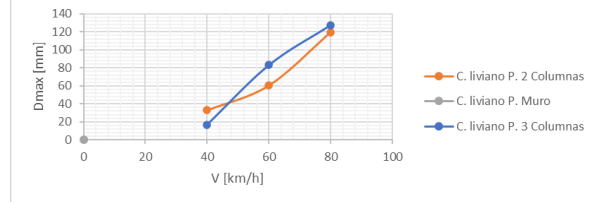
Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

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.

**Gr 24.** Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión ligero.

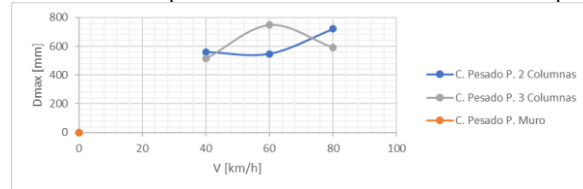


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

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.

**Gr 25.** Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

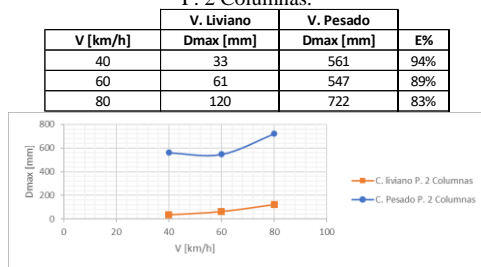
En el caso de los desplazamientos que se presenta en el apoyo de tipo muro, estos se aprecian en la gráfica como un punto naranja cercano al origen porque son muy pequeños en comparación con los gráficos azul y gris.

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

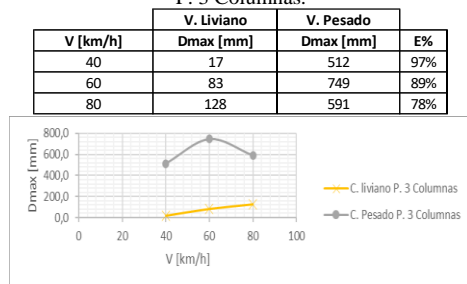
- ronda el 88% y, finalmente; a 80 km/h se observa una diferencia porcentual muy próxima al 80%.
- En términos de desplazamiento, si la carga de impacto es pesada, la velocidad de 60 km/h representa la condición más crítica para el pórtico de 3 columnas, el resto de los casos de carga pesada, sin importar el tipo estructural; el desplazamiento máximo ocurre a 80 km/h
  - 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.
  - 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.

**Gr 26.** Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado – P. 2 Columnas.



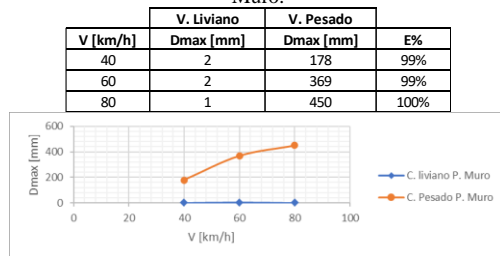
Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

**Gr 27.** Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado – P. 3 Columnas.



Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

**Gr 28.** Gráfico de desplazamiento máximo vs velocidad – Camión pesado – Muro.

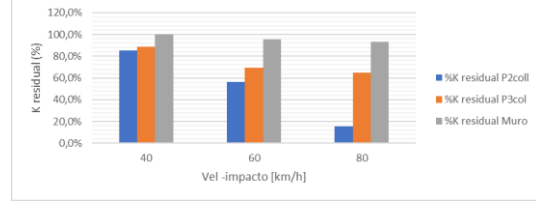


Fuente: Elaboración propia – ANSYS 2021/2022.

Según los resultados obtenidos, 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:

**Gr 29.** Rigidez residual en sistemas impactados – Camión liviano.

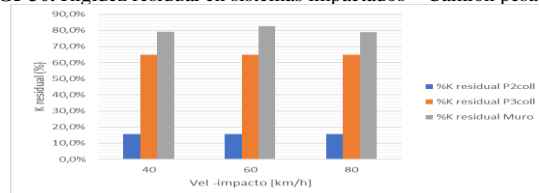


Fuente: Elaboración propia

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.

**Gr 30.** Rigidez residual en sistemas impactados – Camión pesado.



Fuente: Elaboración propia

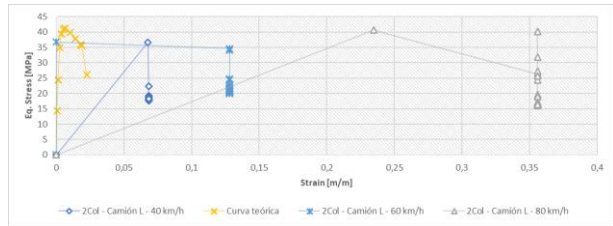
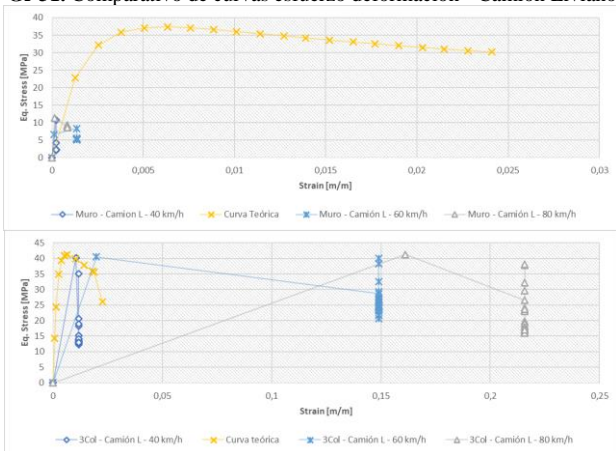
Para los casos de impacto de camión pesado en los pórticos de dos y tres columnas, el elemento que recibe toda la carga es completamente destruido, por lo tanto; como parte del análisis se considera que estos elementos ya no aportan rigidez al sistema para el análisis post-impacto. Se observa que para 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.
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.

Gr 31. Comparativo de curvas esfuerzo deformación - Camión Liviano



Fuente: Elaboración propia

Gr 32. 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.

## VI. 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.
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 sí 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.
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 aperticadas, para las cuales la inercia del elemento individual es la misma en todas sus direcciones ortogonales.
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.
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. 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. Al ser una simplificación estática 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 solicitaciones 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.

## VII. REFERENCIAS.

- [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., Hurlbauss, 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*. Ediciones UPC. [www.edicionsupc.es](http://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>)