

## Uma Análise de Confiabilidade dos Recalques Diferenciais na Interface Ponte-Rodovia

Gabriela B. Perche <sup>1</sup>, André T. Beck <sup>2</sup>, Gustavo H. Siqueira <sup>3</sup>, Mounir K. El Debs <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Mestranda, Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC – USP gabriela.perche@usp.br

<sup>2</sup> Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC – USP atbeck@sc.usp.br

<sup>3</sup> Professor Doutor, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – FEC – Unicamp  
siqueira@fec.unicamp.br

<sup>4</sup> Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC – USP mkdebs@sc.usp.br

### Resumo

Lajes de aproximação de pontes atenuam os assentamentos diferenciais gerados devidos à diferença de rigidezes entre a ponte e a via, e seus problemas em projeto e execução podem gerar altos custos às agências reguladoras. No caso de aterros de encontro compostos majoritariamente de argilas, os assentamentos por consolidação podem levar à ultrapassagem do estado limite de serviço associado ao conforto na via. Neste trabalho, estudou-se a probabilidade de uma deformação na extremidade de laje de aproximação padrão exceder um valor empírico. Os assentamentos por consolidação foram avaliados através da minimização de uma equação de estado limite. As variáveis aleatórias consideradas foram a altura do aterro, o índice de vazios do solo e o incremento de carregamento sobre ele. Descobriu-se que a probabilidade de falha é alta para as hipóteses analisadas, e que detalhes de projeto relacionados à laje de aproximação e ao aterro são extremamente importantes.

### Palavras-chave

Aterros rodoviários; laje de aproximação; consolidação; confiabilidade; recalques diferenciais

### Introdução

Encontros de pontes e viadutos podem ser constituídos por diversos elementos, de maneira a garantir uma boa interface entre a estrutura e a via rodável com segurança, conforto ao usuário e uma manutenção que se justifique dentro da vida útil do projeto. Devido aos carregamentos a que são submetidas, as pontes apresentam valores de reações verticais elevados, sendo necessária a utilização de uma estrutura de fundação que transmita estes esforços a um maciço de solo ou rocha competente, o que cria uma estrutura com recalques verticais muito baixos. Por outro lado, os encontros devem suprir desníveis com grandes alturas de aterro compactado, o que pode levar a altos assentamentos verticais. A diferença entre as rigidezes dos apoios destas duas estruturas leva a um desnível na saída das pontes, o que pode acentuar danos nas vias de saída e causar grande desconforto ao usuário.

Um estudo conduzido por BRIAUD e HOFFMAN (1997) estimou que, nos Estados Unidos da América (EUA), o desnível na saída de pontes afeta aproximadamente 25% das estruturas no país, e gera custos de manutenção da ordem de US\$ 100 milhões

por ano. Alguns autores tentam estabelecer um valor máximo aceitável de gradiente vertical, que define um limite a partir do qual seriam necessárias ações de remediação. LEONHARDT (1979) comenta sobre um gradiente máximo de 1/200 para pontes e HA, SEO e BRIAUD (2002) afirmam que um gradiente de 1/125 é suficiente para causar grave desconforto aos motoristas, mas este fator varia de acordo com volume e velocidade do tráfego.

Estimar recalques, no entanto, não é uma tarefa fácil, e envolve a incerteza de carregamentos, de distribuição de tensões no solo e dos parâmetros do solo em questão (WAHLS, 1990). Além disso, vários fatores podem acentuar os assentamentos nos aterros de saída de pontes, como falhas no detalhamento de estruturas de drenagem, má execução da compactação do aterro, uso de solos compressíveis e/ou com granulometria inadequada, perdas de solo por erosão, tráfego elevado, ciclos de temperatura, dentre outros (HA, SEO e BRIAUD, 2002).

Segundo o Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP, 2005), é necessário adotar uma estrutura rígida sobre o aterro de acesso, denominada laje de aproximação, que vise atenuar os efeitos de recalques diferenciais na interface entre a ponte e a via rodável.

Devido à grande imprecisão na estimativa de recalques em aterros, torna-se interessante uma avaliação que envolva a confiabilidade do sistema. Para isso, será usada uma equação de estado limite do tipo:

$$g(x) = \Delta_{adm} - \Delta(\Delta\sigma, e_0, H) \quad (1)$$

Onde  $g(x)$  é a função a ser minimizada

$\Delta_{adm}$  é o deslocamento admissível, admitido como 1/125 por este ser o critério mais brando

$\Delta(\Delta\sigma, e_0, H)$  é o deslocamento real, estimado a partir do carregamento, do índice de vazios e da altura do aterro, exibidos nesta ordem na função acima.

Assim, objetiva-se determinar a probabilidade de que os assentamentos totais em um aterro de encontro de ponte excedam o limite estipulado, considerando as incertezas nas variáveis aleatórias envolvidas.

A laje de aproximação a ser avaliada tem geometria conforme o projeto padrão preconizado pelo DER-SP (2005), com espessura de 25cm, comprimento de 4,00 metros e estipulando uma largura de via equivalente a 7,76 metros. Dessa forma, a situação crítica será uma deformação na extremidade da laje que exceda o gradiente limite permitido de 1/125.

## Método

- **Geotecnia**

O solo, quando carregado, sofre dois tipos de assentamento: o assentamento elástico ou imediato ( $\delta_e$ ), e os assentamentos por consolidação. Os assentamentos por consolidação, por sua vez, são divididos entre consolidação primária ( $\delta_c$ ) e secundária ( $\delta_s$ ). A consolidação é uma deformação ao longo do tempo provocada pela diminuição de vazios e, por consequência, redução do espaço disponível para água na microestrutura do solo (BOWLES, 1996 e VERRUIJT, 2001). Esta redução do espaço disponível é, na maioria das vezes, irreversível, o que a qualifica como uma deformação plástica.

Os recalques totais do solo podem ser então expressos por:

$$\delta_{\text{tot}} = \delta_e + \delta_c + \delta_s \quad (2)$$

Como a estrutura é construída em diferentes etapas ao longo do tempo, e a deformação elástica é imediata mediante aplicação do carregamento, será considerado que os assentamentos críticos no aterro decorrem da consolidação primária. TERZAGHI (1995) sugere que para solos compressíveis em aterros com um projeto de drenagem bem feito, ou seja, drenos do tipo arenosos com espaçamento não maior que 0,9m, a consolidação pode ocorrer em aproximadamente 500 dias. É interessante notar que em um projeto com más especificações de drenagem, este período sobe para mais de 30 anos. Além disso, a relação entre a compressão do solo e o tempo decorrido é logarítmica, ou seja, para um grau de compactação de 50%, o fator de tempo seria aproximadamente 0,20 e não 0,50 como se supõe em uma relação linear.

Retornando à consideração de que uma construção de encontro de ponte é realizada em etapas, para um projeto com boas condições de drenagem, 30% da consolidação prevista ocorre em apenas 45 dias. Portanto, será considerado que 30% da consolidação já ocorreu quando a última camada de pavimento asfáltico é executada.

- **Assentamentos devidos à consolidação primária**

O processo da consolidação afeta, principalmente, solos com grande percentual de finos em sua composição, ou seja, solos compostos majoritariamente de argila. No estudo, será considerado que houve compactação com controle de qualidade, de forma a atingir parâmetros de solo equivalentes a uma argila compacta. Para definição dos parâmetros de solo, podem e devem ser realizados uma série de testes in situ e em laboratório para uma definição precisa de seus valores.

O solo de aterro será considerado como normalmente consolidado, o que significa que a expressão de cálculo para o assentamento devido à consolidação primária  $\delta_c$  é dado por (DAS, 2009):

$$\delta_c = \frac{C_c * H}{1 + e_0} * \log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right) \quad (3)$$

Onde  $C_c$  é o índice de compressão

$e_0$  é o índice de vazios inicial

$H$  e  $\Delta\sigma$  estão ilustrados na figura a seguir

$\sigma_0$  é a tensão inicial média na camada em estudo

A equação exibida, apesar de ser a mais utilizada para a previsão de recalques devidos à consolidação, tem suas limitações no que diz respeito a suas premissas. São elas a homogeneidade do solo na camada avaliada, o movimento exclusivamente vertical, e uma consideração do solo 100% saturado no início do processo. Dentre estas, a premissa que mais dista da realidade é a última. Os departamentos estaduais brasileiros preveem graus de compactação que dependem de um ensaio de Proctor Normal, ou seja, tratam-se de ensaios que usam níveis de energia de compactação e umidade ótima do

solo, o que não necessariamente representa um solo 100% saturado (DER, 1996). No entanto, na literatura disponível de geotecnia, a equação mais difundida para estimativa de recalques é a Eq. 3, conforme sugerem os autores consultados (TERZAGHI, 1995; BOWLES, 1996; DAS, 2009).

Já o índice de compressão pode ser calculado por diversos equacionamentos, que dependem das informações disponíveis sobre o solo estudado. DAS (2009) fornece os seguintes equacionamentos baseados no índice de vazios inicial:

$$C_{c1} = 0,156 * e_0 + 0,0107 \quad (4)$$

$$C_{c2} = 0,3 * (e_0 - 0,27) \quad (5)$$

$$C_{c3} = 0,208 * e_0 + 0,0083 \quad (6)$$

Com base nas formulações anteriores, será adotado o valor médio de  $C_c$ .

Dadas as informações apresentadas, nota-se que não possuem valores determinísticos a variação de tensões no meio  $\Delta\sigma$ , o índice de vazios  $e_0$  e a altura de aterro a ser executado. A equação a ser minimizada  $g(x)$ , portanto, é função destas três variáveis aleatórias.

$$g(x) = \Delta_{adm} - \Delta(\Delta\sigma, e_0, H) \quad (1)$$

$$g(x) = \frac{4}{125} - 0,70 * \frac{C_c * H}{1 + e_0} * \log\left(\frac{18,9 * H/2 + \Delta\sigma}{18,9 * H/2}\right) \quad (7)$$

$$C_c = \frac{C_{c1} + C_{c2} + C_{c3}}{3} = 0,2213e_0 - 0,0207 \quad (8)$$

#### • Variáveis aleatórias consideradas

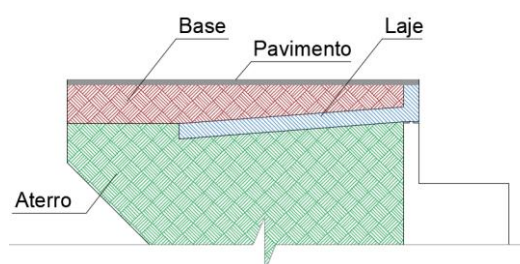
Todas as variáveis aleatórias foram tomadas com distribuição estatística do tipo normal.

A primeira variável aleatória a ser tratada é a altura de aterro  $H$ . Considerando um gabarito mínimo de ponte de 5,50 metros, somada à altura estimada da superestrutura e bordo livre de 2,00 metros, tem-se uma altura  $H$  final de 7,50 metros. No entanto, a altura total de um aterro depende de muitos fatores como a altura de solo natural e orgânico a serem removidos do terreno original, os erros aceitáveis no greide final da via da ponte, dentre outros. Com isso, será considerado um coeficiente de variação de 5% sobre o valor da altura na média.

A próxima variável aleatória a ser considerada é o índice de vazios,  $e_0$ . Segundo BOWLES (1996), o índice de vazios pode variar de 0,35 a 2,0. Conforme o autor, o limite inferior de 0,35 é atingido para solos muito graduados e com controle altíssimo de compactação. Como partimos da hipótese de solo formado majoritariamente por argila, será considerado um índice de vazios com média 0,45 e coeficiente de variação 10%.

Finalmente, resta determinar os dados para o carregamento  $\Delta\sigma$ . Este é um carregamento que permanece sobre o aterro por um período prolongado de tempo, ou seja, cargas devidas à passagem de veículos sobre a estrutura não entram nesta avaliação,

apesar haver estudos que apontam para uma piora dos assentamentos mediante alto tráfego de veículos (HA, SEO e BRIAUD, 2002). Assim, o carregamento de interesse para este estudo inclui todas as camadas dispostas sobre o aterro compactado. Isso inclui a laje de aproximação, a base da rodovia e o pavimento. Segundo projetos padrão do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER, 1996), a laje de aproximação será executada em concreto armado com espessura de 25cm. Sobre esta laje, será disposta uma altura de solo, brita, ou mistura dosada para atuar como base da rodovia na entrada da obra de arte. A altura média desta base tem 45cm. Por último, é disposto o pavimento asfáltico com camada que varia de acordo com o órgão regulador da via. Os carregamentos decorrentes destas camadas são:



**Figura 1 - Camadas dispostas sobre o aterro**

$$\sigma_{\text{laje}} = 0,25 * 25 = 6,25 \text{ kN/m}^2 \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{base}} = 0,45 * 18 = 8,10 \text{ kN/m}^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{pav}} = 4,0 \text{ kN/m}^2 \quad (11)$$

$$\Delta\sigma = 18,35 \text{ kN/m}^2 \quad (12)$$

Dadas as incertezas envolvidas nos valores dos carregamentos, será considerado um coeficiente de variação de 20%.

Pode-se resumir as variáveis aleatórias do problema como:

**Tabela 1 - Variáveis aleatórias do problema**

Variável	Distribuição	Média	C.V.	Desvio Padrão
Altura do aterro H	Normal	7,50	5%	0,375
Índice de vazios $e_0$	Normal	0,45	10%	0,045
Carregamento $\Delta\sigma$	Normal	18,35	20%	3,67

A equação de estado limite e as variáveis de interesse foram então introduzidas no *software* StRAnD, aonde prosseguiu-se para a avaliação dos índices de confiabilidade e suas respectivas probabilidades de falha.

## Resultados

De partida, pode-se dizer que a equação de estado limite (Eq. 7) é fortemente não linear e, portanto, os resultados por avaliações analíticas podem fornecer resultados muito distintos entre si.

Com isso, o problema foi avaliado duas vezes: a primeira, considerando a equação original com todas as variáveis aleatórias e a segunda, com uma equação de estado limite que considerou a variável de índice de vazios como determinística de valor 0,45. Todas as avaliações consideraram correlação nula entre variáveis.

- **Avaliação com equação de estado limite original**

Para a primeira avaliação, os resultados do índice de confiabilidade de primeira ordem (FOMV) e de segunda ordem (SOMV) diferiram muito entre si, sendo:

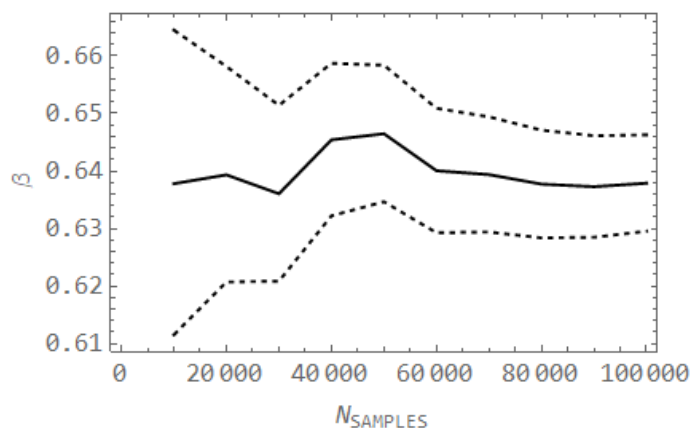
$$\beta_{\text{FOMV}} = 0,5948 \quad \beta_{\text{SOMV}} = 7,8117$$

Portanto, a não linearidade da equação afetou muito a avaliação dos índices de primeira e segunda ordem. A sensibilidade da equação de estado limite foi insignificante para a variável de altura do aterro, mas alta para as outras variáveis (77,8% para a variação da tensão e 22,1% para o índice de vazios).

Como previamente comentado, devido à não-linearidade da equação de estado-limite, a avaliação de Monte Carlo é a que chega a valores de probabilidade de falha mais próximos dos reais, pois avalia a equação múltiplas vezes. O gráfico abaixo exhibe a média e o intervalo de confiança de 95% (95% Bounds) associados a uma probabilidade de falha para a equação de estado limite original. O intervalo de confiança se torna mais estreito com o aumento do número de simulações, em função da redução da variância (BECK, 2007). Para 100.000 simulações, os resultados foram:

$$\text{MonteCarlo } \{\text{Beta, Pf}\} = \{0.637898, 2.6177 \times 10^{-1}\}$$

$$95\% \text{ Bounds} = \{2.5899 \times 10^{-1}, < \text{Pf} <, 2.6455 \times 10^{-1}\}$$



**Figura 2 - Resultados para Avaliação de Monte Carlo com 100.000 simulações**

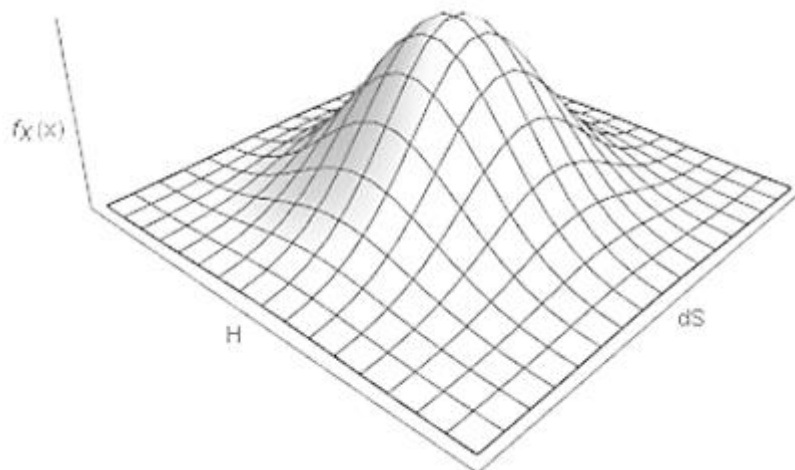
Percebe-se que o valor de  $\beta$  não chegou a plena convergência, mas já é possível ter ideia de sua ordem de grandeza, gerando probabilidades de falha da ordem de 26,5%, em média.

- **Avaliação com equação de estado limite simplificada**

Para esta segunda avaliação, considerou-se o índice de vazios com valor determinístico de 0,45, o que reduz muito a não-linearidade do problema. A nova equação de estado limite passa a ser:

$$g(x) = 0,032 - 0,70 * \frac{0,0789 * H}{1,45} * \log\left(\frac{18,9 * H/2 + \Delta\sigma}{18,9 * H/2}\right) \quad (13)$$

A função de densidade de probabilidade conjunta é ilustrada na imagem a seguir.

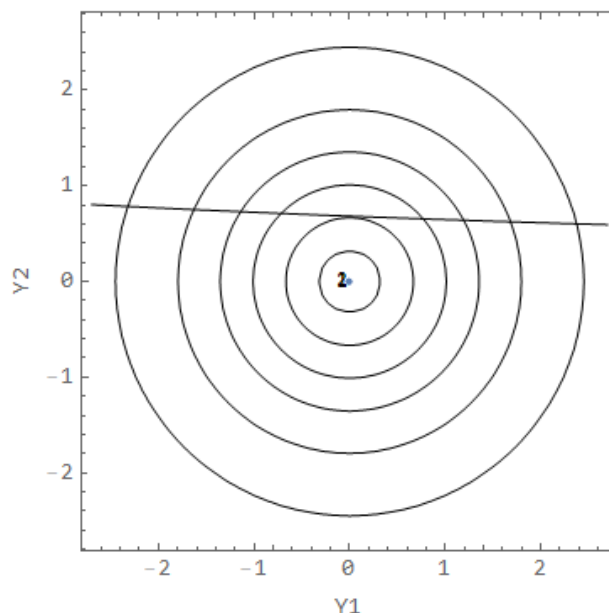


**Figura 3 - Função de densidade de probabilidades conjunta para H e  $\Delta\sigma$**

Os valores dos índices de confiabilidade de primeira ordem (FOMV) e de segunda ordem (SOMV) foram:

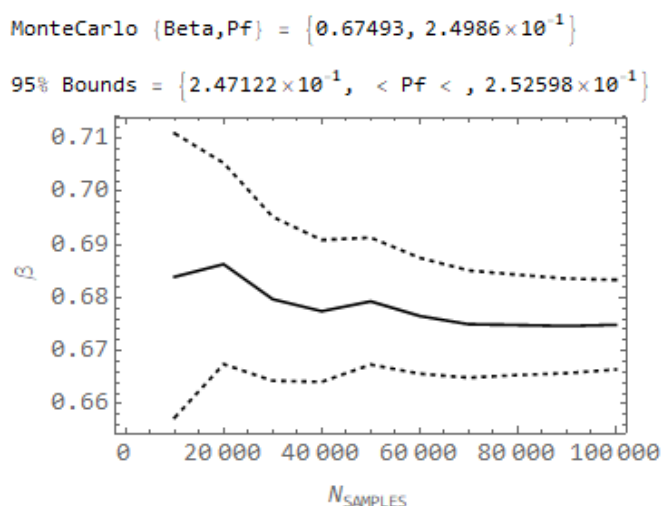
$$\beta_{\text{FOMV}} = 0,673543$$

$$\beta_{\text{SOMV}} = 0,684351$$



**Figura 4 – Função conjunta de densidade de probabilidade e equação de estado limite no espaço normal padrão**

A sensibilidade da função de estado limite foi muito maior com relação à variável  $\Delta\sigma$  que à variável  $H$ . O gráfico abaixo exhibe os resultados para a simulação de Monte Carlo com 100.000 simulações, sendo mostrados a média e o intervalo de confiança para a probabilidade de falha.



**Figura 5 - Convergência do índice de confiabilidade para a simulação de Monte Carlo**

Novamente, percebe-se que não houve plena convergência do índice de confiabilidade, mas é possível obter uma ordem de grandeza para a probabilidade de falha de 25%.



## Conclusões

Para o problema apresentado, foi estimada a probabilidade de um aterro de encontro de ponte exceder seus estados limites de serviço, apresentando assentamentos que podem causar desconforto ao condutor e chamar atenção de agências reguladoras quanto à necessidade de reparos. Para um aterro composto majoritariamente de argila compacta, os assentamentos na extremidade da laje de aproximação foram estimados como 70% daqueles totais, pois acredita-se que as etapas construtivas permitam certa acomodação do solo antes da disposição da camada final de pavimento.

Foram consideradas variáveis aleatórias do problema: a altura de aterro  $H$ , o índice de vazios inicial do solo  $e_0$ , e o incremento de carregamento sobre o aterro  $\Delta\sigma$ . Devido à equação de estado limite ser fortemente não linear, foram feitas duas avaliações: uma delas com a equação original e avaliação de Monte Carlo, e outra de uma equação com valor de índice de vazios determinístico.

A primeira avaliação gerou uma probabilidade de falha maior (26,5%), pois considerou a imprecisão na determinação do índice de vazios, variável que tem alta influência sobre a equação de estado limite, vide sua sensibilidade de 22,1%. Considera-se que a primeira avaliação representa melhor a realidade do problema, uma vez que o índice de vazios é, de fato, uma variável de difícil avaliação.

A altura do aterro  $H$  tem pouquíssima influência sobre a consolidação primária, sendo que o incremento de carga sobre o aterro,  $\Delta\sigma$ , é a variável com maior influência. Isso significa que a espessura da laje, a altura da base rodoviária e do pavimento são de extrema importância para o controle dos recalques diferenciais nesta interface.

Por outro lado, parâmetros relacionados ao aterro como seu grau de compactação e seu projeto de drenagem estão diretamente relacionados ao tempo necessário para atingir a consolidação primária. Quanto mais deficientes forem estes aspectos, mais tempo o aterro levará para consolidar-se, e maiores serão as previsões de recalques ao longo do tempo.

Apesar dos valores de probabilidades de falha serem considerados altos, acredita-se que estejam próximos à realidade, pois o solavanco em saídas de pontes é um cenário muito comum, especialmente em vias secundárias. Julga-se importante adotar medidas preventivas para reduzir gastos em manutenção e aumentar o conforto do usuário, como boas especificações de drenagem e compactação e um acompanhamento metódico da execução das estruturas de encontro.

## Referências

- BECK, A. Curso de Confiabilidade Estrutural, Apostila da disciplina (não publicada). Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2007.
- BOWLES, J. E. Foundation Analysis and Design. 5ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
- BRIAUD, J.-L.; HOFFMAN, S. B. Settlement of Bridge Approaches: The bump at the end of the bridge. Transportation Research Board. Washington, D.C., p. 85. 1997.
- DAS, B. M. Principles of Geotechnical Engineering. 7ª. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2009.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. Memorial de cálculo de lajes de aproximação. DER-SP. São Paulo, p. 17. 2005.



- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especiais. Rio de Janeiro: DNER, 1996.
- HA, H. S.; SEO, J.; BRIAUD, J.-L. Investigation of settlement at bridge approach slab expansion joint: Survey and site investigations. The Texas A&M University. College Station, p. 450. 2002.
- LEONHARDT, F. Construções de Concreto: Princípios básicos da construção de pontes de concreto. 1a. ed. Berlim: Interciência Ltda., v. 6, 1979.
- SOUBRA, A.-H.; MASSIH, D. S. Y. A. Reliability-based analysis and design of foundations resting on a spatially random soil. GeoCongress, 2008. 8.
- TERZAGHI, K.; PECK, R.; MESRI, G. Soil mechanics in engineering practice. 3ª. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- WAHLS, H. E. Design and Construction of Bridge Approaches. Transportation Research Board. Washington, D.C., p. 52. 1990.