

Utilização de estacas metálicas tubulares para reforço de fundação de barragem alteada a montante

Use of tubular metal piles to reinforce the foundation of an upstream raised dam.

Michel Fontes; Raphael Carmo; Giovana Oliveira; Sabrina Penasso; Anderson Nascimento; Fernanda Figueiredo & Fernando Queiroz

Departamento de Projetos (Engenheiros), Fontes Geotécnica, Brasil, michel@fontesgeotecnica.com

Wesley Carvalho & Dalliane Guedes

Departamento de Projetos (Engenheiros), VALE, Brasil

RESUMO: Os acidentes ocorridos com barragens de mineração motivaram atualizações na legislação brasileira, incluindo a exigência de descomissionamento das barragens a montante, sendo a estabilização da estrutura uma das etapas do processo de descomissionamento. Neste contexto, a utilização de estacas metálicas instaladas pelo método “Press In” tem se tornado uma alternativa para o reforço das fundações de barragens a montante, uma vez que a utilização deste método, quando comparado aos métodos tradicionais, permite que a cravação das estacas gere o mínimo de vibrações e ruídos que poderiam, em condições normais, desencadear processos de liquefação. Neste artigo apresenta-se um estudo sobre a execução de estacas metálicas tubulares para reforço da fundação de uma barragem alteada a montante com materiais susceptíveis de liquefação. O artigo apresenta uma visão geral da aplicação de estacas metálicas tubulares para reforço de fundações utilizando a tecnologia “Press In” e a técnica de rotação Gyropress. Aborda também o dimensionamento geotécnico destes elementos de reforço e a viabilidade técnica da solução com recurso a estacas metálicas tubulares para reforço de fundações, através de análises de equilíbrio limite e tensão-deformação.

PALAVRAS CHAVE: Estaca tubular, reforço, fundação, barragem

ABSTRACT: Accidents that occurred with mining dams have prompted updates in Brazilian legislation, including the requirement to decommission upstream dams, with stabilization of the structure being one of the stages of the decommissioning process. In this context, use of metal piles installed using the "Press In" method has become an alternative for reinforcing the foundations of upstream dams, since the use of this method, when compared to traditional methods, allows the pile driving to generate the minimum amount of vibrations and noise that could, under normal conditions, trigger liquefaction processes. This article presents a study on the implementation of tubular steel piles for reinforcing the foundation of an upstream-raised dam with materials susceptible to liquefaction. The article provides a general overview of the application of tubular steel piles for foundation reinforcement using the "Press In" technology and the Gyropress rotation technique. It also covers the geotechnical design of these reinforcement elements and the technical feasibility of the solution using tubular steel piles for foundation reinforcement, through analyses of limit equilibrium and stress-strain.

KEYWORDS: tubular metal, reinforce, foundation, dam.

1 INTRODUCTION

As atividades minerárias tem ganhado grandes destaques nos últimos anos, principalmente após o rompimento das barragens ocorridos em 2015 (barragem de Fundão, em Mariana, Brasil) e 2019 (mina Córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho, Brasil). Foram apontados diversas causas para a ocorrência do rompimento de tais barragens, dentre elas, o fluxo por liquefação.

Nesse contexto, é importante mencionar que o fluxo por liquefação ocorre em solos granulares, saturados e fofos. Para que o fenômeno de liquefação ocorra, faz-se necessário um gatilho, que pode ser traduzido como sismos, vibrações ou carregamentos rápidos.

A barragem em estudo apresenta condições de verosimilhança, o que requer que a solução para sua estabilização pressuponha ações que não gerem sismos, vibrações ou carregamentos rápidos, assim, a implantação de um reforço em estacas metálicas utilizando a tecnologia gyropress se mostra uma alternativa viável.

Dessa forma, o estudo apresenta o dimensionamento das estacas metálicas tubulares para reforço de fundação de uma barragem seguindo a metodologia proposta na International Press-in Association (IPA), associado as análises de equilíbrio limite e tensão deformação. Para definição do nível freático da estrutura, utilizou-se as leituras da instrumentação existente e para definição do modelo geológico e estimativa dos parâmetros de resistência os ensaios SPT e CPTu, bem como ensaios de laboratório.

2 ASPECTOS GERAIS

A simulação numérica foi realizada em apenas uma seção da estrutura, denominada Seção A-A, em duas conformações distintas: condição inicial e condição final. A Figura 1 e Figura 2 apresenta as duas condições, respectivamente.

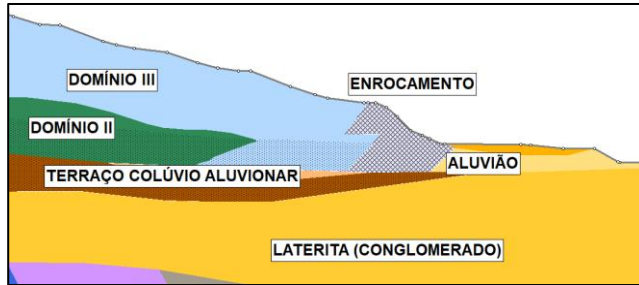


Figura 1. Condição inicial da região de estudo.

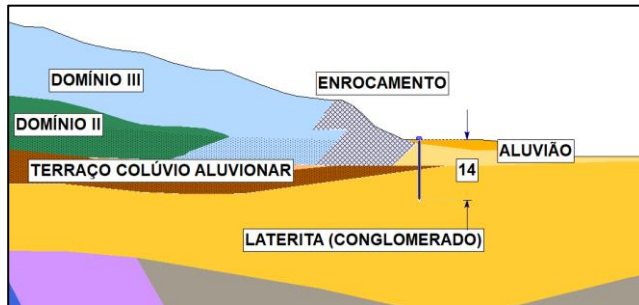


Figura 2. Condição após implantação das estacas tubulares de reforço de fundação

3 PARÂMETROS DE ANÁLISE

Os parâmetros de resistência dos materiais foram definidos com base em correlação com ensaios SPT e CPTu, bem como ensaios triaxiais. Com base em tais parâmetros, foram desenvolvidas análises de estabilidade por equilíbrio limite e análises tensão deformação de forma a Validar o dimensionamento das estacas tubulares e a viabilidade da proposta de reforço.

3.1 Parâmetros adotados

Os parâmetros de resistência e de deformabilidade foram obtidos por meio de correlação com ensaios SPT e CPTu, além de ensaios de laboratório. A tabela 1 resume os parâmetros de deformabilidade adotados, já a tabela 2, resume os parâmetros drenados efetivos e não drenados adotados nas análises de estabilidade.

Tabela 1. Parâmetros de deformabilidade

Litotipo	E (kPa)	E_u (kPa)	ν	ν_u
Domínio I	16000	19333	0,2	0,5

Domínio II	16000	19333	0,2	0,5
Domínio III	16000	19333	0,2	0,5
Terraço Col.	8785	10615	0,2	0,5
Colúvio Lat.	50000	-	0,3	-
Conglomerado	60000	-	0,3	-
Canga	75000	-	0,3	-
SRJ-ITA	70000	-	0,3	-
SAP-ITA	10000	-	0,3	-
SRJ-QTZ	65000	-	0,3	-
SAP-QTZ	100000	-	0,3	-
SR-IM	90000	-	0,3	-
SP-IM	100000	-	0,3	-
Enrocamento	150000	-	0,3	-

Tabela 2. Parâmetros efetivos e não drenados

Litotipo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	S_u/σ'_v (Pico)
Domínio I	21	2	26	0,19
Domínio II	23	0	30	0,24
Domínio III	23	0	32	0,25
Terraço Col.	21	3	22	0,29
Colúvio Lat.	21	10,7	28	-
Conglomerado	22	14,7	42	-
Canga	20	27	36	-
SRJ-ITA	22	24,2	34	-
SAP-ITA	23,8	41,1	40	-
SRJ-QTZ	22	17	33	-
SAP-QTZ	22	21	36	-
SR-IM	19	1	23	0,2
SP-IM	22	22	35	-
Enrocamento				

4 CONDIÇÃO ATUAL DA ESTRUTURA

Atualmente a estrutura não apresenta fator de segurança mínimo igual ou superior a 1,30 requerido em norma para a condição não drenada de pico,. Como se observa na figura 3, a estrutura apresenta um fator de segurança de 1,22.

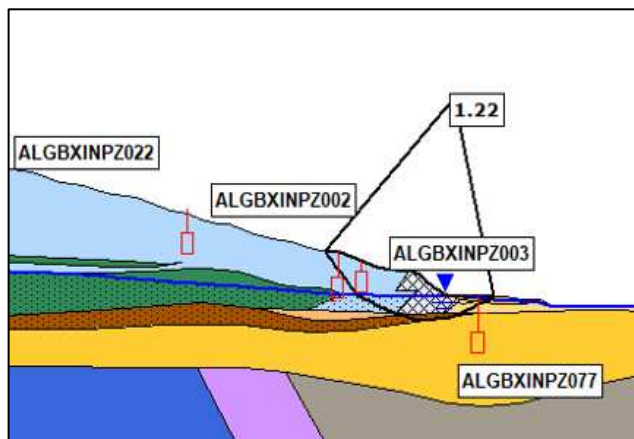


Figura 3. Condição atual de estabilidade da estrutura

5 DIMENSIONAMENTO DAS ESTACAS TUBULARES

A metodologia utilizada para dimensionamento das estacas metálicas tubulares foi baseada na metodologia de cálculo apresentado no documento Press-in retaining structures: a handbook, elaborado pela International Press-in Association (IPA).

Para definir o comprimento de embutimento das estacas, utilizou-se as metodologias propostas por Yoshida e Adachi (1970), Okahara e Takagi (1990) e Broms e Francis (1968) apud Ananthanathan et al (2000). Contudo, cabe mencionar que o critério IPA e o cálculo para comprimento de embutimento das estacas está sendo considerado como referência. As verificações estruturais e geotécnicas tais como equilíbrio limite e tensão deformação irão direcionar para o comprimento e tipo de estaca mais adequado.

Após a realização de todas as análises numéricas e analíticas, o comprimento de embutimento mínimo necessário para a seção de estudo é de 14 m. Cabe mencionar que as estacas estão dispostas separadas de 1,2 m com o objetivo de reduzir as interferências no nível freático da estrutura. A estaca a ser utilizada como elemento de reforço possui diâmetro de 1200 mm, espessura de 21 mm e composta de aço ASTM A572 – Gr. 50. A Tabela 3 resume as características da estaca para reforço de fundação.

Tabela 3. Característica da estaca para reforço de fundação

Inércia (m ⁴)	Área (m ²)	Momento Fletor Admissível (kN*m)	Esforço Cortante Admissível (kN)
5,3E-03	3,0E-02	2.030,00	2.106,00

6 RESULTADOS OBTIDOS

As análises por equilíbrio limite permitiram observar o acréscimo do fator de segurança quando implementadas as estacas metálicas tubulares como reforço de fundação. Já as análises tensão deformação permitiram identificar as máximas tensões cisalhantes, deslocamentos totais e o Strength Reduction Factor (SRF) para a seção de estudo. A tabela 4 resume as solicitações após a implantação das estacas em um cenário crítico da estrutura como um todo. Já a figura 4 e figura 5 ilustram a máxima tensão cisalhante e deslocamento total associado ao SRF, respectivamente. A figura 6 apresenta a análise por equilíbrio limite

Tabela 4. Solicitações após implantação das estacas (cenário crítico)

Análises	Seção de referência
Máxima tensão cisalhante (%)	3
Deslocamentos totais (cm)	60
Strength Reduction Factor (SRF)	1,35

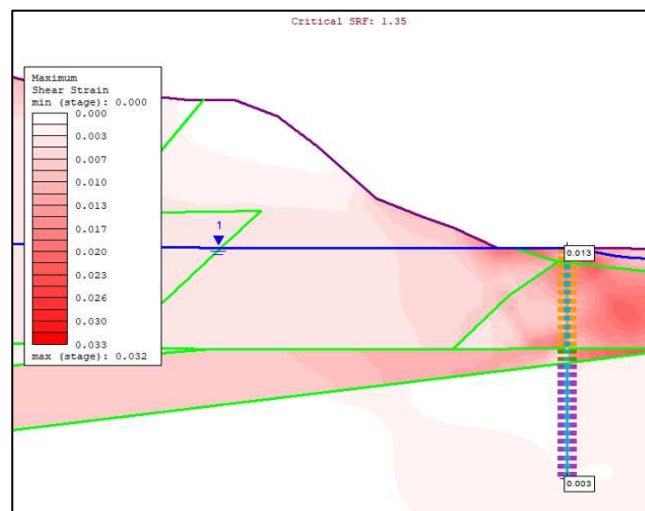


Figura 4. Máxima tensão cisalhante – Condição Global

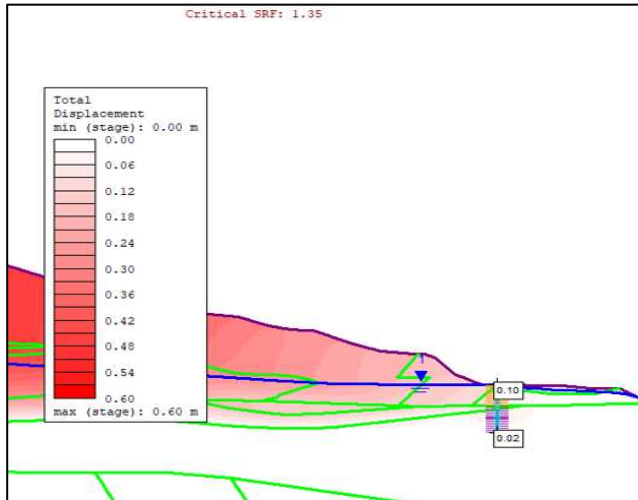


Figura 5. Deslocamento total – Condição global

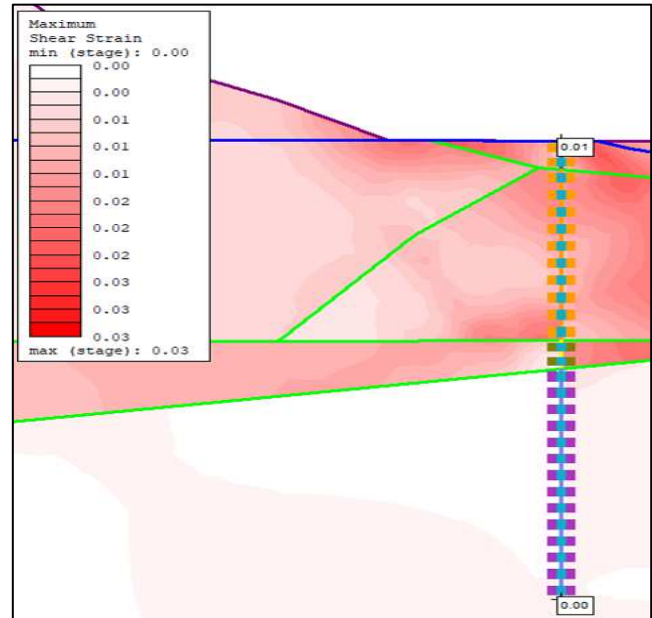


Figura 7. Máxima tensão cisalhante – análise geotécnica

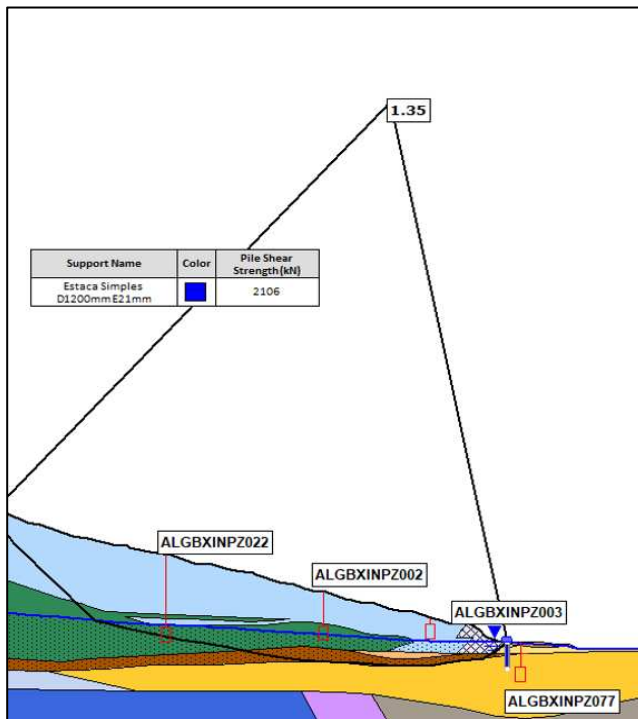


Figura 6. Análise de equilíbrio limite – FS 1,35

Além disso, de forma a validar o uso da estaca proposta como reforço de fundação, realizou-se as análises estruturais isoladas apenas dos elementos discretos (estaca). A figura 7 apresenta a máxima tensão cisalhante da estaca, já a figura 8 ilustra o deslocamento total no cenário crítico para os elementos de reforço.

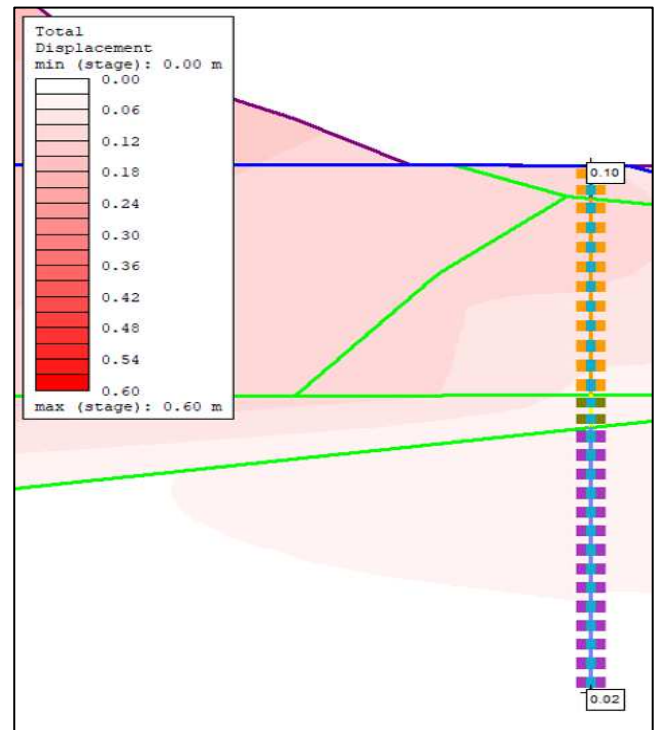


Figura 8. Deslocamento total – análise geotécnica

Ainda foram realizadas análises estruturais para validação das estacas metálicas tubulares como elementos de reforço de fundação. Essa análise tem como objetivo identificar o momento fletor atuante, bem como o esforço cortante e comparar com os

esforços admissíveis. A figura 9 e figura 10 apresentam os resultados

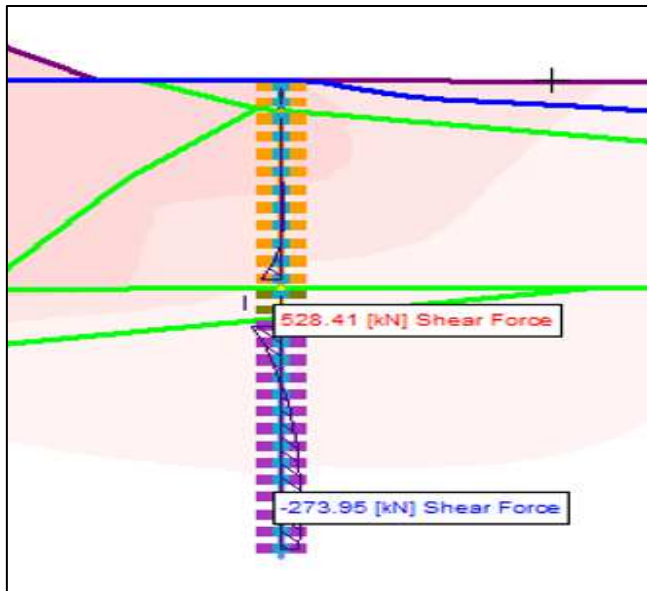


Figura 9. Esforço cortante – análise estrutural

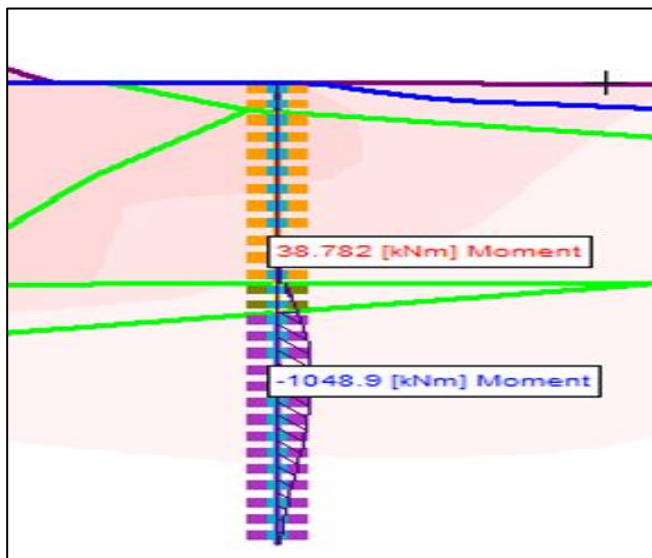


Figura 10. Momento fletor – análise estrutural

7 CONCLUSÕES

Em resumo, as análises descritas proporcionam uma compreensão abrangente da performance da estrutura da barragem após as intervenções de reforço. A combinação de uma avaliação global com testes detalhados dos elementos individuais, como as estacas, oferece uma base sólida para a confiança na estabilidade e

segurança da barragem sob diversas condições operacionais e ambientais.

O resultado das análises realizadas permite afirmar que a solução proposta envolvendo a cravação de estacas metálicas no pé de uma Barragem se apresenta como uma abordagem adequada e eficaz para garantir a estabilidade e segurança da estrutura. Observa-se que a estrutura passou de um fator de segurança para condição não drenada de pico de 1,22 para 1,35.

É importante mencionar que a cravação de estacas pelo método gyropress e press in permite reduzir a possibilidade de eventuais gatilhos de liquefação no que diz respeito à vibrações. Essa metodologia de cravação se torna especialmente importante para o estudo de caso uma vez que a estrutura apresenta materiais com comportamento contrátil.

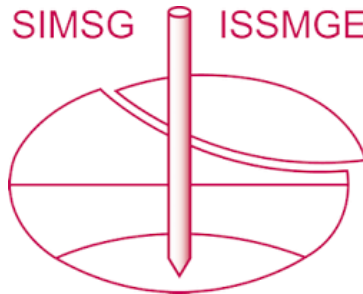
No que diz respeito ao dimensionamento das estacas tubulares, a determinação do comprimento foi embasada nas análises realizadas por equilíbrio limite, tensão deformação e baseada em critérios de embutimento segundo o manual da IPA (International Press-in Association), as quais demonstraram que a solução de reforço é suficiente para aumentar o fator de segurança e atende ao mínimo exigido pela norma ABNT NBR 13.028/2017 e Resolução n° 95 da ANM.

Cabe mencionar ainda que as análises geotécnicas tanto pelo método de equilíbrio limite, quanto por elementos finitos foram necessárias para avaliar o comportamento dos elementos de reforço em conjunto com a barragem em estudo. Já as análises estruturais fazem menção aos esforços absorvidos e deformações observadas nas estacas metálicas. As duas análises se mostraram consistentes e demonstram um comportamento estrutural e geotécnico adequado da proposta de reforço. Dessa forma, conclui-se que a solução de reforço proposta atende aos requisitos de segurança e estabilidade.

8 REFERÊNCIAS

- ANANTHANATHAN, P. & Gajan, Sivapalan & Kanagalingam, T. & Seneviratne, Nimal. (2000). Behavior of laterally loaded piles.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução n° 95, de 7 de fevereiro de 2022. Diário Oficial da União, 2022;
- BROMS, B.B. (1968) Lateral resistance of piles in cohesive soils. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., Jnl. Soil Mech. Found. Div. Mar 1964 90(SM2)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2017). NBR 13.028. Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Rio de Janeiro
- IPA- INTERNATIONAL PRESS-IN ASSOCIATION: Press-in retaining structures: a handbook. 2. ed. atual. [S. l.]: International Press-in Association, 2019. 392 p;
- Okahara, M. and Takagi, S. (1990): Explanation of specifications of highway bridge part IV substructure, lateral resistance of elastic foundation, Civil Engineering Memorandum, Public Work Research Institute, 32, 41-48 (in Japanese).
- Yoshida, I. and Adachi, Y. (1970): Experimental studies on statistical lateral restraint of caisson foundation, Civil Engineering Memorandum, Public Work Research Institute, 139, 1-60 (in Japanese).

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.