



MELHORIA DA TEXTURA DA IMAGEM DE UM SOLO PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA CID EM MODELAGEM GEOTÉCNICA

Yara Barbosa Franco

Jefferson Lins da Silva

yarabf@usp.br

jeffersonlins@gmail.com

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia
Avenida Trabalhador São Carlense, 400, Centro. CEP 13.566-590, São Carlos, SP, Brasil.

Resumo. *Este estudo busca demonstrar a aplicabilidade da técnica CID em modelagem geotécnica considerando um material com pobre textura natural. O método Artificial Seeding Ratio foi utilizado para avaliar a qualidade da textura. Foram preparadas 11 amostras com diferentes quantidades de textura artificial adicionada. As imagens foram adquiridas com uma câmera digital com 18 megapixels de resolução e analisadas com o programa gratuito GeoPIV_RG. A qualidade da textura foi avaliada por meio de dois parâmetros de textura: o desvio padrão das intensidades nos subsets e a soma dos quadrados dos gradientes das intensidades dos pixels nos subsets. Observou-se que os parâmetros de textura melhoraram para maiores tempos de exposição da câmera digital. Uma boa qualidade de textura foi alcançada com uma adição de 20% de textura artificial. Finalmente, um exemplo de aplicação é apresentado para mostrar as potencialidades da técnica CID quando a qualidade da textura é adequadamente considerada. Foi possível avaliar os vetores de deslocamento ao longo de diferentes estágios do ensaio e ainda perceber o efeito de um elemento enterrado nos deslocamentos das partículas de solo circundante.*

Keywords: *Correlação de Imagens Digitais, Qualidade da Textura da Imagem, Areia, Modelagem Geotécnica.*

1 INTRODUÇÃO

A técnica de Correlação de Imagens Digitais (CID) foi concebida originalmente para aplicação na área de estudos experimentais na Mecânica dos Fluidos, conforme revisado por Adrian (1991). Neste caso, o movimento do fluido era estudado por meio do rastreamento de marcadores inseridos em seu interior. Em Geotecnia, a técnica CID permite, a partir das respostas na superfície, inferir as respostas no interior do maciço. Ela tem sido aplicada com sucesso especialmente em modelos geotécnicos visando a medição de deslocamentos (Arshad et al., 2014; Baba; Peth, 2012; Cheuk et al., 2008; Huang et al., 2015). Conforme White et al. (2003), a técnica tem apresentando precisão e acurácia comparáveis à instrumentação local.

Compilando da literatura, Pan et al. (2009) listam algumas vantagens da técnica CID, como a simplicidade do aparato de ensaio e preparação do material a ser fotografado, possibilidade de se utilizar luz natural ou uma fonte de luz branca para iluminação e, ainda, a ampla faixa de sensibilidade e resolução das medidas obtidas.

A análise de imagens se inicia pela definição da área de cálculo ou região de interesse (ROI) na imagem de referência previamente selecionada. Em seguida, divide-se a ROI em regiões virtuais igualmente espaçadas (Fig.1a) e, para cada região da malha virtual, computam-se os deslocamentos entre imagens sucessivas para a posterior obtenção do campo total de deslocamentos. White et al. (2003) e Stanier e White (2013) referem-se à cada sub-região da malha de análise como *patch*. A tendência corrente, porém, parece ser utilizar a denominação *subset* (Arshad et al., 2014; Chen et al., 2017; Stanier et al., 2016a; Stanier et al., 2016b; Take, 2015; Teng et al., 2017, Pan et al., 2008; PAN et al., 2009) e por esse motivo essa será a designação adotada no presente artigo.

Take (2015) destaca que uma imagem digital é simplesmente uma matriz de intensidade de cores que armazena a informação de cor em cada ponto da imagem. As regiões de busca, por sua vez, são áreas selecionadas de uma matriz maior de intensidade de cores que compreende toda a ROI.

Assim, para determinar os deslocamentos de um ponto P (Fig. 1), define-se um *subset* de referência de lado L na imagem de referência (Imagem 1) com centro em P (x_0, y_0) que é utilizado para rastrear sua localização correspondente na imagem deformada (Imagem 2). Em algumas formulações, o *subset* pode ter forma circular no lugar de quadrada, com tamanho representado pelo seu diâmetro. Conforme Pan et al. (2009), utiliza-se um *subset* de referência no lugar de um pixel individual, pelo fato do *subset* compreender um conjunto de pixels com maior variação de níveis de intensidade de cor no seu interior. Desse modo, o *subset* se distingue por si só dos *subsets* circundantes, permitindo sua identificação precisa na imagem deformada.

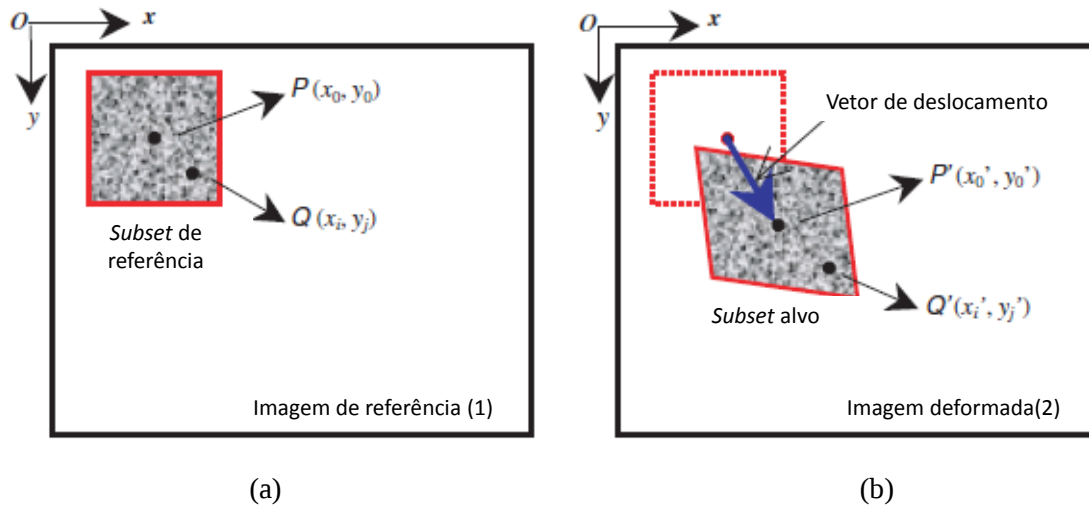


Figura 1. Processo de busca na análise CID: (a) imagem de referência ($t = t_1$); (b) imagem deformada ($t = t_2$). (Adaptado de Pan et al., 2009).

O nível de similaridade entre o *subset* de referência na Imagem 1 e o *subset* buscado na Imagem 2 (Fig. 1) é avaliado por um critério de correlação pré-definido, embutido no algoritmo por meio de uma função de correlação. Tal função dá origem a uma superfície de correlação que indica o grau de correspondência entre as imagens sucessivas (Fig. 2). O maior pico na superfície de correlação indica, portanto, o vetor de deslocamento do *subset* de referência. A superfície de correlação é avaliada para intervalos de pixels individuais (inteiros). Para estabelecer o vetor de deslocamento a nível de subpixel (entre pixels) é ajustada uma função de interpolação para formar uma função contínua na região próxima ao pico de correlação. Essa análise é repetida para a totalidade da malha ROI para a obtenção do campo de deslocamentos entre o par de imagens analisado.

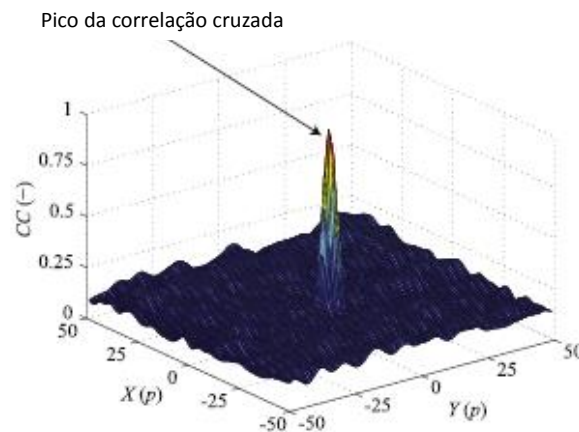


Figura 2. Identificação do pico de correlação cruzada (valores inteiros de pixel) (Stanier et al., 2016b).

Contudo, um fator que afeta diretamente na precisão da técnica CID, em especial na definição do pico de correlação, refere-se à textura da imagem. Take (2015) a define como o parâmetro que descreve o grau de variação dos valores de intensidade de cor dos pixels em uma imagem. O autor mostra a importância do chamado “*random speckle pattern*”, que permite que

o *subset* da imagem de referência tenha uma textura única suficiente para que ele seja identificado nas imagens subsequentes. Dessa forma, uma das primeiras tarefas ao se utilizar a técnica CID é considerar uma textura da imagem apropriada para o fim desejado.

Estudo mais detalhado relacionado à quantificação e otimização da textura introduzida no solo foi conduzido por Stanier e White (2013). Os autores mostraram que, por meio da introdução de uma quantidade ótima de textura artificial, é possível aumentar a precisão dos resultados obtidos via CID, tanto em argila quanto em areia. Tal metodologia constitui-se no foco de estudo do presente artigo.

Portanto, o propósito deste estudo consiste em mostrar a aplicabilidade da técnica CID em modelagem geotécnica considerando um material com textura natural inadequada. Para tal foi aplicada a metodologia de otimização de textura proposta por Stanier e White (2013). Um exemplo de aplicação, que consiste em um modelo geotécnico de escala reduzida, é apresentado para demonstrar o potencial da técnica quando a textura do material é adequadamente definida.

2 OTIMIZAÇÃO DA TEXTURA

Para a aquisição das imagens foi utilizada uma câmera digital de 18 Mpx de resolução, modelo EOS Rebel T5 da Canon, com sensor CMOS. O processamento das imagens, por sua vez, foi feito com o programa gratuito GeoPIV_RG, cuja descrição sobre o método computacional implementado e avaliação de desempenho são detalhados no trabalho de Stanier et al. (2016b).

O GeoPIV_RG implementa a técnica CID visando a modelagem geotécnica e o seu desempenho foi comprovado em estudos publicados em renomados periódicos (Stanier et al., 2016a; Stanier et al., 2016b). Destaca-se que o *software* é um dos mais recentes a incorporar funções de forma de maior ordem, que resultam em uma melhora no refinamento dos deslocamentos obtidos a nível de subpixel (Stanier et al., 2016b). Especificamente, a função de forma utilizada no GeoPIV_RG é de 1ª ordem, que permite a combinação de translação, rotação, distorção e deformações normais do *subset*.

O material utilizado para a análise de otimização de textura foi uma areia pura denominada “areia Itaporanga”, proveniente de uma jazida localizada na rodovia SP-215 (km 154), próxima à cidade de São Carlos-SP. A partir da análise granulométrica (Fig. 3) a areia foi classificada como SP de acordo com a classificação SUCS. Trata-se de um material mal graduado com cerca de 80% correspondente à fração areia média e grãos com diâmetro médio de 0,3 mm.

Como já mencionado, melhores picos de correlação na análise CID estão diretamente relacionados à textura das imagens analisadas (Chen et al., 2017). Porém, a textura natural da areia Itaporanga não se mostrou adequada para a aplicação da técnica CID. De fato, ao se processar as imagens no *software* GeoPIV_RG não foi possível atender, de forma alguma, às tolerâncias mínimas recomendadas para os coeficientes de correlação. Assim, para viabilizar o uso do material, foi utilizado o método denominado *Artificial Seeding Ratio* (ASR), proposto por Stanier e White (2013).

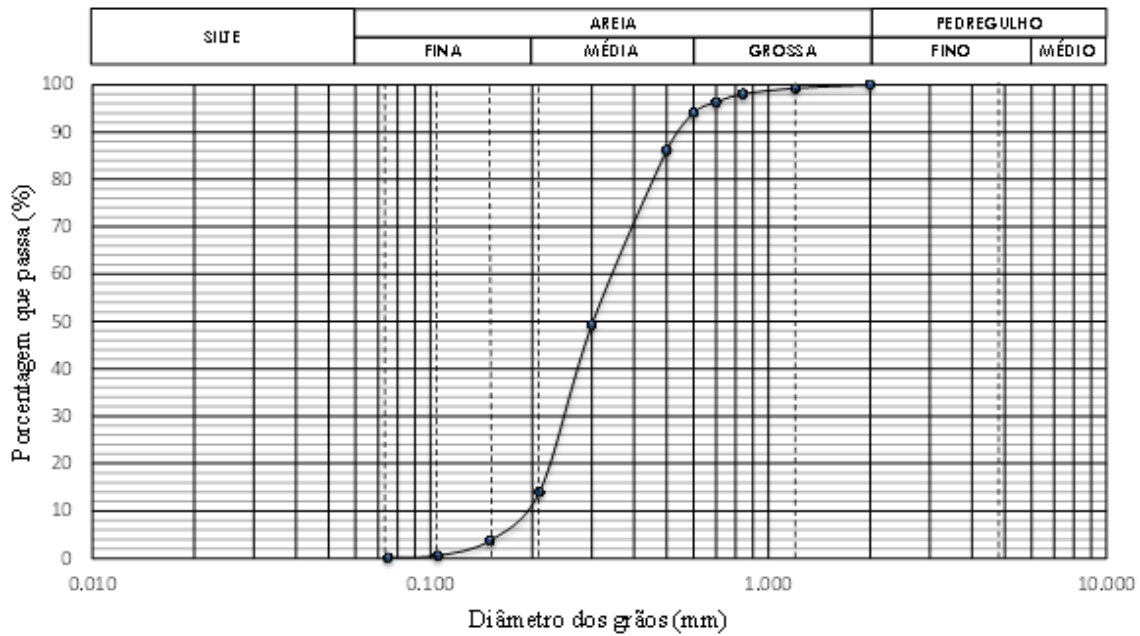


Figura 3. Curva granulométrica da areia Itaporanga.

A técnica ASR consiste em se preparar misturas com diferentes proporções de areia colorida (textura artificial) e obter a intensidade média das cores ($\overline{I_{px}}$) de cada mistura a partir de sua respectiva imagem. As imagens referentes à textura natural (sem adição de areia colorida) e à textura saturada (100% de areia colorida) são utilizadas para definir os valores limites para a intensidade média de cor. Em seguida é feito o cálculo do valor ASR para cada mistura preparada, por meio da Eq. (1). Desse modo, os valores ASR variam entre 0 (textura natural) e 1 (textura saturada).

$$ASR = \frac{(\overline{I_{px}} - \overline{I_{px,nat}})}{(\overline{I_{px,sat}} - \overline{I_{px,nat}})} \quad (1)$$

onde:

ASR – *artificial seeding ratio*;

$\overline{I_{px}}$ - intensidade média de cor da imagem considerada;

$\overline{I_{px,nat}}$ - intensidade média de cor da imagem da textura natural;

$\overline{I_{px,sat}}$ - intensidade média de cor da imagem totalmente saturada.

Neste estudo, foram preparadas 11 misturas, com variação da porcentagem (em peso) de areia colorida de 0 a 100%, com incrementos de 10% (Fig. 4). A areia colorida utilizada foi a própria areia Itaporanga, porém tingida com tinta nankin preta na proporção de 5 ml/kg de areia. As demais definições da montagem experimental são apresentadas na Tabela 1.

As imagens foram adquiridas, para cada mistura, com tempos de exposição da câmera digital variáveis para verificar a influência deste parâmetro na qualidade da textura das misturas.

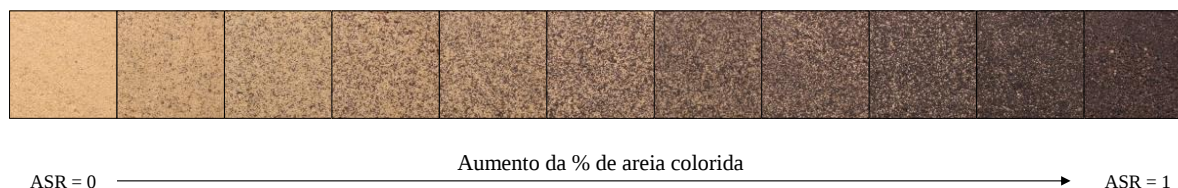


Figura 4. Visualização da evolução da textura das imagens para as 11 misturas preparadas (variação da porcentagem, em peso, de areia colorida de 0 (ASR = 0) a 100% (ASR = 1), com incrementos de 10%).

Tabela 1. Definições da montagem experimental para a otimização de textura

Definições gerais	Valor
Escala global da imagem	0.075 mm/px
Iluminação padronizada	2 refletores LED de 10W
Definições da câmera digital	Valor
Abertura	f/5
Sensibilidade ISO	100
Distância focal	42 mm
Tempos de exposição (velocidade do obturador)	1/15s, 1/13s, 1/10s, 1/8s, 1/6s e 1/5s

As imagens foram subdivididas em um total de 346 *subsets* com 100 pixels de diâmetro (D_s) cada. A intensidade média das imagens, para cada uma das misturas e para cada um dos tempos de exposição analisados, foram obtidas por meio de processamento no programa Matlab R2015a.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Qualidade da textura

O parâmetro tempo de exposição, em fotografia, diz respeito ao tempo que o obturador da câmera leva para abrir e fechar, ou seja, ao tempo a que o sensor fica exposto à luz. Por esse motivo era esperado que tal parâmetro tivesse influência nas intensidades de cor das imagens finais obtidas. Este comportamento é nitidamente observado na Fig. 5, em que, para uma mesma mistura, maiores tempos de exposição resultaram em imagens com maior intensidade média de cor.

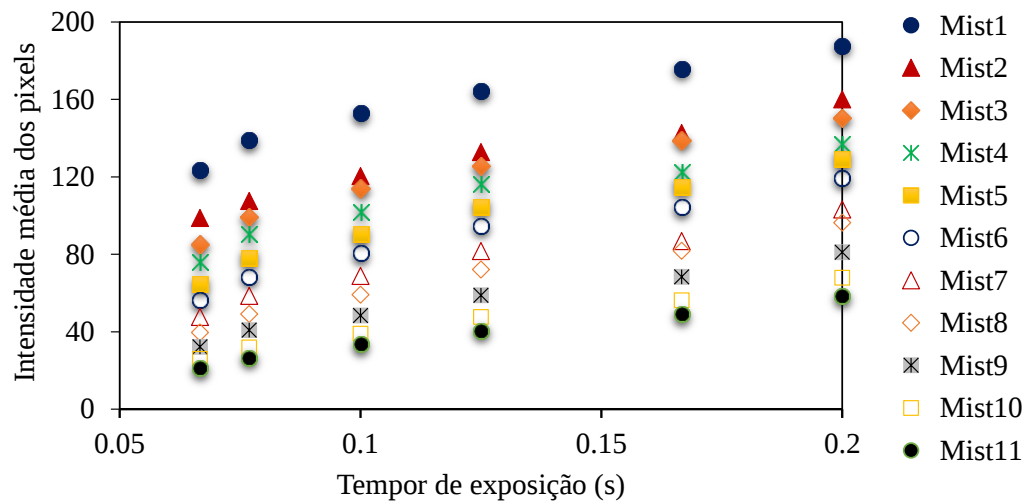


Figura 5. Variação dos valores de intensidade média de cor das imagens em função do grau de saturação e do tempo de exposição (obs: demais parâmetros da câmera mantidos constantes - abertura = $f/5.6$, sensibilidade ISO = 100, distância focal = 42 mm e sem *flash*). As 11 misturas foram preparadas com variação da porcentagem (em peso) de areia colorida adicionada de 0 (Mist. 1) a 100% (Mist. 11), com incrementos de 10%.

A qualidade da textura de cada uma das misturas foi avaliada com base em dois parâmetros de textura indicados na literatura (Stanier et al., 2016a): o desvio padrão das intensidades nos *subsets* (σ_{Is}) e a soma dos quadrados dos gradientes das intensidades dos pixels nos *subsets* (SSSIG). Stanier e White (2013) mostram que valores de σ_{Is} acima de 15 garantem um contraste suficiente nos *subsets*. O parâmetro SSSIG, por sua vez, é uma forma alternativa de medir a qualidade da textura. Pan et al. (2008) recomendam um valor mínimo de SSSIG igual a 1×10^5 .

Os valores de σ_{Is} e SSSIG da imagem, para cada *subset*, foram fornecidos pelo programa GeoPIV_RG após a geração da malha de análise. Para o estudo de otimização de textura, foi definido o tamanho do *subset* (D_s) e o espaçamento (s) entre *subsets* iguais a 100. Primeiramente, os valores médios globais (conjunto total de *subsets*) de σ_{Is} e SSSIG foram comparados com os mínimos recomendados. Os resultados são apresentados na Fig. 6, em função do tempo de exposição. Cada conjunto de dados representa uma mistura. O valor mínimo recomendado é representado pela linha tracejada horizontal.

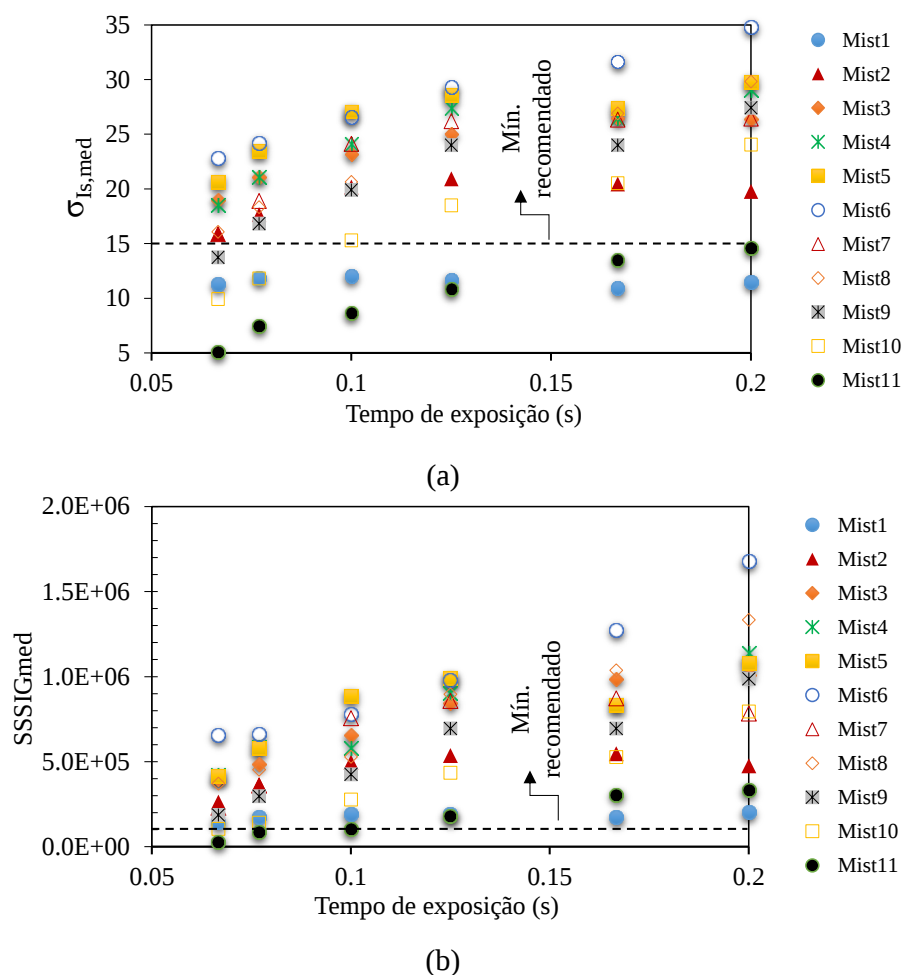


Figura 6. Média global (entre todos os subsets) de: (a) σ_{Is} e (b) SSSIG em função do grau de saturação da amostra e do tempo de exposição (obs: demais parâmetros da câmera mantidos constantes - abertura = f/5.6, sensibilidade ISO = 100, distância focal = 42 mm e sem *flash*). As 11 misturas foram preparadas com variação da porcentagem (em peso) de areia colorida adicionada de 0 (Mist. 1) a 100% (Mist. 11), com incrementos de 10%.

A Mistura 1 apresentou valores de $\sigma_{Is,med}$ abaixo de 15 independente do tempo de exposição (Fig. 6), o que justifica a não adequabilidade do uso da textura natural na análise CID. Porém, uma adição de 10% (em peso) de areia colorida foi suficiente para atender aos requisitos mínimos tanto do σ_{Is} quanto do SSSIG (para as médias globais).

Ambos os parâmetros, σ_{Is} e SSSIG, aumentaram para maiores tempos de exposição. Além disso, este efeito foi mais pronunciado com o acréscimo da porcentagem de areia colorida adicionada, conforme o gráfico apresentado na Fig. 7. Este gráfico apresenta o aumento nos valores dos parâmetros de textura da imagem considerando a diferença entre os valores obtidos com o tempo de exposição igual a 1/5s em relação aos valores obtidos com exposição de 1/15s. Os acréscimos observados, em especial para as misturas mais saturadas, foram significativos e da ordem de 10 a 14 para σ_{Is} e de 6×10^5 a 1×10^6 para o SSSIG.

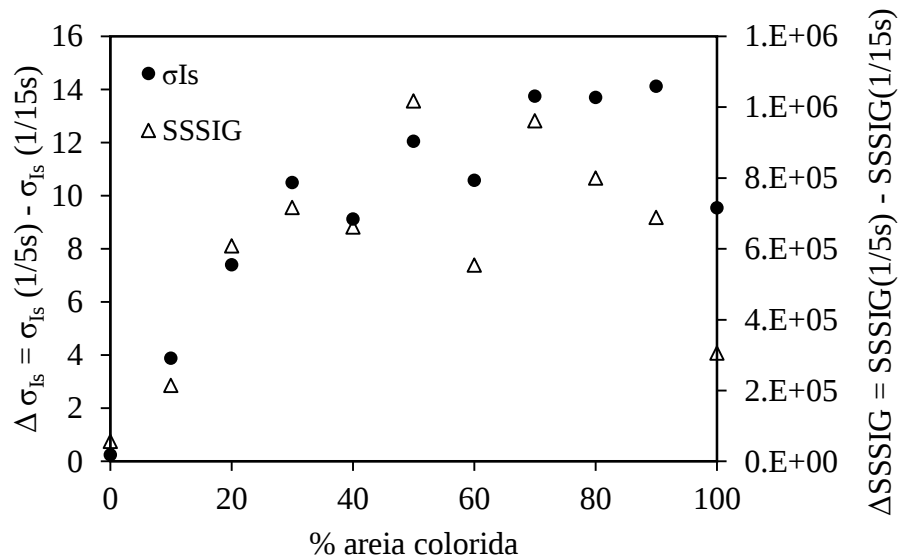


Figura 7. Efeito do tempo de exposição no acréscimo dos parâmetros de textura (σ_{Is} e SSSIG) em função do grau de saturação da amostra (% em peso de areia colorida adicionada): comparação entre tempos de exposição de 1/15s e 1/5s.

A Figura 8 apresenta a evolução de σ_{Is} com o valor de ASR calculado a partir da Eq. 9, considerando os tempos de exposição de 1/15s e 1/5s. É notável a influência da adição de areia colorida no valor de σ_{Is} e, como esperado, a partir de um certo valor de ASR um acréscimo nessa adição não traz mais benefícios. Pelo contrário, a partir de um ASR ‘ótimo’, o valor de σ_{Is} começa a diminuir, visto que a mistura fica cada vez mais saturada e, portanto, com cor mais homogênea. Novamente, é possível verificar o ganho no desvio padrão das intensidades médias nos *subsets* quando alterado o tempo de exposição de 1/15 s para 1/5 s, o que é desejável em uma análise CID.

Do exposto, observa-se que uma adição de apenas 10% (em peso) de areia colorida elevou o $\sigma_{Is,med}$ de 11.5 para 19.8 (Fig. 6a) e o $SSSIG_{med}$ de 2.0×10^5 para 4.8×10^5 (Fig. 6b) para um tempo de exposição de 1/5s. Dessa forma, a Mistura 2 atendeu aos critérios mínimos recomendados para estes parâmetros, quando consideradas as médias globais. Todavia, para se ter uma melhor ideia dos valores de σ_{Is} em toda a malha de análise, foram calculadas as porcentagens de *subsets* com σ_{Is} inferior aos valores de 10 a 30 para as misturas 2 e 3. Os resultados são apresentados na Fig. 9.

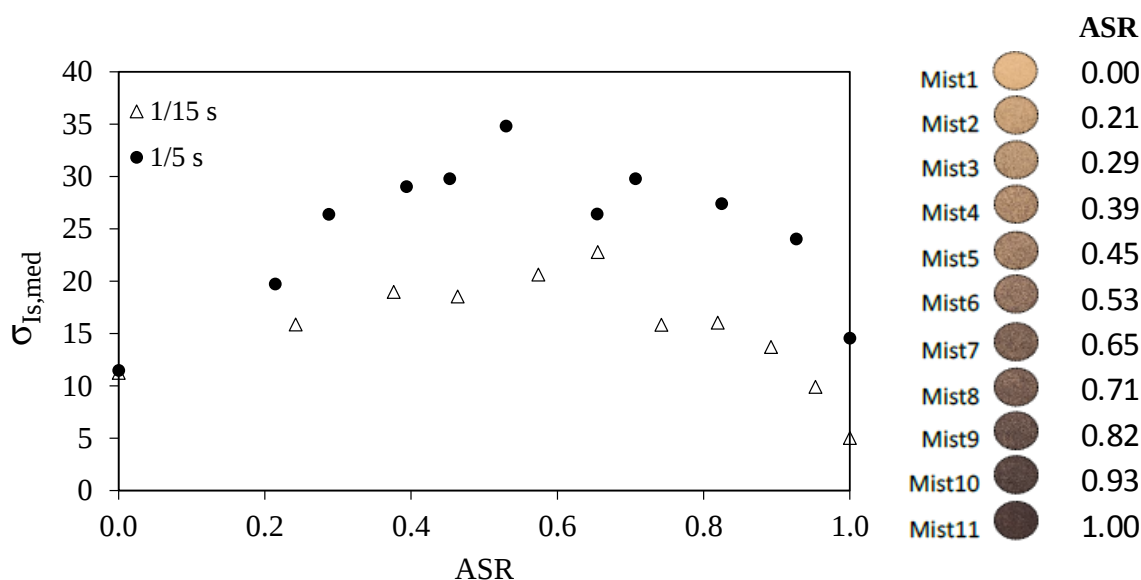


Figura 8. Média global (entre todos os subsets) de σ_{Is} em função do grau de saturação da amostra (ASR) para os tempos de exposição de 1/15s e 1/5s (obs: demais parâmetros da câmera mantidos constantes - abertura = f/5.6, sensibilidade ISO = 100, distância focal = 42 mm e sem *flash*).

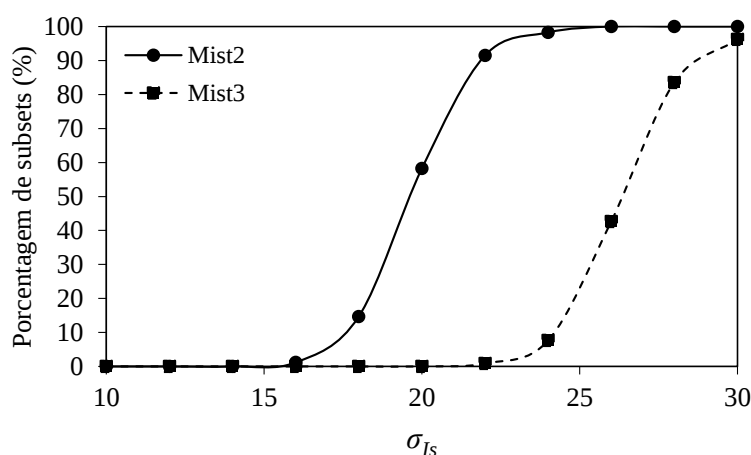


Figura 9. Distribuição acumulada de σ_{Is} (porcentagem de subsets com σ_{Is} no intervalo de 10 a 30) para as misturas Mist2 (ASR = 0,21) e Mist3 (ASR = 0,29).

Ambas as misturas (2 e 3) apresentaram praticamente a totalidade de subsets com σ_{Is} maior que 15, atendendo ao valor mínimo recomendado na literatura. Porém, enquanto a Mistura 2 (ASR = 0.21) apresentou cerca de 99% de subsets com σ_{Is} inferior a 25, a Mistura 3 (ASR = 0.29) apresentou uma porcentagem somente de 18%. Isto significa que, ao longo da malha de análise, a Mistura 3 expôs maior aleatoriedade de textura, representado pelos maiores desvios padrões de intensidade de cor nos subsets. Por esse motivo, a escolha da Mistura 3 se mostrou apropriada para uso em aplicações da técnica CID, com o intuito de se garantir bons picos de correlação. Essa escolha seguiu ainda a recomendação de Stanier et al. (2016b), que concluiu

em seu trabalho que valores de ASR entre 0.3 e 0.7 asseguram que foi adicionada uma quantidade suficiente de textura ao modelo.

A melhora na textura obtida na Mistura 3 é ilustrada na Fig. 10, que compara os histogramas da intensidade dos pixels para as imagens da Mistura 1 e da Mistura 3. Para a textura natural, a distribuição das intensidades de cor se concentra em um intervalo pequeno de valores, resultando em um baixo σ_{Is} e baixa precisão. Por outro lado, a adição de 20% de areia colorida resultou em uma distribuição mais “achatada” e, conseqüentemente, em um aumento de σ_{Is} e melhora na precisão dos resultados advindos do uso da técnica CID. A influência da adição de textura na melhora da precisão da análise foi verificada por Stanier e White (2013).

A escolha da mistura 3 para a aplicação da técnica CID em análises posteriores se mostra vantajosa quando comparada à mistura ótima ou mistura 6 (Fig. 8) pois, além de garantir bons parâmetros de textura (acima dos limites recomendados) requer uma pequena quantidade de textura artificial a ser adicionada. Haja vista que em modelos geotécnicos geralmente é requerido um grande volume de material, é desejável a escolha de uma solução que, na prática, apresente melhor custo benefício, tal qual a mistura 3.

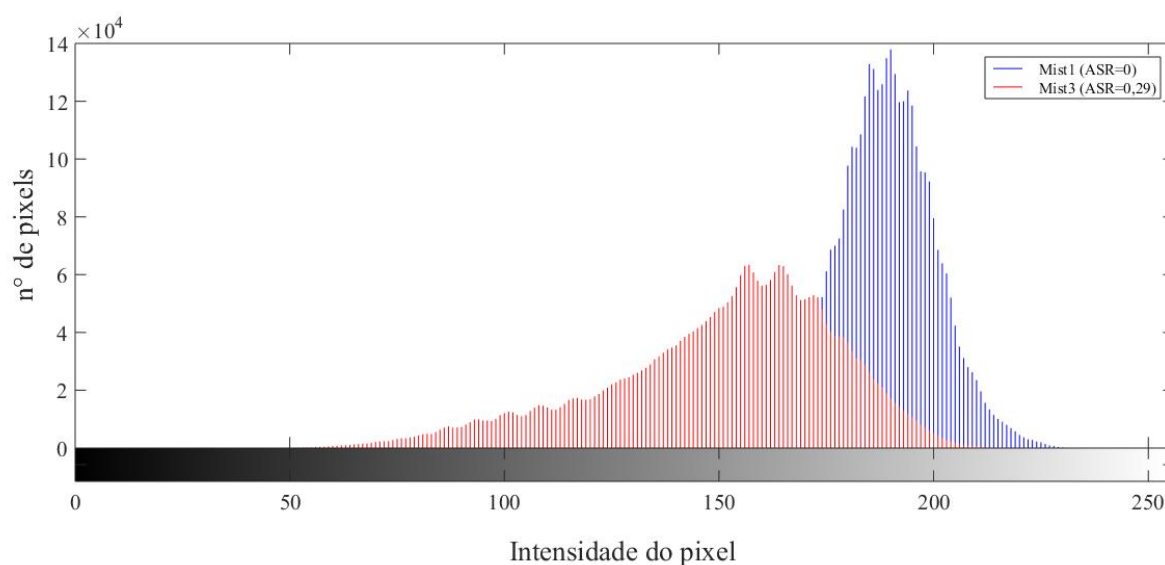


Figura 10. Aumento do intervalo de valores de intensidade de cor dos pixels com o aumento de ASR (comparação entre distribuições de intensidade das Mist 1 e Mist 3).

3.2 Exemplo de aplicação

Para demonstrar a aplicação da mistura preparada segundo a ótica de otimização de textura, foram utilizadas imagens de um ensaio com modelo físico em escala reduzida que estudou o comportamento de dutos enterrados. O ensaio consistiu na alteração do estado de tensões da massa de solo no interior da caixa de ensaios por meio da aplicação de incrementos diários de inclinação ao aparato experimental. Um tubo de alumínio, com 49.3 mm de diâmetro e 0.5 mm de espessura, foi disposto na transversal no interior da caixa e à meia altura do modelo (altura de cobertura igual a 175 mm). O solo utilizado foi a areia Itaporanga com 20% de textura artificial adicionada (mistura 3). O material foi preparado com uma densidade relativa igual a 111.5%, obtida por meio da técnica de chuva de areia. Para a aquisição de imagens foi utilizada

uma câmera digital de 18 Mpx de resolução, modelo EOS Rebel T5 da Canon com sensor CMOS. Foi adotada uma escala de imagem igual a 0.075 mm/px.

A análise do conjunto de imagens obtido foi realizada com o programa gratuito GeoPIV_RG. As definições da análise são resumidas na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do processamento do GeoPIV_RG utilizados no exemplo de aplicação

Parâmetro	Valor
Tamanho do <i>subset</i> (D_s)	100 px
Espaçamento entre <i>subsets</i> (s)	100 px
Máximo número de iterações ($\max_{\text{iter}}$)	50
Máximo valor da norma do vetor de diferença da função de forma do <i>subset</i> ($ \Delta p _{\max}$)	10^{-5}
Tolerância para o coeficiente de correlação do <i>seed</i> ($CC_{\text{ZNCC-seed-tol}}$)	0.9
Tolerância para o coeficiente de correlação do campo total ($CC_{\text{ZNCC-min-tol}}$)	0.75

A Figura 11 mostra que a presença do tubo próximo à face da caixa (distância de 2.5 mm) foi percebida pela análise CID realizada. No modelo, a influência do elemento enterrado atua no sentido de propiciar uma maior movimentação do solo circundante. Na análise CID, por sua vez, tais deformações implicaram em perda na correlação entre os *subsets* de imagens subsequentes, com uma região concentrada de *subsets* não atendendo à tolerância mínima definida de $CC_{\text{ZNCC-min-tol}} = 0.75$.

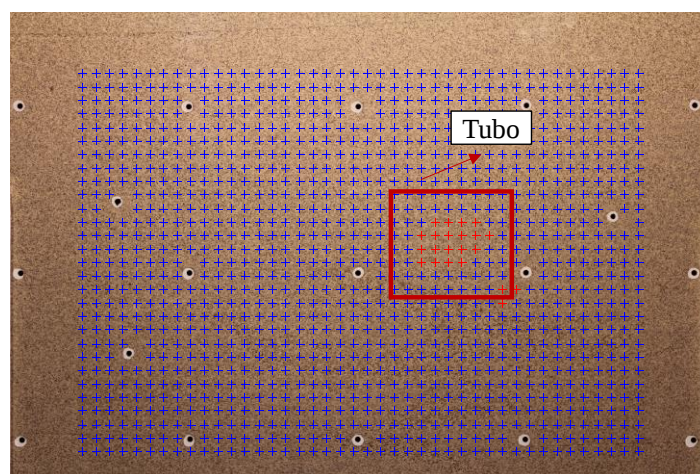


Figura 11. Malha de análise após o processamento com GeoPIV_RG: *subsets* com $CC_{\text{ZNCC-min-tol}} < 0.75$ (centros em vermelho) concentrados na região correspondente à posição do tubo enterrado.

A Figura 12 apresenta os deslocamentos resultantes (em mm) subdivididos por intervalos de inclinação do aparato experimental, para melhor avaliar a evolução do movimento do solo ao longo do ensaio. Os *subsets* com $CC_{ZNCC-min-tol} < 0.75$ (Fig. 11) foram excluídos e a superfície resultante de deslocamentos nessa região foi obtida por interpolação. Destaca-se que, como a caixa e a câmera se movimentam em conjunto ao longo do ensaio, o eixo xy refere-se a um sistema de eixos locais, em que o eixo x sempre coincide com a direção longitudinal da caixa de ensaios e o eixo y permanece perpendicular ao x.

Os baixos níveis de deslocamento observados eram esperados, devido à alta compacidade da areia. O deslocamento total, excluindo a região de influência imediata do tubo (Fig. 11), foi da ordem de 0.2 mm de deslocamento na direção x e de 1 mm para o deslocamento na direção y.

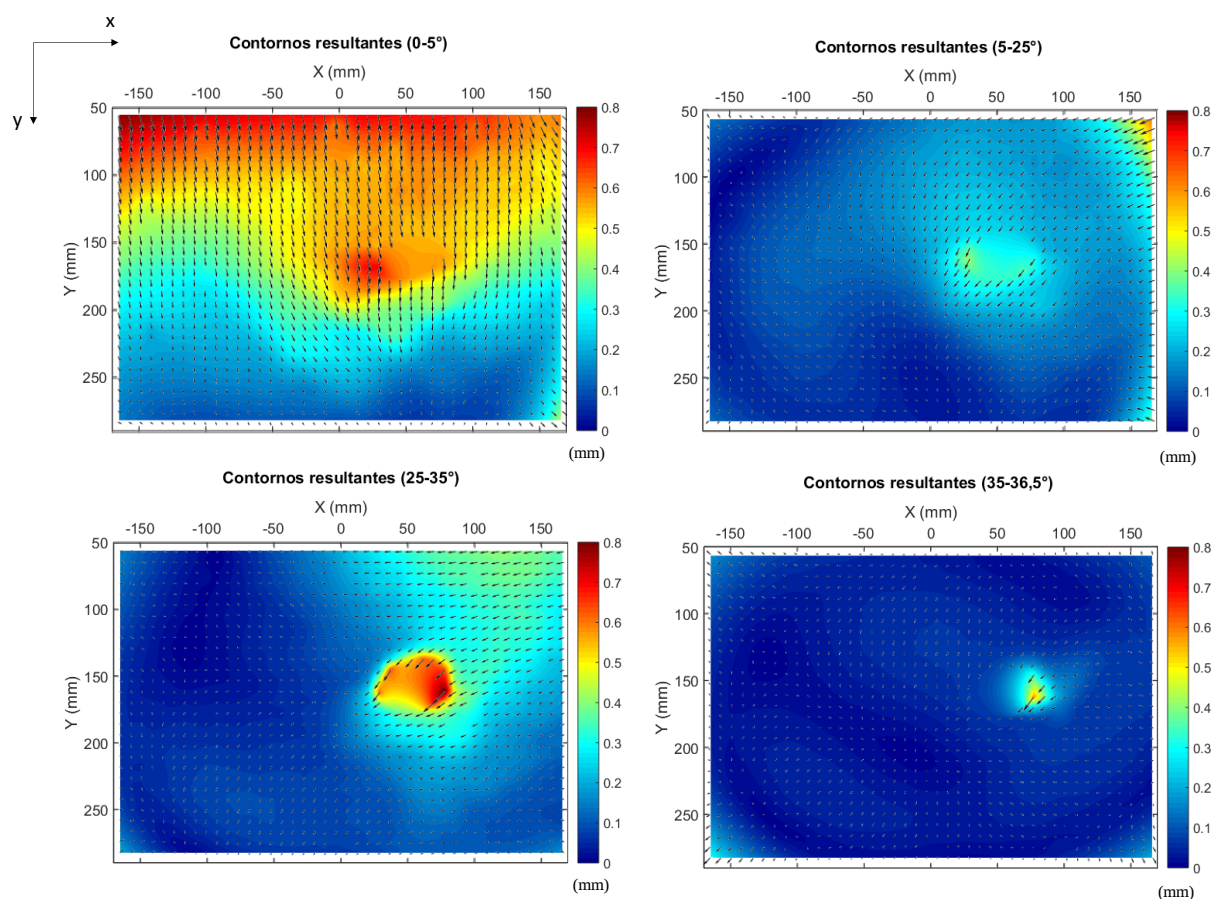


Figura 12. Evolução dos deslocamentos resultantes (em mm) ao longo do ensaio para quatro intervalos de inclinação do modelo: 0 a 5°, 5 a 25°, 25 a 35° e 35 a 36,5°. A delimitação da malha de análise em cada imagem foi definida um pouco abaixo da superfície do modelo (cota y = 25 mm). (Obs: eixos x e y são eixos locais).

O uso da mistura 3, com adição de 20% (em peso) de textura artificial, se mostrou adequado para aplicação da técnica CID. Foi possível captar, no exemplo apresentado, pequenos deslocamentos e a influência de um elemento enterrado nas deformações do solo circundante. Desse modo, observa-se que a técnica CID pode ser uma ferramenta importante na compreensão de modelos geotécnicos, com notável vantagem de ser uma técnica não invasiva.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou a aplicabilidade da técnica CID em modelagem geotécnica considerando um material com textura natural não adequada para tal fim. Foi aplicada uma metodologia recente proposta na literatura, denominada ASR, que se mostrou prática e eficaz. Destaque foi dado às definições dos parâmetros da câmera digital, em especial ao tempo de exposição. Maiores tempos de exposição implicaram em melhora nos parâmetros de textura, o que é desejável para uso da técnica CID. Foi possível identificar as misturas que atendiam aos requisitos mínimos de textura recomendados na literatura e a mistura ótima, com os melhores parâmetros de textura.

Um exemplo de aplicação ilustrou o uso da técnica CID com o uso do programa GeoPIV_RG para uma das misturas preparadas de acordo com a metodologia ASR. A mistura escolhida, apesar de não ser a mistura ótima, atendeu aos requisitos mínimos para os parâmetros de textura e se mostrou prática para a preparação de maiores volumes de material. O processamento das imagens no programa GeoPIV_RG possibilitou a geração de campos de deslocamentos resultantes e vetores de deslocamento, sendo possível analisar separadamente diferentes intervalos de inclinação do modelo ensaiado. Em contrapartida, para o material natural (sem adição de textura artificial) a análise foi inviabilizada devido à impossibilidade de se atingir bons picos de correlação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pelo CNPq, projeto de pesquisa nº Processo 457093/2015-5, sem o qual esta pesquisa não poderia ter sido realizada.

REFERÊNCIAS

- Adrian, R.J., 1991. Particle-imaging techniques for experimental fluid-mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 23, n. 1, pp.261-304.
- Arshad, M.I.; Tehrani, F.S.; Prezzi, M., 2014. Experimental study of cone penetration in silica sand using digital image correlation. *Géotechnique*, vol. 64, n. 7, pp.551-569.
- Baba, H. O.; Peth, S., 2012. Large scale soil box test to investigate soil deformation and creep movement on slopes by Particle Image Velocimetry (PIV). *Soil and Tillage Research*, vol. 125, pp.38-43.
- Chen, Z. (Chris); Li, K.; Omidvar, M., 2017. Guidelines for DIC in geotechnical engineering research. *International Journal of Physical Modelling In Geotechnics*, vol. 17, n. 1, pp.3-22.
- Cheuk, C. Y.; White, D. J.; Bolton, M. D., 2008. Uplift mechanisms of pipes buried in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, n. 2, pp.154-163.
- Huang, B.; Liu, J.; Ling, D., 2015. Application of Particle Image Velocimetry (PIV) in the study of uplift mechanisms of pipe buried in medium dense sand. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 5, n. 5, pp.599-614.
- Pan, B.; Qian, K.; Xie, H. Asundi, A., 2009. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, vol. 20, n. 6, pp.1-17.

- Pan, B.; Xie, H.; Wang, Z.; Qian, K.; Wang, Z., 2008. Study on *subset* size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Optics Express*, vol. 16, n. 10, pp.7037-7048.
- Stanier, S.A.; Blaber, J.; Take, W.A.; White, D.J., 2016a. Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 53, n. 5, pp. 727-739.
- Stanier, S.; Dijkstra, J.; Lésniewska, D.; Hambleton, J.; White, D.; Wood, D.M., 2016b. Vermiculate artefacts in image analysis of granular materials. *Computers and Geotechnics*, vol. 72, pp.100-113.
- Stanier, S.A.; White, D.J., 2013. Improved image-based deformation measurement in the centrifuge environment. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 36, n. 6, pp.915-927.
- Take, W.A., 2015. Thirty-sixth canadian geotechnical colloquium: advances in visualization of geotechnical processes through digital image correlation. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52, n. 9, pp.1199-1220.
- Teng, Y.; Stanier, S. A.; Gourvenec, S. M., 2017. Synchronised multi-scale image analysis of soil deformations. *International Journal Of Physical Modelling In Geotechnics*, vol. 17, n. 1, pp.53-71.
- White, D.J.; Take, W. A.; Bolton, M. D., 2003. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Géotechnique*, vol. 53, n. 7, pp.619-631.