

# Monitoramento de Camadas Estruturais de Trecho Experimental Solo-RCD Utilizando Penetrômetro PANDA

Yago Isaías da Silva Borges

Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Brasil, byagoisaias@yahoo.com.br

Anna Marinella Carizzio Monteiro

Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Brasil, anna\_carizzio@hotmail.com

Diogo Faria de Sousa

Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Brasil, diogofs.13@gmail.com

Marta Pereira da Luz

Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Brasil, martapluz@gmail.com

**RESUMO:** A destinação final de resíduos sólidos tem sido um grave problema dos grandes centros urbanos. Quando feita de forma indevida, pode trazer danos ao meio ambiente e até mesmo à saúde pública. No caso de resíduos de construção e demolição (RCD), a situação não é diferente. Assim, alternativas viáveis do ponto de vista ambiental e econômico têm sido estudadas por diversas entidades com a finalidade de amenizar este problema. Dentre estas alternativas está a utilização de RCD como material de pavimentação. Para tanto, estes materiais devem atender exigências técnicas na fase de construção dos pavimentos e também durante a vida útil das pistas. Logo, faz-se necessário o monitoramento de trechos experimentais construídos com tais materiais, a fim de que o comportamento mecânico destes possa ser estudado, o que é a proposta deste trabalho. Para isso, foram realizadas sondagens nas camadas de base e sub-base, bem como no subleito, de um trecho experimental solo-RCD, utilizando um penetrômetro PANDA. Os resultados obtidos foram comparados com resultados de sondagens realizadas por outros pesquisadores, nos anos de 2006 e 2011. A partir daí, um histórico de tensões no pavimento foi delineado, chegando-se à conclusão que a camada de subleito foi a que mais ganhou resistência de ponta ao longo dos anos e que os resultados das sondagens apresentam relação direta com a umidade do solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sondagem, PANDA, RCD, camada, resistência de ponta.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos de construção e demolição (RCD) nos grandes centros urbanos tem sido causa de problemas de ordem ambiental, urbanística e até mesmo de saúde pública. Visando minimizar estes impactos, diversas atitudes têm sido tomadas, pensando não só na redução da geração, mas também na destinação correta destes.

Nesse âmbito, a utilização destes materiais em camadas estruturais de pavimentos surge como alternativa viável, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Assim, trechos

experimentais com finalidade de pesquisa tem sido construídos por instituições como USP, UFRJ, UFG e UnB, entre outras, objetivando a implementação e melhoria de técnicas que possibilitam a aplicação desses resíduos para os fins supracitados. Para tanto, faz-se necessário o monitoramento tanto dos materiais empregados na fase de construção quanto do pavimento construído.

Na fase de monitoramento do pavimento, o comportamento mecânico das camadas estruturais (base e sub-base, analisadas neste trabalho) é avaliado especialmente sob o ponto de vista do controle de compactação.

As técnicas convencionais de controle de compactação envolvem basicamente a determinação do teor de umidade e da massa específica aparente seca *in situ* para posterior comparação com resultados obtidos em laboratório (MARQUES *et al.*, 2014). Apesar de relativamente simples, esses ensaios requerem tempo, equipamentos específicos e certo grau de prática por parte de quem vai executá-los.

Objetivando facilitar o controle de compactação e o monitoramento do comportamento mecânico de camadas de solo, alguns aparelhos portáteis vêm sendo desenvolvidos desde a segunda metade do século XX. Entre eles, encontram-se o *Penetrometre Autonome Numerique Dynamique Assisté par Ordinateur* (PANDA) e o *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) (MARQUES *et al.* 2014).

Neste trabalho, utilizou-se o penetrômetro PANDA para o monitoramento das camadas estruturais de um trecho experimental solo-RCD a fim de que os resultados obtidos pudessem ser comparados com os de sondagens realizadas em outras idades do pavimento e um histórico de tensões de resistência de ponta fosse delineado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O Penetrômetro PANDA

O PANDA é um penetrômetro dinâmico portátil (o peso total é de 20 kg) de energia variável desenvolvido em 1991 pelo professor Roland Gourvés, em uma parceria da Universidade Politécnica Blaise Pascal (Clermont-Ferrand, França) com a empresa *Sol Solution* (COUSINEAU, 2012).

O equipamento é composto por hastes de 50 cm de comprimento e 14 mm de diâmetro, sendo que a primeira possui uma ponta cônica (que pode ser de 2, 4 ou 10 cm<sup>2</sup>) que é introduzida no solo por meio de golpes, de energia variável, de um martelo de 2 kg (MARQUES *et al.*, 2014).

Além das hastes e do martelo, o aparelho é composto por um sensor de penetração e uma central de aquisição e armazenamento de dados, que permite a leitura instantânea dos valores das

resistências de ponta obtidas durante a penetração das hastes no solo. A Figura 1 apresenta o esquema do equipamento.

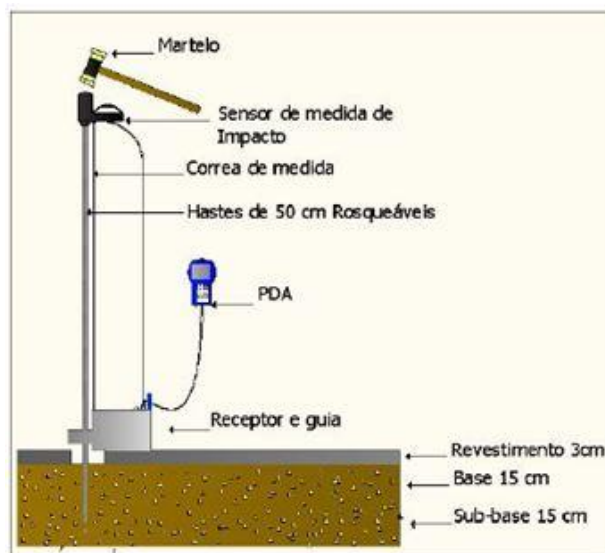


Figura 1. PANDA – Representação Esquemática (MARQUES *et al.*, 2014)

Cousineau (2012) afirma que a profundidade ideal de penetração no solo para cada golpe de martelo varia entre 2 mm e 2 cm.

Para cada golpe do martelo, são registradas a penetração e a resistência de ponta (*qd*) do solo, obtida pela fórmula dos Holandeses (AFNOR, 2012), conforme Equação 1.

$$q_d = E \frac{M}{Ae'(M + P)} \quad (1)$$

Em que:

M= Massa do martelo (kg);

E= Energia aplicada (J);

e'=Penetração da ponta (m);

A= Área da ponta cônica (m<sup>2</sup>);

P= Massa do conjunto de hastes (Kg).

Por se tratar de um equipamento relativamente novo (pouco mais de vinte anos) cuja tecnologia de fabricação é restrita a uma única empresa, a *Sol Solution*, o PANDA ainda tem seu uso pouco difundido no Brasil.

Na França, o uso do aparelho é regulamentado pela NF P 94-105 (AFNOR, 2012), o que favoreceu uma difusão significativa da técnica nesse país. BREUL *et al.* (2008), por exemplo, citam a utilização do penetrômetro em um estudo do risco de

liquefação em solos de regiões costeiras francesas.

No Chile, o PANDA tem sido utilizado em controle de compactação de barragens (VILLAVICENCIO *et al.*, 2012) e também em obras de fundações, para o cálculo da capacidade de carga do solo (SANHUEZA e VILLAVICENCIO, 2010).

No Brasil, onde não existe norma regulamentadora, a maioria dos trabalhos desenvolvidos atualmente com este aparelho procura estabelecer correlações com parâmetros tradicionalmente empregados em ensaios geotécnicos.

Seguindo esta linha de raciocínio, Diemer *et al.* (2014) correlacionaram valores da resistência de ponta com a tensão cisalhante máxima e também com o ângulo de atrito do solo compactado de um aterro; Cruz Jr. *et al.* (2014) procuraram estabelecer correlações entre  $q_d$ , umidade e sucção sem, no entanto, obter resultados satisfatórios; já Carvalho *et al.* (2006) obtiveram coeficiente de correlação linear de 0,97 entre  $q_d$  e umidade, demonstrando coerência satisfatória para os resultados obtidos em um trecho experimental solo-RCD.

Villavicencio *et al.* (2012) afirmam que o penetrômetro PANDA apresenta uma série de vantagens, quando comparado a outras técnicas empregadas no controle de compactação, tais como rapidez na execução do ensaio, leitura instantânea dos resultados, fácil repetitividade, baixos custos de operação e facilidade de transporte do equipamento.

De acordo com Marques *et al.* (2014), dentre as principais desvantagens e restrições de uso do aparelho, estão: profundidade de sondagem limitada a 7 m; resistência máxima do solo igual a 50 MPa; dificuldade de manutenção da verticalidade das hastes durante a cravação e atrito lateral significativo, quando utilizada a ponteira de 2 cm<sup>2</sup>.

## 2.2 O Trecho Experimental Solo-RCD Estudado

O trecho monitorado no presente trabalho foi construído em Goiânia – GO, nos meses de novembro e dezembro de 2003 e liberada para o tráfego em novembro de 2004, como parte de

um programa municipal de gerenciamento de resíduos sólidos (OLIVEIRA, 2007). Na Figura 2 é apresentado o mapa de localização do trecho estudado.



Figura 2. Localização do trecho em estudo.

De acordo com Oliveira (2007) a pista possui uma extensão total de 56,00 m; largura de 9,00 m; inclinação transversal de 3%; espessura da camada de sub-base igual a 15 cm (83% de agregados reciclados e 17% de solo argiloso) e base de 15 cm (75% de agregados reciclados e 25% de solo argiloso); revestimento em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) de 5 cm de espessura. Ainda de acordo com o autor, o número N determinado foi de  $5 \times 10^5$ .

Na Figura 3 é ilustrado o esquema da seção transversal da pista experimental.

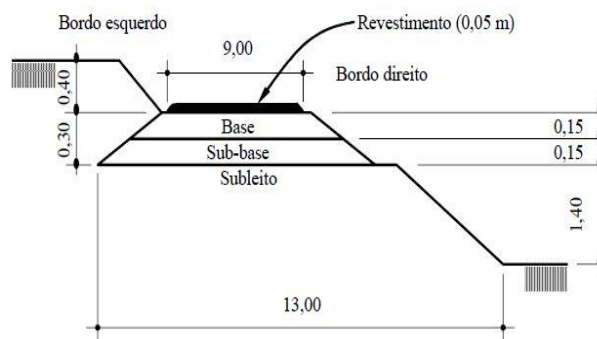


Figura 3. Seção Transversal da Pista (OLIVEIRA, 2007).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Sondagens PANDA

As sondagens com o PANDA foram realizadas em novembro de 2015 (ou seja, na idade de 132 meses de utilização do pavimento), quando a vida útil de projeto do trecho (120 meses) já estava ultrapassada.

Durante a realização das sondagens a camada de revestimento foi removida para facilitar a cravação das hastes, conforme Figura 4.



Figura 4. Remoção da camada de revestimento para cravação das hastes.

A ponteira utilizada foi a de 2 cm<sup>2</sup>, a mesma dimensão utilizada por outros pesquisadores em outras etapas de estudo deste trecho experimental.

Foram escolhidos pontos em que a camada de revestimento já se encontrava danificada, de modo que a necessidade de remoção de revestimento fosse mínima.

Na ocasião, duas sondagens foram realizadas, ambas no bordo direito da pista.

A profundidade de cravação das hastes foi igual a 70 cm nas duas sondagens, de modo a garantir que todas as camadas do pavimento fossem contempladas na penetração do PANDA.

#### 3.2 Histórico de Tensões do Pavimento

Após a realização das sondagens, os resultados

obtidos foram comparados com os resultados de outras duas pesquisas realizadas no mesmo trecho, em duas idades distintas do pavimento e que empregaram a mesma técnica.

Nessa etapa, foram comparados valores de resistência de ponta (qd). As comparações foram feitas com os dados obtidos por Oliveira (2007), para sondagens realizadas em maio de 2006 (18 meses de utilização do pavimento) e também por Marques (2012), para sondagens realizadas em 2011 (79 e 84 meses de utilização), possibilitando o traçado de um perfil de tensões de resistência de ponta ao longo da vida útil do pavimento.

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 5 são apresentados os gráficos das sondagens realizadas em 2015, denominadas sondagem W1 e sondagem W2. As camadas do pavimento estão indicadas nos gráficos.

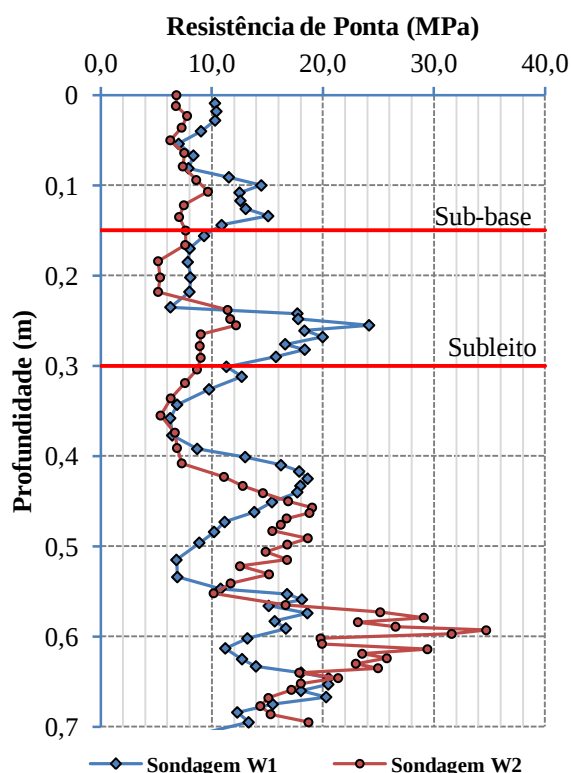


Figura 5. Comparação entre sondagens.

Os gráficos da Figura 5 evidenciam que, na sondagem W1, a maior resistência de ponta ocorreu na camada de sub-base, enquanto na sondagem W2 ocorreu no subleito do

pavimento.

Sondagens realizadas no mesmo trecho, em 2006, também utilizando ponteira de 2 cm<sup>2</sup>, apresentaram o comportamento exposto na Figura 6.

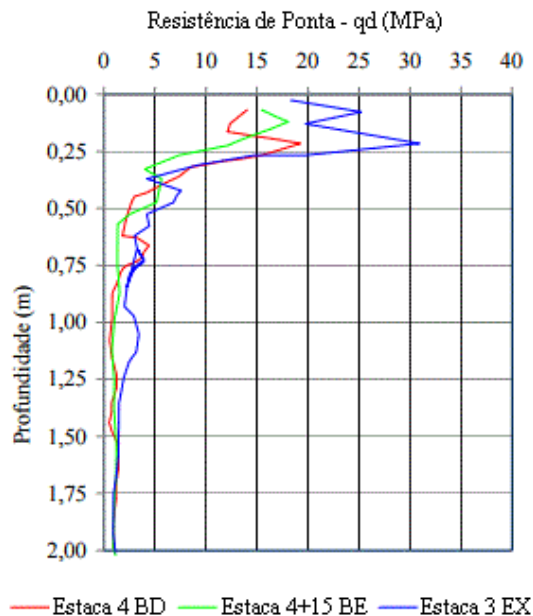


Figura 6. Sondagens realizadas em 2006 (Oliveira, 2007).

Em 2011, Marques (2012), ao investigar o pavimento, obteve os resultados apresentados nas Figuras 7 e 8, referentes aos períodos de seca e chuva, respectivamente.

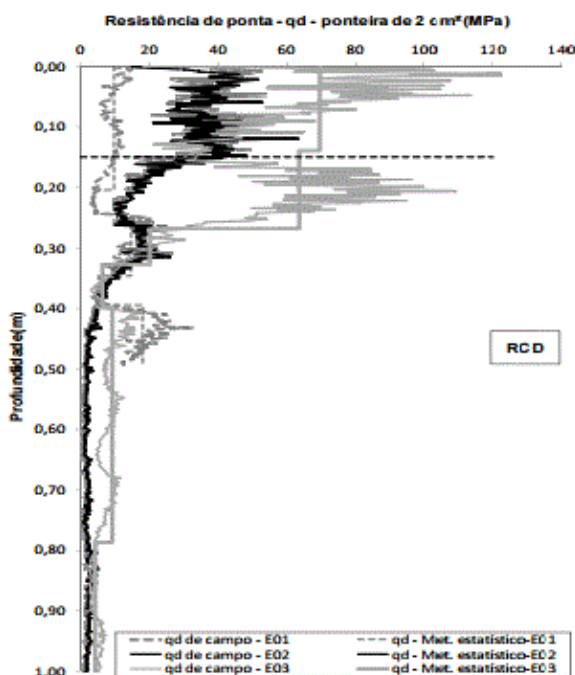


Figura 7. Sondagens no período de seca (MARQUES, 2012).

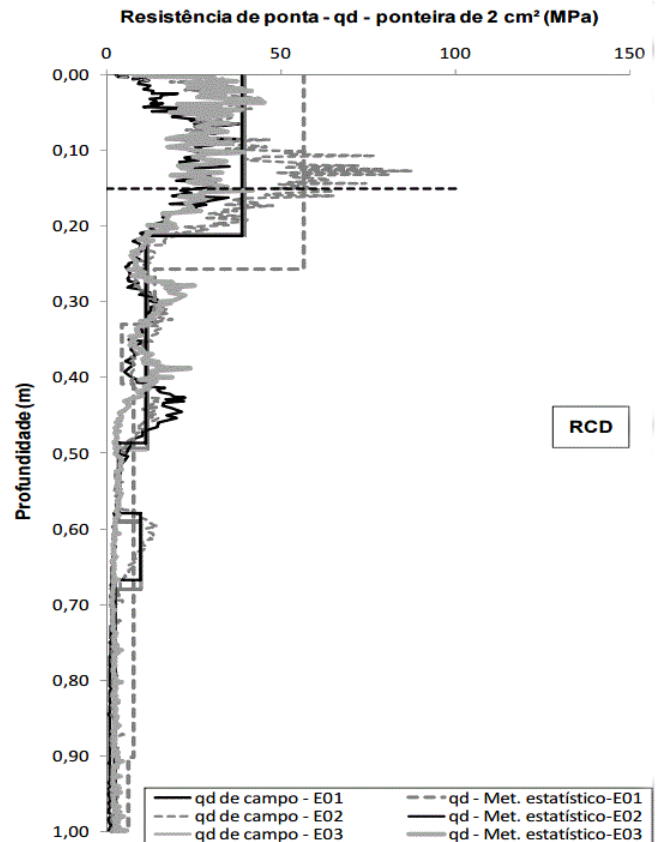


Figura 8. Sondagens no período de chuva (MARQUES, 2012).

Os valores das máximas e mínimas resistências de ponta das camadas de base e sub-base de RCD, e também do subleito do pavimento, registrados nos anos de 2006, 2011 e 2015, estão comparados na Tabela 1 e na Figura 9.

Tabela 1. Comparativo entre sondagens

| Camada      | Ponteira (cm <sup>2</sup> ) | Ano    | Resistência de Ponta (MPa) |              |
|-------------|-----------------------------|--------|----------------------------|--------------|
|             |                             |        | Valor Mínimo               | Valor Máximo |
| Base        | 2                           | 2006*  | 12,2                       | 25,0         |
|             |                             | 2011** | 2,3                        | 124,0        |
|             |                             | 2015   | 6,3                        | 15,1         |
| Sub-base    | 2                           | 2006*  | 5,5                        | 31,1         |
|             |                             | 2011** | 1,8                        | 110,0        |
|             |                             | 2015   | 5,2                        | 24,2         |
| Subleito*** | 2                           | 2006*  | 1,4                        | 11,1         |
|             |                             | 2011** | 0,7                        | 24,4         |
|             |                             | 2015   | 5,4                        | 34,7         |

\*OLIVEIRA (2007).

\*\*MARQUES (2012), considerando os períodos de seca e chuva.

\*\*\* Até a profundidade de 70 cm.

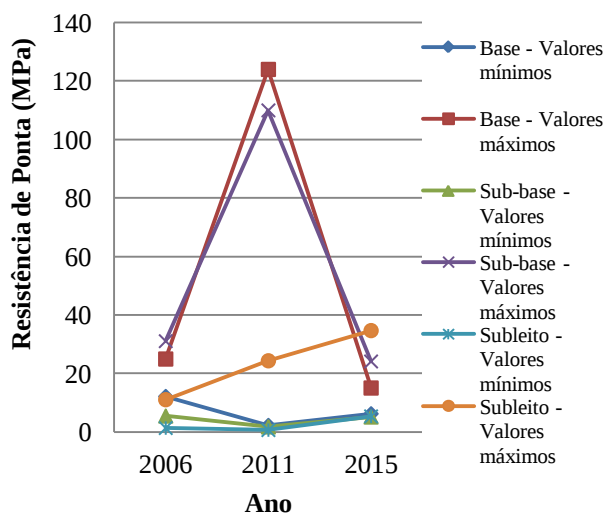


Figura 9. Valores máximos e mínimos das resistências de ponta – Comparativo por camadas.

Verifica-se no gráfico da Figura 9 que o subleito do pavimento foi a única camada a ter aumento de resistência de ponta tanto para os valores mínimos quanto para os máximos no período analisado. As camadas de base e sub-base apresentaram um ganho de resistência de ponta acentuada entre 2006 e 2011 e queda igualmente acentuada entre 2011 e 2015, quando comparados os valores máximos registrados no período. Em contrapartida, verifica-se que os valores mínimos registrados tiveram queda entre 2006 e 2011 e um ligeiro aumento entre 2011 e 2015.

Nas Figuras 10 e 11 são comparadas as máximas resistências de ponta nos períodos de chuva e seca, respectivamente.

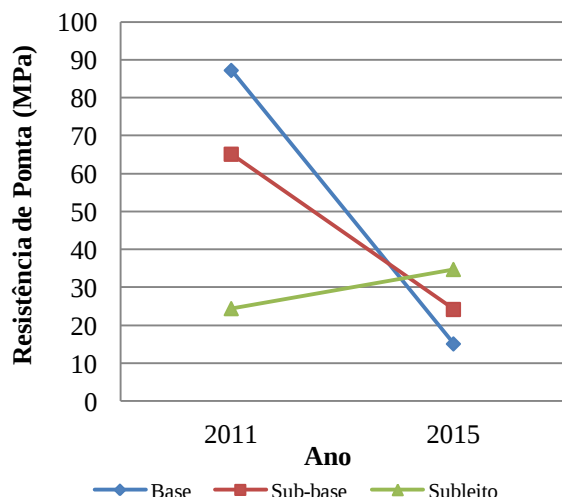


Figura 10. Comparativo de sondagens realizadas em período chuvoso.

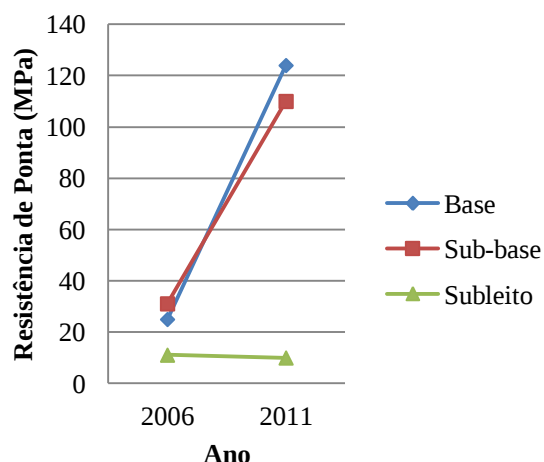


Figura 11. Comparativo de sondagens realizadas em período de seca.

Na Figura 12 os ganhos de resistência de ponta (em percentual) de cada camada são apresentados, tendo como referência as sondagens realizadas em 2006.

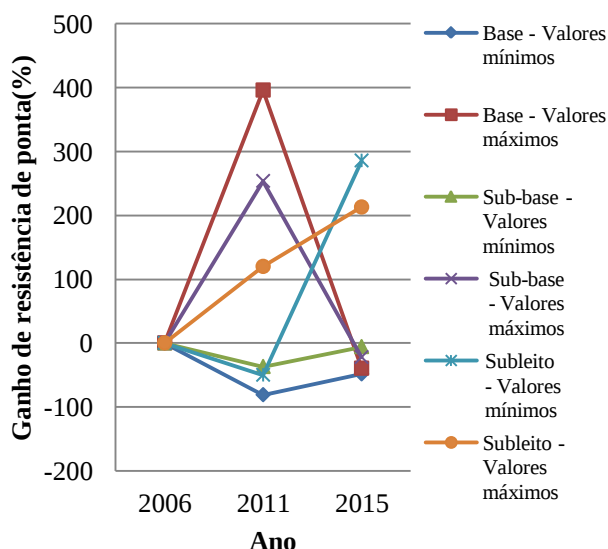


Figura 12. Ganho de resistência de ponta por camada.

No período de 2006 a 2011, conforme indicado na Figura 12, houve acréscimo percentual significativo das máximas resistências de ponta em todas as camadas do pavimento. Em contrapartida, quando os valores mínimos registrados são analisados, percebe-se que todas as camadas perderam resistência.

Quando o período comparado é o de 2006 a 2015, observa-se que apenas o subleito ganhou resistência de ponta, enquanto base e sub-base perderam resistência.

A análise das sondagens demonstrou que, no período estudado, apenas o subleito do pavimento passou por um processo contínuo de ganho de resistência.

A camada de sub-base, constituída de RCD, teve aumento de resistência no período de 2006 a 2011, mas quando o período comparado é o de 2006 a 2015, verificou-se que as variações foram pouco significativas.

A camada de base, também constituída de RCD, foi a que mais oscilou, perdendo resistência no período de 114 meses (2006 a 2015).

Deve-se ressaltar, no entanto, que as sondagens de 2006 foram realizadas em período de seca, e as de 2015, em período chuvoso.

A estação do ano tem caráter relevante nas medições realizadas com o PANDA, uma vez que influencia a umidade do solo. A estreita relação entre resistência de ponta e umidade é demonstrada por Carvalho *et al.* (2006) e corroborada pelo fato de que, quando as comparações são feitas apenas para os períodos chuvosos, as camadas mais superficiais foram as que mais perderam resistência; em contrapartida, quando comparadas as sondagens em período de seca, as camadas mais superficiais foram as que mais ganharam resistência (Figuras 10 e 11).

As sondagens realizadas por Marques (2012) apresentaram valores de máximas resistências de ponta consideravelmente superiores aos verificados nas outras duas sondagens. Embora as camadas de base e sub-base sejam constituídas pelo mesmo traço de RCD (ainda que em proporções diferentes), em toda a extensão da pista, a homogeneização deste material, ainda na fase de construção, teve desempenho abaixo do esperado, segundo Oliveira (2007). Isto, associado ao fato de que a varredura das medições do PANDA restringem-se à área da ponteira cônica (no caso, uma extensão de 2 cm<sup>2</sup>) explica as discrepâncias registradas.

Deve-se considerar ainda que, nesta pesquisa, a espessura das camadas de base e sub-base foi considerada constante ao longo dos anos (15 cm, conforme informado por Oliveira, 2007), desprezando-se o processo de

adensamento destas camadas.

## AGRADECIMENTOS

À Pró-reitoria de Pós-graduação e Pesquisa (PROPE) da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, pela viabilização deste projeto de Iniciação Científica.

À FURNAS Centrais Elétricas S.A., pelo empréstimo do penetrômetro PANDA para realização dos ensaios.

À professora Dra. Lilian Rezende (UFG), pela gentileza no fornecimento de dados de sondagens.

## REFERÊNCIAS

- AFNOR – Association Française de Normalisation (2012) NF P 94-105 – Contrôle de La qualité Du compactage – Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable – Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre – Exploitation des résultats – Interprétation. La Plaine Saint-Denis, França.
- Breul, P.; Haddani, Y.; Gourvès, R. (2008) On site characterization and air content evaluation of coastal soils by image analysis to estimate liquefaction risk. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 45, p. 1723 – 1732.
- Carvalho, J. C.; Fernandes, A. J. C.; Oliveira, J. C.; Gourvès, R. P. H.; Rezende, L. R. (2006) Avaliação do Pencilômetro PENCIL e do penetrômetro PANDA para uso em pavimentação. 37<sup>a</sup> Reunião anual de pavimentação e 11<sup>o</sup> Encontro Anual de Conservação Rodoviária. Goiânia.
- Cousineau, C. (2012) *Uso do PANDA em solos tropicais e solos alterados próximos à erosões*. Relatório de Projeto de Pesquisa. Universidade Federal de Goiás.
- Cruz Jr., A. J.; Gitirana Jr., G. F. N.; Sales, M. M.; Viana, P. M. F. (2014) Determinação do perfil de sucções a partir de amostras de SPT, e verificação de correlações entre Sucção, NSPT e PANDA para solos argilosos superficiais da cidade de Goiânia. 17<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia.
- Diemer, F.; Vargas, C. A. L.; Angelim, R. R. (2014) Comparação do número Nd ( $qd/\sigma_v0$ ) dinâmico com o ângulo de atrito de um solo compactado. 17<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia.
- Marques, M. O. (2012) *Avaliação de Trechos de Pavimentos Experimentais Construídos com Materiais Alternativos na Região Metropolitana de Goiânia*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, 331p.
- Marques, M. O.; Rezende, L. L.; Gitirana Jr., G. F. N. (2014) Análise Comparativa entre resultados do

Dynamic Cone Penetrometre (DCP) e do Penetrometre Autonome Numerique Dynamique Assisté par Ordinateur (PANDA) em trechos de pavimentos experimentais. *17º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Goiânia.

Oliveira, J. C. (2007) *Indicadores de Potencialidades e Desempenho de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Pavimentos Flexíveis*, Tese de Doutorado em Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 163 p.

Sanhueza, C. Villavicencio, G. (2010) Estimación de parámetros resistentes a partir Del ensayo de penetración PANDA y su aplicación en El cálculo de la capacidad de soporte y asentamientos Del suelo de fundación. *Revista de la construcción*. Vol. 9, N°1, p. 120 -131.

Villavicencio, G.; Breul, P.; Espinace, R.; Valenzuela, P. (2012). Contról de compactación com penetrómetro ligero en tranques de relaves, considerando su variabilidad material y estructural. *Revista de la construcción*. Vol. 11, N°1, p. 119-133.