

Relação Entre Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas dos Principais Solos de Palmas-TO

Bruno Carrilho de Castro

Universidade Federal do Tocantins, Palmas- TO, Brasil, brunocarrilho@uft.edu.br

Andressa Faquineli Garcia

Universidade Federal do Tocantins, Palmas- TO, Brasil, andressafaquineli@hotmail.com

Gustavo Haruo Beltran Gondo

Universidade Federal do Tocantins, Palmas- TO, Brasil, ghbgondo@gmail.com

Samuel de França Marques

Universidade Federal do Tocantins, Palmas- TO, Brasil, ssfmmarques@gmail.com

Marcos Vinícius Sousa

Universidade Federal do Tocantins, Palmas- TO, Brasil, marcosvinicius_mvsg@yahoo.com.br

Janaína Santana Queiroz

Universidade Federal do Tocantins, Palmas- TO, Brasil, janainasantana.santana1@gmail.com

Raydel Lorenzo Reinaldo

Universidade Federal do Tocantins, Palmas- TO, Brasil, rlorenzo@uft.edu.br

RESUMO: A cidade de Palmas é a mais nova capital do país e passa por um crescimento econômico e populacional acelerado. Nesse processo as características de uma cidade planejada são ameaçadas pela grande demanda em obras de infraestrutura. Para atender essa necessidade é necessário que se aprimore o conhecimento regional em diversas áreas, dentre elas a geotecnia. Assim, esse trabalho busca descrever e relacionar algumas das principais características geotécnicas dos solos encontrados na região com a sua resistividade elétrica, viabilizando assim a utilização de métodos geofísicos para a aquisição de dados de campo em grande escala, mais baratos e rápidos que as sondagens SPT, comumente empregadas, por exemplo. Para tanto, foram realizadas sondagens em cinco regiões com características geotécnicas distintas, sendo coletadas amostras a cada metro. Em seguida essas amostras foram levadas ao laboratório onde foram analisadas e passaram por ensaios de caracterização física. Após a campanha de ensaios de caracterização foram moldados corpos de prova controlando-se o peso específico e o grau de saturação, e em seguida os mesmos foram submetidos à aplicação de corrente elétrica, determinando a curva de diferença de potencial x corrente elétrica. Foram analisadas amostras com peso específico constante, representando o peso específico natural de campo e com diferentes graus de saturação (60 %, 75 % e 90 %). Assim pôde-se construir para cada um dos solos encontrados na região a relação entre suas características geotécnicas e as correspondentes variações de resistência elétrica. Assim pôde-se apontar a grande influência do grau de saturação da amostra na variação da resistência elétrica observada, devendo ser incorporada no processo de interpretação de ensaios de eletrorresistividade. Ademais, foi possível identificar faixas de variação entre as principais matrizes de solo, diferenciando faixas de valores característicos para importantes tipos de materiais encontrados, permitindo, dessa maneira, a identificação de solos pedregulhosos, argilosos e siltosos, além da determinação do nível freático.

1 INTRODUÇÃO

O município de Palmas, fundado em 1989, é a capital mais jovem do Brasil. Por esse motivo, a caracterização do solo desta cidade ainda está em fase de desenvolvimento, de forma que não existem muitos estudos publicados sobre o assunto. Essa deficiência torna as fases preliminares de elaboração de projetos incertas e conseqüentemente onerosas, eventualmente inviabilizando investimentos na cidade.

Com a evolução da tecnologia relacionada aos métodos de sondagem de terrenos, o ensaio de eletorresistividade surge como alternativa atraente para a aferição de informações sobre a estratigrafia de maciços a partir de medições indiretas, sendo que tal procedimento tem sido amplamente utilizado pela comunidade técnica e científica para variados fins: PRETTO *et al.* (2014) mostram uma alternativa para mapear uma encosta litorânea a partir de ensaios geofísicos eletorresistivos mostrando que é uma opção mais viável, tanto no tempo de execução, como no custo, ressaltando porém que esse método é muito mais eficaz se for feita de maneira mista, junto com a sondagem a percussão. VOGT e DIMYNSKI (2012) falam sobre a utilização, em uma encosta de solo coluvionar da eletorresistividade em campo e laboratório. Os autores indicam em seu trabalho resultados feitos por sondagens geofísicas e eletorresistividade, sendo que esse procedimento tem sido amplamente aplicado para a avaliação da condição estrutural de encostas, grau de contaminação de aterros, reconhecimento geotécnico, entre outros, como pode ser verificado nos trabalhos de XAVIER (2010), MOURA e MALAGUTTI FILHO (2003) e AQUINO (2010).

Portanto, baseado nas experiências citadas anteriormente, percebe-se que a junção das sondagens tradicionais (para a execução dos ensaios corriqueiros de caracterização do solo e avaliação de sua resistência) com o ensaio de eletorresistividade em campo e laboratório pode fornecer um banco de dados suficiente para subsidiar o reconhecimento geotécnico da região, uma vez que, além de permitir a

correlação dos tipos de solo com a condução de corrente pela subsuperfície, a sondagem por eletorresistividade também permite a aferição de outras informações valiosas como, por exemplo: presença de lençol freático, porosidade, condutividade hidráulica e outras propriedades físico-químicas (LUNNE *et al.*, 1997 *apud* AQUINO, 2010).

Logo, tendo em vista os aspectos supracitados, o objetivo do presente artigo é caracterizar amostras obtidas por meio de sondagem SPT e realizar ensaios de resistividade elétrica em diferentes condições de saturação, de modo a verificar a viabilidade de se utilizar eletorresistividade caracterização física.

O texto a seguir está estruturado da seguinte forma: descrição sucinta dos resultados de outros trabalhos disponíveis na literatura sobre a caracterização geotécnica da cidade de Palmas; detalhamento do método utilizado para a coleta e tratamento dos dados, seguido da apresentação dos resultados encontrados e discussão acerca das observações realizadas.

2 O SOLO DE PALMAS

A cidade de Palmas-TO, limitada a oeste pelo lago da UHE Lajeado e a leste pela Serra do Carmo, possui estrutura dividida em unidades de vizinhança (quadras) que por sua vez situam-se no interior da malha viária ortogonal composta por avenidas NS (norte-sul, longitudinais) e LO (Leste-Oeste, transversais). A interseção do corredor principal da cidade (a Avenida Teotônio Segurado) com a Avenida JK (centro comercial) constitui-se no centro administrativo do município, a Praça dos Girassóis. O formato de cruz criado pelas duas avenidas supracitadas segmenta a cidade em quatro quadrantes na região do Plano Diretor, sendo que no extremo sul da capital há também uma área de ocupação densa composta pelos bairros de Taquaralto, Aurenny, Taquari e outros menores. Entre o centro e o extremo sul da cidade nota-se a presença de inúmeros vazios onde impera a especulação imobiliária e cuja ocupação tem sido objeto de esforço pela

Prefeitura. Essa situação evidencia mais uma vez a importância em se conhecer melhor o solo da cidade com o intuito de promover o adensamento seguro de tal região.

A bibliografia técnica disponível sobre as características do solo de Palmas apresenta resultados semelhantes distribuídos em trabalhos distintos, alguns dos quais serão resumidos a seguir. Em levantamento da cartografia geotécnica regional do município de Palmas, SANTOS (2000) identificou a predominância de materiais residuais de textura pedregulho-siltosa, silto-argilosa com pedregulhos, areno-pedregulhosa e areno-siltosa; o autor também verificou a presença de materiais retrabalhados de textura semelhante à dos materiais residuais citados anteriormente.

Já ABREU (2015 *apud* CARVALHO, 2016), avaliando as características dos solos de subleito de duas vias não pavimentadas em Palmas para subsidiar projetos de pavimentação urbana, obteve para a primeira avenida (LO-12, parte norte da cidade), um solo Predregulhoso e para a segunda (NS-15, porção oeste da cidade), Areia Siltosa.

Por último, MARTINS (2014), com o objetivo de apresentar as melhores soluções de fundação para os diferentes tipos de solo da capital tocantinense, realizou a caracterização geotécnica de sete zonas principais por meio de sondagens SPT. Os resultados encontrados identificaram a prevalência de solos siltosos em três das sete zonas, argilo-arenosos em duas e areno-siltosos em uma, sendo que houve a presença de pedregulho em quatro das sete zonas geotécnicas.

Palmas está dividida geologicamente em duas regiões, os Terraços Aluvionares a oeste e a Formação pimenteiras no centro e leste da cidade. Segundo Hasui *et. al* (2012), a Formação Pimenteiras é constituída de folhelhos cinzentos a pretos, ou avermelhados e bege-amarelados, micáceos, além de siltitos e arenitos finos argilosos, sendo encontrados em diversos níveis formações ferruginosas.

Verificadas as condições geotécnicas do solo de Palmas com base na literatura disponível, foram realizados ensaios de sondagem à percussão (10 previstas ao todo e 6 realizadas) em 5 diferentes áreas da cidade. Das sondagens foram recuperadas amostras suficientes para

uma campanha de ensaios de simples caracterização e realização de ensaios de eletrorresistividade de laboratório. O procedimento realizado está detalhado no tópico a seguir.

3 METODOLOGIA

O método de medição da resistividade elétrica do solo consiste basicamente na aplicação de uma corrente elétrica artificial entre dois eletrodos (denominados A e B), com o intuito de verificar o potencial gerado entre outros dois eletrodos (denominados M e N) no entorno do fluxo de corrente (ELIS, 2002 *apud* XAVIER, 2010). Dessa forma, torna-se possível calcular a resistividade aparente que posteriormente é transformada em resistividade real por meio de operações matemáticas, o que permite a obtenção das feições geológicas da subsuperfície (PRETTO *et al.* 2014).

O método eletrorresistivo busca relacionar o mecanismo de propagação da corrente no material às suas características fazendo uma corrente elétrica passar através de um maciço ou amostra de solo. O comportamento do solo mediante tal inspeção possibilita a aferição de variadas informações sobre o tipo de material, composição mineralógica, porosidade, teor de água, salinidade, temperatura entre outras, uma vez que tais parâmetros influenciam o fluxo da corrente elétrica pelo solo (XAVIER, 2010).

Há dois procedimentos distintos já consagrados pela academia para a medição da eletrorresistividade em campo, a saber: Sondagem Elétrica Vertical (SEV), a qual se destina à exploração vertical, e Caminhamento Elétrico (CE) cujos objetivos estão ligados à investigação horizontal/lateral. Além desses, existe também uma técnica de mensuração da resistividade elétrica em laboratório, no qual se cria um circuito com duas placas de cobre e uma amostra do solo a ser ensaiado. Neste arranjo, faz-se passar (a partir de uma das placas de cobre), através do corpo de prova, uma corrente elétrica que percorre o material e chega à outra placa. A medição da resistência ao fluxo dessa corrente é medida por um multímetro conectado à placa de cobre (VOGT e DIMYNSKI, 2012).

A passagem da corrente elétrica através do

corpo de prova está condicionada à aplicação de uma diferença de potencial entre dois pontos no solo, sendo que a curva de resistividade do solo é obtida através da medição da resistência (em ohms) à passagem dessa corrente elétrica conhecida (em amperes), fenômeno regido pela lei de Ohm. Na realização do ensaio, para vários teores de umidade, são feitas leituras de corrente para incrementos de 10 volts (BOSZCZOWSKI, 2008 *apud* VOGT e DIMYNSKI, 2012).

Tendo em vista os objetivos e procedimentos já explanados, o mapeamento do solo de Palmas foi realizado por meio da divisão da região do Plano Diretor da cidade em 5 regiões (Figura 1) consideradas homogêneas com relação às características da subsuperfície. De cada uma dessas áreas levantou-se segmentos representativos nos quais foram realizadas sondagens com SPT e retiradas amostras para a execução de ensaios em laboratório. Cada perfuração seguiu até a profundidade que se chegasse ao impenetrável, com retirada do material retido no amostrador a cada metro.



Figura 1: Localização dos pontos de sondagens

Ao todo, 61 amostras foram caracterizadas por meio das seguintes verificações:

- Caracterização tátil visual de acordo com NBR 7250 (Figura 2);



Figura 2: Caracterização tátil visual

- Determinação da densidade aparente das amostras em g/cm^3 ;
- Determinação do peso específico dos grãos, G_s (em g/cm^3), conforme NBR 6508/82 (Figura 3);



Figura 3: Ensaio de determinação de G_s .

Após o ensaio de densidade aparente, o material foi submetido a um processo de compactação semiestática para que reproduzisse a densidade de campo, variando-se o grau de saturação entre 65%, 75% e 85%. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de eletrorresistividade supracitado, utilizando-se de duas placas de cobre, dois blocos de madeira para isolamento do sistema, um leitor de corrente elétrica e uma fonte regulável de corrente contínua. O arranjo resultante é mostrado na figura 4:

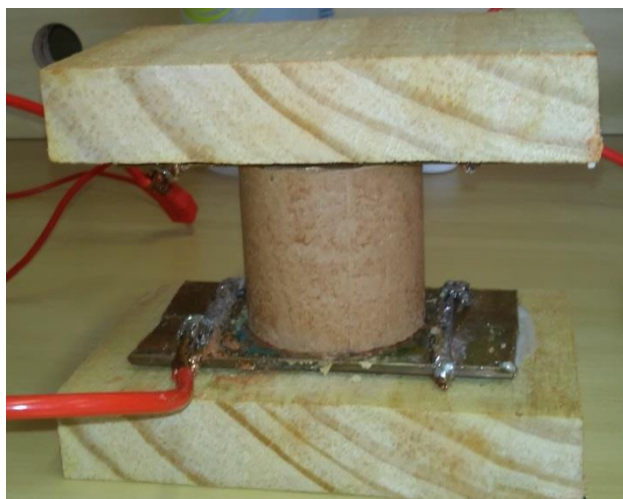


Figura 4: Ensaio de eletrorresistividade em laboratório

4 RESULTADOS

A campanha de ensaios de caracterização forneceu uma grande quantidade de resultados, nesse item será apresentada uma síntese dos principais obtidos. A Tabela 1 apresentam os dados de umidade higroscópica das amostras secas ao ar.

Tabela 1: Resultados para a umidade higroscópica em porcentagem.

Profundidade (m)	Sondagem					
	SPT 01	SPT 02	SPT 03	SPT 04	SPT 05	SPT 06
1	3.91	1.38	2.33	2.78	4.28	2.70
2	3.12	0.58	1.84	2.65	4.43	5.59
3	2.09		1.29	2.47	2.98	7.22
4	2.72	0.70	3.31	2.06	0.77	1.77
5	2.37	2.21	1.53	1.69	6.07	0.99
6	4.77	0.95	2.19	1.04	4.02	1.52
7	1.75	0.85	2.14	0.99	0.73	1.19
8	3.41	1.00	9.09	1.27	0.99	0.84
9	0.35	1.00	8.43	1.19	0.60	1.53

A campanha de ensaios de peso específico real dos grãos permitiu, pela grande quantidade de amostras ensaiadas, uma análise estatística e a consequente construção da curva de distribuição normal e histograma, como mostra a Figura 5.

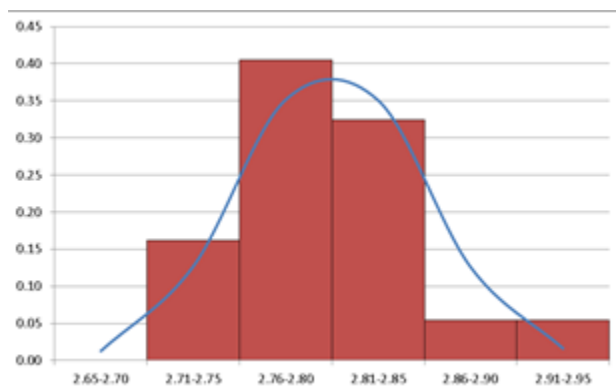


Figura 5: Histograma e curva de distribuição normal para os ensaios de Gs.

Estatisticamente as amostras ensaiadas podem ser consideradas pertencentes a uma mesma população uma vez que a ANOVA realizada aponta valor de $F(1,41)$ inferior ao $F_{\text{crítico}}(2,50)$. Contudo, trata-se de uma composição de grãos de quartzo e outros minerais, especialmente aqueles composto de ferro, como demonstram os estudos geológicos citados no início do artigo.

Os ensaios realizados para a determinação do peso específico aparente revelaram valores razoavelmente elevados para solos naturais, contudo, tal ocorrência está relacionada com os valores igualmente elevados de peso específico real dos grãos, por sua vez relacionados com a presença de minerais ferruginosos.

As análises tátil visual apontaram alguma diferença daquelas descritas nos boletins de sondagem. A Tabela 2 apresenta os dados obtidos nesse ensaio para todas as amostras relacionadas ao SPT 01.

Tabela 2: Classificação tátil visual para as amostras do SPT01.

Profundidade (m)	Identificação tátil visual
1	Silte arenoso com pedregulho roxo medianamente compacto
2	Argila arenosa com pedregulho marrom rija
3	Argila arenosa com pedregulho marrom rija
4	Silte arenoso amarelo pouco compacto
5	Argila arenosa amarela média
6	Pedregulho siltoso muito compacto roxo
7	Silte argiloso com pedregulho marrom claro muito compacto
8	Argila arenosa com pedregulho marrom rija
9	Silte pouco arenoso amarelo muito compacto

A compactação semi estática dos corpos de prova resultou em curvas carga x deslocamento como a mostrada pela Figura 6.

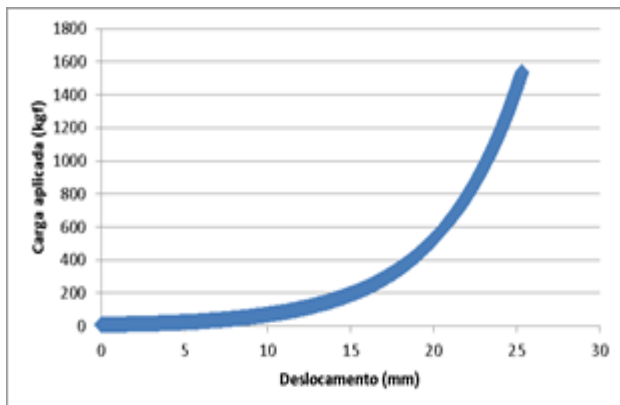


Figura 6: Curva carga deslocamento para a compactação de uma amostra.

Uma vez concluídos os ensaios de caracterização iniciaram-se os ensaios de eletrorresistividade de laboratório. Num primeiro momento procurou-se verificar se as amostras obedeciam a lei de Ohm, como mostra a Figura 7.

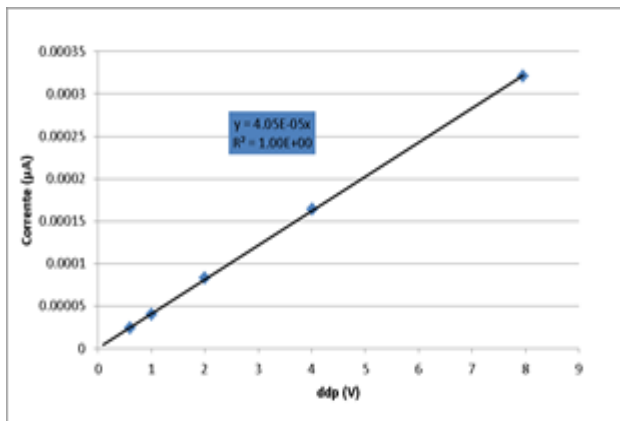


Figura 7: Material obedece a lei de Ohm.

Após a determinação da eletrorresistividade para as três condições de saturação (65%, 75% e 85%) traçou-se a curva característica de resistividade elétrica do material, como determinado em Aquino (2010). A Figura 8 apresenta uma das curvas características obtidas.

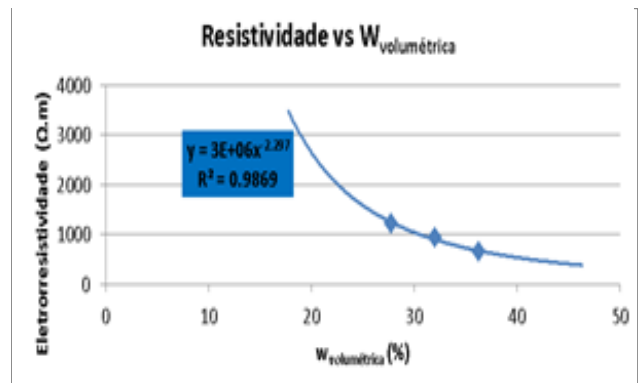


Figura 8: Curva característica para uma das amostras ensaiadas.

A junção das diversas curvas características através de sua composição predominante (Pedregulho, Silte ou Argila) permitiu traçar o ábaco apresentado pela Figura 9.

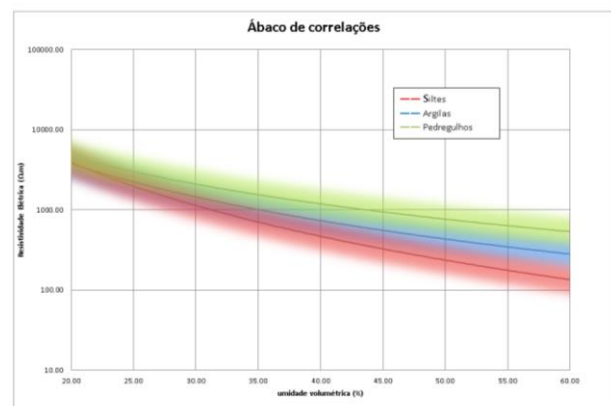


Figura 9: Ábaco de relação entre resistividade elétrica e umidade volumétrica para diferentes tipos de solos encontrados.

O ábaco relaciona valores de resistividade elétrica e umidade volumétrica, podendo-se distinguir por meio de curvas de eletrorresistividade os três tipos de solos observados nos ensaios de caracterização.

O fato de os materiais siltosos apresentarem uma resistividade característica inferior ao dos materiais argilosos pode ser explicado pelo fato de existir uma fração arenosa importante nos materiais argilosos, mas não nos siltosos, por estes serem encontrados em camadas mais profundas e em condições mais puras.

Para a utilização do ábaco em um estudo prático é necessária a obtenção, na sondagem SPT, da umidade e densidade aparente do solo, sendo assim possível a relação dos valores de eletrorresistividade com a umidade volumétrica de cada tipo de solo encontrado.

5 CONCLUSÕES

A campanha de ensaios trouxe dados muito importantes para a área de estudo, isso porque permitiu o aprofundamento do conhecimento prévio fornecido pelas cartas geológicas disponíveis. Estas, que apesar de muito úteis carecem de uma escala adequada para uma capital.

Assim, pôde-se reforçar a evidência da presença de minerais ferruginosos por meio dos valores de peso específico real dos grãos obtidos. Bem como da compartimentação da área de estudo entre a Formação Pimenteiras, presença de siltes e argilas, e os Terraços Fluviais, predominantemente pedregulhosos e arenosos. Do ponto de vista dos ensaios de resistividade elétrica de laboratório percebeu-se uma ligação entre a classificação do solo e a sua curva de eletroresistividade. Ou seja, os estudos mostraram que existe uma relação entre a composição granulométrica do material e a sua resistividade aparente.

Contudo, é necessário ressaltar que a eletroresistividade deve sempre estar associada a ensaios de sondagem a percussão, atuando como orientadora na campanha desses ensaios ou como instrumento de extrapolação de seus resultados.

Assim, abre-se uma oportunidade de pesquisa nessa área para viabilizar a aplicação de ensaios de eletroresistividade para o mapeamento de subsolos com o intuito de identificar camadas de solos para fins diversos, notadamente aqueles relacionados com obras de infraestrutura urbana.

REFERÊNCIAS

- Aquino, F. R. Estudo Comparativo Entre a Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um Solo Argiloso Compactado. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 189/2010, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p.
- Aquino, F. R.; Souza, N. M. ; Farias, M. M. e Aguiar, L. A. (2011) Estudo comparativo entre a resistividade elétrica e características geotécnicas de um solo argiloso compactado. In: *V Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste e o II GEOCENTRO*, Brasília, 2011.
- Carvalho, S. B. (2016) *Uso de resíduos de cerâmica vermelha como agregado reciclado para o melhoramento de camadas de pavimentos de baixo tráfego no município de Palmas-TO*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Tocantins. Palmas, 2016. 79 p.
- Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., Almeida, F. F. M., Bartorelli, A. (2012) *Geologia do Brasil*. Primeira Edição, Beca-BALL edições. São Paulo – SP 906p.
- Martins, J. P. C. (2014) *Caracterização geotécnica dos principais perfis de Palmas e apresentação de soluções de fundação, com vistas ao planejamento urbano*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Tocantins. Palmas, 2014. 75 p.
- Moura, H. P. e Malagutti Filho, W. (2003) Métodos da eletroresistividade e da polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: Aterro controlado de Rio Claro - SP. *Geociências* (São Paulo), v. 22, n.especial, p. 129-139, 2003.
- Pretto, J. H. F.; Sestrem, L. P. ; Kormann, A. C. M. e Campos, A. L. (2014) Mapeamento geotécnico de uma encosta litorânea em Santa Catarina a partir de ensaios geofísicos eletroresistivos. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2014, Goiânia. Anais COBRAMSEG, 2014.
- Santos, L. F. (2000) *Cartografia Regional do Município de Palmas/TO: área a oeste do meridiano 48° W*. Gr. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2000. 176 p.
- Vogt, V. e Dyminski, A. S. (2012) *Estudo de Eletroresistividade em Campo e Laboratório de Solo Coluvionar de uma Encosta da Serra do Mar Paranaense*. In: XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2012, Porto de Galinhas - PE. Anais COBRAMSEG 2012.
- Xavier, F. F. (2010) *Geofísica Elétrica Aplicada a Investigação Geotécnica de Subsolo para Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)*. In: XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Florianópolis. Anais COBRAMSEG, 2010.