

Pruebas de carga en puentes

Eva Lantsoght

Telmo Andrés Sánchez



Contenidos

1. Definición de pruebas de carga
2. Tipos y clasificación de pruebas de carga
3. Análisis de la conveniencia de aplicar una prueba de carga
4. Consideraciones generales de pruebas de carga
5. Diferencias de pruebas de carga en puentes nuevos y existentes
6. Uso de pruebas de carga a nivel internacional

Definición de pruebas de carga



Definición

La prueba de carga es la observación y medición de la respuesta estructural de un puente sometido a cargas controladas y predeterminadas sin causar cambios en la respuesta elástica de la estructura. Se pueden utilizar pruebas de carga para verificar el desempeño de los elementos y el sistema estructural bajo una carga viva conocida y proporcionar una metodología de evaluación alternativa al calculo analítico de la capacidad de carga de un puente.

Definición

AASHTO (2016). The manual for bridge evaluation with 2016 interim revisions. Washington, D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials.

Load testing is the observation and measurement of the response of a bridge subjected to controlled and predetermined loadings without causing changes in the elastic response of the structure. Load tests can be used to verify both component and system performance under a known live load and provide an alternative evaluation methodology to analytically computing the load rating of a bridge.

Definición

- Elementos necesarios:
 - Medir (sensores)
 - Carga conocida
 - No causar cambios al puente
 - Criterios de paralización
 - Sensores
 - Entender comportamiento estructural

Tipos y clasificación de pruebas de carga



Tipos de pruebas de carga (1)

PRUEBA DE CARGA DE DIAGNÓSTICO



Delaware

Jones, B. P. (2011). Reevaluation of the AASHTO effective width equation in concrete slab bridges in Delaware. MSc. Thesis, University of Delaware.

PRUEBA DE CARGA DE CAPACIDAD



Puente Barcza, Polonia

Olaszek, P., G. Świt and J. R. Casas (2012). Proof load testing supported by acoustic emission. An example of application. IABMAS 2012.

Tipos de pruebas de carga (2)

PRUEBA DE CARGA DE DIAGNÓSTICO

- Calibración de modelo analítico (elementos finitos)
- Medir deformaciones sobre altura de viga
- Cargas bajas
- Evaluación de método de diseño
- Análisis con modelo analítico con resultados de prueba

PRUEBA DE CARGA DE CAPACIDAD

- Demuestra que el puente cumple con requisitos de la norma
- Cargas altas
- Riesgo alto
- Mediciones críticas
- Criterios de paralización

Pruebas de carga en puentes existentes

- Formula de *Rating Factor*
(factor de capacidad de carga)

$$RF = \frac{C - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_P)(P)}{(\gamma_{LL})(LL + IM)}$$

- Prueba diagnostica: identificar LL con mas precisión
- Prueba de capacidad: determinar RF

- Capacidad de carga

- Prueba diagnostica: con modelo validado en campo, ajustado para evaluación
- Prueba de capacidad: en base de peso de vehiculo L_R y peso de carga L_P

$$RF_o = \frac{OP}{L_R(1 + IM)}$$

$$OP = \frac{k_0 L_P}{X_{pA}}$$

Análisis de la conveniencia de aplicar una prueba de carga

Objetivos de la prueba de carga

- Desarrollo de modelos analíticos del puente comprobado con datos de campo
- Evaluación del efecto de deterioro de materiales en el desempeño del puente
- Evaluación de rehabilitación
- Análisis de puentes históricos
- Determinación de mecanismos de resistencia de carga adicionales
- Evaluación del desempeño de nuevos materiales
- Estimación de vida de fatiga restante
- Verificación de comportamiento en puentes nuevos
- Medir propiedades dinámicas
- Verificar ciertos aspectos del desempeño

Objetivos

- Aplicación de carga
- Plan de sensores
- Evaluar si una prueba de carga puede alcanzar los objetivos

Cuando hacer una prueba de carga

- Análisis de costos y beneficios de ciclo de vida

$$C_{ET} = C_T + C_{PM} + C_{INS} + C_{REP} + C_F$$

C_T = costo inicial

C_{PM} = costo esperado de mantenimiento

C_{INS} = costo esperado de inspecciones

C_{REP} = costo esperado de reparaciones

C_F = costo de falla

Cuando hacer una prueba de carga

- Análisis de costos y beneficios de ciclo de vida con monitoreo

$$C_{ET}^* = C_T^* + C_{PM}^* + C_{INS}^* + C_{REP}^* + C_F^* + C_{MON}$$

- Tendencias:
 - Costo económico, ambiental y social
 - Análisis al nivel de la red de puentes

Resumen

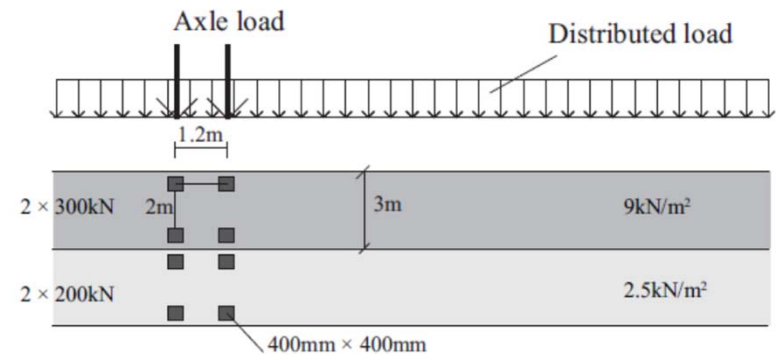
- Justificación de prueba de carga:
 - Nivel de incertidumbre
 - Objetivos y ejecución de la prueba
 - Análisis de costos y beneficios

Consideraciones generales de pruebas de carga



Preparación de prueba (1)

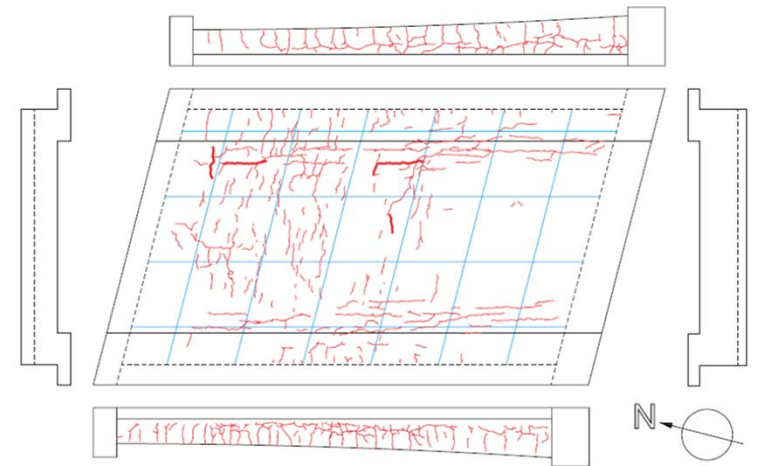
- Definir objetivos
- Carga viva: distribuida + concentrada



Safety level	β	Reference period	γ_{sw}	γ_{sd}	γ_{ll}
RBK Design	4.3	100 years	1.10	1.25	1.50
RBK Reconstruction	3.6	30 years	1.10	1.15	1.30
RBK Usage	3.3	30 years	1.10	1.15	1.25
RBK Disapproval	3.1	15 years	1.10	1.10	1.25

Preparación de prueba (2)

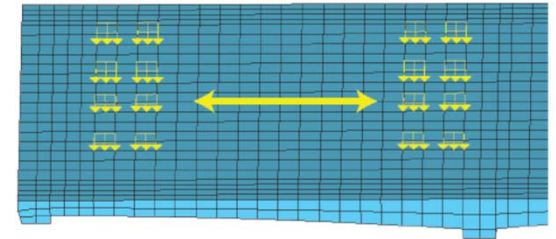
- Documentación disponible
- Inspección
 - Perdidas de secciones
 - Deterioro
- Cálculos preliminares
 - Capacidad de carga
 - Capacidad esperada
- Información sobre materiales
- Modelo analítico
- Inspección con métodos no-destrutivos



Lantsoght, E.O.L., et al., *Towards standardization of proof load testing: pilot test on viaduct Zijlweg*. Structure and Infrastructure Engineering, 2017: p. 16.

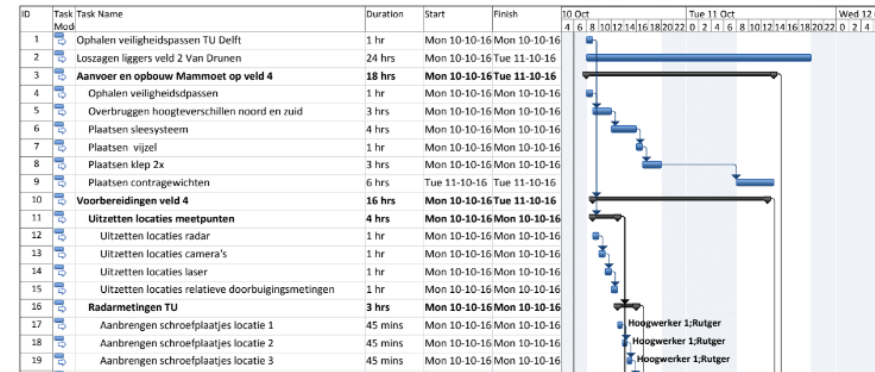
Preparación de prueba (3)

- Posición de la carga
- Magnitud de la carga
- Usar modelo elementos finitos lineal



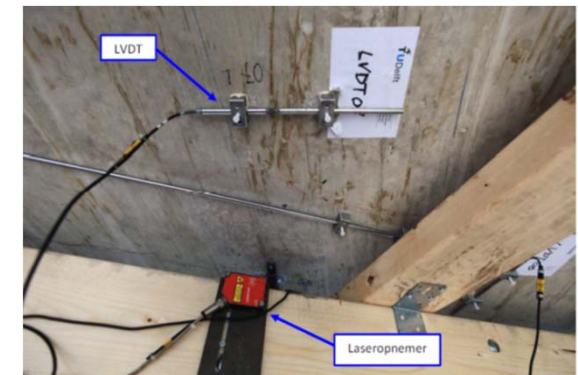
Preparación de prueba (3)

- Limitaciones de sitio ⇔ inspección
 - Plan de mediciones
 - Aplicación de carga
 - Seguridad
- Preparación ⇔ objetivos de la prueba
- Interpretación de repuestas de sensores + definición de criterios de paralización
- Plan de seguridad y riesgos
- Planificación de actividades



Preparación de prueba (4)

- Plan de mediciones:
 - Perfiles de deflexión longitudinal y transversal
 - Deflexión de soportes
 - Deformación debajo de losa
 - Deformación para corregir T , RH
 - Apertura de fisuras existentes
 - Generación de fisuras nuevas
 - Carga aplicada
 - *Emisiones acústicas (investigación)*
 - *DIC (investigación)*
 - *Fibras ópticas (investigación)*
- Colección de datos
- Detalles de instalación y cableo
- Incluir redundancia

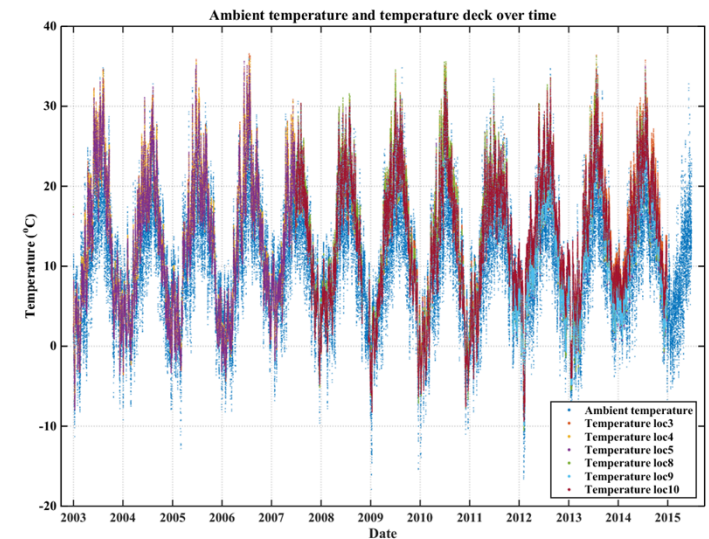


Preparación de prueba (5)

- Adquisición y visualización de datos
 - Tasa de muestreo
 - Mediciones en vivo
 - Calibración de sensores antes de la prueba
- Requerimientos de personal
 - Responsabilidad: ingeniero de puentes
 - Personal adecuado para prueba y control de trafico
 - Requisitos de las agencias locales

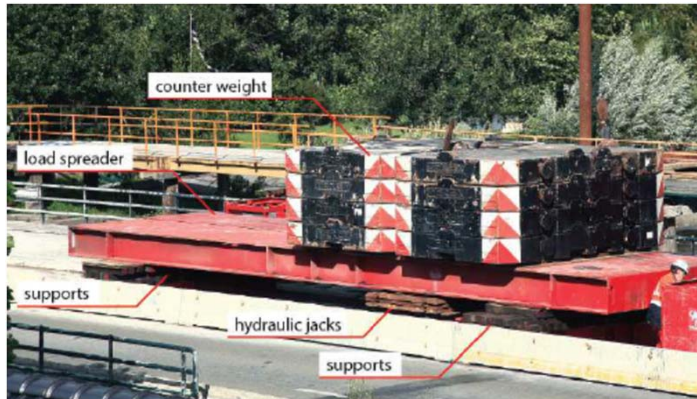
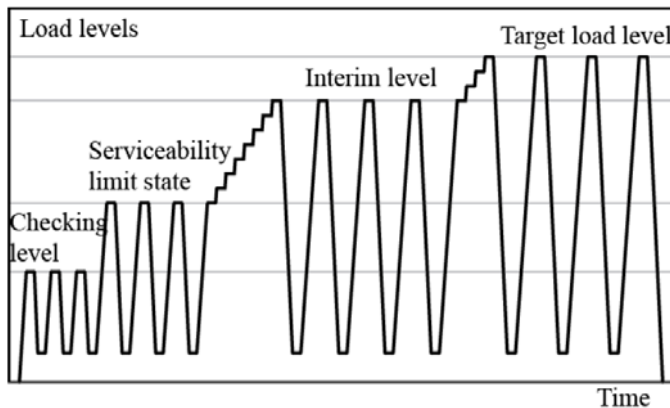
Efectos ambientales

- Efecto de T y RH
 - En respuesta estructural
 - Usar sensor dummy
 - Usar casos “sin carga”
 - En sensor
 - Selección de sensor
 - Corrección con información de fabrica



Koekkoek, R.T., E.O.L. Lantsoght, and D.A. Hordijk, *Proof loading of the ASR-affected viaduct Zijlweg over highway A59*. 2015, Delft University of Technology: Delft, The Netherlands. p. 180.

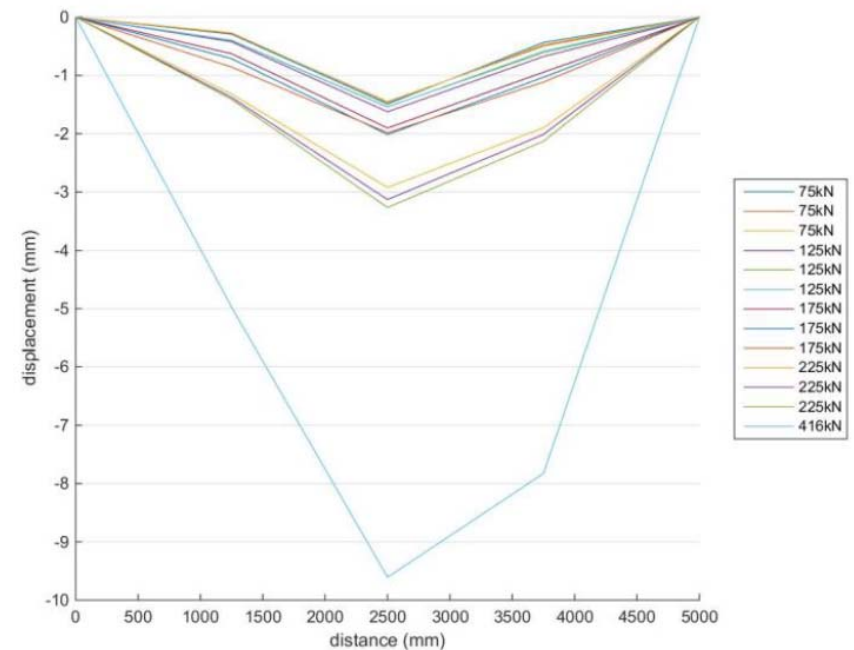
Ejecución de prueba



- Aplicación de carga de manera cíclica
 - Linealidad y reproducibilidad de mediciones
 - Carga mínima durante prueba
 - Niveles de carga:
 - Nivel bajo: comprobación de mediciones
 - Nivel de servicio
 - Nivel intermedio
 - Nivel de carga requerida para aprobar puente
 - Verificar criterios de paralización

Análisis de prueba

- Análisis de datos
 - Corrección efecto de T
 - Corrección deflexiones de soporte
 - Figuras para informe
- Recomendación final



Diferencias de pruebas de carga en puentes nuevos y existentes



Diferencias

PUENTES NUEVOS

- Comprobar comportamiento de puente
- Requisito estándar en algunos países
- Información disponible

PUENTES EXISTENTES

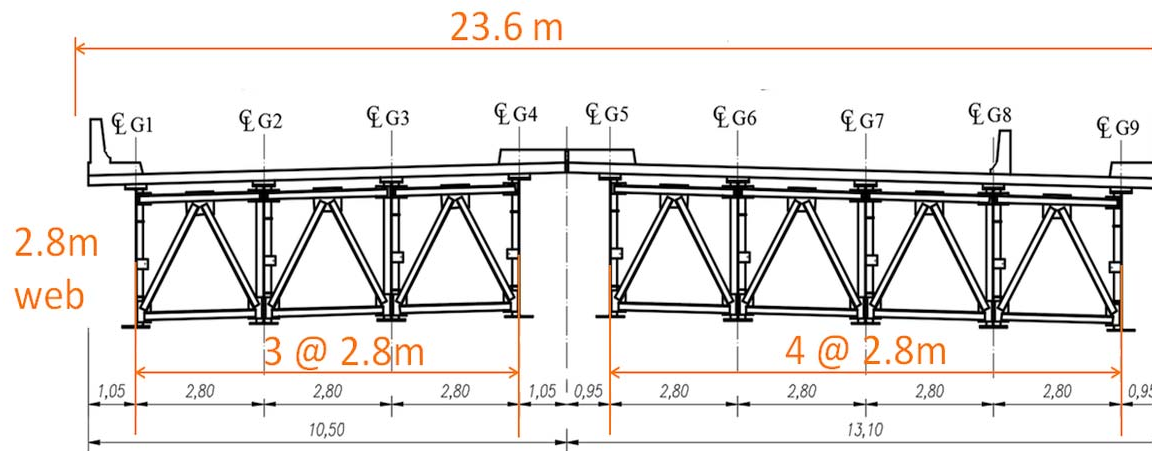
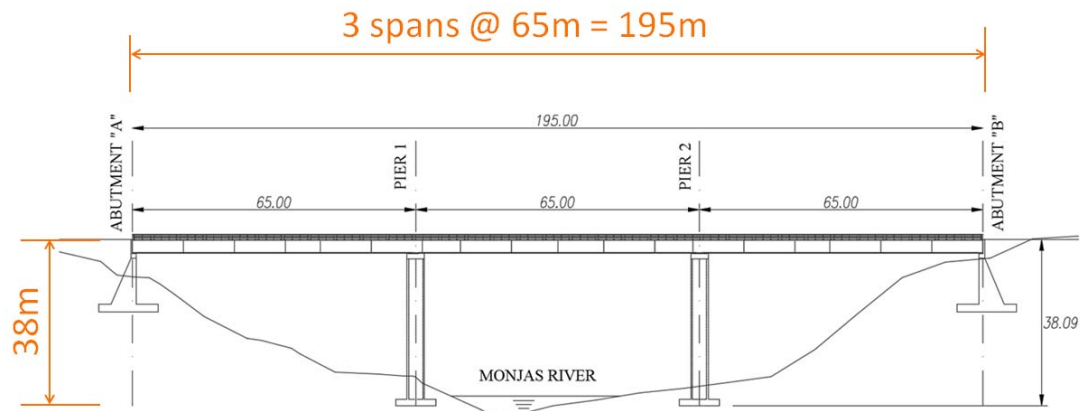
- Varios objetivos
- Método para determinar capacidad de carga
- Efectos de deterioro
- Limitada información

Ejemplo de puente nuevo

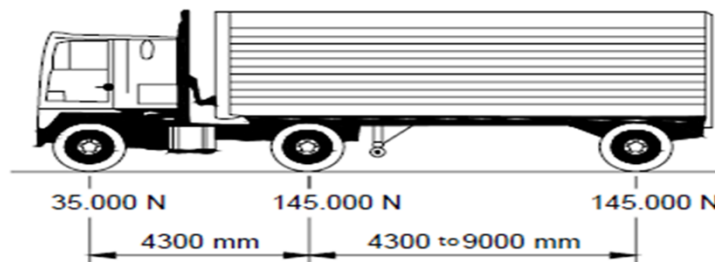
- Puente Los Pajaros (Quito)
- Primer puente de acero con lanzamiento incremental en Quito
- Objetivo de prueba: verificar diseño
- Niveles de carga: 60% de AASHTO HL-93



Puente Los Pajaros



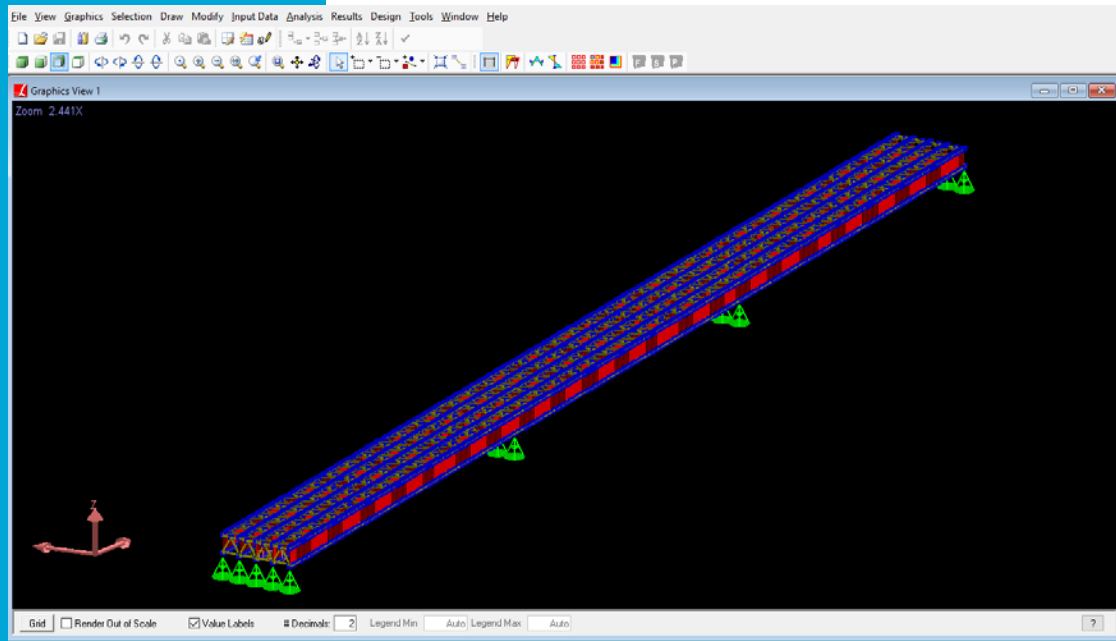
- En puentes nuevos, las pruebas de carga de diagnóstico se usan para demostrar que la estructura se comporta según las predicciones del modelo computacional
- Típicamente, las deflexiones de las pruebas se las compara con las deflexiones obtenidas del modelo analítico
- Los niveles de carga de las pruebas no están estrictamente establecidos, pero están alrededor del 60% de la carga de diseño (AASHTO HL-93)



+ 9,36kN/m por carril

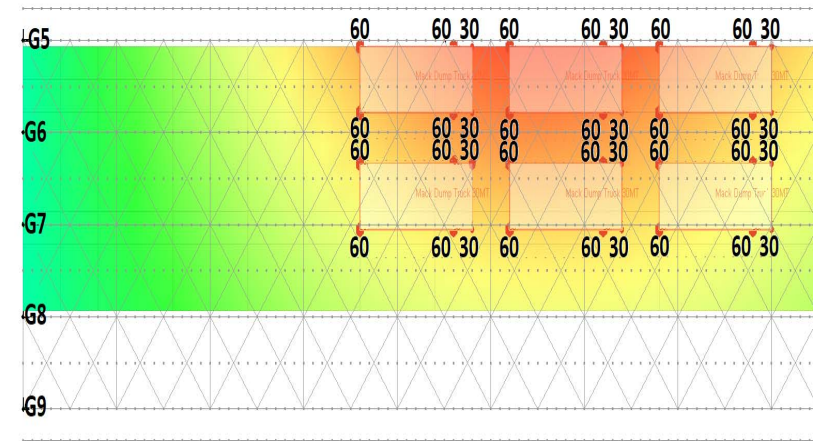
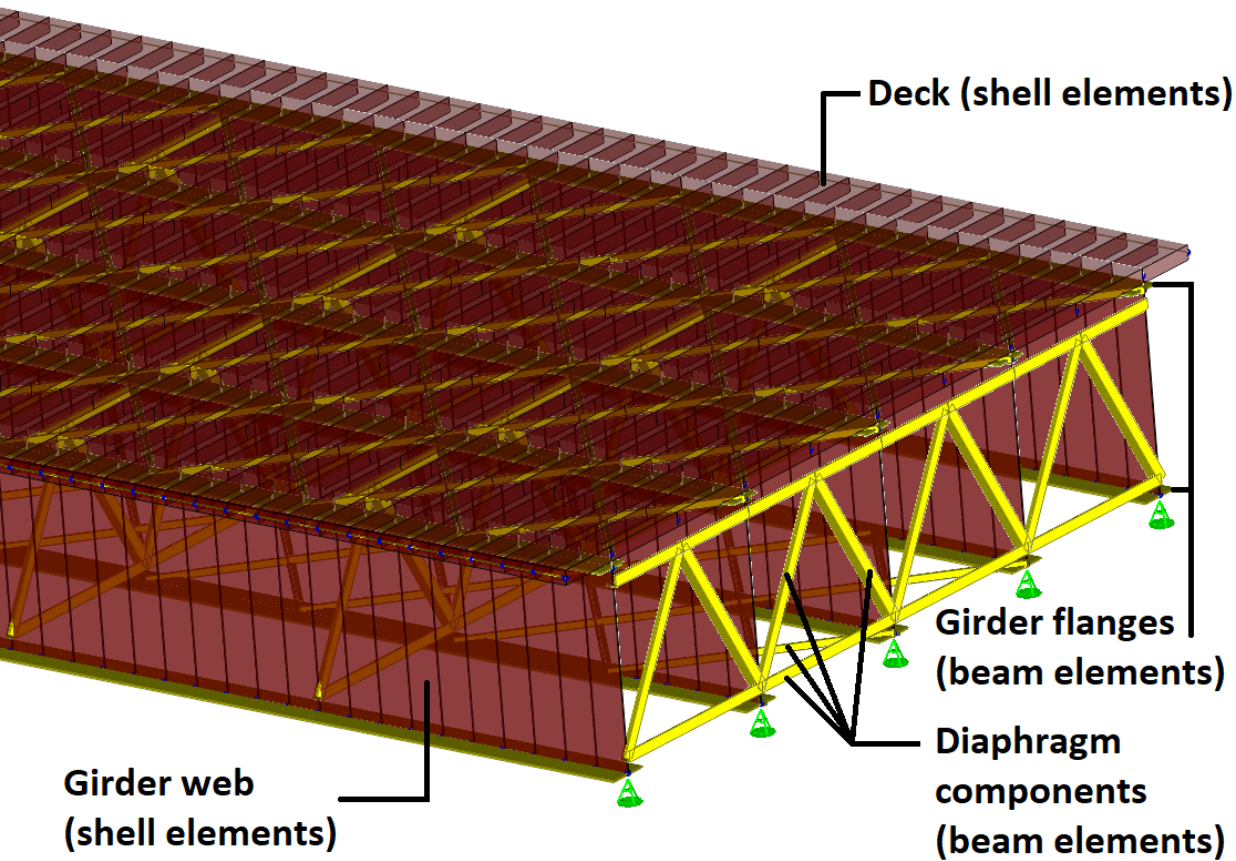
- El objetivo fundamental es el de inducir deflexiones que puedan ser “medibles”

Modelo Computacional



↑
¿El modelo representa la realidad?
↑

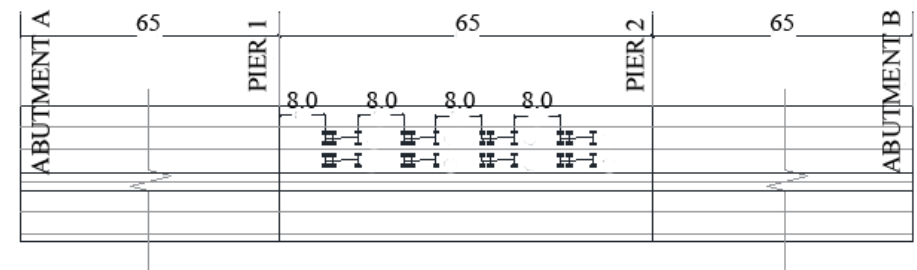
Modelo Computacional



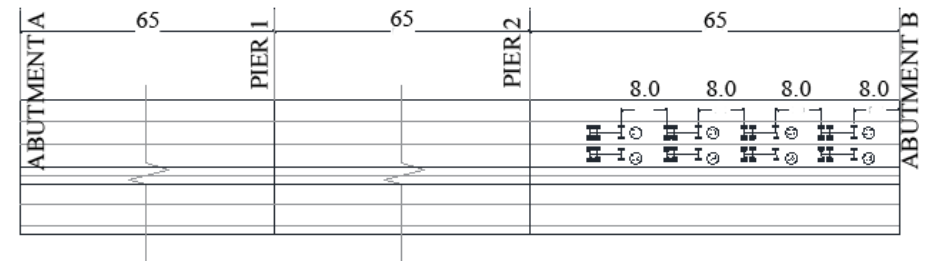
Posición de las volquetas
300kN/und.

Pruebas de Carga

- Ocho volquetas $\rightarrow$ 2400kN (60% de la carga de diseño)
- Siete posiciones (casos de carga)

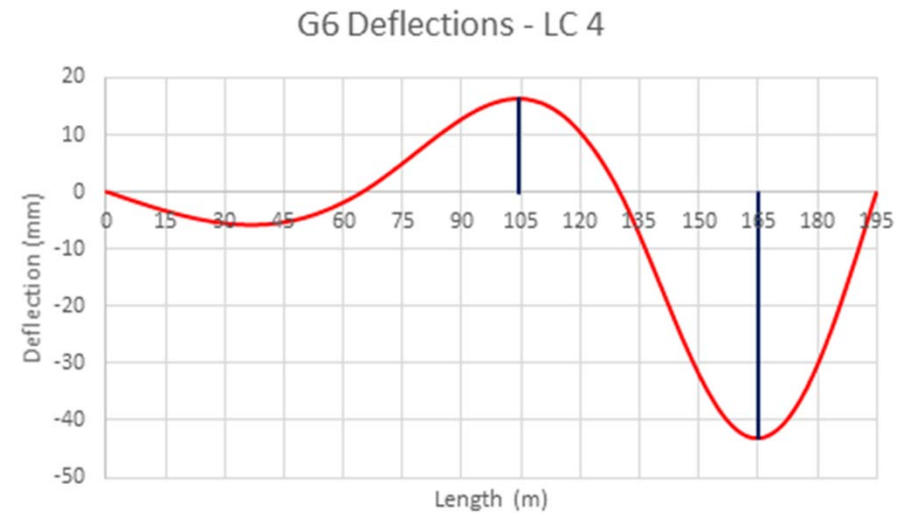
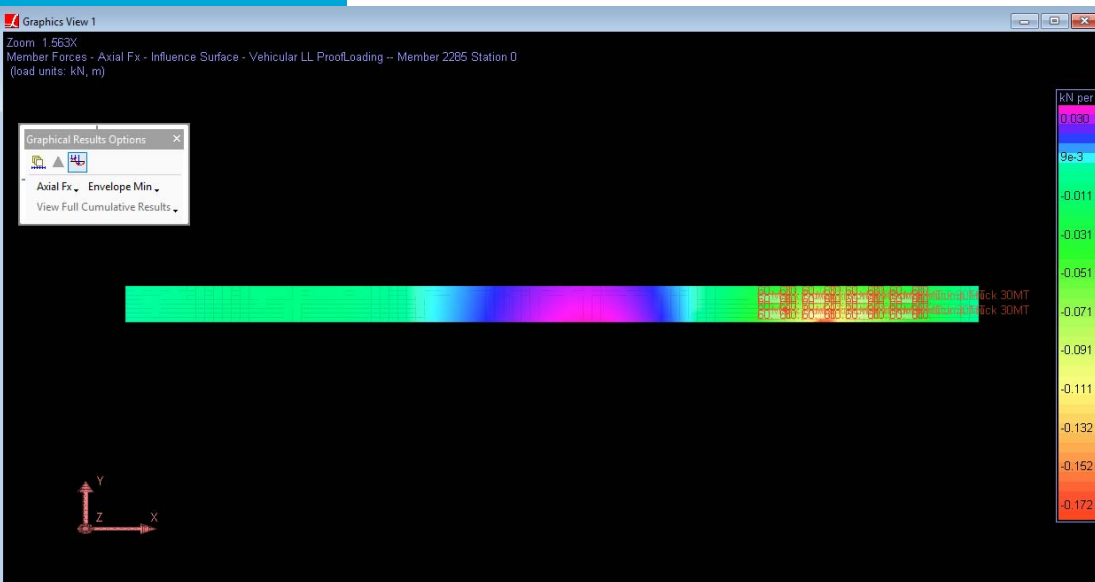


Caso de Carga 3



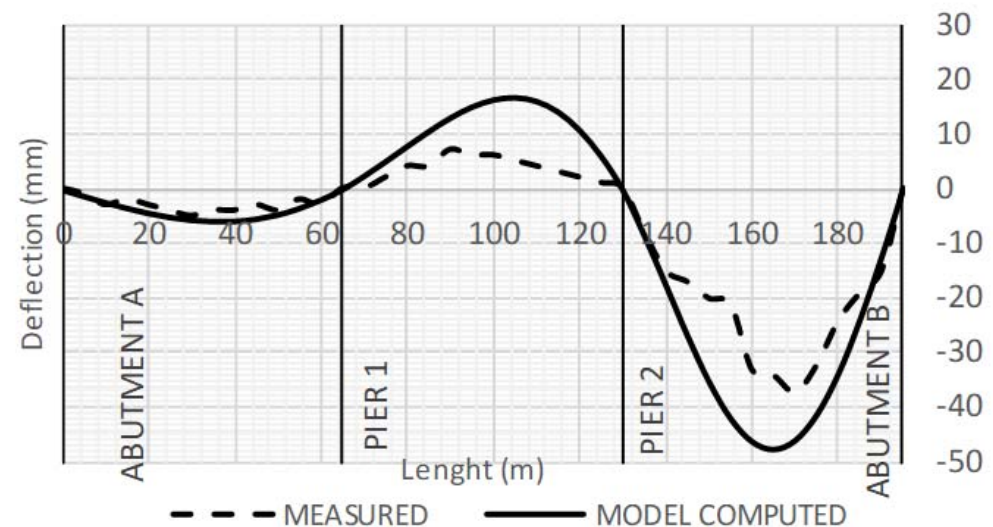
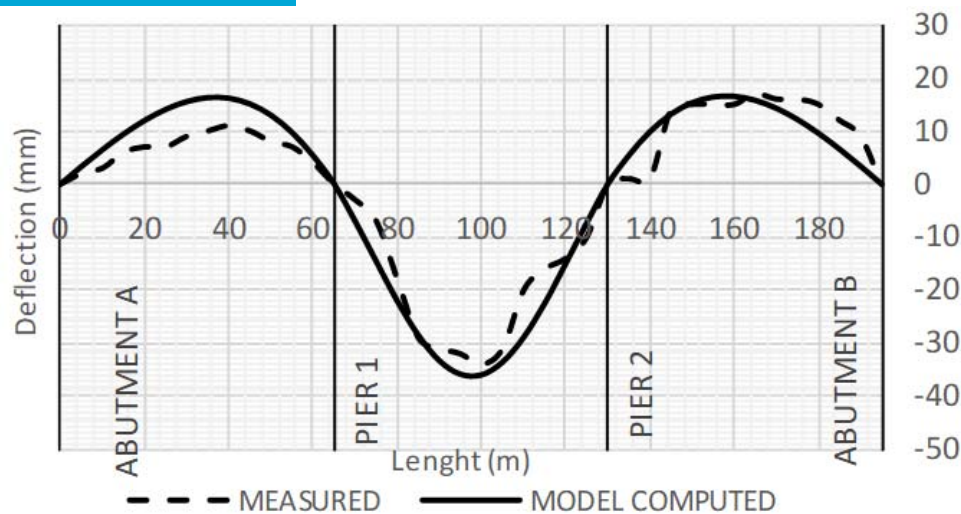
Caso de Carga 4

Modelo Computacional





Pruebas de Carga vs. Predicciones Analíticas



Caso de Carga 3

- Las predicciones analíticas son similares a las mediciones de la prueba de carga
- El puente se comporta según el diseño estructural
- El puente está listo para ser abierto al tráfico

Caso de Carga 4

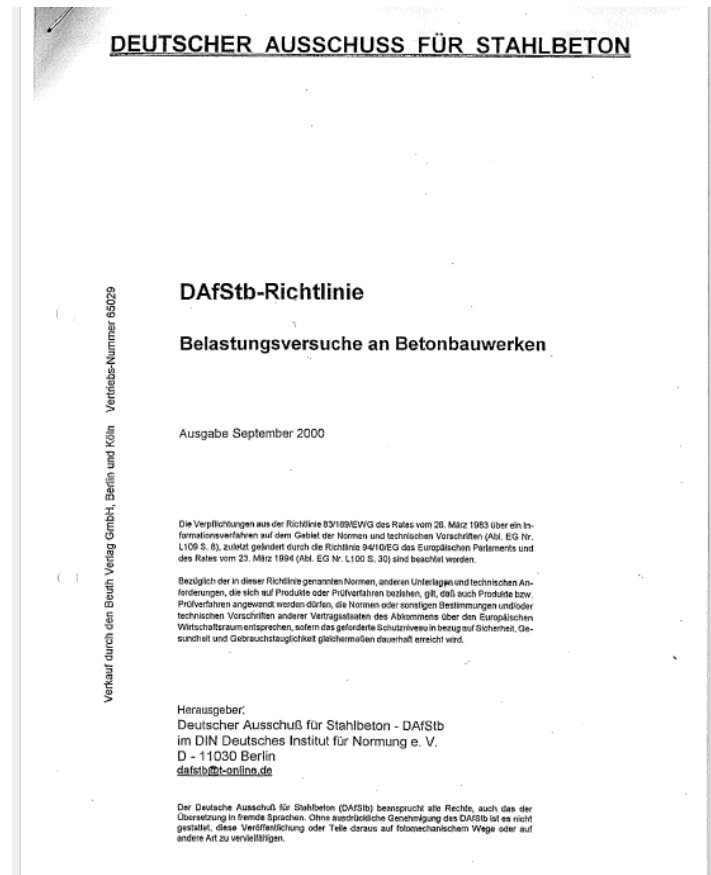
Uso de pruebas de carga a nivel internacional



TUDelft

Códigos para pruebas de carga de capacidad

- Europa:
 - DAfStB Richtlinie (2000, 2020)
 - Normativa Española para puentes nuevos (1999)
 - Normativa Francesa para puentes nuevos (2004)
- EEUU:
 - Edificios: ACI 437.2M-13
 - Puentes: Manual of Bridge Rating Through Load Testing (1998)
 - TRB E-C257
- Flexión únicamente
- Efecto de fisuras existentes?

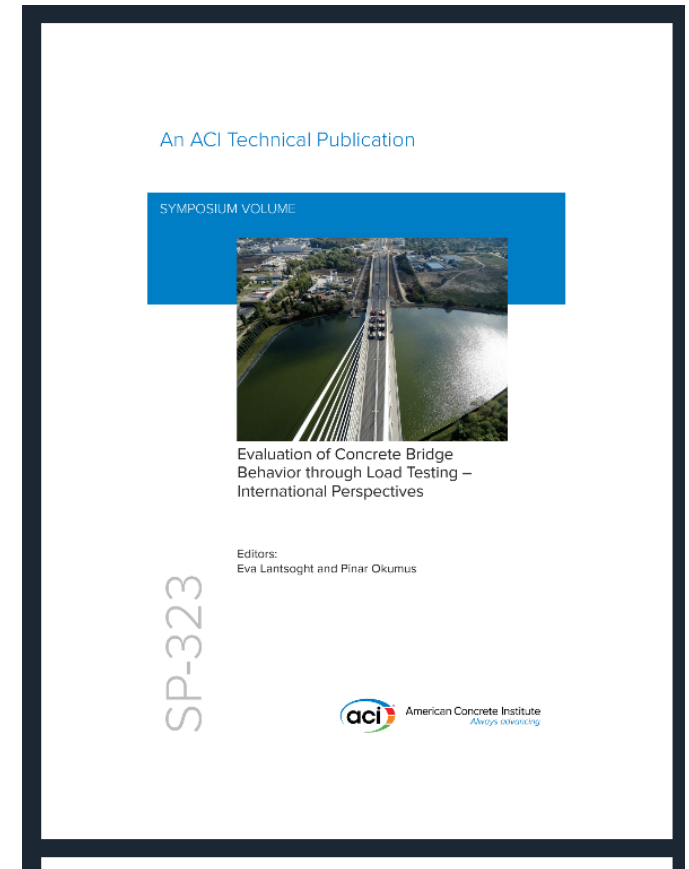


Contexto internacional

- Desarrollo de codigos al nivel internacional
 - USA – ACI 437 for buildings
 - USA – ACI 342 for bridges (capitulo sobre pruebas de carga)
 - Holanda: Investigación
 - *fib* – bulletin existing structures + new Model Code
 - IABMAS Comité internacional
- Conferencias: ACI 2017, IABMAS 2018; IALCCE 2016 + 2018, BEI 2019, fib 2017, IABSE 2021, IABMAS 2022

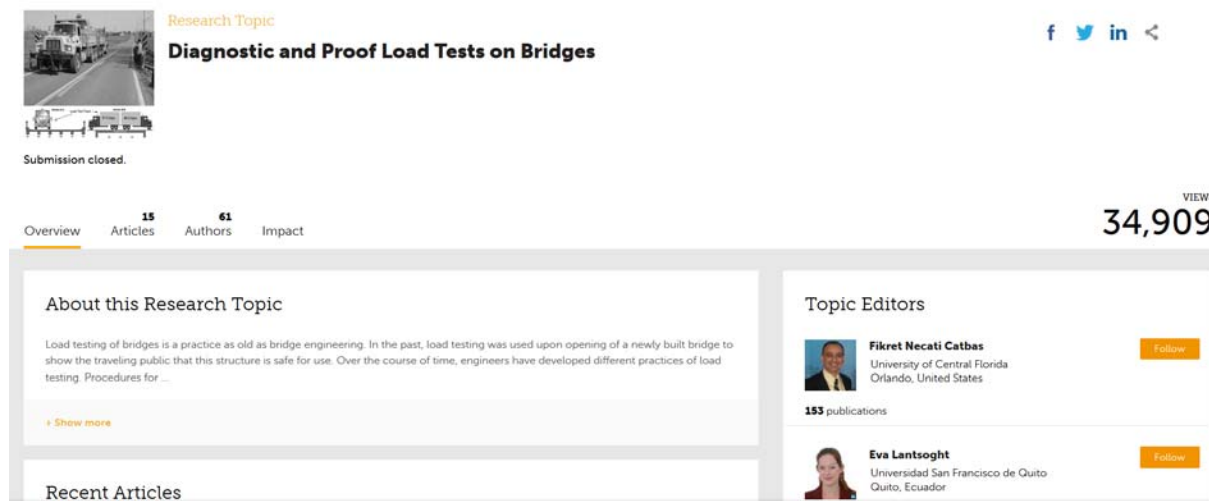
Contexto internacional

- ACI SP-323 (co-editor):
Evaluation of concrete
bridge behavior through load
testing – international
perspectives



Contexto internacional

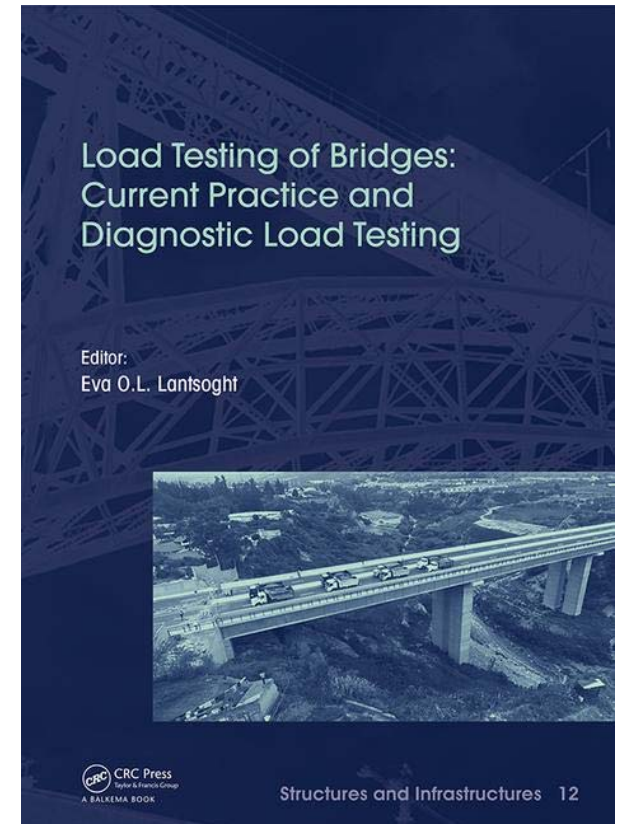
- Frontiers Built Environment – Bridge Engineering article collection (guest associate editor)



<https://www.frontiersin.org/research-topics/7721/diagnostic-and-proof-load-tests-on-bridges>

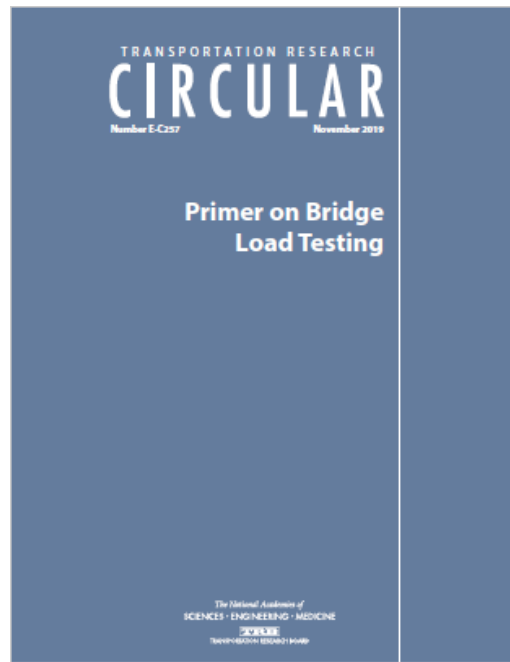
Contexto internacional

- Two Books: Load Testing of Bridges (editor) – Structures and Infrastructures series (2019)



Contexto internacional

E-circular



Primary Contributors:

Sreenivas Alampalli, NYS DOT
Dan M. Frangopol, Lehigh University
Jesse Grimson, BDI
David Kosnik, CTL Group
Marvin Halling, Utah State University
Eva O.L. Lantsoght, USFQ & TU Delft
Jeff S. Weidner, University of Texas
David Y. Yang, Lehigh University
Y. Edward Zhou, AECOM

Reviewed by:

Erin Bell, University of New Hampshire
Christina Freeman, FL DOT
James Long, PA
Brent Phares, Iowa University
Franklin Moon, Rutgers University
Duane Otter, TTCI
Thomas E. Beitelman, AASHTO T-18 /FL DOT
Stephen Maher, TRB



Download link: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec257.pdf>

Pruebas de carga TU Delft

- Pruebas de carga:
 - Heidijk 2007
 - Medemblik 2009
 - Vlijmen-Oost 2013
 - Puente Halvemaans 2014
 - *Puente Ruytenschildt 2014*
 - Zijlweg 2015
 - Beek 2015
 - *Puente Vecht 2016*



Puente Ruytenschildt, verano 2014

Zijlweg

- Prueba de carga para flexión y cortante
- Puente cerrado 1 semana
- Viaducto sobre carretera
- Daños de ASR
- Mediciones:
 - Láser
 - Emisiones acústicas
 - LVDT
- Aprobado con resultados de la prueba



De Beek (1)

- No existe degradación de materiales
 - Agrietamiento importante
 - Prueba en tramo 1
 - Tramo 2 sobre carretera
 - Flexión y cortante
-
- Puente aprobado, si 7% de redistribución plástica es aceptable
 - Inspecciones necesarias para durabilidad y corrosión



De Beek (2)

- Video de Beek





PREGUNTAS

