



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

OTIMIZAÇÕES EM FUNDAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COM USO DE SOLO-CIMENTO.

Cescyle C. M. da Silva(*)
SNC-LAVALIN MARTE

Carlos F. Costa
SNC-LAVALIN MARTE

Osmar da C. Garcia
ABENGOA BRASIL

Gabriel Norberto Zarpellon
ABENGOA BRASIL

RESUMO

O presente trabalho apresenta as otimizações que podem ser conseguidas através do emprego de solo-cimento como elemento constituinte da fundação. Este artigo apresenta as características técnicas que o solo-cimento deve ter e as características do solo natural onde há bons resultados no emprego do solo-cimento.

Para melhor compreender os valores de parâmetros para projeto que poderiam ser empregados, foram feitas provas de carga em escala natural, para prever o comportamento de fundações típicas com emprego de solo-cimento. A presente experiência mostrou que a tensão admissível do solo-cimento e seu ângulo de espraio de tensões podem ser adotados com valores bastante maiores que os empregados usualmente, gerando assim economia significativa.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Fundações, Solo-cimento

1.0 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho propõe a utilização de solo cimento para otimização de custos em fundações. Apesar de ser de uma técnica milenar, a sua aplicação ainda é pouco explorada em um empreendimento grandioso do porte de uma linha de transmissão. A sua utilização proporciona economia e agilidade, principalmente quando se tem repetitividade de fundações ao longo do traçado da LT, o qual atravessa regiões geológico-geotécnicas muito distintas.

Para avaliação das características técnicas do solo-cimento como elemento de fundação foram feitas provas de carga em escala natural utilizando-se sapatas e blocos pré-moldados para ensaios de compressão e tração, respectivamente.

São apresentadas referências técnicas sobre o uso de solo-cimento, bem como suas facilidades de utilização, se agregando-se à estrutura de fundação e melhorando a interface para transferência das cargas para o solo.

Posteriormente é feita uma avaliação dos resultados e suas aplicações na interação da fundação com o terreno, além de conclusões e sugestões de novos estudos.

2.0 - REFERÊNCIAS DE PROCEDIMENTO

O solo-cimento é uma mistura íntima e bem proporcionada de solo com aglomerante hidráulico artificial denominado cimento Portland, de tal modo que haja uma estabilização do solo pelo cimento, melhorando as propriedades da mistura.

Vários fatores podem influir nas características do produto final e entre eles podemos citar: dosagem de cimento, natureza do solo, teor de umidade e compactação ou prensagem.

A coesão do solo-cimento é determinada pela constituição do cimento, sua finura, a quantidade de água e temperatura ambiente.

As impurezas que podem aparecer na água de mistura podem ser agressivas ao cimento (como por exemplo, sulfatos e matéria orgânica).

As quantidades mais adequadas dos componentes são determinadas através dos ensaios de laboratórios, onde se analisam corpos de prova, ou ensaios solicitados de acordo com os tipos de solo e cimento a serem usados.

Os ensaios de resistência à compressão podem ser executados em corpos de prova cilíndricos.

O solo é componente de maior proporção na mistura, devendo ser selecionado de modo que se possibilite o uso da menor quantidade possível de cimento. De maneira geral, os solos mais adequados são os que possuem as características apresentadas a seguir:

Passando na peneira 4,8 mm (n° 4)	100 %
Passando na peneira 0,075 mm (n° 200)	10% a 50%
Limite de liquidez	≤ 45%
Índice de plasticidade	≤ 18%

A plasticidade é a propriedade que os solos finos apresentam entre largos limites de umidade, de se submeterem a grandes deformações permanentes sem sofrerem rupturas, fissuramentos ou variações de volume apreciável.

O limite de liquidez de um solo é o teor de umidade que separa o estado de consistência líquido do plástico e para o qual o solo apresenta uma pequena resistência ao cisalhamento. O ensaio utiliza o aparelho de Casagrande, onde tanto o equipamento quanto o procedimento são descritos e normalizados pela NBR6459/82

Os solos que contenham quantidade de argila e silte superior a 50% em sua composição não são aconselháveis para emprego no solo-cimento. A argila é um componente importante porque, tendo propriedades aglomerantes, promove a resistência inicial do material e melhora a sua trabalhabilidade. Porém, os solos predominantemente argilosos podem provocar fissuras, trincas ou rachaduras no material depois de seco, em consequência da sua retração característica. Solos com grande quantidade de finos, geralmente, apresentam pouca resistência.

A areia caracteriza-se por sua boa resistência e, por ser um material inerte, contribui para maior estabilidade e resistência finais. Entretanto os solos com grande predominância de areia exigem mais tempo de espera para que adquiram suficiente resistência e possam suportar bem a compactação de outra camada de solo-cimento. A composição areia e silte melhoram a resistência inicial.

3.0 - OBJETIVO DO TRABALHO

Neste trabalho objetivou-se conseguir através de ensaios de prova de carga à compressão e à tração, um menor consumo de concreto através de uma maior taxa de compressão possível do solo-cimento.

4.0 - CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA E PEDOLÓGICA DA ÁREA

Os ensaios foram executados na Cidade de Bauru que se insere na Bacia sedimentar do Paraná no Grupo Bauru sob a formação Adamantina, dentro da bacia sedimentar do Paraná. Esta formação é caracterizada por bancos de arenitos de granulação normalmente fina, de cor rosada a bege com estratificação cruzada ocasional e cimentação carbonática localizada.

O que se percebe é que o solo da área de ensaio corresponde bem à descrição de solo formado a partir do intemperismo do arenito, de cor bege, avermelhada ou cinza e granulometria fina (areia fina a silte) comprovado através dos ensaios feitos no solo.

No local escolhido para a realização das provas de carga, foram executadas sondagens SPT, ensaios de caracterização, cisalhamento direto e compactação Proctor normal.

De acordo com sondagens SPT pode-se observar um perfil de solo bastante homogêneo com resistência entre 2 e 6 golpes para as profundidades de assentamento das fundações. Os ensaios de caracterização mostraram uma areia fina pouco siltosa, proporcionando condições ideais para os trabalhos com solo-cimento

5.0 - FUNDAÇÕES ESTUDADAS

5.1 Apresentação

Para esta campanha de prova de carga em escala natural procurou-se representar uma série típica de sapatas pré-moldadas para fundações de mastros de torres estaiadas e blocos pré-moldados (vigas “L”) para as fundações dos estais.

Foram projetadas seis fundações para serem ensaiadas, sendo três sapatas pré-moldadas para ensaios de compressão e três vigas pré-moldadas para ensaios à tração. As sapatas foram assentadas sobre base regenerado com solo-cimento Figura 1a) e os blocos pré-moldados foram envoltos em reaterro de solo-cimento (Figura 1b). Em ambos os casos, as peças em concreto armado têm dimensões menores do que aquelas necessárias para a sua estabilidade diante dos esforços aplicados. A aplicação de solo-cimento, aumenta significativamente a área de atuação, proporcionando estabilidade à fundação, sem que seja necessário o aumento do volume de concreto.

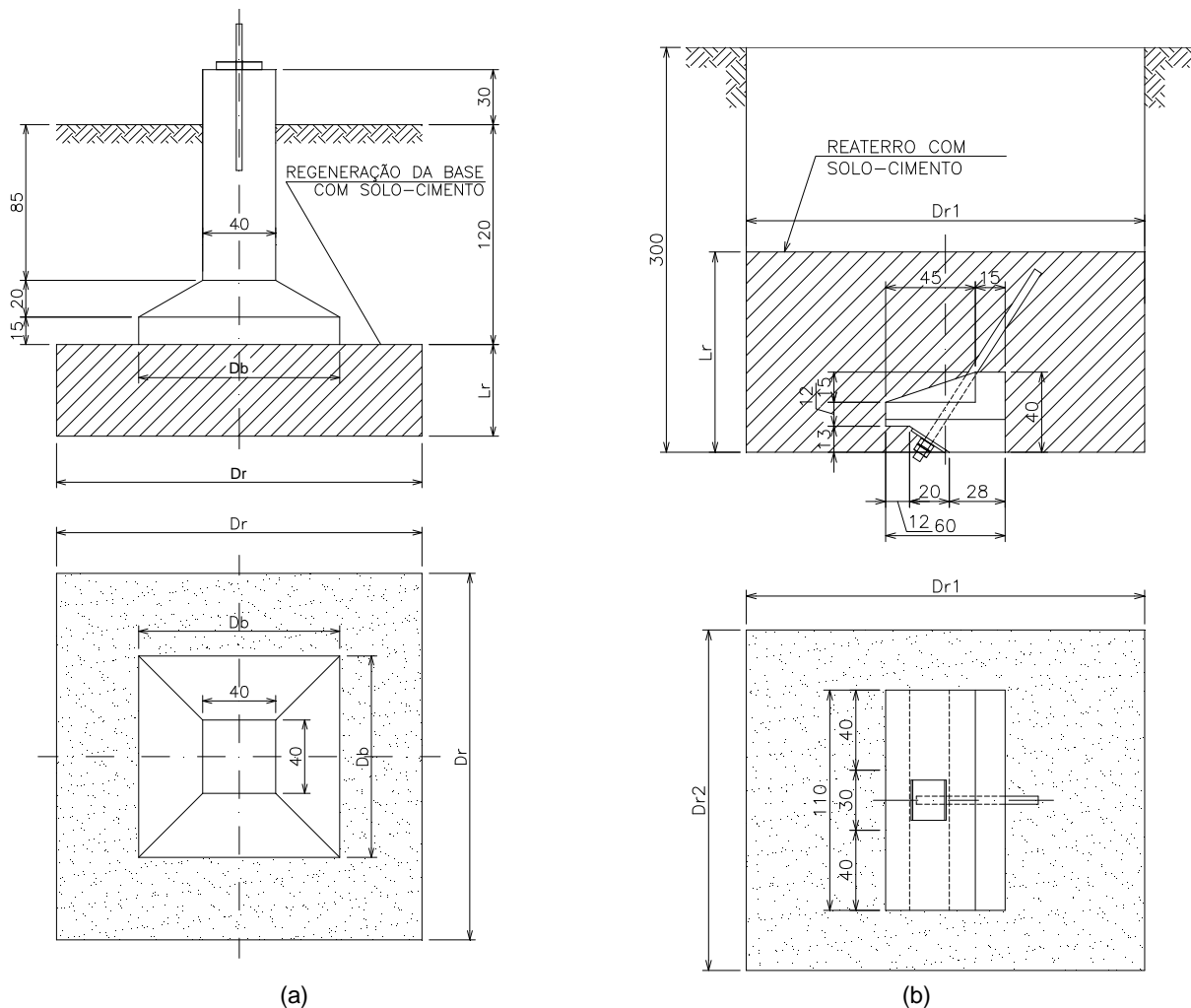


FIGURA 1 – a) Sapata típica pré-moldada com regeneração para mastro b) Bloco pré-moldados (vigas “L”) para as fundações dos estais

Os trabalhos de compactação foram executados com auxílio de equipamentos mecânicos do tipo “sapo”, em camadas de 20 cm de espessura, medidas antes da compactação, na umidade ótima.

5.2 Modelagem

O solo-cimento utilizado como material de regeneração teve proporção de 1:10 em sua mistura, ou seja, uma parte de cimento para dez partes de solo. Esta proporção consiste em um padrão usual em fundações de LT, visto que apresenta valores de resistência à compressão bastante satisfatórios e ainda se mostra como uma medida racional no que diz respeito ao consumo de cimento.

Tanto as sapatas quanto as vigas pré-moldadas foram projetadas com dimensões de base mínimas, de forma que a tensão aplicada à superfície regenerada pudesse exigir o máximo, em termos de resistência ao cisalhamento, do volume regenerado. Procurou-se reduzir o máximo possível as dimensões das fundações, a fim de se obter baixos volumes de concreto, e aplicando sobre elas uma tensão superior àquelas normalmente utilizadas em fundações desse tipo.

No item 6.1 será visto que se ensaiou as fundações com tensões de 450kN/m² a 720kN/m², quando o tradicional é utilizar uma tensão de 300kN/m², o que geraria uma sapata de 1,35m, com a mesma lógica de dimensionamento.

Para o caso das vigas pré-moldadas de concreto, normalmente se utiliza o solo-cimento sem função estrutural, isto é, servindo apenas como um substituto do reaterro na zona da viga, e nesta modelagem, o solo-cimento foi modelado como parte integrante da fundação. Assim as dimensões da peça foram todas reduzidas.

As dimensões da regeneração foram governadas por dois fatores: pela capacidade de carga do solo natural do local dos ensaios, o qual se apresentou com baixa resistência de acordo com sondagens SPT com solos arenosos finos levemente argilosos e NSPT entre 2 e 6 golpes, pela tendência de espraio das tensões de tração e compressão internas da regeneração.

Para a compressão variou-se as tensões admissíveis à compressão em três valores (450kN/m², 560kN/m² e 720kN/m²) e adotou-se ângulo de espraio de 45° (Figura 2a). Para o arrancamento admitiu-se variações do ângulo de espraio de tensões em três valores distintos (Figura 2b).

Os ensaios foram levados a 100% da carga de projeto, posteriormente descarregados até 10% da carga de projeto e recarregados até 150% da carga de projeto para compressão e 100% para tração.

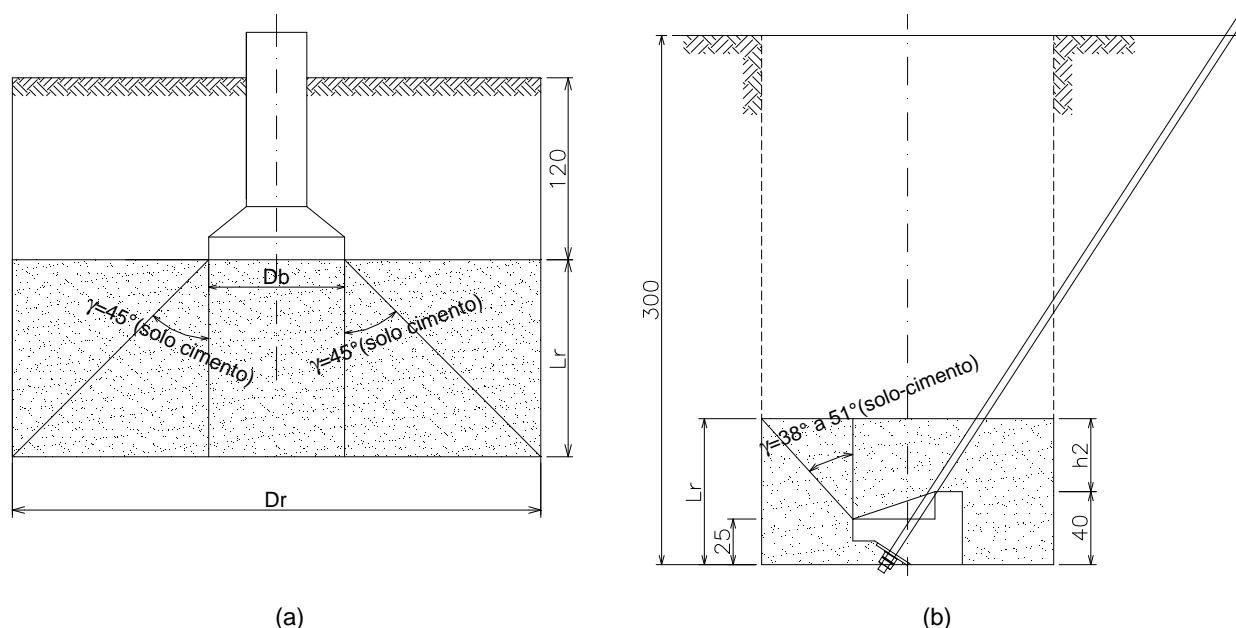


FIGURA 2 – Comportamento de espraio de tensões a) Sapata típica pré-moldada com regeneração para mastro b) Bloco pré-moldados (vigas “L”) para as fundações dos estais

6.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Resultados quanto à Compressão – Solo-cimento

A avaliação mais rígida quanto a taxa de compressão do solo-cimento se deu na sapata de base 0,9m x 0,9m. Nesta avaliação, a carga ultrapassou 50% da carga de dimensionamento, e mesmo assim não apresentou-se comportamento de ruptura. O que mostra que a taxa de compressão admissível de 720 kN/m² utilizada para esta sapata é um valor bastante razoável para projeto. Anteriormente a estes ensaios, nos projetos, o valor de tensão

admissível utilizada era de 300 kN/m², e após estes ensaios, já foi possível utilizar com segurança a taxa de 700kN/m², gerando assim economia significativa nas fundações.

Na Figura 3, apresentam-se os resultados de ensaios de prova de carga que mostram que não houve comportamento de ruptura, inclusive com descompressão e retorno ao comportamento de deslocamentos anterior.

Tabela 1 – Dados das sapatas ensaiadas com regeneração em solo-cimento

Sapata	Db (m)	Taxa de Projeto	Taxa de Ensaio	Carga de Projeto	Deslocamento axial
S1	0,90	720 kN/m ²	1080 kN/m ²	320 kN	0,84 mm
S2	1,00	560 kN/m ²	840 kN/m ²		1,32 mm
S3	1,10	450 kN/m ²	675 kN/m ²		2,26 mm

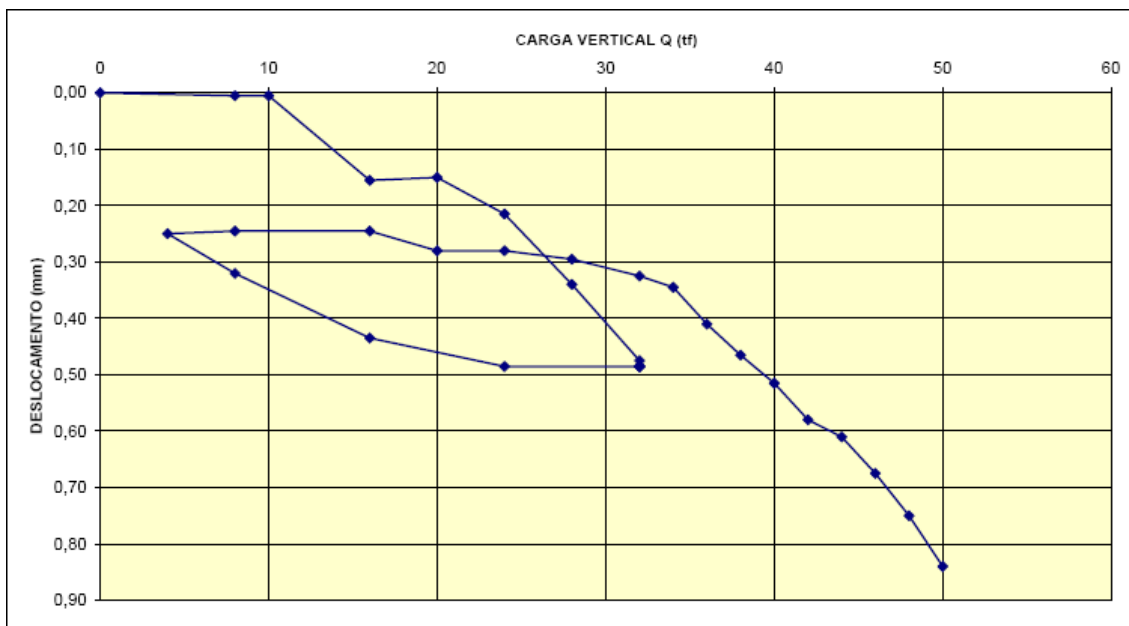


FIGURA 3 – Carga Vertical de Compressão x Deslocamento axial em sapata S1

6.2 Resultados quanto à Tração – Solo-cimento

As estruturas ensaiadas com ângulo de espraio de tensões de 51° (V3) e 38° (V1) tiveram comportamento semelhante e com uma deformação inicial (na faixa de 72mm) muito alta. Este tipo de deslocamento parece ser um deslocamento ou acomodação do equipamento de tração e não do estai em relação ao equipamento. Os deslocamentos posteriores ao segundo estágio de carga foram baixos e mínimos com a chegada da carga máxima, não apresentando assim sinais de ruptura. A estrutura intermediária V2, não apresentou deformação muito grande até o segundo estágio de cargas o que parece mais adequado. Isso mostra que no atirantamento dos estais, deve-se ter um cuidado maior em relação às deformações durante a aplicação de carga.

Como as peças apresentaram comportamento carga x deslocamento satisfatório, mostrou-se que é possível usar um ângulo de espraio de tensões de arrancamento de 51°. Como o ângulo de 51° é bem superior ao ângulo de atrito dos solos que normalmente se utiliza, forma-se então uma cunha de arrancamento no interior do conjunto pré-moldado e solo-cimento bem maior, gerando economia considerável.

A seguir apresentam-se os resultados de ensaios de prova de carga que levam às conclusões acima, nas Figura 4, Figura 5 e Figura 6. A tabela 2 apresenta um resumo dos resultados, Os deslocamentos totais adotados, são os deslocamentos após o segundo estágio de carga.

Tabela 2 – Dados dos blocos pré-moldados com regeneração em solo-cimento

Viga	Ângulo de espraio de tensões	Carga de Projeto	Deslocamento
V1	38°	170 kN	4,15mm
V2	45°		4,55mm
V3	51°		7,69mm

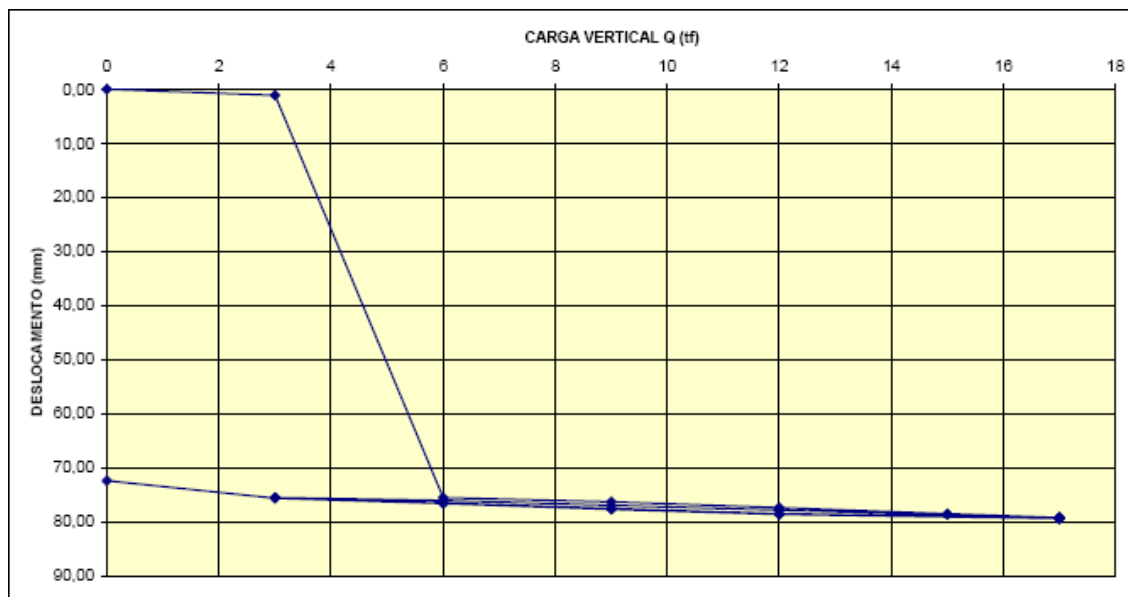


FIGURA 4- Carga Vertical de Tração x Deslocamento axial em bloco pré-moldado com solo-cimento V1

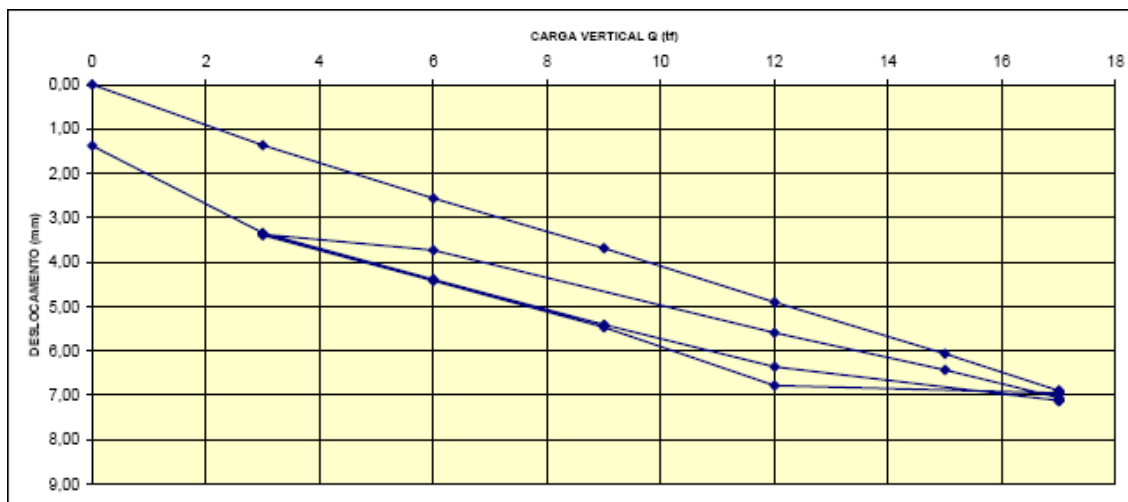


FIGURA 5 - Carga Vertical de Tração x Deslocamento axial em bloco pré-moldado com solo-cimento v2

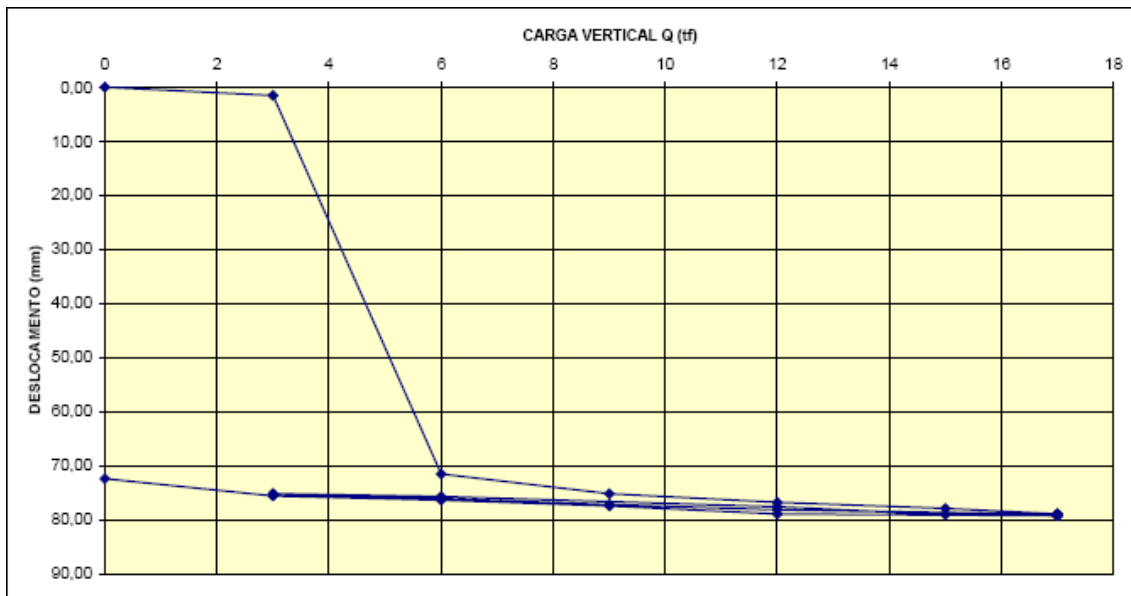


FIGURA 6 - Carga Vertical de Tração x Deslocamento axial em bloco pré-moldado com solo-cimento V3

7.0 - CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios são considerados satisfatórios e o objetivo proposto para os mesmos foi alcançado. Os resultados indicaram que é possível a adoção de taxas de tensões admissíveis à compressão no solo-cimento maiores que as usualmente adotadas em LT, assim como, um ângulo de espraio de tensões maior. Isso favoreceu tanto o dimensionamento à compressão quanto o dimensionamento ao arrancamento, e como resultado final, fundações, mais econômicas.

As cargas aplicadas foram limitadas pela capacidade de carga estrutural do equipamento utilizado nos ensaios. Os baixos deslocamentos obtidos mostram que as cargas aplicadas ainda poderiam ser maiores.

A medida que novos ensaios sejam realizados as taxas de compressão adotadas poderão ser reavaliadas visando uma otimização das mesmas. Os baixos deslocamentos obtidos sugerem que se possa otimizar ainda mais, avançando nessa linha de pesquisa.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AIO,D.;SILVA,J.P.N. et al (2004); Estudo da Influência do Uso do Cimento ARI nas Propriedades do Solo-Cimento Auto-Adensável - WORKSHOP - CONCRETO: DURABILIDADE, QUALIDADE E NOVOS MATERIAIS, Ilha Solteira – SP
- (2) ALBIERO,J.H., CINTRA,J.H. et al (1993);Solos do Interior de São Paulo, São Carlos-SP
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Determinação do limite de liquidez - NBR 6459. Brasil.
- (4) GRANDE, F.M.(2003); Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa. – Dissertação de Mestrado – USP - São Carlos -SP

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Cescyle Costa Medeiros da Silva
Nascida em Itamonte-MG em 31/07/1983
Graduada em Engenharia Civil pela UFRN em 2006
Mestre em Engenharia Civil/Geotecnia pela COPPE/UFRJ em 2008
Empresa:SNC-Lavalin Marte desde 2008



Carlos Ferreira Costa
Nascido em Niterói-RJ em 04/11/1950
Graduado em Engenharia pela UFF em 1973
Empresa:SNC-Lavalin Marte desde 2005



Osmar da Cunha Garcia
Nascido em Rio de Janeiro-RJ em 09/09/1970
Graduado em Engenharia Civil pela UERJ em 1999
Mestre em Engenharia Civil/Geotecnia pela COPPE/UFRJ em 2005
Empresa:ABENGOA BRASIL desde 2011

Gabriel Norberto Zarpellon
Nascido em Buenos Aires
Graduado em Engenharia Elétrica
Empresa:ABENGOA BRASIL desde 1993