

serie normativas

Instrucciones de construcción



Recomendaciones
para la realización de pruebas
de carga de recepción en
puentes de carretera



Ministerio de Fomento
Dirección General de Carreteras

serie normativas

Instrucciones de construcción

Recomendaciones
para la realización de pruebas
de carga de recepción en
puentes de carretera



Ministerio de Fomento
Dirección General de Carreteras

1999

ESPAÑA: Dirección General de Carreteras

Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de
recepción en puentes de carretera / Dirección General de Carre-
teras. - Madrid : Ministerio de Fomento. Centro de Publicaciones, 1999
21 p. : il. : 30 cm.- (Serie normativas)

ESTRUCTURAS - Cálculo
PUENTES DE CARRETERA

624.042
625.745.1



Edita: Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Fomento ©

I.S.B.N.: 84-498-0425-6
NIPO: 161-99-066-2
Depósito Legal: M-31.242-1999
Imprime: Centro de Publicaciones

Diseño cubierta: Carmen G. Ayala

Impreso en papel reciclado

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. CAMPO DE APLICACIÓN	5
3. DIRECCIÓN Y REALIZACIÓN DE LA PRUEBA	6
4. PLANTEAMIENTO DE LA PRUEBA	6
4.1. Proyecto de la prueba	6
4.2. Sistema de medida.....	6
4.3. Determinación del módulo de elasticidad del hormigón	7
4.4. Efecto de las condiciones meteorológicas	7
4.5. Fecha de ejecución	7
5. ACTUACIONES COMPLEMENTARIAS	7
6. DESARROLLO DE LA PRUEBA	8
6.1. Materialización del tren de carga	8
6.2. Estados de carga	8
6.3. Forma de aplicación de la carga	9
6.3.1. <i>Escalones de carga</i>	9
6.3.2. <i>Criterio de estabilización</i>	9
6.3.3. <i>Criterio de remanencia</i>	12
6.4. Pruebas de carga simplificadas	13
6.5. Pruebas complementarias.....	14
7. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	14
8. PRUEBA DINÁMICA	15
8.1. Objeto de la prueba.....	15
8.2. Condiciones de ejecución	15
8.3. Excitación de la estructura	16
8.4. Instrumentación	16
8.5. Análisis de resultados	17
9. INFORME DE LA PRUEBA DE CARGA	19
10. ACTA DE LA PRUEBA DE CARGA	19
ANEJO 1: Vehículos tipo	21

PRESENTACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Con motivo de la publicación de la *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera* (O.M. de 12 de febrero de 1998) y de la *Instrucción de hormigón estructural* (R.D. 2661/1998, de 11 de diciembre de 1998), la Dirección General de Carreteras está llevando a cabo un proceso de actualización del conjunto de los documentos normativos que, en mayor o menor medida, resultan afectados por las citadas Instrucciones.

En el año 1974, se publicaron las primeras *Recomendaciones para el proyecto y ejecución de pruebas de carga en puentes de carretera*, en un intento de sistematizar las actuaciones involucradas en las pruebas de carga, que la Instrucción de acciones vigente convertía en obligatorias. En el año 1988, se publicó el documento *Pruebas de carga en puentes de carretera*, el cual supuso una revisión profunda de las primeras *Recomendaciones*, a la luz de la experiencia con que ya se contaba en aquella fecha.

En el período transcurrido desde la publicación de ese último documento hasta hoy, se han actualizado las Instrucciones arriba citadas, los sistemas instrumentales y los procedimientos de medida no han cesado de mejorar y, además, la experiencia acumulada ha puesto de manifiesto la necesidad de desarrollar algunos aspectos sólo sugeridos en el texto de 1988, simplificar o modificar otros e incluir algunos criterios nuevos.

Como ejemplo de las novedades introducidas en las presentes *Recomendaciones*, cabe citar la reducción del nivel de carga alcanzado durante las pruebas, el planteamiento de las pruebas simplificadas, los criterios de aceptación o los criterios para la realización de pruebas dinámicas.

1. INTRODUCCIÓN

La prueba de carga de recepción de una estructura es un conjunto de operaciones consistente en la reproducción de uno o varios estados de carga sobre la misma, antes de su puesta en servicio, con objeto de confirmar que el proyecto y construcción de la obra se han llevado a cabo de forma satisfactoria.

Con este objeto es necesario comprobar que, para unas situaciones de carga representativas de las acciones a que va a estar sometida durante su vida en servicio, el comportamiento de la estructura se ajusta a las previsiones de proyecto.

Esta publicación está dedicada a las pruebas de recepción de obra nueva. No se contemplan, por tanto, las pruebas de carga de obras en servicio, aunque muchos de los criterios que aquí se recogen sean aplicables también a ese caso.

Se tratan tanto las pruebas de carga estáticas como las dinámicas, aunque los aspectos característicos de estas últimas se han recogido en un apartado específico, estando referida la mayor parte del texto a las pruebas estáticas.

2. CAMPO DE APLICACIÓN

El contenido de este documento es de aplicación para las obras de paso de carreteras y las pasarelas. Las pruebas de carga de puentes con funciones diversas (de carretera y ferrocarril, de acueducto y carretera, etc.) requerirán un tratamiento especial no considerado en esta publicación.

En el caso de puentes nuevos, la prueba de carga estática es preceptiva, según la vigente "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP)", que en su capítulo 5 establece lo siguiente:

"Todo puente proyectado de acuerdo con la presente Instrucción deberá ser sometido a pruebas de carga antes de su puesta en servicio, de acuerdo con lo indicado en el preceptivo anejo que sobre la materia incluirá todo proyecto aprobado por la Dirección General de Carreteras."

"Tales pruebas podrán ser estáticas o dinámicas. Las primeras serán siempre obligatorias, las segundas serán preceptivas en aquellas estructuras en las que sea necesario verificar que las vibraciones que se puedan producir no afectarán a la funcionalidad de la obra."

De acuerdo con el artículo 1.2 de la IAP, *"en el concepto puentes de carretera, se consideran incluidas las obras de paso [...] cuya función sea salvar una discontinuidad en un trazado para permitir el paso del tráfico [...]"*.

La obligatoriedad de la prueba de carga a que hace referencia la IAP se entenderá para obras de paso en que alguno de sus vanos tenga una luz¹ igual o superior a 12 m. Para luces inferiores a 12 m, el Director de la Obra, o en su caso el Director del Proyecto, podrá decidir la realización de la prueba en función de las características o circunstancias de la estructura.

Por lo que se refiere a las pruebas de carga dinámicas, la "Instrucción de hormigón estructural (EHE)", establece su obligatoriedad en el caso de puentes con luces superiores a 60 metros, o en aquéllos cuyo diseño sea inusual o se utilicen nuevos materiales, así como en el caso de pasarelas y zonas de tránsito en las que se prevea que las vibraciones puedan ocasionar molestias a los usuarios. Estos criterios serán también de aplicación cuando se trate de estructuras metálicas o mixtas.

En general, también deberá realizarse prueba de carga tras la ejecución de actuaciones importantes de ampliación y/o rehabilitación de una estructura en servicio.

¹ A los efectos de este documento, se define *luz* como la distancia entre líneas de apoyo de un tablero, medida sobre su directriz. En el caso de estructuras tipo cajón o marco, se considerará como *luz* la luz libre, esto es, la distancia entre los paramentos vistos de los hastiales.

3. DIRECCIÓN Y REALIZACIÓN DE LA PRUEBA

La realización de la prueba será llevada a cabo por personal cualificado, al frente del cual figurará un Ingeniero especializado en este tipo de trabajos, quien será nombrado por el Director de la Obra.

El ingeniero responsable de ese cometido, a quien en adelante se denominará Director de la prueba, deberá estar presente durante todo el desarrollo de la misma.

El Director de la prueba será quien dé por finalizado cada estado de carga y, una vez que la considere realizada en todas sus fases, dé por terminada la prueba. Deberá, en su caso, ordenar la suspensión de la misma cuando así lo requiera el comportamiento de la estructura. El Director de la prueba será quien, a partir de los resultados de la misma, redacte el informe de la prueba.

En general, será conveniente la participación del Autor del proyecto de la estructura en el proceso de prueba de carga.

4. PLANTEAMIENTO DE LA PRUEBA

4.1. Proyecto de la prueba

El Proyecto de la prueba de carga deberá estar incluido en el proyecto de la obra, correspondiendo, por tanto, su redacción al autor de dicho proyecto. Constará de Memoria, Planos, Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares y Presupuesto, quedando en general incluidos cada uno de estos documentos en las correspondientes partes del proyecto de la obra.

Deberán quedar definidos todos los aspectos relativos a la realización de la prueba de carga, tanto en lo que se refiere a los trenes y estados de carga, instrumentación, medios auxiliares (en su caso) y valoración económica, como a los valores teóricos previstos para las medidas experimentales y apertura de fisuras. Excepcionalmente, y siempre que se justifique adecuadamente, el Proyecto de la prueba podrá contener criterios de aceptación distintos de los recogidos en este documento.

Si, en el momento de redactar el Proyecto de la prueba, no se conocieran las características de los vehículos de carga con los que se va a realizar ésta, se utilizará uno de los dos vehículos tipo que figuran en el Anejo 1. Todos los vehículos utilizados en una prueba serán preferiblemente iguales entre sí en cuanto a forma, peso y dimensiones. Para alcanzar el nivel de carga deseado (según apartado 6.1), se aconseja disponer los camiones con su peso máximo autorizado (según Anejo 1) y variar únicamente el número y la posición relativa de los vehículos.

Tanto si el proyecto de la estructura sufriera modificaciones antes de la construcción de la misma, como si los vehículos de carga a utilizar fueran distintos de los previstos o si se tuviera constancia de desviaciones significativas de las características de los materiales respecto a lo previsto en proyecto, será necesario rehacer o adaptar el Proyecto de la prueba de carga.

4.2. Sistema de medida

Las magnitudes a medir y la localización de los puntos de medida serán los especificados en el Proyecto de la prueba. Las medidas deberán efectuarse en posición y cantidad suficiente para permitir la correcta evaluación del comportamiento de la obra.

En general, se debe medir al menos la flecha en todos los centros de vano y el descenso en líneas de apoyo. Podrá prescindirse de la medida de estos últimos si se considera que su valor no va a ser significativo en relación con las flechas.

El número de puntos de medida en cada sección será función del ancho del tablero y del tipo estructural. En el caso de secciones en cajón, puede ser aconsejable disponer más de un punto de medida, en función de la respuesta torsional prevista

de la estructura. En el caso de tableros de vigas, lo aconsejable será disponer un mínimo de tres puntos, uno en la viga central y uno en cada viga de borde.

En el caso de puentes metálicos o mixtos de tipos estructurales especiales, o en aquéllos en que al autor del proyecto así lo considere, se recomienda además medir deformaciones unitarias en el acero estructural en las secciones más significativas de la obra.

Los aparatos de medida que se utilicen deberán estar sancionados por la experiencia en pruebas similares. Deberán estar debidamente calibrados y poseer una sensibilidad mínima del orden de un 5% de los valores más pequeños esperados en los puntos de medida significativos.

Su rango de medida deberá ser como mínimo superior en un 50% a los valores máximos esperados de dichas magnitudes.

Es recomendable que el equipo instrumental permita el registro automático de las medidas que se efectúan y su visualización en tiempo real. Esta característica será exigible en el caso de puentes con luces superiores a 60 m.

4.3. Determinación del módulo de elasticidad del hormigón

En puentes de hormigón, para poder conocer las características del material en el momento de la prueba de carga, se recomienda efectuar algún ensayo a compresión de probetas reservadas a tal fin durante la ejecución de la obra.

Preferiblemente, dicho ensayo será realizado por un laboratorio con capacidad para obtener la curva tensión-deformación.

4.4. Efecto de las condiciones meteorológicas

Con objeto de cuantificar el efecto de las variaciones térmicas sobre los parámetros estructurales registrados, se recomienda instrumentar una sección del tablero con dos sensores de temperatura, uno en su cara superior y otro en la inferior. Las lecturas de estos sensores se efectuarán con la misma periodicidad que la adoptada para el resto de la instrumentación.

Se intentará reducir al mínimo el tiempo de aplicación de la carga para minimizar la influencia, en la propia estructura y en los aparatos de medida, de los efectos térmicos, higrométricos o de otro tipo, cumpliendo siempre los criterios recogidos en el apartado 6 de este documento.

4.5. Fecha de ejecución

La prueba de carga de recepción se realizará antes de la puesta en servicio de la estructura.

En el momento de iniciarse la prueba, el hormigón de cualquier elemento resistente de la obra deberá haber alcanzado la resistencia característica de proyecto. El Director de Obra podrá autorizar la realización de la prueba aunque no se cumpla esta condición, una vez analizada la repercusión estructural de tal decisión.

5. ACTUACIONES COMPLEMENTARIAS

La prueba de carga exige una organización y preparación en las que se prevean todos los detalles necesarios para su realización, de forma que se garantice la fiabilidad de los resultados y las adecuadas condiciones de seguridad para las personas, los equipos y la propia obra. En particular, se tendrán en cuenta los medios au-

xiliares de acceso, el replanteo de las posiciones del tren de carga sobre el tablero, así como sus movimientos, la distribución y organización del personal y los puntos característicos a controlar durante el desarrollo de la prueba.

La preparación incluye también un estudio previo y pormenorizado del Proyecto de la prueba, que permita prever el comportamiento de la obra.

Antes de realizar cualquier prueba de carga, se efectuará una inspección de la obra que incluirá, además de la estructura resistente, los aparatos de apoyo (contacto del apoyo con la cara inferior del tablero, deformación, etc.), juntas y otros elementos singulares, en la medida que lo permitan las condiciones de accesibilidad de la obra.

Durante la prueba se realizará un seguimiento de los elementos más característicos de la obra, realizándose una última inspección al finalizar la prueba. En las estructuras de hormigón se controlará el posible proceso de fisuración.

En caso de que se haga una nivelación general de la obra para servir de referencia en futuras inspecciones de la estructura, ésta deberá realizarse una vez concluida la prueba de carga.

6. DESARROLLO DE LA PRUEBA

6.1. Materialización del tren de carga

Se empleará un tren de carga constituido por camiones, cuyo número y características estarán definidos en el Proyecto de la prueba.

El nivel de carga alcanzado durante la prueba debe ser representativo de las acciones de servicio. Se considera adecuado alcanzar un nivel de carga correspondiente a un período de retorno próximo a 5 años. De acuerdo con esto, se aconseja que las solicitaciones a que dé lugar el tren de carga real estén en torno al 60% de los valores teóricos producidos por el tren de carga definido en la "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP)", adoptando sus valores característicos sin mayorar. En ningún caso las solicitaciones producidas por el tren de carga real serán superiores al 70% de dichos esfuerzos teóricos.

Antes de comenzar la prueba, se comprobará mediante pesaje en báscula el peso total real de cada uno de los vehículos, debiendo quedar garantizado que su valor no se desvía en más de un 5% del considerado en el Proyecto de la prueba. Los recibos de báscula deberán entregarse al Director de la prueba, quien dejará constancia de ello en el informe de la misma.

La posición de todos los vehículos en cada estado de carga deberá marcarse previamente sobre el tablero, de forma que pueda realizarse su colocación con suficiente precisión.

En el caso de pasarelas, la sobrecarga uniforme de cálculo podrá materializarse mediante cargas concentradas que produzcan en la estructura esfuerzos equivalentes a los de aquélla.

En aquellos casos en que se realice la prueba de carga antes de la ejecución de alguna de las unidades no estructurales que forman parte de la carga muerta, se podrá materializar su peso incrementando la carga de la prueba o añadiendo una carga supletoria con antelación suficiente para que se produzca la estabilización.

6.2. Estados de carga

Los estados de carga se definirán en el Proyecto de la prueba de forma que, cargando convenientemente distintas zonas de la estructura, se alcancen los porcentajes deseados de los esfuerzos máximos producidos por el tren de carga de la Instrucción en las secciones críticas.

En el caso de vanos simplemente apoyados, se cargará todo el vano. En el caso de puentes continuos, en general será suficiente con cargar parejas de vanos contiguos y de vanos alternos, de forma que, en todas las secciones de apoyo y de centro de vano, se alcancen los porcentajes de esfuerzos indicados en el apartado 6.1.

En general, además de las secciones sobre apoyos y secciones de vano, se considerarán críticas, y se definirán los correspondientes estados de carga, aquellas secciones con cambios bruscos de geometría, cambio de materiales o aquellas que, a juicio del autor del proyecto, sea conveniente comprobar.

Como norma general, la carga se aplicará solamente en la calzada y arcenes, sin que sea necesario someter a prueba las aceras, distribuyendo uniformemente los vehículos de carga en el ancho de la plataforma.

También pueden definirse estados de carga en los que ésta se distribuya únicamente en la mitad izquierda o derecha de la plataforma. Se recomienda disponer este tipo de estados asimétricos en el caso de puentes de planta curva en los que el efecto de la torsión pueda ser significativo, en puentes con esviaje importante, en puentes con doble arco, etc.

Por último, también podrán establecerse, si el autor del proyecto lo estima conveniente, estados de carga destinados a comprobar transversalmente el tablero.

6.3. Forma de aplicación de la carga

Los movimientos de los vehículos en cualquier fase del proceso de carga o de descarga se efectuarán con la lentitud necesaria para no provocar efectos dinámicos no deseados, y se organizarán de forma que no se produzcan sobre otras partes de la estructura solicitaciones superiores a las previstas.

Será necesario proceder a la descarga total de la estructura antes de materializar cada nuevo estado de carga. Únicamente en el caso de puentes formados por vanos simplemente apoyados, se podrán materializar los distintos estados de carga mediante el avance del tren de carga sucesivamente de vano en vano.

6.3.1. Escalones de carga

La carga correspondiente a cada estado se aplicará en varias fases o escalones de manera que se pueda registrar la respuesta progresiva de la estructura en las zonas críticas. En general, se aconseja aplicar la carga en un mínimo de dos escalones. De forma complementaria, y siempre que el equipo de medida permita llevar a cabo la adquisición de datos con rapidez, se efectuará una lectura de los parámetros controlados tras la entrada o salida de cada uno de los camiones o fila transversal de camiones.

El proceso de descarga se llevará a cabo, en general, en escalones análogos y en orden inverso al proceso de carga.

En general, salvo que se justifique lo contrario en el Proyecto de la prueba, no será necesario esperar a la estabilización de las medidas entre dos escalones de carga.

6.3.2. Criterio de estabilización

El tiempo que se debe mantener la carga total correspondiente a un cierto estado de carga, vendrá determinado por el criterio de estabilización de las medidas, que se indica a continuación.

Los valores de la respuesta de la estructura que se consideren (flechas, giros, deformaciones unitarias, etc.) se denominarán *medidas* f_i y se obtendrán en cada momento como diferencia entre las lecturas de los aparatos en ese instante i y las lecturas iniciales inmediatamente antes de la colocación de la carga correspondiente a cada estado.

Una vez colocado en su posición prevista el tren de carga, se realizará una medida de la respuesta instantánea de la estructura f_0 en los aparatos de medida situados en los puntos significativos.

Transcurridos 10 minutos se obtendrá una nueva medida en dichos puntos f_{10} . Si las diferencias entre los nuevos valores de la respuesta y los instantáneos son inferiores al 5% de éstos:

$$f_{10} - f_0 < 0,05 f_0$$

o bien son del mismo orden de la precisión de los aparatos de medida, se considerará estabilizado el proceso de carga.

Si no se satisface la condición anterior, se mantendrá la carga durante un nuevo intervalo de 10 minutos, considerándose cumplido el requisito de estabilización si, realizada la medida al final del mismo f_{20} , la diferencia de medidas correspondiente a este intervalo es inferior al 20% de la diferencia de medidas correspondiente al intervalo anterior, o bien es del orden de magnitud de la precisión de los aparatos de medida:

$$f_{20} - f_{10} < 0,2 (f_{10} - f_0)$$

Si esto no se cumpliera, se procederá, a juicio del Ingeniero Director de la prueba, a mantener la carga durante un nuevo intervalo, o a efectuar la descarga.

Una vez alcanzada la estabilización, se tomarán las lecturas finales en todos los puntos de medida.

Después de descargar totalmente la estructura, se esperará a que los valores de las medidas estén estabilizados, aplicando el mismo criterio seguido para el proceso de carga².

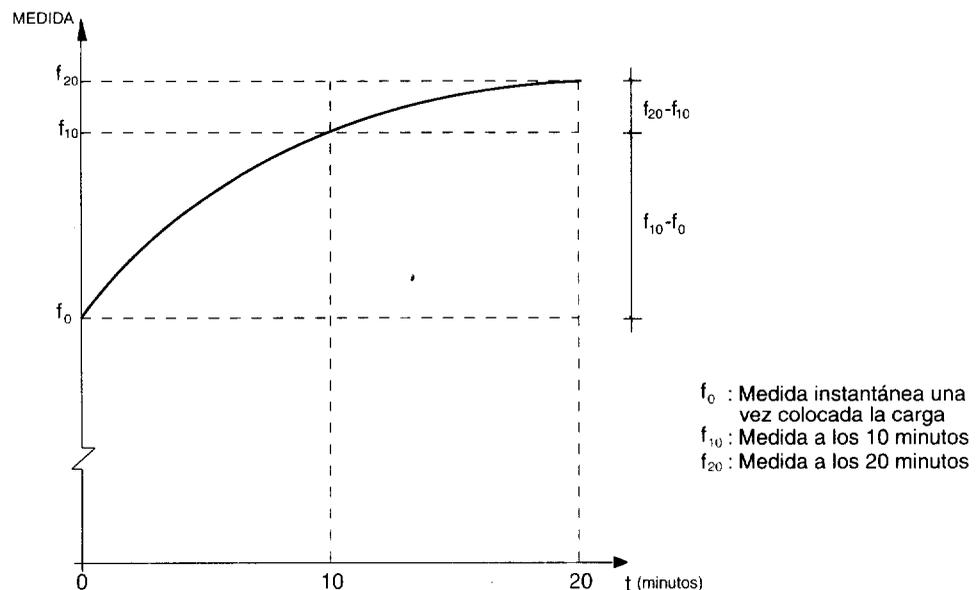


FIGURA 1. PROCESO DE CARGA

² Las diferencias $f_{10} - f_0$ y $f_{20} - f_{10}$ deben entenderse en valor absoluto.

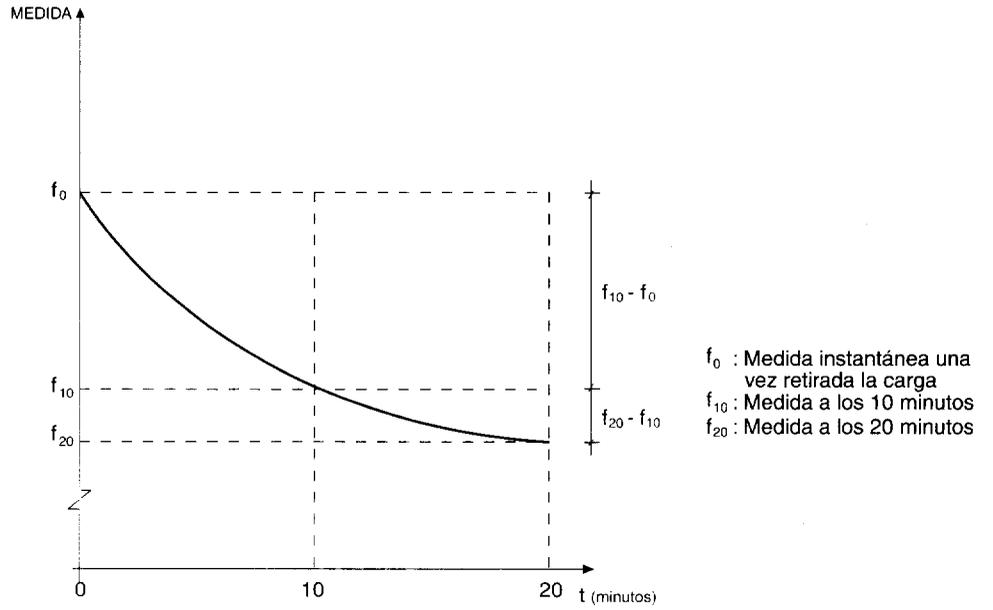


FIGURA 2. PROCESO DE DESCARGA

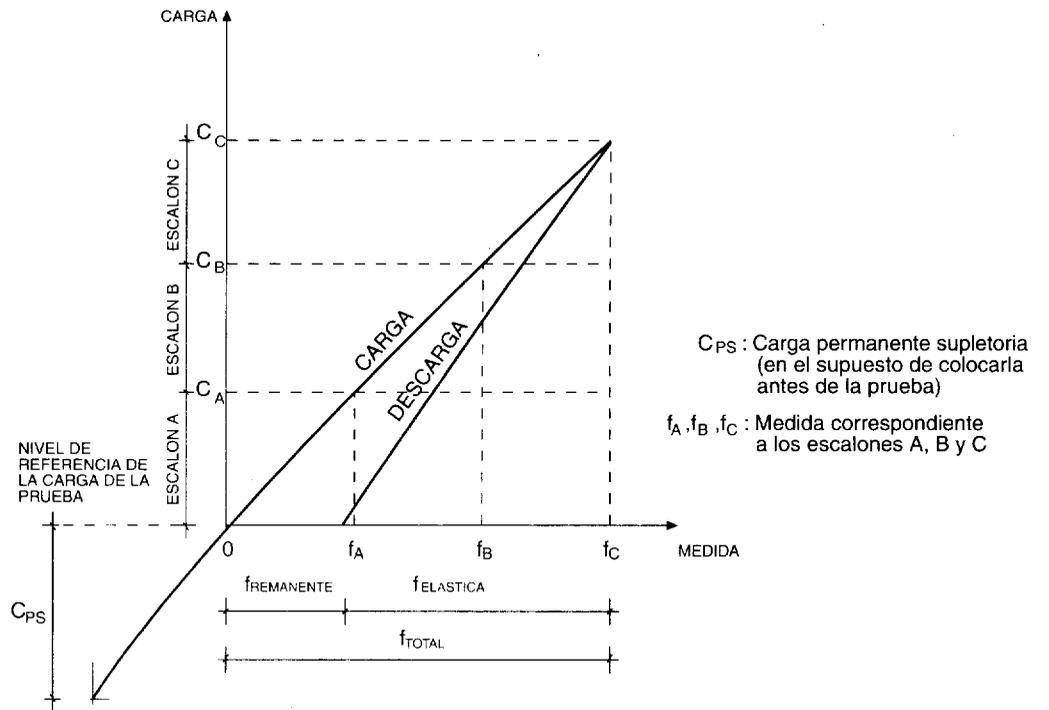


FIGURA 3. CICLO DE CARGA/DESCARGA

En el caso de que los valores remanentes inmediatamente después de la descarga sean inferiores al límite que para cada tipo de estructura se establece en el apartado 6.3.3, no será necesaria la comprobación del criterio de estabilización en descarga, y podrá procederse a la lectura definitiva de todos los aparatos de medida.

El proceso general de carga y descarga está detallado en las figuras 1, 2 y 3. En la figura 1, se muestra el proceso general de estabilización de las medidas en un punto de la estructura durante la carga y en la figura 2 el correspondiente a la descarga. La figura 3 representa la evolución de las medidas durante un ciclo completo de carga y descarga.

6.3.3. Criterio de remanencia

Los valores remanentes f_r correspondientes a un estado de carga se definen como la diferencia entre los valores estabilizados después de la descarga y los iniciales antes de la carga.

Los valores remanentes de un estado de carga se considerarán aceptables siempre que sean inferiores a los límites indicados en este apartado. En el Proyecto de la prueba se podrán definir límites distintos de los aquí recogidos, siempre que estén adecuadamente justificados.

Los límites para las remanencias en cada punto de medida α_{lim} , que se indican a continuación expresados en forma de porcentaje, están referidos a los valores máximos de la respuesta medida de la estructura:

- a) Puentes de hormigón armado: 20%
- b) Puentes de hormigón pretensado o mixtos: 15%
- c) Puentes metálicos: 10%

Una vez finalizado un estado de carga, se comprobará que los valores remanentes resultan admisibles, procediendo como se indica a continuación y se representa en la figura 4.

Sea α_{lim} la remanencia admisible expresada en tanto por ciento, f la medida total y f_r la medida remanente. La remanencia α correspondiente al estado de carga vendrá dada por:

$$\alpha = 100 \cdot \frac{f_r}{f}$$

- Si $\alpha \leq \alpha_{lim}$ el valor remanente se considera admisible
- Si $\alpha_{lim} < \alpha \leq 2\alpha_{lim}$ deberá realizarse un segundo ciclo de carga (repetición del ensayo)
- Si $\alpha > 2\alpha_{lim}$ se suspenderá la aplicación de la carga

En caso de ser necesario un segundo ciclo de carga:

- Si $\alpha^* \leq \alpha/3$ el valor remanente se considera admisible
- Si $\alpha^* > \alpha/3$ se suspenderá la aplicación de la carga

Donde α es la remanencia obtenida en el primer ciclo y α^* la obtenida en el segundo ciclo (tomando en este caso como valores iniciales los estabilizados después de la descarga del primer ciclo).

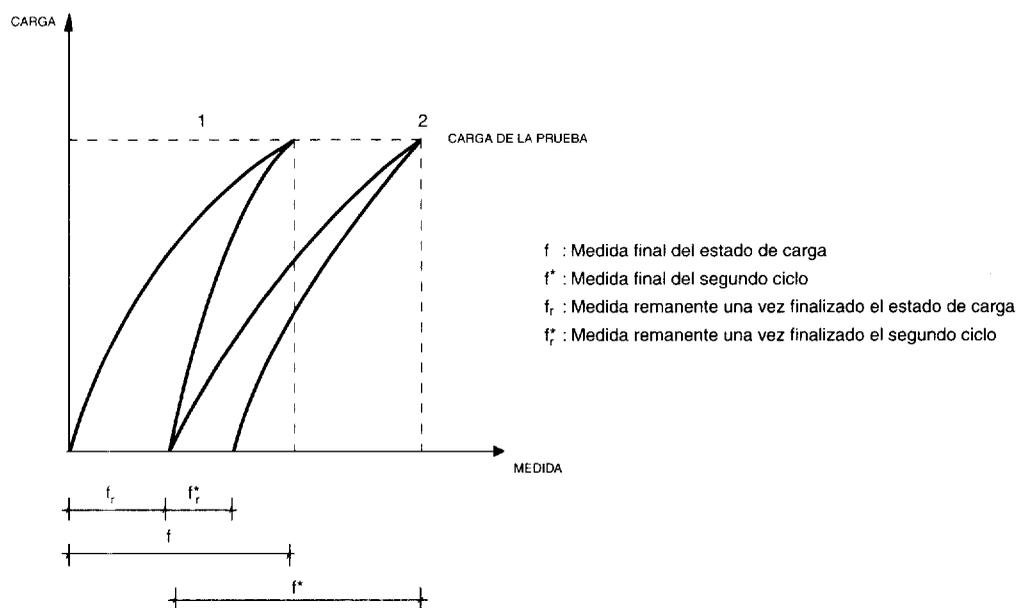


FIGURA 4. VALORES REMANENTES

En caso de que, realizado el segundo ciclo, no se hubieran alcanzado resultados satisfactorios, el Director de la prueba suspenderá la aplicación de la carga correspondiente, tomando respecto a los demás estados de carga las medidas que crea convenientes.

6.4. Pruebas de carga simplificadas

En las pruebas de carga de recepción se presentan casos en los que resulta adecuado adoptar alguna reducción en cuanto a la intensidad y detalle en su ejecución, dando lugar a lo que se denominarán pruebas simplificadas.

La descripción de las pruebas simplificadas debe estar contenida en el Proyecto de la prueba con el mismo grado de detalle que en el caso de las pruebas de carga completas.

Podrán realizarse pruebas de carga simplificadas en los casos que se especifican a continuación, con las limitaciones recogidas para cada uno de ellos:

a) Puentes con varios vanos similares

En el caso de puentes de vanos simplemente apoyados, deberá realizarse la prueba completa en uno de cada cuatro vanos similares o fracción, con un mínimo de dos vanos, pudiendo simplificarse la prueba en el resto.

En el caso de puentes de vanos continuos, deberá realizarse la prueba completa en los vanos extremos y en uno de cada cuatro vanos interiores similares o fracción, con un mínimo de dos vanos interiores³. La prueba del resto de los vanos podrá ser simplificada.

A los efectos de este apartado, se considerarán vanos similares aquéllos cuyas luces no difieran en más de un 10% respecto de la del vano menor, siempre que su solución estructural sea la misma.

³ Se entenderá por prueba completa de un vano, aquélla en la que se introducen todos los estados de carga correspondientes a ese vano (el que produce máxima flexión sobre el apoyo precedente, sobre el apoyo posterior y en vano).

b) *Obras iguales e independientes*

Cuando haya cuatro o más obras iguales, y siempre que hayan sido ejecutadas en las mismas condiciones, podrá hacerse prueba de carga simplificada en un número de ellas no superior al 50%. Sin embargo, en aquellas estructuras en las que se apliquen las simplificaciones, se efectuará la prueba completa en, al menos, dos vanos.

En los vanos en los que se aplica la simplificación, ésta se introduce de la forma siguiente:

- a) La aplicación de la carga podrá reducirse a un sólo escalón.
- b) Sólo será preciso efectuar medidas en los puntos más característicos, bastando generalmente con la medida de las flechas en el centro de la luz de cada uno de los vanos y el descenso de apoyos en caso de considerarse que su magnitud es significativa.
- c) En el Proyecto de la prueba podrá reducirse el número de estados de carga y/o definir estados de carga más sencillos, con la condición de que todos los vanos queden sometidos a la acción directa de algún tren de carga.

En caso de que se cuente con sistemas automáticos de medida, la simplificación de los estados de carga puede introducirse realizando una prueba cuasi-estática. En ésta, el tren de carga circulará como máximo a 5 km/h y se registrarán datos en todos los puntos de medida con una intensidad no inferior a 10 lecturas por segundo y punto. En este caso, no será de aplicación el criterio de estabilización indicado en el apartado 6.3.2.

6.5. Pruebas complementarias

El Director de la obra podrá ordenar la realización de pruebas complementarias si lo estima necesario, cuando haya dudas sobre los resultados obtenidos en las pruebas o sobre la correcta ejecución de alguna parte de las mismas.

7. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Además de tener en cuenta los criterios hasta ahora expuestos, referentes a la estabilización de las medidas y al tratamiento de los valores remanentes, de forma general, y salvo justificación especial, se considerará que el resultado de la prueba es satisfactorio cuando se cumplan las condiciones indicadas a continuación:

- a) De acuerdo con la "Instrucción de hormigón estructural", en el caso de estructuras de hormigón pretensado, las flechas máximas, obtenidas después de la estabilización, no superarán en más de un 10% a los valores previstos en el Proyecto de la prueba. Se adoptará el mismo porcentaje para el caso de puentes metálicos. Si se trata puentes de hormigón armado o mixtos, este porcentaje será del 15%.
En el caso de que los valores obtenidos sean inferiores al 60% de los previstos, será necesario justificar esta disminución de la respuesta.
- b) Cuando se realicen pruebas simplificadas, se cumplirá lo siguiente:
En los vanos en los que se ha hecho la prueba completa, será de aplicación lo expuesto en el párrafo anterior para la relación entre los valores registrados y los valores teóricos previstos.
En los vanos en los que se ha realizado la prueba simplificada, los resultados obtenidos no deberán desviarse en más de un 10% de los del vano al cual se han asimilado, una vez introducida la corrección debida a la diferencia de luces.

Si en algún vano esta última condición no se cumple, deberá realizarse sobre el mismo la prueba de carga completa.

- c) La abertura de las fisuras producidas en el transcurso de la prueba, así como de las que permanezcan abiertas una vez retirada la carga, deberán estar en consonancia con los criterios recogidos en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) para la comprobación del estado límite de fisuración.
- d) No deberán aparecer signos de agotamiento de la capacidad portante en ninguna parte de la estructura.

A la vista de los resultados de cada estado de carga, el Director de la prueba podrá decidir su repetición si lo considera conveniente.

Excepcionalmente, y siempre que esté justificado, los límites que aquí figuran podrán ser modificados en el Proyecto de la prueba.

8. PRUEBA DINÁMICA

Se realizará prueba de carga dinámica en los casos indicados en el apartado 2 de este documento.

8.1. Objeto de la prueba

El objeto de la prueba dinámica es obtener información sobre la estructura, más allá de la proporcionada por la prueba de carga estática, determinando ciertos parámetros que identifican las características intrínsecas de la estructura, así como su respuesta bajo excitación externa.

Los resultados de una prueba dinámica pueden estar en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. En general, estos resultados podrán ser:

- Líneas de influencia
- Acelerogramas
- Espectros de frecuencia
- Modos de vibración
- Impacto (amplificación dinámica)
- Amortiguamiento

Asimismo, los ensayos dinámicos pueden ser útiles para detectar anomalías de carácter funcional como movimientos imprevistos en aparatos de apoyo, vibraciones en tirantes, etc.

El Proyecto de la prueba de carga debe definir cuáles son los parámetros dinámicos que se van a determinar en la prueba, así como los valores teóricos previstos para los mismos. Suele ser habitual obtener las primeras frecuencias de vibración y el valor del amortiguamiento, como características intrínsecas de la estructura, y las aceleraciones y el coeficiente de amplificación dinámica, como respuesta de ésta frente a una excitación externa (definida en el apartado 8.3).

8.2. Condiciones de ejecución

El proyecto y ejecución de las pruebas dinámicas deberán ser realizados por equipos técnicos con experiencia acreditada en este campo.

Para efectuar la prueba será imprescindible que el puente esté acabado (pavimento, aceras, pretilas, juntas de dilatación,...), debido a la repercusión del estado de la obra en su respuesta dinámica, salvo que se pretenda evaluar el comportamiento de la estructura en una etapa intermedia de su construcción.

8.3. Excitación de la estructura

La fuente de excitación será un tren de carga que recorrerá el puente a diferentes velocidades:

- Velocidad lenta: ≤ 5 km/h (prueba cuasi-estática)
- Velocidad media: entre 30 y 40 km/h
- Velocidad rápida: > 60 km/h (siempre que las condiciones de la obra lo permitan)

El tren de carga estará formado, en general, por un único camión avanzando a velocidad constante a lo largo del eje longitudinal del puente. Cuando se desee excitar un modo de torsión, dicho vehículo circulará por un lateral del tablero.

En el caso de que se desee evaluar el grado de confort en zonas de uso peatonal del puente, el tren de carga estará formado por una batería de tantos camiones como carriles de circulación tenga la calzada, avanzando con velocidad constante a lo largo del tablero en sentido único.

Para la determinación de las frecuencias propias y del amortiguamiento estructural, podrá disponerse en la calzada un obstáculo transversal a la marcha del camión, siempre que se considere necesario aumentar las vibraciones generadas durante el ensayo.

En la tabla siguiente se recoge y detalla lo indicado en los párrafos anteriores.

Parámetro medido	Tren de carga	Velocidad del tren de carga	Disposición de obstáculo
Línea de influencia	1 camión	Lenta	No
Frecuencia	1 camión	Media y rápida	Opcional
Amortiguamiento	1 camión	Media y rápida	Opcional
Impacto	1 camión	Lenta, media y rápida	No
Aceleración (confort)	1 ó más camiones	Media y rápida	No

En casos especiales, podrá excitarse la estructura mediante elementos mecánicos o hidráulicos, suelta repentina de peso, acción de frenado, etc.

Por último, en el caso de pasarelas peatonales, la fuente de excitación empleada para obtener el registro de aceleraciones consistirá en un grupo de personas que efectúan pasadas sucesivas, andando y corriendo, y que avanzan en paralelo a lo largo del tablero. El grupo constará de una persona, de peso medio, por cada metro de ancho de la pasarela.

8.4. Instrumentación

De forma general, pueden medirse las mismas magnitudes que las indicadas para las pruebas estáticas, además de aceleraciones.

Los dispositivos de medida a emplear dependerán de la finalidad de la prueba. Además de los indicados en el apartado 4.2 para pruebas estáticas, que en este caso deberán ser capaces de proporcionar registros dinámicos, la instrumentación contará con acelerómetros cuya respuesta sea de 0 a 50 Hz en frecuencia y de $\pm 0.5g$ en amplitud.

La instrumentación utilizada deberá posibilitar la obtención de registros de señales que permitan su estudio mediante un ordenador o analizador adecuado. La dura-

ción de los registros deberá ser la suficiente para que reflejen, sin interrupción, las condiciones iniciales, el desarrollo del ensayo y la zona de amortiguamiento final.

Los registros se harán de forma analógica o digital, debiendo en ambos casos garantizar el análisis en frecuencia en el rango comprendido entre 0 y 50 Hz. Si el registro es digital, o se obtiene digitalizando uno analógico previo, deberá contener al menos 10 lecturas por segundo y punto de medida, en pruebas cuasi-estáticas, y 100 lecturas por segundo y punto de medida, en pruebas dinámicas.

En particular, el sistema de adquisición de datos deberá proporcionar el valor de la frecuencia fundamental de vibración con una precisión mínima de 0,05 Hz.

8.5. Análisis de resultados

En las pruebas dinámicas no cabe establecer con carácter general unos criterios de aceptación, dada la diversidad de tipos estructurales existentes y de factores que pueden afectar a la respuesta de la estructura.

En algunos casos, la prueba servirá para detectar un posible problema de incomodidad en los usuarios o la generación de esfuerzos no previstos en el cálculo. En otros, una eventual desviación de la frecuencia de vibración respecto a su valor teórico, sin la correspondiente desviación de la flecha estática, pondrá de manifiesto una posible variación de la masa respecto a su valor de cálculo. En general, la determinación de las características dinámicas intrínsecas de la estructura proporcionará unos valores de referencia que permitirán efectuar un seguimiento de la estructura a medio o largo plazo.

En todos los casos, será necesario efectuar una interpretación cuidadosa de los resultados antes de obtener conclusiones y, en general, será necesario contar con la asesoría del Autor del proyecto de la obra para poder evaluar la trascendencia de esos resultados.

Como marco de referencia, se dan a continuación unas indicaciones relativas a los aspectos que normalmente se tratan en las pruebas dinámicas, con órdenes de magnitud para puentes de tipos y luces habituales.

A) Características dinámicas intrínsecas de la estructura

Frecuencias

La frecuencia principal o, en su defecto, la correspondiente al modo excitado durante la prueba (en general, flexión de eje horizontal ortogonal a la directriz del puente), no diferirá de la calculada teóricamente en mayor medida de lo que lo hayan hecho las flechas, teniendo en cuenta que éstas son proporcionales a la rigidez del tablero mientras que la frecuencia lo es, en primera aproximación, a la raíz cuadrada de la misma.

Amortiguamiento

El amortiguamiento suele expresarse mediante el decremento logarítmico, que se define como:

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right)$$

siendo: n número de ciclos del intervalo considerado, a la frecuencia fundamental
 A_0 amplitud de la respuesta dinámica al inicio de dicho intervalo
 A_n amplitud de la respuesta dinámica al final del intervalo

El número de ciclos deberá ser el mayor posible que permita el amortiguamiento de la estructura y la resolución de los instrumentos de medida. En general, se considera deseable un mínimo de 5 a 10 ciclos.

Las amplitudes A_0 y A_n se tomarán de la zona del registro de datos correspondiente a las vibraciones libres de la estructura, tras el paso del tren de carga. Con preferencia a otras magnitudes, las amplitudes A_0 y A_n serán de desplazamientos (flechas). En defecto de éstas podrán utilizarse deformaciones unitarias (tensiones) o aceleraciones.

Si en el intervalo considerado existieran varios modos de vibración superpuestos y las amplitudes A_0 y A_n no pudieran determinarse claramente de los registros analógicos de datos en el dominio del tiempo, se procesará la señal y se utilizarán las amplitudes a la frecuencia fundamental f_0 en dos espectros correspondientes a instantes de tiempo separados n/f_0 segundos.

Se suelen considerar valores normales del amortiguamiento, expresado éste en forma de decremento logarítmico, los comprendidos entre 0,03 y 0,12.

También es frecuente expresar el amortiguamiento como fracción del amortiguamiento crítico a través del índice de amortiguamiento ζ que se define mediante la relación:

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi}$$

Valores normales de este índice, expresados en tanto por cien, serían los comprendidos entre 0,5% y 2%.

B) Características dinámicas dependientes de la fuente de excitación

Aceleraciones

Desde el punto de vista de la incomodidad o inquietud del usuario, en pasarelas y zonas de uso peatonal de puentes, la aceleración puede clasificarse en:

Imperceptible a fácilmente perceptible:	$a \leq 0,025 \text{ g}$
Claramente perceptible a molesta:	$0,025 \text{ g} < a \leq 0,075 \text{ g}$
Molesta a muy molesta:	$0,075 \text{ g} < a \leq 0,125 \text{ g}$

Donde a es la máxima aceleración vertical de pico registrada⁴ y g la constante de aceleración gravitatoria, ambas expresadas en $[\text{m/s}^2]$.

Impacto

El coeficiente de impacto (coeficiente de amplificación dinámica o incremento dinámico) se define como:

$$\Phi = f_{\text{din}} / f_{\text{est}}$$

siendo: f_{din} máxima respuesta dinámica
 f_{est} máxima respuesta estática o cuasi-estática frente a la misma acción

El coeficiente de impacto puede considerarse:

Bajo:	$\Phi \leq 1,10$
Medio:	$1,10 < \Phi \leq 1,30$
Alto:	$\Phi > 1,30$

⁴ El punto de medida para registrar esta aceleración deberá estar localizado en la zona peatonal.

El coeficiente de impacto se determinará a partir de registros de desplazamientos (flechas) y/o deformaciones unitarias.

9. INFORME DE LA PRUEBA DE CARGA

Una vez finalizada la prueba de carga se redactará el Informe de la prueba, en el que figurarán los aspectos siguientes:

- Fecha, hora de inicio y fin y asistentes a la prueba
- Referencia al proyecto de la estructura y de la prueba de carga (clave, fecha, autor,...)
- Descripción de la obra y de su estado previo a la prueba
- Descripción detallada de los vehículos utilizados y los distintos estados de carga
- Descripción de las magnitudes, equipo instrumental de toma de datos y número y situación de los puntos de medida
- Información sobre el desarrollo de la prueba (hora de comienzo de cada estado de carga, tiempo transcurrido entre carga y descarga, número de escalones, etc.)
- Registros de las magnitudes medidas durante la prueba
- Comparación con los valores teóricos previstos y valoración del cumplimiento de los criterios de aceptación
- Cuestiones de interés observadas en las inspecciones de la obra antes, durante o después de la prueba
- Varios: documentación fotográfica, condiciones meteorológicas, puntos de referencia para la nivelación si los hubiera, incidencias, ...

El informe estará redactado y firmado por el ingeniero Director de la prueba. Si, por indicación del Director de las Obras, la valoración del cumplimiento de los criterios de aceptación fuera efectuada por el Autor del Proyecto, éste será quien redacte y firme dicha parte del informe.

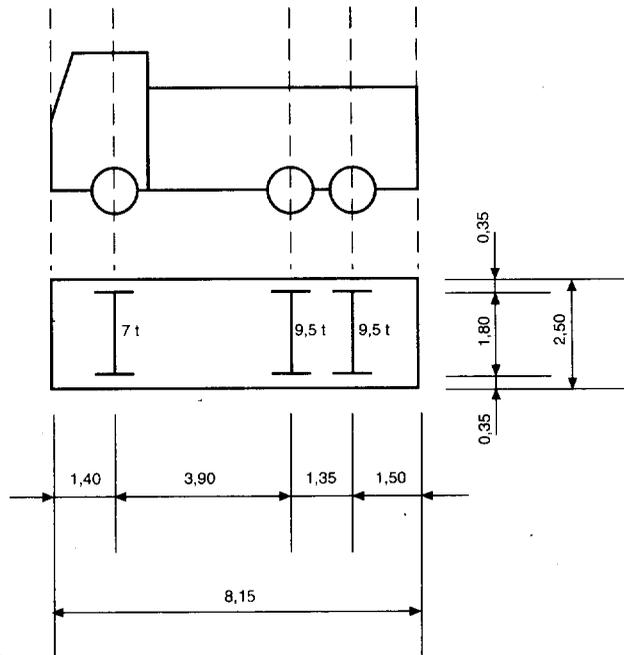
10. ACTA DE LA PRUEBA DE CARGA

Con base en el Informe, se redactará el Acta de la prueba, documento de carácter oficial que contiene una descripción resumida de los distintos aspectos de la prueba, mencionados en el apartado anterior, y una referencia expresa al cumplimiento de los criterios de aceptación.

El Acta estará firmada al menos por el Director de la Obra, el Director de la prueba y el representante del Constructor.

ANEJO 1. VEHICULOS TIPO

1. CAMIÓN DE TRES EJES (26 t)



2. CAMIÓN ARTICULADO DE CUATRO EJES (38 t)

