

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP

FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - FEAGRI

UTILIZAÇÃO DE SOLO-CIMENTO EM ESTACAS APILOADAS  
PARA OBRAS DE PEQUENO PORTE

por

ANTONIO ANDERSON DA SILVA SEGANTINI

Paracer

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Antonio Anderson da Silva Segantini e aprovada pela Comissão Julgadora em 21 de outubro de 1994. Campinas, 21 de novembro de 1994

Orientador:

Prof. Dr. David de Carvalho

*Alto*  
Presidente da banca

CAMPINAS

Estado de São Paulo

Brasil

Setembro - 1994



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - FEAGRI

UTILIZAÇÃO DE SOLO-CIMENTO EM ESTACAS APILOADAS  
PARA OBRAS DE PEQUENO PORTE

por

*ANTONIO ANDERSON DA SILVA SEGANTINI* *n/37*

*ENGENHEIRO CIVIL*

---

Orientador:

Prof. Dr. David de *Carvalho*

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Construções Rurais.

CAMPINAS

Estado de São Paulo

Brasil

Setembro - 1994

---

A minha esposa

Maria Helena

e a meus filhos

Daniela

e

André

ternos companheiros

como forma de reconhecimento

pela compreensão e incentivos prestados

Agradecimentos

Ao Professor Dr. David de Carvalho  
pela orientação, amizade, incentivos e ensinamentos recebidos;

Aos Professores Doutores Milton Dall 'Aglia Sobrinho e Mônica Pinto Barbosa  
Chefes do Departamento de Engenharia Civil da Unesp em Ilha Solteira-SP  
pelo apoio recebido;

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)  
pela bolsa de auxílio deslocamento concedida;

À FEIS/UNESP, FEAGRI/UNICAMP e EESC/USP  
pelo apoio recebido;

---

Aos técnicos Ronaldo, Mário, Cavassano, Gilson, Silvio e Ozias  
pela inestimável ajuda durante a realização dos ensaios de campo;

Aos Professores Wilson Manzoli Jr, Stélio Maia Menezes e Adriano Souza  
pelo auxílio na execução dos ensaios de campo;

Ao Professor Geraldo de Freitas Maciel  
pela colaboração prestada;

Aos Engenheiros  
Antonio Carlos Leister de Castro, Roberto Cardieri Ferreira, Wandelely Ognebene,  
Jaime Elias Escudeiro Peres, Aloisio Celeri e Flávio Moreira Salles,  
e aos técnicos do Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP  
pelo auxílio na execução de ensaios de laboratório e de campo;

Ao Sr. Valdeir  
fotógrafo da Unesp pela dedicação e serviços prestados; e

a todas as pessoas que,  
de alguma forma, contribuíram para que esse trabalho pudesse ser realizado.

## CONTEÚDO

	Página
LISTA DE FIGURAS .....	<i>viii</i>
LISTA DE QUADROS .....	<i>x</i>
LISTA DE SÍMBOLOS .....	<i>xii</i>
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	<i>xiv</i>
RESUMO .....	<i>xv</i>
ABSTRACT.....	<i>xvi</i>
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	5
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	7
3.1. Solo-cimento.....	7
3.1.1. Definição e Histórico .....	7
3.1.2. Classificação .....	10
3.1.3. Critérios para a escolha do tipo de solo a ser utilizado .....	10
3.1.4. Critérios de dosagem .....	13
3.2. Sistemas de aplicação .....	16
3.2.1. Fundações .....	16
3.2.2. Barragens de terra .....	20

3.2.3.	Outras aplicações .....	21
3.3.	Outros processos de estabilização .....	22
4.	MATERIAL E MÉTODOS .....	24
4.1.	Introdução .....	24
4.2.	Materiais .....	27
4.2.1.	Concreto .....	27
4.2.2.	Solo componente do solo-cimento .....	29
4.2.3.	Solo-cimento compactado .....	30
4.2.4.	Solo-cimento plástico .....	32
4.2.5.	Cimento .....	33
4.2.6.	Água .....	34
4.2.7.	Aço .....	34
4.3.	Métodos .....	35
4.3.1.	Estacas de reação .....	35
4.3.2.	Estacas de concreto .....	36
4.3.3.	Estacas de solo-cimento compactado .....	37
4.3.4.	Estacas de solo-cimento plástico .....	42
4.3.5.	Controle de qualidade .....	43
4.3.6.	Sistema de reação .....	45
4.4.	Equipamentos .....	48
4.4.1.	Macaco .....	48
4.4.2.	Célula de carga .....	48
4.4.3.	Indicador de deformação .....	48
4.4.4.	Rótula .....	49

4.4.5.	Relógios comparadores .....	49
4.4.6.	Sistema de referência.....	49
4.4.7.	Sistema de aplicação do carregamento .....	50
4.4.8.	Realização das provas de carga .....	50
5.	RESULTADOS .....	53
5.1.	Caracterização do subsolo local .....	53
5.2.	Solo componente do solo-cimento .....	55
5.3.	Solo-cimento .....	57
5.4.	Cimento .....	58
5.5.	Controle tecnológico dos materiais .....	60
5.6.	Provas de carga .....	63
6.	ANÁLISE E DISCUSSÃO .....	76
6.1.	Técnica construtiva .....	76
6.1.1.	Solo-cimento compactado .....	76
6.1.2.	Solo-cimento plástico .....	80
6.2.	Provas de carga .....	82
6.2.1.	Estacas de concreto .....	82
6.2.2.	Estacas de solo-cimento compactado .....	84
6.2.3.	Estacas de solo-cimento plástico .....	87
7.	CONCLUSÕES .....	89
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	92

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Critérios para a escolha do tipo de solo a ser utilizado .....	12
2. Localização da área reservada para ensaios de campo .....	24
3. Localização da cidade de Ilha Solteira-SP .....	25
4. Equipamento utilizado na abertura dos furos das estacas .....	36
5. Detalhe das estacas de reação e das estacas de solo-cimento .....	37
6. Inspeção visual "in situ" da estaca "piloto" .....	38
7. Maseira utilizada para misturar os componentes .....	39
8. Controle da umidade através do "Speed-test" .....	40
9. Aspecto de uma das estacas de solo-cimento compactado .....	41
10. Execução do bloco de transição .....	41
11. Controle da umidade através do "Slump-test" .....	42
12. Rompimento de corpos-de-prova de concreto .....	44
13. Disposição das estacas no campo de provas .....	46
14. Detalhe da viga de reação .....	47
15. Detalhe dos sistema de referência e posicionamento dos relógios ..	50
16. Sistema para a aplicação de carga .....	51
17. Ensaio SPT - Standart Penetration Test .....	54

18. Ensaio CPT - Cone Penetration Test .....	54
19. Curva granulométrica do solo utilizado .....	56
20. Curva granulométrica do solo-cimento após a mistura .....	57
21. Prova de carga rápida realizada na estaca de concreto C1 .....	72
22. Prova de carga lenta realizada na estaca de concreto C2 .....	72
23. Prova de carga lenta realizada na estaca de solo-cimento compactado SCC1 .....	73
24. Prova de carga lenta realizada na estaca de solo-cimento compactado SCC2 .....	73
25. Prova de carga rápida realizada na estaca de solo-cimento compactado SCC3 .....	74
26. Prova de carga rápida realizada na estaca de solo-cimento plástico SCP1 .....	74
27. Prova de carga lenta realizada na estaca de solo-cimento plástico SCP2 .....	75
28. Prova de carga rápida realizada na estaca de solo-cimento plástico SCP3 .....	75

## LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1. Critérios para a seleção de solos quanto à granulometria .....	11
2. Teor de cimento indicado para o ensaio de compactação .....	14
3. Teor de cimento requerido por solos siltosos e argilosos .....	15
4. Teor de cimento médio requerido por solos arenosos .....	16
5. Análise química da água utilizada .....	34
6. Caracterização do subsolo local .....	53
7. Caracterização do solo utilizado .....	56
8. Caracterização do solo-cimento .....	57
9. Resistência à compressão simples do solo-cimento .....	59
10. Análise física do cimento .....	59
11. Análise química do cimento .....	60
12. Controle tecnológico do concreto utilizado nas estacas de reação ....	61
13. Controle tecnológico do concreto utilizado nas estacas de concreto	62
14. Controle tecnológico do solo-cimento aplicado nas estacas de solo-cimento compactado .....	62
15. Controle tecnológico do solo-cimento aplicado nas estacas de solo-cimento plástico .....	63

16. Prova de carga rápida realizada na estaca de concreto C1 .....	64
17. Prova de carga lenta realizada na estaca de Concreto C2 .....	65
18. Prova de carga lenta realizada na estaca de solo-cimento compactado SCC1 .....	66
19. Prova de carga lenta realizada na estaca de solo-cimento compactado SCC2 .....	67
20. Prova de carga rápida realizada na estaca de solo-cimento compactado SCC3 .....	68
21. Prova de carga rápida realizada na estaca de solo-cimento plástico SCP1 .....	69
<del>22. Prova de carga lenta realizada na estaca de solo-cimento plástico SCP2 .....</del>	<del>70</del>
23. Prova de carga rápida realizada na estaca de solo-cimento plástico SCP3 .....	71
24. Valores de carga última estimados e valores obtidos em provas de carga .....	85

## LISTA DE SIMBOLOS

CPT	-	Sondagem a penetração estática
<b>fu</b>	-	Resistência lateral unitária (kPa)
<b>fu<sub>f</sub></b>	-	Resistência de ponta unitária obtida por fórmulas empíricas (kPa)
<b>fu<sub>pc</sub></b>	-	Resistência de ponta unitária obtida em provas de carga (kPa)
IP	-	Índice de plasticidade
L	-	Profundidade (m)
LL	-	Limite de liquidez (%)
LP	-	Limite de plasticidade (%)
LRi	-	Leitura de recalques através de relógio comparador (mm)
LRm	-	Média de leitura de recalques (mm)
NA	-	Cota do lençol freático (m)
Q	-	Carga aplicada (kN)
<b>q<sub>ponta</sub></b>	-	Resistência de ponta unitária (kPa)
<b>qu<sub>f</sub></b>	-	Resistência última de ponta obtida por fórmulas empíricas (kPa)
<b>qu<sub>pc</sub></b>	-	Resistência última de ponta obtida em provas de carga
<b>Qu</b>	-	Carga última (kN)
<b>Qu<sub>f</sub></b>	-	Carga última obtida por fórmulas empíricas (kN)

<b>Qu<sub>pc</sub></b>	-	Carga última obtida em provas de carga (kN)
Re	-	Recalque (mm)
RE	-	Estaca de reação do tipo escavada
R	-	Estaca de reação do tipo apiloada
RI	-	Resistência lateral (MN/m <sup>2</sup> )
Rp	-	Resistência de ponta (MN/m <sup>2</sup> )
Rt	-	Resistência total (kN)
SCC	-	Estaca de solo-cimento compactado
SCP	-	Estaca de solo-cimento plástico
SPT	-	Sondagem a percussão
ST	-	Sondagem a trado
T	-	Estaca de concreto para ensaio à tração
ρ <sub>s</sub>	-	Massa específica dos grãos do solo (g/cm <sup>3</sup> )
w	-	Teor de umidade natural (%)
w <sub>ot</sub>	-	Teor de umidade ótima (%)
γ <sub>s,máx</sub>	-	Peso específico aparente seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )
#	-	Malha de peneira para ensaio de granulometria
σ <sub>r</sub>	-	Tensão de ruptura (MPa)
σ <sub>r,m</sub>	-	Tensão de ruptura média (MPa)
Ø	-	Diâmetro (m)

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BNH	Banco Nacional da Habitação
CEBRACE	Centro Brasileiro de Construções e Equipamentos Escolares
CEPED/BA	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CONDER	Companhia de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Salvador
ICPA	Instituto del Cemento Portland Argentino
OEA	Organização dos Estados Americanos
PCA	Portland Cement Association
PMC	Prefeitura Municipal de Camaçari
URBIS	Companhia de Urbanização da Bahia

## RESUMO

Esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a utilização do solo-cimento em fundações feitas em estacas. Primeiramente, o solo utilizado como componente da mistura foi classificado, tendo em vista a determinação dos índices físicos, dos limites de consistência e da composição granulométrica. Através do ensaio de compactação foram obtidos, posteriormente, os valores do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima. O teor de cimento adotado, da ordem de 8% em peso, foi escolhido considerando-se, por um lado, a larga experiência adquirida pelo Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP e, por outro lado, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples e as cargas previstas para serem aplicadas na cabeça das estacas.

Este trabalho foi realizado em Ilha Solteira, onde as características do solo superficial são representativas do tipo de solo que recobre mais de 50% da área do Estado de São Paulo. Para a caracterização do subsolo local foram executadas sondagens de penetração estática (CPT - Cone Penetration Test), à percussão (SPT - Standard Penetration Test) e a trado (ST - Sondagem a Trado).

Foram confeccionadas oito estacas em escala natural, sendo duas de concreto convencional, três de solo-cimento plástico e três de solo-cimento compactado. O solo-cimento plástico foi aplicado de forma análoga à que se emprega em estacas convencionais de concreto. No caso das estacas de solo-cimento compactado, foram seguidas as recomendações do Manual de construção com solo-cimento, publicado pelo CEPED (1984).

Essas estacas foram submetidas a provas de carga e os resultados obtidos mostraram tratar-se de um material tecnicamente viável para ser aplicado em elementos de fundações de obras de pequeno porte.

## **ABSTRACT**

---

The purpose of this work is to verify the applicability of the soil cement in piles foundation. Firstly, the physical properties of the soil component, the Atterberg limits and also, grain-size distribution were determined. Afterwards, from the moisture density Test, the values of maximum dry unit weight and optimum moisture content were obtained. The cement content, the order of 8%, was adopted from, on the one hand, of the large experience of the Civil Engineering Laboratory of the CESP and, on the other hand, from the experimental results of the compressive strength and load carrying capacity in the head piles.

This work was realized in Ilha Solteira city, where it finds a soil which the characteristics are, practically, the same found in more the 50% of the São Paulo region. In order to investigate in detail the local subsoil, the Standart Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT) and Auger Boring Test were performed.

It was prepared eight piles in natural scale: two piles was constructed in conventional concrete, three piles in plastic soil cement and three piles in compacted soil cement. The use of the plastic soil cement was done of the same way as used in concrete piles. In the case of compacted soil cement, the regulations published Construction of Soil Cement Manual, published by CEPED (1984), were adopted .

These piles foundations were submitted a load test. The results pointed up the technical viability of this material to be used in piles foundations in the small edifications case.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A grande maioria das edificações existentes na região oeste do Estado de São Paulo, numa faixa que vai desde a margem esquerda do Rio Paraná até a cidade de São Carlos-SP, abrangendo mais de 50% da área do estado, tem a sua fundação executada em estacas moldadas "in loco". Adota-se esse procedimento em razão do tipo de solo que recobre essa região, ou seja, solo arenoso fino laterítico, cuja principal característica é a sua elevada colapsibilidade quando, sob a ação de carregamentos, é submetido a variações bruscas de umidade. Nessa região, empregam-se geralmente três tipos de estacas, quais sejam: estacas do tipo broca, feitas com trado mecânico ou manual; estacas do tipo "Strauss"; e, mais recentemente, estacas apiloadas, perfuradas através da ação da queda de um pilão.

Em obras de pequeno e médio porte, onde os carregamentos geralmente são da ordem de 40 kN a 100 kN por estaca, verificou-se que em vez de concreto, existe a possibilidade de se utilizar o solo-cimento como material componente. Trata-se de um material já conhecido no meio técnico e que apresenta características técnicas suficientes para o bom desempenho da fundação. Diversos trabalhos

onde se utilizam o solo-cimento como material alternativo já foram executados no Brasil e no exterior , principalmente em obras de pavimentação de estradas e aeroportos. Existem também citações de seu emprego em habitações (tijolos, blocos e paredes monolíticas), proteção de taludes em obras de barragem de terra (Usina Hidrelétrica de Rosana e Porto Primavera, no Pontal do Paranapanema), etc.

O custo de produção com materiais, mão-de-obra e encargos sociais do solo-cimento gira em torno de 30% a 40% se comparado ao custo de produção do concreto. Conseqüentemente, a redução de custos para a execução de estacas de solo-cimento seguirá essa mesma proporção. Entretanto, ao se considerar os custos indiretos, tais como, consumo de energia, mão-de-obra e transporte na produção dos materiais componentes, o custo geral de produção do solo-cimento será ainda inferior aos índices mencionados. Vale ressaltar que na região citada predominam solos que atendem plenamente aos requisitos necessários à estabilização com cimento. Portanto, na maioria das vezes, a produção do solo-cimento poderá ser feita com aproveitamento de solos do próprio local, reduzindo-se ainda mais os custos. Caso o solo do local da construção não atenda aos requisitos para a estabilização com cimento, fato que normalmente ocorre quando a sua granulometria não se encontra dentro da faixa ideal, existe a possibilidade de se efetuar correções, seja pela adição de areia ou pela mistura com outros tipos de solos mais arenosos. Existem diversas outras regiões no Brasil que apresentam características semelhantes e, muitas vezes, essas regiões encontram-se carentes de materiais convencionais (areia lavada, pedra britada,

seixo rolado), onde acredita-se que seja também possível a aplicação de estacas de solo-cimento, fato esse que amplia consideravelmente a abrangência desse trabalho.

A principal desvantagem do solo-cimento como material de construção, segundo alguns autores, é a grande variedade de tipos de solos, implicando necessariamente na execução de ensaios para a caracterização das jazidas de empréstimo. Por outro lado, tratam-se de ensaios simples, normalmente rotineiros em qualquer laboratório. Consistem basicamente de ensaios visando a classificação dos solos, quais sejam: determinação da granulometria, índices físicos e compactação.

Por todas essas razões, pretendeu-se neste trabalho estudar a capacidade de carga de estacas apiloadas. Foram realizadas provas de carga em oito estacas, divididas em grupos constituídos por três de solo-cimento compactado, três de solo-cimento plástico e duas de concreto simples. Executou-se, preliminarmente, uma estaca de solo-cimento compactado, denominada "estaca piloto". Essa estaca serviu de base para o treinamento dos operários envolvidos na execução do serviço.

Para garantir a confiabilidade dos resultados, foram tomadas ainda as seguintes providências: realização de ensaios penetrométricos do tipo SPT - Standart Penetration Test e CPT - Cone Penetration Test, visando o reconhecimento do subsolo local; caracterização dos principais componentes empregados; controle tecnológico do concreto

e do solo-cimento aplicado, com retirada das amostras durante a sua aplicação; e escavação para inspeção visual "in situ" da estaca-piloto.

A caracterização do subsolo da área estudada foi feita através da coleta do material extraído de um furo feito a trado. Os ensaios de caracterização foram feitos metro a metro até a profundidade de 12,00 metros. Esses ensaios foram executados pelo Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP em Ilha Solteira-SP.

As provas-de-carga foram conduzidas até à ruptura. A leitura dos carregamentos e dos recalques foi obtida através da instrumentação instalada no topo dos elementos. Foram colocadas "bolachas" de isopor com 0,10 m de espessura e 0,20 m de diâmetro na ponta de cinco estacas, sendo duas para o grupo das estacas de solo-cimento plástico, duas para o grupo das estacas de solo-cimento compactado e uma para as estacas de concreto. Adotou-se esse procedimento com o objetivo de se obter leituras apenas do atrito lateral, propiciando futuramente a realização de novas provas de carga afim de se verificar o comportamento das estacas em termos de atrito lateral ao longo do tempo.

## 2. OBJETIVOS

Com a realização deste trabalho objetivou-se dar prosseguimento aos trabalhos já existentes no sentido de ampliar a tecnologia do solo-cimento, visando garantir a sua aplicação em fundações de forma adequada, segura e com respaldo tecnológico. Pretendeu-se, dessa forma, buscar conhecimentos técnicos suficientes de modo a garantir o desempenho dos materiais componentes de forma satisfatória e eficiente durante a vida útil da edificação.

Não obstante, objetivou-se contribuir de forma decisiva para a minimização dos custos envolvidos na construção de edifícios, bem como complementar a literatura existente através do emprego do solo-cimento em fundações, uma vez que essa etapa da construção quase não é apontada nos estudos e pesquisas realizadas em materiais alternativos.

Objetivou-se, ainda, contribuir para com o meio rural, onde as dificuldades para a execução de edificações são bem mais significativas, seja muitas vezes pela falta ou inexistência de energia elétrica, carência de profissionais habilitados ou pelas dificuldades de

acesso aos canteiros de obra, como também pelas despesas com o transporte de materiais de construção convencionais.

Tendo em vista a abrangência deste trabalho e as potencialidades do solo-cimento, objetivou-se ainda contribuir com o meio técnico através da simplificação das técnicas de execução, redução de custos e, principalmente, fornecer subsídios para a análise de casos semelhantes através da apresentação dos dados obtidos nos ensaios de campo.

---

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O tema especificamente a ser abordado, ou seja, capacidade de carga em elementos de fundação executadas em solo-cimento quase não se encontra mencionado na literatura disponível. Assim, nessa revisão, procurou-se abordar assuntos que de alguma forma estivessem relacionados com o tema, os quais serviram de embasamento conceitual para o desenvolvimento do trabalho proposto.

#### **3.1. Solo-cimento**

##### **3.1.1. Definição e histórico**

De acordo com a ABCP (1983a), o solo-cimento é o produto resultante da mistura íntima, em proporções previamente estabelecidas, de solo pulverizado, cimento Portland e água que, compactados ao teor ótimo de umidade e sob a máxima densidade, adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do cimento.

ANDRADE FILHO (1989) cita que, de acordo com Bezerra (1976), a conceituação do solo-cimento parece ter sua origem em Sallsburg no ano de 1917. O autor afirma, entretanto, haver poucos usos relatados até 1932, quando se tem notícia dos primeiros trabalhos cientificamente controlados nos Estados Unidos da América, através da sua utilização na pavimentação de 17.000 m<sup>2</sup> em Johnsonville, Carolina do Sul.

A terra como material de construção tem sido utilizada pelo homem desde a antiguidade. Várias de suas obras desafiam os séculos até alcançarem os dias de hoje. As técnicas construtivas variaram desde adobes moldados em mistura plástica de terra e água, até adobes melhorados com asfalto natural, como no caso das construções da Babilônia e Assíria. Adobes com palha e bambu, visando reduzir os efeitos da retração, foram utilizados no Egito. Existem também citações de construções em taipa na Europa Central e os muros de terra compactada, ainda na Babilônia. Nas Américas, os métodos de construção com terra existiam, de forma independente, em países como Perú, México e Sudoeste dos Estados Unidos, regiões mais favorecidas por suas características de clima quente e seco (CEPED, 1984).

De acordo com FREIRE (1976), a utilização do cimento como agente estabilizador de solos teve início nos Estados Unidos da América, em 1916, quando de sua aplicação pela primeira vez para solucionar problemas causados pelo tráfego de veículos de rodas não pneumáticas. No Brasil, o interesse pelo assunto se deu a partir de 1936

com a fundação da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, que regulamentou, fomentou e pesquisou a sua aplicação.

De acordo com NASCIMENTO (1994), a utilização do solo-cimento como material de construção no Brasil se deu em 1942 quando a diretoria da Aeronáutica autorizou a ABCP a executar uma das pistas de circulação do Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro. A primeira experiência em edificações ocorreu em 1945 com a execução de uma casa de bombas que abasteceria de água a obra do aeroporto de Santarém-PA.

No princípio, a aplicação do solo-cimento se limitava à pavimentação rodoviária e aeroportuária, mas hoje, suficientemente conhecido e difundido no meio técnico e tendo suas características tecnológicas bem definidas, o solo-cimento se apresenta como um material de aplicações bastante diversificadas, como por exemplo: base para pavimentos rodoviários e aeroportuários (ABCP, 1983b); revestimento de silos (ABCP, 1983c); fabricação de tijolos e blocos (ABCP, 1985a); construção de paredes monolíticas (ABCP, 1985b); base para a pavimentação de ruas e pequenas vias urbanas (ABCP, 1985c); aplicações diversas em pequenas áreas urbanas, tais como calçadas, praças, parques de recreação, canteiros para jardins (ABCP, 1986); revestimento de barragens de terra, diques e reservatórios (ABCP, 1980); e revestimento de canais (SILVA, 1992).

### **3.1.2. Classificação**

Basicamente, o solo-cimento é dividido em duas classes: solo-cimento compactado e solo-cimento plástico. De acordo com ANDRADE F.º (1989), o solo-cimento compactado é o mais usual. O teor de cimento deve ser o necessário para endurecer a mistura. A água deve ser adicionada em quantidade suficiente, de forma que permita a ocorrência da hidratação do cimento e possibilite condições adequadas de trabalhabilidade para o manuseio e compactação da mistura. No solo-cimento plástico a água deve ser adicionada à mistura até que se obtenha um produto de consistência similar ao de uma argamassa de emboço.

---

A ABCP (1983a) sugere, ainda, a adoção do termo "solos melhorados com cimento" para solos estabilizados a pequenos teores de cimento.

### **3.1.3. Critérios para a escolha do tipo de solo a ser utilizado**

Todos os tipos de solos apresentam melhorias significativas em suas propriedades mecânicas quando misturados com cimento e devidamente compactados. Existem, entretanto, limitações ao uso de determinados tipos de solos, geralmente vinculadas à trabalhabilidade e ao consumo de cimento. Os limites de consistência (LL e LP) são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade. Existe um certo consenso de que, para ser viável tecnicamente, o solo

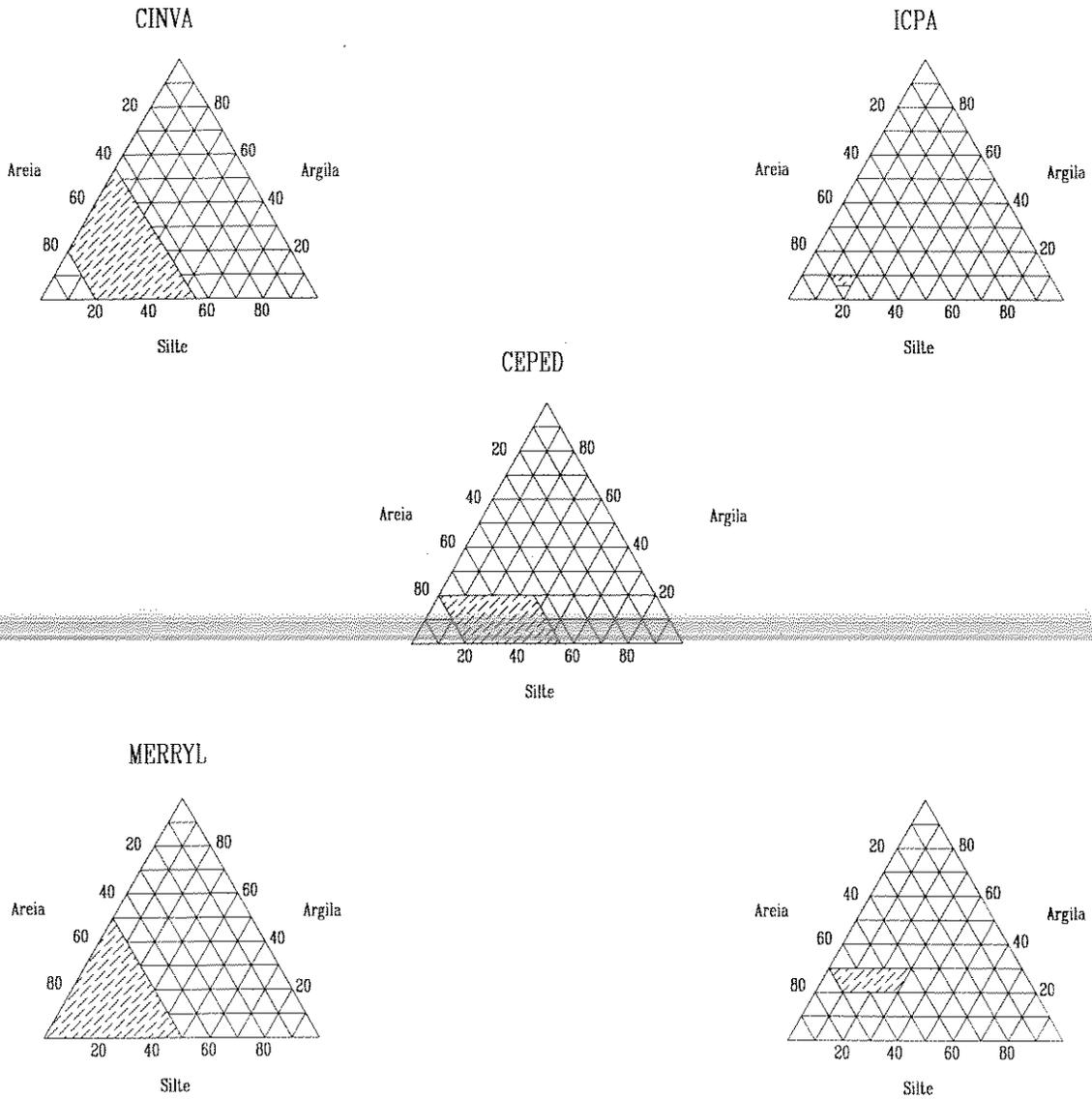
deve apresentar limite de liquidez máximo entre 45% e 50% (CEPED, 1984).

Os critérios para a seleção dos melhores solos quanto à granulometria, segundo alguns autores, não têm sofrido variações consideráveis. O Quadro 1 apresenta as faixas granulométricas consideradas ideais.

QUADRO 1. Critérios para a seleção de solos quanto à granulometria

Autor	Teor de areia (%)	Teor de silte (%)	Teor de argila (%)	Teor e silte + argila (%)	Limite de Liquidez (%)
CINVA (1963)	45 a 80	-	-	20 a 55	-
ICPA (1973)	60 a 80	10 a 20	5 a 10	-	-
MERRIL (1949)	> 50	-	-	-	-
MAC (1975)	40 a 70	< 30	20 a 30	-	-
CEPED (1984)	45 a 90	-	< 20	10 a 55	45 a 50

A Figura 1 apresenta a ilustração das respectivas faixas granulométricas.



**Figura 1. Critérios para escolha do tipo de solo**

**Fonte: CEPED (1984)**

### 3.1.4. Critérios de dosagem

A grande maioria dos critérios de dosagem para o solo-cimento foi elaborada tendo em vista a sua aplicação como base de pavimentos rodoviários e aeroportuários. A dosagem é feita normalmente em função das características do solo, da quantidade de cimento a ser adicionada, do teor de umidade e da densidade a ser conseguida no processo de compactação.

De acordo com as citações de PINTO (1980), os ingleses consideram adequado o teor de cimento capaz de conferir à mistura uma resistência à compressão aos sete dias de 1,75 MPa. São também empregados ensaios de durabilidade à molhagem/secagem e à congelação/degelo, cujos resultados são expressos em função do decréscimo da resistência dos corpos-de-prova.

No Estado da Califórnia, Estados Unidos da América, emprega-se uma técnica diferente para a estabilização do solo-cimento, principalmente por exigir que o solo seja bastante pedregulhoso e empregar teores de cimento mais reduzidos. A resistência exigida é de 4,5 MPa ou de 2,1 MPa, conforme o tipo de base a ser executada.

A metodologia de dosagem adotada pela ABCP (1983a), aborda basicamente a dosagem do solo-cimento a ser aplicado na base de pavimentos rodoviários. Essa metodologia se baseia nos critérios de dosagem elaborados pela PCA, que sugere duas normas a serem adotadas: Norma Geral de Dosagem e Norma Simplificada de Dosagem.

O Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP em Ilha Solteira, adota a norma simplificada para solos que apresentem no máximo 50% das partículas com diâmetro inferior a 0,05 mm e no máximo 20% com diâmetro inferior a 0,005 mm. A norma geral é aplicada quando a granulometria do solo não se enquadrar nessa faixa. Os Quadros 2, 3 e 4 apresentam os teores de cimento utilizados pela CESP, de acordo com o seu Método de Ensaio MSL-08, na dosagem de misturas de solo com cimento.

**QUADRO 2. Teor de cimento indicado para o ensaio de compactação**

Classificação do solo segundo H.R.B.	Teor de cimento em peso (%)
A1-a	5
A1-b	6
A2	7
A3	8
A4	10
A5	10
A6	12
A7	13

Fonte: CESP - Dosagens para misturas de solo com cimento (MSL-08)

QUADRO 3. Teor de cimento médio requerido por solos siltosos e argilosos

Índice de Grupo	Silte (%)	Peso específico aparente máximo (kN/m <sup>3</sup> )						
		14,40 a 15,20	15,20 a 16,00	16,00 a 16,80	16,80 a 17,60	17,60 a 18,40	18,40 a 19,20	19,20 ou mais
0 - 3	0 - 19	12	11	10	8	8	7	7
	20 - 39	12	11	10	9	8	8	7
	40 - 59	13	12	11	9	9	8	8
	> 60	-	-	-	-	-	-	-
4 - 7	0 - 19	13	12	11	9	8	7	7
	20 - 39	13	12	11	10	9	8	8
	40 - 59	14	13	12	10	10	9	8
	>60	15	14	12	11	10	9	9
8 - 11	0 - 19	14	13	11	10	9	8	8
	20 - 39	15	14	11	10	9	9	9
	40 - 59	16	14	12	11	10	10	9
	>60	17	15	13	11	10	10	10
12 - 15	0 - 19	15	14	13	12	11	9	9
	20 - 39	16	15	13	12	11	10	10
	40 - 59	17	16	14	12	12	11	10
	>60	18	16	14	13	12	11	11
16 - 20	0 - 19	17	16	14	13	12	11	10
	20 - 39	18	17	15	14	13	11	11
	40 - 59	19	18	15	14	14	12	12
	>60	20	19	16	15	14	13	12

Fonte: CESP - Dosagens para mistura de solo com cimento (MSL-08)

**QUADRO 4.** Teor de cimento médio requerido por solos arenosos

Pedregulho grosso (%)	Silte mais argila (%)	Peso específico aparente máximo (kN/m <sup>3</sup> )					
		16,80 a 17,60	17,60 a 18,40	18,40 a 19,20	19,20 a 20,00	20,00 a 20,80	20,80 ou mais
	0 - 19	10	8	8	7	6	5
0 - 14	20 - 39	9	9	7	7	5	5
	40 - 50	11	10	9	8	6	5
	0 - 19	10	9	8	6	5	5
15 - 29	20 - 39	9	8	7	6	6	5
	40 - 50	12	10	9	8	7	6
	0 - 19	10	8	7	6	5	5
30 - 45	20 - 39	11	9	8	7	6	5
	40 - 50	12	11	10	9	8	6

Fonte: CESP - Dosagens para misturas de solo com cimento (MSL-08)

### 3.2. Sistemas de aplicação

#### 3.2.1. Fundações

CARVALHO et al. (1990) estudou o comportamento do solo-cimento plástico para uso em fundações. Foram analisados três tipos de solos: uma argila amarela proveniente de uma camada porosa; um solo arenoso de uma camada de arenito que ocorre em algumas áreas sob a camada de argila porosa; e um solo laterítico com concreções, de ocorrências localizadas. Foram utilizados quatro teores de cimento (8%,

10%, 12% e 14%) em quatro períodos de cura em câmara úmida (7, 14, 28 e 56 dias). Os primeiros resultados mostraram que, quanto ao aspecto de resistência, o uso do solo-cimento plástico conduz a uma solução mais econômica para fundações de obras de pequeno porte. Existe, contudo, a necessidade de se efetuarem estudos complementares de durabilidade além de outros, tais como interação fundação-estrutura e fundação-solo.

De acordo com SEGANTINI e CARVALHO (1994), o solo-cimento é um material que apresenta grande potencialidade para a aplicação em fundações diretas para obras de pequeno porte. Alguns cuidados, entretanto, devem ser observados em locais que apresentam solos superficiais colapsíveis. Nesse caso, os autores recomendam as seguintes providências: impermeabilização das áreas molháveis (banheiros, cozinhas e lavanderias); utilização de tubulações em PVC, em vez de manilha cerâmica, para as instalações hidráulicas e sanitárias; proteções laterais de fachada (pingadeiras) para evitar o escoamento de águas de chuva pelas paredes; e execução de calçadas externas com largura mínima de 1,00 m, com caimento mínimo de 2% para o lado externo da edificação. Em 1991, um protótipo de residência popular foi construído em Pereira Barreto-SP, onde se aplicou solo-cimento nas sapatas corridas, no contra-piso e nas paredes. A avaliação de campo realizada, após decorridos três anos de sua execução, mostrou que todos os elementos executados em solo-cimento encontravam-se em perfeito estado de conservação.

De acordo com o Manual de construção em solo-cimento do CEPED (1984), o desempenho do solo-cimento para fundações diretas é equivalente ao das alvenarias de embasamento (alicerces), desde que não seja submetido a movimentos diferenciais, como ocorre em solos compressíveis ou expansivos. Para pequenas edificações, notadamente aquelas com paredes executadas por solo-cimento monolítico, a fundação abaixo de todas as paredes poderá ser executada em sapatas corridas. Em solos arenosos compactos ou argilas duras, as larguras podem ser da ordem de 40 cm e a profundidade o suficiente para prevenir erosões superficiais (30 cm a 40 cm), bastando compactar a mistura na própria cava. Paredes internas que não recebam outras cargas, senão o peso próprio, podem ter fundações com 20 cm de largura, embutidas de 20 cm a 30 cm no terreno. Segundo o CEPED (1984), as características de monolitismo das paredes dispensam qualquer tipo de estruturação.

ANDRADE F.º (1989), aproveitando-se da existência de uma situação real, pesquisou o comportamento de tubulões sem base alargada, com 0,90 m de diâmetro, feitos com solo-cimento plástico em uma obra no Rio de Janeiro. Foram realizadas provas de carga em tubulões em grupo e também tubulões isolados, onde se investigou a influência dos seguintes fatores: número de tubulões, espaçamento entre tubulões, distribuição das cargas e influência da posição ocupada pelo tubulão no grupo.

Um exemplo clássico de aplicação do solo-cimento, inclusive nas fundações, foi a construção do Hospital Adriano Jorge, em Manaus-AM, em 1950 (ABCP, 1979). As fundações dessa obra foram executadas em sapatas corridas de solo-cimento compactado com 40 cm de profundidade por 30 cm de largura para as paredes externas e 30 cm de profundidade por 20 cm de largura para as paredes internas. Sobre a sapata, nas paredes externas, executou-se uma cinta de concreto com 5 cm de espessura com taxa de armadura de 0,3%. Nas paredes internas a cinta foi substituída por uma camada de concreto simples com 3 cm de espessura e largura equivalente à espessura da parede. Conforme mostra o Relatório Técnico n.º 4 da ABCP (1979), em inspeção realizada em abril de 1976 (26 anos depois), até aquela data o hospital ainda não havia sido totalmente ocupado, sendo os serviços de manutenção executados de forma bastante precária devido à falta de recursos financeiros. Mesmo assim a obra não apresentou sequer um defeito que pudesse ser atribuído ao solo-cimento. Segundo a ABCP (1979), o desempenho do sistema construtivo adotado foi considerado excepcional.

De acordo com OKAMOTO et al. (1988), um novo tipo de fundação está sendo introduzido no Japão. Trata-se de um sistema constituído por uma estaca de solo-cimento plástico com diâmetro de 800 mm, estruturada por um tubo metálico de superfície corrugada, cujo diâmetro é de aproximadamente 75% do diâmetro final da estaca. Segundo os autores, os japoneses são bastante rigorosos no que diz respeito à execução de obras de fundações, inclusive com relação à geração e propagação de vibrações e ruídos. Como esse novo

tipo de estaca é executado com o auxílio de uma perfuratriz mecânica, esse problema praticamente não ocorre. E, em razão das perfeitas condições de aderência entre os dois materiais, tem-se como resultado um elemento de fundação com grande capacidade de carga.

### **3.2.2. Barragens de terra**

As usinas hidrelétricas de Porto-Primavera (no rio Paraná) e Rosana (no rio Paranapanema), são constituídas por barragens de terra extensas. De acordo com CARVALHO (1986), a proteção do talude de montante foi executada com solo-cimento compactado em camadas horizontais sucessivas. De acordo com o autor, a adoção desse sistema, entre as várias propostas existente, ocorreu pelo fato de ser esta a alternativa que se revelou a mais viável técnica e economicamente.

De acordo com a ABCP (1983), desde a pioneira Bonny Dam, executada em 1952 no Colorado, EUA, mais de 60 barragens de terra tiveram seus montantes protegidos com solo-cimento nos Estados Unidos desde 1961 até 1973, além de um sem número de aplicações similares. Segundo a ABCP (1983), a impermeabilidade, a resistência aos esforços mecânicos, a coesão e a baixa erodibilidade do solo-cimento acrescentam melhorias consideráveis à estabilidade de taludes.

De acordo com ABCP (1983), Nussbaum e Colley (1971), realizaram extensa pesquisa de laboratório em modelos reduzidos e, entre outros fatores, investigaram o efeito do teor de cimento no comportamento de solos estabilizados, sob condições equivalentes às que ocorrem em barragens, canais ou estruturas similares.

### 3.2.3 Outras aplicações

SILVA (1992) pesquisou a aplicação do solo-cimento plástico em um dos trechos de um canal experimental construído a céu aberto para transporte de vinhaça na Usina Costa Pinto, Piracicaba-SP. Utilizou-se, em outro trecho, uma mistura constituída por solo e vinhaça. O solo utilizado em ambos os casos, classificado como A2-4 (H.R.B), foi coletado no próprio local da obra. De acordo com a sua conclusão, o autor recomenda o uso do solo-cimento plástico em revestimento de canais para transporte de vinhaça, desde que o solo empregado seja adequado e que se faça o estudo da relação benefício-custo para a sua implantação. O autor sugere que sejam feitas pesquisas objetivando testar um número maior de dosagens, espessuras de revestimento e a criação de uma metodologia específica para o solo-cimento plástico, bem como o uso de aditivos impermeabilizantes. Quanto ao solo-vinhaça, segundo o autor, esse material não se apresentou adequado para fins de revestimento de canais para transporte de vinhaça.

### 3.3. Outros processos de estabilização

Vários são os tipos de produtos estabilizadores existentes, cada um atuando de forma específica sobre o solo. Além do cimento, os mais comuns são: cal, asfalto, produtos químicos, agregados e fibras vegetais.

ANDRADE F.<sup>o</sup> (1989) cita que de acordo com Costa Nunes (1978), o uso de estacas de pedra tem facilitado a melhoria das condições dos solos no sentido de suportar cargas de fundação muito elevadas, sendo seu comportamento de suma importância em edificações construídas sobre solos constituídos por argilas moles semelhantes às que ocorrem em extensas áreas do Brasil.

BAUER e CARVALHO (1990) concluíram que os diversos tipos de solos lateríticos encontrados na região nordeste do Brasil responderam diferentemente ao tratamento com cal, mas sempre positivamente. Eles verificaram a ocorrência de ganhos consideráveis de resistência, redução na plasticidade e melhoria nas condições de trabalhabilidade.

GUIDA (1974) afirma que os solos lateríticos, especialmente os de textura fina, tendo óxidos de ferro e alumínio livres em sua composição, desenvolvem elevada resistência à compressão simples quando tratados com ácido fosfórico. Isso ocorre, de acordo com o autor, em função da cimentação das partículas do solo. Foram ensaiadas

amostras de solo de "terra-roxa legítima" (Campinas-SP), solo laterítico fino (Anápolis-GO) e solos de gnaisses (Ilha do Governador-RJ). Os solos lateríticos apresentaram resistência máxima à compressão em torno de 4,0 MPa aos 28 dias.

De acordo com FREIRE (1976), o tratamento com silicato de sódio fez com que um solo, classificado como A-7 (H.R.B), contraindicado para fins de solo-cimento, tivesse seu nível categórico alterado para A4, um material cujo comportamento é considerado regular para estradas de rodagem.

De acordo com PINTO e BOSCOV (1990), a cal tem sido utilizada frequentemente como estabilizante químico de solos. Eles selecionaram dois tipos de solos tropicais, um silte saprolítico e um solo arenoso fino laterítico, bastante representativos de extensas áreas do Estado de São Paulo. Esses dois solos foram classificados como A4 (H.R.B), apresentando parâmetros de compactação bastante próximos, mas diferenciando-se consideravelmente quanto ao aspecto geotécnico. No estudo da variação da resistência à compressão simples, os valores obtidos para os dois solos foram considerados baixos, tendo em vista a aplicação em bases para pavimentos. O ganho de resistência, contudo, demonstrou ser crescente com o aumento do teor de cal, com o aumento do tempo de cura e com o aumento do grau de compactação, sendo que o solo saprolítico reagiu de forma mais rápida, apresentando sistematicamente melhores resultados que o solo laterítico para tempos iguais de cura e teor de cal a 12%.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Introdução

A área onde os ensaios de campo foram realizados está localizada no Campus da UNESP em Ilha Solteira, próxima ao Laboratório de Engenharia Civil, em local reservado para pesquisas de mecânica dos solos e fundações (Figura 2).

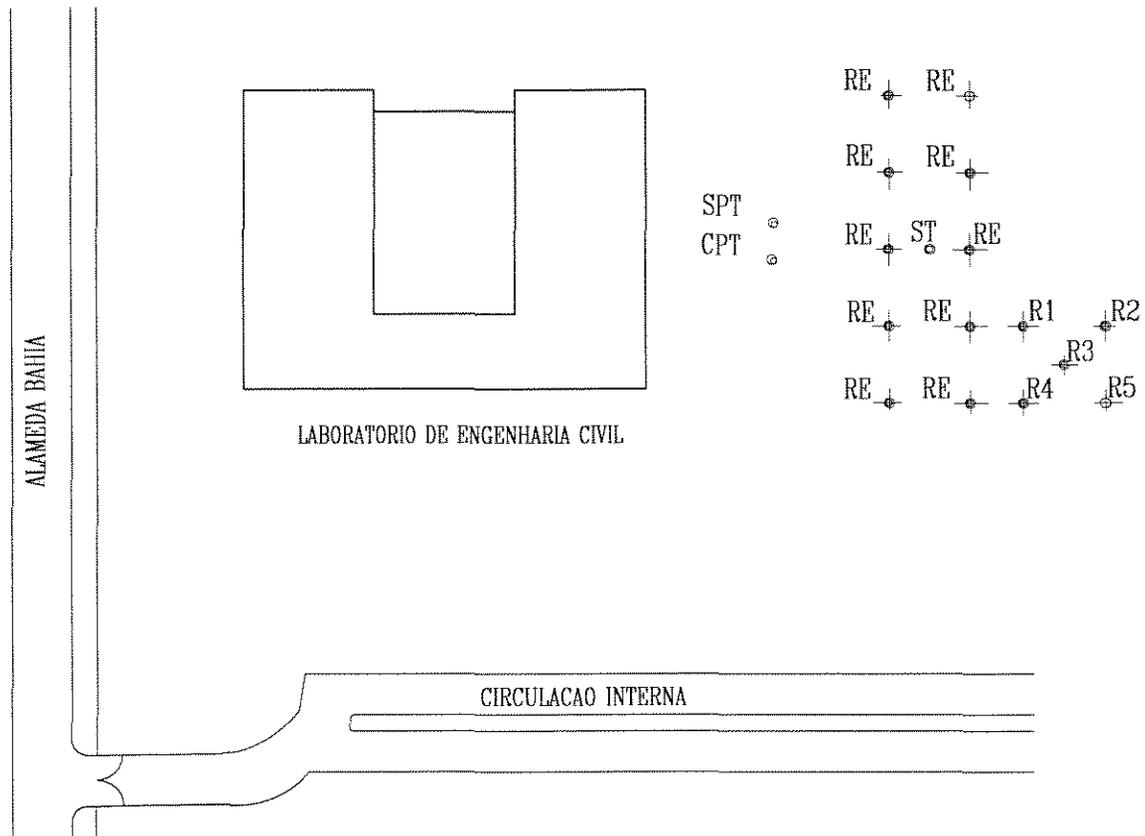


Figura 2. Localização da área reservada para ensaios de campo

Distante cerca de 670 km da capital do Estado de São Paulo, Ilha Solteira apresenta uma população de aproximadamente 20.000 habitantes (1990), a qual se concentra em quase sua totalidade na zona urbana. Sua posição geográfica está determinada pelas coordenadas  $20^{\circ}45'$  de latitude sul e  $51^{\circ}36'$  de longitude oeste (Figura 3).

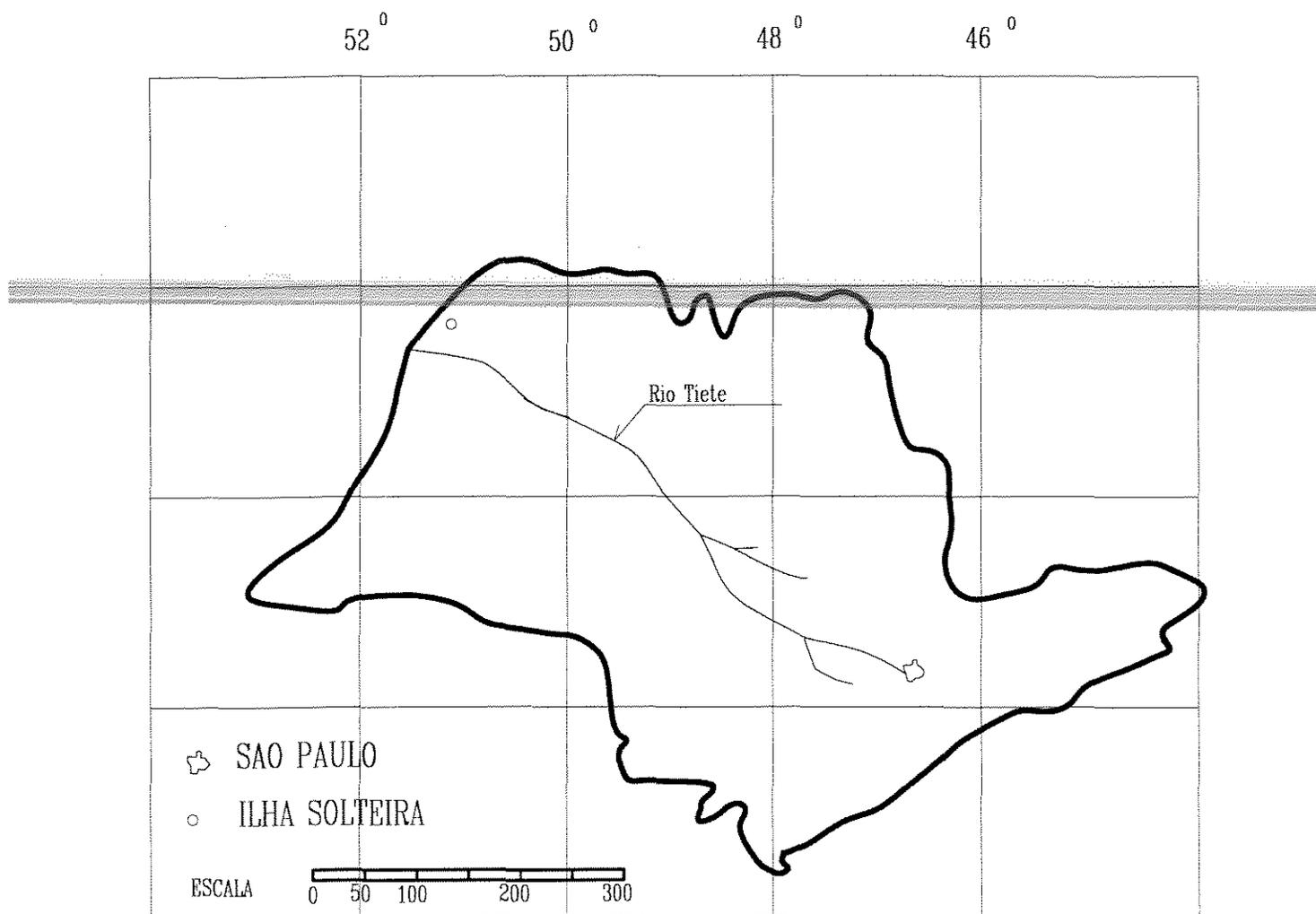


Figura 3. Localização da Cidade de Ilha Solteira-SP

De acordo com a CESP (1987), o solo superficial da região é pouco compacto devido à sua origem recente, sem extratificações, oriundo de rochas (arenito de Bauru na maioria das vezes) que sofreram a ação do intemperismo e erosão. A ação contínua dos agentes de intemperismo tem ocasionado, ao longo do tempo, uma alteração gradativa do maciço rochoso, dando origem a solos residuais de basalto e brecha (\*), os quais apresentam textura fina à média argilosa, principalmente quando em horizontes próximos ao basalto. A ação da erosão, desde o cretáceo até a época atual, deu origem a sedimentos de natureza tipicamente arenosa, denominadas "formações arenosas recentes" ou, ainda, "sedimentos cenozóicos" ou "sedimentos modernos". Tratam-se de formações que cobrem terraços em vários níveis e provavelmente de idades diferentes, as quais apresentam grande extensão, recobrando toda a região oeste do Estado de São Paulo. Há, em alguns trechos, depósitos aluvionares caracterizados por um horizonte superior de argila ôrgânica pouco arenosa, o qual está assentado sobre areias de formação recente e granulação variada. O contato do sedimento cenozóico com as formações subadjacentes é facilmente identificado, uma vez que encontram-se, geralmente, separados por uma camada de seixos (quartzo e limonita transportada) de 0,2 metros de espessura aproximadamente.

---

(\*) Brecha é o nome que se dá a fragmentos angulosos consolidados por agentes cimentantes. Podem ser derivados do quebramento de uma rocha por processos tectônicos, ou de fragmentos de blocos vulcânicos ou de cascalhos angulosos sedimentados.

SOUZA (1992) cita que, de acordo com a Promom (1980), os sedimentos recentes são extremamente friáveis, devido a sua baixa coesão, adquirindo apenas uma coesão aparente quando umedecidos. Devido a esse fato, esses materiais apresentam uma taxa de adensamento extremamente alta, principalmente quando carregados e inundados, característica que os torna facilmente erodíveis.

Segundo SOUZA (1992), a maior parte da superfície da bacia do Paraná encontra-se coberta por solos lateríticos, sendo esse termo empregado para designar solos com estrutura maciça, sem qualquer extratificação, com alta porosidade e elevado teor de ferro. Apresenta-se na cor ocre-vermelho ou amarelo, permanecendo fofo quando protegido do ar e extremamente duro quando exposto à superfície.

De acordo com o DAEE (1976), o solo da área em estudo pertence à classe podzólico vermelho amarelo, solos com horizonte B textural (Bt).

## **4.2. Materiais**

### **4.2.1. Concreto**

#### **a) Dosagem**

Utilizou-se concreto simples no traço 1:2:3, em volume, para a confecção das estacas de reação e também para as estacas de concreto a serem submetidas a provas-de-carga.

#### b) Confecção e cura dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram confeccionados de acordo com as prescrições da NBR-5738, utilizando-se dos moldes cilíndricos com dimensões de 15 cm x 30 cm. A mistura dos materiais componentes se deu em uma betoneira de capacidade de 350 litros.

#### c) Consistência

A determinação da consistência se deu através do ensaio de abatimento em tronco de cone, também conhecido como "Slump-Test". Obedeceu-se as prescrições contidas na NRB-7223, conferindo ao material abatimentos da ordem de 5,0 cm.

#### d) Ensaio de compressão simples

O ensaio para a determinação da resistência à ruptura dos corpos-de-prova foi efetuado de acordo com as prescrições da NBR-5739 aos 7, 14 e 28 dias.

#### 4.2.2 Solo componente do solo-cimento

O solo utilizado como material componente do solo-cimento foi coletado na área de empréstimo da Prefeitura local, situada à margem esquerda do Rio Paraná, à jusante da Barragem da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira.

##### a) Análise granulométrica

~~As análises granulométricas do solo e do solo-cimento foram~~  
feitas de acordo com a NRB-7181, da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, realizadas pela combinação da análise de sedimentação e peneiramento. Os resultados foram expressos através das curvas de distribuição granulométrica e quadros de composição granulométrica.

##### b) Limites de Consistência

A determinação dos limites de liquidez para o solo e para o solo-cimento foi feita de acordo com o método de ensaio preconizado pela NBR-6459, da ABNT, enquanto que a determinação dos limites de plasticidade foram feitos conforme a NBR-7180.

### c) Índices Físicos

A umidade natural do solo foi obtida através do método de secagem em estufa à temperatura de 100°C a 105°C, até a constância de peso.

A determinação da massa específica dos grãos para o solo e para o solo-cimento foi feita de acordo com as prescrições da NBR-6508, da ABNT.

### d) Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação para o solo e para o solo-cimento foi feito de acordo com o método SC1 da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, que é idêntico ao da ABNT.

#### **4.2.3. Solo-cimento compactado**

##### a) Dosagem

A escolha do teor de cimento para o solo-cimento compactado foi feita com base na experiência adquirida pelo Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP, Ilha Solteira-SP, em vista do grande número de ensaios por eles já realizados com esse solo. E, por se tratar

de uma aplicação ainda sem muitas referências, ou seja, em estacas, resolveu-se adotar o teor de cimento a 8% em peso, muito embora esse solo possa ser estabilizado a teores de cimento bem inferiores. Procurou-se, dessa forma, garantir que o material da estaca não sofresse ruptura na parte superior do fuste quando fosse submetido aos carregamentos a serem aplicados. Esse teor de cimento corresponde, em volume, ao traço 1:8.

#### b) Moldagem dos corpos-de-prova

A moldagem dos corpos de prova foi feita de acordo com as prescrições do Método Brasileiro MB-3360, da ABNT, que descreve a técnica de moldagem para corpos de prova cilíndricos a serem submetidos ao ensaio de compressão simples.

#### c) Cura dos corpos-de-prova

Após a moldagem, os corpos de prova foram transferidos para a câmara úmida do Laboratório de Engenharia Civil da FEIS - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, permanecendo nesse local até a data da realização do ensaio de ruptura, respectivamente aos sete, quatorze e 28 dias.

#### d) Ensaio à compressão simples

O ensaio à compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento compactado foi executado de acordo com as prescrições do MB-3361, da ABNT.

#### **4.2.4. Solo-cimento plástico**

Como não existe ainda uma metodologia específica para o tratamento do solo-cimento plástico, adotou-se, em parte, a metodologia empregada para o concreto.

---

##### **a) Dosagem**

Adotou-se para o solo-cimento plástico o mesmo traço que se utilizou no solo-cimento compactado, ou seja 1:8 (cimento:solo) em volume.

##### **b) Confeção e cura dos corpos-de-prova**

Os corpos-de-prova de solo-cimento plástico foram confeccionados utilizando-se dos moldes cilíndricos, com dimensões de 15 cm x 30 cm. A mistura dos materiais componentes se deu em betoneira. A cura dos corpos-de-prova foi efetuada de maneira idêntida à aplicada aos de concreto.

### c) Controle da umidade

Seguiu-se o mesmo procedimento adotado para o concreto, mas em razão de haver uma certa dificuldade em se misturar esse material com betoneira, a adição de água foi efetuada aos poucos de maneira a conferir uma consistência tal que permitisse a perfeita mistura dos componentes, o que somente foi possível com abatimentos no tronco de cone da ordem de 10,0 cm, o que corresponde a um teor de umidade da ordem de 20%.

---

### d) Ensaio de compressão simples

O ensaio para a determinação da resistência à ruptura dos corpos-de-prova foi efetuado de acordo com as prescrições da NBR-5739 aos 7, 14 e 28 dias.

### 4.2.5. Cimento

O cimento utilizado foi o do tipo Portland comum (C.P. 32 II-E), da marca Itau. Foram feitos ensaios para a análise das características desse cimento quando da moldagem dos corpos-de-prova e também quando da sua aplicação nas estacas. Esses ensaios foram executados pelo Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP.

#### 4.2.6 Água

A água utilizada foi a de abastecimento da cidade de Ilha Solteira-SP. O Quadro 5 mostra o resultado da análise química efetuada.

QUADRO 5. Análise química da água utilizada

Descrição	Resultados
pH	7,3
Dureza EDTA	128 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Alcalinidade a fenolftaleína	zero
Alcalinidade ao metilorange	28 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Alcalinidade hidróxida	28 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Alcalinidade de carbonato	zero
Alcalinidade de bicarbonato	28 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Cloretos	34,3 ppm como Cl <sub>2</sub>
Oxigênio dissolvido	2,10 ppm de O <sub>2</sub>
Sólidos totais, dissolvidos e em suspensão	isento

#### 4.2.7. Aço

As estacas de reação, os blocos de concreto e as ferragens de arranque foram preparadas com aço CA50B, dimensionados de acordo com a NBR-6118.

### 4.3. Métodos

Para a concretização do trabalho e execução das provas-de-carga, foi feita uma ampliação do campo experimental de fundações já existente no Laboratório de Engenharia Civil da FEIS-UNESP. Foram feitas mais cinco estacas de reação do tipo apiloadas com 20 cm de diâmetro e 6,00 m de comprimento.

O reconhecimento do subsolo local foi feito através de uma sondagem a trado, com 12 metros de profundidade. Os materiais coletados metro a metro foram submetidos a ensaios de caracterização. ~~Foram feitos, ainda, um ensaio SPT - Standard Penetration Test e um ensaio CPT - Cone Penetration Test.~~ Esses ensaios foram realizados pelo Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP.

#### 4.3.1. Estacas de reação

As estacas de reação foram perfuradas através da ação da queda de um pilão de 5 kN, com diâmetro nominal de 0,20 m. Empregou-se o mesmo tipo de equipamento que normalmente se emprega na execução de estacas "strauss", executando-se o furo sem o auxílio do tubo de revestimento. A concretagem foi feita através do lançamento do concreto, sem apiloamento. A Figura 4 mostra o equipamento utilizado.



Figura 4. Equipamento utilizado na abertura dos furos das estacas

---

O concreto utilizado na moldagem das estacas foi batido em uma betoneira de 350 litros, no traço 1:2:3, com abatimento no tronco de cone sempre inferior a 5,0 cm. O concreto foi lançado, imediatamente após a abertura do furo, sendo em seguida adensado com um vibrador de imersão. As estacas foram armadas com 4 ferros 1/2" e estribos de 1/4" a cada 20 cm. Utilizou-se tirantes Dywidag de 1/4" ancorados 1,20 m da massa de concreto. A Figura 5 mostra o detalhamento das estacas de reação.

#### **4.3.2. Estacas de concreto**

Foram executadas duas estacas apiloadas de concreto simples moldadas "in loco". Essas estacas foram executadas com o mesmo pilão empregado nas estacas de reação, com 20 cm de diâmetro e

profundidade de 6,00 m. Para melhorar as condições de transferência de carga desde o macaco até a estaca, executou-se um bloco de transição com dimensões de 45 cm x 45 cm, com altura de 45 cm. O concreto para essas estacas recebeu o mesmo tratamento dispensado às estacas de reação.

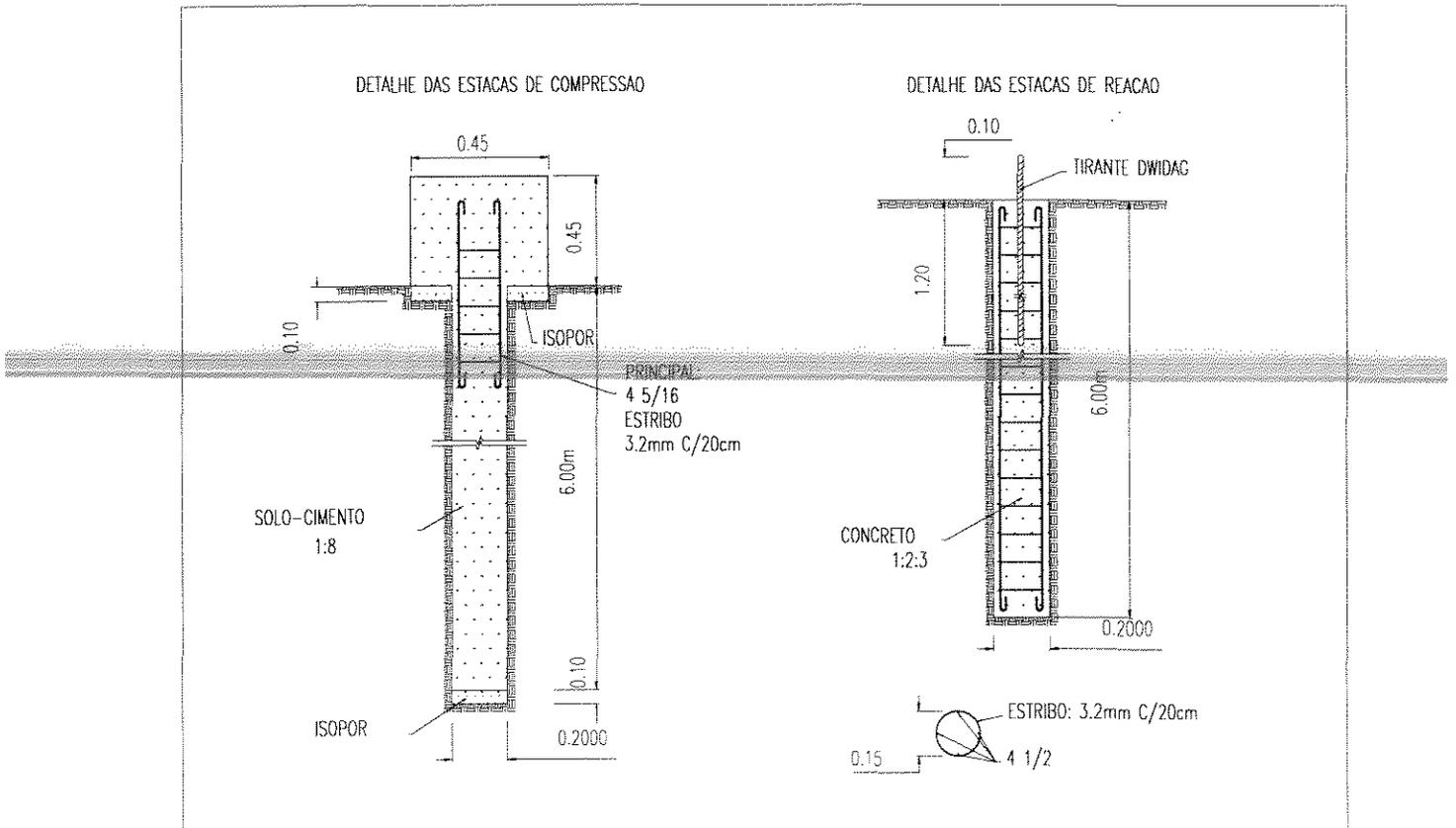


Figura 5. Detalhe das estacas de reação e das estacas de compressão

#### 4.3.3. Estacas de solo-cimento compactado

Foram executadas quatro estacas de solo-cimento compactado, sendo que a primeira delas, denominada "estaca piloto", foi executada com apenas 2,5 m de profundidade. Essa estaca foi executada

objetivando-se proporcionar treinamento e adaptação do pessoal envolvido na tarefa de trabalhar com o solo-cimento. As outras três estacas, previstas para a realização das provas-de-carga, foram executadas com as mesmas dimensões adotadas para as estacas anteriores. A Figura 5 mostra, também, o detalhamento das estacas de solo-cimento que receberam isopor na ponta. A Figura 6 mostra o momento da realização da inspeção visual efetuada na estaca "piloto".

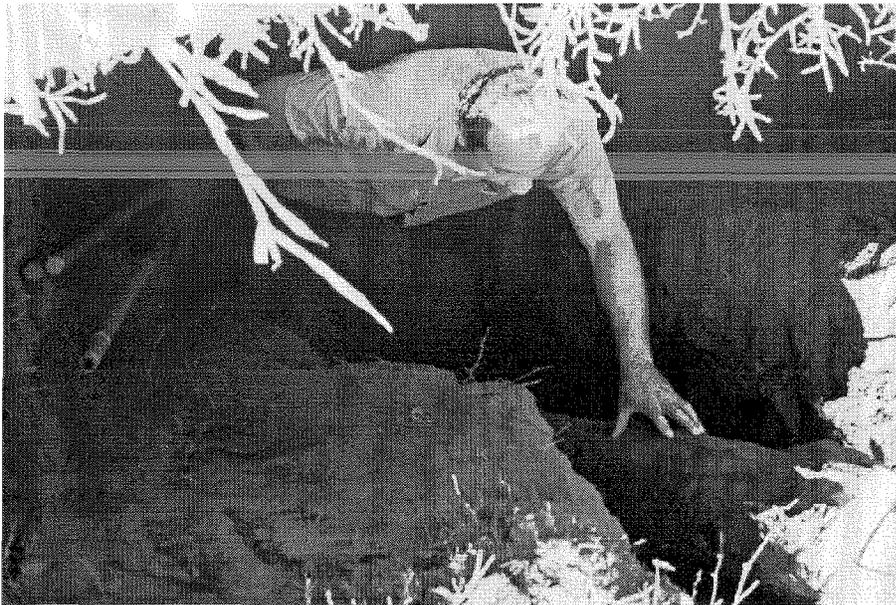


Figura 6. Inspeção da estaca "piloto".

A mistura do solo-cimento no traço 1:8 em volume foi realizada em uma masseira metálica (Figura 7). Após o peneiramento, por várias vezes o solo foi revolvido com a finalidade de se retirar o máximo possível da umidade existente antes de se proceder a mistura com o cimento.

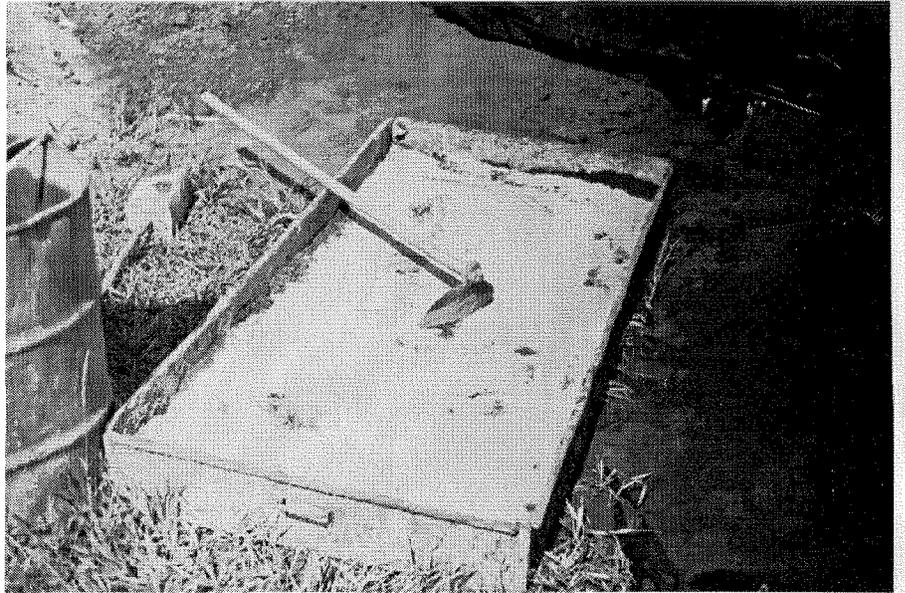


Figura 7. Masseira metálica utilizada para misturar os componentes

A homogeneização da mistura foi efetuada até o instante em que se atingiu a coloração uniforme e a adição de água foi efetuada aos poucos de modo a conferir o grau de umidade ótima à mistura. Inicialmente, o controle da umidade se deu através do ensaio rápido de campo, denominado "Speed-Test" (Figura 8). Posteriormente, utilizou-se do método empírico sugerido pela ABCP (1985), onde o controle da umidade é feito manualmente.

O lançamento do material, consubstanciado pelo treinamento efetuado na estaca "piloto", se deu de modo a garantir que a camada de solo-cimento, após a compactação, não ficasse com espessura superior a 0,20 m. O material foi compactado com um leve soquete de madeira (aproximadamente 2,0 kg).



Figura 8. Controle da umidade através do "Speed-test"

Para garantir melhores condições de aderência, a cada novo lançamento de material, escarificava-se a camada recém lançada através da manipulação de um instrumento apropriado feito com ferros de 1/4", cujas extremidades foram apontadas em um esmeril. A compactação das camadas somente era interrompida quando a sensibilidade do operário acusasse não haver mais deformações por parte do material lançado. A Figura 9 ilustra o aspecto de uma das estacas de solo-cimento compactado antes da execução dos blocos de transição. Observa-se que foram deixados quatro ferros de espera com bitola de 5/16".

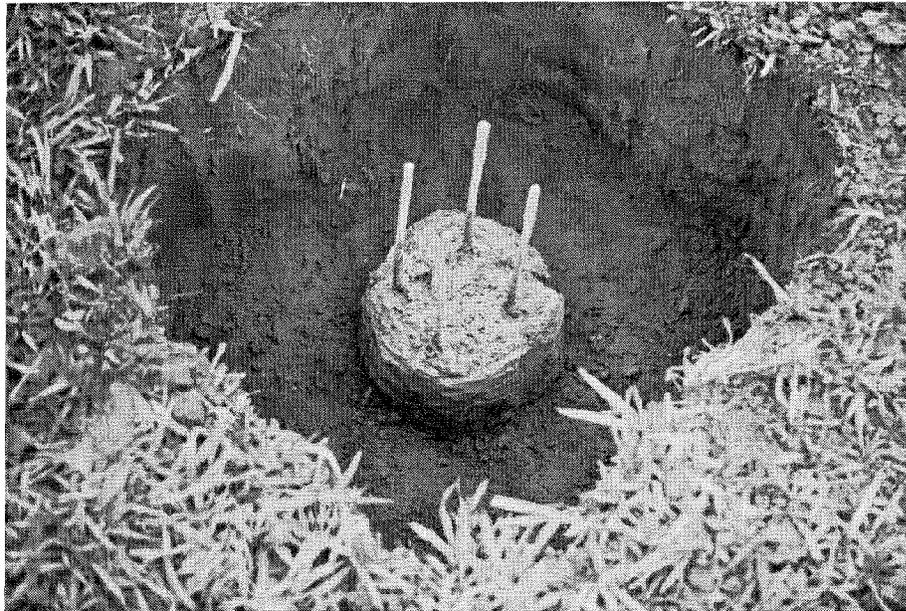


Figura 9. Aspecto de uma das estacas de solo-cimento compactado

Os blocos de transição, feitos também em solo-cimento compactado, foram executados posteriormente. A Figura 10 ilustra o procedimento adotado, mostrando o sistema de fôrmas empregado e a compactação do material.

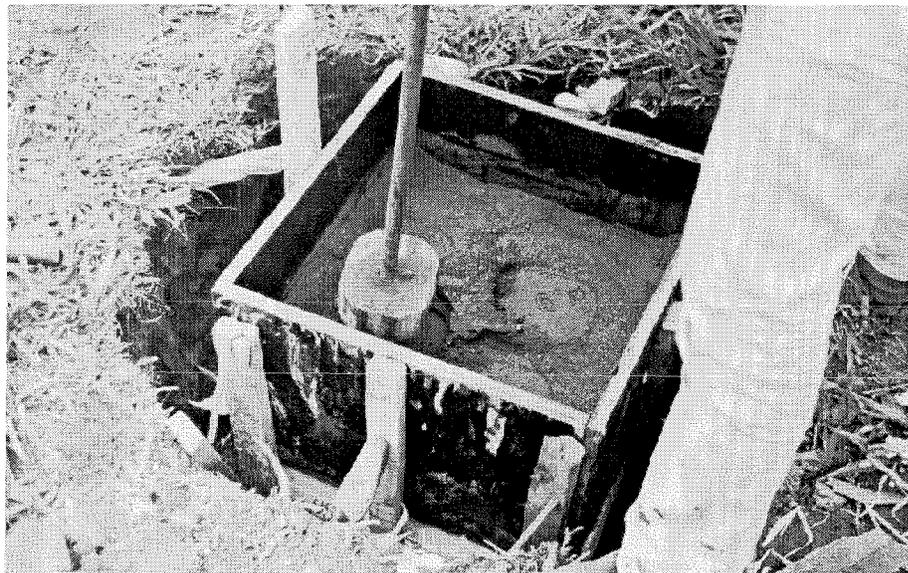


Figura 10. Execução do bloco de transição

Os blocos e as estacas foram devidamente curados durante os três primeiros dias através de umedecimento constante e, após esse período, com três sessões de umedecimento diário durante os próximos sete dias.

#### 4.3.4. Estacas de solo-cimento plástico

O solo-cimento plástico foi preparado em uma betoneira com capacidade de 350 litros. A homogeneização foi efetuada até o instante em que se atingiu uma coloração de aspecto uniforme, sendo a adição de água controlada através do "slump-test" (Figura 11) que, mantido em torno de 10,0 cm, proporcionou ao material uma consistência semelhante à de uma argamassas de assentamento.



Figura 11. Controle da umidade através do "Slump-Test"

O lançamento da mistura foi feito de forma análoga àquela que se emprega para as estacas de concreto. Essas estacas ficaram com o mesmo aspecto visual das estacas de solo-cimento compactado.

Os blocos de transição foram feitos de forma semelhante aos de solo-cimento compactado. A cura das estacas e dos blocos foi feita da mesma forma que para os elementos anteriores.

#### **4.3.5. Controle de qualidade**

##### **a) Estacas de concreto**

O controle de qualidade do material utilizado nas estacas de concreto, tanto para as de reação como para as de compressão, foi feito através da coleta de amostras durante o lançamento. Foram coletados seis corpos-de-prova cilíndricos de 15 cm x 30 cm para cada estaca. Após a coleta, os corpos-de-prova foram transferidos para a câmara úmida e lá permaneceram até a data da ruptura, efetuada aos quatorze e aos 28 dias, de acordo com as prescrições da NBR-6118 da ABNT. A Figura 12 mostra o momento da execução do ensaio de compressão simples efetuado em um dos corpos-de-prova de concreto.

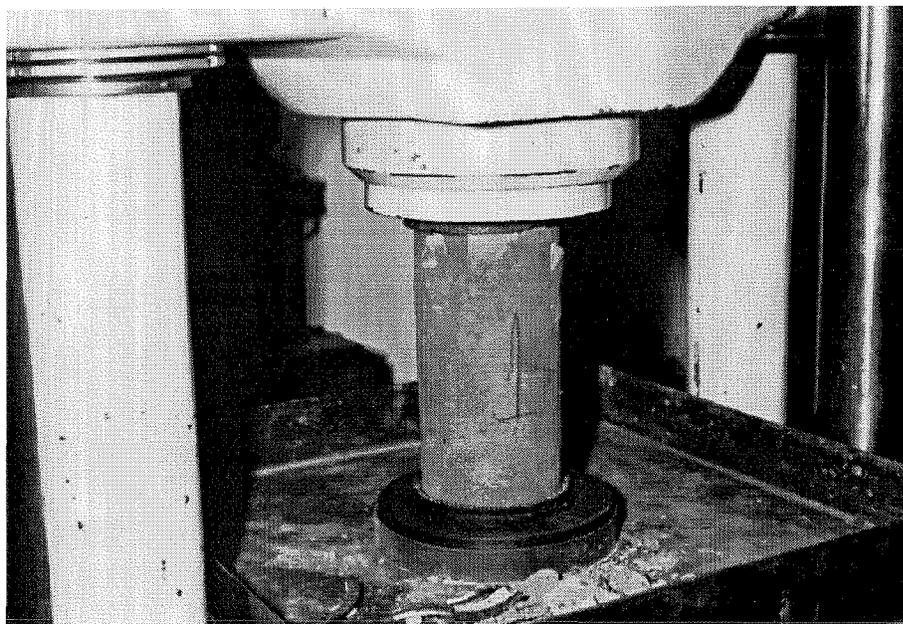


Figura 12. Rompimento de corpos-de-prova de concreto

#### b) Estacas de solo-cimento compactado

Durante a aplicação do material, foram coletados seis corpos-de-prova cilíndricos de 10,0 cm x 12,7 cm para cada estaca. A moldagem dos corpos-de-prova foi feita de acordo com o preconizado pelo método MB-3360 da ABNT. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram transferidos para a câmara úmida, onde permaneceram em processo de cura até a data da ruptura. Antes de serem rompidos, os corpos-de-prova foram transferidos para um tanque com água, onde ficaram imersos durante quatro horas. A ruptura, aos quatorze e aos vinte e oito dias foi realizada em conformidade com o método MB-3361 da ABNT.

#### c) Estacas de solo-cimento-plástico

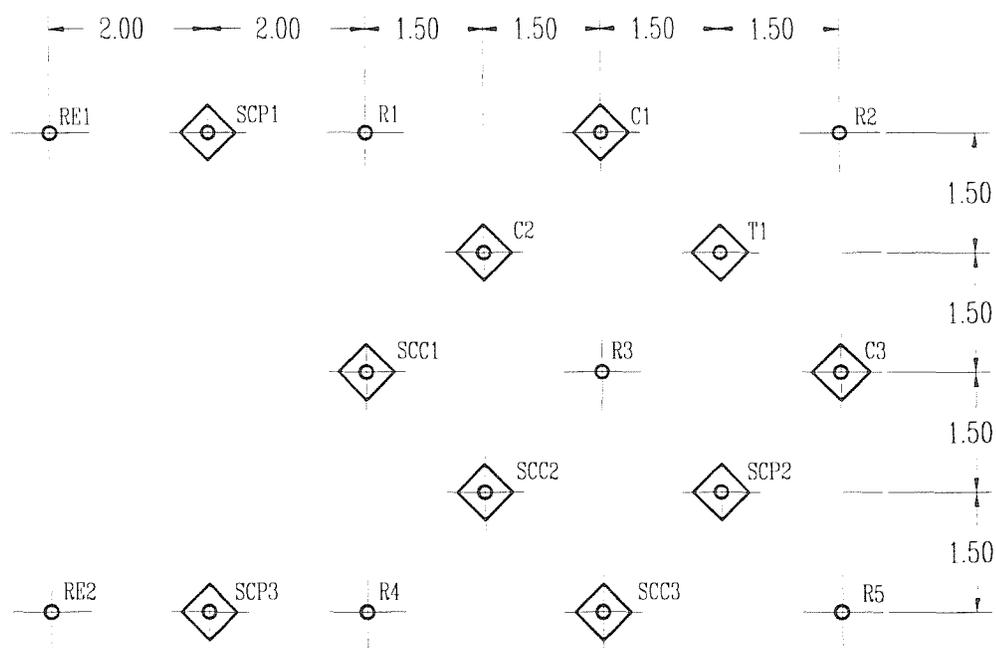
Foram moldados seis corpos-de-prova cilíndricos de 15,0 x 30,0 cm para cada estaca. Como não existe ainda uma norma específica para o controle de qualidade do solo-cimento-plástico, adotou-se o mesmo tratamento dispensado aos corpos-de-prova de concreto.

#### **4.3.6. Sistema de reação**

O sistema de reação ficou composto pela viga de reação, placas de ancoragem, tirantes Dywidag e pelas estacas de reação.

##### **a) Estacas de reação**

Ao todo, sete estacas foram utilizadas como reação, sendo que duas delas faziam parte de um sistema já existente. A execução dessas duas estacas foi efetuada com o auxílio de uma perfuratriz, com diâmetro de 0,20 m, até a profundidade de 6,00 m. As cinco novas estacas de reação, conforme citado anteriormente, tiveram seus furos abertos através da ação da queda de um pilão de 5 kN, normalmente empregado em estacas "strauss". Portanto, foram empregadas duas estacas escavadas e cinco estacas apiloadas na composição do sistema de reação, conforme ilustra a Figura 13.



### LEGENDA:

- REi : Estaca de Reação existente  
 SCPi : Estaca de solo-cimento-plástico  
 SCCi : Estaca de solo-cimento compactado  
 Ri : Estaca de Reação  
 Ci : Estaca de Concreto

Figura 13. Disposição das estacas no campo de provas

### b) Viga de reação

A viga de reação utilizada é composta por uma estrutura metálica com capacidade de carga de 1,0 MN, quando aplicada em seu

centro de gravidade. Essa estrutura é constituída de dois perfis metálicos em "I" solidarizados por placas de aço especial, soldadas de forma contínua ao longo de suas arestas, em quatro posições distintas da viga, conforme ilustra a Figura 14.

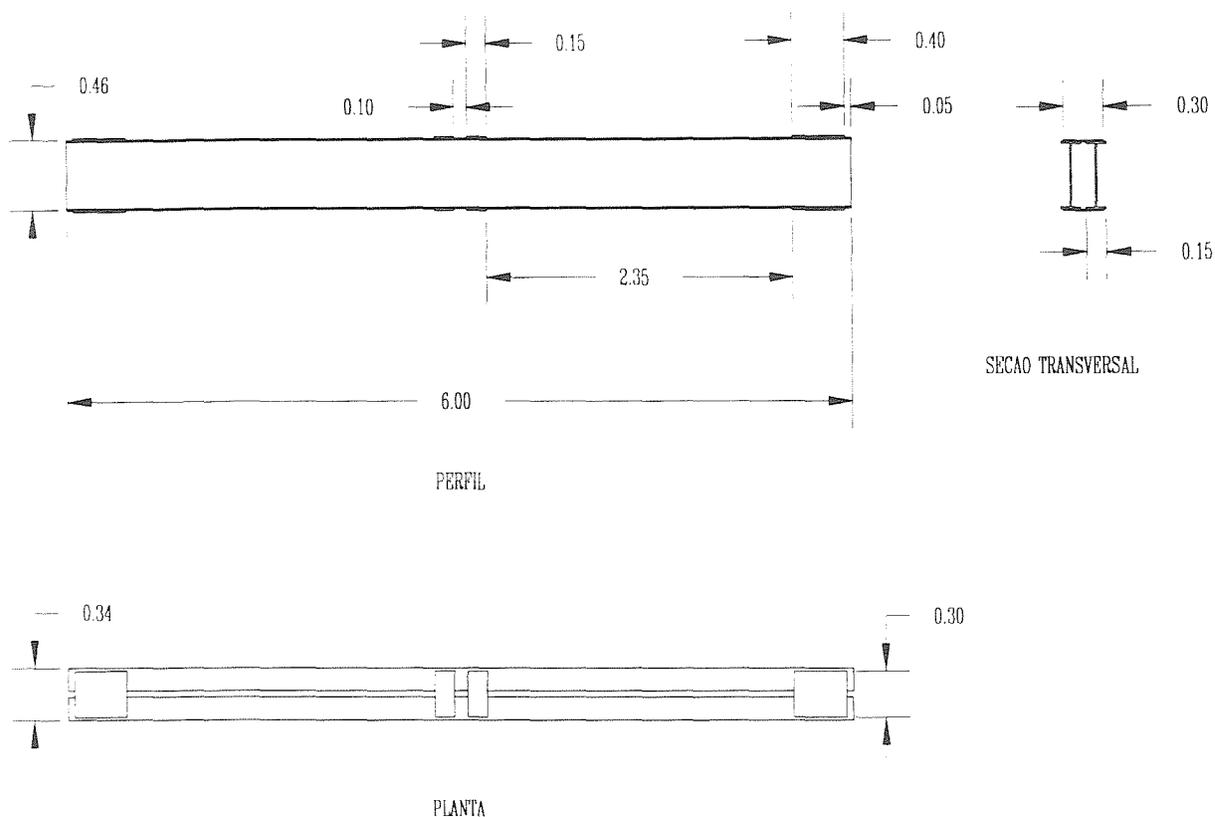


Figura 14. Detalhe da viga de reação

### c) Tirantes

O sistema de atirantamento entre a viga e as estacas de reação foi composto por barras de aço especiais ST-85/105 com 32 mm de seção nominal, porcas, placas e luvas de aço, todos fabricados com o mesmo tipo de material empregado nos tirantes. Esses elementos foram adquiridos junto à empresa Protendidos Dywidag Ltda. A luvas foram

utilizadas para conectar os tirantes à estaca de reação, através da barra de aço Dywidag deixada de espera. As placas foram utilizadas na ancoragem dos tirantes à viga de reação.

#### **4.4. Equipamentos**

##### **4.4.1. Macaco**

A aplicação das cargas, para os ensaios de prova-de-carga, foi efetuada através de um macaco hidráulico, munido de manômetro e bomba, com capacidade de carga de 500 kN. As cargas aplicadas foram controladas por intermédio das células de carga.

##### **4.4.2. Células de carga**

Foram utilizadas duas células de carga, uma com capacidade de 200 kN e outra de 500kN. A célula de carga de 200 kN foi utilizada nas provas de carga realizadas nas estacas de solo-cimento. A outra foi utilizada para as estacas de concreto. O controle da aplicação das cargas foi efetuado através de um indicador digital de deformações conectado à célula de carga.

##### **4.4.3. Indicador de deformação**

A leitura das cargas aplicadas foi feita através de um indicador de deformações digital, fabricado pela Sensortec. Esse

equipamento também foi utilizado para manter o carregamento constante ao longo de cada estágio de carregamento.

#### **4.4.4. Rótula**

Para garantir a aplicação do carregamento de forma axial, utilizou-se uma rótula de aço com capacidade de carga de 500 kN.

#### **4.4.5. Relógios comparadores**

Para a leitura dos recalques sofridos pelas estacas, quando da aplicação dos carregamentos, foram utilizados quatro relógios comparadores com curso de 50 mm e precisão de 0,01 mm, fabricados pela Mytutoyo do Brasil. Os relógios comparadores, afixados ao sistema de referência, foram posicionados nos quatro cantos do bloco de transição. Suas hastes ficaram apoiadas sobre placas de acrílico com dimensões de 2,0 cm x 2,0 cm, devidamente coladas na face superior do bloco. Esse procedimento obedeceu às instruções da NBR-6121.

#### **4.4.6. Sistema de referência**

O sistema de referência adotado consistiu de dois perfis metálicos em "I", devidamente apoiados sobre elementos de concreto afixados no terreno, conforme mostra a Figura 15.

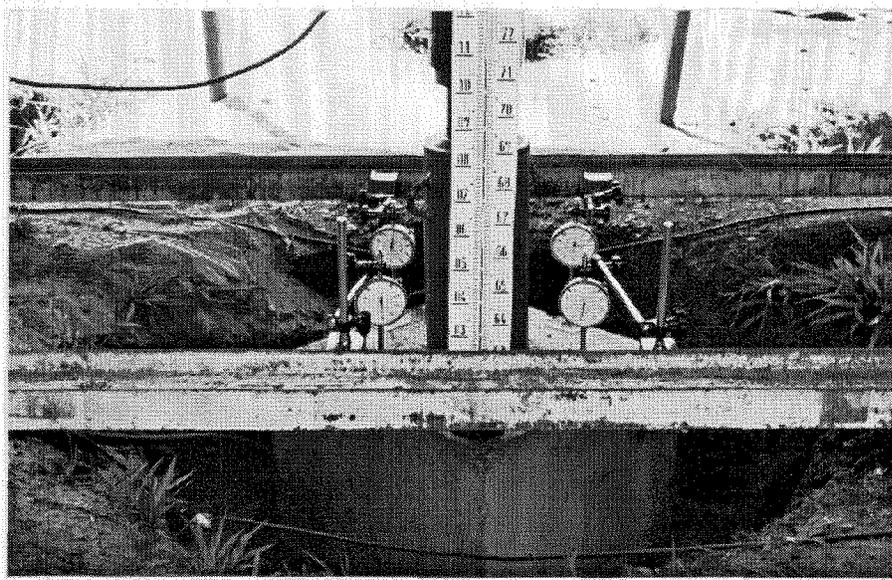


Figura 15. Detalhe do sistema de referência e posicionamento dos relógios

#### **4.4.7. Sistema de aplicação do carregamento**

O sistema adotado para a transferência da carga aplicada desde o macaco hidráulico até as estacas é do tipo ação-reação. Instalado entre a viga de reação e o bloco de transição, a carga imposta pelo macaco é imediatamente transferida para a estaca, conforme ilustra a Figura 16.

#### **4.4.8. Realização das provas de carga**

Foram realizadas oito provas de carga, sendo que das três estacas de solo-cimento compactado, duas foram submetidas a ensaio lento e as outras duas a ensaio rápido. Das estacas de solo-cimento plástico, duas foram submetidas a ensaio rápido e a terceira a ensaio lento. Das estacas de concreto, uma foi submetida a ensaio rápido e a outra a ensaio lento. As provas de carga lentas foram efetuadas de acordo com a NBR-6121 da ABNT. As provas de carga rápidas foram feitas com carregamentos de 1/20 da carga última prevista, em intervalos de tempo de 15 minutos.

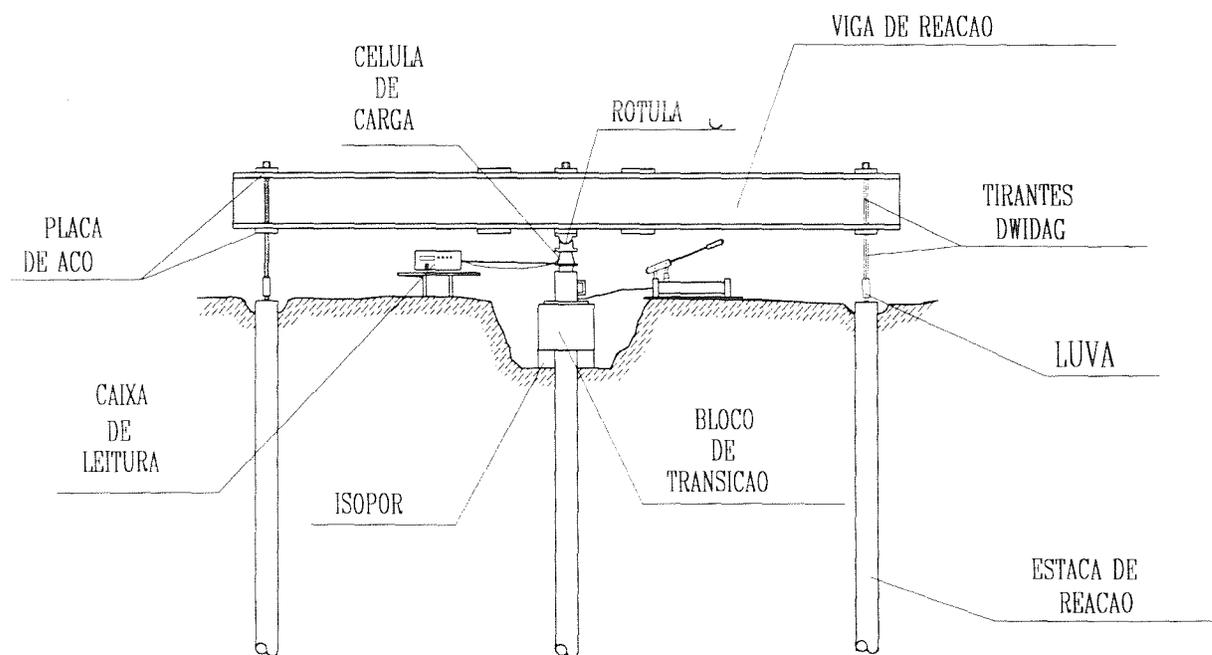


Figura 16. Sistema para a aplicação de carga

As estacas que foram submetidas a ensaio rápido receberam, em sua extremidade inferior, uma "bolacha" de isopor de 100 mm de

espessura e diâmetro igual ao das estacas. Adotou-se esse procedimento visando a obtenção de leituras apenas da resistência lateral das estacas, sem que houvesse influência da resistência de ponta. Desse modo, objetivou-se possibilitar futuramente a aplicação de novas provas de carga e a obtenção de novas leituras de resistência lateral, propiciando a verificação do comportamento dos materiais, principalmente do solo-cimento, ao longo do tempo.

---

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Caracterização do subsolo local

O resultado dos ensaios para a caracterização do subsolo local efetuados nas amostras coletadas no furo feito a trado encontram-se no Quadro 6.

QUADRO 6. Caracterização do subsolo local

A	B	LIMITES (%)			$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	GRANULOMETRIA (mm)					w (%)	w <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{s,máx}$ kN/m <sup>3</sup>
		LL	LP	IP		0,005	0,05	0,42	2,0	4,8			
0-1	A6	25	14	11	2,68	30	6	59	5	-	10,9	11,7	19,42
1-2	A4	24	15	9	2,67	30	5	61	4	-	11,7	11,2	19,59
2-3	A6	27	16	11	2,69	30	6	60	4	-	11,2	11,3	19,53
3-4	A6	27	17	10	2,64	31	6	60	3	-	11,4	11,8	19,34
4-5	A6	29	17	13	2,66	33	6	57	4	-	11,8	12,6	19,18
5-6	A6	29	17	12	2,66	33	5	58	4	-	11,9	12,5	19,19
6-7	A6	29	16	13	2,69	33	7	57	3	-	12,1	12,3	19,24
7-8	A6	29	16	13	2,70	31	3	57	4	-	12,2	12,5	19,22
8-9	A6	28	17	11	2,69	30	11	56	3	-	12,2	12,1	19,12
9-10	A6	27	16	11	2,70	32	12	53	3	-	12,2	12,2	19,36
10-11	A6	28	17	11	2,70	32	8	57	3	-	11,0	12,2	19,19
11-12	A6	29	17	12	2,69	33	7	57	3	-	11,6	12,1	19,07

(A) - Profundidade (m)

(B) - Classificação HRB

A Figura 17 mostra o resultado do ensaio SPT - Standard Penetration Test. A Figura 18 mostra o resultado do ensaio CPT - Cone Penetration Test.

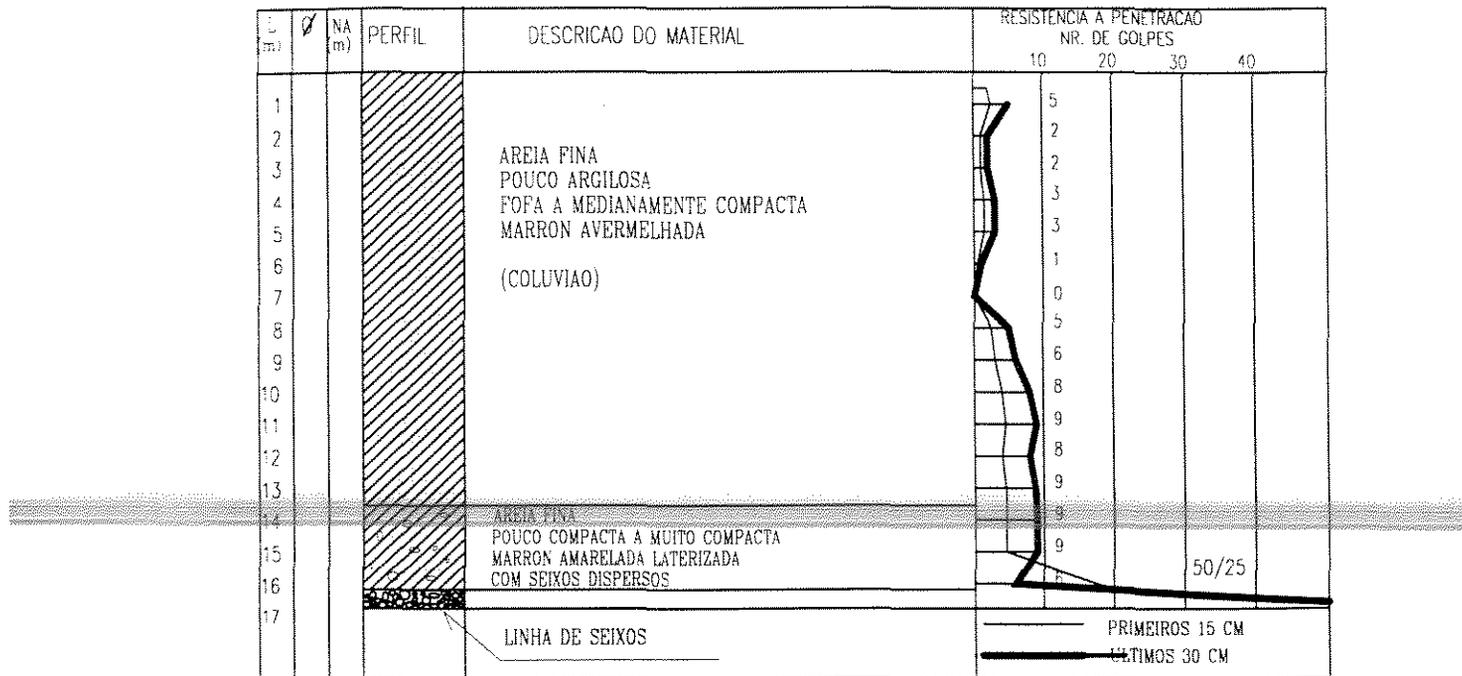


Figura 17. Ensaio SPT - Standard Penetration Test

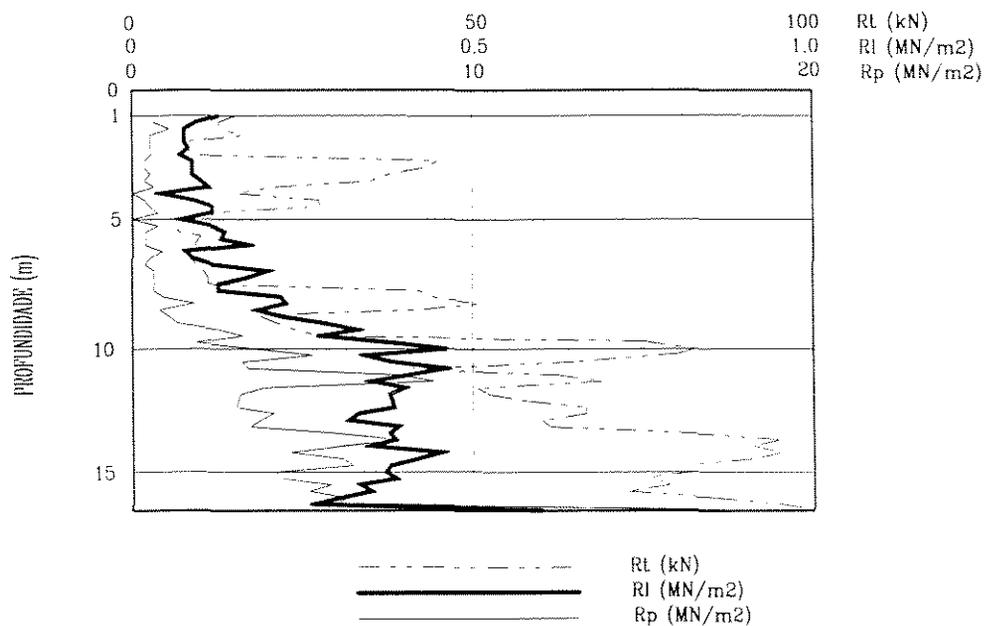


Figura 18 - Ensaio CPT - Cone Penetration Test

Esses ensaios apresentam resultados que mostram que o solo local apresenta características semelhantes aos solos arenosos com alta porosidade, comumente encontrados no interior do Estado de São Paulo. Estudo detalhado do solo superficial de Ilha Solteira é apresentado por FERREIRA (1985).

## **5.2. Solo componente do solo-cimento**

Conforme já foi citado, o solo utilizado como material ~~componente do solo-cimento foi coletado na área de empréstimo da~~ prefeitura local. Trata-se de um solo que apresenta condições satisfatórias para a estabilização com cimento. O Método Brasileiro MB-1336 (Solo-cimento - Norma de dosagem para pavimento: procedimento) faz referência à estabilização com cimento para solos que se enquadrem nas classificações A1, A2, A3 e A4, e que contenham 100% do material passando pela peneira de abertura de 76 mm e no máximo 45% de material retido na peneira de abertura de 4,8 mm. A resistência mínima admissível nessa Norma é fixada em 2,1 MPa.

Embora não haja diferença significativa, verifica-se que o solo do local, em quase todo o perfil estudado, enquadra-se como sendo do tipo A6, razão pela qual resolveu-se utilizar outro tipo de solo.

A jazida de onde o solo foi coletado já é bastante conhecida. Diversos ensaios para a utilização desse material como componente de solo-cimento já foram processados pela CESP visando a sua utilização em vários serviços, entre eles a recente restauração da base da pista de rolamento sobre a barragem da Usina de Ilha Solteira, onde empregou-se teor de cimento a 8% em peso para a sua estabilização. O Quadro 7 mostra os resultados obtidos na caracterização do solo utilizado. A Figura 19 mostra a curva granulométrica.

QUADRO 7. Caracterização do solo utilizado

GRANULOMETRIA (%)					
0,005	0,05	0,42	2,0	4,8 (mm)	
28	14	56	2	0	0
ÍNDICES FÍSICOS					
$\gamma_{s,MAX} = 19,22 \text{ kN/m}^3$ wot = 12,20 %	MASSA ESPECIF. REAL DOS GRAOS: 2,69 g/cm <sup>3</sup>		LL (%) = 27,2 LP (%) = 17,0 IP (%) = 10,2		

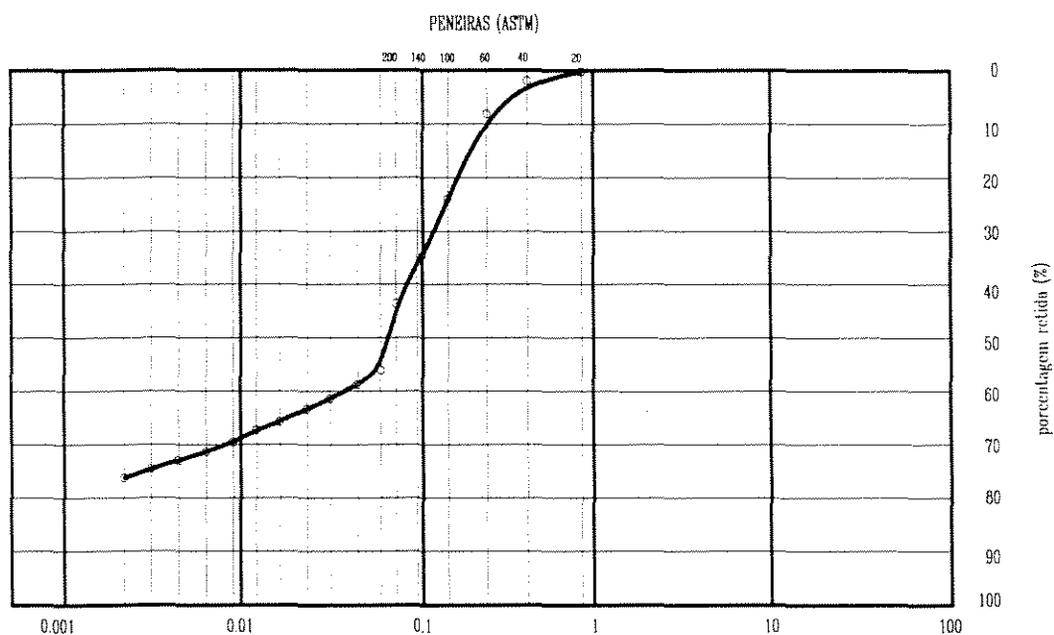


Figura 19. Curva granulométrica do solo utilizado

### 5.3. Solo-cimento

O Quadro 8 mostra a caracterização obtida para o solo-cimento imediatamente após a mistura do solo com o cimento. A Figura 20 mostra a curva granulométrica obtida para o solo-cimento imediatamente após a mistura.

QUADRO 8. Caracterização do solo-cimento logo após a mistura

GRANULOMETRIA (%)					
0,005	0,05	0,42	2,0	4,8 (mm)	
11	14	71	4	0	0
ÍNDICES FÍSICOS					
$\gamma_{s,MAX} = 19,23 \text{ kN/m}^3$		MASSA ESPECIF. REAL DOS GRAOS:			
wot = 12,80 %		2,74 g/cm <sup>3</sup>			

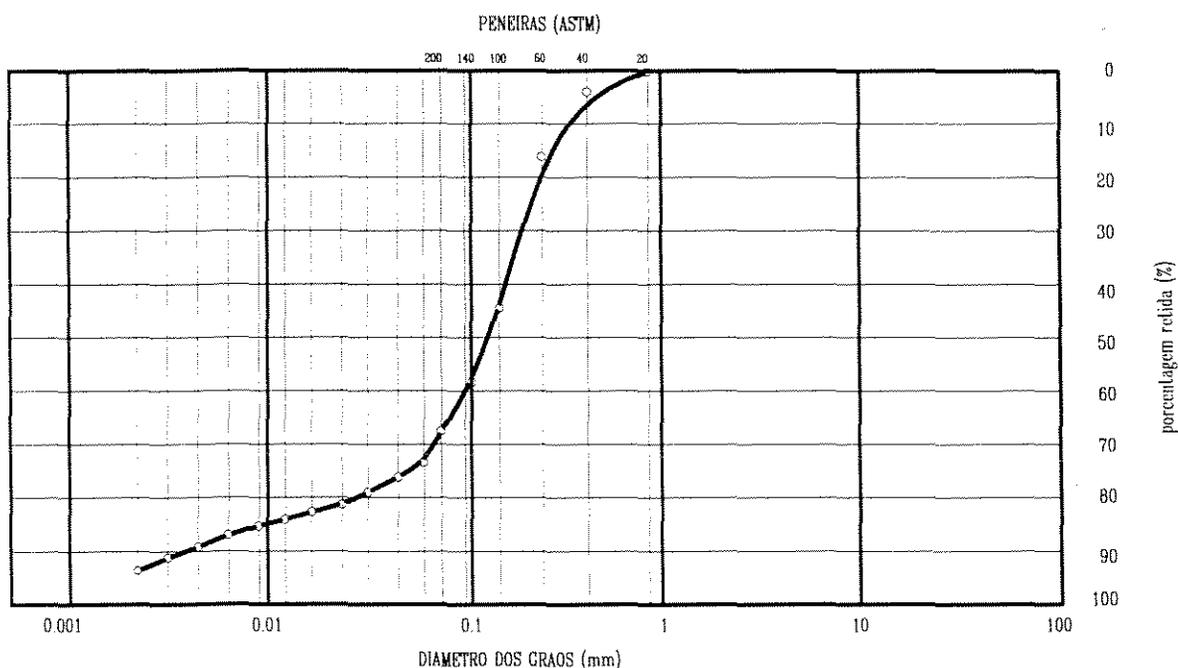


Figura 20. Curva granulométrica do solo-cimento após a mistura

Observa-se que houve uma melhoria sensível nas características granulométricas do material logo após a mistura. A porcentagem de grãos retidos na peneira de malha igual a 0,05 mm passou de 58% para 75%.

O Quadro 9 mostra os resultados obtidos nos ensaios para a determinação da resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento compactado. Foram moldados dezoito corpos-de-prova para serem rompidos, seis a seis, aos sete, quatorze e vinte e oito dias. Embora a norma (MB-3361) indique que sejam necessários, no mínimo, três corpos-de-prova para cada teor e idade, ~~adotou-se utilizar seis corpos-de-prova em cada bateria. Esse~~ procedimento possibilitou uma maior flexibilidade, permitindo descartar corpos-de-prova cujos resultados se apresentaram dispersos (15% em relação à média), sem prejuízo para a confiabilidade do resultado.

#### **5.4. Cimento**

O Quadro 10 mostra o resultado da análise física e o Quadro 11 mostra o resultado da análise química realizadas na amostra do cimento, da marca ITAU CP II F-32, que foi utilizado na moldagem dos corpos-de-prova e, posteriormente, na confecção das estacas. Esses ensaios foram desenvolvidos no Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP em Ilha Solteira-SP.

QUADRO 9. Resistência à compressão simples do solo-cimento

Características gerais	Teor de cimento: 8% (em peso)					
	$\gamma_{s,máx} = 19,22 \text{ kN/m}^3$					
c.p. n.º	01	02	03	04	05	06
idade (dias)	7	7	7	7	7	7
Resistência à compressão (MPa)	5,17	4,19 *	4,41	5,15	5,92 *	5,22
Resistência média (MPa)	4,98					
c.p. n.º	07	08	09	10	11	12
idade(dias)	14	14	14	14	14	14
Resistência à compressão (MPa)	6,51	5,08 *	5,46	6,25	7,17 *	6,61
Resistência média (MPa)	6,20					
c.p. n.º	13	14	15	16	17	18
idade (dias)	28	28	28	28	28	28
Resistência à compressão (MPa)	6,47	5,33 *	7,48	7,63	8,01 *	6,79
Resistência média (MPa)	7,09					

(\*) valores não considerados no cálculo da média

QUADRO 10. Análise física do cimento

Data da coleta		22/02/94	
Finura	# 200 (% retida)	4,2	
	# 325 (% retida)	22,7	
	Sup. específica (Blaine) $\text{cm}^2/\text{g}$	3.717	
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	aparente	1,07	
	absoluta	3,12	
Água de consistência pasta	(gramas)	124	
	(%)	12,8	
Início da pega	(h:min.)	15:18	
Resistência à compressão	consistência	(gramas)	150
		a/c	0,48
	data da moldagem		01/03/94
	Tensão (MPa)	3 dias	21,3
		7 dias	29,1
28 dias		37,9	

QUADRO 11. Análise química do cimento

Análise Química (%)	perda ao fogo	4,71
	insolúveis	0,61
	Si O <sub>2</sub>	17,89
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,55
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,15
	Ca O	61,23
	Mg O	4,48
	S O <sub>3</sub>	2,62
	Na <sub>2</sub> O	0,07
	K <sub>2</sub> O	0,82
	Equiv. alcalino em Na <sub>2</sub> O	0,61
	Cal livre em Ca O	1,32
	Compostos método de Bogue (%)	C <sub>3</sub> S
C <sub>2</sub> S		0,39
C <sub>3</sub> A		4,99
C <sub>4</sub> AF		10,80

### 5.5. Controle tecnológico dos materiais

Os Quadros 12, 13, 14 e 15 mostram os resultados dos ensaios de compressão simples efetuados nos corpos-de-prova dos materiais utilizados na confecção das estacas. A coleta das amostras foi efetuada durante a aplicação dos materiais nas respectivas estacas.

QUADRO 12. Controle tecnológico do concreto aplicado nas estacas de reação

Estaca de reação R1 moldagem: 15/12/93	dias	07 dias		14 dias		28 dias	
	c.p.	01	02	03	04	05	06
	$\sigma_r$ (MPa)	32,4	33,4	36,5	38,4	28,3	35,5
	$\sigma_m$ (MPa)	32,9		37,5		31,9	
Estaca de reação R2 moldagem: 20/12/93	dias	07 dias		14 dias		28 dias	
	c.p.	07	08	09	10	11	12
	$\sigma_r$ (MPa)	32,4	33,5	35,8	37,3	35,7	40,1
	$\sigma_m$ (MPa)	33,4		36,5		37,9	
Estaca de reação R3 moldagem: 17/12/93	dias	07 dias		14 dias		28 dias	
	c.p.	13	14	15	16	17	18
	$\sigma_r$ (MPa)	31,9	32,5	39,6	41,0	39,6	40,4
	$\sigma_m$ (MPa)	32,7		40,3		40,0	
Estaca de reação R4 moldagem: 17/12/93	dias	07 dias		14 dias		28 dias	
	c.p.	19	20	21	22	23	24
	$\sigma_r$ (MPa)	32,5	33,6	39,0	40,1	40,1	43,2
	$\sigma_m$ (MPa)	33,1		39,5		41,7	
Estaca de reação R5 moldagem: 16/12/93	dias	07 dias		14 dias		28 dias	
	c.p.	25	26	27	28	29	30
	$\sigma_r$ (MPa)	37,6	41,5	45,2	46,9	39,6	44,9
	$\sigma_m$ (MPa)	39,6		46,1		42,3	

QUADRO 13. Controle tecnológico do concreto aplicado nas estacas de concreto

Estaca de concreto C1 moldagem: 15/12/93	dias	07 dias		14 dias		28 dias	
	c.p.	31	32	33	34	35	36
	$\sigma_r$ (MPa)	34,4	35,6	39,3	40,4	31,2	33,3
	$\sigma_m$ (MPa)	35,0		39,9		32,3	
Estaca de concreto C2 moldagem: 16/12/93	dias	07 dias		14 dias		28 dias	
	c.p.	37	38	39	40	41	42
	$\sigma_r$ (MPa)	33,9	34,2	33,2	34,5	40,3	
	$\sigma_m$ (MPa)	34,0		33,8		40,3	
Estaca de concreto C3 moldagem: 21/12/93	dias	07 dias		14 dias		28 dias	
	c.p.	43	44	45	46	47	48
	$\sigma_r$ (MPa)	35,8	38,4	42,7	43,1	44,4	
	$\sigma_m$ (MPa)	37,1		42,9		44,4	

QUADRO 14. Controle tecnológico do solo-cimento aplicado nas estacas solo-cimento compactado

Estaca SCC1 moldagem: 23/12/93	dias	14 dias			28 dias		
	c.p.	49	50	51	52	53	54
	$\sigma_r$ (MPa)	6,37	6,59	6,62	6,16	7,00	7,64
	$\sigma_m$ (MPa)	6,53			6,93		
Estaca SCC2 moldagem: 23/12/93	dias	14 dias			28 dias		
	c.p.	55	56	57	58	59	60
	$\sigma_r$ (MPa)	4,14		5,41	2,27	3,36	5,44
	$\sigma_m$ (MPa)	4,76			3,69		
Estaca SCC3 moldagem: 23/12/93	dias	14 dias			28 dias		
	c.p.	61	62	63	64	65	66
	$\sigma_r$ (MPa)	3,82	4,58	5,16	2,55	2,86	6,68
	$\sigma_m$ (MPa)	4,52			4,03		

QUADRO 15. Controle tecnológico do solo-cimento aplicado nas estacas solo-cimento plástico.

Estaca SCP1 moldagem: 23/12/93	dias	14 dias			28 dias		
	c.p.	67	68	69	80	71	72
	$\sigma_r$ (MPa)	1,88	2,26	2,63	4,30	3,06	2,83
	$\sigma_m$ (MPa)	2,26			3,40		
Estaca SCP2 moldagem: 23/12/93	dias	14 dias			28 dias		
	c.p.	73	74	75	76	77	78
	$\sigma_r$ (MPa)	2,35	2,55	2,56	3,96	3,51	3,65
	$\sigma_m$ (MPa)	2,49			3,70		
Estaca SCP3 moldagem: 23/12/93	dias	14 dias			28 dias		
	c.p.	79	80	81	82	83	84
	$\sigma_r$ (MPa)	3,25	4,00	4,87	5,52	4,02	4,72
	$\sigma_m$ (MPa)	4,04			4,75		

## 5.6. Provas de carga

As curvas carga x recalque das provas de carga realizadas estão apresentadas nas Figuras 21 a 28. Os resultados numéricos estão apresentados nos Quadros 16 a 23.

QUADRO 16. Prova de carga rápida realizada na estaca de concreto C1

Tempo (minutos)	LR1 (mm)	LR2 (mm)	LR3 (mm)	LR4 (mm)	LRm (mm)	Recalque (mm)	Q (kN)
0	43.12	45.08	49.46	45.17	45.70	0.00	0
15	43.00	44.89	49.35	45.02	45.56	0.14	15
30	42.78	44.71	49.12	44.80	45.41	0.29	30
45	42.55	44.52	48.92	44.66	45.16	0.54	45
60	42.38	44.34	48.70	44.46	44.97	0.73	60
75	42.16	44.12	48.49	44.22	44.74	0.96	75
90	41.78	43.78	48.13	43.79	44.37	1.33	90
105	41.38	43.34	47.71	43.40	43.95	1.75	105
120	40.76	42.67	47.08	42.72	43.30	2.40	120
135	39.80	41.67	46.06	41.68	42.30	3.40	135
150	38.04	39.92	44.30	39.88	40.53	5.17	150
165	34.48	36.32	40.68	36.21	36.92	8.78	165
180	26.80	28.60	32.90	28.37	29.16	16.54	180
195	19.60	21.33	25.60	21.05	21.89	23.81	195
210	15.64	18.36	21.62	17.05	18.16	27.54	210
225	12.28	14.96	18.20	13.50	14.73	30.97	225
240	6.48	8.09	11.28	7.62	8.36	37.34	240
255	2.82	4.45	8.82	3.82	4.97	45.02	255
270	2.82	4.45	8.82	3.82	4.97	45.02	127
285	2.88	4.45	9.12	4.12	5.14	44.86	64
300	3.29	5.35	10.37	9.92	7.23	42.77	0

Início - data: 04/02/94

hora: 9h30m

QUADRO 17. Prova de carga lenta realizada na estaca de Concreto C2

Tempo (horas)	LR1 (mm)	LR2 (mm)	LR3 (mm)	LR4 (mm)	LRm (mm)	Re (mm)	Q (kN)
8:40	49.20	49.17	48.90	49.88	49.29	0	0
9:00	49.17	49.12	48.88	49.84	49.25	0.04	25
11:00	48.50	48.48	48.37	49.33	48.67	0.62	50
15:07	44.40	44.39	44.21	45.14	44.53	4.76	75
17:12	38.53	38.50	38.37	39.30	38.67	10.62	100
21:08	31.78	31.70	31.56	32.48	31.88	17.41	125
21:40	4.37	4.13	4.84	6.50	4.94	44.33	150
21:55	4.57	4.63	5.28	6.52	5.25	44.04	11.25
22:10	4.64	4.70	5.36	6.60	5.32	43.97	7.50
22:25	4.71	4.91	5.50	6.76	5.47	43.82	3.75
22:40	5.04	5.32	5.86	7.20	5.85	43.43	0

Início - data: 15/03/94

hora: 8h40m

QUADRO 18. Prova de carga lenta realizada na estaca de solo-cimento compactado SCC1

Tempo (horas)	LR1 (mm)	LR2 (mm)	LR3 (mm)	LR4 (mm)	LRm (mm)	Recalque (mm)	Q (kN)
9:58	47.16	49.80	46.42	49.89	48.31	0	0
10:08	47.04	49.79	46.25	49.89	48.24	0.07	16
11:08	46.58	49.60	45.75	49.75	47.92	0.39	32
15:05	45.96	49.19	45.09	49.34	47.40	0.91	48
15:54	45.54	48.74	44.66	48.76	46.92	1.39	64
23:54	33.66	36.55	31.41	36.37	35.16	13.15	80
0:15	1.22	1.12	0.00	0.65	0.75	47.56	96
0:30	1.22	1.12	0.00	0.65	0.75	47.56	72
0:45	1.22	1.12	0.00	0.65	0.75	47.56	48
1:00	1.22	1.12	0.00	0.65	0.75	47.56	24
1:45	4.71	3.06	0.00	2.98	2.68	45.63	0

Início - data: 17/02/94  
hora: 9h58m

QUADRO 19. Prova de carga lenta realizada na estaca de solo-cimento compactado SCC2

Tempo (horas)	LR1 (mm)	LR2 (mm)	LR3 (mm)	LR4 (mm)	LRm (mm)	Recalque (mm)	Q (kN)
9:50	47.29	49.87	49.63	49.48	49.06	0	0
10:05	47.20	49.87	49.36	48.97	48.85	0.21	12
10:40	46.98	49.82	49.24	49.05	48.77	0.29	24
11:00	46.46	49.43	48.62	48.47	48.27	0.79	36
11:32	45.67	48.76	47.80	47.64	47.47	1.59	48
12:46	44.74	47.95	46.85	46.75	46.57	2.49	60
1:25	7.01	10.48	8.84	9.01	8.94	40.12	76
1:40	7.01	10.48	8.84	9.01	8.94	40.12	54
1:55	7.18	10.54	9.07	9.27	9.12	39.94	36
2:10	7.70	10.91	9.58	9.84	9.62	39.44	18
2:25	10.38	13.50	12.18	12.73	12.31	36.75	0

Início - data: 07/03/94

hora: 9h50m

QUADRO 20. Prova de carga rápida realizada na estaca de solo-cimento compactado SCC3

Tempo (minutos)	LR1 (mm)	LR2 (mm)	LR3 (mm)	LR4 (mm)	LRm (mm)	Recalque (mm)	Q (kN)
0	49.46	49.62	47.40	48.76	48.81	0	0
15	49.47	49.62	47.40	48.76	48.81	0	4
30	49.47	49.59	47.40	48.75	48.80	0.01	8
45	49.47	49.58	47.40	48.74	48.79	0.02	12
60	49.47	49.58	47.40	48.74	48.79	0.02	16
75	49.47	49.51	47.40	48.68	48.76	0.05	20
90	49.47	49.50	47.40	48.66	48.76	0.05	24
105	49.47	49.42	47.40	48.61	48.73	0.08	28
120	49.47	49.38	47.31	48.56	48.68	0.13	32
135	49.46	49.24	47.31	48.45	48.62	0.19	36
150	49.34	49.16	47.17	48.33	48.50	0.31	40
165	49.22	48.99	47.04	48.18	48.36	0.45	44
180	49.12	48.79	46.90	48.00	48.20	0.61	48
195	48.94	48.61	46.74	47.83	48.03	0.78	52
210	48.72	48.36	46.55	47.58	47.75	1.06	56
225	48.44	48.04	46.23	47.25	47.49	1.32	60
240	47.74	47.29	45.48	46.49	46.75	2.06	64
255	46.48	46.00	44.23	45.18	45.47	3.34	68
260	44.45	44.00	42.28	43.21	43.48	5.33	72
275	40.25	39.67	37.00	38.85	38.94	9.87	76
290	29.29	28.67	27.11	27.93	28.25	20.56	80
305	22.71	21.05	19.57	20.40	20.93	27.88	84
320	16.89	16.29	14.82	15.64	16.23	32.61	88
335	16.89	16.24	14.78	15.62	15.88	32.93	60
350	17.19	16.49	15.08	16.86	16.40	32.40	40
365	17.52	16.78	15.45	17.16	16.73	32.08	20
370	21.29	20.55	19.19	19.82	20.21	28.60	0

Início - data: 23/02/94

hora: 10h00m

QUADRO 21. Prova de carga rápida realizada na estaca de solo-cimento plástico SCP1

Tempo (minutos)	LR1 (mm)	LR2 (mm)	LR3 (mm)	LR4 (mm)	LRm (mm)	Recalque (mm)	Q (kN)
0	47.57	49.28	49.35	49.93	49.03	0.00	0
15	47.57	49.28	49.35	49.93	49.03	0.00	5
30	47.57	49.28	49.35	49.93	49.03	0.00	10
45	47.51	49.20	49.35	49.93	48.98	0.05	15
60	47.42	49.16	49.33	49.84	48.93	0.10	20
75	47.25	48.98	49.20	49.67	48.77	0.26	25
90	47.00	48.73	48.96	49.38	48.51	0.52	30
105	46.58	48.49	48.54	48.97	48.14	0.89	35
120	45.83	47.74	47.80	48.25	47.40	1.63	40
135	44.50	46.40	46.48	45.86	45.81	3.22	45
150	43.08	44.00	45.04	44.04	44.04	4.99	50
165	40.75	42.65	43.70	43.07	42.54	6.49	55
180	38.08	39.99	40.00	39.39	39.36	9.67	60
195	34.91	35.84	37.82	37.24	36.45	12.58	65
210	30.21	32.16	32.09	31.46	31.48	17.55	70
225	25.41	27.42	27.30	26.70	26.70	22.23	75
240	16.50	18.56	18.34	17.82	17.80	31.13	80
255	15.88	18.00	17.78	17.27	17.23	31.70	80
260	15.88	18.00	17.78	17.27	17.23	31.70	60
275	16.11	18.00	18.04	17.40	17.38	31.55	40
290	16.47	18.13	18.48	17.70	17.69	31.24	20
305	18.14	20.51	20.11	19.16	19.48	29.45	0

Início - data: 22/02/94  
hora: 10h16m

QUADRO 22. Prova de carga lenta realizada na estaca de solo-cimento plástico SCP2

Tempo (minutos)	LR1 (mm)	LR2 (mm)	LR3 (mm)	LR4 (mm)	LRm (mm)	Recalque (mm)	Q (kN)
16:30	49.62	48.79	48.96	49.26	49.15	0.00	0
16:45	49.62	48.75	48.95	49.20	49.13	0.02	12
17:06	49.58	48.64	48.95	49.12	49.07	0.08	24
17:25	49.44	48.44	48.78	48.90	48.89	0.26	36
18:30	49.14	48.12	48.49	48.53	48.57	0.58	48
2:42	47.99	46.90	47.37	47.28	47.39	1.76	60
18:46	46.88	45.68	46.31	46.19	46.27	2.88	66
2:49	45.61	44.39	44.88	44.78	44.91	4.24	72
6:52	42.34	41.13	41.66	41.43	41.64	7.51	78
10:54	37.53	36.31	36.81	36.49	36.78	12.37	84
2:56	33.85	32.53	33.00	32.86	33.06	16.09	90
18:59	28.46	27.23	26.54	25.98	27.05	22.10	96
1:02	14.34	13.20	12.32	11.71	12.89	36.26	102
1:35	2.04	0.86	0.32	0.00	0.81	48.34	108
1:50	2.04	0.86	0.32	0.00	0.81	48.34	78
2:05	2.04	0.86	0.32	0.00	0.81	48.34	54
2:20	2.63	1.45	0.56	0.35	1.24	47.91	27
2:35	4.14	2.88	2.33	2.25	2.90	46.25	0

Início - data: 08/03/94

hora: 16h30m

QUADRO 23. Prova de carga rápida realizada na estaca de solo-cimento plástico SCP3

Tempo (minutos)	LR1 (mm)	LR2 (mm)	LR3 (mm)	LR4 (mm)	LRm (mm)	Recalque (mm)	Q (kN)
0	47.80	48.16	47.73	49.40	48.27	0	0
15	47.80	48.16	47.73	48.81	48.02	0,05	4
30	47.80	48.16	47.73	48.81	48.02	0,05	8
45	47.76	48.16	47.66	48.41	48.00	0,07	12
60	47.64	48.08	47.55	48.40	47.92	0,15	16
75	47.59	48.04	47.51	48.39	47.88	0,19	20
90	47.52	47.98	47.45	48.37	47.83	0,24	24
105	47.40	47.87	47.32	48.25	47.71	0.36	28
120	47.25	47.75	47.16	48.13	47.57	0.50	32
135	47.12	47.64	47.01	47.98	47.43	0.64	36
150	46.90	47.46	46.78	47.79	47.23	0.84	40
165	46.64	47.22	46.48	47.54	46.97	1.10	44
180	46.17	46.79	46.00	47.12	46.52	1.55	48
195	45.66	46.22	45.38	46.53	45.94	2.13	52
210	44.67	45.39	44.45	45.64	45.03	3.04	56
225	43.40	44.15	43.20	44.40	43.79	4.28	60
240	41.67	42.47	41.48	42.72	42.08	5.99	64
255	40.50	41.32	40.30	41.59	40.93	7.14	68
270	39.40	40.38	39.37	40.77	39.23	8.84	72
285	35.54	36.42	35.43	36.90	36.07	12.20	76
300	32.15	33.05	33.02	33.55	32.69	15.38	80
315	29.85	30.82	29.65	31.22	30.38	17.69	84
330	28.85	26.85	25.48	27.11	26.32	21.75	88
345	11.99	12.50	11.40	13.45	12.22	35.74	92
360	11.99	12.05	11.40	13.45	12.22	36.40	92
375	11.99	12.05	11.40	13.45	12.22	36.40	54
390	12.09	12.25	11.53	13.51	12.35	35.92	40
405	12.18	12.47	11.73	13.57	12.48	35.79	20
60	13.71	14.00	13.40	14.19	13.82	34.45	0

Início - data: 24/02/94

hora: 9h18m

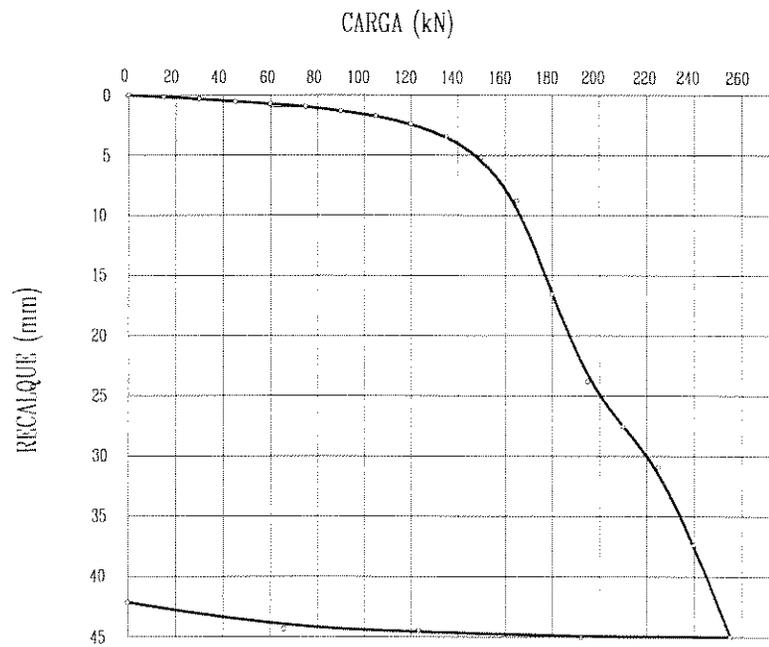


Figura 21. Prova de carga rápida realizada na estaca C1, a qual recebeu isopor de 25 mm em sua ponta.

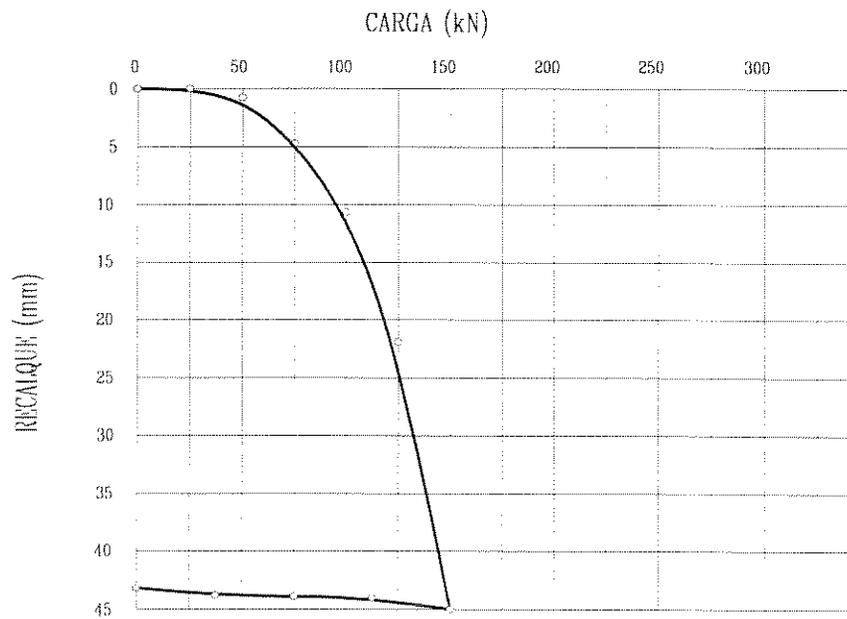


Figura 22. Prova de carga lenta realizada na estaca C2.

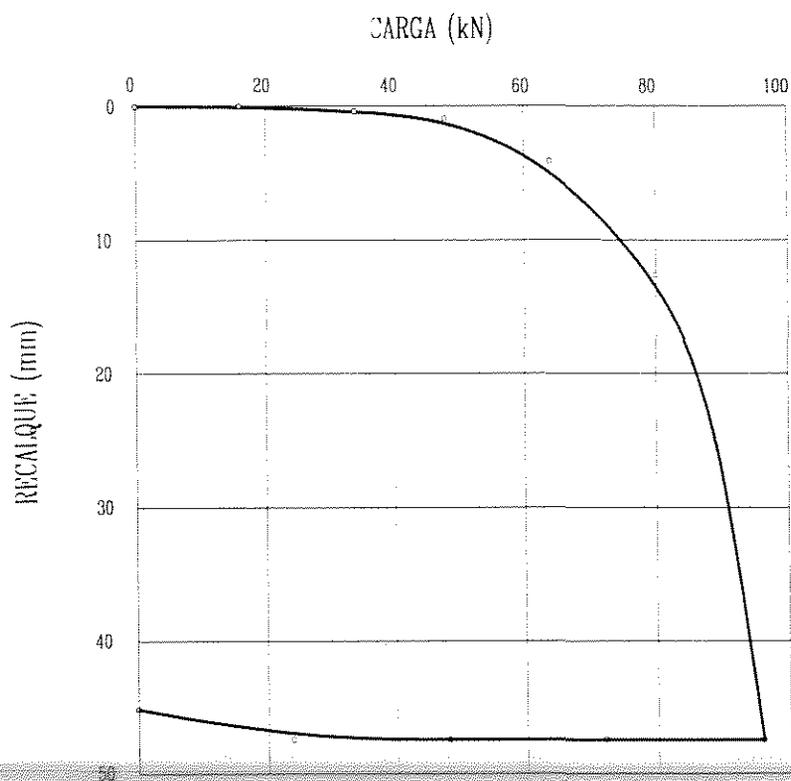


Figura 23. Prova de carga lenta realizada na estaca SCC1

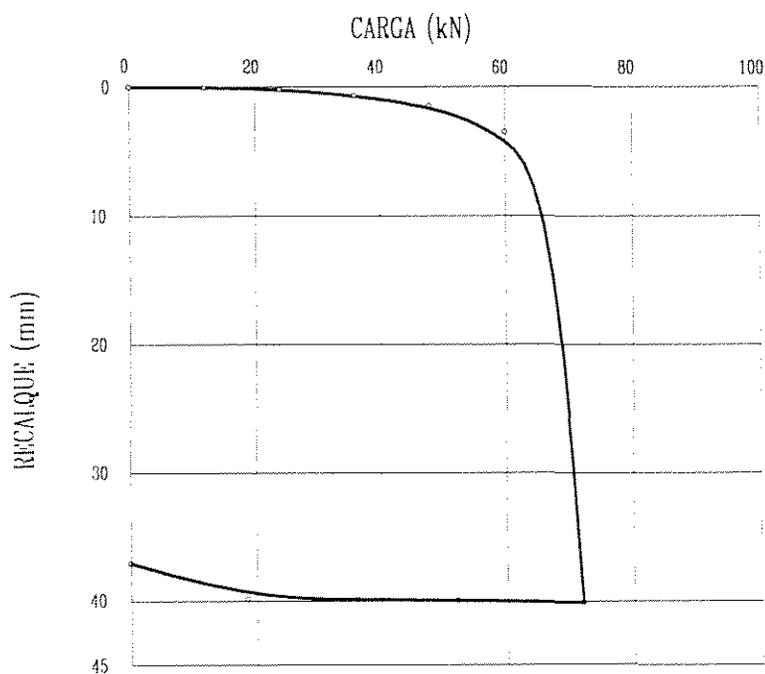


Figura 24. Prova de carga lenta realizada estaca SCC2, a qual recebeu isopor de 100 mm em sua ponta.

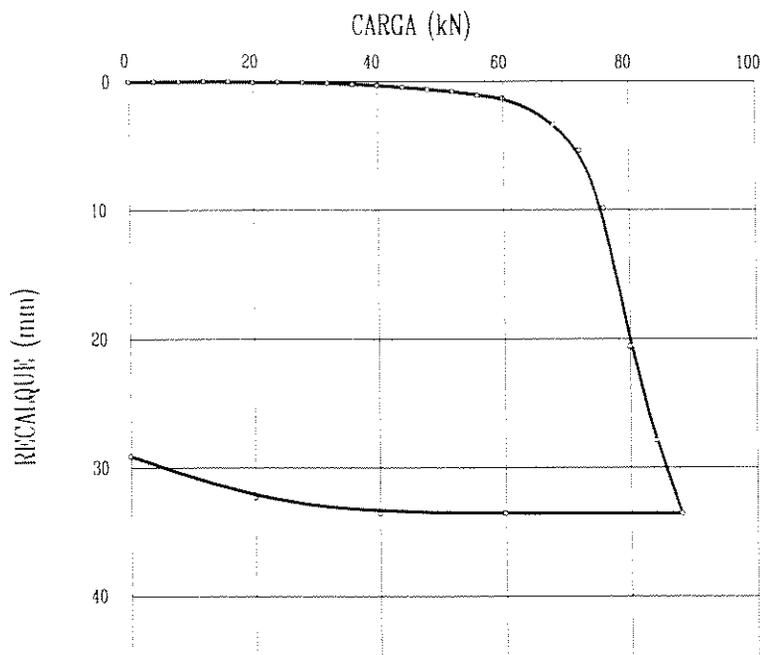


Figura 25. Prova de carga rápida realizada na estaca SCC3, a qual recebeu isopor de 100 mm em sua ponta.

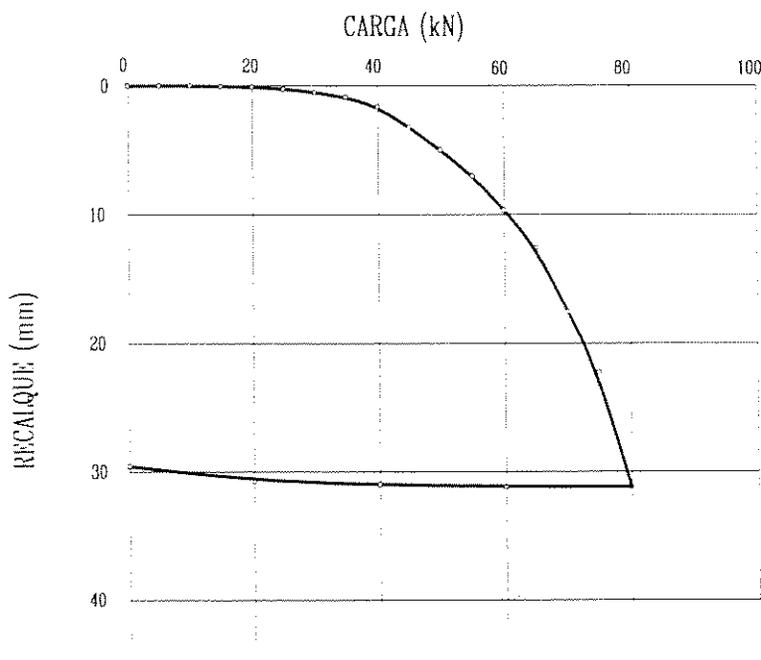


Figura 26. Prova de carga rápida realizada na estaca SCP1, a qual recebeu isopor com espessura de 100 mm em sua ponta.

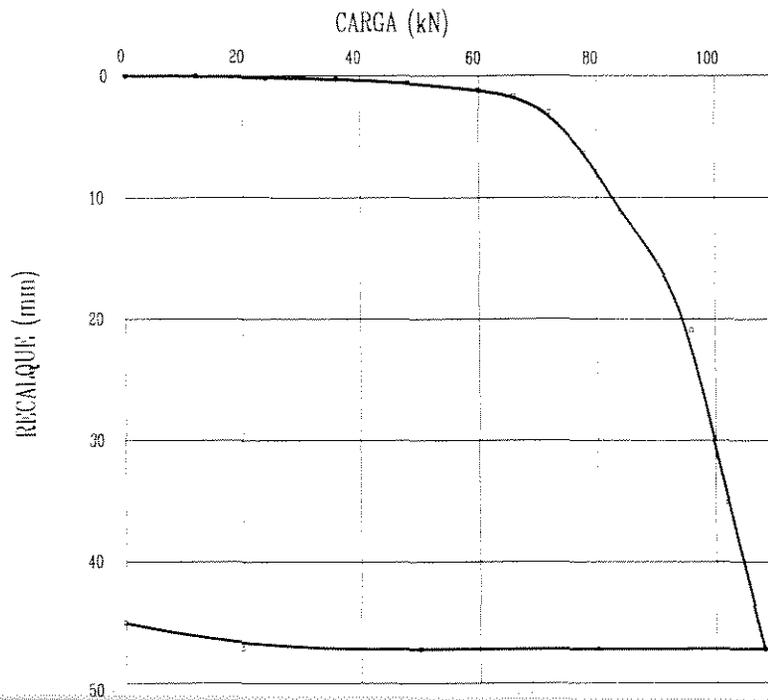


Figura 27. Prova de carga lenta realizada na estaca SCP2

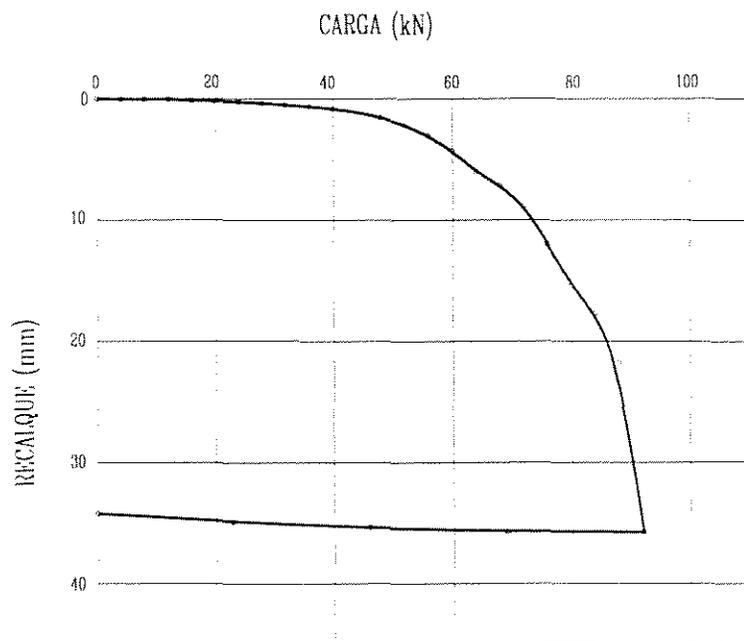


Figura 28. Prova de carga rápida realizada na estaca SCP3, a qual recebeu isopor com 100 mm de espessura em sua ponta.

## 6. ANÁLISE E DISCUSSÃO

### 6.1. Técnicas construtivas

---

#### 6.1.1. Solo-cimento compactado

Para a execução das estacas de solo-cimento compactado adotou-se o mesmo procedimento que se emprega na confecção de paredes monolíticas, de acordo com as instruções do *Manual de Construção com Solo-cimento* (CEPED, 1984). Verificou-se que trata-se de um procedimento de fácil assimilação por parte dos operários. Porém, diferentemente do que ocorre em paredes monolíticas, a aplicação do solo-cimento compactado em estacas não apresentou as mesmas características de trabalhabilidade, havendo um maior consumo de tempo e mão-de-obra para a aplicação do material. O lançamento em camadas sucessivas de pequena espessura (20 cm no máximo) associado à necessidade de compactação na umidade ótima e escarificação da superfície adjacente antes de cada novo lançamento, fizeram com que o processo construtivo, no seu todo, se tornasse

bastante lento. Observou-se que a execução de estacas empregando-se essa metodologia requer controle e fiscalização rigorosos em todas as etapas, havendo necessidade de verificação da espessura da camada de lançamento e verificação constante da umidade ótima para permitir que a ação da compactação se dê de forma adequada. Os ensaios para a determinação da resistência à compressão simples (Quadro 9), serviram para mostrar que mesmo sendo preparado dentro de um laboratório, com todos os cuidados possíveis e com auxílio de pessoal técnico altamente capacitado, ainda assim os resultados obtidos apresentaram certa dispersão. Ao que tudo indica, a ocorrência desse fato está associada à dificuldade de se controlar e manter o material com teor de ~~umidade em torno da ótima, o que evidencia a necessidade de~~ fiscalização e controle rigorosos durante a aplicação no campo.

Constatou-se, também, que para garantir uma homogeneização perfeita, o solo deve estar bem seco antes de ser misturado ao cimento. No caso de haver umidade em excesso, observou-se que as partículas de cimento acabam se aglutinando, provocando a formação indesejável de pequenos torrões de cimento. Na preparação da mistura, portanto, é necessário que o solo seja deixado exposto à radiação solar, sendo revolvido de vez em quando, tendo em vista a eliminação ao máximo possível da umidade existente. O solo seco deve ser convenientemente estocado ao abrigo de condições desfavoráveis de umidade.

Para ser viável e competitivo em termos de mercado, o processo construtivo para a execução de estacas com solo-cimento compactado deve passar necessariamente por um processo de

aprimoramento no que se refere a equipamentos a serem utilizados, seja no processo de mistura ou mesmo na sua aplicação.

Com relação ao custo envolvendo apenas os materiais aplicados, observou-se que o consumo de cimento foi da ordem de 150 kg/m<sup>3</sup>. Para o concreto, o consumo de cimento geralmente é da ordem de 300 kg/m<sup>3</sup>, devendo ainda ser acrescentado o custo com os agregados. Observou-se que custo referente à mão-de-obra utilizada para a produção e aplicação do solo-cimento, entretanto, é superior ao do concreto.

~~Por outro lado, em obras de cunho social, notadamente~~ aquelas executadas em regime de mutirão ou autoconstrução, onde o custo da mão-de-obra não é incorporado ao custo final do produto, desde que sejam tomados os devidos cuidados no que se refere à fiscalização, a aplicação do solo-cimento compactado poderá significar um avanço no sentido de se ampliar os horizontes em termos de sistemas alternativos, mais econômicos, também na fase de fundações.

A execução da estaca piloto em solo-cimento compactado, além de propiciar treinamento aos operários, possibilitou a realização de uma inspeção "in-situ" através da abertura de uma vala ao seu redor. Verificou-se que o elemento de solo-cimento não sofreu qualquer tipo de retração que pudesse ser visivelmente notada. Observou-se, ainda, que o sistema adotado para a confecção dessas estacas conferiu ao elemento uma textura lisa, em função da textura também lisa

apresentada pela superfície do furo em razão da ação da queda do pilão.

A resistência obtida em ensaios de compressão simples mostrou que o solo-cimento pode ser aplicado com segurança em elementos de fundação, principalmente em estacas moldadas "in loco", onde a favor da segurança, conta-se ainda com o efeito provocado pelo confinamento do material. Para o solo utilizado como componente, obteve-se para a mistura de solo-cimento compactado uma resistência média de 7,09 MPa aos 28 dias. Com essa resistência, um elemento com 0,20 m de diâmetro ( $\text{Área}=314 \text{ cm}^2$ ) suportaria perto de 220 kN.

~~Em obras de pequeno porte as cargas que chegam às estacas~~ dificilmente atingem 100 kN. Existe, contudo, uma dificuldade associada à "junta fria" que se forma na transição entre o solo-cimento e o material dos outros elementos, geralmente concreto. Nesse caso, sugere-se que sejam efetuados outros trabalhos e pesquisas no sentido de se dar prosseguimento a este trabalho visando a obtenção de soluções técnicas que viabilizem a aplicação desse material sem a necessidade de grandes esforços para suplantar as dificuldades advindas desse processo construtivo.

Para os casos em que seja necessária uma maior capacidade de carga e, conseqüentemente, de elementos mais resistentes, principalmente na "cabeça" da estaca, existe a possibilidade de se executar estacas mistas. Nesse caso, sugere-se que a cabeça da estaca, ou seja, a parte superior do seu fuste, seja feita em concreto e o restante em solo-cimento. Dessa forma, a parte da estaca composta por

solo-cimento estará totalmente enterrada e confinada, sendo a parte superior do fuste executada de forma convencional. Esse procedimento possibilitará inclusive a colocação de ferragens de espera, permitindo uma perfeita transição entre a infra-estrutura e a estrutura a ser executada posteriormente.

### 6.1.2. Solo-cimento plástico

A utilização do solo-cimento plástico permitiu uma maior rapidez na produção e na aplicação do material. A maioria das ~~operações foram simplificadas de forma significativa. A mistura dos~~ materiais componentes em betoneira permitiu uma maior agilidade ao processo. O controle da umidade foi efetuado inicialmente através do "slump-test" e, posteriormente, apenas pelo volume de água a ser adicionado. A mistura em betoneira proporcionou melhorias consideráveis à qualidade do produto final, permitindo uma perfeita homogeneização dos componentes. Observou-se, ainda, que em razão da melhor eficiência do processo de homogeneização, a dispersão nos resultados obtidos para a resistência à compressão foi inferior àquela observada para o solo-cimento compactado, conforme mostra o Quadro 15. Por outro lado, verificou-se que, utilizando o mesmo traço, os valores de resistência à compressão simples foram menores do que os obtidos para o solo-cimento compactado. Esse fato evidencia a necessidade de se usar teores de cimento superiores, a fim de se obter resistências equivalentes àquelas que se obtém para o solo-cimento compactado.

As condições de trabalhabilidade para a produção do solo-cimento plástico em betoneira não se equiparam às condições de preparo do concreto. Observou-se que existe uma tendência natural de aglutinação da massa na superfície interna da betoneira, principalmente no início da operação, quando a mistura não dispõe ainda da quantidade total da água de amassamento. Entretanto, no momento em que se atinge a consistência desejada, esse problema praticamente é eliminado e a homogeneização se processa de forma satisfatória. ANDRADE FILHO (1989) cita que para solos muito argilosos as condições de trabalhabilidade podem ser melhoradas através da adição de pequenas quantidades de agregado miúdo.

A moldagem das estacas de solo-cimento plástico se deu simplesmente pelo lançamento do material dentro no furo, sem qualquer tipo de compactação ou adensamento. Ou seja, adotou-se o mesmo procedimento que usualmente se emprega em canteiros de obra quando do lançamento do concreto em estacas semelhantes. A adoção desse procedimento praticamente não provocou alterações nos resultados obtidos para as provas de carga realizadas, tanto para as estacas de solo-cimento compactado como para as de solo-cimento plástico, conforme pode ser observado nos resultados obtidos para as estacas de solo-cimento (Figuras 23 a 28).

Por outro lado, há que se ressaltar que o concreto para a aplicação em estacas, de acordo com o que manda a boa técnica, deve apresentar um baixo fator água/cimento, ou seja, deve estar quase

"seco". O seu lançamento também deve ser feito em camadas sucessivas e compactadas através da ação da queda de um pilão. Verifica-se, portanto, que esse procedimento não difere muito daquele utilizado para o solo-cimento compactado. No entanto, não é isso o que se observa nos canteiros de obra. Na grande maioria das vezes, a produção do concreto para emprego em estacas é feita de forma a se obter um material de consistência bastante fluida, justamente para facilitar o lançamento e evitar a necessidade da compactação. Para evitar a ocorrência de prejuízos à qualidade do produto final, no que se refere à resistência à compressão simples, os construtores habituaram-se a incrementar de forma empírica uma certa quantidade de cimento, ~~além daquela especificada pelo traço original, visando assim equilibrar~~ o fator água/cimento previamente estabelecido e minimizar a ocorrência da diminuição da resistência à compressão simples.

## **6.2. Provas de carga**

### **6.2.1. Estacas de Concreto**

Executou-se duas estacas de concreto, sendo que uma delas recebeu em sua ponta uma "bolacha" de isopor com 0,20 m de diâmetro e espessura de 25 mm. Procurou-se, com esse procedimento, fazer com que a carga aplicada à estaca mobilizasse primeiramente a resistência lateral, para depois mobilizar a ponta da estaca. Assim, observou-se

que nessa estaca (C1), através da realização de prova de carga rápida, para o deslocamento referente aos 25 mm correspondentes à espessura do isopor, foi necessária a aplicação de uma carga de 195 kN. Após esse deslocamento, verificou-se que houve uma inflexão da curva *carga x recalque* correspondente à mobilização da resistência de ponta. A prova de carga foi conduzida até a carga de 255 kN, provocando um recalque total de 45 mm na cabeça da estaca.

Considerando tratar-se de uma estaca de deslocamento e admitindo-se que os recalques ocorridos após a inflexão da curva (20,7 mm  $\approx$  10 % do diâmetro) foram suficientes para mobilizar toda a ~~resistência de ponta, tem-se que a carga atuante na ponta da estaca~~ correspondeu a 60 kN. Dessa maneira, da carga total de 255 kN aplicada à estaca, 24% foi transferida para a ponta e 76% para o fuste. Observa-se, portanto, a necessidade de grandes deslocamentos (10% do diâmetro) para se mobilizar a resistência de ponta. Essa estaca foi submetida a prova de carga rápida.

Para a segunda estaca de concreto (C2), executada sem isopor na ponta, atingiu-se um valor de carga última de 150 kN, o que provocou um deslocamento de 44,33 mm na cabeça da estaca. Observa-se na Figura 22 que para um recalque de 20 mm (10% do diâmetro), foi necessário mobilizar cerca de 80% da carga última. Portanto, para a mobilização dos 20% de carga restantes, analogamente ao que ocorreu para a estaca C1, verificou-se que houve a necessidade de grandes deslocamentos (superiores a 25 mm). Essa estaca foi submetida a prova de carga lenta.

Considerando-se os resultados obtidos para essas duas estacas, verifica-se que houve uma grande variação entre os valores obtidos para as cargas últimas (255 kN e 150 kN), sendo um valor 70% superior ao outro. Variações semelhantes também foram encontradas por MACACARI (1994) no Campo Experimental da USP em São Carlos-SP onde, para estacas idênticas ( $\varnothing = 0,20$  m,  $L = 6,00$  m) e subsolo semelhante ao de Ilha Solteira-SP, obteve-se valores de carga última de 232 kN, 200kN e 150 kN. Admitindo-se que cerca de 25% da carga última desse tipo de estaca seja transferida para a ponta, tem-se valores de atrito lateral unitário médio de 40,31 kPa para Ilha Solteira e 38,61 kPa para São Carlos. Os valores de atrito lateral unitário mínimo, tanto para Ilha Solteira como para São Carlos, são de 29,86 kPa. Para a resistência de ponta tem-se valores médios de 1620 kPa e 1545 kPa para Ilha Solteira e São Carlos respectivamente.

Cumprе salientar que para a obtenção dos valores médios, tanto para essas estacas (de concreto), como para as de solo-cimento, admitiu-se não haver diferença de resultados, em termos de carga última, em função de se ter realizado ensaios rápidos ou lentos, fato este que precisa ser comprovado pela prática.

As fórmulas empíricas, comumente usadas para a previsão de cargas últimas em estacas, conduziram aos valores apresentados no Quadro 24, onde são feitas comparações com os valores obtidos nas provas de carga realizadas. Para a aplicação das fórmulas citadas, considerou essas estacas como sendo estacas de deslocamento. Foram

utilizados os valores da sondagem de penetração estática (Figura 18) realizada no local.

QUADRO 24. Valores de carga última estimados e valores obtidos em provas de carga.

<b>Autores</b>	<b>fu</b> (kPa)	<b>qponta</b> (kPa)	<b>fuf/</b> <b>fupc</b>	<b>quf/</b> <b>qupc</b>	<b>Qu</b> (kN)	<b>Quf/</b> <b>Qupc</b>
AOKI (1975)	7.63	1513	0.19	0.98	76.26	0.38
DECOURT (1982)	18.89	1200	0.47	0.78	108.86	0.54
VELLOSO (1981)	26,70	1789	0.66	1.16	156.78	0.77
MEYERHOF (1976)	5.34	1068	0.13	0.69	53.66	0.26
PHILIPPONAT (1978)	24.58	972	0.61	0.63	123.16	0.61
PROVA DE CARGA ILHA SOLTEIRA (MÉDIA)	40.31	1547			202.50	

Observa-se que os valores de atrito lateral fornecidos pelas fórmulas empíricas estão bastante distantes daqueles fornecidos pelas provas de carga, o mesmo não acontecendo para a resistência de ponta. Em termos de carga última, todas as fórmulas forneceram valores abaixo daqueles obtidos nas provas de carga. De todas as fórmulas utilizadas, VELLOSO (1981) foi a que mais se aproximou dos valores obtidos em campo.

### 6.2.2. Estacas de solo-cimento compactado

Das três estacas executadas em solo-cimento compactado, todas com 0,20 m de diâmetro e 6,00 m de profundidade, duas receberam "bolachas" de isopor na ponta (SCC2 e SCC3). Nesse caso, porém, a espessura do elemento de isopor foi de 100 mm. Procurou-se, medir, assim, somente a resistência lateral das estacas em uma primeira prova de carga e futuramente voltar a realizar novas provas de carga com o objetivo de se verificar o seu comportamento em termos de resistência por atrito lateral ao longo do tempo. As estacas SCC1 e SCC2 foram submetidas a provas de carga lenta e a estaca SCC3 foi submetida a prova de carga rápida.

As cargas últimas das estacas SCC2 (72kN) e SCC3 (88kN), conforme pode ser observado nas Figuras 24 e 25, foram mantidas até que se atingisse recalques de 40,12 mm e 32,01 mm, respectivamente, mobilizando, dessa forma, somente o atrito lateral, uma vez que a espessura do isopor utilizado foi de 100 mm. Logo, a carga última lateral média, nesse caso de 80 kN, conduziu a um atrito lateral unitário médio de 21,23 kPa. Esse valor corresponde a 53% do valor obtido para as estacas de concreto.

Para a estaca SCC1, sem isopor na ponta, atingiu-se um valor de carga última de 96 kN, provocando um recalque de 47,43 mm na cabeça da estaca, conforme mostra a Figura 23. Admitindo-se que a carga última lateral seja de 80kN, valor que corresponde à média dos resultados obtidos para as duas estacas com isopor na ponta (SCC2 e

SCC3), obtém-se uma carga última na ponta equivalente a 16 kN. Esse valor correspondente a 17% da carga última total.

Nos ensaios para a determinação da resistência à compressão simples efetuados para o solo-cimento compactado (Quadro 9), obteve-se em média 7,09 MPa aos vinte e oito dias. Os carregamentos aplicados nas estacas foram de 3,0 MPa, 2,3 MPa e 2,8 MPa. O maior desses valores corresponde a 42% da resistência média obtida em laboratório.

### 6.2.3 Estacas de solo-cimento plástico

Das três estacas de solo-cimento plástico executadas, todas com 0,20 m de diâmetro e 6,00 m de profundidade, duas receberam "bolachas" de isopor na ponta, com 100 mm de espessura. Da mesma forma, nessa primeira prova de carga, procurou-se medir somente a resistência lateral, possibilitando futuramente a realização de novas provas de carga com o objetivo de verificar o comportamento do solo-cimento plástico com relação ao atrito lateral, ao longo do tempo. A estaca SCP2 foi submetida a prova de carga lenta e as estacas SCP1 e SCP3 foram submetidas a provas de carga rápidas.

As cargas últimas obtidas para as estacas com isopor na ponta, ou seja SCP1 (80 kN) e SCP3 (92 kN), foram mantidas até que se atingisse os recalques de 31,7 mm e 36,40 mm, respectivamente, conforme mostram as Figuras 26 e 28, mobilizando dessa forma

somente o atrito lateral. Isso indica que a carga última lateral média foi de 86 kN, conduzindo a um atrito lateral unitário médio de 22,82 kPa. Este valor praticamente não difere daquele obtido para as estacas de solo-cimento compactado (21,23 kPa) e é 43% inferior ao valor de atrito obtido para as estacas de concreto (40,31 kPa).

Para a estaca SCP2, sem isopor na ponta, atingiu-se um recalque de 47,16 mm para um carregamento de 108 kN. Admitindo-se uma carga lateral de 86 kN, valor este que corresponde à média dos resultados obtidos para as duas estacas com isopor na ponta, obtem-se uma carga última na ponta da estaca equivalente de 22 kN. Esse valor ~~corresponde a 20% da carga total.~~

Para o solo-cimento plástico empregado nessas estacas, o controle de qualidade indicou uma resistência média à compressão simples, aos vinte e oito dias, de 3,95 MPa (Quadro 15). Os valores de carregamento máximo aplicados às estacas foram de 2,5 MPa, 2,7 MPa e 3,4 MPa, sendo esse último valor de carregamento correspondente a 86% da resistência média do material. Este fato, provavelmente, foi o causador das variações verificadas nas curvas das estacas SCP2 e SCP3, conforme se observa nas figuras 27 e 28.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos através da realização das provas de carga em estacas apiloadas de solo-cimento compactado e de solo-cimento plástico indicam a possibilidade técnica de sua aplicação, respeitadas as características de capacidade de carga, tanto em termos do material solo-cimento como da ligação estaca de solo-cimento x solo.

A utilização de elementos de isopor na ponta de algumas das estacas permitiu a obtenção de valores apenas de atrito lateral, conforme pode ser verificado e comprovado através do resultado obtido para a estaca de concreto C1 (Figura 21). Observa-se que somente após o esmagamento do isopor, nesse caso com espessura de 25 mm, é que houve a inflexão na curva *carga x recalque*, evidenciando a reação da ponta da estaca. Conclui-se, portanto, tratar-se de uma metodologia simples, de baixo custo e de fácil aplicação, podendo ser utilizada de

forma segura e eficiente para a determinação da resistência por atrito lateral.

O atrito lateral médio obtido para as estacas de solo-cimento compactado (21,23 kPa) e solo-cimento plástico (22,82 kPa) foram praticamente iguais. Esses valores são cerca de 45% inferiores aos obtidos para as estacas de concreto.

Os resultados das provas de carga indicaram valores de transferência de carga para a ponta de cerca de 17%, 20% e 24% da carga máxima aplicada para as estacas de solo-cimento compactado, solo-cimento plástico e concreto, respectivamente. A mobilização total dessas resistências ocorre para deslocamentos superiores a 10% do diâmetro das estacas.

As estacas apiloadas de concreto apresentaram uma grande variação nos valores de carga última. O mesmo não se verificou com relação às estacas de solo-cimento. LOBO (1991) e MACACARI (1994) também encontraram variações semelhantes para estacas apiloadas de concreto, executadas em solos semelhantes ao de Ilha Solteira, nas cidades de Bauru-SP e São Carlos-SP, respectivamente. A realização de mais provas de carga em condições semelhantes, ou seja, mesmo tipo de estaca e mesmo tipo de solo, se faz necessária tendo em vista a obtenção de valores médios mais confiáveis.

Todas as fórmulas de previsão empregadas para as estacas de concreto forneceram valores de carga última inferiores às obtidas

através das provas de carga, o que evidencia a necessidade de se estabelecer, nessas fórmulas, parâmetros mais específicos para esse tipo de estaca e para esse tipo de solo. Na medida em que as experiências forem se acumulando, o mesmo deverá ser feito em relação às estacas de solo-cimento.

Dos resultados obtidos nas provas de carga e da análise referente às técnicas construtivas, conclui-se que entre o solo-cimento compactado e o solo-cimento plástico, o último se mostrou mais viável em termos de trabalhabilidade para a substituição do concreto em elementos de estacas. Não obstante, o processo construtivo deve ser ~~aprimorado no sentido de facilitar a preparação do material,~~ principalmente no que diz respeito à adequação dos equipamentos a serem utilizados.

Conclui-se, finalmente, que o solo-cimento (plástico ou compactado) é viável tecnicamente para ser aplicado em estacas apiloadas para obras de pequeno porte. A sua utilização no mercado da construção significará uma contribuição decisiva no sentido de baratear os custos envolvidos em pequenas edificações, notadamente as de caráter social, bem como para o meio rural onde as dificuldades para a execução de obras são bem mais significativas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland., (1979). Paredes monolíticas de solo-cimento: Hospital Adriano Jorge. São Paulo-SP, 1979. Relatório Técnico n.º 04. 55p.

\_\_\_\_\_. (1983a). Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo-SP, Estudo Técnico n.º 35, 59p.

\_\_\_\_\_. (1983b). Construção das bases de solo-cimento pelo processo de mistura na pista. São Paulo-SP, Estudo Técnico n.º 40, 55p.

\_\_\_\_\_. (1983c). Solo-cimento para revestimento de barragens, diques e reservatórios. São Paulo-SP, Estudo Técnico n.º 34, 14p.

\_\_\_\_\_. (1985a). Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. São Paulo-SP, 1985a. Boletim Técnico n.º 111. 5p.

- \_\_\_\_\_, (1985b). Construção de paredes monolíticas com solo-cimento compactado. São Paulo-SP, 1985b. Boletim Técnico n.º 110. 5p.
- \_\_\_\_\_, (1985c). Ruas de solo-cimento: Prática de construção. São Paulo-SP, 1985c. Boletim Técnico n.º 86. 8p.
- \_\_\_\_\_, (1986). Aplicação de solo-cimento em pequenas áreas urbanas. São Paulo-SP. Boletim Técnico n.º 109. 9p.
- ABIKO, A. K., (1980). Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento. São Paulo-SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da USP. 115p.
- ANDRADE F.º J. (1989) Reforço de solos com a utilização de tubulões em solo-cimento. São Carlos-SP. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos-USP. 190p.
- AOKI, N. & VELLOSO, D.A., (1975). Um método aproximado para estimativa de carga de estacas. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 5, Buenos Aires. Anais. Buenos Aires, Sociedad argentina de Mecánica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones, 1975. pp. 367-376.
- BAUER G. & CARVALHO J.B.Q., (1990). Estabilização de solos lateríticos com cal: propriedades geotécnicas, reações e produtos formados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS, 9, Salvador-BA, 1990. v.2, pp.207-211.
- CARVALHO, P. A.; HEELVIG Jr. A. & AGUIAR, R., (1986). Avaliação de juntas de solo-cimento. Porto Alegre-RS. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8, v.4 pp.245-263

CESP - Companhia Energética de São Paulo., (1986). Dosagens de misturas de solo com cimento: métodos de ensaio. Ilha Solteira-SP. Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP - MSL-8. 28p.

CEPED - Centro de pesquisas e desenvolvimento., (1984). Manual de construção com solo-cimento. Camaçari-BA. Convênio CEPED/ BNH/ URBIS/ CONDER/ PMC/ OEA/ CEBRACE/ ABCP. 147p.

CINVA - Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento., (1963). Suelo-cemento: su aplicación en la en la edificación. Bogotá, Colômbia,

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica., (1976). Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 7, 8 e 9, Vol. 2 e 4.

---

DECOURT, L., (1982). Prediction of the bearing capacity of piles based exclusively on N values of the SPT. In: EUROPEAN SYMPOSIUM ON PENETRATION TESTING, 2, Amsterdam, Proceedings. Rotterdam, Balkema, 1982. v.1 pp.29-34.

FERREIRA, R.C. & MONTEIRO, L.B., (1985). Identification and evaluation of collapsibility of colluvial soils that occur in the São Paulo state. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOIL, 1, Brasilia-DF, Brasil, Proceedings, ABMS, 1985, v.1 pp. 269-280.

FREIRE, W. J., (1976). Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento. Piracicaba-SP. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo. 142p.

- GUIDA, H., (1974). Estabilização de solos lateríticos com ácido fosfórico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS, 5, São Paulo-SP, 1974. v.2, pp.1-37.
- IPCA - Instituto del Cemento Portland Argentino., (1973). Boletín. Buenos Aires, mar./abr 1973. 7(32).
- LOBO, A.S., (1991). Colapsividade do solo de Bauru e sua influência em estacas de pequeno porte. São Carlos-SP, EESC-USP, Tese de Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, 211p.
- MAC., (1975). Ministère des Affaires Culturalles. Minimôme découvre la terre. Unité Pédagogique d'Architecture de Genobre. 359p.
- 
- MACACARI, M.F., (1994). Comportamento de estacas apiloadas em solo colapsível. X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, Foz do Iguaçu-PR.
- MERRIL, A.F., (1949). Casas de tierra apisonada y suelo-cemento. Buenos Aires, Windsor, 1949.
- MEYERHOF, G.G., (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundation. Journal of the Soil Mechanics and foundation div., ASCE, 99(3). pp.197-228.
- NASCIMENTO, A.A.P., (1994). Um estudo sobre fissuras em alvenarias: solo-cimento. São Paulo-SP. Editora Pini, Revista Thécne n.º 10, maio/junho 1994. pp.23-27.
- OKAMOTO, T.; TAKANO, K. & NAGAOKA, H., (1988). A new pile foundation composed of soil cement and steel pipe. Balkema, Rotterdam, Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Vam Impe (ed.). pp.371-376.

PHILIPPONNAT, G. et al., (1978). Methode pratique de calcul des pieux à l'aide du pénétromètre statique. Paris, Soletanche Entreprise, 1978. 21p. (Informations Thecnicques Bulletin, 16).

PINTO, C. S., (1980). Evolução das pesquisa de laboratório sobre solo-cimento. São Paulo-SP, ABCP, 22p.

PINTO, C. S., (1990). Estudo comparativo de estabilização com cal de um solo saprolítico e de um solo laterítico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS, 9, Salvador-BA, 1990. v.2. pp.227-234.

~~PCA - Portland Cement Association., (1971). Soil-cement for dams, contracts awarded. Skokie, PCA. (MS004.02W).~~

NUSSBAUM, P. J. & COLLEY, B.E., (1971). Dam Construction and facing with soil-cement. Skokie, PCA. (RD010.01w).

SILVA, E.T., (1992). Solo-cimento e solo-vinhaça no revestimento de canais de irrigação para transporte de vinhaça: adequação física e parâmetros hidráulicos. Campinas-SP. Dissertação (Mestrado em engenharia Agrícola) apresentada à UNICAMP - Universidade de Campinas. 108p.

VELLOSO, P. P. C., (1981). Considerações sobre a estimativa da capacidade de suporte e dos deslocamentos vertical e horizontal de estacas em solo. Brasilia, UnB-Engenharia Civil.