

## ANÁLISE MULTIVARIADA DE ENSAIOS DE CAMPO EM BARRAGEM DE REJEITOS

Guilherme Alex Sanders Cardoso Vasconcelos De Freitas<sup>1</sup>

**Resumo** – A atividade humana está intimamente ligada a utilização de recursos naturais e nesse contexto são construídas as barragens: estruturas com o objetivo de armazenar água, rejeitos ou mesmo para a geração de energia, neste último caso, através do aproveitamento de variações no gradiente hidráulico. Dadas as recentes tragédias envolvendo grandes estruturas de armazenamento de rejeitos de mineração, o estudo dessas têm se tornado cada vez mais relevante e, a matéria, corresponde a um dos mais citados assuntos contemporâneos no âmbito da geotecnia. Este estudo tem como objetivo propor uma análise dos maciços das barragens, face a previsão do comportamento dos tipos de solos que compõem a estrutura do maciço, utilizando para tanto, os dados obtidos através de ensaios de campo. É proposta, nomeadamente, a verificação dos dados advindos de ensaios de penetração padronizados (SPT) e ensaios de resistência à penetração de cone com medida de poropressão (CPTu), que correspondem a resultados de investigações geológico-geotécnicas conduzidas no maciço terroso de rejeitos de uma barragem de rejeitos de mineração de ferro, alteada à montante, e localizada na região do Quadrilátero Ferrífero (QF) em Minas Gerais, Brasil. De posse dos dados do levantamento de campo foi elaborado um banco de dados multivariado e, a partir de testes de correlação das informações contidas no banco de dados, e com o advento de técnicas de estatística multivariada, foram verificadas a dependência, linhas de tendência e a relevância dos dados obtidos nos ensaios de campo, ante a definição dos parâmetros de resistência dos materiais que compõem o maciço da barragem, relativamente à definição de quais os fatores influenciam nos valores de resistência, sendo estes fatores relevantes no estudo do comportamento geomecânico dos materiais que compõem tais estruturas. O resultado do estudo demonstra a relação de dependência de parâmetros de resistência, promovendo o agrupamento das variáveis em conjuntos com comportamentos semelhantes comparativamente ao bando de dados.

**Abstract** - Human activity is closely linked to the use of natural resources and in this context dams are built: structures with the objective of storing water, tailings or even for the generation of energy, in the latter case, through the use of variations in the hydraulic gradient. Given the recent tragedies involving large storage structures for mining tailings, the study of these has become increasingly relevant and the matter corresponds to one of the most cited contemporary issues in the field of geotechnics. This study aims to propose a methodology for understanding the behavior of dam masses, in view of the prediction of the behavior of the types of soils that make up the structure of the dam, using data obtained through field tests. For this analysis, it was proposed, the verification of data from “Standard Penetration Tests” (SPT) and “Cone Penetration Tests” with pore pressure measurement (CPTu), which correspond to the results of geological-geotechnical investigations carried out embankment of tailings from an iron mining tailings dam, raised upstream and located in the Quadrilátero Ferrífero (QF) region of Minas Gerais, Brazil. With the data from the field survey, a multivariate database was created and, from correlation tests of the information contained in the database, and with the advent of multivariate statistical techniques, the dependence and relevance of the data were verified obtained in the field tests, in view of the definition of the resistance parameters of the materials that make up the dam, regarding the definition of which factors influence the resistance values, being relevant factors in the study of the geomechanical behavior of the materials that make up such structures.

**PALAVRAS CHAVE:** resistência dos solos; investigações geotécnicas; mecânica dos solos; minério de ferro; quadrilátero ferrífero; componentes principais.

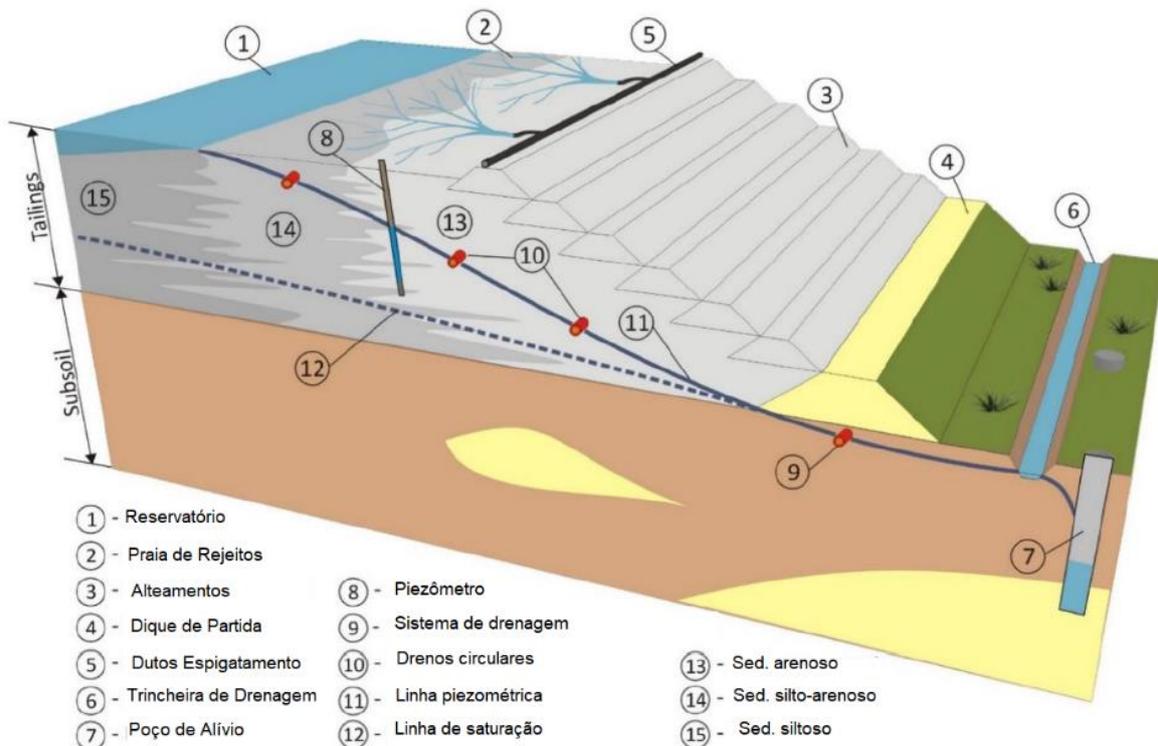
<sup>1</sup> Geól., Esp, Geocontrole: Nova Lima - MG, (31) 99937.5718, [guilhermefreitas@geocontrole.com](mailto:guilhermefreitas@geocontrole.com)

# 1. INTRODUÇÃO

A investigação geotécnica de obras de engenharia constitui uma das ferramentas empregadas para a identificação, detecção e caracterização de materiais e eventuais comportamentos que constituem os materiais geológicos naturais e antrópicos em superfície e em profundidade.

Ela permite pôr em prática um processo de aquisição, registro e processamento sistemático dos dados obtidos, a partir de métodos investigativos de diferentes propósitos e aplicados em diferentes seções e zonas dos terrenos investigados. Nos programas de investigação geotécnica são incluídas soluções de forma a facilitar a detecção de parâmetros físicos, de parâmetros de estado e de comportamentos de interesse. Assim, no tocante as barragens de rejeito de mineração (Figura 1), em condições adequadas, um programa de investigações tende a garantir acurácia, bem como fornecer parâmetros relacionados à fiabilidade das leituras, e à compatibilidade em relação às metodologias construtivas e às premissas de projeto. (FONSECA, 2003).

As primeiras aplicações de investigações em obras geotécnicas de grande porte ocorreram entre 1930 e 1940. O célebre estudo de mecânica dos solos de Terzaghi intitulado “*Theoretical Soil Mechanics*” consta publicado em 1943 e é responsável por ditar o ritmo precursor do estudo do comportamento mecânico dos solos da era moderna. Durante os primeiros 50 anos de atividades das investigações geotécnicas, constatou-se um desenvolvimento acelerado. Nos primeiros anos, predominaram técnicas simples, manuais e mecânicas. Com o avanço tecnológico das décadas seguintes, surgiram meios e métodos mais sofisticados, como o uso transdutores pneumáticos e elétricos para a aferição de parâmetros elásticos dos materiais *in situ*, através de ensaios pressiométricos (Failmezger, 2012) e dilatométricos (de Faria Cruz, 2010). Ao final do século XX, registraram-se o aparecimento de sistemas automatizados de ensaios SPT utilizando aparatos hidráulicos, assim como, a partir da metade do século até os tempos atuais, a constante modernização dos ensaios CPTu, com o incremento de transdutores de ondas de corte (SCPTu) e transdutores de resistividade dos solos (RCPTu), alguns dos quais, utilizam mecanismos remotos para a condução desses ensaios em meios *offshore* de águas profundas (20 ton seafloor CPT system “DCPT”, Gregg, 2010).



**Figura 1 – Barragem de rejeitos de mineração e seus principais elementos vistos numa seção esquemática (adaptado de Tschuschke et al., 2020).**

O presente estudo tem como objetivo desenvolver uma metodologia para o entendimento do comportamento de uma barragem de rejeitos de mineração (Figura 2) face as características dos tipos de solos, através da previsão de correlações dos parâmetros de resistência obtidos com ensaios de campo, via investigações geotécnicas. Para tal análise será proposto a verificação dos dados das investigações realizadas, através de técnicas de estatística básica e multivariada. Após a aplicação das técnicas multivariadas a verificação da relevância e eficácia do estudo será realizada com os dados de investigações geotécnicas, sejam eles NSPT, no caso da sondagem direta, e ainda a resistência de ponta, atrito lateral e poropressão, no caso da sondagem indireta CPTu.



Figura 2 – Vista aérea da estrutura avaliada. Os pontos verdes indicam os ensaios SPT e os triângulos vermelhos os CPTu. (Google, 2021).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS – Barragens, Sondagens e Estatística Multivariada

### 2.1. Método construtivo de alteamento

Uma característica peculiar que difere as barragens de rejeito de mineração dos demais tipos de barragens corresponde ao fato de que as barragens de rejeito não são construídas, na maioria dos casos, em uma única etapa e não correspondem a uma estrutura definitiva posteriormente a sua instalação, como ocorre por exemplo, com uma barragem para geração de energia hidrelétrica.

Pelo contrário, nas barragens de rejeito de mineração, após concluída a etapa de construção do maciço da barragem principal (dique de partida), ou a sequência de bancadas, bermas e taludes do projeto inicial, é comum num determinado espaço temporal posterior, a estrutura ser aumentada, ao que se faz, através de determinados métodos, designados métodos de alteamento, conforme demonstrado na Figura 3. O estudo em apreço abordará uma barragem construída à montante.

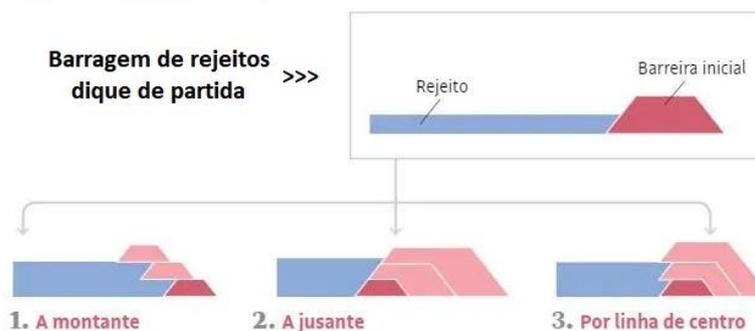


Figura 3 – Métodos de alteamento de barragens de rejeito de mineração. (adaptado de Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Sabeamento, aesbe, 2019).

## 2.2. Ensaio SPT (*standard penetration method*)

Standard Penetration Test (SPT) é, reconhecidamente, a mais popular, rotineira e econômica ferramenta de investigação geotécnica em praticamente todo o mundo. O método serve como indicativo da densidade de solos granulares e é aplicado também na identificação da consistência de solos coesivos, e mesmo de rochas brandas. Métodos rotineiros de projeto de fundações diretas e profundas usam sistematicamente os resultados de SPT, especialmente no Brasil (Schnaid e Odebrecht, 2012), assim como, na caracterização de maciços antrópicos de solos, como barragens de terra, barragens de rejeito, aterros e empilhamentos de solos e rejeitos.

O ensaio SPT constitui-se em uma medida de resistência dinâmica conjugada a um método de sondagem direta. No âmbito do presente estudo os ensaios SPT considerados foram executados a partir do método de sondagem direta mista (Figura 4) a partir de sonda geotécnica hidráulica automatizada (Boart Longyear, Modelo DB 525 – LX6).



Figura 4 – Equipamento de sondagem geotécnica Boart Longyear DB 525-LX (Geocontrole, 2019).

As Amostras representativas do solo são coletadas a cada metro de profundidade por meio de amostrador padrão com diâmetro externo de 50 mm. O procedimento de ensaio consiste na cravação do amostrador no fundo de uma escavação (revestida ou não), usando-se a queda de peso de 65 kg de uma altura de 750 mm. No Brasil o ensaio é normatizado pela diretriz técnica ABNT NBR 6484:2020. O valor NSPT é o número de golpes necessários para fazer o amostrador penetrar 300 mm, pós uma cravação inicial de 150 mm.

Segundo Fernandes (2021) o resultado do ensaio SPT ( $N_1$ )<sub>60</sub>, que significa o valor do resultado NSPT corrigido para uma eficiência de 60% de energia transmitida no golpe do martelo no ensaio, possui uma correlação com o ângulo de atrito interno da resistência ao cisalhamento do material (valor de pico) conforme proposto por Décaoutr (1989) e Hatanaka e Uchida (1996), conforme defino dela expressão da Equação 1.

$$\phi' = [15,4(N_1)_{60}]^{0,5} + 20^\circ \quad (\text{Eq. 1})$$

## 2.3. Ensaio CPTu (*cone penetrometer test*)

Os ensaios de cone e piezocone, conhecidos pelas siglas CPT (cone penetration test) e CPTu (piezocone penetration test), respectivamente, caracterizam-se internacionalmente como uma das mais importantes ferramentas de prospecção geotécnica (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Pela leitura do trabalho de Fernandes (2017) de posse dos resultados do ensaio CPTu é possível estabelecer uma série de correlações relativamente a parâmetros geotécnicos, das quais, é possível elencar a seguinte em relação ao ângulo de atrito efetivo do material ( $\phi'$ ):

$$\phi' = \arctg[0,1 + 0,38.\log(q_t/\sigma'_{v0})] \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde,  $q_t$  é a resistência de ponta do cone e  $\sigma_{vo}$  é a tensão vertical inicial.

## **2.4. Técnicas estatísticas multivariadas**

Segundo Santos (2019), entre as vantagens da utilização de sistemas quantitativos de análise multivariada, a principal é a redução da subjetividade dos resultados obtidos. Isso aumenta a confiança na tomada de decisão dos engenheiros geotécnicos. Técnicas estatísticas multivariadas são ferramentas interessantes para obtenção de sistemas quantitativos de níveis de susceptibilidade e consequência, além de análise de risco. As técnicas multivariadas de avaliação estatística são ainda ferramentas importantes no encontro de correlações, linhas de tendência e traços de similaridade entre as variáveis abordadas.

### **2.4.1. Contextualização inicial da estatística multivariada**

A ferramenta de estatística multivariada corresponde a um conjunto de métodos estatísticos utilizados em ocasiões nas quais as variáveis são mensuradas concomitantemente em cada elemento amostral (Santos, 2019 *apud* Mingoti, 2013). Em geral, as variáveis são correlacionadas entre si e quanto maior o número de variáveis, mais complexa se torna a análise por métodos comuns de estatística trivial. Como o objetivo deste estudo é abordar a coerência entre os parâmetros de resistência obtidos por ensaios de campo, os quais, são correlacionáveis entre si por expressões consagradas da literatura, será aplicado no presente trabalho a técnica de componentes principais. Ainda conforme Santos, 2019 (*apud* Mingoti, 2013), os métodos de estatística multivariada são bem aplicados quando: se busca simplificar e facilitar a interpretação do fenômeno que está sendo estudado através da construção de índices ou variáveis alternativas que sintetizem a informação original dos dados; se pretende construir grupos de elementos amostrais que apresentem semelhança entre si, possibilitando a segmentação do conjunto original de dados e, investigar as relações de interdependência entre as variáveis ante as respostas associadas ao fenômeno, dentre outros aspectos.

### **2.4.2. Montagem do banco de dados**

Santos (2019), sugere que anteriormente a aplicação de uma das técnicas multivariadas, faz-se necessário a montagem do banco de dados e verificação deles de forma investigativa. Para tanto, deve ser conhecido a média e mediana, como medida de posição dos dados, valer-se de gráficos *boxplot* das variáveis com o objetivo de se observar a variabilidade dos dados, assim como, confeccionar gráficos de dispersão das variáveis em pares conjugados para a observação de correlação entre os dados. O conhecimento entre a covariância e correlação entre as variáveis do problema é uma etapa crucial na montagem do banco de dados, conforme Santos (2019), haja vista que, o emprego da técnica multivariada só faz sentido em banco de dados que apresentem correlação entre as variáveis. Conforme ainda citado por Santos (2019), alguns testes, como o teste de Bartlett deve ser aplicado anteriormente a qualquer aplicação de técnica de estatística multivariada, com o objetivo de se certificar a significativa correlação entre as variáveis do problema.

O banco de dados foi composto por 93 pontos amostrais referentes a ensaios de campo (SPT ou CPTu) executados em diferentes pontos de sondagem distintos na estrutura alvo de estudo (barragem de rejeitos de mineração).

### **2.4.3. Seleção das Variáveis**

Neste estudo foram consideradas variáveis quantitativas e qualitativas. Em termos de variável qualitativa o membro é representado pelo litotipo (LITO) referente ao tipo de solo que foi investigado. Os demais membros quantitativos utilizados são enumerados na Tabela 1.

### **2.4.4. Metodologia de Análise de Componentes Principais**

A análise de componentes principais foi conduzida no banco de dados, objetivando quantificar os dados originais e, para tanto, valer-se dos cálculos dos escores dos indivíduos. Foi ainda utilizado

os gráficos *boxplots* das variáveis originais para a verificação da variabilidade das variâncias dos parâmetros utilizados e, a partir do resultado observado, aplicada a matriz de correlações.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 contém as 03 primeiras linhas, num total de 93, das variáveis selecionadas e os dados amostrais.

**Tabela 1 – Amostra das 03 primeiras linhas do Bando de dados das variáveis analisadas.**

ID	LITO	COTA(m)	NSPT	qc(MPa)	fs(kPa)	u(MPa)	f.Atrito.SPT(°)	f.Atrito.CPTu(°)
1	1	1	6	31.355	0.0157	-0.0007	27	45
2	1	2	10	12.715	0.0018	-0.0003	30	37
3	1	3	11	27.784	0.0119	-0.0002	31	39

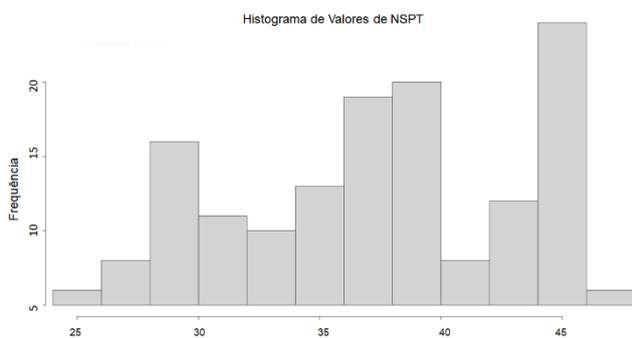
A construção do banco de dados resultou num conjunto de 08 variáveis e 93 dados amostrais, onde para cada amostra as informações das variáveis estão plotadas nas colunas 8 e 9 da Tabela 1. A codificação da variável “LITO” seguiu o seguinte critério, conforme Tabela 2 abaixo.

**Tabela 2 - Codificação da variável "LITO".**

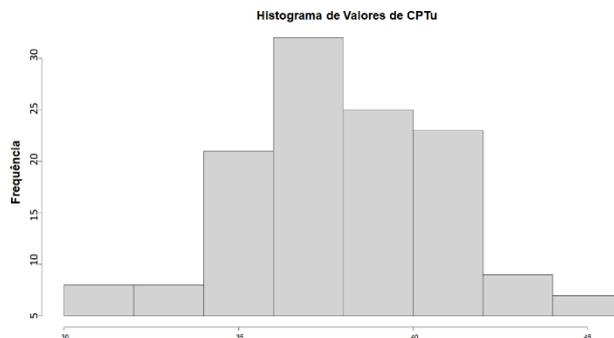
COD.	LITO
1	REJEITO
2	ATERRO ARENO SILTOSO
3	ATERRO ARENOSO
4	SAPROLITO DE FILITO
5	ATERRO ARGILO ARENOSO
6	SAPROLITO DE QUARTZITO

#### 3.1. Estatística Inicial

As variáveis de interesse geotécnico do banco de dados correspondem aos parâmetros de resistência das colunas 8 e 9, quais sejam, respectivamente, o ângulo de atrito do material obtido através do SPT (NSPT) e o ângulo de atrito obtido através do CPTu (qc). Ambos os dados das variáveis de interesse foram analisados quanto a sua distribuição e frequência, através de histogramas, conforme as Figura 5 e Figura 5 – Histograma de valores de NSPT Figura 6 – Histograma de Valores de  $q_c$  - CPTu. É possível avaliar que a variável CPTu apresenta uma distribuição normal, diferentemente da distribuição irregular do NSPT.



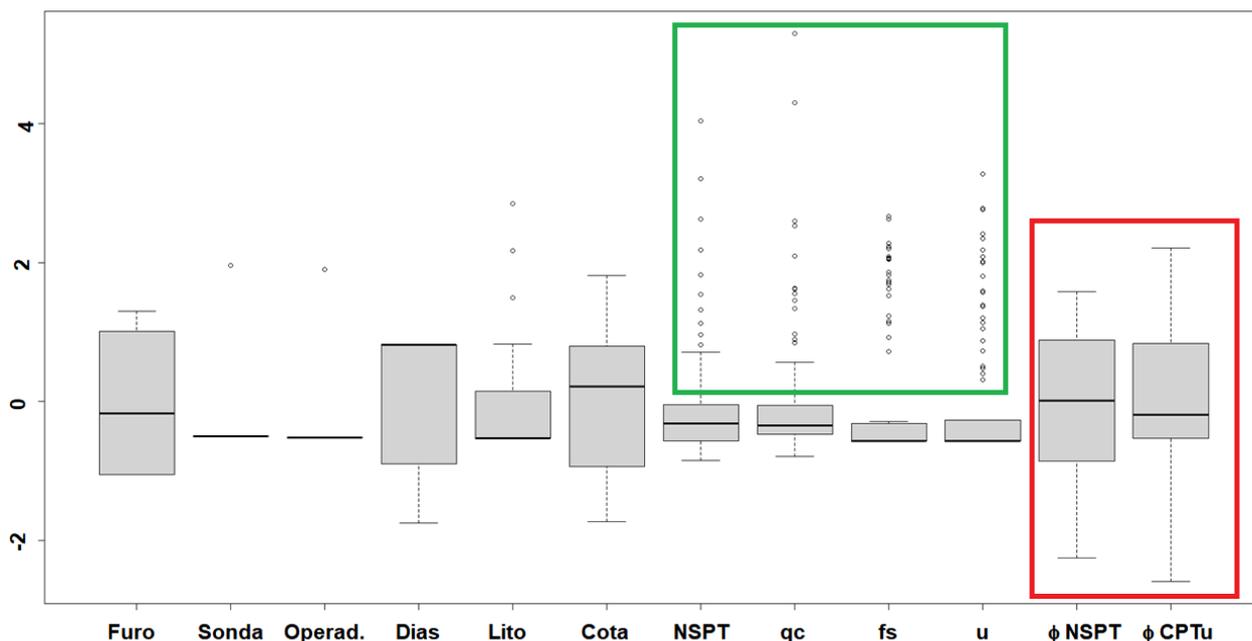
**Figura 5 – Histograma de valores de NSPT**



**Figura 6 – Histograma de Valores de  $q_c$  - CPTu**

A distribuição do conjunto completo dos dados amostrais foi analisada através de gráficos *boxplot*, original e normalizados, conforme as Figura 7. A construção do gráfico *boxplot* demonstrou a existência de dados destoantes em relação a avaliação global do banco de dados, sendo identificados como termos *outliers*. A verificação da dispersão dos dados foi conduzida com o uso

do gráfico *scatterplot*. Os elementos outliers ocorrem principalmente nas variáveis dos parâmetros geotécnicos, NSPT,  $q_s$ ,  $f_s$  e  $u$ .



**Figura 7 – Gráfico *boxplot* normalizado, demonstrando a variabilidade de valores das variáveis, com destaque para o retângulo vermelho mostrando a evidente correlação entre os valores de ângulo de atrito ( $\phi$ ) obtido pelos ensaios SPT e CPTu, assim como, os termos *outliers* indicados no retângulo verde.**

### 3.2. Teste de Bartlett

Para a certificação do bando de dados para a aplicação da técnica multivariada foi conduzido o teste de Bartlett, cujo resultado foi diferente de uma matriz identidade, e “p.value” menor que 0,05 o que indica a coerência do banco para a aplicação do método multivariado.

```
$p.value
[1] 1.670169e-92
```

O teste de esfericidade de Bartlett, avalia em que medida a matriz de (co)variância é similar a uma matriz-identidade (os elementos da diagonal principal têm valor igual a um, e os demais elementos da matriz são aproximadamente zero, ou seja, não apresentam correlações entre si; (Field, 2005 *apud* Damásio, 2012). Segundo Hair e colaboradores (2005 *apud* Damásio, 2012), esse teste avalia, também, a significância geral de todas as correlações em uma matriz de dados. Valores do teste de esfericidade de Bartlett com níveis de significância  $p < 0,05$  indicam que a matriz é fatorável (Tabachnick & Fidell, 2007), rejeitando a hipótese nula de que a matriz de dados é similar a uma matriz-identidade, o que se mostrou válido à luz do banco de dados analisado, conforme dito anteriormente.

### 3.3. Análise das Componentes Principais

A análise das componentes principais (CP) foi conduzida com o artifício do *software* R e da *interface* RStudio. A individualização das componentes principais extraída do R consta indicado abaixo, onde foram construídas 08 componentes principais, conforme indicado abaixo.

	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6	Comp.7	Comp.8
Standard deviation	2.0347299	1.1943019	1.0039064	0.80906260	0.58031324	0.47081432	0.38732913	0.250306618
Proportion of Variance	0.5175157	0.1782946	0.1259785	0.08182279	0.04209543	0.02770827	0.01875298	0.007831675
Cumulative Proportion	0.5175157	0.6958104	0.8217889	0.90361165	0.94570708	0.97341534	0.99216832	1.000000000

Nesta avaliação se percebe que a CP 1 representa 51% (0.51) aproximadamente da variância do banco de dados (retângulo vermelho) e conjuntamente com a CP 2 e CP 3 juntas representam 82% (0.69 e 0.82, respectivamente) da variabilidade acumulada do banco de dados (retângulo verde), o que se entende, que a interpretação de 82% de toda variabilidade do banco de dados, ou seja, 08 variáveis e 93 amostras, é obtida com boa segurança pela observação de apenas 03 componentes principais.

As cargas das componentes principais em relação a representatividade da variância por variável foram extraídas, conforme adiante. A variável  $q_c$  é a única inversamente proporcional em relação as demais na variabilidade da CP 1 (retângulo vermelho), conforme pode-se perceber, no valor negativo (-0.169) comparativamente as demais cargas para as outras variáveis (todas positivas) na CP 1, este valor representa aproximadamente 17% de toda a variabilidade da CP 1, sendo, importante ressaltar que, conforme as cargas, a CP 1 não apresenta é relevante na determinação do valor do ângulo de atrito através do ensaio CPTu.

Loadings:

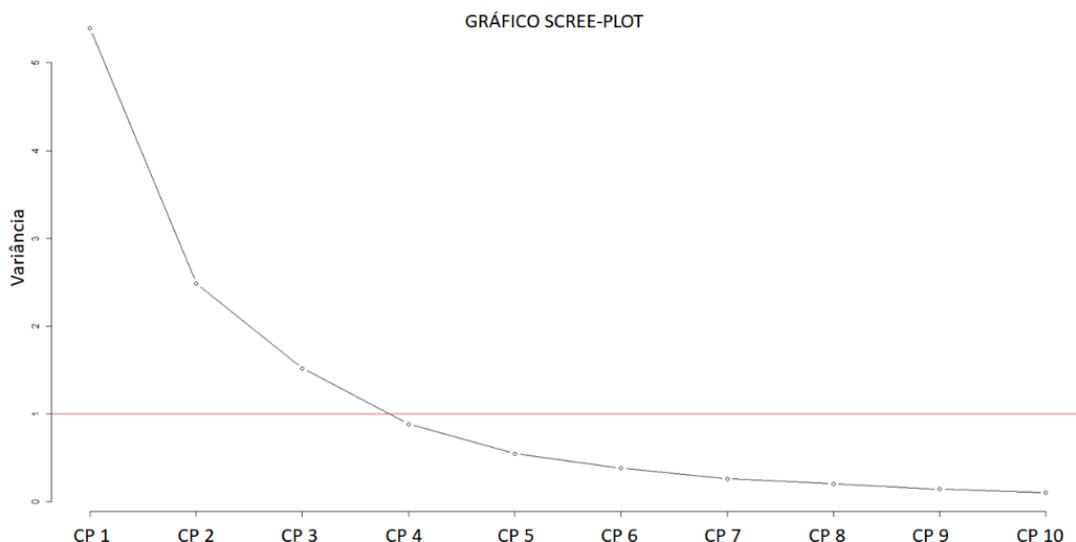
	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6	Comp.7	Comp.8
LITO	0.407	0.209	0.277		0.478	0.599	0.353	
COTA	0.424	-0.225	-0.117		0.520	-0.177	-0.667	
NSPT	0.311		-0.679	-0.240	-0.365	0.474	-0.128	0.102
$q_c$	-0.169	0.554	-0.268	0.748				-0.156
fs	0.425	0.195	0.331		-0.354	-0.213	-0.109	0.696
u	0.433	0.163	0.288		-0.434		-0.103	-0.704
f.Atrito.SPT	0.402	-0.136	-0.400	0.232		-0.477	0.606	
f.Atrito.CPTu		0.718	-0.155	-0.555	0.212	-0.319		

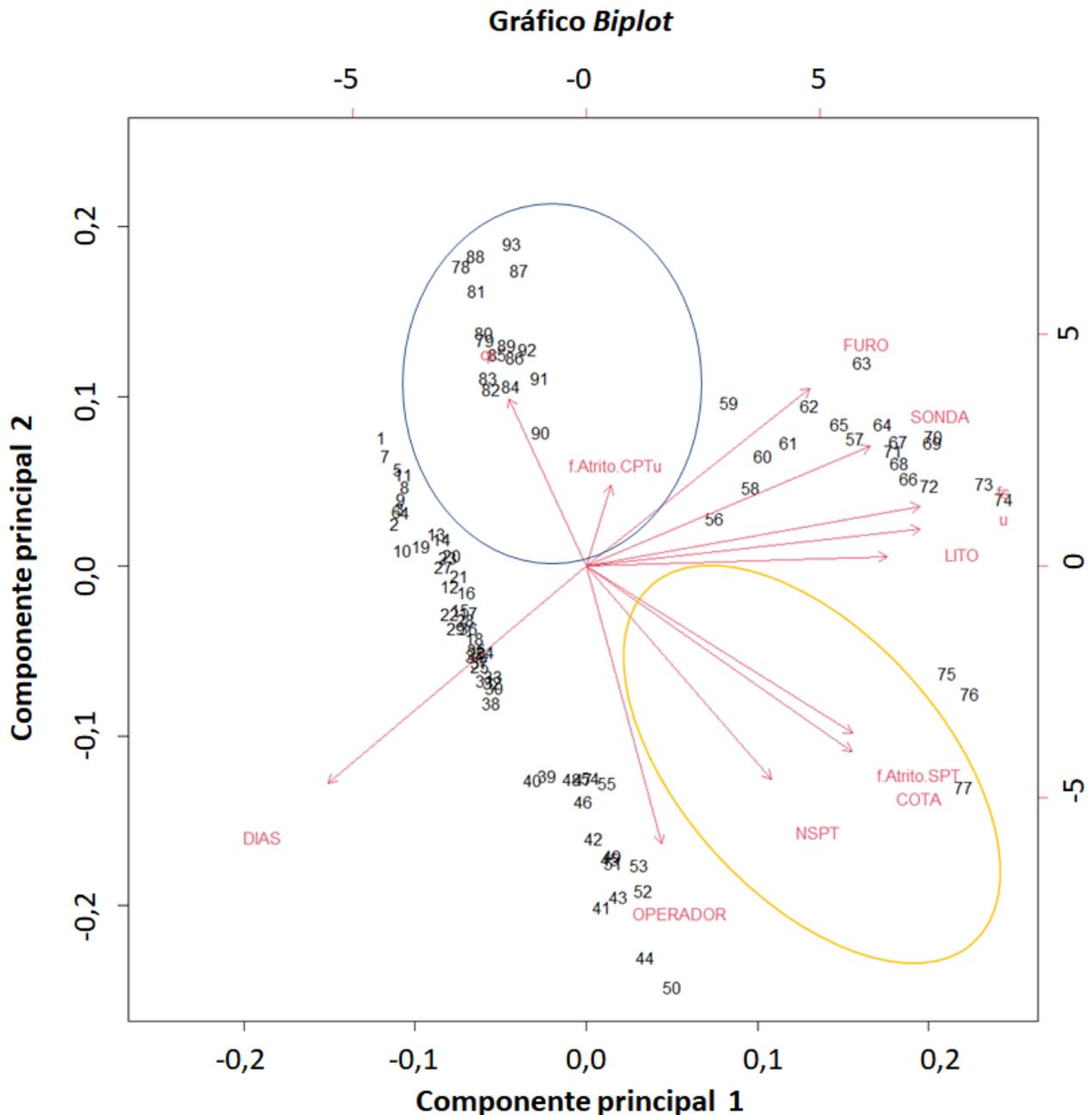
	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6	Comp.7	Comp.8
SS loadings	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Proportion Var	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
cumulative Var	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1.000

A escolha da combinação do conjunto de componentes principais foi feita através do método Kaiser e comparado com o gráfico *scree-plot*. A opção por Kaiser indicou a escolha de 03 (três) componentes principais para a representação relevante dos dados amostrais, o que foi marcado no gráfico *scree-plot* da Figura 8.

O *scree-plot* é uma ferramenta para auxiliar na escolha de quantas componentes baseada no gráfico de autovalores. Comumente, a diferença entre os primeiros autovalores é grande e diminui para os últimos. A sugestão é fazer o corte quando a variação dos autovalores passa a ser pequena (PEREIRA, 2015 *apud* SANTOS, 2018). A linha vermelha horizontal no gráfico da Figura 8, portanto, indica o ponto em que a variação dos valores das variáveis é considerada diminuta, sendo então, considerados acima da linha vermelha o número de CP's que irão representar melhor o problema. As tendências e correlações das componentes principais foi avaliada com o uso do gráfico biplot das componentes 1 e 2 (Figura 12).



**Figura 8 - Gráfico *scree-plot*. A Linha vermelha horizontal demonstra o ponto onde a variação dos valores das variáveis passa a ser pequena, definindo acima desse ponto o número de CP's a serem utilizadas.**



**Figura 9** – Gráfico *biplot*, onde é possível observar linhas de tendência das grandezas avaliadas em relação as componentes principais CP 1 e CP2, assim como, promover o agrupamento dessas grandezas em conjuntos que possuam comportamentos similares.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o estudo de dados de campo obtidos a partir de ensaios geotécnicos *in situ*, no âmbito de uma barragem de rejeito de mineração. Para o estudo proposto foram utilizados dados de NSPT e CPTu. Os dados foram avaliados através de técnicas de estatística básica, inicialmente, para se verificar as formas de distribuição e dispersão dos dados amostras. Através da aplicação da técnica de estatística multivariada de componentes principais o banco de dados foi avaliado, no que tange, aos parâmetros de resistência de interesse para o estudo, quais sejam, o valor de ângulo de atrito dos materiais obtidos através dos ensaios de campo propostos. A avaliação dos resultados obtidos pela técnica multivariada escolhida demonstrou correlações esperadas e outras diferentes da expectativa, conforme concluído adiante:

- O valor do ângulo de atrito do material é majorado com o incremento do valor da resistência de ponta do material no ensaio CPTu conforme elipse na cor azul da Figura 9; porém a variação da cota não possui uma relação direta com o incremento no valor de  $q_c$ , o que se esperaria ser diferente, ou seja, que o resultado da resistência de ponta do cone fosse acrescido com o incremento da profundidade do ensaio de forma direta;
- O valor do ângulo de atrito do material é majorado com o incremento do valor do NSPT e com o incremento da cota do ensaio, ou seja, com o aumento da profundidade; essa relação era esperada, conforme mostra a elipse na cor laranja da Figura 9;
- A correlação entre os valores do ângulo de atrito obtido pelo ensaio SPT e pelo CPTu não possui uma correlação linear, apesar de também não serem inversamente proporcionais, o que deve ser ainda mais bem avaliado como objeto de estudos complementares;

O foco da aplicação da técnica de componentes principais na estatística multivariada é identificar linhas de tendência e promover o agrupamento de variáveis que dependem e relacionam-se entre si. Neste sentido, foi possível estabelecer uma relação direta de dependência de valores de NSPT com o incremento da cota do ensaio, e conseqüentemente incremento no valor do ângulo de atrito do material obtido por este método, conforme demonstrado no gráfico biplot. Essa é uma informação “visual” da observação da Figura 9 e que corrobora com a expectativa da prática do ensaio aplicada em campo. Já a tendência de variação do valor do ângulo de atrito para o mesmo material, na mesma cota de ensaio, obtido com o ensaio CPTu não possui a mesma dependência direta com o incremento da cota, conforme visualmente perceptível na Figura 9.

A não dependência do valor da resistência de ponta do ensaio CPTu ( $q_c$ ) com o incremento da profundidade é uma constatação que não era absolutamente esperada como resultado deste estudo. Isso posto, esse fenômeno deverá ser abordado com mais detalhe em estudos futuros.

## REFERÊNCIAS

- AESBE, Associação Brasileira de Empresas Estaduais de Saneamento, aesbe. (2019). Website; <https://aesbe.org.br/novo/1-a-cada-3-barragens-da-vale-pode-causar-tanto-estrago-quanto-a-de-brumadinho/> (acesso em 18/04/2022).
- DAMÁSIO, B. F. Uso da Análise Fatorial Exploratória em Psicologia (2012). Periódicos eletrônicos em Psicologia. Website: [http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1677-04712012000200007#nota1a](http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-04712012000200007#nota1a) (acesso feito em 18/04/2022).
- FAILMEZGER, Roger, Soil Pressuremeter Testing. In-Situ Soil Testing, L.C. (2012) de Faria Cruz, N. B. Modelling Geomechanics of Residual Soils with DMT Tests. Tese de Doutorado, Instituto Politécnico da Guarda, Lisboa (2010).
- FERNÁNDEZ, B. P. Caracterização geológico-geotécnica de solos da Asa Sul a partir de métodos de aquisição sísmica, Brasília, Distrito Federal-Brasil. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas). Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Brasília, 2017.
- FONSECA, A. Da R. (2003). *Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – Estudo de Caso das Barragens da UHE São Simião*, Ouro Preto, MG
- GREGG DRILLING, LCC, Offshore Geotechnical Site Investigation and Remotely Operated Systems (2010).
- MATURANO Rafael, Herbert Miguel Angel. (2012) Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito. Dissertação de Mestrado. Universidade Católica do Rio de Janeiro, 103 p.
- R Seek – website; <https://rseek.org/> (acesso em 25/11/2021).
- SANTOS, Tatiana Barreto dos, Análise De Risco Geotécnico Em Taludes Rochosos de Mina com Uso de Técnicas Estatísticas Multivariadas e de Aprendizado de Máquina – Tese de Doutorado, 2019. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.
- SCHNAID, Fernando Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações / Fernando Schnaid, Edgar Odebrecht. -- 2. ed. São Paulo : Oficina de Textos, 2012.
- TERZAGHI, K., Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York (1943).
- TSCHUSCHKE, W.; Gogolik, S.; Wróżyńska, M.; Kroll, M.; Stefanek, P. The Application of the Seismic Cone Penetration Test (SCPTU) in Tailings Water Conditions Monitoring. Water 2020, 12, 737. <https://doi.org/10.3390/w12030737>