

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Interpretação de Ensaios CPTu Realizados em Pilha de Fosfogesso por Meio de Técnicas de Estatística Multivariada

Pablo dos Santos Cardoso Coelho

Engenheiro Geotécnico, Walm Engenharia BH, Belo Horizonte, Brasil, pabloccoelho@outlook.com

Gustavo Henrique Nogueira

Engenheiro Geotécnico, Walm Engenharia BH, Belo Horizonte, Brasil, ghnogueira89@gmail.com

Daniel Ferreira Katahira

Geólogo, Walm Engenharia BH, Belo Horizonte, Brasil, daniel.katahira@walmengenharia.com.br

José Mário Queiroga Mafra

Engenheiro Geotécnico, Walm Engenharia BH, Belo Horizonte, Brasil, jose.mafra@walmengenharia.com.br

João Emilio Tozetti Franco

Geólogo, Walm Engenharia BH, Belo Horizonte, Brasil, joao.franco@walmengenharia.com.br

RESUMO: Métodos empíricos de classificação de geomateriais por meio de ensaios CPTu, dentre os quais destaca-se o sistema SBTn (Robertson, 2016) tem aplicabilidade altamente difundida na prática da engenharia geotécnica, possibilitando a segregação de materiais por meio da associação dos parâmetros de ensaio a comportamentos típicos de solos. Observa-se, entretanto, que o emprego da técnica para ensaios CPTu realizados em uma pilha de fosfogesso não apresentam resultados satisfatórios, sendo percebida a incongruência das classificações resultantes do sistema SBTn com as observações *in situ* dos materiais dispostos na estrutura. Dada a impossibilidade de diferenciação dos diferentes tipos de fosfogesso por meio do sistema SBTn, propôs-se a avaliação dos fosfogessos da pilha por meio do emprego da técnica de agrupamento *k-means*, subsidiada pela criação de variáveis auxiliares, componentes principais 1 e 2, obtidas por meio da técnica de análise de componentes principais. Observa-se que a classificação do fosfogesso por meio do emprego da metodologia apresentada no presente artigo resulta compartimentos de 4 classes de fosfogesso distribuídos ao longo da pilha em posições coerentes com o esperado para o método de empilhamento *rim ditch*, empregado na construção da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: CPTu, Classificação, Fosfogesso, Pilha, K-means, Análise de componentes principais.

ABSTRACT: Empirical methods for classification of geomaterials through CPTu tests, among which the SBTn system (Robertson, 2016) stands out, has widespread applicability in the practice of geotechnical engineering, enabling the segregation of materials through the association of test factors to typical soil behaviors. It is observed, however, that the use of the technique for CPTu tests carried out in a pile of phosphogypsum does not present satisfactory results, being perceived the incongruity of the categories of the SBTn system with an *in situ* observation of the materials disposed in the structure. Given the impossibility of differentiating the different types of phosphogypsum using the SBTn system, an evaluation of the phosphogypsum in the pile was proposed using the k-means grouping technique, supported by the creation of auxiliary variables, principal components 1 and 2, obtained through the technique of principal component analysis. It is observed that the classification of phosphogypsum using the methodology presented in this article results in compartments of 4 classes of phosphogypsum distributed along the pile in positions consistent with those expected for the rim ditch stacking method, used in the construction of the structure.

KEYWORDS: CPTu, Classification, Phosphogypsum, Pile, K-means, Principal components analysis.



1 Introdução

O fosfogesso di-hidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, consiste no subproduto da produção de ácido fosfórico. O referido material, conforme apontado por Fuleihan (2012), é convencionalmente disposto por meio de empilhamentos por via seca ou úmida e, no caso de alguns países específicos como Marrocos, Tunísia, México e África do Sul, despejado no mar. Menos de 5% da produção mundial de fosfogesso é comercializada, tendo como principal destino o emprego na agroindústria.

O presente artigo tem foco voltado para a compartimentação de uma pilha de disposição de fosfogesso por via úmida, com o intuito de propor meios para agrupar os materiais dispostos na estrutura em função de suas propriedades físicas – dada a percepção visual de diferentes de consolidação dos materiais estocados.

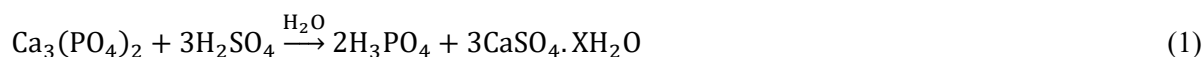
Neste contexto, foram analisados os resultados de 7 ensaios de cravação de piezecone (CPTu) realizados ao longo da estrutura e inspeção visual dos materiais tratados.

Os dados analisados foram interpretados por meio das metodologias de classificação comportamental dos solos via ensaio CPTu propostas por Robertson (2016) e Schneider *et al.* (2012). Paralelamente, os mesmos foram tratados estatisticamente mediante o emprego das técnicas de análise de componentes principais (PCA) e agrupamento pelo método *k-means*, sendo proposto um sistema de classificação estatístico para o material estudado.

Observa-se que o sistema de classificação proposto é capaz de explicitar diferenciações entre grupos de materiais capazes de reter significados coerente com as características típicas do método de alteamento da estrutura, nomeadamente, *rim ditch*, expostas por Fuleihan (2012).

2 Fosfogesso e Método de Alteamento *Rim Ditch*

A produção do ácido fosfórico consiste no tratamento da rocha fosfórica com ácido sulfúrico, resultando a subprodução do fosfogesso, conforme demonstrado pela equação 1, na qual X pode apresentar valor de 0, 0,5 e 2, a depender da tecnologia empregada. O presente estudo é voltado para o empilhamento de fosfogesso di-hidratado ($X=2$).



Amin (1966) aponta que a cristalização do fosfogesso produz cristais aciculiformes, sendo a solubilidade do material inversamente proporcional à concentração de sulfato no meio. Neste cenário, o fosfogesso disposto por via úmida em polpa ácida subproduzida no beneficiamento industrial de rochas fosfóricas com ácido sulfúrico encontra meio propício para a sua consolidação e cristalização, com a consequente promoção do ganho de resistência do subproduto.

De acordo com Fuleihan (2012), o método mais eficiente e convencionalmente utilizado para a disposição do fosfogesso por via úmida consiste no alteamento de pilhas. Denomina-se o método *rim ditch*. A técnica de disposição consiste na construção de trincheiras compostas por duas leiras concêntricas de fosfogesso drenado, as quais funcionam como barreiras para a contenção de um lago central, comunicante com a trincheira anelar por meio de aberturas realizadas na leira interna.

O fosfogesso, disposto em forma de polpa, é depositado no interior das trincheiras mediante a utilização de tubulações posicionadas com desemboques distantes das comunicações com o lago central. A configuração permite que o material disposto decante-se parcialmente no interior da trincheira, promovendo o seu enchimento, e parcialmente no interior do lago, formando praias de fosfogesso. A estrutura preenchida torna-se então estruturante para a construção de uma nova trincheira concêntrica, apoiada sobre as praias formadas – sendo promovido o alteamento do empilhamento rumo ao centro do lago.

O método *rim ditch* de alteamento de pilhas de fosfogesso proporciona a consolidação/cristalização do material em função da sua distância do centro da pilha e profundidade, sendo não pouco comum a observação de materiais situados aos pés de empilhamentos de fosfogesso com características rochosas e em zonas intermediárias com texturas similares à de solos, enquanto as zonas próximas ao lago tendem a apresentar materiais com texturas características de lama. As figuras 1, 2 e 3 retratam os referidos materiais ao longo da pilha estudada.



Figura 1. Texturas do fosfogesso. (a) rochosa, observável aos pés do empilhamento estudado. (b) solo, observável nas zonas intermediárias do empilhamento. (c) lama, observável nas proximidades do lago.

3 Metodologia

Para a realização do presente estudo, propôs-se a realização de 7 sondagens CPTu, denominadas CPTu-01 a CPTu-07, e a inspeção visual da pilha. Objetivou-se, a título de compreensão preliminar da estrutura do empilhamento estudado, a classificação dos materiais amostrados ao longo da profundidade das sondagens de modo as classes fossem capazes de reter significados físicos capazes de replicar as diferenças físicas observáveis visualmente ao longo da pilha – resultantes da consolidação e cristalização da polpa disposta.

Frente ao exposto, foi proposta a classificação do fosfogesso pelos métodos de classificação comportamental dos solos apresentados por Robertson (2016) e Schneider *et al.* (2012) modificado por Robertson (2016), os quais se propõe a diferenciar os materiais amostrados por meio de cartas de classificação. Em ambas as cartas, os materiais são analisados em função da resistência de ponta normalizada (Q_{tn}) combinada, respectivamente, com a razão de atrito (F_r) e com o diferencial normalizado de poropressão (U_2).

Paralelamente, foram tratadas estatisticamente as leituras de profundidade, resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s) e geração de poropressão (u_2). O referido banco de dados teve sua dimensionalidade reduzida para duas variáveis fictícias denominadas PC_1 e PC_2 , em função das quais foram propostos agrupamentos pelo método *k-means*. Os tratamentos estatísticos foram conduzidos para os dados padronizados por meio do *software* RStudio.

As classificações obtidas foram comparadas às características típicas do método construtivo da pilha e às observações visuais feitas.

3.1 Análise de Componentes Principais (PCA)

De acordo com Hair *et al.* (2009), a PCA é uma técnica de estatística multivariada de interdependência, proposta por Hotteling (1933), que permite a redução da dimensionalização dos dados pela proposição de variáveis secundárias denominadas componentes principais (PC), de máxima variância (Hair *et al.*, 2009). Com o advento da PCA, tornou-se possível a redimensionalização dos dados, a partir do descarte de combinações lineares de variáveis que apresentam pequenas variâncias (Anderson, 2003). As PCs resultantes são agrupamentos das variáveis originais, com pesos distintos em sua formação.

Segundo Mingotti (2013), a aplicação da técnica PCA pressupõe a intercorrelação entre os dados. É desejável a obtenção de correlações maiores que 0,30 entre as variáveis, sendo valores acima de 0,70 indicativos de altas correlações (Hair *et al.*, 2009). Outro pressuposto relevante para aplicação da técnica é demonstrado pelo teste de esfericidade de Bartlett, teste de hipótese cuja hipótese nula indica que as variáveis não estejam correlacionadas com a população. O teste resultou p-valor=0, tornado possível a aplicação de técnicas de estatística multivariada.

Durante o desenvolvimento da técnica PCA, os 261 *outliers* observados foram mantidos no banco de dados, após análise multivariada com emprego da distância de Mahalanobis – as quatro grandezas foram estudadas (profundidade, q_c , f_s e u_2) e validadas, tendo em vista sua possibilidade de ocorrência.

A definição do número de PCs a ser mantido seguiu o exposto por Hair *et al.* (2009), que versa sobre a aplicação de critérios empíricos como *scree* (Catell, 1966) e Kaiser (1970), com análise crítica dos valores.



3.2 Técnica de Agrupamento *K-means*

De acordo com Sark e Gaben (2014), a técnica de agrupamento *k-means* consiste em método iterativo de caráter multivariado, sem observância de hierarquização dos agrupamentos. Isso impõe, necessariamente, a necessidade de definição prévia do número de grupos *k* a ser utilizado para definição de *k* centroides dos grupos, atualizados iterativamente, com objetivo do agrupamento dos elementos amostrais por proximidade.

Dentre as distâncias presentes na literatura que são passíveis de utilização no método *k-means*, o presente estudo adotou aquela que Bortolossi (2002) apresentou como a mais difundida e capaz de promover bons resultados: distância euclidiana. Sua definição consiste na distância geométrica entre os elementos amostrais no espaço cartesiano.

Proposto por Thorndike (1953), o método de *elbow* foi utilizado para definição do número de grupos *k*. A partir da plotagem dos valores de *k* em função das distâncias intragrupo, o método propõe a definição do valor *k* como aquele no qual há a observância de mudança brusca na inclinação da curva, indicando que não ocorre mais redução significativa das distâncias, e, por conseguinte, aumento do potencial explicativo do aumento dos grupos.

4 Resultados

As cravações de piezocone realizadas na pilha de fosfogesso estudada, no geral, altos valores de q_c acompanhados de valores de f_s pouco expressivos frente à magnitude dos primeiros, sendo calculados, para parte expressiva dos dados analisados, valores de F_r inferiores a 1%. As leituras de u_2 processadas ao longo das cravações foram também pouco expressivas, resultando valores de B_q pouco característicos de materiais contráteis. Em contrapartida, observa-se a ocorrência de sucção na pedra porosa do amostrador CPTu, evidenciada pela geração de valores de u_2 inferiores à pressão hidrostática. Os comportamentos supracitados são ilustrados na figura 4, na qual observa-se pelo menos quatro comportamentos bem demarcados:

- Resistências moderadas associadas a gerações de poropressões próximas à pressão hidrostática;
- Resistências moderadas associadas a gerações de poropressão moderadas;
- Altas resistências associadas a gerações de poropressões próximas à pressão hidrostática;
- Altas resistências associadas a baixas gerações de poropressões inferiores à hidrostática.

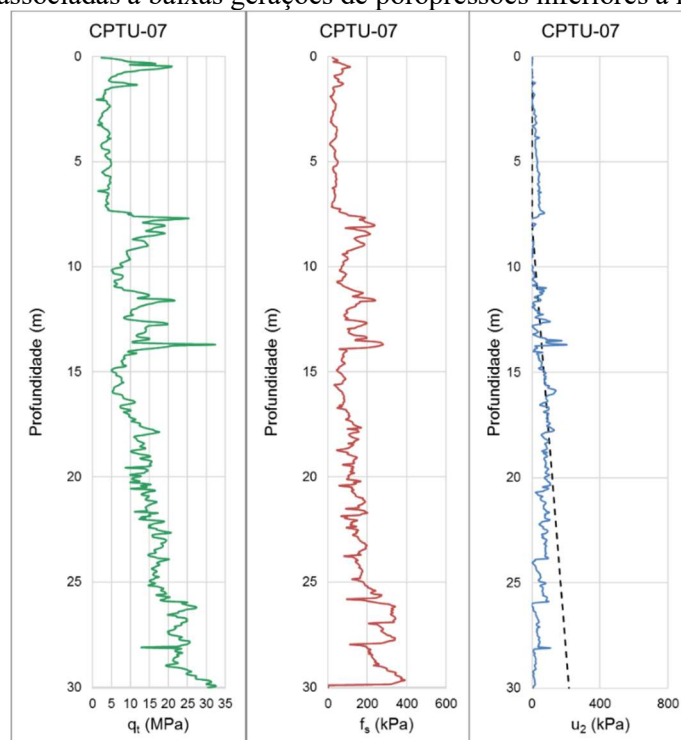


Figura 4. Resultados de cravação obtidos para o furo CPTu-07.



No contexto descrito de observação de altos valores de resistência, percebe-se, conforme ilustrado na figura 5, o resultado de classificações do fosfogesso no sistema SBTn (Robertson, 2016) predominantemente arenosas a transicionais. A tabela 1 apresenta o resumo dos resultados

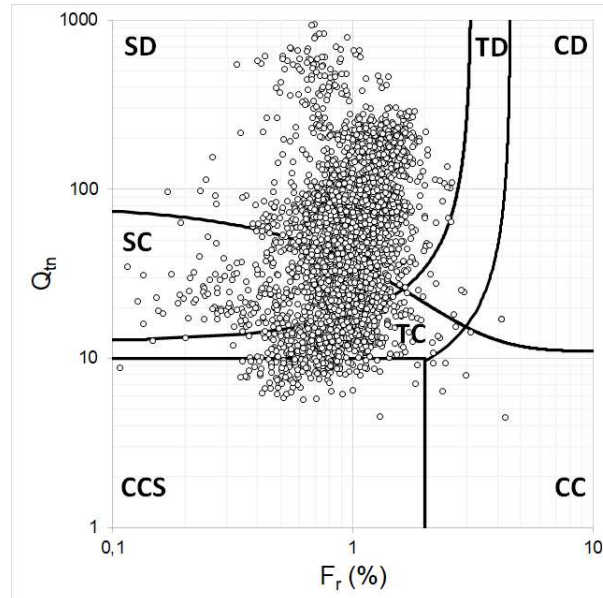


Figura 5. Resultados produzidos pelo sistema de classificação SBTn (Robertson, 2016).

Tabela 1. Resumo dos resultados produzidos pelo sistema de classificação SBTn (Robertson, 2016).

CCS	CC	CD	TC	TD	SC	SD
4,40%	0,17%	0,03%	12,53%	0,25%	26,99%	55,63%

A utilização do ábaco de Schneider *et al.* (2012) modificado por Robertson (2016) evidencia ainda menos distinções entre os materiais ensaiados. Observa-se que o emprego do ábaco resulta a classificação do fosfogesso ora como areia dilatante, ora como material transicional contrátil. A tabela 2 apresenta o resumo das classes resultantes da análise.

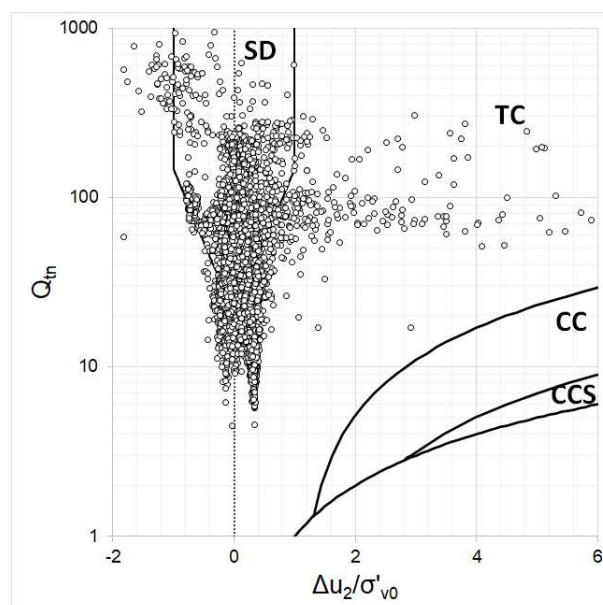


Figura 6. Resultados produzidos pelo ábaco $U_2 \times Q_{tn}$ (Robertson, 2016).



Tabela 2. Resumo dos resultados produzidos pelo ábaco $U_2 \times Q_m$ (Robertson, 2016).

CCS	CC	TC	SD
0,00%	0,00	42,97%	57,03%

Paralelamente, o emprego da técnica de análise de componentes principais sobre o banco de dados composto pelas leituras padronizadas de profundidade (m) q_c (MPa), f_s (kPa) e u_2 (kPa) das sondagens CPTu realizadas no empilhamento analisado resultaram 4 componentes principais, PC, com pesos descritos na tabela 3.

Tabela 3. Pesos obtidos para as variáveis PC_i obtidas por meio do emprego de PCA.

Variável padronizada	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4
Profundidade	0,003	0,710	0,702	0,044
q_c	0,705	0,042	-0,001	-0,708
f_s	0,703	0,053	-0,101	0,702
u_2	-0,098	0,700	-0,705	-0,056

Observa-se, da análise pesos da tabela 3, que PC_1 apresenta tendência de crescimento à medida que são observados materiais com maiores resistências, sendo baixa a sua correlação com a profundidade e com as gerações de poropressão. Neste contexto, a PC_1 apresenta caráter explicativo do comportamento dos materiais, uma vez apontado por Lunne *et al.* (1997) que o comportamento resistente dos materiais ensaiados é preponderante para a sua classificação.

A PC_2 , de maneira similar, retém caráter explicativo das condições de campo, uma vez que aumenta principalmente com maiores valores de profundidade e geração de poropressão. Assume-se assim que a PC_2 tende a refletir os níveis de confinamento ou contratibilidade dos materiais ensaiados.

Ao contrário do observado para as PCs supracitadas, não foi possível atribuir significado prático aos pesos das PC_3 e PC_4 . Ao passo que a análise do gráfico de *scree* e do emprego do método de Kaiser (1970) sugerem a manutenção de apenas duas PCs, conforme ilustrado na figura 7, decidiu-se pelo emprego das variáveis PC_1 e PC_2 no presente estudo, com o descarte das demais. As duas PCs são capazes de explicar 83,57% da variância dos dados.

Com relação ao número de grupos assumidos, decidiu-se pela definição de $k = 4$, mediante o emprego do método de *elbow* (Thorndike, 1953), ilustrado na figura 7.

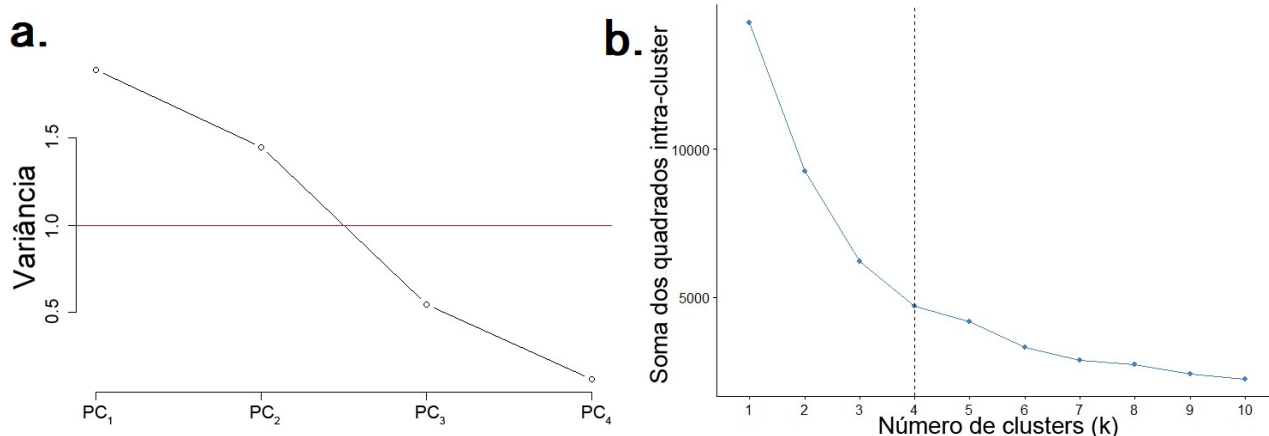


Figura 7. (a) Gráfico de *scree* e método de Kaiser (1970). (b) Método de *elbow*.

O emprego do método de agrupamento k-means sobre o banco de dados composto pelas variáveis PC_1 e PC_2 resultou os 4 grupos ilustrados na figura 8.

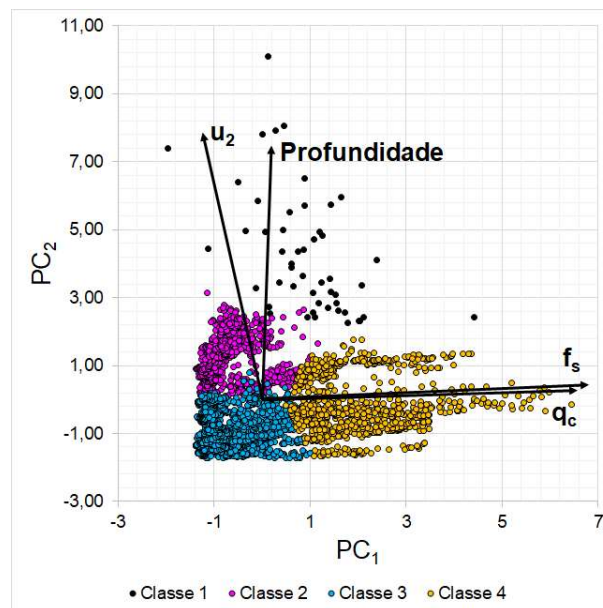


Figura 8. Agrupamentos resultantes do emprego do método *k-means*.

Com base na figura 8, infere-se que:

- A classe 1 compreende materiais com comportamentos geotécnicos dispersos e com ocorrências pouco expressivas. Atribui-se a esta classe a característica de *outlier*, com suas leituras indicando comportamentos ora aproximados da classe 2, ora da classe 4;
- A classe 2 compreende os materiais de baixa resistência e altos níveis de confinamento, com gerações de poropressão durante a cravação – a ocorrência do material nesta região pode ter associação com a presença de água;
- A classe 3 compreende materiais com baixas resistências, gerações de poropressão pouco expressivas e baixos níveis de confinamento.
- A classe 4 compreende materiais de alta resistência.

Tomando a classificação proposta para o fosfogesso ao longo da profundidade dos ensaios CPTu analisados, propõe-se a representação do empilhamento analisado apresentada na figura 10.

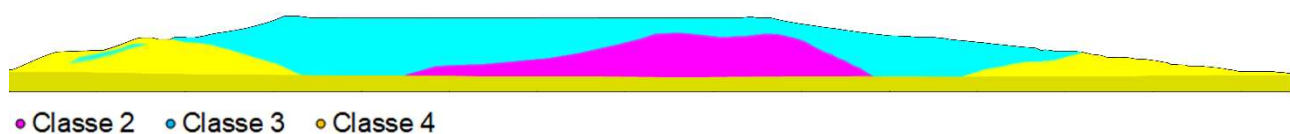


Figura 10. Representação gráfica da compartimentação do empilhamento estudado em função das classes propostas.

5 Considerações Finais

No contexto do presente estudo, a eficiência de um sistema classificatório empregado para descrever as variações espaciais das propriedades do fosfogesso estudado pode ser avaliada em função da apresentação de um número de classes capaz de remontar as observações de campo descritas, tal qual as características típicas do material associadas ao método de alteamento da estrutura. Assume-se, portanto, uma vez resultadas apenas duas classes (SD e TC) do ábaco $U_2 \times Q_{tn}$, igualmente predominantes no ábaco $F_r \times Q_{tn}$, a ineficiência do sistema SBTn em diferenciar os tipos de fosfogesso contidos no empilhamento estudado.

Em contrapartida, observa-se, da seção elaborada com base na classificação estatística proposta, a presença do fosfogesso classe 4 nas zonas perimetrais da pilha, indicando a existência de uma zona estruturante condizente com o método de alteamento da estrutura e com as observações feitas em campo. A distribuição do fosfogesso de classe 3, ao qual atribui-se características de menor consolidação, se dá em zonas superficiais,



enquanto o gesso de classe 2 se apresenta no núcleo da pilha, abaixo do lago. O fosfogesso de classe 1, por sua vez, apresenta ocorrências dispersas, não indicando a existência de zonas de classe 1 no interior da pilha.

Frete ao exposto, entende-se que o emprego das técnicas de estatística multivariada de PCA e agrupamento por *k-means* aplicadas sobre as variáveis profundidade, q_c , f_s e u_2 normalizadas apresenta grande potencial explicativo da compartimentação de empilhamentos de fosfogesso di-hidratado por via úmida.

Entende-se, entretanto, que o emprego desta técnica deva ser validado por meio de comparação das classes obtidas com amostragens diretas e indiretas.

AGRADECIMENTOS

À Walm Engenharia BH pelo fornecimento do banco de dados empregado para a realização do presente estudo e pelo apoio fornecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amin, A. B (1966). Calcium sulfate crystallization in phosphoric acid. Tese de Doutorado. Iowa State University of Science and Technology, Iowa, IA, USA.

Anderson, T. W. (2003). An Introduction to Multivariate Statistical Analysis. 3a ed. John Wiley & Sons, Stanford, CA.

Bortolossi, H. J. (2002). Cálculo Diferencial a Várias Variáveis. Edições Loyola.

Cattell, R. B. (1966). The Scree Test For The Number Of Factors. Multivariate Behavioral Research, 1(2), 245-276.

Fuleihan, N. F. (2012). Phosphogypsum Disposal - The Pros & Cons of Wet Versus Dry Stacking. Procedia Engineering, 46, 195-205.

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2009). Análise Multivariada de Dados. Bookman.

Hottelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. Journal of Educational Psychology, 24(7), 498-520.

Kaiser, H. F. (1970). A second generation little Jiffy. Psychometrika, 35(4), 401-415.

Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. (1997). Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic/Routledge Publishing.

Mingoti, S. A. (2013). Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Editora UFMG.

Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. Canadian Geotechnical Journal, 53(12), 1910-1927.

Sark, S., & Gaben, M. (2014). Large Scale and Big Data: Processing and Management. CRC Press.

Schneider, J.A., Hotstream, J.N., Mayne, P.W., & Randolph, M.F. (2012). Comparing CPTU Q-F and Q- $\Delta u_2/\sigma_{vo}$ soil classification charts. Géotechnique Letters, 2(4), 209-215.

Thorndike R L. (1953). Who Belongs in a Family?. Psychometrika, 18, 267-76.