

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/794

Estimativa de Tensão a partir do Campo de Deslocamentos e Deformações utilizando a Técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC)

Júlio de Oliveira França Barbosa

Mestrando em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, julio.barbosa7@hotmail.com

Marina Bellaver Corte

Professora Assistente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, marina@puc-rio.br

Alexandr Khemchuzhnikov

Pesquisador, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, alx.zhm@gmail.com

Raquel Quadros Velloso

Professora Adjunta, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, raquelveloso@puc-rio.br

RESUMO: A técnica de Correlação Digital de Imagem ou *Digital Image Correlation* – DIC consiste em um método óptico que rastreia a movimentação de determinado objeto ou área por meio de algoritmos que buscam averiguar as modificações entre as imagens após determinado evento, seja em escala microscópica ou macroscópica. A partir da imagem captada, a área de interesse é definida para a obtenção dos subconjuntos (subsets), após a seleção, o cálculo dos deslocamentos é realizado através de software específico, correlacionando os subconjuntos de uma imagem-referência com os subconjuntos das imagens seguintes e, através desses deslocamentos, as deformações são calculadas. A proposta deste artigo é explorar a técnica de DIC na realização do ensaio de Compressão Uniaxial Simples no Arenito Aberto da Formação Botucatu para realizar a retroanálise de tensões, obtendo os campos de deslocamentos e, conseqüentemente às deformações e, desta maneira, prever às tensões aplicadas ao material. Os resultados obtidos apresentaram uma acurácia inferior ao esperado pois as deformações foram muito pequenas em relação à área de estudo do corpo de prova, impedindo assim a estimativa de tensão.

PALAVRAS-CHAVE: *Digital Image Correlation*, Ensaio não destrutivo, Análise de tensões, Arenito da Formação Botucatu.

ABSTRACT: The Digital Image Correlation or Digital Image Correlation – DIC technique consists of an optical method that tracks the movement of a certain object or area through algorithms that seek to investigate the changes between images after a certain event, whether on a microscopic or macroscopic scale. From the captured image, the area of interest is defined to obtain the subsets (subsets), after selection, the calculation of displacements is carried out using specific software, correlating the subsets of a reference image with the subsets of the following images and, through these displacements, the deformations are calculated. The purpose of this article is to explore the DIC technique in carrying out the Simple Uniaxial Compression test on the Open Sandstone of the Botucatu Formation to perform stress retroanalysis, obtaining the displacement fields and, consequently, the deformations and, in this way, predicting the applied stresses to the material. The results obtained were less accurate than expected because the deformations were very small in relation to the area of study of the specimen, thus preventing the estimation of stress.

KEYWORDS: Digital Image Correlation, Non-destructive testing, Stress analysis, Botucatu Formation Sandstone.

1 INTRODUÇÃO

Durante realizações de ensaios de laboratório, as deformações oriundas de cargas aplicadas é uma das principais informações a serem adquiridas. O uso de extensômetros de resistência elétrica, conhecido como strain gages, é confiável e garante resultados satisfatórios quando aplicado em medições locais ou com baixo gradiente de deformação. Entretanto, para a obtenção de informações com altos gradientes de deformação faz-se a necessidade do uso de extensômetros com dimensões muito reduzidas. Ainda assim, sua limitação acaba contribuindo por fornecerem informações de deformações em pontos intrínsecos apenas.

Uma das formas de superar a limitação dos strain gages é através da utilização de técnicas ópticas. A obtenção de medidas e o aperfeiçoamento da fotogrametria ao longo dos anos, permitiu o surgimento da Correlação Digital de Imagem ou *Digital Image Correlation* – DIC, um dos campos da fotogrametria, nos Estados Unidos, com capacidade de registrar deformações tanto no plano (2D) quanto em três dimensões (3D). A técnica foi criada na década de 80 e vem recebendo notoriedade por conta da capacidade de aquisição e tratamento de imagens.

A Correlação Digital de Imagem é definida como um método óptico que rastreia a movimentação de determinado objeto ou área, por meio de algoritmos, que buscam averiguar as modificações entre as imagens após determinado evento, seja em escala microscópica ou macroscópica (MCCORMICK; LORD, 2010).

A principal função da técnica é capturar imagens e processar a partir de um software específico. As fotos são tiradas durante a realização de um carregamento e/ou descarregamento e, a partir do conhecimento dos campos de deslocamentos de pontos reproduzidos na face da amostra, é possível determinar os campos de deformações sofridas. A popularidade da técnica ganhou destaque em diversas áreas de conhecimento e que comprovam a validade da técnica quanto utilizada para medir os campos de deformações. Contudo, existe uma necessidade de restrição quanto a sua aplicação a ambientes com níveis de ruídos e vibrações.

Com a disseminação da técnica, principalmente quando se trata do monitoramento de desempenho das estruturas, houve o crescimento de uso em inúmeros âmbitos. Pode-se citar alguns exemplos da aplicação do método, como na detecção de tensão no processo de secagem da madeira (Chai, 2023) ou aplicação na avaliação do comportamento do concreto reforçado com fibras de aço – CRFA (Oliveira, 2018) ou análise das contribuições de diferentes mecanismos na resistência à força cortante de vigas de concreto (Resende, 2019), ou ainda, o uso da técnica para estudos em ensaios em escala reduzida de corrida de lama (Sakano, 2018).

Para este trabalho, além da aplicação da técnica sob o viés de mecânica das rochas, cenário ainda pouco encontrado na literatura, trará também aqui, a validação da técnica para os estudos em rochas. O objetivo deste trabalho é explorar a técnica de DIC na realização do ensaio de Compressão Uniaxial Simples no Arenito Aberto da Formação Botucatu.

2 METODOLOGIA

A metodologia conta com seis etapas que serão descritas abaixo, que vão desde a retirada dos testemunhos em blocos de rochas em laboratório até o processamento das imagens obtidas a partir da técnica do DIC.

2.1 Materiais

O Arenito da Formação Botucatu utilizado nesta pesquisa é proveniente da porção central paulista e do centro leste paranaense marcando, em conjunto com os basaltos da Formação Serra Geral, os limites das encostas da Bacia Sedimentar do Paraná, dos planaltos da região e do relevo de elevados platôs. A Formação Botucatu (Jurássico, Bacia do Paraná) é composta de um depósito eólico e constituída, em sua maioria, por arenitos quartzosos permeáveis e porosos (MONTANHEIRO *et al.*, 2011).

Os arenitos da Formação Botucatu mostram uma ótima relação entre a porosidade e permeabilidade, além de pequena porcentagem de material argiloso e de composição predominantemente quartzosa (CAETANO-CHANG *et al.*, 1992). Devido sua característica, ela é muito adequada para conter fluidos. Os blocos em questão, foram adquiridos junto a empresa Inartec e coletados de frente de pedreira localizada na cidade de Jacarezinho, no estado do Paraná. Os ensaios realizados por Pires (2023) apresentam o Arenito Aberto com resistência à compressão uniaxial de 41,5 MPa e Módulo de Young de $13,3 \pm 0,42$ (GPa), tais valores serão utilizados como referência neste artigo.

2.2. Métodos

2.1.1. Preparação do corpo de prova

A primeira etapa se trata da retirada de testemunhos de rocha, para este caso, Arenito Aberto da Formação Botucatu em blocos que apresentavam dimensões aproximadas de 30 x 30 x 60 cm, conforme ilustrado na Figura 1, provenientes da Bacia do Paraná, do período Jurássico-Cretáceo, formada em ambiente deposicional eólico de natureza continental (Milani *et al.*, 2007).



Figura 1. Retirada dos testemunhos de Arenito da Formação Botucatu.

Na segunda etapa, é realizado o corte dos corpos de prova em formato prismático, de aproximadamente, 150 mm de altura e 75 mm de largura, como mostrado na Figura 2. Além do corte em formato prismático, foi realizado também o faceamento da amostra para que a superfície em contato com o atuador esteja o mais regular possível. O formato prismático da amostra é necessário para a análise dos ensaios através de DIC. Após a preparação das amostras, são realizadas medidas dos corpos de prova para determinações das dimensões finais, utilizadas como dados de entrada no processamento das imagens no software da *Correlated Solutions*.

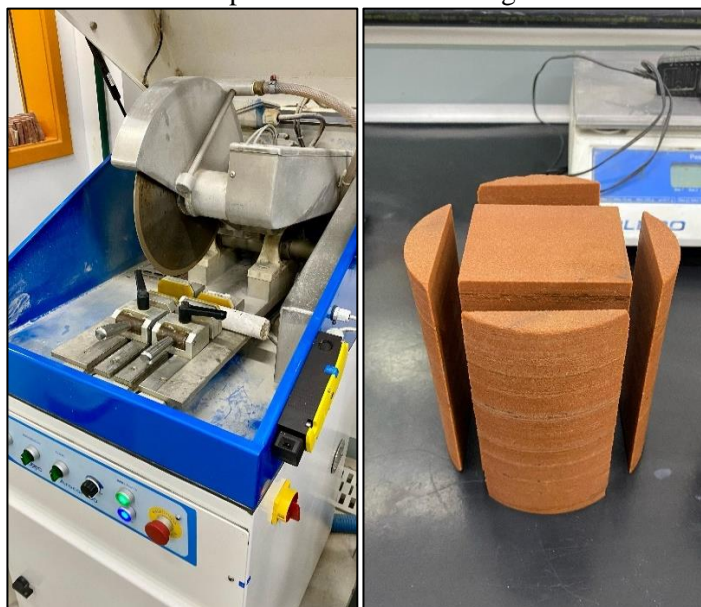


Figura 2. Corte do corpo de prova em formato prismático.

A terceira etapa corresponde à preparação do corpo de prova para a aquisição externa, como apresentado na Figura 3. Nesta etapa, é realizada a fixação de um extensômetro que medirá as deformações elásticas geradas pela compressão durante o ensaio de compressão simples.



Figura 3. Instrumentação do corpo de prova – Strain gauges.

E por fim, a superfície a ser analisada pela técnica DIC é preparada na quarta etapa. A Figura 4 mostra a superfície do corpo de prova com pintura branca cuja função é uniformizar o fundo a ser captado e, em seguida, a realização dos pontos pretos espaçados aleatoriamente (para o uso do DIC). A realização desses pontos permitirá a obtenção dos campos de deslocamentos e deformações a partir dos registros das imagens ao longo de todo o ensaio.

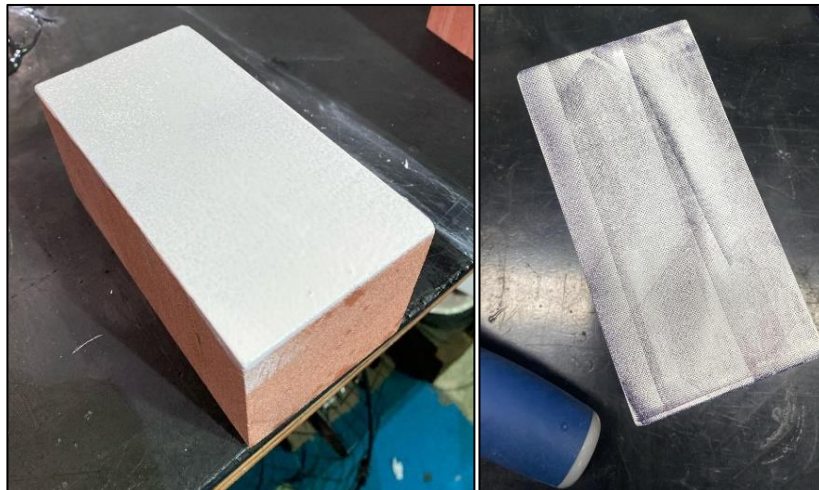


Figura 4. Pintura e realização dos pontos pretos (*speckels*) – Strain gauges.

Após a realização das 4 etapas iniciais, é montado o ensaio. Nesta etapa, é utilizada uma câmera posicionada ortogonalmente à superfície do objeto em análise, sempre mantendo a câmera fixa em relação ao objeto (corpo de prova). As imagens dos pontos pretos são registradas ao longo do ensaio e transferidas para um software de tratamento e análise das imagens, que correlaciona as intensidades de luz das várias sub-regiões (*subsets*) que formam as imagens.

A técnica objetiva determinar a média dos deslocamentos dos centros das subáreas de análise entre as imagens inicial e final. O deslocamento é determinado quando uma sub-região da imagem não deformada (primeira) é identificada na imagem deformada (segunda). Tal identificação é obtida pelo uso de algoritmos

que procuram pela melhor correlação entre as distribuições de intensidades de luz (ou níveis de cinza) dos pixels contidos nas subáreas das imagens antes e depois do carregamento.

A Figura 5 apresenta a configuração básica dos equipamentos necessários para a aquisição de imagens para uma análise de correlação em duas dimensões. O sistema de aquisição é constituído por uma câmera profissional de 30 Megapixels de resolução, com zoom aplicado ao máximo. Para a análise de correlação das imagens foram utilizados os equipamentos e softwares fornecidos pela *Correlated Solutions*. Além disso, foram utilizados um computador para aquisição externa referente ao strain gages utilizado na amostra.



Figura 5. Configuração de ensaio.

Mesmo existindo uma evolução quanto os equipamentos e softwares em uso no DIC, alguns cuidados devem ser tomados e controlados durante a realização para a maior acurácia. Dentre os principais cuidados, pode-se indicar o tamanho dos pontos pretos, iluminação, zoom, foco, tamanho dos subconjuntos de pixels que serão correlacionados, quantidade de fotos e entre outros.

2.2.1 Realização do UCS

A aplicação da técnica DIC foi realizada no ensaio de compressão uniaxial ou simples (UCS) que corresponde a compressão produzida, a partir da aplicação de uma carga normal à direção axial do corpo de prova. Para a determinação dos parâmetros de resistência das rochas em função do carregamento uniaxial de compressão é realizado o ensaio de UCS – Resistência à Compressão Uniaxial.

Os ensaios foram realizados seguindo as sugestões da ASTM (ASTM, 2014) em uma máquina de ensaios em rochas da marca *MTS Systems Corporation*, modelo 810, com capacidade de carga compressional de 1 kN, pertencente ao Laboratório de Estruturas e Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio.

O ensaio realizado atingiu uma tensão máxima de 10 MPa, considerando 40% da carga última de ruptura. O procedimento realizado no ensaio é descrito a seguir, cabe ressaltar que o valor de referência da resistência à compressão uniaxial utilizado para o arenito foi de 41,5 MPa (Pires, 2023).

- a. Carregamento com controle de força axial até 51,7 kN, com uma taxa de 0,02 mm/min;
- b. Descarregamento até 0 kN com uma taxa de 0,05 mm/min.

Os resultados do ensaio serão apresentados no próximo item principal.

2.2.2 Processamento das Imagens

Os softwares utilizados para tratamento e análises das imagens foram o image J (para mudança de formato e agrupamento das fotos em formato .tif). Após a integração das imagens, é realizado a exportação diretamente para o VIC-2D 2010, onde é feito o processamento das imagens do corpo de prova avaliado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 6 e 7 mostram a curva tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão uniaxial realizados no arenito aberto por meio da aquisição externa, oriundo do strain-gauges e o resultado do processamento da imagem por meio do software utilizado, respectivamente.

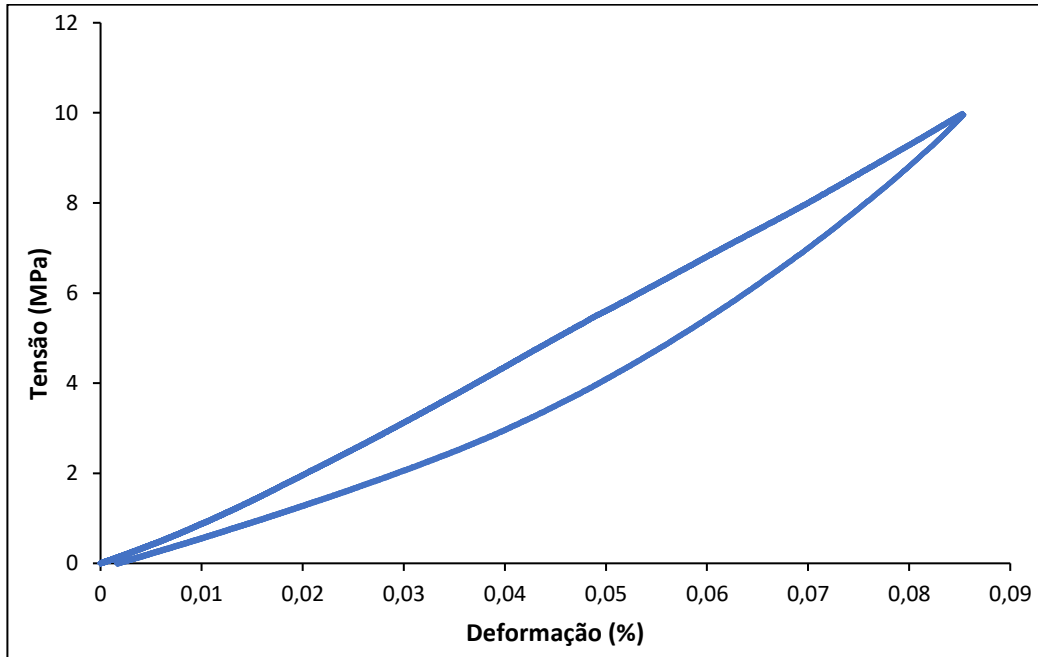


Figura 6. Curva tensão x deformação

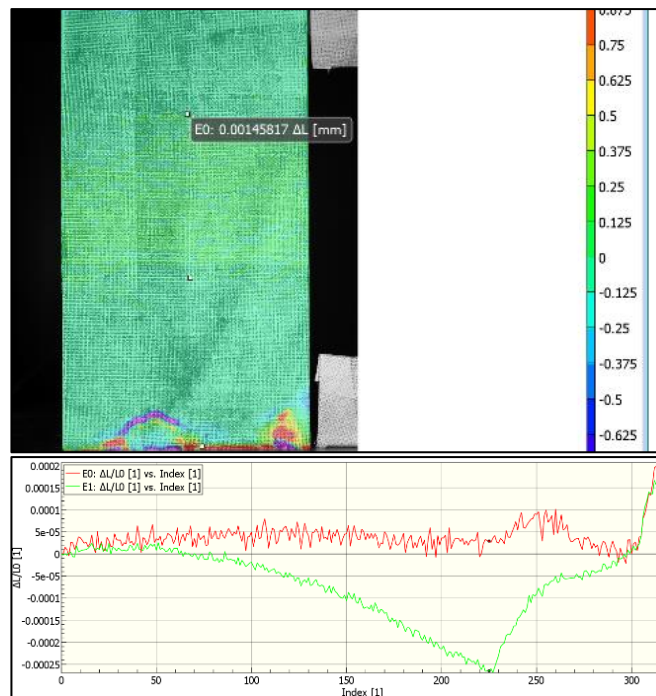


Figura 7. Resultado do ensaio.

A partir do ensaio realizado foi possível a obtenção do diagrama de tensões e deformações, conforme a Figura 6, que apresenta o gráfico oriundo do strain gages. A ordem da deformação obtida no strain gage foi de 0,085% para a tensão máxima aplicada, o que corresponde a um valor máximo de 0,045 mm de deformação em todo corpo da amostra. Por meio da técnica do DIC, a resolução de medida da câmera para a visualização

dos deslocamentos foi na ordem de 0,02 mm/pixel quando aplicado em toda a amostra. O que implica na não possibilidade de comparação entre as duas técnicas utilizadas.

Como também resultado proveniente do strain gages real foi possível também encontrar o módulo de Young da amostra a partir do gráfico de tensão *versus* deformação, por meio do trecho de reta virgem a partir de médias de intervalos de tensões resultando em um valor médio de 12,18 GPa. O valor do módulo de Young obtido também ficou muito próximo à literatura como esperado.

Desta maneira, devido a resolução insuficiente do DIC não foi possível comparar com os resultados obtidos pelo strain gages porque o resultado do processamento do DIC apresentou apenas uma tendência do resultado obtido quando comparado com o strain gages, mostrando que a resolução não foi suficiente para o acompanhamento dos deslocamentos do corpo de prova.

Com o avanço da tecnologia ou com o uso de uma ou mais câmeras com resolução ainda maior, permitirá o mapeamento em escala plausível à comparar com o uso do strain gages. Sendo assim, as deformações se mostraram pequenas demais para o padrão de imagem existente, o que não permitiu estimar a tensão.

4 CONCLUSÕES

O método de metrologia DIC é uma ferramenta óptica não destrutiva e não invasiva, ou seja, não há contato direto ou destruição do elemento em estudo, que por meio de um conjunto de imagens é capaz de realizar o mapeamento dos campos de deslocamentos e deformações. A técnica basicamente, estabelece a correlação entre vários pontos da superfície obtidas no registro da imagem, e com uso de um algoritmo de correlação, faz-se a relação entre as fotos, antes e após o ensaio.

A técnica possui uma configuração barata e acessível, com simples execução e manutenção, que pode ser utilizada em diferentes materiais e situações, em espaço e tempo, bem como, mesmo com a influência externa, no caso da variação de luminosidade no ambiente, trazer resultados consistentes. Além de, acompanhar a evolução cronológica do ensaio e fazer uso de strain gages virtuais e obter informações em diferentes ângulos. A Correlação Digital de Imagem ganhou notoriedade em diversos cenários devido a medição precisa, como na biomedicina, engenharia, metalurgia e, até mesmo, na produção de novos materiais utilizados na medicina.

Viu-se por meio do ensaio realizado que para a comprovação da técnica, a continuidade do avanço da tecnologia contribuirá para a possibilidade de maiores resoluções que permitirá não apenas apresentar uma tendência de comportamento do material, mas também, comparar com métodos usualmente utilizados hoje em dia.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International (2016). ASTM. D3967: *Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*.
- CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T. *Bacia do Paraná: Formações Piramboia e Botucatu*. IN: Congresso Brasileiro de Geologia, 37. São Paulo. Roteiro de excursão São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1992, n.2, p.1-19.
- CHAI et al. (2023). *Digital Image Correlation Method for detecting Strain in wood drying process*. Bio Resources 18(2), 4143-4152.
- ISRM, 1978 – Suggested Methods for determining tensile strength of rock materials.
- ISRM, *ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36: p.279- 289. 1999.
- KEMPNY, Marcin. *Digital Image Correlation – Method Development, Scope, Principle Functioning, and Future Goals*. Journal of Mettalic Materials., 2022, 74 (3-4), p. 30-41.

- MCCORMICK, N.; LORD, J. *Digital Image Correlation*. *Materials Today*, v. 13, n. 12, p. 52–54, 1 Dez. 2010.
- MILANI E.J., MELO J.H.G., SOUZA P.A., FERNANDES L.A. e FRANÇA A.B. *Bacia do Paraná*. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2):265-287. 2007.
- MONTANHEIRO, T. J., ARTUR A. C., MONTANHEIRO F., NEGRI F. A., GESICKI A. L., BOGGIANI P. C. *Investigação Tecnológica de arenitos silicificados da Formação Botucatu (NE do Paraná) para uso como rocha de revestimento*. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 30, n. 2, p. 237-251, 2011.
- PIRES, B.P. *Estudo Experimental do Comportamento Mecânico da Interface Rocha-Pasta de Cimento para Integridade de Poços*. Rio de Janeiro, 2023. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio., 2023.
- SAKANO, Victor Keniti et al. *Uso da técnica Digital Image Correlation (DIC) para estudos em ensaios em escala reduzida de corrida de lama*. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2018. Salvador, Bahia, Brasil.