

Diagnostico del impacto dinámico o muelleo en cimentaciones de puentes mediante la medición de ondas senoidales

José Martín Gallo Aguilar
Aguascalientes, Ags. México.



ABSTRACT.

The loads in motion per vehicle on bridges, generate elastic deformations which are transmitted to the superstructure elements, and subsequently to the foundation and the subsoil; these are perceived as vibrations resulting from a dynamic impact, and this is influenced by; velocity, vehicle loads and the surface, this phenomenon increases with the variation of building materials and dimensions that integrate a total weight or mass in the development of service the dynamic impact of service live loads is measured and detected in form of accelerations (m/s^2), as low frequency waves or sinusoidal; knowing the accelerations and natural periods, Newton's second law can be applied and a dynamic analysis is developed on materials and per gravitational mass deduced from external forces (X,Y) and internal inertia. If these are known, the response shear stress in the foundation and subsoil can be determined.

RESUMEN

Las cargas por vehiculos en movimiento en puentes generan deformaciones elásticas que son transmitidas a los elementos estructuras, cimentación y suelo de soporte, son percibidas como vibraciones derivadas del muelleo o impacto Dinámico; influye la velocidad, carga del vehículo y la superficie, el fenómeno se incrementa con la variación de los materiales de construcción y sus dimensiones que integra un peso total o masa.

En el desarrollo de este artículo se miden el Impacto Dinámico por cargas vivas de servicio detectadas en aceleraciones (m/seg^2) como ondas de baja frecuencia o senoidales; conocidas las aceleraciones y periodos naturales se aplican la segunda Ley de Newton, se desarrolla un análisis dinámico de materiales por masas gravitacionales deduciendo en las fuerzas externas(X,Y) y las internas de inercia; conocidas estas se pueden determinar los esfuerzos de respuesta al corte en la cimentación y suelo de soporte.

1 ANTECEDENTES.

El efecto del Impacto Dinámica por cargas vivas de servicio en movimiento generan un estado de vibración en las estructuras de los Puentes, la velocidad y el peso generan deformaciones y esfuerzos cíclicos que son transmitidos a la cimentación y suelo de soporte en forma de ondas senoidales.

El criterio ASSHO - AASHTO mostrado en la Ecuación [1] fue definido en los años 1930, han pasado 80 años y es utilizado en América libremente en el diseño, así como para realizar diagnósticos de comportamiento de los puentes.

La tecnología actual utilizada en el diseño de vehículos de pasajeros y de carga marca una gran diferencia por la velocidad de transporte y su impacto dinámico o muelleo con relación a las sollicitaciones de velocidad y carga generadas por las condiciones de los años 30.

Las condiciones actuales por impacto dinámico abren la posibilidad de que exista la combinación de dos formas o modos simultáneas de vibrar; el generado en un estado libre por las cargas vivas de servicio o trafico diaria que se transmite de la superficie de rodamiento a la cimentación y suelo de soporte, y el vibrado forzado por el efecto de un sismo transmitido del suelo a la

cimentación lo que implicaría la posibilidad de un estado de resonancia.

Es muy frecuente que las cargas vivas de servicio circulen en forma simultánea a velocidades y cargas variadas en el mismo sentido y otra en sentido contrario generando deformaciones que recorren una distancia en forma de ondas o vibración de choque propiciando otra posibilidad de resonancia sin que se presente un estado de vibración forzada por un sismo.

La agrupación de vehículos en movimiento las identifico como masas vehiculares en movimiento que producen fuerzas externas que se aplican a una masa estática o puente que generara fuerzas de respuesta o de inercia que se oponen al movimiento, siendo esta una manifestación de la primera Ley de Newton o de la inercia o masa.

El objetivo de este estudio es detectar las vibraciones del Impacto Dinámico por cargas vivas de servicio como deformaciones que recorren una distancia en forma de ondas senoidales a una velocidad indeterminado convirtiéndose en aceleraciones en m/s^2 transmitiendo esfuerzos dinámicos en las cimentaciones y suelo de soporte.

El diagnostico se realiza comparando los periodos de vibración de la estructura y el suelo, continuando con la

aplicación de la segunda Ley de Newton, por medio de esta se realiza un análisis por masas gravitacionales para determinar las fuerzas externas que inducen al movimiento y las de inercia que se oponen, este intercambio de fuerzas genera un estado de esfuerzo de respuesta al corte por Impacto Dinámico $I_d(x)$, $I_d(y)$, estos se toman como esfuerzos principales para la aplicación de la teoría de Coulomb y círculos de Mohr para determinar el esfuerzo cortante dinámico en la cimentación y en el suelo de soporte.

2 LUGAR DE ESTUDIO.

Se eligieron dos puntos de observación el P1 o puente Superior vial se ubica en carretera Aguascalientes – Calvillo, Ags, México. Sus características son: travesaños de acero de alma llena; la cimentación se desplanta sobre arcillas(CL) y arenas arcillosas(SC), su masa aproximada es de 250 Tn; la velocidad máxima de tránsito es de 20 a 30 km/hr no cuenta con cuerpo de pavimento por estar en reparación. existen semáforos de control a una distancia de 150 mts en ambas orientaciones oriente- poniente.

El segundo estudio es un Puente Superior Vial PSV ubicado en la carretera Ags-León, México cruce con Universidad Panamericana(P2): sus características son de concreto preesforzado desplantado sobre suelos de Arenas Limosas (SM) , la velocidad de los vehículos es de 70 a 100 km/hr:

3 TÉCNICA PARA EL DIAGNOSTICO DEL IMPACTO DINÁMICO.

3.1 Equipo utilizado y criterios generales.

Se construyó un acelerómetro con sensibilidad para registrar las vibraciones por impacto Dinámico en ondas senoidales, éstas se conducen como senos y cosenos trigonométricos por la estructura hasta la cimentación.

En las zonas urbanas en cruces con luz roja se acumula una masa vehicular (un número indeterminado de vehículos de todo tipo, cargas y velocidades variables). En el caso de puentes en carreteras libres y autopistas el paso simultánea de vehículos depende de las acciones de rebase o velocidad máxima.

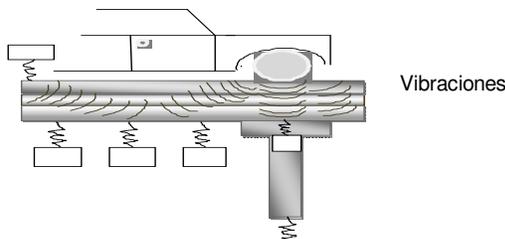


Figura 1 modelo de impacto dinámico y sistema de vibración (ondas senoidales).

El estudio se realiza aprovechando las cargas vivas reales de servicios o tráfico real en tránsito que pasa en un momento determinado. Se miden las vibraciones en aceleraciones m/s² formando los Acelerogramas que se muestran en las figuras 2, 3 y los periodos de vibración mostrados en la figura 11.

Un grupo de vehículos o tráfico vehicular en un momento determinado que pasan por un puente, se define como masa vehicular en tránsito.

3.2 ECUACIONES y FORMULAS.

Todos los fundamentos científicos y técnicos se derivan de la aplicación de la segunda Ley de Newton ecuación [2], Los principios de la energía cinética y del movimiento armónico simple son derivaciones, integraciones de la Ecuación [2].

Impacto dinámico AASHTO:

$$I_d = (15.24/L + 38) \leq 0.3 \quad [1]$$

Con la aplicación de la segunda Ley de Newton:

$$F - m \cdot a = 0 \quad [2]$$

F= fuerza de Impacto por vehículos o muelleo.

(m) = Masa del puente.

(a)= aceleración registrada con el acelerómetro.

(g)= la fuerza de gravedad.

$$K = (\text{masa/gravedad}) \quad [3]$$

$$F(x,y) = (K) \cdot (a(x,y)). \quad [4]$$

$$I_d = F(X,Y)/A. \quad [5]$$

$$I = m \cdot a \quad [6]$$

$$T = \sigma_n \tan \phi + c \quad [7]$$

$$\sigma_3 = I_d(y); \sigma_1 I_d(x) \quad [8]$$

$$\sigma_d = \sigma_3 - \sigma_1 = I_d(y) - I_d(x) \quad [9]$$

$$C = F(x) / \text{Peso del puente} \quad [10]$$

$$T=2\pi/\omega$$

[11]

3.3 Acelero gramas resultantes para el Diagnostico.

Los accelero gramas en (X,Y) de las figuras 2 y 3 son sin filtración o eliminación de ruido magnético, para esta presentación son considerados como modelación para lograr un mejor desarrollo en las comparaciones de comportamiento de los puentes en estudio.

Durante la captura en el P1 se observó un mínimo de tráfico vehicular integrado por vehículos B2, A2, C2, Ap, Ac, TR-S2-R4, B2 con velocidad de 20 – 30 km/hr en la figura 2 se muestra el accelero grama en P1 con lectura de 50 m/seg2.

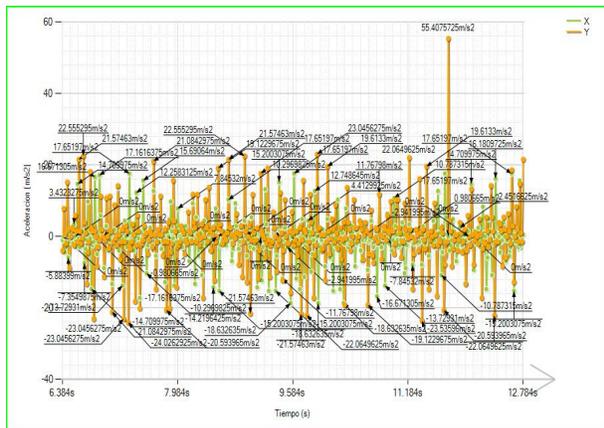


Figura 2 Cresta máxima paso simultáneos B2, C2 Ap, 50 m/sg2.

En la figura 3 se muestra el accelero grama en P2, el trafico que componía la masa vehicular era muy variado y denso con velocidades de 80 – 90 km/hr. Se caracterizo por el paso simultáneo de vehículos TR-S2-R4, B2, C3.

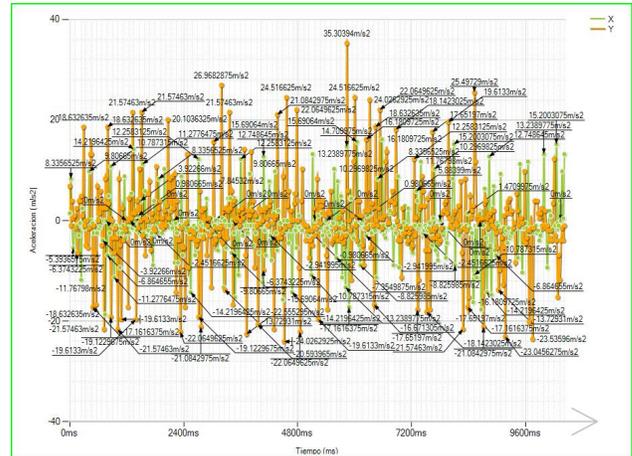


Figura 3 Cresta máxima paso de TR-S2-R4 simultáneos 59.82 m/sg2.

3.4 Determinación de Fuerzas e Impacto Dinámico.

Se interpreta a las vibraciones como deformaciones que transcurren en un lapso de tiempo convirtiéndose en aceleraciones, se registran en (X,Y); con la aplicación de la segunda Ley de Newton Ecuación [2] se convertirán en Fuerzas Externas (X,Y); considerando el factor de rigidez Ecuación [4]

El impacto Dinámico ID(X,Y) se obtiene dividiendo la Fuerza externa F(X,Y) entre el área Ecuación [5]; la Inercia equivalente a masa por aceleración ecuación [6]

3.5 Análisis dinámico de materiales por masas gravitacionales.

Para la aplicación de las Leyes de Newton es necesario conocer las masas según la tabla 1 y las aceleraciones (m/seg2) en figura 2,3; resultando en el conocimiento de las fuerzas de inercia, estas definen el estado de equilibrio tablas 2,3, 6 y 9. En la definición de la masa se consideran los pesos volumétricos de los cuerpos del pavimento, concretos y densidades para elementos estructurales de acero tabla 1, según el lugar seleccionado para colocar el sensor.

El estado de equilibrio se considero cuando las Fuerzas(x,y) son iguales a las fuerzas de inercia,(X,Y), al darse la condición de $F(X,Y) > Inercia(X,Y)$ el cuerpo inicia su estado de vibración.

Tabla 1 masas de cuerpo de pavimento y puentes.

Cuerpo	PESOS VOLUMETRICOS	ESPESOR	Masa KG
PAVIMENTO	2200 Kg/m3	15	19.8
BASE	1800 Kg/m3	20	21.6
SUB-BASE	1800 Kg/m3	30	0
TERRAPLEN	1700 Kg/m3	40	40.8
GRAVEDAD	9.8 M/SEG2		
SUMA			82.2
Masa Tn P1			250

Tabla 2 Fuerzas Externas, Inercia en cimentación masa total de P1

Eje X (m/s ²)	Fx Tn	lx	σ_1 - (Idx) Tn/m ²	Eje Y (m/s ²)	FY Tn	ly	σ_3 -(Idy) Tn/m ²
2.452	63	250	8.69	-17.2	-438	250	-60.81
-0.49	-13	250	-1.74	3.432	88	250	12.16
0.49	13	250	1.74	44.13	1126	250	156.36
-0.49	-2	250	-8.65	4.903	125	250	17.37

Esfuerzos principales ($\sigma_1 = Id(x)$), ($\sigma_3 = Id(y)$)

Tabla 3 Fuerzas Externas, Inercia en cimentación de P2

Eje X (m/s ²)	Fx Tn	lx Tn	σ_1 - (Idx) Tn/m ²	Eje Y (m/s ²)	FY Tn	ly	σ_3 -(Idy) Tn/m ²
-	-	-	-	-	-	-	-
-2.45	134	537	-18.66	14.22	779	537	108.22
-1.96	-50	537	-6.95	-1.47	-38	537	-5.21
0	0	537	0.00	-5.39	138	537	-19.11
-0.49	-13	537	-1.74	-1.47	-38	537	-5.21
14.71	375	537	52.12	35.3	901	537	125.08
-0.98	-4	537	-17.29	8.336	37	537	6.12
-1.96	-9	537	-34.58	5.884	26	537	4.32

Esfuerzos principales Impacto dinámico ($\sigma_x = Id(x)$), ($\sigma_y = Id(y)$)

3.6 Esfuerzos de respuesta al corte y círculos de Mohr.

En la figura 4 y 5 es una ilustración de la segunda Ley de Newton en la que las deformaciones producto del Impacto dinámico con una velocidad recorren una distancia originando una tendencia al movimiento convirtiéndose en aceleraciones; dicho comportamiento se desarrolla en un intercambio de fuerzas y esfuerzos de aplicación y de respuesta o de inercia para resistir el movimiento o la deformación.

Para obtener los esfuerzos al corte se toman las fuerzas de Impacto dinámico en (x) como una aplicación semejante a los esfuerzos principales que se aplica para realizar un ensayo en laboratorio para formar los círculos de Mohr tabla 4 y obtener el esfuerzo al cortante, solo que en esta aplicación es dinámico y el impacto dinámico en (y) es la fuerza de falla.

Para definir el Id(x) se considera equivalente al esfuerzo confinante, igual a las fuerzas de inercia.

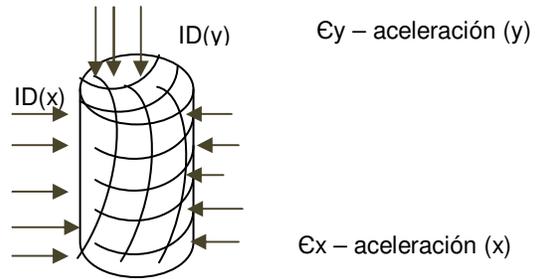


Figura 4 Modelo de Impacto dinámico- deformaciones- aceleraciones.

En la figura 5 se ilustran los esfuerzos al corte de respuesta en impacto Dinámico $ID(X) = \sigma_1$, $ID(Y) = \sigma_3$.

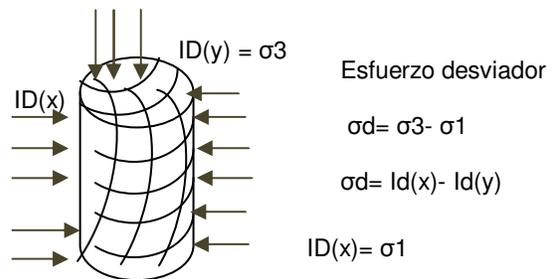


Figura 5 Modelo de interpretación del Impacto dinámico- y esfuerzos para determinar la respuestas al corte.

3.7 Respuesta al esfuerzo cortante dinámico en cimentación.

Para conocer la respuesta al esfuerzo cortante en la cimentación en el puente 1. De la tabla 2,3 los Impactos dinámicos ID en (x) y en (y) se toman como esfuerzos principales para formar los círculos de Mohr tabla 4.

Tabla 4 Esfuerzos principales para círculo de Mohr.

Esfuerzos principales	$\sigma_1 = ID(x)$	$\sigma_3 = ID(y)$	$\sigma_1 = ID(x)$	$\sigma_3 = ID(y)$
PUENTE 1 CIMENTACIÓN	1.74	12.16	8.65	17
PUENTE 2 CIMENTACIÓN	18.66	108.2	52.12	125

Tabla 5 Esfuerzo cortante de respuesta cimentación

E cortante tn/m ²	T
Puente 1	23

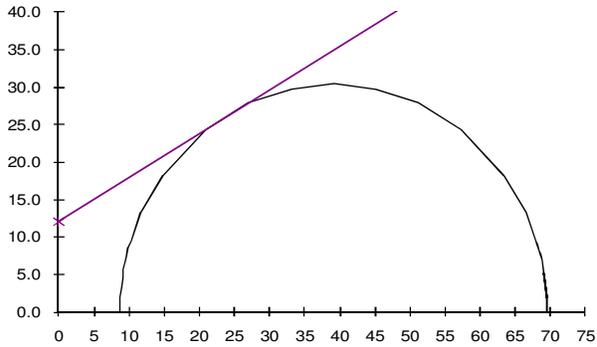


Figura 6 Respuesta al corte por impacto Dinámico en cimentación en P1 $c= 12 \text{ tn/m}^2, \phi= 30^\circ$

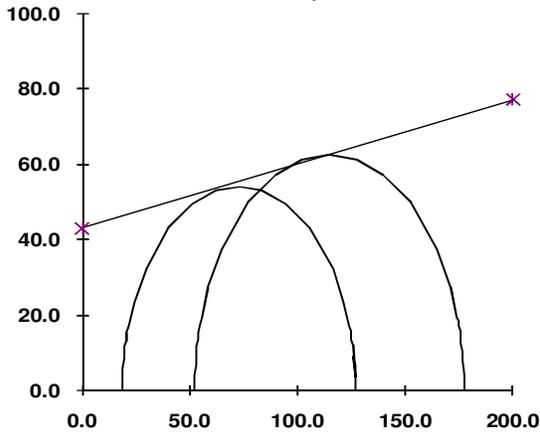


Figura 7 Respuesta al corte por impacto Dinámico en cimentación P2. $C=43 \text{ Tn/m}^2, \phi=10$.

3.8 Respuesta del suelo de soporte de cimentación.

3.8.1 Respuesta al corte suelo de soporte en Puente P1.

Para conocer la respuesta dinámica del suelo de cimentación se tomó un registro de aceleraciones en un área accesible y representativa de la zona de estudio.

De igual forma las lecturas de aceleraciones por el impacto dinámico de vehículos en movimiento en masa integrada por TR-S2-R4, B2, C3,Ap.

Tabla 6 Esfuerzos principales y Fuerzas Externas, Inercia en suelo de P1.

Eje X (m/s ²)	Fx kg	lx	σ_1 - (ldx) Kg/cm ²	Eje Y (m/s ²)	FY kg	ly	σ_3 -(ldy) kg/cm ²
------------------------------	----------	----	--	------------------------------	----------	----	---

0.49	1	15	0.13	-7.35	-188	15	-31.27
-0.98	-2	15	-0.26	2.452	63	15	10.42
0.49	1	15	0.13	3.923	100	15	16.68
0.49	1	15	0.13	43.15	1101	15	183.46
-1.47	-2	15	-0.38	6.374	163	15	27.10
0.981	2	15	0.26	-8.83	-225	15	-37.53
-6.37	-10	15	-1.66	3.923	100	15	16.68
1.471	2	15	0.38	3.923	100	15	16.68

Tabla 7 Esfuerzos principales por Impacto dinámico en suelo P1.

Esfuerzos principales	$\sigma_1 =$ ID(x)	$\sigma_3 =$ ID(y)	$\sigma_1 =$ ID(x)	$\sigma_3 =$ IDy
PUENTE 1	0.26	10.42	1.16	16.69
	0.13	183.4		

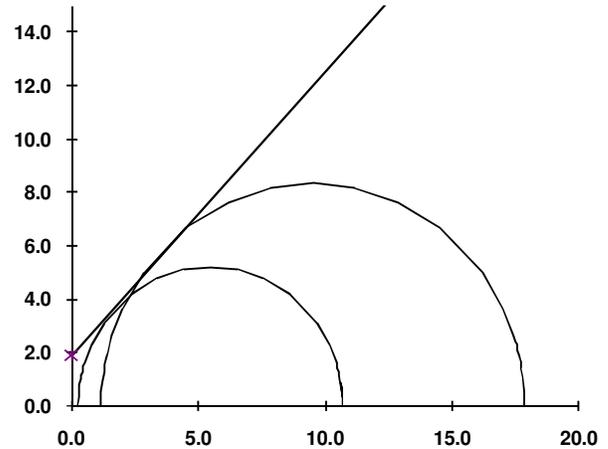


Figura 8 Respuesta al corte por impacto Dinámico en suelo P1. $C=1.9 \text{ KG/Cm}^2, \phi=47$

Tabla 8 Respuesta la corte kg/cm² por impacto dinámico en suelo P1.

Respuesta al corte	T	suelo
Puente 1	4.58	CL- SC
	63.77	CL- SC

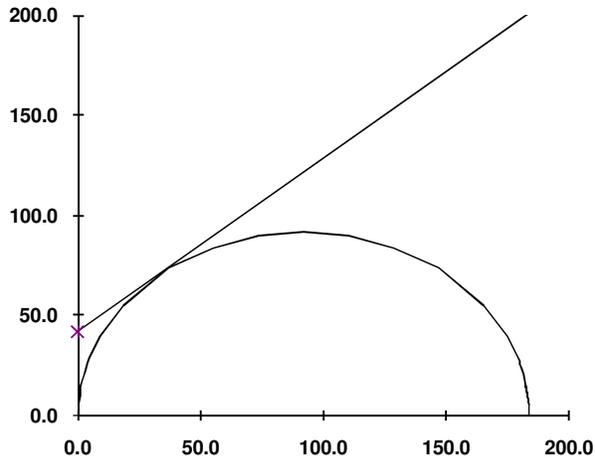


Figura 9 Respuesta al corte por impacto Dinámico en suelo P1. $C=42 \text{ KG/Cm}^2$, $\phi=41$.

3.8.2 Respuesta al corte suelo de soporte en Puesto P2.

Las lecturas registradas de aceleraciones por el impacto dinámico de vehículos corresponde a una masa vehicular integrada por dos TR-S2-R4 cargado, dos B2, tres C3, y varios Ap en paso simultáneamente sobre el puente a una velocidad de 80 -100 km/hr

Tabla 9 Esfuerzos principales y Fuerzas Externas, Inercia en suelo de P2.

Eje X (m/s ²)	Fx kg	Ix	σ_1 - (Idx) Kg/cm ²	Eje Y (m/s ²)	FY kg	Iy	σ_3 -(Idy) kg/cm ²
6.865	30	43	5.04	11.77	52	43	8.65
0	0	43	0.00	25.5	112	43	18.73
7.355	32	43	5.40	-12.3	-54	43	-9.01
0	0	43	0.00	3.923	17	43	2.88
-1.47	-6	43	-1.08	4.413	19	43	3.24

Tabla 10 Esfuerzos principales por Impacto dinámico en suelo P2.

Esfuerzos principales	$\sigma_1 =$ ID(x)	$\sigma_3 =$ ID(y)	$\sigma_1 =$ ID(x)	$\sigma_3 =$ ID(y)
Puente 2				
Cimentación	0 5.04	2.88 9.01	1.08	3.24

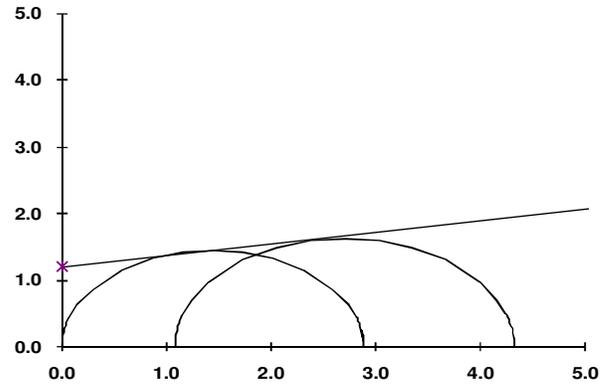


Figura 10 Respuesta al corte suelo en P2 $C=1.2 \text{ KG/Cm}^2$, $\phi=10$.

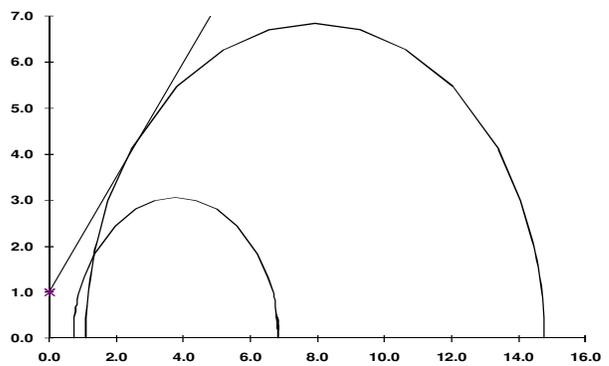


Figura 11 Respuesta al Corte suelo en P2 $c=4 \text{ kg/cm}^2$, $\phi=43$

Tabla 11 Respuesta la corte por Impacto dinámico en suelo P2.

Respuesta al corte kg/cm ²	T	suelo
Puente 2	1.53	SM
	5.77	SM

3.8.3 Periodos de vibración.

Periodos de vibración son analizados en un estado vibración libre como un comportamiento armónico simple.

Para interpretar los datos de la tabla 12 es importante no olvidar que las cargas vivas de servicio aplicadas en el P2 son más intensas en velocidad, carga y número de vehículos.

Tabla 12 Periodos en de vibración en estado libre aplicación (Y).

elemento	Suelo	T suelo	T Estructura
Puente 1	CL- SC	0.017 -0.0 24	0.024- 0.032
Puente 2	SM- SC	0.032	0.018- 0.024

estructurales. Si se logra realizar un diseño dinámico que tome en cuenta la presencia de dos estados de vibración en forma simultánea se lograrían cimentaciones para puentes más resistentes al comportamiento dinámico combinado por el impacto dinámico de cargas vivas y ante un sismo.

No fue posible contar con datos de proyecto para realizar un análisis completo de periodos naturales de vibración para determinar un estado de resonancia.

5 EQUIVALENCIA DE FUERZAS A PESO SEGUN TIPO DE VEHICULOS.

Conocidas las fuerzas externas, así como las de inercia tabla 16 se pueden conocer el número y tipo de vehículo que puede soportar el puente para mantener un estado de equilibrio dinámico según el criterio de D'Alembert. Tabla 16, 17,18.

En la tabla 16 el Impacto Dinámico es en relación al área total de la superficie de rodamiento.

Tabla 16 Impacto dinámico en el área total del puente.

PUENTE	E- X m/seg ²	Inercia Tn	ID T/m ²
P1	17.65	449.85	1.87
P2	14.71	805.22	2.01
E-Y m/seg ²		Inercia Tn	ID T/m ²
P1	55.41	1412.02	5.88
P2	59.82	3274.58	8.19

En la tabla 17 con los valores de la inercia de la tabla 16 desarrollamos la ecuación [6] y [2] para deducir los pesos de los vehículos que soportan los puentes.

Tabla 17 total de vehículos en equilibrio con la masa

Puente	masa	T3-S2-R4	T3-S2-R4	T3-S2-R4
P1 E-X	250	3.07	3.5	3.73
P2 E-Y	537	6.59	7.51	8.05
P1 E-Y	250	3.07	3.5	3.73
P2 E-Y	537	6.59	7.51	8.01

Tabla 18 total de vehículos en equilibrio con la masa

	Ap	Ac	B2	C2	B3	C3	T2-S1	T3-S3	T3-S2
P1x	417	76	31	17	16	15	11	5.1	5.68
P2x	895	163	67	36	34	32	24	11	12.2
P1y	417	76	31	17	16	15	11	5.1	5.68
P2y	895	163	67	36	34	32	24	11	12.2

6 BIBLIOGRAFIA.

Colindres Selva Rafael, 1985, Dinámica de suelos y Estructuras Aplicadas a la Ingeniería Sísmica, 1 ed, Limusa, México D..F

Meli Piralla Roberto, 1987 Diseño Estructural, 2nd ed, Limusa, México D.F.

Crespo Villalaz Carlos, 1993, Mecánica de suelos y Cimentaciones, 2 nd ed, Limusa, México D.F.

Luis I. González de Vallejo, Mercedes Ferrer, Luis Ortuño, Carlos Oteo, 2006, Ingeniería Geológica, ultima impresión, Pearson Prentice Hall, Madrid.