

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/535

Ensaio de Campo Combinados para Classificação e Análise de Cimentação em Solos Residuais

Fábio Krueger da Silva

Docente, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fabio.krueger@ifsc.edu.br

Fernanda Simoni Schuch

Docente, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fernandass@ifsc.edu.br

Ana Karolyna Silveira da Silva

Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, anajovitta@gmail.com

RESUMO: A cimentação nos solos residuais resulta da presença de ligações reliquias das partículas remanescentes após o intemperismo da rocha matriz. Ainda durante o processo de decomposição pode haver lixiviação de minerais que podem incrementar a resistência adicional nestes pontos de contato das partículas. A microestrutura ou cimentação dos solos residuais tem forte influência no seu comportamento mecânico. Assim é importante identificar a sua presença e se, possível medir os distintos níveis de cimentação existentes nas camadas de solos. Esta pesquisa procura aplicar cartas de classificação de solos para identificação da cimentação a partir de resultados dos ensaios de CPT e medidas do módulo sísmico G_o . O trabalho foi realizado com a condução dos ensaios de campo (SPT, CPT e SDMT) num talude de solo residual silte arenoso de origem gnáissica. Ao final, conclui-se que os resultados obtidos mostraram similaridades nos perfis estratigráficos obtidos pelos diferentes ensaios de campo. Além disso, o emprego das relações entre G_o/q_c nos métodos propostos permitiram a avaliação da presença e do grau de cimentação do solo residual na presente pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: Cimentação, Solos residuais, Ensaio de Campo.

ABSTRACT: Cementation in residual soils results from the presence of relic bonds of particles remaining after weathering of the matrix rock. During the decomposition process, minerals may be leached, which may increase additional resistance at these particle contact points. The microstructure or cementation of residual soils has a strong influence on their mechanical behavior. Therefore, it is important to identify its presence and whether it is possible to measure the different levels of cementation existing in the soil layers. This research seeks to apply soil classification charts to identify cementation based on the results of CPT tests and G_o seismic module measurements. The work was carried out by conducting in situ tests (SPT, CPT and SDMT) on a soil slope residual sandy silt of gneissic origin. In the end, it is concluded that the results obtained showed similarities in the stratigraphic profiles obtained by the different in situ tests. Furthermore, the use of relationships between G_o/q_c in the proposed methods allowed the evaluation of the presence and degree of cementation of the residual soil in the present research.

KEYWORDS: Cementation, Residual soils, In situ tests.

1 INTRODUÇÃO

Os solos residuais são materiais de comportamento particular. Estas particularidades estão relacionadas ao tipo de rocha de origem, relevo, condições climáticas, tempo de exposição, entre outras. A partir da decomposição da rocha ocorre a formação do solo residual, contudo, durante este processo de alteração restam algumas ligações remanescentes da rocha-mãe, essas ligações reliquias são chamadas de cimentação. A análise da cimentação em solos residuais é importante devido a contribuição sob a resistência ao cisalhamento e, ao modo particular de ruptura em baixas e altas tensões confinantes.

Os ensaios de campo são empregados para conhecimento do perfil e classificação das camadas, determinação do nível de água e topo rochoso, além de, estimar as propriedades geotécnicas dos solos. A estimativa da cimentação em solos residuais torna-se um desafio pois a penetração das ponteiros no solo acaba por destruir as ligações cimentantes no entorno do ensaio. Este trabalho trata da classificação e análise da cimentação em solos residuais de gnaiss com emprego dos ensaios de campo: Dilatômetro de Marchetti Sísmico (SDMT), Cone de Penetração Mecânico (CPT) e Penetração de Simples Reconhecimento à percussão (SPT).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solos Residuais

Segundo Krueger (2015), os solos residuais são formados a partir do intemperismo físico e químico das rochas existentes no local. Ou seja, a decomposição ou apodrecimento desta rocha dá origem a um tipo de solo que permanece no seu local de formação. O processo de formação influencia diretamente no comportamento geomecânico dos mesmos, pois a decomposição converte a rocha de origem ou rocha mãe em partículas menores e argilo-minerais, inevitavelmente tornando o material menos denso, menos resistente e mais compressível. Viana da Fonseca e Coutinho (2008) destacam a importância do desenvolvimento ou aprimoramento dos métodos de interpretação para caracterização geotécnica de solos residuais.

Um dos aspectos bastante estudados, mas ainda não perfeitamente explicados refere-se a identificação da cimentação entre as partículas presente em alguns solos residuais. Existem mecanismos principais que condicionam as cimentações em solos, alguns são minerais introduzidos na estrutura e acabam por enrijecer seus contatos e, outros processos alteram a estrutura física e química do material. A cimentação é um fenômeno natural, e em muitos solos tem um grau de ligação entre as partículas que, segundo Vaughan (1985), Maccarini (1987), Santamarina (2001), Krueger (2015) afeta drasticamente o comportamento tensão-deformação, rigidez, resistência e alterações de volume dos materiais.

2.1.1 Cimentação em solos residuais

Do processo de decomposição da rocha surgem estruturas reliquias no solo residual formado, usualmente, são denominadas de macroestrutura e microestrutura. A microestrutura nos solos residuais é compreendida como uma cimentação natural que ocorre entre os grãos. Essa cimentação é uma contribuição extra na união entre os contatos das partículas. Dessa forma, essa cimentação afeta o comportamento mecânico do material. A cimentação nos solos residuais é anisotrópica e com diferentes graus ao longo do maciço. A estimativa do grau de cimentação é complexa. Pode ser feita através de ensaios de laboratório com cuidados na amostragem e preparação das amostras e/ou com os ensaios de campo desde que sejam considerados os efeitos do amolgamento estrutural causado pela penetração da ponteira.

Na interpretação dos ensaios de cone e dilatômetro devem ser considerados os efeitos da amolgamento do solo devido a cravação da sonda. As estimativas de parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito, coesão, densidade, coeficiente de empuxo, entre outros) por meio dos ensaios de campo são afetadas pela penetração das ponteiros. Porém, mesmo assim é possível obter razoáveis estimativas se os efeitos da perturbação forem considerados no processamento dos resultados. Outra forma de analisar as cimentações é através do emprego de ondas sísmicas que são propagadas pelo solo permitindo a interpretação de materiais com distintos níveis de cimentação estando o material em condições não perturbadas (Krueger et al. 2021).

2.2 Ensaio de Cone de Penetração Dinâmico – CPT

O ensaio CPT mecânico consiste numa ponteira cônica cravada com velocidade constante no solo com objetivo de determinar a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s). Estes índices indicam, respectivamente, as pressões na ponta (MPa) e na luva lateral (kPa). O ensaio tem diversas aplicabilidades: além da estratigrafia

e classificação do solo por meio de interpretação dos dados de q_c e f_s , também possibilita através de correlações já estabelecidas, a estimativa de propriedades geotécnicas dos materiais analisados.

O princípio do ensaio é bastante simples, consistindo da cravação no terreno de uma ponteira cônica (60° de ápice) a uma velocidade constante de 20 mm/s. A seção transversal da ponteira é normalmente de 10 cm² e a luva de atrito tem área de 150 cm². Este cone também é conhecido como Cone Mecânico ou Cone de Begemann. A ponteira é cravada no solo por meio de um conjunto de hastes e, a cravação é realizada por um equipamento que possui um pistão hidráulico para empurrar o conjunto de haste e ponteira para o interior do solo.

O equipamento de cravação consiste numa estrutura de reação sobre a qual é montado um sistema de aplicação de cargas. Sistemas hidráulicos são normalmente utilizados para esta finalidade, sendo o pistão acionado por uma bomba hidráulica acoplada a um motor à combustão ou elétrico. Uma válvula reguladora de vazão possibilita o controle preciso da velocidade de cravação durante o ensaio. A penetração é obtida através da cravação contínua de hastes de comprimento de 1m, seguido da retração do pistão hidráulico para posicionamento de nova haste. O conjunto pode ser montado sobre um caminhão, utilitário ou reboque, cuja capacidade varia normalmente entre 10 e 20 toneladas (100 e 200 kN). A reação aos esforços de cravação é obtida pelo peso próprio do equipamento e/ou através de fixação ao solo de hélices de ancoragem manual ou mecanizada.

2.3 Ensaio Dilatômetro de Marchetti Sísmico - SDMT

O ensaio Dilatômetro Sísmico (SDMT) opera de maneira similar ao DMT (Dilatômetro de Marchetti), contudo, são instalados na haste anterior a lâmina um conjunto de geofones. Esses sensores permitem que sejam feitas medidas de leituras das velocidades de ondas. As ondas de compressão e de cisalhamento são geradas na superfície através de um golpe mecânico, maiores detalhes em Krueger (2015). Este ensaio sísmico analisa o tempo necessário para determinado tipo de onda percorrer uma certa distância no maciço analisado.

Este conjunto de sensores posicionados estrategicamente na haste permitem que sejam determinadas as diferenças de tempo entre a emissão da onda e a respectiva captação de cada sensor. Isso pode ser conduzido em diferentes profundidades. As interpretações das diferenças de tempo que um determinado tipo de onda leva para atravessar o solo permite que seja calculado o módulo de cisalhamento máximo (G_o). A seguir serão apresentados os resultados das relações entre G_o e outros índices obtidos nos ensaios de campo desta pesquisa. Este conceito será usado para avaliação da classificação e análise da cimentação nos solos residuais.

2.4 Interpretação das cimentações através de ensaios de campo

Diversas pesquisas ao redor do mundo tem procurado correlacionar o G_o obtido a partir de ensaios sísmicos com outros índices para avaliação das propriedades geotecnicas do solos (Robertson apud Lunne (1997), Mayne e Brown 2003, Schnaid et al. 2004, Viana da Fonseca et al. 2006, Giachetti e De mio (2008)). Neste trabalho será proposto uma relação entre o módulo de cisalhamento máximo do SDMT com a resistência de ponta (q_c) do ensaio CPT.

Como já citado, a aplicação do módulo sísmico relacionado com índices do CPT e SDMT pode ser muito útil para classificação do comportamento do material, avaliação da história de tensões, idade geológica e do grau de cimentação (Eslaminzaad e Robertson, 1997). Uma carta de classificação baseada nos estudos de Robertson (1990) e, modificada por Lunne et al. (1997) propõe a avaliação do estado do material com base nos valores da resistência de ponta normalizada e a razão entre modulo sísmico e resistência de ponta. Esta carta mostra uma tendência de aumento de OCR e idade no mesmo sentido mostrado na carta.

Segundo Viana da Fonseca et al. (2006), a relação G_o/q_c fornece uma medida de razão entre a rigidez elástica e a resistência última, sendo de esperar que está mesma aumente com idade geológica no caso dos solos sedimentares (com reflexo nos imbricamentos secundários nas areias, por exemplo) e (ou) com a cimentação (no caso de solos residuais). Uma vez que estes aspectos afetam muito mais o valor de G_o que o de q_c . Esta razão deve ser adimensionada para que possa ter aplicação mais universal, portanto sugere-se que se faça a representação em função do parâmetro de estado:

$$q_{c1} = \left(\frac{q_c}{p_a} \right) \sqrt{\frac{p_a}{\sigma'_v}} \quad (1)$$

Sendo:

q_{c1} a resistência de ponta normalizada e p_a a pressão atmosférica.

Em outras pesquisas feitas por Schnaid et al. (2004) e Viana da Fonseca et al. (2006) comprovam que a partir dos dados de G_o e q_c ao longo da profundidade é possível definir esta razão que pode ser aplicada para avaliação direta da história de tensões, grau de cimentação entre outros. Os resultados desses autores são provenientes de campos experimentais distintos de solos residuais e de areia *Monterey* artificialmente cimentada. Os autores propõem um gráfico que define os limites de diferentes graus de cimentação nos solos. Assim, se os solos residuais possuírem uma estrutura cimentada, os resultados dos pontos devem cair fora e acima do limite proposto por Eslaamizaad e Robertson (1997) para solos não cimentados. Buscando validar a aplicação destes gráficos, o atual trabalho irá usar esses dois métodos para verificação da presença e análise do grau de cimentação no solo residual de gnaíse.

3 MÉTODO DA PESQUISA

Essa pesquisa foi conduzida num solo residual de gnaíse existente na cidade de Santo Amaro da Imperatriz/SC. No local existe uma elevação natural que recebeu um retaludamento nos anos anteriores à data do trabalho. Atualmente, este talude tem mais de 30 metros desde do nível da rua até o seu topo. Nos trabalhos de retaludamento foram feitas bancadas para melhorar a estabilidade da encosta (Figura 2).

Os ensaios de campo usados neste trabalho foram agrupados. Ou seja, os 3 ensaios de campo (SPT, CPT e SDMT) foram locados numa posição triangular com distâncias de 1 metro entre si. O primeiro grupo de ensaios de campo foi conduzido no patamar defronte ao talude 2, denominado de Grupo 01 e, o segundo grupo de ensaios na cota do nível da rua, denominado de Grupo 04. Na Figura 1 é possível observar o referido talude e a realização dos ensaios de campo do Grupo 01



Figura 1. Fotos do talude e dos ensaios de campo.
Fonte: Krueger (2015).

4 RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 2, é possível visualizar o perfil do solo obtido pelo ensaio SDMT. Esta classificação do tipo de solo é feita no SDMT através do índice de material I_D que é obtido por meio das medidas de pressões registradas durante a expansão da lâmina do ensaio. Os ensaios de campo SPT e CPT conduzidos muito próximos, corroboraram com as informações geotécnicas obtidas pelo SDMT. Todos os ensaios confirmaram o perfil das camadas de solo e a ocorrência de um material com comportamento de silte arenoso à areia siltosa.

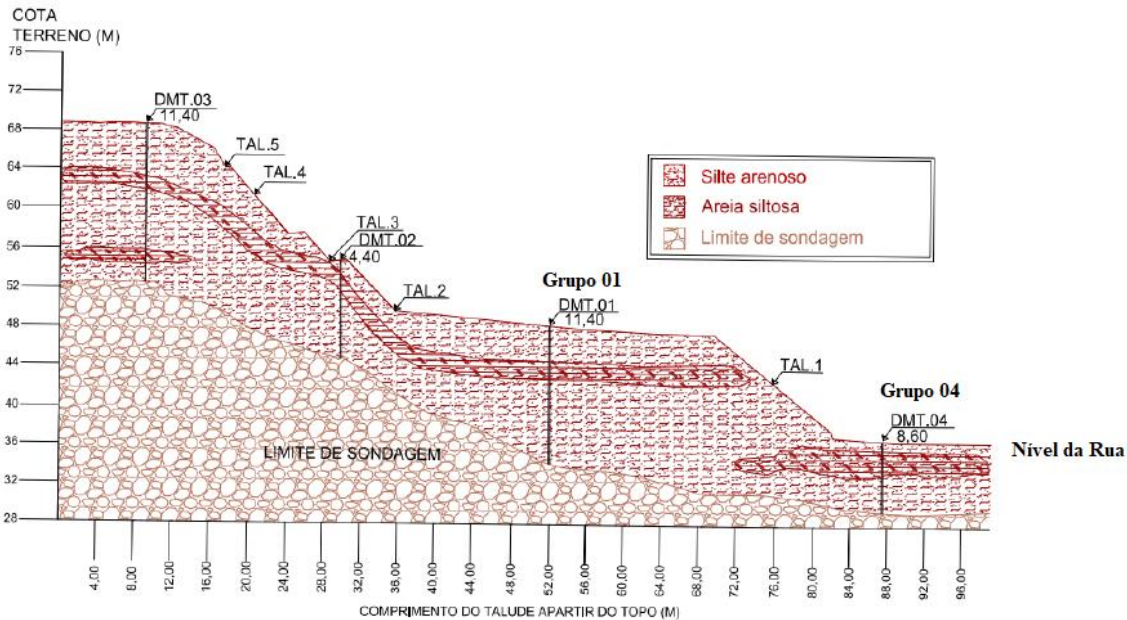


Figura 2. – Perfil estratigráfico obtido pelo SDMT
Fonte: Autor.

A elevada rigidez inicial e a baixa resistência das camadas mais superficiais (intemperismo físico e químico) são reflexos do processo de laterização que enriquecem os solos com alumínio e ferro e elementos associados que potencializam a formação de estruturas cimentadas com alta porosidade.

A razão entre a rigidez inicial à pequeníssimas deformações (G_0) e a resistência última (q_c) é uma boa relação para avaliação de uma estrutura de cimentação frágil e incipiente presente num arranjo estrutural meta estável. Qualquer perturbação, como a penetração do cone tem reflexo na queda do valor de resistência, quando comparada com a rigidez a muito baixa deformações (Krueger, 2021).

Na atual pesquisa, devido a inexistência de poro pressão positiva, assumiu-se que a tensão total é igual a tensão vertical efetiva, da mesma forma que a resistência de ponta corrigida (q_t) é igual a resistência de ponta (q_c). A relação G_0/q_c foi calculada com a média aritmética dos valores de q_c ao redor da cota onde G_0 foi medido. Os resultados da relação entre o módulo sísmico obtido pelo SDMT e da resistência de ponta dos ensaios CPT realizados nos grupo de ensaios 01 (na cor azul) e 04 (na cor vermelha) são apresentados na Figura 3. Observando-se o agrupamento de pontos obtidos a partir dos resultados dos ensaios 01 e 04 fica confirmado um material com comportamento predominantemente arenoso ou misturas arenosas (com silte). Indicam também solos com idade geológica mais avançada e com evidências da presença de cimentação. Esta carta identifica a existência de cimentação, porém não quantifica este valor.

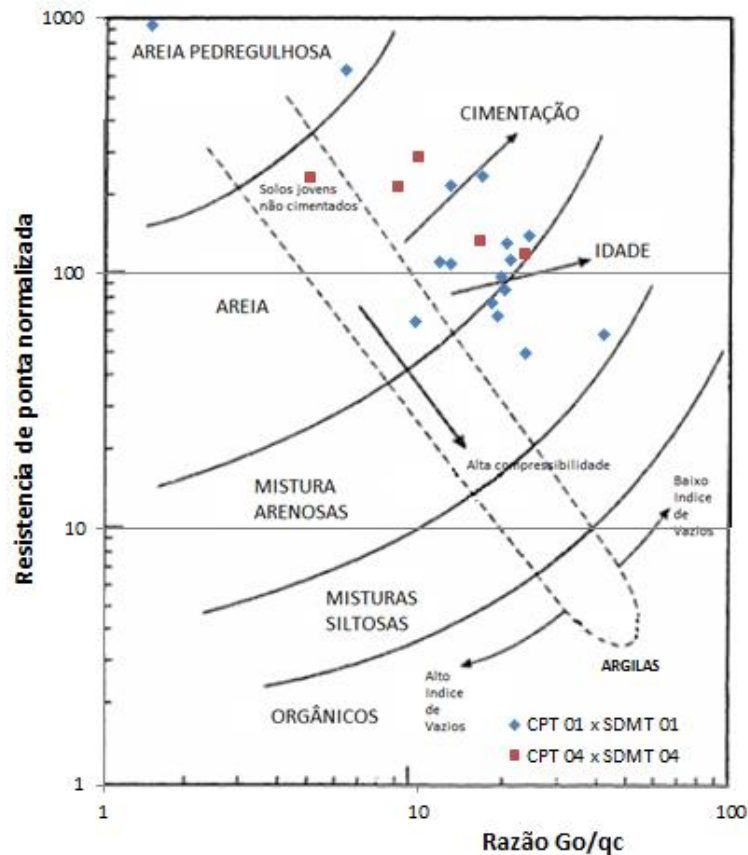


Figura 3. – Aplicação da carta proposta para avaliação da cimentação do solo residual silte arenoso de gnaíse.
 Fonte: Autor.

Através da abordagem proposta por Schnaid et. al (2004) e Viana da Fonseca et al. (2006) é possível prever um grau de cimentação através das relações entre G_0 e q_c , e definir limites para altos e baixos teores de cimentações. Analisando os dados obtidos (Figura 4), nota-se que os pontos encontram-se no limite inferior de solos cimentados indicando que o material possui um baixo grau de cimentação.

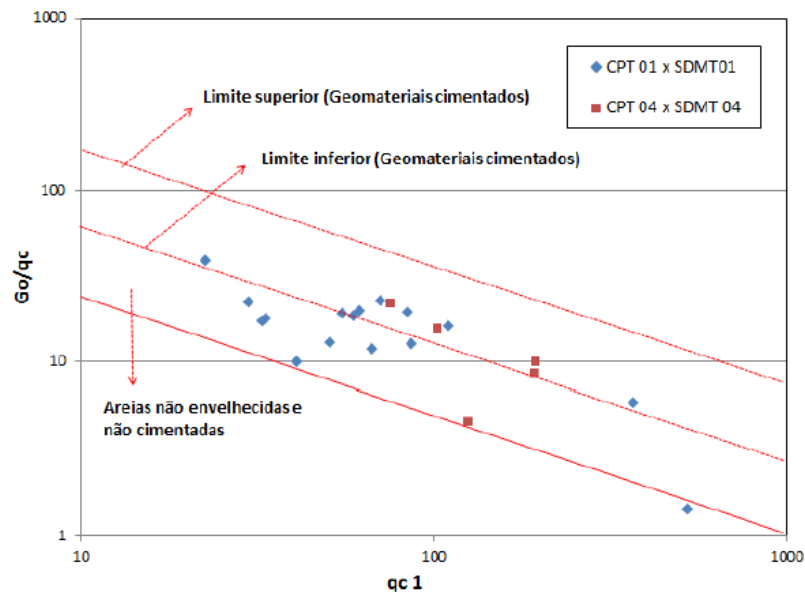


Figura 4. – Avaliação da relação entre $G_0/q_c \times q_{c1}$ para solo residual silte arenoso de gnaíse.
 Fonte: Autor (modificado de Schnaid, 2004).

Esses resultados corroboram com os obtidos por Krueger (2020) através de ensaios laboratoriais conduzidos no mesmo tipo de solo. Em laboratório, os ensaios de compressão diametral confirmaram que o material analisado nesta pesquisa tem um baixo níveis de cimentação. Nesta situação, a condução dos ensaios em laboratório requer cuidados extras na coleta de amostras indeformadas, transporte, preparação e moldagem dos corpos de prova, afim de manter a integridade das cimentações naturais.

5 CONCLUSÕES

Por fim, conclui-se que ensaios de campo associados a registros sísmicos têm potencial para classificar e avaliar a presença das cimentações num solo residual de gnaiss. Ressalta-se que a penetração de sondas em campo acaba por destruir a cimentação natural no solo do entorno da ponteira. Contudo, o ensaio SDMT é o método que provoca a menor perturbação do solo devido ao formato geométrico da lâmina e, que os geofones quando instalados nas hastes, permitem o G_0 possa ser medido num material com condições muito próximas às naturais. As relações entre G_0 com índices do CPT e do SDMT mostram alternativas para análise da microestrutura em solos residuais.

De maneira análoga a outras pesquisas conduzidas em solos cimentados, a aplicação desta metodologia busca definir limites para solos que possuem fortes cimentações e limites onde estas cimentações são muito baixas ou não existem. Utilizando o gráfico proposto por Robertson et al. (1997) foi identificado a presença de cimentação no solo residual desta pesquisa.

Observando os trabalhos de Schnaid (2004), Viana da Fonseca (2006) e Cruz (2010) percebe-se que não são incomuns alguns pontos obtidos nos solos analisados, ficarem fora dos limites pré-estabelecidos. Isto também ocorreu nesta pesquisa. Alguns pontos ficaram fora dos limites inferior e superior definidos nos métodos. Porém, existe uma tendência clara da maioria dos pontos analisados em solo residual de gnaiss situarem-se exatamente sobre a linha média, ou seja, próximo da fronteira entre solos cimentados e não cimentados. Acredita-se que isto indica a existência de um baixo grau de cimentação presente no solo residual silte arenoso de gnaiss.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cruz, N. *Modelling geomechanics of residual soils with DMT tests*. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto/Portugal, 2010.
- Eslaamizaad, S., and Robertson, P.K. *Estimation of in-situ lateral stress and stress history in sands*. In Proceedings of the 49th Canadian Geotechnical Conference. St. John's, Newfoundland, pp. 439-448. 1996.
- Giacheti, H.L., Peixoto, A.S., De Mio, G., Carvalho, D. (2006). *Flat Dilatometer Testing In Brazilian Tropical Soils*, Proceedings Second Flat Dilatometer Conference – Isc' 06, P. 103-111. Washington/Usa.
- Krueger, F.S. (2015). *Caracterização Física e Mecânica de Solo Residual de Gnaiss por meio de Ensaios de Campo e Laboratório – Santo Amaro da Imperatriz/SC*. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação Em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- Krueger, F. S. (2020) *Cimentação em Solos Naturalmente Estruturados com Emprego do Ensaio de Compressão Diametral*. 9º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul. Evento online <http://criciuma.ifsc.edu.br/9-sict-sul/>
- Krueger, F. S. (2021) *Uma discussão sobre os efeitos da cravação das sondas dos ensaios CPT e DMT em Solos Estruturados*. Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia Evento online – 30 de agosto a 03 de setembro de 2021.

- Lunne, T., Robertson, P.K., And Powell, J.J.M. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic & Professional. 1997.
- Maccarini, M. *Laboratory Studies of Weakly Bonded Artificial Soil*. Thesis, University of London, 1987.
- Mayne, P.W., Brown, D.A. (2003). Site Characterization of Piedmont Residuum of North America. *Characterization And Engineering Properties of Natural Soils*, Vol. 2, Pp.1323–1339. Swets & Zeitlinger, Lisse.
- Robertson, P. K. *Soil classification using the cone penetration test*. *Canadian Geotech. J.*, 27, 151–158. 1990.
- Santamarina, J.C. 2001. *Soil Behavior at the Micro scale: Particle Forces*. Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd – October 2001, MIT.
- Schnaid, F., Fahey, M., Lehane, B.(2004). *In Situ Test Characterization of Unusual Geomaterial*. Geotechnical & Geophysical Site Characterization. Isc'2. Keynote Lecture. Viana Da Fonseca, A. And Mayne, P.W. (Eds). Milpress, Rotterdam, Pp.49-74.
- Vaughan, P.R. *Mechanical and hydraulic properties of in situ residual soils*. Proceedings, First International Conference on Geomechanics in Tropical, Lateritic, and Saprolitic Soils, Brasília, Brazil, 1-33. 1985.
- Viana Da Fonseca, A., Carvalho, C., Ferreira, C., Santos, J. A., Almeida, F. Perreira, E., Feliciano, J., Grade, J. & Oliveira, A. (2006). *Characterization of Profile of Residual Soil from Granite Combining Geological, Geophysical and Mechanical Testing Techniques*. *Geotechnical And Geophysical Engineering*, 25, Pp. 1307-1348.
- Viana Da Fonseca, A., Coutinho, R.Q. *Characterization of residual soils*. Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Eds. Huang e Mayne, London, 2008.