

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/520

## Classificação de materiais em ensaios piezocone utilizando ensaios de dissipação e índice de comportamento

Christine Alfradique

Engenheira Geotécnica, Tetra Tech South America, Rio de Janeiro, Brasil, christine.alfradique@tetrattech.com

Bernardo Silva

Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, bernardo.silva@tetrattech.com

Pablo Gonçalves

Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, pablo.goncalves@tetrattech.com

Jonathas Balbino

Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, jonathas.balbino@tetrattech.com

Marcela Oliveira

Engenheira Geotécnica, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, marcela.oliveira@tetrattech.com

**RESUMO:** Em projetos geotécnicos, a caracterização geomecânica da região de interferência é essencial, e frequentemente requer investigações extensas dos litotipos que a compõem. O ensaio de piezocone (CPTu), amplamente utilizado para obter dados de campo das camadas estratigráficas de solo, fornece valores de resistência de ponta, atrito lateral e poropressão em profundidade, permitindo correlacionar os resultados com comportamentos típicos de materiais granulares, argilas e siltes através do Índice de Comportamento ( $I_c$ ). Classificações para materiais baseadas em métodos empíricos foram propostas ao longo dos anos, entretanto, diferenciar siltes de argilas apenas com essas classificações pode ser difícil na prática da engenharia geotécnica. Por exemplo, é comum o comportamento de um silte de baixa resistência ser classificado como argila, ou uma argila sobreadensada ser classificado como um silte. Este artigo apresenta o uso de ensaios de dissipação como ferramenta auxiliar na classificação de argilas e siltes. Um banco de dados de ensaios CPTu's nos quais também foram realizados ensaios de dissipação, foi reunido para demonstrar a possibilidade da diferenciação dos materiais unindo-se os métodos de classificação consagrados na literatura com o uso do coeficiente de adensamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** CPTu, Ensaio de dissipação, Índice de comportamento, Argilas, Siltes.

**ABSTRACT:** In geotechnical projects, the geomechanical characterization of the interference region is essential, often requiring extensive investigations of the lithotypes. The piezocone test (CPTu), widely used to obtain field data of soil stratigraphic layers, provides values of tip resistance, sleeve friction, and pore pressure at depth, allowing correlation of results with typical behaviors of granular materials, clays, and silts through the Material Index ( $I_c$ ). Classifications for materials based on empirical methods have been proposed over the years; however, distinguishing silts from clays solely with these classifications can be challenging in geotechnical engineering practice. For example, it is common a low-strength silt to be classified as clay, or an overconsolidated clay to be classified as a silt. This article presents the use of dissipation tests as an auxiliary tool in the classification of clays and silts. A database of CPTu tests in which dissipation tests were also conducted was compiled to demonstrate the possibility of differentiating materials by combining established classification methods in the literature with the use of the coefficient of consolidation.

**KEYWORDS:** CPTu, dissipation test, Material Index, Clays, Silts.

## 1 INTRODUÇÃO

No âmbito dos projetos geotécnicos, os ensaios CPTu são utilizados não só para a obtenção de parâmetros, como também para a caracterização de materiais. Esses resultados podem ser usados para a interpretação estratigráfica em subsuperfície, principalmente devido a grande quantidade de informações obtidas com a perfuração do piezocone. Ao utilizar-se de correlações existentes entre o comportamento do material durante a cravação do cone e comportamentos típicos de materiais com determinada granulometria, é possível estabelecer a espessura de cada litotipo e prever o comportamento típico de cada camada.

Entretanto, o uso de correlações para a classificação dos materiais a partir dos CPTu's, sem a obtenção de resultados de outros ensaios de campo e laboratório a fim de realizar uma verificação cruzada, pode ocasionar em classificações granulométricas errôneas de materiais. Um exemplo deste tipo de equívoco ao utilizar classificações é apresentado na Figura 1, em que o valor do Índice de Comportamento ( $I_c$ ) em profundidade calculado para um CPTu realizado em rejeito de minério de ferro é diferente do percentual de argila obtida através de análises granulométricas em amostras em profundidade. Ao se classificar o material do furo P01, utilizando-se o  $I_c$  proposto por Robertson e Wride (1998), seu comportamento é similar ao comportamento de solos argilosos, porém os ensaios de caracterização em diversas profundidades mostram um material pouco argiloso em toda extensão do furo, o que é esperado dada a sua procedência (beneficiamento de minério de ferro). Neste caso, apesar do atrito lateral ser baixo, o que não é típico para argilas, devido a baixa resistência de ponta a formulação apresenta valores superiores de  $I_c$ .

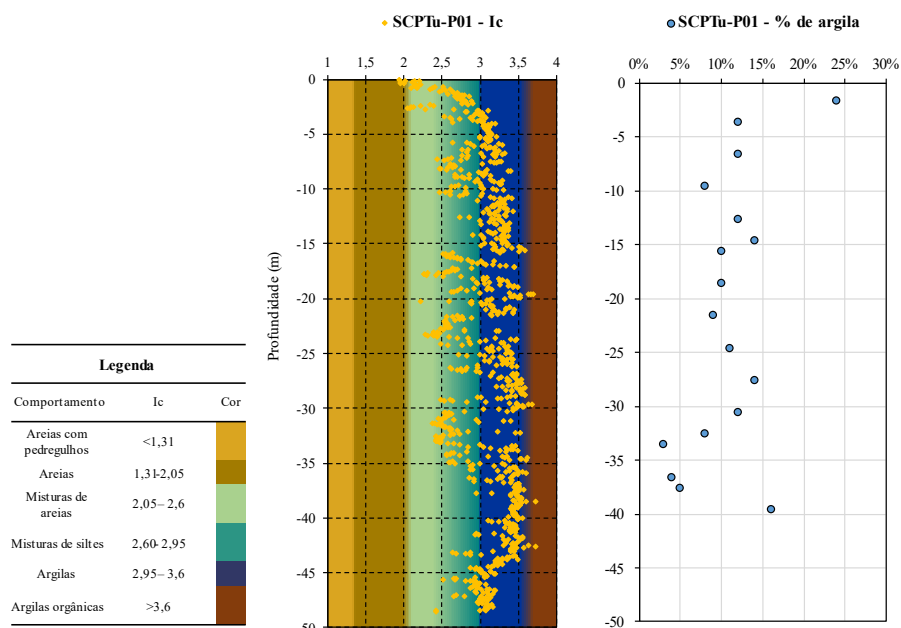


Figura 1. Classificação  $I_c$  e percentual de argila em profundidade.

Dessa forma, para uma caracterização granulométrica correta do material, percebe-se que é necessário não somente o uso do  $I_c$  através do ensaio CPTu, como também o auxílio de outros tipos de ensaios. Em casos nos quais há inviabilidade da coleta extensiva de amostras em profundidade para a realização de análises granulométricas, uma alternativa é o uso dos ensaios de dissipação como artifício para a obtenção de uma classificação granulométrica mais assertiva do material.

Com este propósito, foram compilados 6 ensaios CPTu's, para os quais foram realizados ensaios de dissipação e análises granulométricas, a fim de verificar a classificação usando somente o  $I_c$  e avaliando-se conjuntamente o  $I_c$  e o Coeficiente de adensamento na direção horizontal ( $c_h$ ). Por fim, comparou-se os resultados com a granulometria obtida nos ensaios de laboratório.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

## 2.1 Embasamento teórico

Historicamente, diversos autores propuseram métodos para caracterizar comportamentos de materiais por meio dos resultados de ensaios CPTu, principalmente através de ábacos. Schmertmann (1978) e Douglas e Olson (1981) propuseram os primeiros ábacos de classificação, em que se estabelecia a relação entre a resistência de ponta do cone e razão de atrito lateral. Posteriormente, Robertson e Campanella (1983) apresentaram sua primeira versão do ábaco que passou por sucessivas atualizações em 1986, 1990 e 2010 (Robertson et al, 1996; Robertson 1990 e Robertson, 2010). Há também versões que utilizam a poropressão como critério de classificação, como os elaborados por Jefferies e Davies (1993) e Schneider et al (2008). Embora os ábacos sejam úteis, o uso do  $I_c$  na engenharia geotécnica é amplamente utilizado, pois consegue resumir as principais informações do ábaco de forma simplificada.

Há duas formulações que se destacam na literatura, postuladas por Robertson e Wride (1998) e Jefferies e Davies (1993). Para a determinação do  $I_{cRW}$  (Equação 1), utiliza-se parâmetros derivados da resistência de ponta e atrito lateral, ao passo que para o  $I_{cJD}$  (Equação 2), utiliza-se também parâmetros derivados da poropressão.

$$I_{cRW} = \sqrt{(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (1,22 + \log F_r)^2} \quad (1)$$

$$I_{cJD} = \sqrt{(3 - \log_{10}(Q_t(1 - B_q) + 1))^2 + (1,5 + 1,3 \cdot \log_{10} F_r)^2} \quad (2)$$

Os valores de  $Q_{tn}$ ,  $F_r$ ,  $Q_t$  e  $B_q$  são determinados conforme as equações 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

$$Q_{tn} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma_{atm}} \left( \frac{\sigma_{atm}}{\sigma'_{v0}} \right)^n, \text{ onde } n = 0,381 \cdot I_{cRW} + 0,15 \left( \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma_{atm}} \right) - 0,15 \leq 1,0 \quad (3)$$

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} \cdot 100\% \quad (4)$$

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{(\sigma_{v0} - u_0)} \quad (5)$$

$$B_q = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})} \quad (6)$$

Robertson et al (1986) e Robertson (1990) enfatizam que as classificações por  $I_c$  são essencialmente uma classificação do comportamento mecânico do material e não diretamente uma classificação da distribuição granulométrica e plasticidade do solo. Robertson (2010) apresenta diversos exemplos de materiais que podem ser classificados de acordo com a granulometria e com o  $I_c$  de forma diferente, conforme apresentado na Tabela 1. Apesar do comportamento frente a um carregamento ser importante, o conhecimento acerca da granulometria também pode trazer informações relevantes a um projeto geotécnico.

Tabela 1. Possíveis divergências entre granulometria e  $I_c$ .

Granulometria	Classificação pelo Índice de comportamento ( $I_c$ )	Motivo da divergência
Areia siltosa / Areia argilosa (cerca de 40% de finos)	Silte argiloso a argila siltosa	Argila com alta plasticidade (argila controla o comportamento)
Argila	Areia / Silte	Argilas duras, muito sobreadensadas
Argila	Areia siltosa a silte arenoso	Material fino não plástico
Silte	Argila	Siltes saturados com baixa resistência

O comportamento dos materiais em termos de poropressão, conforme já mencionado, também é utilizado para a sua classificação, devido as condições de drenagem do material durante a penetração do piezocone serem bem características para areias e argilas. Em areias, pela rápida dissipação do excesso de poropressão, as medidas de  $B_q$  costumam ser pequenas ou nulas (as poropressões atingem o equilíbrio rapidamente), o que é interpretado como um comportamento drenado ou parcialmente drenado mediante ao carregamento imposto pelo piezocone. No caso das argilas, o excesso de poropressão não é dissipado rápido o suficiente durante a cravação, o que confere grandes valores de  $B_q$ , ou seja, comportamento não-drenado, pois as poropressões excedem a poropressão de equilíbrio e se mantem dessa forma por muito tempo.

O tempo de dissipação da poropressão é fundamental para se avaliar as características do material e pode ser obtido através dos ensaios de dissipação do excesso de poropressão. Esse ensaio consiste em interromper a cravação por um período determinado, até que as poropressões atinjam o equilíbrio, ou seja, o excesso de poropressão devido à cravação do cone se iguala às condições hidrostáticas. A partir da teoria do adensamento, é possível calcular o coeficiente de adensamento horizontal ( $c_h$ ), que indica a velocidade do adensamento das camadas e, conseqüentemente, a dissipação das poropressões.

O valor de  $c_h$  normalmente é calculado para 50% de dissipação do excesso de poropressão gerado pelo ensaio (Schnaid et al, 1997) e é calculado pela Equação 7.

$$c_h = \frac{TR^2\sqrt{I_r}}{t} \quad (7)$$

Em que:

- T é o fator tempo em função da porcentagem de dissipação (50%);
- R é o raio do piezocone;
- $I_r$  é o índice de rigidez;
- t é o tempo para 50% de dissipação.

Parez e Fauriel (1988) apresentam a relação entre permeabilidade e o tempo necessário para que 50% da poropressão seja dissipada ( $t_{50}$ ), além de destacar os materiais característicos que apresentam comumente esse intervalo de valores. A Figura 2 apresenta o gráfico proposto pelos autores. Nota-se que para areias, podem ser obtidos  $t_{50}$  menores que 10 segundos e para argilas são comuns valores maiores que 500 segundos, enquanto siltes possuem  $t_{50}$  característicos entre 50 e 500 segundos.

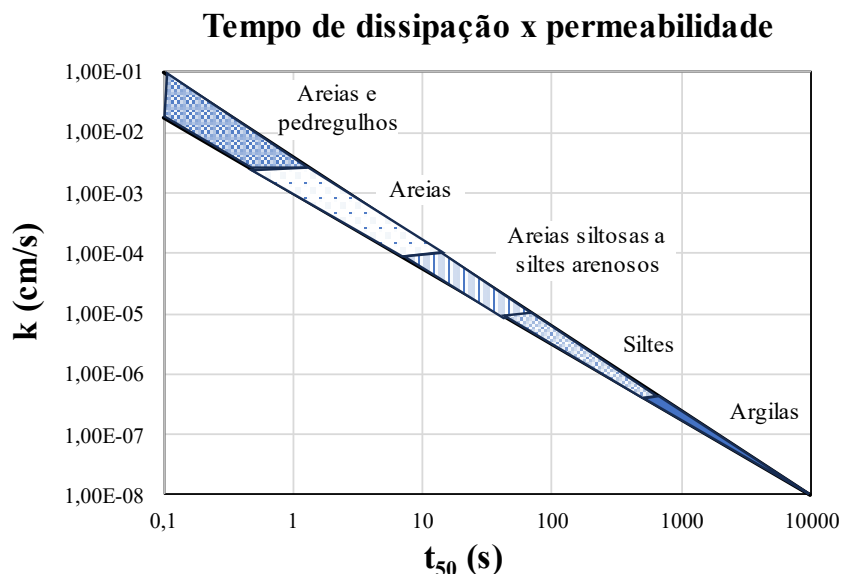


Figura 2. Tempo de dissipação x permeabilidade e classificação de materiais (Parez e Fauriel, 1988).

## 2.2 Ensaios CPTus, ensaios de dissipação e ensaios granulométricos

A amostragem deste artigo compreende ensaios CPTu realizados em rejeitos de minério de ferro, estéril e depósitos sedimentares, selecionados pela diversidade de comportamentos e variedade na quantidade de argila presente nas amostras coletadas. A Tabela 2 apresenta os dados utilizados, para as profundidades em que houve tanto ensaios de dissipação quanto coleta de material.

Tabela 2. Banco de dados utilizado.

Furo CPTu	Prof.	t <sub>50</sub>	I <sub>c</sub> médio (1m)	Classificação I <sub>c</sub>	Argila (%)	Material
P1	-10,75	25	3,02	Argila	8	Rejeito de Minério de ferro
P1	-11,65	35	3,24	Argila	12	Rejeito de Minério de ferro
P1	-15,70	15	3,04	Argila	10	Rejeito de Minério de ferro
P1	-18,80	17	3,14	Argila	10	Rejeito de Minério de ferro
P1	-24,60	5	3,14	Argila	11	Rejeito de Minério de ferro
P1	-26,95	26	3,22	Argila	14	Rejeito de Minério de ferro
P1	-29,80	27	3,29	Argila	12	Rejeito de Minério de ferro
P1	-34,65	32	3,05	Argila	3	Rejeito de Minério de ferro
P1	-38,60	105	3,51	Argila	16	Rejeito de Minério de ferro
P3	-7,00	31	3,61	Argila orgânica	8	Rejeito de Minério de ferro
P3	-11,60	65	3,45	Argila	15	Rejeito de Minério de ferro
P3	-19,60	3	2,63	Misturas de siltes	1	Rejeito de Minério de ferro
P3	-22,50	21	3,32	Argila	5	Rejeito de Minério de ferro
P3	-25,95	21	3,28	Argila	5	Rejeito de Minério de ferro
P3	-33,00	37	3,24	Argila	11	Rejeito de Minério de ferro
P3	-41,05	28	2,77	Misturas de siltes	4	Rejeito de Minério de ferro
P4	-9,36	22	2,65	Mistura de siltes	10	Rejeito de Minério de ferro
P4	-13,16	37	2,82	Mistura de siltes	8	Rejeito de Minério de ferro
P4	-17,16	32	2,89	Mistura de siltes	14	Rejeito de Minério de ferro
P4	-19,00	19	2,63	Mistura de siltes	5	Rejeito de Minério de ferro
P4	-26,81	19	2,79	Mistura de siltes	9	Rejeito de Minério de ferro
P4	-29,81	21	2,74	Mistura de siltes	5	Rejeito de Minério de ferro
P4	-33,71	20	2,87	Mistura de siltes	8	Rejeito de Minério de ferro
P4	-37,36	4	2,54	Mistura de siltes	4	Rejeito de Minério de ferro
Q3	-9,94	250	3,49	Argila	7	Rejeito de Minério de ferro
Q3	-12,94	162	3,37	Argila	17	Rejeito de Minério de ferro
Q3	-14,94	378	3,45	Argila	26	Rejeito de Minério de ferro
Q3	-19,01	4310	3,80	Argila orgânica	20	Rejeito de Minério de ferro
Q3	-24,99	61	3,68	Argila orgânica	24	Rejeito de Minério de ferro
Q3	-27,99	156	3,74	Argila orgânica	29	Rejeito de Minério de ferro
Q4	-7,00	494	3,73	Argila orgânica	24	Rejeito de Minério de ferro
Q4	-10,00	466	3,64	Argila orgânica	24	Rejeito de Minério de ferro
Q4	-13,00	163	3,67	Argila orgânica	28	Rejeito de Minério de ferro
Q4	-16,00	180	3,90	Argila orgânica	23	Rejeito de Minério de ferro
Q4	-19,00	282	3,67	Argila orgânica	23	Rejeito de Minério de ferro
R1	-10,00	900	3,17	Argila	72	Estéril argiloso
R1	-16,00	6600	2,65	Mistura de siltes	62	Depósito sedimentar

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta a relação entre o I<sub>c</sub> e o c<sub>h</sub>, de forma a avaliar a relação com a granulometria dos materiais. Para o caso dos siltes de baixa resistência foi possível observar que quase todos foram classificados como argilas pelo I<sub>c</sub>, porém há pequena porcentagem de argila nas amostras coletadas e o tempo de dissipação é menor que 100 segundos. De forma a mostrar os casos em que a classificação granulométrica e de comportamento se assemelham, apresentou-se também o conjunto de resultados destes mesmos ensaios em

que o  $I_c$  apontou corretamente a classificação de silte e de argila. Quanto ao material chamado de “material fino”, apesar deste ser classificado como argila orgânica pelo  $I_c$ , trata-se de um rejeito fino (entre 20 e 30% de finos) com baixa plasticidade e baixa resistência. Por fim, a amostra de argila dura, apesar da sua grande porcentagem de argila, é classificada pelo  $I_c$  como silte, devido a sua grande resistência.

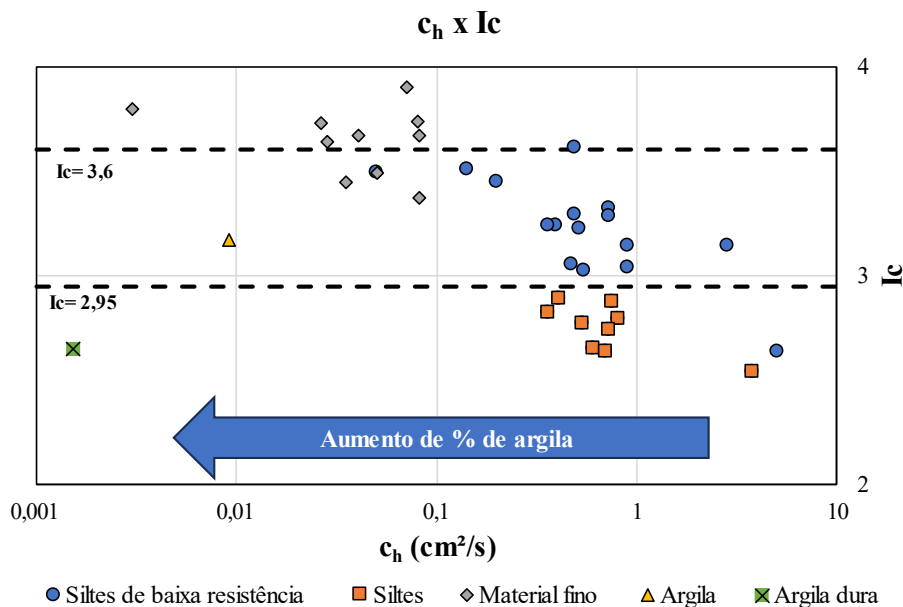


Figura 3.  $C_h$  x  $I_c$  e quantidade de argila dos materiais.

Os casos de classificações granulométricas inexatas usando o  $I_c$  para siltes de baixa resistência e argila dura, já haviam sido destacados por Robertson (2010), e foram vistos também nas amostras estudadas. No entanto, enfatiza-se que é possível distinguir seu comportamento pelo  $C_h$  de forma satisfatória. Por exemplo, para a argila dura, o baixo valor de  $C_h$  já é um indício de seu comportamento argiloso, mesmo que o  $I_c$  apresente classificação de silte. É possível fazer a mesma relação com o silte de baixa resistência, que apesar de ser classificado como argila pelo  $I_c$ , apresenta  $C_h$  alto, o que não é característico de materiais argilosos. Os rejeitos classificados como “material fino” apresentou um valor de  $c_h$  intermediário, o que indica que é um material mais fino que o siltes, porém não chegam a ter um comportamento típico de argilas no âmbito da drenagem.

#### 4 CONCLUSÕES

As correlações existentes entre o comportamento do material durante a cravação do piezocone e comportamentos típicos de materiais possuem grande utilidade para a definição de espessuras para cada litotipo e prever o comportamento típico de cada camada.

Entretanto, o uso do  $I_c$  para a classificação de um solo muitas vezes não corresponde ao resultado da granulometria do material. Sendo assim, para se obter mais informações em profundidade sem a necessidade de extensas coletas de materiais, sugere-se o uso do parâmetro  $c_h$  para realizar uma verificação cruzada da classificação do material.

Comumente os ensaios de dissipação são utilizados por geotécnicos apenas para a definição das poropressões hidrostáticas em subsuperfície, porém este artigo visa apresentar este ensaio como um método auxiliar para a caracterização do material quando utilizado para o cálculo do parâmetro  $c_h$ .

Em casos em que o  $I_c$  encontrado sugere uma classificação de argila, pode-se compará-lo com o valor de  $c_h$ , e caso este seja alto, há grande possibilidade do material ensaiado ser um silte de baixa resistência. Da mesma forma, quando o  $I_c$  sugere uma classificação de silte ou areia, mas o valor de  $c_h$  é muito baixo, o material ensaiado pode tratar-se de uma argila dura ou sobreadensada.

Salienta-se que as análises realizadas representam comportamento de depósitos pouco heterogêneos e com pouca diferença na sua estratigrafia. Depósitos com grandes lentes de areia ou com diferentes granulometrias intercaladas podem apresentar valores de  $c_h$  não representativos para esse tipo de análise.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Douglas, B.J., Olsen, R.S. (1981) Soil classification using electric cone penetrometer. Cone Penetration Test and Experience. *ASCE National Convention*, St Louis, p. 209-227.
- Jefferies, M. G., Davies, M. P. (1993). Use of CPTU to estimate equivalent SPT N 60. *Geotechnical Testing Journal*, 16 (4), p. 458-468.
- Kulhawy, F.H., Mayne, P. W. First-order estimation of  $k_0$  in sands and clays. *Foundations Eng.: Current Principles and Practice (GSP 22)*, ASCE, NY, 1, p. 539-548.
- Parez, L., Fauriel, R. (1988). Le piézocône améliorations apportées à la reconnaissance des sols. *Revue française de géotechnique*, 44, p. 13-27.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G. (1983). Interpretation of cone penetration tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 20 (4), p. 718-745.
- Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., Greig, J.(1986) Use of Piezometer Cone data. In-Situ '86 *Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering*, GSP 6 , ASCE, Reston, VA, Specialty Publication, SM 92, pp 1263-1280.
- Robertson, P.K.(1990) Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27 (1), p.151-158.
- Robertson, P. K., Wride, C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, 35, ( 3), p.442-459.
- Robertson, P. K. (2010). Soil behaviour type from the CPT: an update. *2nd International symposium on cone penetration testing*, 2, (56), p. 8. Huntington Beach, Cone Penetration Testing Organizing Committee.
- Schmertmann, J. H. (1978). *Guidelines for cone penetration test, performance and design* . Report FHWA-TS-78-209. Washington, D.C. United States. Federal Highway Administration.
- Schnaid, F., Sills, G. C., Soares, J. M.; Nyirenda, Z. (1997). Predictions of the coefficient of consolidation from piezocone tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 34 (2), p.143-159.