

Diseño de Puentes de Losa.

Autor: Egberto Jesús Álvarez Trujillo. Estudiante 5to año Ingeniería Civil.
eatrujillo@uclv.edu.cu

Tutor: Dr. Ing. Luis O. Ibañez. Dpto Ingeniería Civil.
Universidad Central de Las Villas. Villa Clara. Cuba
Ibanez@uclv.edu.cu

1.1- Tipología

A través de la historia, los puentes en sus variados tipos y formas, han evolucionado sustancialmente dependiendo fundamentalmente de dos aspectos: conocimiento que tiene el hombre de las características de los materiales y del comportamiento de estos desde el punto de vista de la resistencia a los diferentes esfuerzos que son sometidos.

El primero ha motivado el desarrollo de nuevos tipos, desde los inicios cuando los materiales utilizados eran la madera y la piedra, luego cuando apareció el acero como material para la construcción que mas tarde se combinaría con el hormigón para formar el hormigón armado, gran salto este en la evolución de los materiales no solo para la construcción de puentes si no también para todo tipo obras de la rama de la construcción. Después al aparecer los aceros de un alto límite elástico se dio paso al hormigón pretensado, importantísimo avance en la búsqueda de salvar grandes luces sin la necesidad de colocar pilas intermedias.

Referente al segundo aspecto acerca del conocimiento del comportamiento de los materiales desde el punto de vista de la resistencia a los diferentes esfuerzos a permitido la reducción en las secciones de los elementos componentes del puente y además usar los criterios técnicos provenientes de los resultados obtenidos de diversos análisis para llegar a conformar así nuevos tipos con una adaptación mejor del puente como conjunto a la función estructural encomendada.

En este epígrafe se ilustraran algunas de las clasificaciones más utilizadas pero sin llegar a un gran nivel de detalle, es decir, de manera global, recogiendo en lo fundamental aquellas que nos permitan tipificar los puentes mas usados en la actualidad.

1.1.1- Atendiendo a su utilización.

Son clasificados como:

- ✓ Pasarelas para cruce de peatones.

- ✓ Puentes de carretera.
- ✓ Puentes de ferrocarril.
- ✓ Puentes de conducción de fluidos (líquidos o gases).

1.1.2- Materiales constructivos.

Se clasifican en:

- ✓ de madera.
- ✓ de piedra.
- ✓ de acero
- ✓ de hierro.
- ✓ de hormigón armado.
- ✓ de hormigón pretensado.

1.1.3- Atendiendo a su estructura.

Pueden ser:

- ✓ puentes de estructura isostática.
- ✓ puentes de estructura hiperestática.

1.1.4- Atendiendo a la tecnología constructiva empleada.

Se clasifican en:

- ✓ puentes fundidos en el lugar.
- ✓ puentes con estructura prefabricada.
- ✓ puentes mixtos.

1.1.5- Atendiendo al desarrollo de la estructura longitudinal.

- ✓ puentes de tramo recto
- ✓ puentes de arco
- ✓ puentes colgantes

1.1.5.1- Puentes de tramo recto.

- ✓ sencillo
- ✓ múltiple
- ✓ continuo
- ✓ compensado
- ✓ pórtico
- ✓ de ménsula
- ✓ de armadura

1.1.5.2- Puentes de arco.

- ✓ de tablero superior.

- ✓ de tablero inferior.
- ✓ de tablero intermedio.
- ✓ atirantado.
- ✓ de arco tímpano.
- ✓ de arco con bielas.

1.1.5.3- Puentes colgantes.

- ✓ de cable o tensores rectos.
- ✓ de cables o tensores curvos.

1.1.6- Atendiendo al desarrollo de la estructura transversal.

Se clasifican en:

- ✓ puentes de losa.
- ✓ puentes de viga-losa.
- ✓ puentes de sección cajón.

1.2- Análisis de la carga vertical móvil o vehículo de diseño en diferentes normativas.

Sobre la concepción de que vehículo considerar como idóneo para la carga vertical móvil, a la hora de realizar el diseño de un puente, se ha generado en el mundo una gran diversidad de criterios. Evidentemente la característica específica del tránsito en el área donde se llevará a cabo la realización del proyecto es un elemento determinante en que existan estas diferencias; llámese área a una región que contenga varios países (Centro América, Europa, Asia) que puedan tener variaciones de tránsito permisibles que pueda utilizarse una normativa común en el caso del vehículo de diseño. Puede ser también un país independiente o una zona determinada que presente características excepcionales del tránsito, por lo que sea más factible económica y/o constructivamente hacer un análisis independiente y no considerar una norma que pueda estar vigente en la región o país.

A continuación se muestra alguna de las normas vigentes en el mundo y como conciben el vehículo de diseño o carga vertical móvil para sus condiciones particulares de tránsito.

1.2.1- Norma Cubana

La siguiente norma plantea que para el diseño de puentes en autopistas, carreteras y vías urbanas la carga a utilizar es la referente los vehículos N-30 y NK-80 (Norma Cubana NC 53-125, de 1984).

a) Carga característica N-30

La carga accidental característica N-30 se considera formada por un convoy ilimitado de vehículos con un peso de 300 kN cada uno y cuyas características se muestran en la Fig. 1.

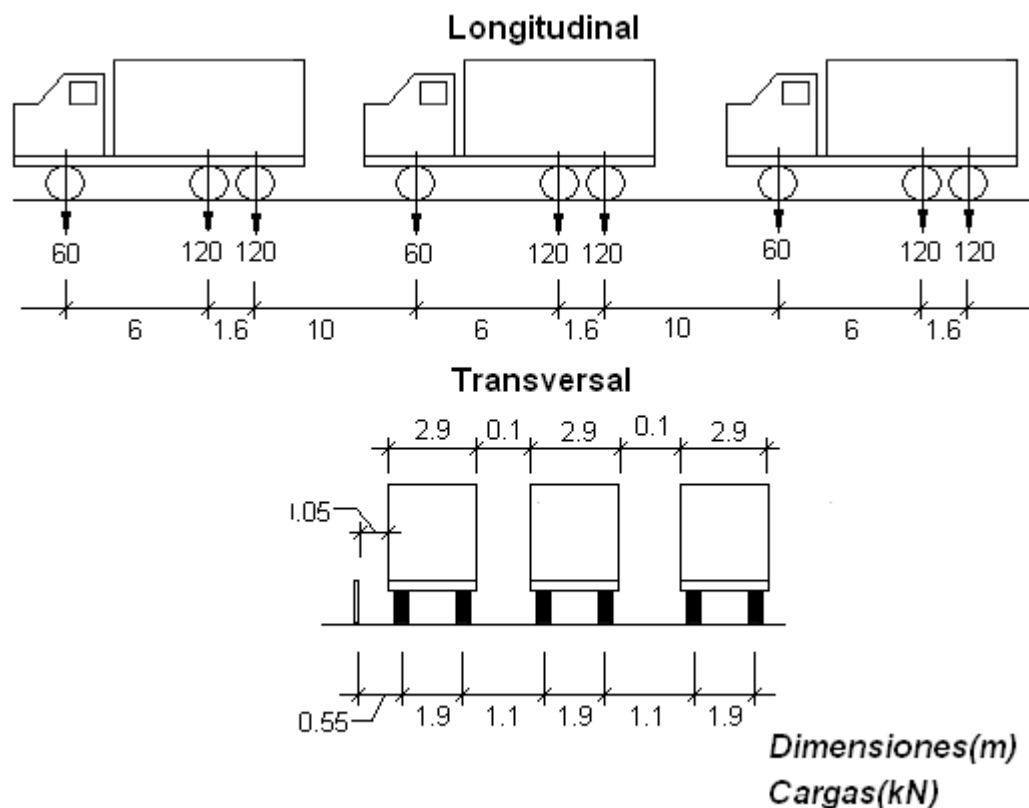


Fig. 1 Disposición del vehículo N-30.

✓ Definición del área de contacto de los neumáticos sobre el pavimento.

Tabla 1: Área de contacto de los neumáticos sobre el pavimento.

Posición	Ancho(m)	Largo(m)
Posteriores	0.6	0.2
Delanteros	0.3	0.2

✓ Colocación de los vehículos.

Transversales: La colocación de los vehículos en el ancho de la calzada se hará situando cualquier número de convoyes de vehículos paralelos al eje del puente y en el mismo sentido, con el objetivo de conseguir los efectos más desfavorables, para los cuales se tendrán en cuenta los criterios de separación entre vehículos y separación de vehículo al borde interior de un pretil-defensa que se muestran en la Fig. 1.

Longitudinal: La colocación de los vehículos en la longitud del puente se hará variando la separación entre vehículos para así buscar el efecto más desfavorable para la losa (Separación mínima entre vehículos de 10m).

✓ Reducción de la carga atendiendo a número de sendas cargadas.

Cuando la longitud sea mayor de 25m se le aplicara una reducci3n a la carga de acuerdo al n3mero de columnas de veh3culos colocados transversalmente seg3n como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2: Factor de reducci3n por varias sendas cargadas

Cantidad de columnas de veh3culos colocados transversalmente	2	3	4 y mas
Coeficiente de uso Ø	0.9	0.8	0.7

✓ Carga equivalente.

La norma permite sustituir la carga N-30 para el dise1o de los elementos principales del tablero (vigas longitudinales, arcos y p3rticos), por una carga uniformemente distribuida equivalente que se encuentra en funci3n de la longitud cargada, posici3n del v3rtice de la l3nea de influencia y aplicable solamente para l3neas de influencia triangulares (Anexo A de la Norma Cubana). Tambi3n ser3 aplicado un coeficiente din3mico o de impacto as3 como su respectivo coeficiente de sobrecarga.

b) Carga caracter3stica NK-80

La carga especial NK-80 se considerara formada por un solo veh3culo de 800 kN cuyas caracter3sticas se muestran en la Fig. 2.

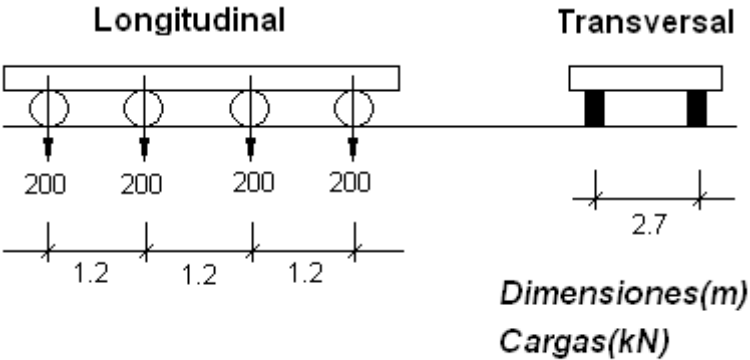


Fig. 2 Disposici3n del veh3culo NK-80.

✓ Definici3n del 3rea de contacto de los neum3ticos sobre el pavimento.

Tabla 3: 3rea de contacto de los neum3ticos sobre el pavimento.

Ancho(m)	Largo(m)
0.8	0.2

✓ Colocaci3n de los veh3culos.

Transversales: La colocaci3n de los veh3culos en el ancho de la calzada se har3 situando un solo veh3culo paralelo al eje del puente y en aquella posici3n que produzca el efecto mas desfavorable pero con una distancia entre el eje de la rueda y el borde interior del pretil-defensa nunca menor de 0.65m.

Longitudinal: Se colocará siempre en el lugar mas desfavorable para el efecto que se realice.

✓ Reducción de la carga atendiendo a número de sendas cargadas.

No se aplicara coeficiente de reducción ya que como se planteo anteriormente el análisis con el NK-80 se realizara considerando una sola columna de vehículos.

✓ Carga equivalente.

La carga equivalente para el NK-80 esta en función de los mismos requisitos que las especificadas para el N-30 (Anexo A de la Norma Cubana). Es importante aclarar que en este caso no se considera ningún coeficiente dinámico o de impacto.

NOTA: La carga NK-80 no se incluye en las combinaciones complementarias ni particulares y además no se considera con las cargas de acera, todo esto para el caso de autopistas, carreteras y vías urbanas.

1.2.2- Especificaciones AASHTO (Estándar).

La American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO 2004) de los Estados Unidos de América contiene las especificaciones que normalmente utilizan en el proyecto de puentes la mayoría de los países del mundo. Estas especificaciones han ido evolucionando al paso del tiempo pudiéndose mencionar la de 1931 como la primera y ya suman más de 15 hasta la actualidad.

Según la AASHTO hay dos clases principales de camiones: los denominados con la letra H seguida de un número y los designados con las letras HS, seguidas también de caracteres numéricos.

Los camiones de tipo H tienen solo dos ejes y el número que le sigue a la H en la denominación indica el peso total del camión cargado. Los camiones HS son vehículos tipo, con tractor y semirremolque, es decir, tres ejes. El número que sigue a las letras HS es el peso del tractor o par de ejes delanteros. El peso del semirremolque o tercer eje es el 80% del peso del tractor.

NOTA: En ambos casos el número que representa la carga está dado en toneladas americanas de 2000 libras.

A continuación se muestra cada uno de estos vehículos en detalle.

a) Vehículos H.

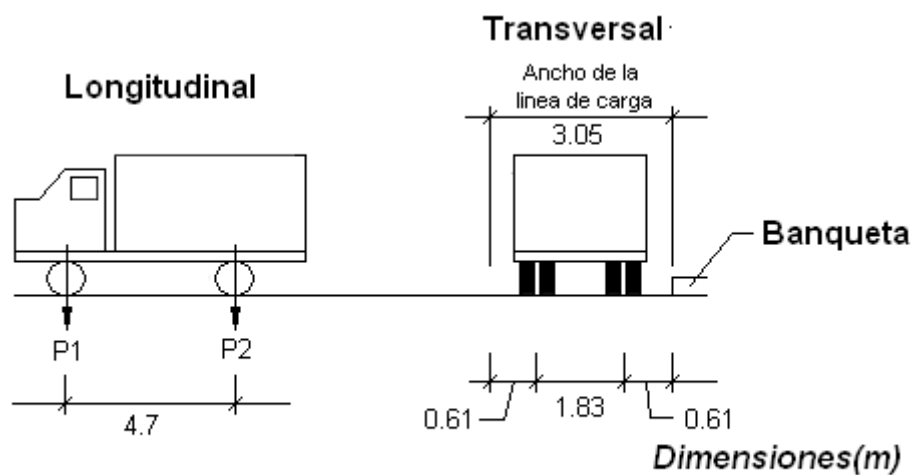


Fig. 3 Disposición para los vehículos H.

Tabla 4: Cargas por eje y total para los vehículos tipo H.

Vehículos	P1(kN)	P2(kN)	Peso total(kN)
H15	30	120	150
H20	40	160	200
H25	50	200	250

b) Vehículos HS.

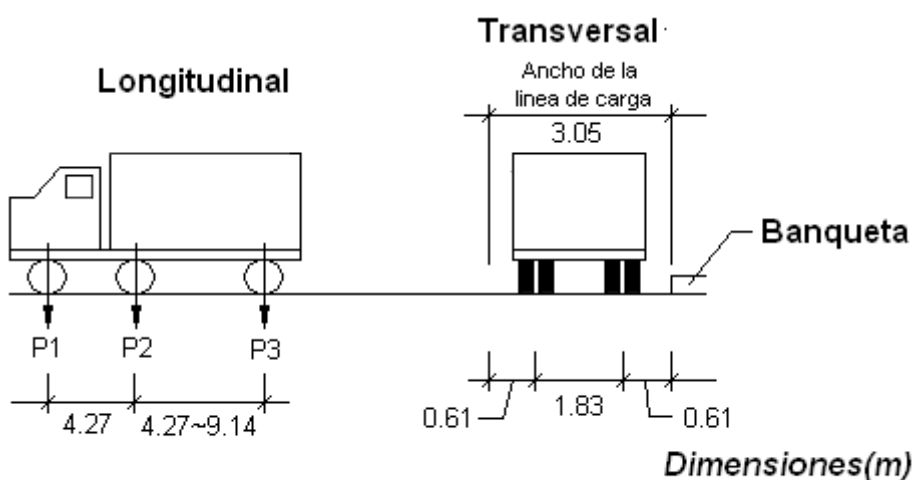


Fig. 4 Disposición para los vehículos HS.

Tabla 5: Cargas por eje y total para los vehículos tipo HS.

Vehículos	P1(kN)	P2(kN)	P3(kN)	Peso total(kN)
HS20	40	160	160	200
HS25	50	200	200	250

Nótese que la distancia entre el eje con carga P2 y el eje con carga P3 puede variar entre 4.27 y 9.14, dado esto a que la norma define que podrá tomarse a aquel numero que cumpliendo con el intervalo nos brinde los esfuerzos mas desfavorables para el elemento que se este analizando. La norma plantea además que cuando se utilice el camión H20 o el HS20 los ejes de 160kN se desdoblen en ejes de 80kN con separación de 1.2m, mas desfavorables estos para luces mayores de 3.2m y se recomienda entonces para luces menores el camión H15 con eje trasero de 120kN.

✓ Carga equivalente.

La carga distribuida equivalente esta unida a un eje transversal de cargas concentradas con el propósito de modelar el efecto de un congestionamiento vehicular sobre el puente. Mediante el eje transversal de carga concentrado se modela la existencia de algún vehículo de mayor carga en algún lugar del tren de vehículos congestionados (Fig. 5).

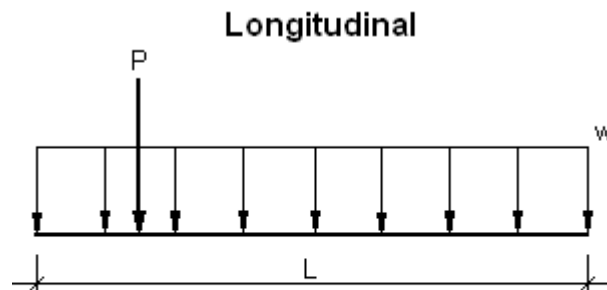


Fig. 5 Esquema de carga equivalente para vehículos HS.

Tabla 6: Valores de carga concentrada (P) y carga equivalente (w) para los vehículos tipo HS.

Vehículo	P(kN)		W(kN/m)
	Para momento	Para cortante	
HS20	82	118	9.6
HS25	102	147	1.2

La razón por la cual la carga concentrada sea mayor para solicitaciones de corte que la correspondiente a momentos flectores se debe al tipo de falla frágil de los elementos sometidos a fuerzas cortantes y la falla dúctil de los elementos sometidos a momentos

flectores. Este enfoque de diseño permitirá que los puentes siempre tengan falla de tipo dúctil.

Generalmente el tren de cargas concentradas (HS20 y HS25), domina el diseño de elementos estructurales con distancias relativamente pequeñas de hasta 40m de luz, mientras que para grandes luces son las cargas distribuidas equivalentes las que definen el diseño de los elementos con tales luces.

✓ Definición del área de contacto de los neumáticos sobre el pavimento.

Tabla 7: Área de contacto de los neumáticos sobre el pavimento.

Ancho(m)	Largo(m)
0.51	0.25

Esta área será independientemente del vehículo que se este analizando.

✓ Incremento por carga dinámica(IM)

Tabla 8: Factor de incremento por carga dinámica.

Componentes	IM (%)
Juntas de tablero • Todos los estados límites.	75
Los demás componentes • Estado Límite de fatiga y rotura • Los demás Estados Límites	15 33

El valor a aplicar a la carga estática será: $(1+IM/100)$

✓ Reducción de la carga atendiendo al número de sendas cargadas.

Tabla 9: Factor de reducción por varias sendas cargadas.

Cantidad de columnas de vehículos colocados transversalmente	1	2	3	>3
Coeficiente de uso ϕ	1.2	1	0.85	0.65

1.2.3- Especificaciones AASHTO (LRFD).

La propuesta **AASHTO (LRFD)** (AASHTO 2004) consta de un camión de diseño igual al HS20 de la AASHTO (Estándar) lo que con la diferencia que ahora se considerara un tándem de diseño que consta de 2 ejes espaciados a 1.2m y con carga de 120kN cada uno, con denominación HL93.

La solicitud se deberá tomar como la mayor entre: solicitud del camión de diseño combinada con la carga el carril de diseño o solicitud de tándem de diseño con carga de carril de diseño. La carga definida para el carril de diseño es de 9.3 kN/m.

De manera general si se observa con detenimiento los valores de momento en función de la luz salvada tabulados en la Tabla 10 a partir de hacer un análisis de la dos propuesta AASHTO con sus vehículos tipos utilizados para el diseño de puentes, podemos apreciar las diferencias que pueden existir al utilizar uno u otro vehículo o carga equivalente.

Tabla 10. Momentos máximos (kN*m) producidos por los camiones de diseño establecidos por la AASHTO.

Luces(m)	AASHTO HS20		AASHTO HS25		AASHTO LRFD	
	Camión	Equivalente	Camión	Equivalente	Camión	Tándem
5	181.4	131.8	226.8	164.8	211.2	244.1
10	448.1	323.2	560.2	404.0	559.7	616.9
15	842.3	574.0	1052.8	717.6	1105.5	1049.2
20	1245.8	884.4	1557.3	1105.6	1722.0	1541.1
25	1654.1	1254.4	2067.6	1568.0	2398.1	2092.4
30	2062.3	1683.8	2577.9	2104.8	3133.8	2703.3
35	2470.5	2173.8	3088.1	2716.0	3928.9	3373.7
40	2878.8	2721.3	3598.4	3401.6	4783.6	4103.7
45	3287.0	3329.4	4108.7	4161.7	5697.8	4893.2
50	3695.2	3996.9	4619.0	4996.1	6671.5	5742.2
55	4103.5	4724.1	5129.3	5905.0	7704.8	6650.7
60	4511.7	5510.6	5639.6	6888.3	8797.6	7618.7

1.2.4- Norma Mexicana.

En México, no obstante que se utilizan las normas AASHTO para el proyecto de puentes, las cargas móviles de diseño que se usan son las denominadas T3-S3 y T3-S2-R4, que identifican a camiones reales cuyo tránsito está permitido en las carreteras del país.

Como dato histórico, es bueno mencionar que hasta el año 1972 las cargas móviles utilizadas para el proyecto de puentes carreteros en México fueron la HS15 y HS20. A partir de este 1972 y hasta 1980, se generalizó el uso de la carga HS20, fue después de 1980 entonces que comenzaron a utilizarse las cargas T3-S3 y T3-S2-R4 con pesos totales de 485kN y 665kN respectivamente. Sus características particulares se muestran en la Fig. 6.

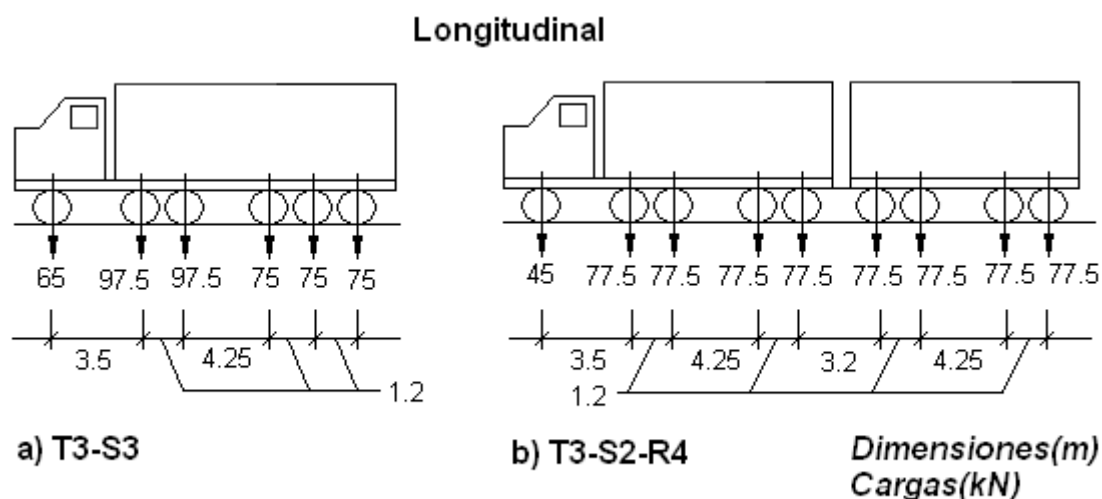


Fig. 6 Disposición de los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4.

1.2.5- Norma Peruana

En Perú no existe un reglamento propio para el diseño de puentes. Durante muchos años se estuvo diseñando según las especificaciones americanas AASHTO, hasta que se realizó un análisis entre los esfuerzos provocados por la carga viva de diseño AASHTO y los que generaban los vehículos que realmente circulaban por las vías peruanas. Los resultados arrojaron que las solicitaciones de los vehículos reales estaban en el orden de un 20~25% mas grandes que las de los vehículos estipulados por la AASHTO. Esto los llevó a tomar la decisión transitoria de acogerse al Reglamento Francés pero ahora con el problema opuesto, las cargas de los vehículos por las que se rige la norma francesa provocaban esfuerzos mayores trayendo esto como consecuencia un sobre diseño. En la actualidad la norma peruana considera como carga móvil de diseño lo igualmente considerado por la AASHTO (LRFD) cuyas características ya fueron abordadas en el epígrafe 1.2.3.

1.2.6- Norma para Centro América

La norma para Centro América en lo referente al vehículo de diseño (número de ejes, carga por cada uno de ellos, dimensiones, consideraciones para el sistema de carga equivalente, el carril de diseño, cantidad de estos), hace una copia de la norma AASHTO específicamente el vehículo tipo HS20. Mencionar que no tiene dentro de sus consideraciones el tándem de diseño que propone la AASHTO con su propuesta LRFD.

La norma si especifica sus factores de reducción por fajas cargadas a la misma vez (m), así como el coeficiente de incremento de carga por el impacto de la carga móvil a

través de una expresión que se muestra a continuación (Manual de carreteras de la República de Honduras Tomo 6, de 1996).

✓ Reducción de la carga atendiendo al número de sendas cargadas.

Tabla 11: Factor de reducción por varias sendas cargadas.

Numero de fajas cargadas	1	2	3	>3
Factor (m)	1	1	0.9	0.75

✓ Incremento por carga dinámica o de impacto (I)

$$I = \frac{15.24}{L + 38} \leq 30\%$$

Donde:

L: longitud de la estructura cargada para producir máximos en el elemento.

1.2.7- Eurocódigo.

Un poco particular en relación a las demás normas ya vistas anteriormente, el Eurocódigo (Eurocódigo 1 Parte 3, de 1998) tiene 4 modelos de de cargas para cargas verticales, que representa los siguientes efectos del transito:

1. Modelo de carga 1: Cargas concentradas y uniformemente distribuidas, que cubren la mayoría de los efectos del transito de coches y camiones. Este modelo esta defino para comprobaciones locales y generales.

2. Modelo de carga 2: Una carga de un eje simple, aplicada en un área especifica de contacto de la rueda, que cubre los efectos dinámicos del tráfico normal en elementos estructurales muy cortos. Este modelo debe ser considerado aisladamente y solo se utiliza en comprobaciones locales.

3. Modelo de carga 3: Un conjunto de cargas de ejes que representan vehículos especiales (por ejemplo, para transporte industrial) que pueden viajar por carreteras especiales autorizadas para cargas especiales. Este modelo esta definido para ser utilizado solamente cuando lo requiera la propiedad, para comprobaciones locales y generales.

4. Modelo de carga 4: La carga de una muchedumbre. Este modelo debe ser considerado solo cuando la propiedad lo requiera. El modelo esta definido solo para comprobaciones generales.

NOTA: Los Modelos de Carga 3 y 4 se definen solamente para algunas situaciones de proyecto transitorias.

Algo igualmente diferente es la manera de planificar la distribución transversal de la vía, no tienen ese criterio de lo que hasta ahora conocíamos como carril de diseño, si no que para ellos la vía tendrá carriles teóricos y un área residual, cuyos requisito y expresiones de cálculo se encuentra en la siguiente Tabla.

Tabla 12: Números de carriles teóricos, su ancho y ancho del área residual.

Ancho de plataforma w .	Numero de carriles teóricos.	Ancho de un carril teórico (m).	Ancho del área residual (m).
$w < 5.4m$	$n_1 = 1$	3.0	$W=3.0$
$5.4m \leq w < 6.0m$	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$w \geq 6.0m$	$n_1 = \frac{w}{3}$ entero	3.0	$w - 3 * n_1$

Después que se halla realizado el cálculo de la cantidad de carriles teóricos es necesario clasificarlos. La norma establece que para cada proyecto concreto la numeración de los carriles debe darse para que exista una correspondencia con las condiciones del tráfico normalmente esperadas. Esta numeración esta dada por los efectos que incidirán en la vía durante su periodo de diseño siendo el carril teórico número 1 aquel que se estime sufrirá las condiciones más desfavorables y así se seguirán enumerando según la definición hasta haberlos enumerado todos.

Estas consideraciones seran de mucha ayuda para la comprension de las especificaciones que tiene la norma en los diferentes modelos de carga.

1.2.7.1- Modelo principal de carga (Modelo de carga 1).

El sistema principal de carga consta de dos sistemas parciales:

- a) Cargas concentradas en un eje doble (sistema tándem TS) los ejes tienen un peso $P = a_{Qi} * Q_{ik}$ y dimensiones que se muestran en el esquema siguiente.

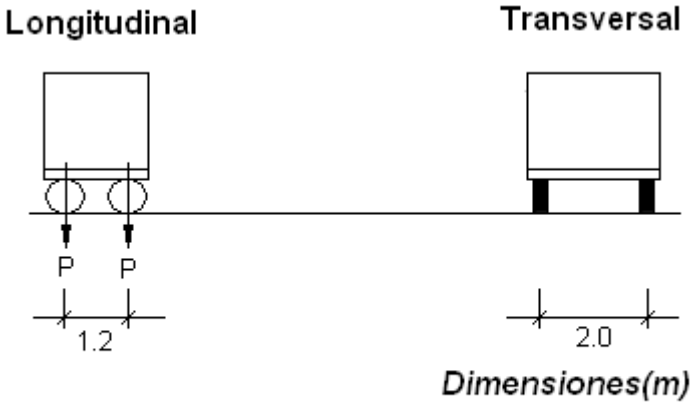


Fig. 7 Disposición del sistema tandem TS.

b) Cargas uniformemente distribuidas (sistema UDL), de valor por metro cuadrado:

$q_i = a_{qi} * q_{ik}$ para los carriles y $q_r = a_{qr} * q_{rk}$ para el área residual.

a_{qi} , a_{qi} y a_{qr} Son coeficientes de ajuste, solo pueden ser $\neq 1$ si han sido escogidos de acuerdo con la autoridad competente.

NOTA: Para puentes que no tengan restricciones del peso de los vehículos $a_{q1} \geq 0.8$.

Los valores Q_{ik} , q_{ik} y q_{rk} se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 13: Cargas por eje del tándem y cargas distribuidas de los carriles teóricos y área residual.

Situación	Sistema tándem	Sistema UDL
	Cargas por eje Q_{ik} (kN)	q_{ik} o q_{rk} (kN/m^2)
Carril #1	300	9
Carril #2	200	2.5
Carril #3	100	2.5
Resto de carriles	0	2.5
Área residual q_{rk}	0	2.5

NOTA: La amplificación por carga dinámica o de impacto esta incluida en los valores de Q_{ik} y q_{rk} .

✓ Definición del área de contacto de los neumáticos sobre el pavimento.

Tabla 14: Área de contacto de los neumáticos sobre el pavimento.

Ancho(m)	Largo(m)
0.4	0.4

La siguiente figura ayudará a una mejor comprensión del sistema de cargas para carriles teóricos y área residual que propone el modelo principal de carga.

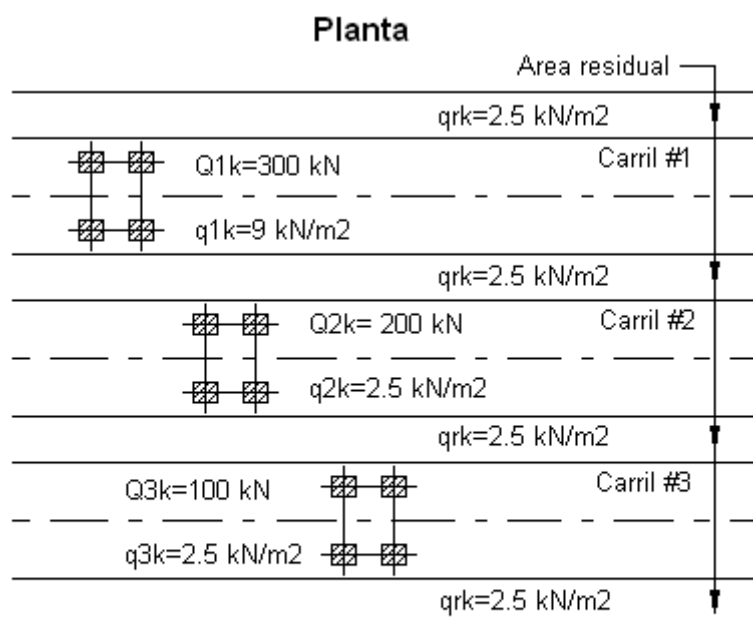


Fig. 8 Sistema general de cargas para el modelo de carga 1.

1.2.7.2- Modelo de eje simple (Modelo de carga 2).

El modelo es un eje simple cargado con $P = \beta_Q \cdot Q_{ak}$, con $Q_{ak} = 400 \text{ kN}$ y $\beta_Q = a_{Q1}$ salvo que se especifique otro valor.

✓ Definición del área de contacto de los neumáticos sobre el pavimento.

Tabla 15: Área de contacto de los neumáticos sobre el pavimento.

Largo(m)	Ancho(m)
0.35	0.60

A continuación se muestra la figura que ilustra el caso.

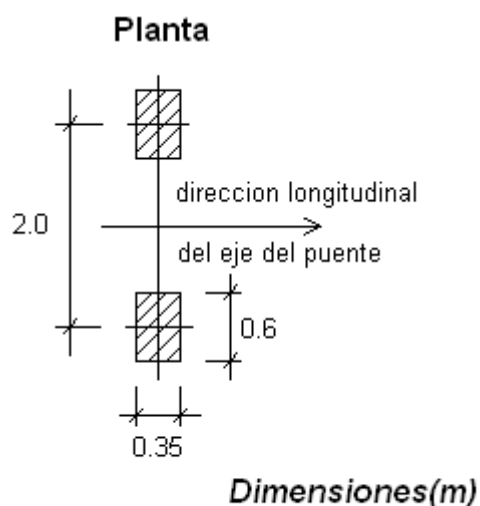


Fig. 9 Esquema de eje simple.

1.2.7.3- Conjunto de modelos de vehículos especiales (Modelo de carga 3).

Cada modelo normalizado es aplicable en un carril teórico (considerado como carril #1, Fig. 10a)) para los modelos compuestos de 150 y 200kN, en dos carriles teóricos adyacentes (considerados como carriles #1 y #2, Fig. 10b)) para los modelos compuestos de ejes de 240kN. Los carriles se dispondrán en la situación más desfavorables dentro de la calzada. Los vehículos están formados por ejes de 2 ó 3 aéreas de contacto con el pavimento, según sea el peso, igualmente separados entre ellos a 1.5m, véase Fig. 11.

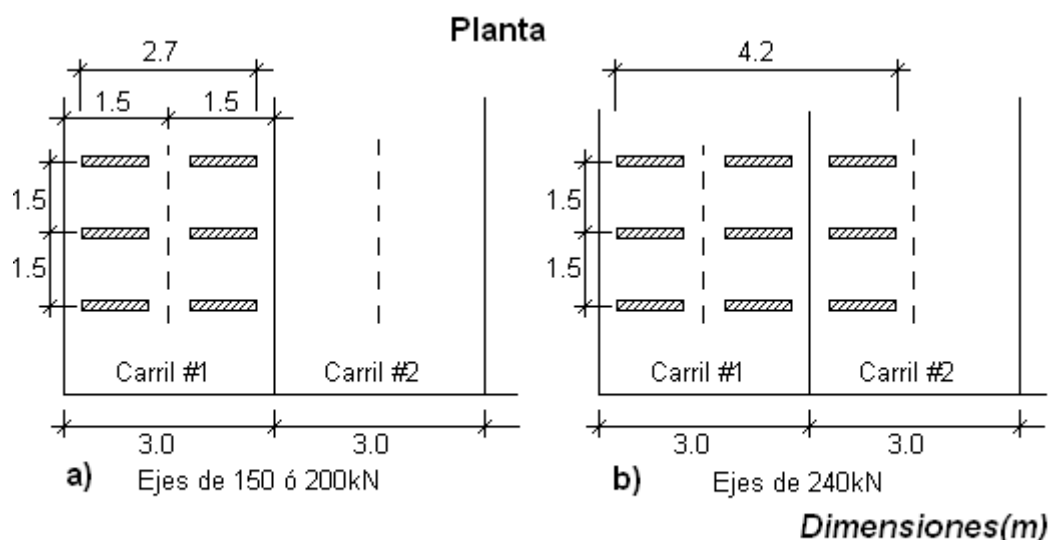


Fig. 10 Disposición de los vehículos especiales en 1 ó 2 carriles teóricos.

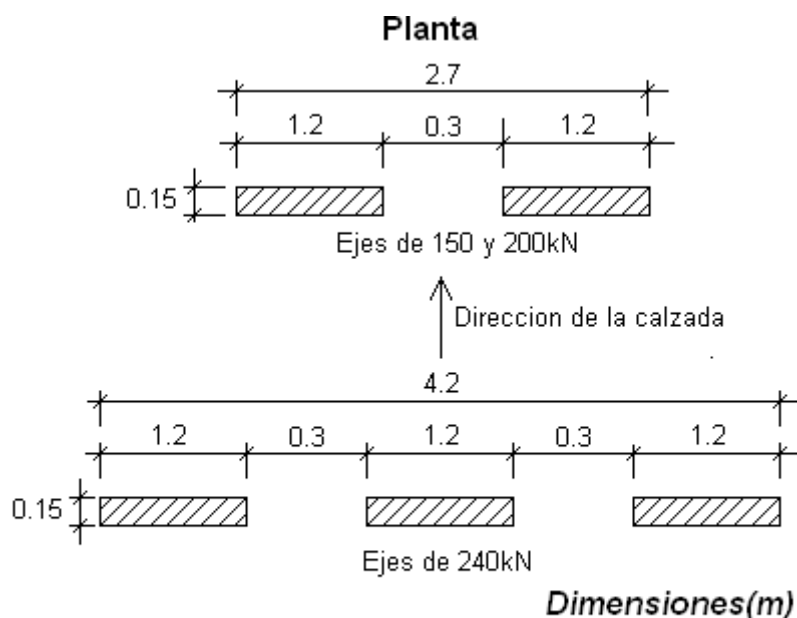


Fig. 11 Esquema de ejes para conformar los vehículos especiales según el peso.

NOTA: Los vehículos especiales simulados se supone que se muevan a poca velocidad (no más de 5 km/h); por tanto, no se considera amplificación dinámica.

Cada carril teórico y el área residual del puente están cargados con los valores frecuentes del sistema principal de carga, definido en 1.1.8.1. En el carril, o carriles, ocupados por los vehículos normalizados, este sistema se debe aplicar en al menos 25m desde los ejes exteriores del vehículo en consideración.

1.2.7.4- Carga de muchedumbre (Modelo de carga 4)

La carga de muchedumbre, si es necesaria su utilización, incluye la amplificación dinámica y se define por una carga $q = 5 \text{ kN/m}^2$ que debe ser aplicada en las zonas pertinentes a lo largo y ancho del tablero. Este sistema de carga. Utilizado para comprobaciones globales, se asocia exclusivamente con una situación transitoria.

Conclusiones parciales.

De las diferentes normativas tratadas en el epígrafe, podemos conocer o al menos tener cierta idea del entorno en que se mueven las especificaciones de los vehículos de diseño o carga móvil para el diseño de puentes. Existen varios términos que muestran claras diferencias entre ellas, en nuestro análisis creemos de mayor interés los siguientes: características de los vehículos (peso, cantidad de ejes y superficie de contacto), factor de reducción por varias sendas cargadas, factor de incremento por carga dinámica y carga adicional o carga equivalente, según corresponda.

Creemos necesario la confección de la siguiente tabla para una visión de las diferencias que pueden existir en las características de los distintos vehículos.

Tabla 16: Peso, cantidad de ejes y superficie de contacto establecidos.

Normas	Vehículos	Peso (kN)	Cant. de ejes	Superficie de contacto	
				Ancho (m)	Largo(m)
Cubana	N-30	300	3	0.6	0.2
	NK-80	800	4	0.8	0.2
AASHTO (Estándar)	H	150,200y 250	2	0.51	0.25
	HS	150,200y 250	3		
AASHTO (LRFD)	HS20	200	3		
	tándem	240	2		
Mexicana	T3-S3	485	6	-	
	T3-S2-R4	665	9		
Eurocódigo	tándem	varía	2	0.4	0.4
	eje simple	400 (puede variar)	1	0.6	0.35
	especial	ejes de	varía	1.2	0.15

		150,200 ó 240			
Centroamérica	Toma las especificaciones de la AASHTO (LRFD), pero no considera lo referente el tándem de diseño.				
Peruana	Toma las especificaciones del AASHTO (LRFD).				

Como dato interesante podemos apreciar que el vehículo cubano NK-80 es el de mayor peso de todos con 800 kN.

Cada norma especifica factores de reducción por varias sendas cargadas que de manera genera se encuentran entre 1~0.65, con un valor de 1.2 producto a una consideración particular que establece la AASHTO para cuando existe 1 sola senda cargada. Existen también diferencias en cuanto a la carga distribuidas. La norma AASHTO (estándar) por ejemplo, tiene un sistema de cargas (Fig. 5) que puede sustituir el vehículo de diseño, es decir, es una carga equivalente. La AASHTO (LRFD) establece una carga distribuida pero para que sea utilizada conjuntamente con el camión o el tándem de diseño. El Eurocódigo también propone una carga distribuida como sobrecarga y no como equivalencia, ya sea para los carriles teóricos o el área de servicio (epígrafe 1.2.7.1 Tabla 13). Existen normas (Peruana, Centroamericana, Mexicana) aquí abordadas, que se les hace más factible utilizar los mismos criterios de otras, por determinadas razones, pero de la misma manera existen otras varias (Cubana, AASHTO, Eurocódigo) que establecen sus propias especificaciones para sus características específicas de tráfico, mostrar y analizar estas diferencias ha sido nuestro principal propósito en este epígrafe.

1.3- Métodos de análisis.

En este epígrafe abordaremos lo referente a los métodos de análisis que se utilizan para resolver la superestructura en puentes, claro que estos no son los únicos existentes, pero para nuestro trabajo son los de mayor interés debido a las aplicaciones que posteriormente le daremos.

1.3.1- Método del ancho eficaz de H. M. Westergaard.

El método de cálculo del ancho eficaz o de Westergaard, se basa en la consideración de que la losa es isotrópica, iguales propiedades mecánicas en todas las direcciones, apoyada en dos bordes opuestos y libres en los otros dos, tal como se presenta en los puentes de losa que trabajan en una sola dirección.

De los estudios teóricos y experimentales se obtuvo que la distribución de tensiones en una losa simplemente apoyada en dos bordes opuestos y con una o más cargas concentradas perpendiculares a su plano medio, depende fundamentalmente de:

- a) La luz de la losa.
- b) La distancia relativa de las cargas al apoyo y al eje.
- c) Del espesor de la losa.
- d) La forma y tamaño del área sobre la cual actúa la carga concentrada.
- e) La estrechez de la losa.

El análisis teórico desarrollado por Westergaard supone una losa apoyada en dos bordes opuestos, con un ancho infinito hacia los otros dos y con una sola carga actuando en el centro de la losa. Desarrolla aquí el concepto fundamental del ancho eficaz y va aumentando la complejidad del sistema de carga añadiendo cargas en direcciones longitudinales y transversales.

Si se analiza con detenimiento los estados de carga independientes se concluye en que resultan incrementos de momentos al caso inicial y así se conforman los demás estados de cargas, los cuales se muestran a continuación.

Caso 1: Carga concentrada en el centro del puente.

Carga aplicada en el centro de la luz con una superficie de contacto de forma circular con diámetro definido. Las fórmulas que brinda el caso inicialmente para el cálculo de los momentos M_x y M_y dependen de la luz (L), del diámetro equivalente a la superficie de contacto (c), del peralte de losa (h), de la carga aplicada (P_1) y de la distancia del centro de la luz a la posición de la carga. Estas ecuaciones introdujeron inconvenientes por su complejidad y su dependencia del espesor de la losa (h). Para una mayor facilidad del trabajo se encontró una nueva expresión aproximada que resultó de evaluar las expresiones exactas para valores de L/h y c obteniéndose una ecuación que sea envolvente de todas ellas.

En esta nueva expresión aparece el término de ancho eficaz (E) que le da el nombre al método y que depende totalmente de L y c . El ancho eficaz de una losa, es el ancho en que puede suponerse actuando la carga concentrada, considerando la losa como una viga simplemente apoyada. Para el diseño se considera una franja unitaria de la losa en dirección paralela a los apoyos y suponiendo una carga uniformemente distribuida.

El hecho de obtener los momentos flectores M_x y M_y independientemente de la altura (h) y a través del ancho eficaz (E), es una forma aproximada que resulta más exacta en la medida que se cumplan las condiciones siguientes:

- a) $h \leq c \leq 3.45h$
- b) $h > L/50$
- c) $0.04 \leq c/L \leq 0.25$

En caso de no cumplirse las condiciones anteriores y si se requiera más precisión en los cálculos, entonces es necesario utilizar las expresiones de M_x y M_y exactas.

El valor de M_y será calculado en función de M_x y varía entre 40~60% respecto a M_x .

Como estas condiciones no son las que generalmente se presentan en la práctica se desarrollaron los siguientes casos:

Caso 2: Dos cargas concentradas en el centro, en fajas paralelas:

Este caso se refiere a dos o más cargas (P_1, P_2, \dots, P_n) actuando en el centro de la luz en elementos o fajas paralelas, a una distancia conocida, las acciones producidas por P_1 se incrementan por la acción de P_2 .

El cálculo de este incremento, tanto del M_x con M_y , viene dado por expresiones que al igual que en el caso anterior son poco prácticas, por lo que se elaboró un gráfico (Libro Puentes, Tomo 2, Primera parte, de Gustavo Taylor y Ernesto Valdés, pág. 71 figura 7.8) donde se muestra el porcentaje de incremento de M_x del Caso 1 bajo la carga P_1 debido a la carga P_2 .

Cuando exista más de una carga, una en el centro de la losa y otras en fajas paralelas, se incrementará de acuerdo con la distancia (Y)*, tanta veces como cargas existan.

* (Y) es la distancia que existirá entre la carga que se está analizando y el eje central de la losa (transversalmente).

El porcentaje de incremento para M_y también puede buscarse en la misma figura notándose que el momento debido a P_2 para valores de y/L mayores de 0.5 es negativo; es necesario entonces para valores de $y/L > 5$ utilizar las fórmulas de incremento. Por lo general al M_y es pequeño en comparación con el M_x , normalmente lo que se hace es no calcularlo y poner una cantidad especificada de refuerzo.

Caso 3: Dos cargas concentradas en el mismo elemento.

Dos cargas concentradas situadas en la misma faja, una carga P_1 en el centro y la otra carga P_3 , a una distancia conocida (x) del centro. La carga P_3 produce un incremento de momento sobre el momento producido por P_1 , el cual puede ser calculado.

El incremento de momento debido a las dos cargas, sobre el que se produce con la carga P_1 en el centro, es mostrado en un gráfico (Libro Puentes, Tomo 2, Primera parte, de Gustavo Taylor y Ernesto Valdés, pág. 75 figura 7.10) con lo que se puede hallar el M_x para este caso. En la misma figura se muestra además el incremento para el ancho efectivo para las dos cargas, alcanzando un máximo de 28% para $a/L = 0.2$.

A través del nuevo ancho eficaz puede ser hallado también el M_x con ancho eficaz modificado.

Caso 4: Cuatro cargas concentradas en dos elementos paralelos.

En este caso al igual que en el Caso 3 han sido colocadas las cargas según el teorema de Barré*, obteniendo el momento máximo debido a dichas cargas en las coordenadas donde se encuentra P_1 (desplazada del centro). En la práctica este punto verdaderamente es el de momento máximo, pero sucede que el momento que puede ser generado por las cargas de peso propio y cargas permanentes tiene su valor máximo en el centro de la luz y no en la posición de P_1 , es por esto que es más práctico situar la carga P_1 en el centro y aplicar el caso general que se verá más adelante.

* Si dos cargas son libres de movimiento, pero permaneciendo fija la distancia entre las ruedas, como sucede en los vehículos, el momento máximo ocurre bajo la rueda mas cercana al centro, cuando el centro de la losa bisecta la distancia entre la carga mas cercana y las resultante de las cargas. (Teorema de Barré)

Estrechez de la losa

En todos los casos anteriores, la losa ha sido supuesta como de ancho infinito en la dirección paralela a los apoyos. Se ha demostrado a través de ensayos que aunque el valor del ancho de la losa se haga mayor, el momento máximo debido a la carga no será afectado por el incremento del ancho. Los ensayos han demostrado también que los momentos flectores se incrementan para losas estrechas y han dado paso a formulas empíricas que evalúan esa disminución del ancho eficaz, pasando a ser ancho eficaz modificado. Con la fórmula obtenida fue confeccionado un gráfico que brinda los % de incremento del ancho eficaz y que esta en función de la relación B/L .

Si se observa la figura (Libro Puentes, Tomo 2, Primera parte, de Gustavo Taylor y Ernesto Valdés, pág. 80 figura 7.13), se puede ver que para valores de $B/L = 1.6$, el ancho eficaz no es modificado, por lo que para valores mayores la losa se comportará como de ancho infinito.

Cargas excéntricas, cercanas a los bordes.

Para tomar este efecto, se elaboró una expresión de ancho eficaz para cargas cercanas al borde en función de la distancia de la carga al borde más cercano, obtenida de analizar los resultados de varios ensayos realizados a losas con cargas aplicadas cerca de los bordes. Las losas que soportan cargas cercanas a los bordes, como por ejemplo los puentes sin acera, deben tener bordes rigidizados ya sea con recrecimiento de los bordes (contenes) o introduciendo una viga que soporte los bordes.

Caso general de cargas.

El sistema de cargas obtenido para el Caso 4 puede ser generalizado para cualquier caso real, pero además teniendo en cuenta la estrechez de la losa y la cercanía de la carga al borde. Para el cálculo definitivo del M_x para un sistema de cargas reales se dispone de tres términos que abarcan los parámetros definidos en los cuatro casos anteriores así como la estrechez de la losa y la cercanía de la cargas al borde, están definidos por:

1. Momento de fila o momento flector producido por una fila de ruedas a una distancia (x) del apoyo.
2. Ancho eficaz corregido por estrechez y cercanía de la cargas al borde, cuando hay cargas en un mismo elemento (faja) se incrementa primero según el valor de a/L (Caso 3).
3. Porcentaje de incremento por cargas en otras fajas paralelas a la faja central unitaria analizada, de cada combinación de carga solo se consideran los porcentajes de las cargas colocadas en una sección transversal del puente.

1.3.2- Método de la AASHTO.

El método se basa en la teoría de Westergaard adaptando los incrementos debido a cargas en un mismo elemento o en elementos paralelos de acuerdo con las dimensiones de sus camiones tipo. En base a esto se han encontrado expresiones de ancho eficaz en función del sentido de trabajo de la losa, de constitución de eje del vehículo (eje simple o tandem) y de la luz de la losa, que dan directamente las correcciones señaladas por Westergaard.

Casos de distribución

El método considera 3 casos de distribución de acuerdo con el sentido de trabajo de la losa y la posición de los vehículos. El Caso A se refiere a losas cuya dirección de trabajo principal es perpendicular al tránsito y el Caso B y C se refiere a losa cuyo

sentido de trabajo principal coincide con la dirección del tránsito. El Caso B abarca las luces menores de 3.6m y el Caso C las luces mayores, estos casos se ejemplifican en los puentes de losa.

Caso A: Refuerzo perpendicular al tránsito.

Especifican diferentes expresiones de ancho eficaz (E), en función de L y dependiendo si es eje simple o eje tandem, además cada caso del tipo de eje es desdoblado en si L se encuentra entre 0.6~2.1m o si es mayor que 2.1m, el caso se convierte en cuatro variantes:

- a) Eje simple $\leftrightarrow 0.6 \leq L \leq 2.1\text{m}$
- b) Eje simple $\leftrightarrow L > 2.1\text{m}$
- c) Eje tandem $\leftrightarrow 0.6 \leq L \leq 2.1\text{m}$
- d) Eje tandem $\leftrightarrow L > 2.1\text{m}$

Las expresiones para calcular los valores de M_x son dependientes de los términos P, L y E, para cada una de las variantes anteriores diferentes y teniendo además en cuenta si la luz del puente es simplemente apoyada o si es continua.

Caso B: Refuerzo principal paralelo al tránsito, luces desde 0.6 hasta 3.6m

Este caso se muestra independientemente del tipo de eje que presente el vehículo y así el valor de momento de interés será uno solo (según las condiciones de continuidad)

Caso C: Refuerzo principal paralelo al tránsito, luces mayores de 3.6m

Para este caso la norma da una expresión de ancho eficaz (E) en función del número de carriles de tránsito en el puente y del ancho de la calzada entre contenes.

La norma propone, aunque sin ningún estudio fundamentado las cargas que deben ser utilizadas para el cálculo de los M_x en los 3 casos anteriores y define además que en el Caso A se utilicen las dos variantes (eje simple y tandem), escogiendo el de mayor valor.

Vigas de borde

La norma especifica que todas las losas que tengan refuerzo principal paralelo al tráfico hay que colocarles vigas de borde. La conformación de esta viga puede estar definida por la sección del contén reforzada, de un ancho adicional de la losa o una viga de soporte. Se calculará para resistir una fila de ruedas con un valor de carga que puede variar en correspondencia al vehículo que se este utilizando.

Conclusiones parciales.

Ambos métodos trabajan teniendo en cuenta los mismos principios (Momento en función de L , P y del ancho eficaz E que se calcula). En el método de Westergaard el ancho eficaz es un término que puede ser afectado varias veces según corresponda (considerando la losa de ancho infinito, cargas en la misma faja, estrechez de la losa y por cercanía de las cargas al borde), la modificación por dichos términos se irán realizando según transcurra el caso ya que incluyen mas de un termino que depende del sistema de carga (distancia entre las cargas en una misma faja, ancho real de la losa y distancia de cada carga que se encuentre en una sección transversal del puente al borde mas cercano). El método de la AASHTO define las expresiones de ancho eficaz (E) necesarias para cualquier sistema de carga solo hay que situarse en el caso que corresponda, es decir, generaliza las situaciones que puedan suceder para sus vehículos tipo con alguno de los término que creen puedan ser productos de cambios significativos (condiciones de apoyo de la losa, dirección del refuerzo, tipo de eje y tramo de luz), para llegar a obtener un método mas sencillo para sus condiciones específicas. Las expresiones que la norma AASHTO establece, solo si se ajustaran a nuestros vehículos tipo, pudiera entonces ser utilizadas con exactitud para nuestros proyectos, si no, se utilizara únicamente para anteproyectos o para obtener una propuesta inicial ya que como se dijo el método resulta rápido y sencillo.

1.1 Conclusiones parciales del epigrafe

Después de analizada los epígrafes anteriores arribamos a las siguientes conclusiones parciales:

1. Existen diferencia en las normativas consultadas respecto al vehículo de diseño a utilizar y el método de análisis aplicable (características de los vehículos (peso, cantidad de ejes y superficie de contacto), factor de reducción por varias sendas cargadas, factor de incremento por carga dinámica y carga adicional o carga equivalente), métodos de análisis teóricos o empíricos).
2. Cada norma especifica factores de reducción por varias sendas cargadas.
3. Los Métodos de Análisis, trabajan teniendo en cuenta los mismos principios (Momento en función de luz, la carga y del ancho eficaz E).
4. El método de la AASHTO define las expresiones de ancho eficaz (E) necesarias para cualquier sistema de carga.

