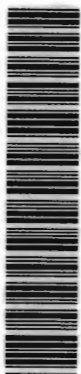


# CONSIDERAÇÕES SOBRE CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS PELA TEORIA DA EQUAÇÃO DA ONDA

**Maurício Pereira**

DEDALUS - Acervo - EESC



31100007824

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Henrique Albiero

São Carlos  
1997



Class.	TESE - EESC
Curr.	4333
Tombo	T 0042/98

3110000.7824

S/S 942216

TESE-EESC  
P436co

Pereira, Maurício

Considerações sobre capacidade de carga  
de estacas pela teoria da equação da onda /  
Maurício Pereira. São Carlos, 1997

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia  
de São Carlos - Universidade de São Paulo,  
1997

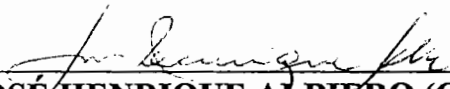
Orientador: Prof. Dr. José Henrique Albiero

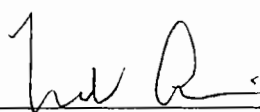
1. Fundações. 2. Instrumentação. I. Título

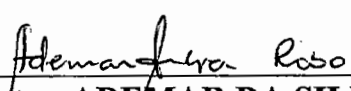
## FOLHA DE APROVAÇÃO

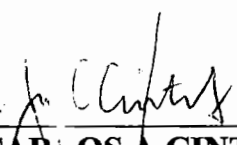
Candidato: Engenheiro MAURICIO PEREIRA

Dissertação defendida e aprovada em 24-10-1997  
pela Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **JOSÉ HENRIQUE ALBIERO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. **NELSON AOKI**  
(Especialista - EESC - Universidade de São Paulo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Doutor **ADEMAR DA SILVA LOBO**  
(Universidade Estadual Paulista - Campus de Bauru)

  
\_\_\_\_\_  
**JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Coordenador da Área de Geotecnia e  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*À Dona Cida, minha mãe, cuja luz iluminou sempre o meu caminho.  
E à Marina, esposa amada, com quem descobri a alegria de caminharmos juntos.*

## **Agradecimentos:**

Ao Professor José Henrique Albiero, pela dedicada orientação fornecida, pelo incentivo e, sobretudo, pelo exemplo de figura humana.

Ao Professor José Carlos Angelo Cintra, pelo apoio e amizade.

Ao Professor Nelson Aoki, por sugestões e esclarecimentos.

À Professora Sandra Aurélia de Oliveira Cupini, pelo incentivo e amizade.

Ao Engenheiro Sérgio Valverde da PDI Prova Dinâmica e Instrumentação, pelo material fornecido, por sugestões, esclarecimentos, apoio e amizade.

Ao Engenheiro Cláudio Gonçalves da Estacas Benaton Ltda., por material fornecido e sugestões.

À Protendit, por material fornecido.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas, pelo apoio.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, pela colaboração.

Ao amigo exemplar Engenheiro Roberto Faria Cavalcanti, pelo estímulo constante, e irrestrita solidariedade.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1.INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	4
2.1. Considerações Iniciais.....	4
2.2. Breve Histórico.....	5
2.3. Teoria da Equação da Onda de Smith.....	8
2.4. Equipamentos de Campo.....	12
2.5. Instrumentos Empregados.....	15
2.6. Considerações sobre a Propagação da Onda.....	17
2.7. Formulação Básica.....	18
2.8. Influência das Condições de Contorno.....	21
2.9. Diagrama Representativo da Trajetória das Ondas.....	22
2.10. Métodos de Análises Elásticas de Estacas.....	23

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
4. CAPWAP x FÓRMULAS DINÂMICAS.....	69
5. CORRELAÇÕES CAPWAP x MÉTODOS EMPÍRICOS.....	75
5.1. Introdução.....	75
5.2. Tabelas com Resultados Obtidos.....	77
5.3. Comentários sobre os Resultados Encontrados.....	93
5.4. Influência do Comprimento Cravado.....	95
5.5. Influência da Seção da Estaca.....	96
6. ANÁLISES CAPWAP x REPIQUES ELÁSTICOS.....	97
7. CONCLUSÕES.....	101

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Representação do Modelo de Smith para o sistema martelo/estaca/solo.	9
FIGURA 2- Diagrama Força x Deslocamento na ponta da estaca.....	10
FIGURA 3- Representação do conjunto básico para aquisição dos dados no campo.	12
FIGURA 4- Foto de um equipamento PDA - modelo PAK.....	14
FIGURA 5- Ilustração representativa dos instrumentos de campo.....	15
FIGURA 6- Formação da onda no impacto.....	17
FIGURA 7- Deformação do elemento da estaca decorrente da propagação da onda.	20
FIGURA 8- Representação da solução da equação da onda.....	20
FIGURA 9- Esquema ilustrativo de algumas condições de contorno.....	21
FIGURA 10- Representação da trajetória das ondas incidentes e refletidas.....	22
FIGURA 11- Modelo extendido do CAPWAPC para a resistência do solo.....	28
FIGURA 12- Exemplo de sinais obtidos no campo com o PDA.....	29
FIGURA 13- CASE/CAPWAPC x Provas de carga estáticas - Goble et.at.(1980)...	32
FIGURA 14- Comparação de resultados provas de carga estáticas e programa CH83 - Liang et.al.(1983).....	34
FIGURA 15- Comparação das curvas carga x deslocamento para a estaca PRE 2 Apud Niyama & Aoki (1991).....	41
FIGURA 16- Correlações CAPWAP x PCE a partir do banco de dados da GRL, Inc. (1996).....	50
FIGURA 17- Densidade de probabilidade para diferentes relações de tempo.....	51
FIGURA 18- Fórmulas dinâmicas empregadas por Olson et.al. (1967).....	55
FIGURA 19- Correlações entre fórmulas dinâmicas e provas de carga para estacas de concreto armado, obtidas por Olson et.al (1967).....	56
FIGURA 20- Correlações entre fórmulas dinâmicas e provas de carga para estacas metálicas, obtidas por Olson et.al. (1967).....	57
FIGURA 21- Compilação dos parâmetros estatísticos.....	58
FIGURA 22- Correlações entre CAPWAP x Fórmulas Dinâmicas de Janbu e Dina- marquesa. - Resultados obtidos por Jimenez (1991).....	60
FIGURA 23- Correlações CAPWAP x Fórmula de Gates. - Valores obtidos por Jimenez (1991).....	61
FIGURA 24- Esquema do procedimento para medidas de repiques elásticos.....	63



FIGURA 25-Ilustração dos sinais registrados para uma série de golpes.....	64
FIGURA 26- Deslocamento do topo da estaca.....	64
FIGURA 27- Deslocamento da ponta da estaca.....	64
FIGURA 28- Seção esquemática do Registrador Dinâmico de Deslocamento RDD	68
FIGURA 29- Ilustração do esquema de aquisição de sinais, empregando o Repi- cômetro Eletrônico desenvolvido pelo IPT.....	68
FIGURA 30- Fórmulas dinâmicas empregadas neste estudo de correlação.....	71
FIGURA 31- Gráficos Comparativos - Análises CAPWAP x Fórmulas Dinâmicas...	73
FIGURA 32- PR (CAPWAP) x PR (Métodos Empíricos).....	84
FIGURA 33- PL (CAPWAP) x PL (Métodos Empíricos).....	85
FIGURA 34- PP (CAPWAP) x PP (Métodos Empíricos).....	86
FIGURA 35- Capacidade de Carga CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas em solos predominantemente argilosos.....	87
FIGURA 36- Capacidade de Carga CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas em solos predominantemente arenosos.....	88
FIGURA 37- Parcela de Atrito Lateral PL CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas em solos predominantemente argilosos.....	89
FIGURA 38- Parcela de Ponta PP CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas em solos predominantemente argilosos.....	90
FIGURA 39- Parcela de Atrito Lateral PL CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas em solos predominantemente arenosos.....	91
FIGURA 40- Parcela de Ponta PP CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas em solos predominantemente arenosos.....	92
FIGURA 41- Análises CAPWAP x Fórmulas que empregam medidas de repiques elásticos.....	100

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Valores da Constante de Amortecimento $J_c$ valores propostos por Goble et.al.(1980).....	25
TABELA 02 - Capacidade de Carga - CAPWAP x Ensaios Estáticos THOMPSON (1980).....	33
TABELA 03 - Previsões de Capacidade de Carga por diferentes métodos GOMES et.al.(1986).....	35
TABELA 04 - Capacidade de Carga - CASE/CAPWAP x Prova de Carga Estática por SILVA et.al.(1986) .....	36
TABELA 05 - Capacidade de Carga - CAPWAP x Prova de Carga Estática CHENG et.al. (1988) .....	37
TABELA 06 - Capacidade de Carga - WEAP x Prova de Carga Estática por LANGER et.al.(1988) .....	39
TABELA 07 -Influência da Relação Tempo nos resultados comparados por GRL Inc.(1996).....	47
TABELA 08 - Características das Estacas e Dados Referentes à Cravação .....	70
TABELA 09 - Valores de Capacidade de Carga - CAPWAP x Fórm. Dinâmicas.....	72
TABELA 10 - Características técnicas das estacas monitoradas .....	76
TABELA 11 - Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto protendido seção quadrada, lados de 17; 21.5; e 23.5 cm.....	77
TABELA 12 - Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto armado seções octogonais - diâmetros equivalentes de 36 e 42 cm...78	
TABELA 13 - Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto armado seção circular de 17 cm de diâmetro .....	79
TABELA 14 - Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto armado seção circular de 20 cm de diâmetro .....	80

TABELA 15 - Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto seção circular de 23 cm de diâmetro .....	81
TABELA 16 - Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto armado seção circular de 26 cm de diâmetro.....	82
TABELA 17 - Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto armado seções circulares de diâmetros 28 , 33, e 38 cm.....	83
TABELA 18 - Influência do Comprimento Cravado das Estacas .....	95
TABELA 19 - Características das Estacas e dos Sistemas de Cravação .....	98
TABELA 20 -Valores de Capacidade de Carga obtidos por Análises CAPWAP e via Medidas de Repiques Elásticos .....	99

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASCE - American Society of Civil Engineers
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- CAPWAP - Case Pile-Wave Analysis Program
- CAPWAPC - Case Pile-Wave Analysis Program - Continuous Model
- GRL, Inc. - Goble, Rausche, Likins & Associates, Inc.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
- PDA - Pile Driving Analyzer
- PCE - Prova de Carga Estática
- SEFE - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais
- SPT - Standard Penetration Test

## LISTA DE SÍMBOLOS

- a - aceleração da partícula da estaca em frente da onda
- A - área da seção transversal da estaca
- A - inclinação da linha de regressão
- B - intercepto da linha de regressão
- c - velocidade de propagação da onda na estaca
- $c_1$  - compressão elástica do capacete
- $c_2$  - compressão elástica da estaca
- $c_3$  - compressão elástica do solo
- $c_d$  - coeficiente de cravação
- $e_h E_n$  - energia despendida na cravação
- F - força na partícula da estaca no instante considerado
- h - altura de queda do martelo
- I - impedância da estaca =  $E \cdot A / c$
- Jc - constante de amortecimento do solo “damping”
- K - repique elástico
- L - comprimento embutido da estaca
- m - massa da estaca
- n - eficiência do sistema de cravação
- $n^2$  - coeficiente de restituição
- PR - capacidade de carga
- PL - parcela resistente do solo por atrito ou adesão lateral ao longo do fuste da estaca
- PP - parcela resistente do solo sob a ponta da estaca
- Q - “quake” - deformação elástica máxima do solo
- r - coeficiente de correlação estatística
- Rt - resistência total do solo à penetração da estaca para o golpe em questão
- Rs - componente estática de Rt

- $R_d$  - componente dinâmica de  $R_t$
- $R_{MX}$  - resistência máxima para o nível de energia transferida á estaca pelo golpe
- $S$  - área da seção transversal da estaca
- $s$  - “nega” - penetração permanente da estaca no terreno para o golpe aplicado
- $v_p$  - velocidade instantânea da ponta da estaca
- $v$  - velocidade da partícula da estaca situada na frente da onda
- $W_n$  - peso do martelo
- $W_p$  - peso da estaca
- 
- $\rho$  - massa específica do material da estaca

## RESUMO

PEREIRA, M. (1997). *Considerações sobre capacidade de carga de estacas pela teoria da equação da onda*. São Carlos, 1997. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

O emprego de métodos de análises apoiados na Teoria da Equação da Onda, a partir da instrumentação de medidas dinâmicas, como controle do comportamento de estacas tem evoluído continuamente nos últimos recentes anos. Trata-se de uma técnica em contínuo aperfeiçoamento, que possibilita de modo rápido, seguro e eficiente a avaliação do desempenho de estacas cravadas, como tem atestado muitos pesquisadores que encontraram correlações bastante satisfatórias comparando resultados de capacidades de carga de estacas obtidos por essas análises, com resultados obtidos por ensaios de carregamentos estáticos. Apresenta-se, nesta dissertação, avaliações comparativas de resultados obtidos por análises CAPWAP com previsões de capacidade de carga empregando métodos empíricos de correlações com medidas de SPT, e também com previsões obtidas por formulações que empregam medidas de repiques elásticos.

palavras-chave: estacas; capacidade de carga; equação da onda; CAPWAP.

## ABSTRACT

PEREIRA, M. (1997). - *On the certification of piles behavior by the analysis from the Stress-Wave Theory*. São Carlos, 1997. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

The use of analysis methods to control piles behavior employing the Stress-Wave Theory from the results of dynamic pile driving measurements has had a great evolution in recent years. These procedures are in continuous improvement and allow the piles behavior confirmation, in a fast, safe and efficient manner. This fact has been corroborated in several published works. In this thesis, comparative studies between results of pile bearing capacity from the CAPWAP program, and from empiric correlations methods using SPT values are presented. Comparative results between CAPWAP and rebound measurements are presented too.

keywords: piles, bearing capacity, Stress-Wave Theory, CAPWAP.



## 1. - INTRODUÇÃO

A cada dia constata-se uma conscientização maior na sociedade, pelo seu direito de exigir uma constante melhoria na qualidade dos produtos e serviços que lhe são oferecidos.

No que se refere aos serviços de execução de fundações para obras civis, esse aprimoramento na qualidade, deve-se verificar nas três etapas básicas desses serviços, que são: a etapa de concepção e projeto, a etapa de execução e implantação e a etapa final de controle do desempenho .

Para estacas cravadas, tradicionalmente, esse controle durante a implantação, devido a simplicidade do procedimento, foi realizado até recentemente, quase que unicamente através de medidas da penetração da estaca no terreno (negas) para os golpes finais da cravação, em que pesem as incertezas e imprecisões inerentes a esse procedimento, já bastante conhecidas.

A idéia de se empregar modelos matemáticos fundamentados na propagação através do fuste da estaca, da onda gerada pelo golpe do martelo durante a cravação, é bastante remota, como menciona-se no breve histórico apresentado no capítulo seguinte. Todavia, só a partir do advento dos computadores digitais, e da solução por algoritmos apresentada por SMITH (1960), para a teoria da equação da onda, é que foi possível uma compreensão adequada do fenômeno, o que favoreceu a rápida difusão dessa técnica a nível mundial.

Desenvolvimentos contínuos posteriores, na instrumentação da cravação de estacas, e nos métodos de análises, realizados em dezenas de países, contribuíram para a incorporação da monitoração da cravação de estacas, como um procedimento de rotina para o controle do desempenho de estacas cravadas.

O enorme interesse despertado por esse procedimento motivou centenas de pesquisadores em todo o mundo, e um volume crescente de trabalhos publicados sobre o tema tem contribuído para um aprimoramento contínuo dessa técnica. Tal interesse justifica-se, pois a monitoração da cravação, conforme atestam diversas dessas pesquisas, tem aliado segurança e economia, binômio extremamente importante e objetivado atingir, em qualquer serviço de engenharia.

Consciente da limitação de nosso conhecimento sobre o assunto, ainda assim optamos por escolhê-lo como tema desta dissertação, por dois aspectos precípuos: em primeiro lugar pelo interesse pessoal que nos despertou, dado sua atualidade, e também pela crença de que nosso trabalho possa de alguma forma servir de estímulo para que novos pesquisadores interessem-se por trabalhar nessa direção, que a nosso ver, apesar de já se encontrar num estágio desenvolvido, oferece amplas possibilidades de novos estudos e aprimoramentos.

No capítulo 2, apresentamos, de forma sucinta, os fundamentos teóricos referentes à aplicação da Teoria da Equação da Onda, iniciando-o com um breve histórico. A seguir, comenta-se de forma resumida o trabalho pioneiro de Smith. Tais considerações foram julgadas oportunas, por considerarmos o mesmo como marco inicial do desenvolvimento dessa técnica.

Uma descrição dos equipamentos e instrumentos atualmente mais utilizados na monitoração da cravação de estacas é também apresentada nesse capítulo, assim como apresenta-se algumas considerações sobre o fenômeno de propagação da onda e uma breve descrição dos métodos mais usuais de análises elásticas dos registros obtidos na instrumentação, oportuna para aqueles leitores ainda não familiarizados com os procedimentos das provas de carga dinâmicas.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica, onde optamos por selecionar alguns trabalhos considerados relevantes, como ilustrativos do nosso propósito de situar o atual estágio dessa técnica, dando ênfase para aqueles que tratam da

comparação dos resultados obtidos por análises elásticas a partir dos registros da instrumentação da cravação, com resultados obtidos a partir da realização de provas de carga estáticas, por serem estas últimas, consideradas, de modo inquestionável, como o único procedimento de controle de comportamento de estacas que permite avaliar com precisão adequada, a capacidade de carga mobilizada pela estaca ensaiada.

Nesse capítulo também são apresentadas considerações breves sobre métodos de controle que se baseiam em medidas de “negas” e de repiques elásticos, e empregam as fórmulas dinâmicas clássicas, fundamentadas na teoria de impacto de Newton.

Os capítulos seguintes apresentam estudos práticos comparativos de resultados de capacidade de carga avaliados empregando análises CAPWAP, realizadas para estacas pré-moldadas de concreto armado, com a cravação ou recravação monitoradas.

No capítulo 4 compara-se tais resultados com resultados de previsões de capacidade de carga obtidas empregando algumas fórmulas dinâmicas clássicas, bastante conhecidas.

No capítulo 5 os resultados de análises CAPWAP são comparados com resultados obtidos empregando-se os métodos empíricos de Aoki-Velloso e de Décour-Quaresma, também bastante difundidos e incorporados na rotina de projetos no Brasil, para previsão da capacidade de carga de estacas, a partir de medidas de índices de resistência à penetração - SPT- obtidos de sondagens à percussão, realizadas próximas ao local de implantação das referidas estacas.

No capítulo 6, compara-se resultados CAPWAP com resultados de previsão de capacidade de carga, obtidos através de formulações que empregam medidas de repiques elásticos. Finalmente no capítulo 7, apresentamos os comentários e as conclusões

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. Considerações iniciais:

Nos últimos recentes anos, tem evoluído na prática corrente da engenharia de fundações, o controle da cravação das estacas, via instrumentação, empregando-se instrumentos de precisão (acelerômetros e transdutores de deformação), que são fixados próximos ao topo das estacas, e conectados a um micro-computador que dispõe de um software especialmente desenvolvido, o qual constitui-se num analisador dos sinais enviados pelos instrumentos, quando da cravação ou da recravação das estacas. Um dos equipamentos mais usual de análise desses sinais, foi desenvolvido nos Estados Unidos, e é designado por Analisador da Cravação de Estacas, ou pela sigla PDA (Pile Driving Analyzer).

Diversos programas de análises desses sinais foram desenvolvidos em vários países, sendo que o mais amplamente difundido é conhecido pela sigla CAPWAP (Case Pile-Wave Analysis Program) desenvolvido na CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY, e empregado nas análises de instrumentação das estacas apresentadas neste trabalho.

Esse programa baseia-se na teoria da equação de propagação da onda longitudinal de tensão ao longo do fuste da estaca quando a mesma recebe um golpe do martelo de cravação. O PDA recebe os sinais registrados nos instrumentos nos instantes em que essa onda passa descentente e ascendente pelos mesmos, processando a conversão analógica-digital, e empregando a teoria de modelagem do sistema martelo/estaca/solo como um sistema de massas e molas, propostas por SMITH (1960), fornece, por integração matemática, a força transmitida para a estaca e a penetração da mesma no terreno, para cada golpe aplicado pelo martelo.

A análise é processada de modo iterativo e interativo (onde o analista interage com o programa, atribuindo valores às variáveis do problema, até obter o melhor ajuste das curvas de força e de velocidade ao longo do tempo da propagação da onda descendente e ascendente pelo fuste da estaca). Nesse modelo, as forças reativas do solo são admitidas como passivas, sendo expressas como dependentes apenas do movimento da estaca.

Procedendo-se, no final da cravação, ou na recravação, a aplicação de golpes com energias crescentes (aumentando-se gradativamente a altura de queda do martelo), pode-se obter como resultado final uma curva carga x deslocamento, semelhante àquela obtida quando da realização de uma prova de carga estática, e assim avaliar a capacidade de carga. Por esse motivo, esse procedimento tem sido denominado de Prova de Carga Dinâmica.

## **2.2. Breve Histórico:**

A primeira tentativa de se avaliar a capacidade de carga de uma estaca isolada empregando propagação da onda foi apresentada por Saint-Venant, em 1865, conforme citado em TIMOSCHENKO et. al. (1970). O autor assumiu a estaca como uma barra elástica e formulou uma equação diferencial que governava a propagação da onda longitudinal, bem como apresentou uma solução para essa equação.

Segundo GOBLE et.al. (1980), alguns trabalhos isolados foram posteriormente apresentados, mas em virtude da não se dispor à época, de um ferramental adequado, o emprego das soluções apresentadas nesses trabalhos ficou extremamente limitado, inviabilizando sua incorporação na rotina de projetos de engenharia de fundações por estacas cravadas, ficando praticamente esquecidos.

Avanços significativos para a compreensão do fenômeno da cravação de estacas somente ocorreram a partir da publicação do trabalho de SMITH (1960), no qual o autor formulou o que ficou conhecida como Teoria da Equação da Onda, cuja solução e aplicabilidade foram tornadas práticas, com o advento dos computadores.

Embora o trabalho de Smith tenha recebido severas críticas de eminentes pesquisadores da época, quanto a aplicabilidade de sua teoria, o autor defendeu enfaticamente a sua proposição. Pesquisadores de principalmente duas universidades norte-americanas (Texas University e Case Western Reserve University), investiram em extensivas pesquisas na direção indicada por Smith, tanto através de refinamentos teóricos, como também na confecção de equipamentos e instrumentos que viabilizassem o emprego prático dessa teoria, apresentando os primeiros programas de análises por equação da onda. Paralelamente, trabalhos em linhas análogas, foram também desenvolvidos na Europa.

A partir de 1980, realiza-se a cada quatro anos, Congressos Internacionais específicos sobre o tema de aplicação da teoria da equação da onda para análises de comportamento de estacas, com um crescimento considerável de trabalhos apresentados. Além disso, a cada dois anos, são promovidos encontros internacionais, entre usuários de equipamentos de monitoração da cravação.

Mais recentemente, programas de análises tridimensionais, através de elementos finitos têm sido desenvolvidos em diversos países, demonstrando o potencial de utilização dessa teoria, em contínua e rápida expansão. Tal difusão despertou a preocupação natural de padronização dos procedimentos, estando atualmente o assunto normatizado em muitos países, inclusive no Brasil.

No Brasil, os primeiros trabalhos de instrumentação da cravação de estacas foram realizados pelo INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS de São Paulo- IPT, em obras de estruturas "off-shore" para a Petrobrás, no início da década de 1980. Quando então foram também desenvolvidas as primeiras pesquisas nacionais.

Assim, ao contrário dos demais países, no Brasil, o emprego da instrumentação da cravação de estacas desenvolveu-se primeiramente em obras marítimas, devido dificuldades inerentes da realização de provas de carga estáticas, para bem tarde serem também aplicada em obras terrestres.

Em 1989, a Petrobrás incluiu na sua norma interna de procedimentos, a N-2001a - Projeto de Execução de Fundações de Estruturas Marítimas, um capítulo destinado à monitoração da cravação de estacas. A partir de Novembro de 1994, o assunto fica devidamente normatizado no País, com a publicação da Norma NBR-13208 (Estacas - Ensaio de Carregamento Dinâmico), pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.

Atualmente, empregando a instrumentação da cravação e os programas de análises desenvolvidos, pode-se a partir dos resultados, responder às seguintes questões importantes com respeito ao comportamento das estacas monitoradas:

- a) Avaliação da capacidade de carga estática da estaca;
- b) Garantir a cravabilidade da estaca, a partir da descrição das características da estaca, do solo e do sistema de cravação;
- c) Avaliar as tensões de compressão ou de tração que são induzidas na estaca, decorrentes da energia da cravação;
- d) Verificar a integridade da estaca após a cravação, ou seja, se a mesma está inteiramente sadia, ou se foi avariada durante sua instalação no terreno;
- e) Avaliar a eficiência do sistema de cravação, ou seja, que parcela da energia aplicada foi efetivamente transformada em trabalho para a penetração da estaca.

### 2.3. Teoria da Equação da Onda de Smith (1960):

O emprego da teoria da equação da onda para análise da cravação de estacas tornou-se viável com o advento dos computadores, e fundamentou-se principalmente no trabalho de Smith, apresentado no "Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division" da THE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - ASCE, em agosto de 1960, intitulado: "PILE DRIVING ANALYSIS BY THE WAVE EQUATION".

Esse artigo teve sua tradução feita pelo Engenheiro M.S.M. Fialho, e foi publicado pelo núcleo regional de São Paulo da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS - ABMS, em Novembro de 1984, como tradução nº 8.

Dada a importância desse trabalho, considerado pioneiro para o desenvolvimento da monitoração da cravação de estacas, tema desta dissertação, consideramos oportuno apresentar, ainda que de forma ilustrativa, alguns comentários resumidos sobre o trabalho de Smith. Esses comentários apresentados a seguir, apoiaram-se fundamentalmente no trabalho de Smith como redigido originalmente em 1960, visando manter o carácter precursor do trabalho, embora, no estágio atual, algumas considerações contidas, já sofreram significativos aperfeiçoamentos, conforme abordado em itens posteriores deste trabalho.

Antes da apresentação propriamente dita do seu método de análise, Smith argumentou que as inúmeras fórmulas dinâmicas clássicas, apresentadas até então por diversos pesquisadores, e baseadas na teoria do choque, mostraram-se ineficazes na prática, em virtude de que a cravação de estacas não é um problema de impacto que pode ser resolvido pelas leis de Newton. Além disso, comentou que tais formulações dinâmicas tradicionais são sempre parcialmente empíricas, requerendo adoção de parâmetros para representar perdas de energia ocorridas, de difícil quantificação, além da impossibilidade de considerarem influências decorrentes do tipo de estaca e da ação elasto-plástica do terreno.



O método proposto por Smith se desenvolveu a partir de um modelo idealizado do sistema de cravação dinâmica da estaca, em que os elementos envolvidos: martelo, capacete, cepos e coxins, estaca e solo, são representados por massas e molas, conforme esquema ilustrativo, apresentado na figura 1.

Nessa representação diagramática, considera o pilão e o capacete como objetos rígidos, curtos e pesados, que podem ser representados por massas individuais, sem elasticidade. O cepo por ser leve e “elástico” é representado por uma mola. A estaca, embora pesada, tem uma certa compressibilidade, decorrente de sua geometria alongada, e dessa forma, propôs representá-la por um conjunto de massas interligadas por molas. A resolução do problema emprega a teoria da equação da onda, requer a utilização de computadores, e fornece a solução por integração numérica.

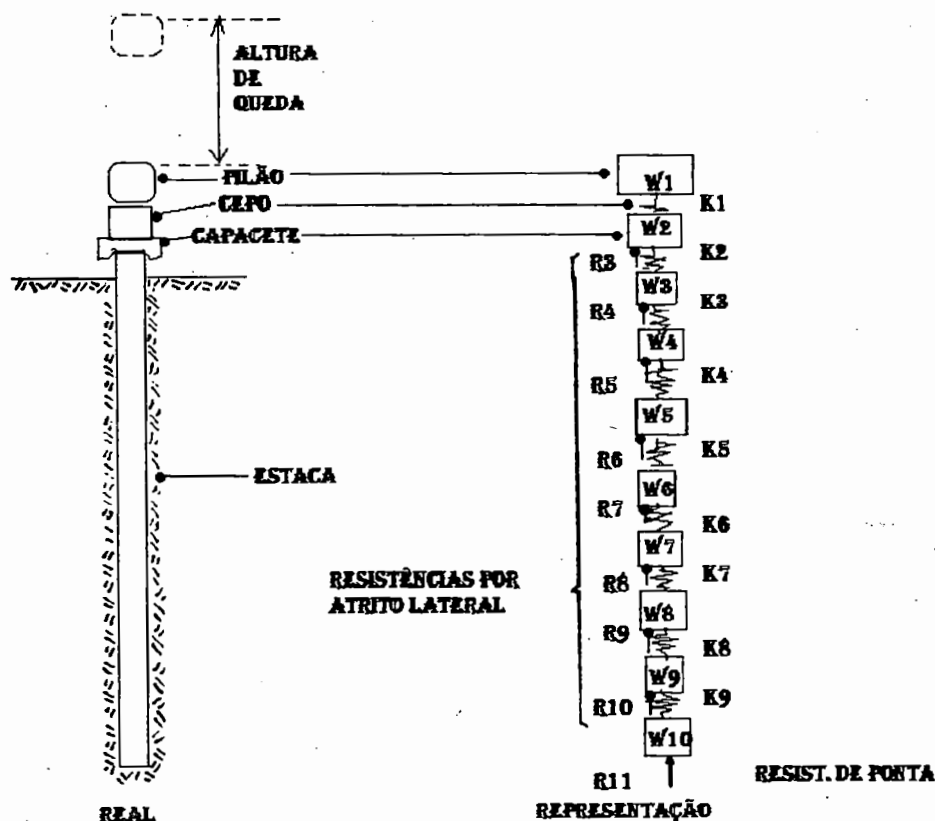


FIGURA 1: Representação do Modelo de Smith para o sistema martelo / estaca / solo

O autor comenta que segundo Chellis, o terreno comprime-se elasticamente até um certo deslocamento, designado por este de  $C_3$ , mas neste trabalho Smith define por “quake”  $Q$ . A partir desse deslocamento o terreno rompe plasticamente com resistência constante ou “última”  $R_u$ . Essa conceituação é ilustrada no diagrama da figura 2.

Começando em  $O$ , a ponta da estaca penetra uma distância  $Q$  (usualmente assumida igual a 0,25 cm), comprimindo o solo elasticamente de modo que no ponto  $A$  a resistência do terreno atingiu seu valor limite  $R_u$ . A ruptura plástica do terreno então ocorre e a resistência do solo permanece igual a  $R_u$  até a ponta atingir o ponto  $B$ . A partir desse ponto, ocorre então a decompressão elástica da estaca igual a  $Q$ , e o movimento cessa no ponto  $C$  onde todas as forças se anulam. O deslocamento permanente da estaca (nega “s”), corresponde ao segmento  $\overline{OC}$  que é igual a  $\overline{AB}$ .

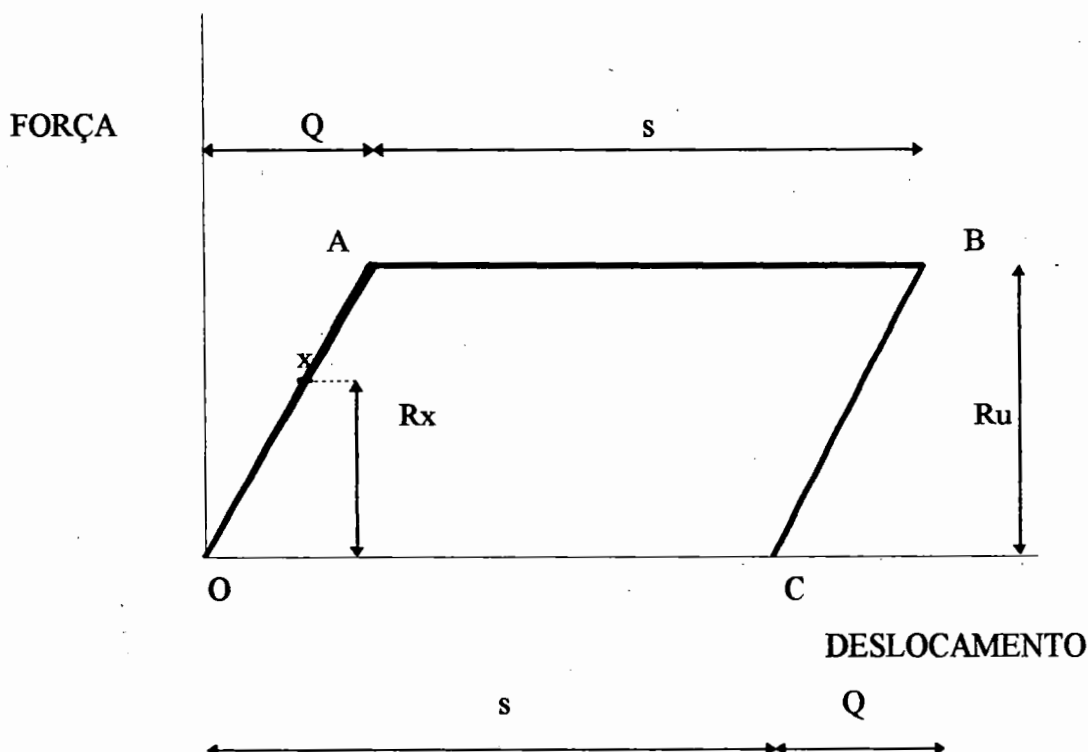


FIGURA 2: Diagrama Força x Deslocamento na Ponta da Estaca

Algumas estacas penetram no terreno mais rapidamente do que outras. O terreno oferece maior resistência instantânea ao movimento rápido do que ao movimento lento. Em vista disso, Smith introduziu o fator "J", o qual designou por "fator de amortecimento viscoso", comumente usado em problemas de vibrações.

Na proposição de Smith, o cálculo numérico da equação da onda permite avaliar a velocidade instantânea da ponta da estaca  $v_p$  em cada instante. O produto do fator de amortecimento "J" introduzido, por essa velocidade  $v_p$  pode ser então empregado para aumentar (ou diminuir) a resistência do terreno, de modo a reproduzir o amortecimento. Assim, num ponto "x" qualquer da linha OABC a resistência instantânea provocada pelo amortecimento é dada por:  $J \cdot v_p \cdot R_x$ .

Essa resistência é, obviamente, temporária, ou instantânea e não contribui para a capacidade de carga da estaca. Deve-se observar que a constante J refere-se à resistência na ponta da estaca, a qual calcula-se a partir de considerações sobre a compressão elástica do terreno ("quake" Q), sobre a resistência última do terreno, e sobre o amortecimento viscoso, com base na constante "J".

Para avaliação da resistência desenvolvida ao longo do fuste, o procedimento proposto por Smith é análogo, exceto que uma constante  $J'$  é utilizada no lugar de J. Como o solo junto ao fuste não se desloca da mesma forma que o solo na ponta da estaca, o autor considerou  $J'$ , menor que J. Propôs os valores iniciais de 0,15 s/m e 0,05 s/m, para as constantes J e  $J'$  respectivamente. Posteriormente diversos autores propuseram em seus trabalhos novos valores para essas constantes, considerando os tipos de solos locais, obtendo uma precisão maior nos resultados.

Já em seu trabalho, Smith alertava para a necessidade de aperfeiçoamentos na avaliação dessas constantes inicialmente propostas. Argumentou que o engenheiro de fundações deveria sentir-se com liberdade para fixar outros valores dessas constantes, a partir da adoção, a seu julgamento, das distribuições de resistências ao longo do fuste e na ponta da estaca, com base nas características específicas do subsolo local.

## 2.4. Equipamentos de Campo:

Um dos conjuntos básicos para a aquisição e o tratamento dos dados no campo, mais difundido está ilustrado na figura 3. Ele é formado pelo Analisador de Cravação de Estacas (“Pile Driving Analyzer” - PDA), um gravador de fita magnética e um osciloscópio. Embora existam outras técnicas alternativas e outros conjuntos de equipamentos, nos limitaremos a uma breve descrição dos equipamentos que utilizam o PDA, por sua ampla difusão.

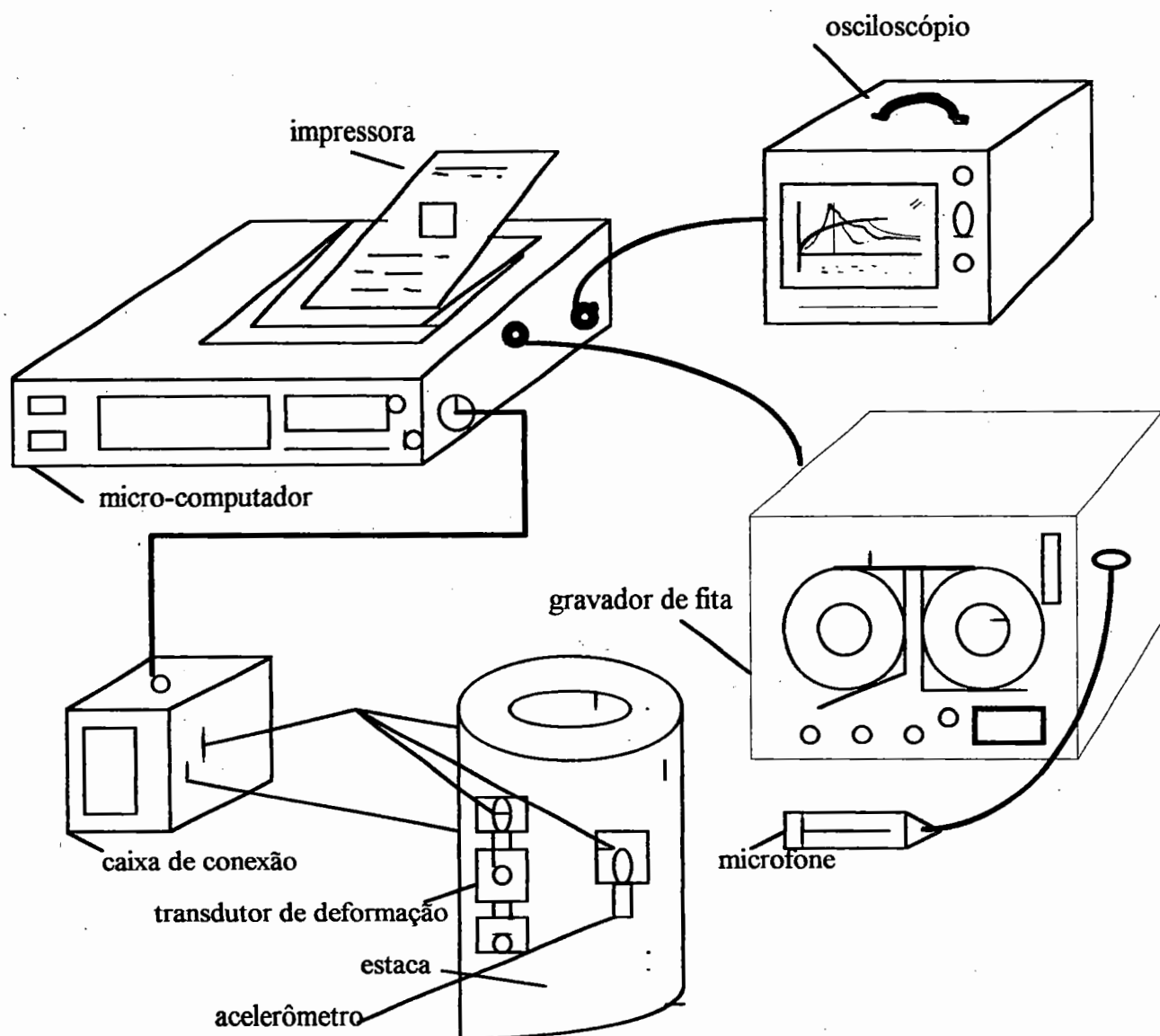


FIGURA 3: Representação do Conjunto Básico de Aquisição dos Dados no Campo.

O analisador de cravação de estacas, ou simplesmente PDA, foi desenvolvido pela Pile Dynamics Inc. ( empresa norte-americana criada por pesquisadores ligados ao G.G.Goble, que foi quem liderou as pesquisas sobre o tema na Case Western Reserve University ) . Trata-se, basicamente, de um micro-computador provido de funções de condicionador de sinais, que permite a realização de uma série de cálculos “on-line”, no instante da cravação. Desde os primeiros protótipos desenvolvidos, vários aperfeiçoamentos já foram introduzidos.

A sua maior vantagem é justamente proporcionar uma série de informações de forma imediata durante a cravação ou a recravação da estaca, possibilitando até, uma eventual interferência na operação de cravação no exato momento requerido, como por exemplo detectar a ocorrência de um dano na estaca, ou constatar uma eficiência inadequada do sistema de cravação empregado.

O PDA recebe os sinais brutos dos instrumentos conectados no topo da estaca, como dados de entrada, e fornece como dados de saída , sinais de força, de aceleração e de velocidade, já devidamente tratados. Esses sinais são enviados ao gravador de fita magnética, onde ficam registrados. Dentre as informações que podem ser obtidas direta ou indiretamente (por interpretação do operador), as principais são:

- A força máxima no impacto;
- A energia máxima no golpe;
- A eficiência do sistema de cravação;
- Verificação de dano estrutural e a sua localização;
- Tensões máximas de compressão e de tração;
- Avaliação da distribuição de resistência por atrito e na ponta.

O PDA possui uma mini-impressora na qual são impressos alguns desses parâmetros, os quais podem ser selecionados durante a cravação.

O gravador de fita magnética tem a função de registrar todos os dados e sinais de interesse para posterior reprodução e tratamento através do próprio PDA, ou através de micro-computadores compatíveis. Normalmente é do tipo frequência modulada FM, face às faixas de frequência requeridas para as medidas dinâmicas envolvidas. O número mínimo de canais é de quatro, sendo um para o sinal de força, outro para velocidade, um para aceleração e o quarto para a voz ( para registros de eventuais eventos importantes e observações complementares).

O osciloscópio é normalmente um equipamento imprescindível no campo ao lado de qualquer registrador de fita, destinando-se à visualização dos sinais que estão sendo registrados. Na configuração usual, o osciloscópio permite a visualização de sinais de força e de velocidade (multiplicada por uma constante, denominada impedância da estaca), para cada golpe, sendo possível em campo, uma pré-seleção dos golpes a serem gravados. Além disso, o osciloscópio permite a verificação da qualidade dos sinais que estão sendo gravados, possibilitando dessa maneira a detecção de eventuais problemas com algum dos instrumentos, para a tomada de medidas corretivas. É interessante que o operador de campo tenha conhecimentos suficientes sobre a teoria da equação da onda, para uma correta interpretação dos sinais transmitidos, no instante da cravação.

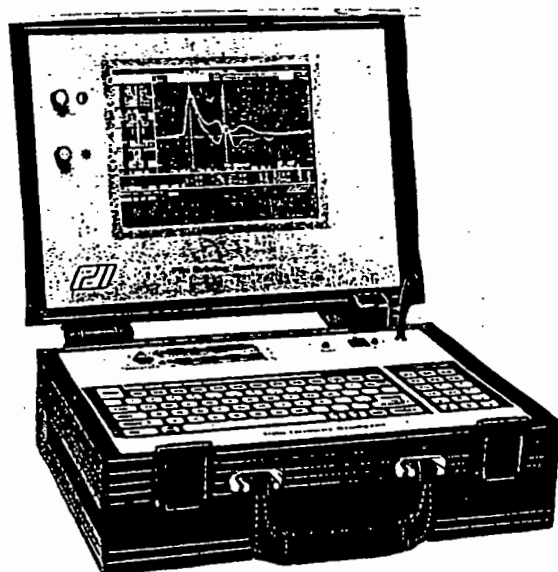


FIGURA 4: Foto de um equipamento PDA - modelo PAK

## 2.5. Instrumentos Empregados:

São fixados, diametralmente opostos, próximos ao topo da estaca, dois pares de instrumentos (transdutores de deformação e acelerômetros) destinados a receber os sinais originados das ondas de tensão descendentes e ascendentes que percorrem o fuste da estaca, geradas quando a estaca é golpeada pelo martelo. A seguir apresenta-se uma breve descrição desses instrumentos, que estão ilustrados na figura 5.

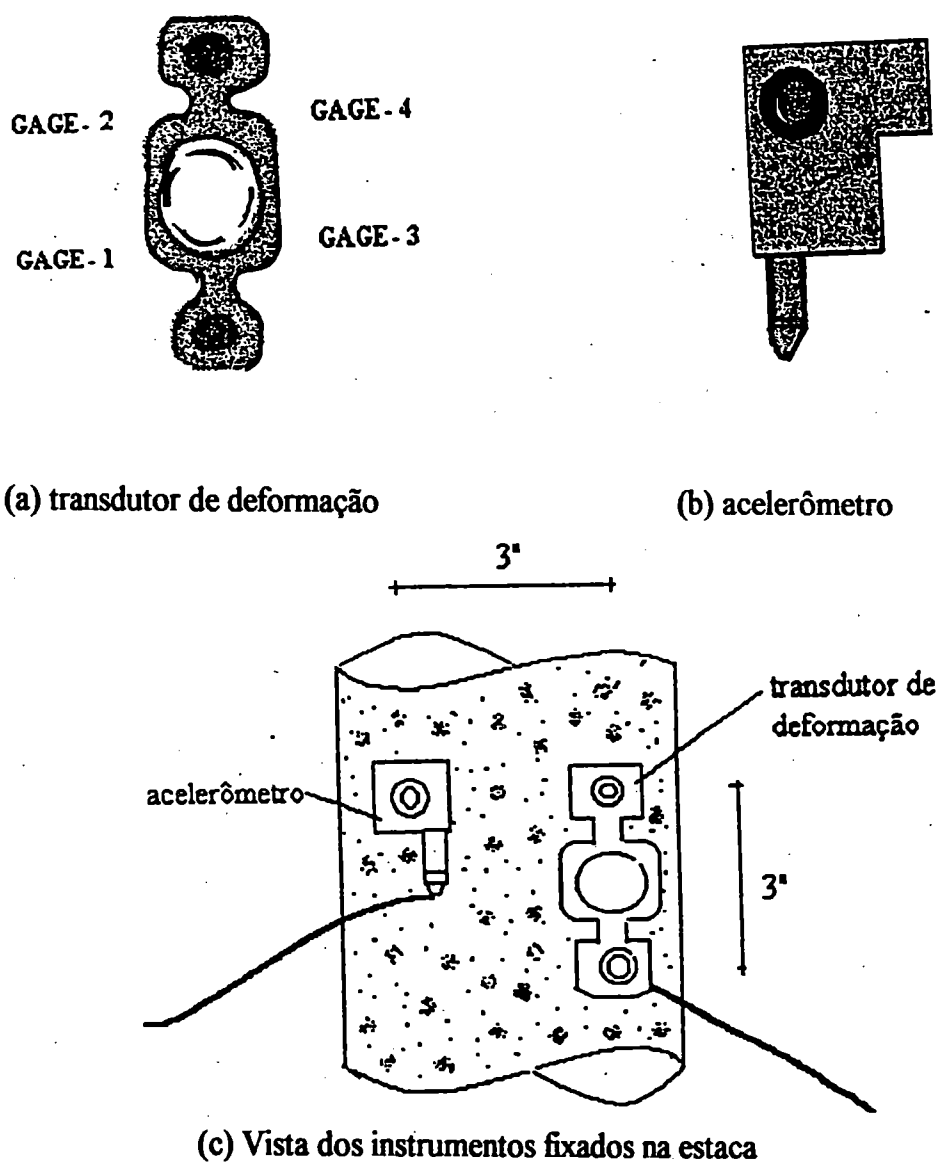


FIGURA 5: Ilustração Representativa dos Instrumentos de Campo.

**a) Transdutor de Deformação Específica:**

Para a confecção de um transdutor são empregados quatro extensômetros elétricos, do tipo película de 350 Ohms, conhecidos por "strain-gages". Esses extensômetros são convenientemente dispostos num arranjo central de alumínio, de tal forma a permitir um máximo ganho com o arranjo formado, tipo ponte de Wheatstone completa. Dessa forma, podem amplificar o efeito da variação de resistência, a qual é proporcional à deformação da estaca. Para tanto, são instalados nos pontos onde ocorrem maiores concentrações de tensão, na armação de alumínio. Apresentam alta sensibilidade, o que permite um maior número de informações armazenadas num reduzido espaço de tempo. São fixados dois transdutores, próximos ao topo da estaca, diametralmente opostos, com auxílio de buchas especiais, empregando-se dois parafusos e chumbadores, de modo que possam ser depois retirados, para reutilização em outras estacas a serem ensaiadas.

**b) Acelerômetro:**

Também usam-se dois, colocados diametralmente opostos, próximos ao topo da estaca, para possibilitar compensação entre eles, caso ocorra eventuais efeitos decorrentes de flexão e excentricidades durante a aplicação do golpe do martelo. São instrumentos, como o próprio nome diz, destinados a registrar os sinais de aceleração das partículas de uma seção da estaca, nos instantes em que a onda de tensão descendente e ascendente, gerada pelo golpe do martelo, passa pela seção instrumentada. Os sinais são processados, e por integração numérica, fornecerão resultados de velocidade e de deformação correspondentes. São normalmente do tipo piezoelétrico, com um amplificador incorporado, destinado a reduzir os efeitos de ruído. Para frequências de até 10.000 Hz, são lineares. Possuem uma base rígida dotada de amortecimento mecânico interno destinado a eliminar frequências superiores a 2.000 Hz, que poderiam causar problemas de ressonância que afetariam a qualidade dos sinais registrados, prejudicando as análises. Também são reutilizáveis.



## 2.6. Considerações sobre a propagação da onda:

Embora o entendimento do fenômeno de propagação da onda seja um tanto complexo, assim como não é elementar o ferramental matemático necessário à sua compreensão, considerando que de certa forma tal tarefa já esteja satisfatoriamente resolvida por especialistas, optamos neste item apresentá-lo de forma resumida, e ao mesmo tempo clara, uma vez que consideramos importante constar algumas considerações básicas sobre o fenômeno, ainda que em detrimento de um enfoque mais preciso e aprofundado. Esses comentários a seguir apoiaram-se principalmente no ótimo trabalho de NIYAMA, S. (1991), apresentado no SEFE II.

O modelo de Smith, em que a estaca é discretizada em elementos de massas e molas é atualmente o mais empregado, por representar de forma adequada o efeito do impacto do martelo sobre o sistema estaca / solo, na cravação. O modelo permite uma melhor visualização dos movimentos, e com a aplicação de computadores a solução da equação da onda pode ser facilmente obtida. A figura 6 ilustra o fenômeno. Devido ao impacto do martelo, a parte superior da estaca é comprimida e as partículas do material da estaca são aceleradas. Forma-se então uma onda de tensão que se propaga através do fuste da estaca com uma velocidade "c" que depende do meio. No concreto essa velocidade varia na faixa de 3200 m/s a 4000 m/s.

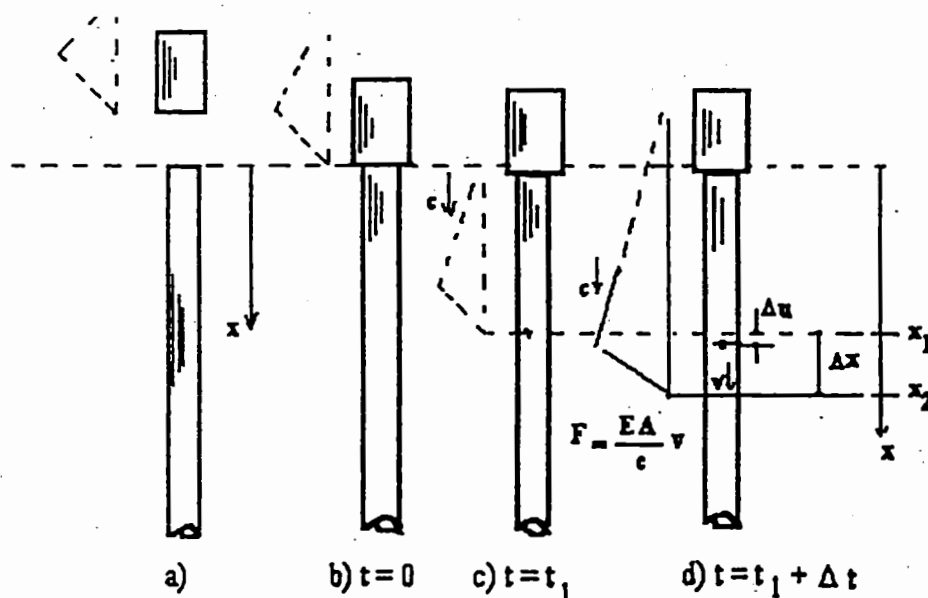


FIGURA 6: Formação da Onda no Impacto.

## 2.7. Formulação Básica:

Num intervalo de tempo  $\Delta t$ , a onda atravessa um segmento  $\Delta x$  da estaca, intervalo no qual a partícula situada na frente da onda, que tinha uma velocidade  $v = 0$  (no instante  $t = t_1$ ), terá sido acelerada até a velocidade  $v$ , deslocando-se  $\Delta u$  da sua posição inicial. Como a deformação da zona comprimida coincide com o deslocamento do topo da estaca, pode-se escrever:

$$c = \Delta x / \Delta t \quad (1)$$

$$E = \Delta u / \Delta x \quad (2)$$

$$v = \Delta u / \Delta t \quad (3)$$

$$a = \Delta v / \Delta t \quad (4)$$

Das expressões (1), (2) e (3) obtém-se:  $E = v / c \quad (5)$

Aplicando-se a Lei de Hooke, sendo  $E$  o módulo de elasticidade do material da estaca, e  $A$  a área de sua seção transversal, obtém-se a seguinte relação:

$$F = (E \cdot A / c) v \quad (6)$$

O fator  $E \cdot A / c$  é constante, denominado de Impedância "T" da estaca, mostrando assim que existe uma relação de proporcionalidade entre a força  $F$  e a velocidade  $v$ .

Pela aplicação da segunda lei de Newton ( $F = m \cdot a$ ), no trecho em questão da estaca, pode-se obter:

$$F = \rho A dx ( \partial v / \partial t ) \quad (7)$$

onde  $\rho$  é a massa específica da estaca.

Combinando-se (1), (6) e (7), e considerando-se a velocidade inicial igual a zero, pois o elemento está em repouso, tem-se que  $\Delta V = V$  de onde resulta que:

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (8)$$

A impedância pode ser entendida como a massa da estaca através da qual a onda se propaga, por unidade de tempo. A propagação da onda pode ser expressa através de equação diferencial. Considerando-se um segmento de estaca, conforme figura 7, e aplicando-se as leis de Hooke e de Newton, pode-se escrever:

$$F_2 - F_1 - m \cdot a = 0 \quad (9)$$

ou,

$$E A \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] dx - E A \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \rho a dx \left( \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (10)$$

Se em (10) introduzirmos a equação (8) resulta a equação do movimento da onda unidimensional, conhecida como EQUAÇÃO DA ONDA:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \quad (11)$$

A solução geral dessa equação diferencial parcial de segunda ordem é dada por:

$$u(x,t) = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (12)$$

Que representa duas famílias de curvas de ondas de deslocamentos propagando-se em sentidos opostos ( descendente e ascendente) ao longo do eixo da estaca, com velocidade  $c$ , decorrentes do impacto do golpe do martelo, no topo da estaca, conforme visto na figura 8.

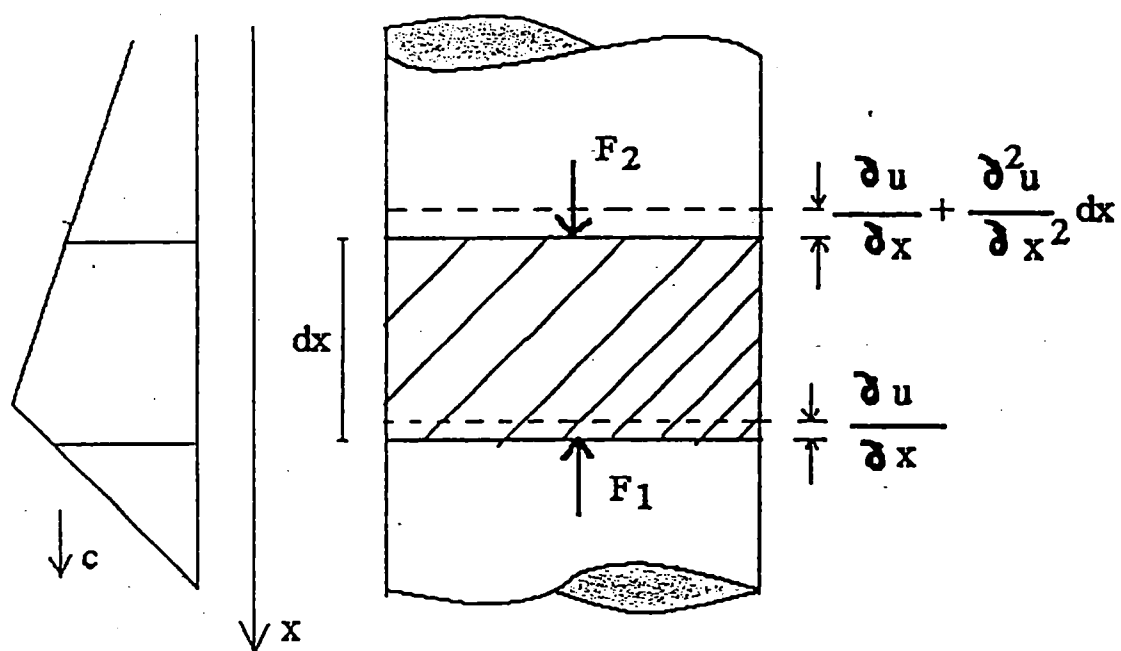


FIGURA 7: Deformações do Elemento da Estaca Decorrentes da Propagação da Onda.

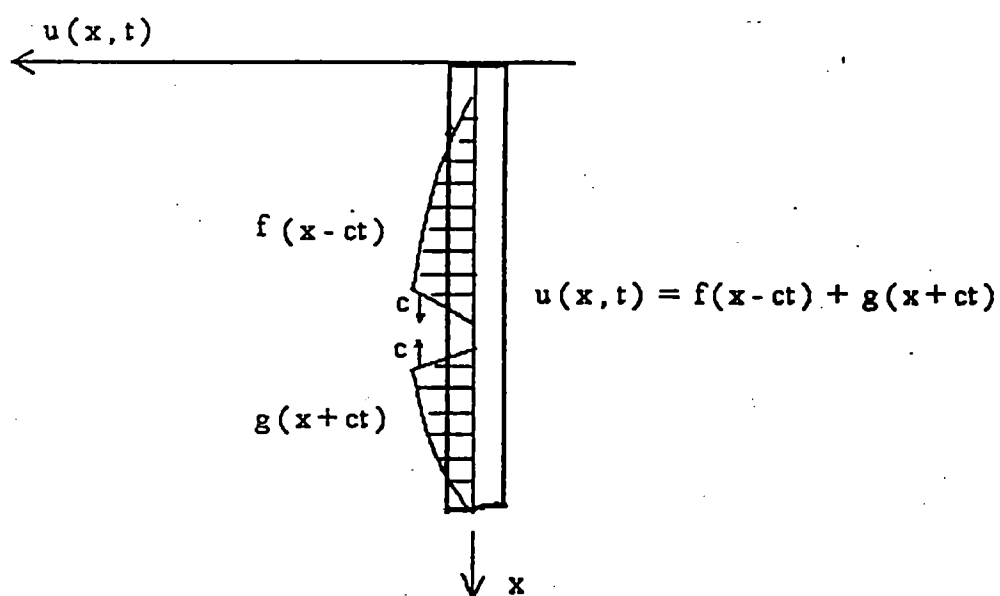


FIGURA 8: Representação da Solução da Equação da Onda.

## 2.8. Influência das condições de contorno:

Para a interpretação das ondas ascendentes ou refletidas, deve-se considerar os efeitos das condições de contorno da estaca, tais como, resistência de ponta (desde os limites: ponta livre - quando se considera a resistência de ponta nula, até - ponta engastada, quando se considera a resistência de ponta infinita), resistência por atrito lateral, e também, o efeito de mudança na impedância da estaca, que pode ocorrer por exemplo, quando há variação na seção transversal da estaca.

Na condição de ponta livre ( $R_p=0$ ), quando a onda de compressão chega na extremidade da estaca, reflete-se como onda de tração, e para manter o equilíbrio, a extremidade da estaca acelera-se novamente, e a velocidade reflete-se com o mesmo sinal, duplicando a amplitude da onda incidente. A falta de resistência na ponta da estaca faz com que a parte da estaca próxima a ponta seja “puxada” para baixo, gerando força de tração na estaca. Esse fenômeno é bastante importante quando estacas longas atravessam camadas espessas de solo mole, pois essas tensões de tração podem atingir magnitudes tais que afetem a integridade da estaca. A figura 9, ilustra algumas dessas condições de contorno.

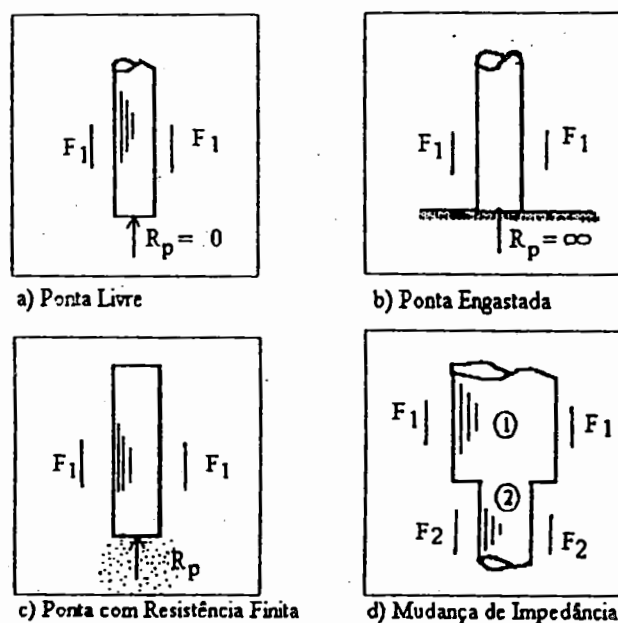


FIGURA 9: Esquema Ilustrativo de Algumas Condições de Contorno.

## 2.9. Diagrama representativo da trajetória das ondas:

O instante em que a onda gerada pelo impacto passa descendente pelo nível dos instrumentos colocados próximos ao topo da estaca é tomado como referência inicial na escala dos tempos decorridos para que a onda percorra o fuste da estaca e seja refletida, ao encontrar resistência do solo na ponta da estaca.

O atrito lateral ao longo de cada trecho  $\Delta x$  percorrido pela onda descendente atua no sentido de diminuir a sua amplitude em  $1/2 R A(x) dx$ , assim como cada onda ascendente tem um incremento do mesmo valor. Observa-se dessa forma, que a influência do solo só começa a se manifestar no instante  $2(L - D) / c$ , com a chegada no nível dos instrumentos, das primeiras ondas de reflexão. A figura 10, apresenta um diagrama representativo da trajetória das ondas incidentes e refletidas.

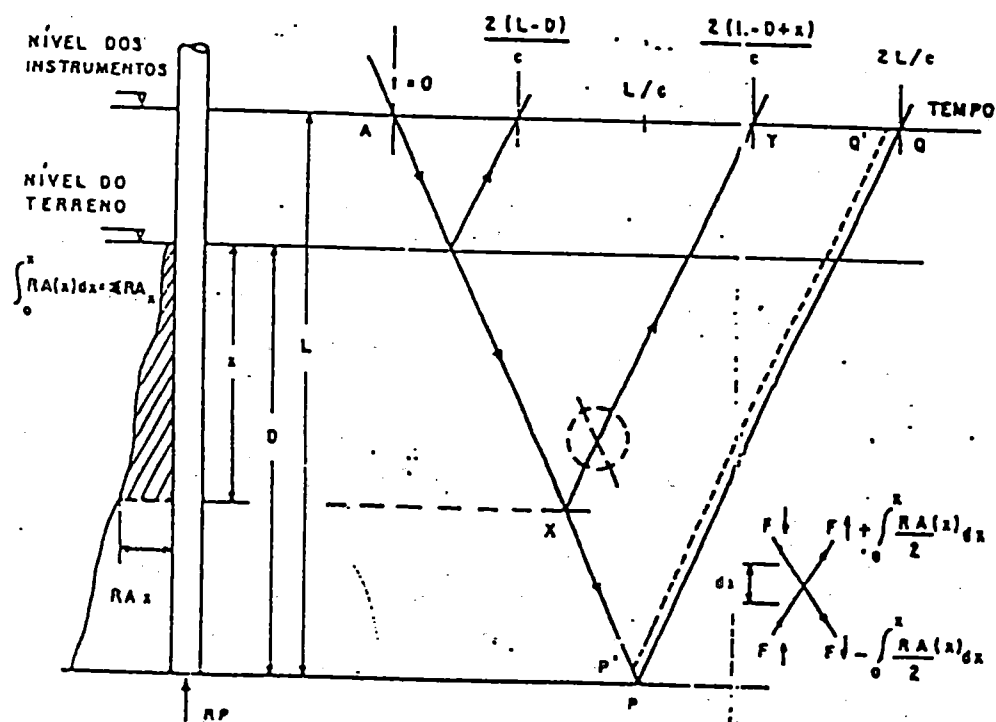


FIGURA 10: Representação da Trajetória das Ondas Incidentes e Refletidas.

## 2.10. Métodos de análises elásticas de estacas:

A partir do trabalho de Smith, e do adventos dos computadores, ocorreu nos anos seguintes um aumento considerável no emprego de análises de ondas aplicadas à cravação de estacas, tanto na etapa de projeto, quanto no controle da execução. Questões referentes à capacidade de carga da estaca, à integridade da estaca cravada, às tensões desenvolvidas durante a cravação, à eficiência do sistema de cravação, dentre outras têm sido amplamente pesquisadas com resultados bastante satisfatórios, a ponto da instrumentação da cravação ser atualmente uma prática rotineira na implantação de fundações por estacas, na maioria dos países. Embora todas essas questões sejam igualmente importantes, a fixação de uma metodologia de execução e controle que garanta para a estaca, com segurança e economia adequadas, a carga de trabalho requerida no projeto, é a que vem despertando maiores esforços por parte dos pesquisadores.

Atualmente, um número expressivo de programas de análises estão sendo empregados em diferentes partes do mundo, para previsão e controle da capacidade de carga de estacas. Dentre os mais usuais, pode-se citar: "TTI Program", "Raymond Company Program", "WEAP Program", "DieselI", "Dukfor", "Sweep", "TNO-Delft", desenvolvido na Holanda, além de outros desenvolvidos na Europa. No Brasil, foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT, o programa IPT-CASE.

O programa mais extenso de análise da onda foi desenvolvido pelo atual "Case Western Reserve Institute", a partir de 1964, em Ohio - EUA, estendendo-se por vários anos, sendo aplicado em diversos países. Desse programa resultaram os métodos de análises mais conhecidos, que são os métodos "CASE", o "CAPWAP" e o "CAPWAPC". Devido a ampla utilização desses métodos, julgamos oportuno tecer algumas considerações resumidas sobre seus fundamentos.

### Método CASE:

É um método simplificado que partiu da consideração de a quantidade de movimento seja possível de ser avaliada, e a partir de medidas de força e de aceleração no topo da estaca, avalia a carga resistente mobilizada para um golpe do martelo, com base nos sinais obtidos no campo. Consiste em uma solução matemática de forma fechada, obtida a partir de hipóteses simplificadoras, tais como a consideração de que o solo apresenta um comportamento plástico ideal, e a estaca é uniforme em toda sua extensão, idealizada com comportamento elástico.

Inicialmente a resistência total do solo  $R_t$  foi computada a partir da equação do corpo rígido, da teoria do impacto Newtoniano, sendo expressa por:

$$R_t = F_{(t)} - m \cdot a_{(t)} \quad (13)$$

onde  $F_{(t)}$  e  $a_{(t)}$  são respectivamente a força e a aceleração medidas no topo da estaca, e  $m$  é a massa da estaca. Estudos posteriores modelando a estaca como meio elástico, considerando que a estimativa da capacidade de carga por este método, é dada pela soma do atrito lateral e resistência de ponta, obteve-se que a resistência total é dada por:

$$R_t = 1/2 (F_1 + F_2) + (E \cdot A / 2 \cdot c) \cdot (V_1 - V_2) \quad (14)$$

em que  $F_1$  e  $V_1$  são, respectivamente, a força e a velocidade medidas no instante  $t_1$ ;  $F_2$  e  $V_2$  são, respectivamente, a força e a velocidade no tempo  $t_1 + 2 \cdot l / c$ , onde " $l$ " é o comprimento da estaca abaixo do nível dos instrumentos, " $E$ " é o módulo de elasticidade da estaca, " $A$ " é área da sua seção transversal, e " $c$ " é a velocidade de propagação da onda no meio.



Usualmente, considera-se por  $t_1$  o tempo decorrido até a o instante de ocorrência do primeiro pico de máximo, na curva de força e de velocidade x impedância. A constante  $E \cdot A / c$  é comumente designada por impedância da estaca. Essa resistência total pode ser dividida em duas parcelas; uma estática  $R_s$  e outra dinâmica  $R_d$ , ou seja:

$$R_t = R_s + R_d \quad (15)$$

Essa parcela dinâmica é assumida proporcional à velocidade da ponta da estaca  $v_p$ , ou seja :

$$R_d = J \cdot I \cdot v_p \quad (16)$$

onde  $J$  é uma constante de amortecimento. Normalmente  $J$  é empregada na forma adimensional dividindo-se pela impedância  $I$ , sendo designado por  $J_c$ . Resultando que:

$$R_d = J_c \cdot v_p \quad (17)$$

Diversos autores tem propostos valores para  $J_c$ . A tabela 1 apresenta valores de  $J_c$  conforme o tipo de solo, propostos por GOBLE et.al. (1985).

TABELA 1: Valores da Constante de Amortecimento  $J_c$  propostos por GOBLE et.al.

TIPO DE SOLO NA PONTA DA ESTACA	CONSTANTE $J_c$ DO SOLO ("DAMPING")
AREIA	0,05 A 0,015
SILTE ARENOSO	0,15 A 0,25
SILTE ARGILOSO	0,40 A 0,60
ARGILA	0,60 A 1,00

Obs: Atualmente, devido ao grande número de pesquisadores que encontraram valores de  $J_c$  fora das faixas acima, é praticamente consenso que esse parâmetro não depende apenas do tipo de solo na ponta da estaca.

### **Programa CAPWAP:**

Concomitantemente com o desenvolvimento do método CASE, outro programa de análises de ondas foi desenvolvido teórica e experimentalmente na mesma instituição. Foi denominado de "CAPWAP" (Case Pile Wave Analysis Program). Também utiliza medições de força e de aceleração obtidas no topo da estaca, via instrumentação, mas exige análise iterativa, com o engenheiro interagindo com o programa, no escritório. Fornece dessa forma resultado mais preciso do que o método CASE. Na verdade, trata-se de um programa de refinamento da precisão daquele método. Uma breve descrição deste método é apropriada.

Tanto a força no topo da estaca, como a velocidade (obtida por integração da aceleração), podem ser empregadas na análise dinâmica, como valores de contorno. As forças resistentes do solo devem ser descritas. Tais forças são admitidas passivas, e na análise CAPWAP, assim como nas análises típicas de Smith, elas são expressas como uma função apenas do movimento da estaca. As forças reativas do solo são apresentadas por componentes elasto-plásticas e visco-lineares. Assim, três constantes do solo devem ser admitidas conhecidas a priori para cada elemento da estaca no trecho enterrado:

- A resistência estática limite -  $R_u$ ;
- O deslocamento elástico máximo do solo - "quake" -  $Q$ ;
- A constante de amortecimento do solo - "damping" -  $J_c$ .

O programa realiza análises empregando conceitos comuns da teoria da equação da onda, considerando o modelo original, proposto por Smith, onde a estaca é discretizada em elementos, como uma série de massas e molas, onde ocorrem as forças resistentes.

Como resultados de saída, fornece não só, todos os movimentos dos elementos da estaca, e as forças resistentes do solo, como também as forças

computadas nos elementos da estaca. Todos como função do tempo. A concordância pode ser iterativamente obtida, através da variação dos parâmetros resistentes do solo, assumidos inicialmente. Quando o analista obtém a força calculada no topo da estaca concordante com a força medida, de forma a não ser mais possível melhorar essa concordância, os parâmetros do solo associados são considerados os melhores valores.

Este programa produz soluções satisfatórias para estacas com comprimentos até da ordem de 25 metros. Para estacas mais longas, os tempos computados tornam-se excessivos. Posteriormente, foi então desenvolvida uma extensão desse programa, para englobar estacas longas, e promover a computação iterativamente em que o analista interage com o programa, atribuindo valores até obter o ajuste ideal.

Um aperfeiçoamento do programa, onde a estaca passa a ser subdividida em elementos contínuos, deu origem ao programa conhecido como "CAPWAPC" (Case Pile Wave Analysis Program - Continuous Model). Apresenta recursos adicionais interessantes em relação à versão anterior, introduzindo considerações sobre a descontinuidade entre a ponta da estaca e o solo de apoio - designado por "gap", o fenômeno de amortecimento radial ou "radiation damping" e ainda, considerou adicionalmente análises sobre as tensões residuais que podem ocorrer na estaca.

Atualmente as versões mais modernas dispõem de um sistema de busca automática do "melhor ajuste" ("best match"), que por enquanto ainda requer a interação com o analista, para se obter a concordância ideal das curvas calculada e medida, mas reduzindo significativamente, na maioria das vezes, o número de iterações necessárias para esse fim.

A figura 11 apresenta o modelo representativo do sistema estaca / solo , para o "CAPWAPC".

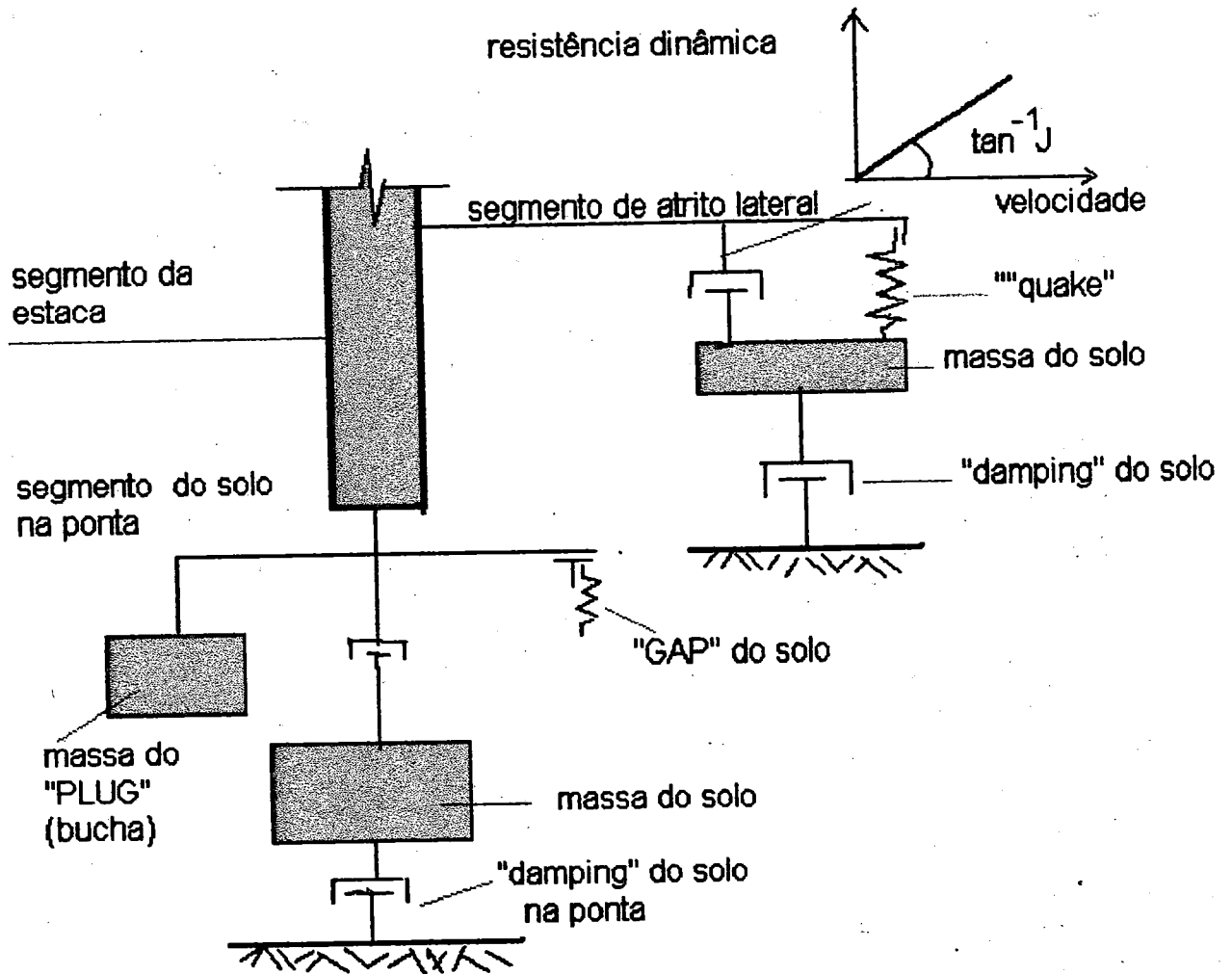


FIGURA 11: Modelo Extendido do CAPWAPC para a Resistência do Solo.

A figura 12 ilustra os resultados de uma análise CASE, realizada logo após a aplicação de um golpe do martelo, conforme aparecem na tela do PDA. Na coluna da esquerda do vídeo são apresentados os dados de entrada que descrevem as características da estaca e do sistema de cravação. Na tela central, aparecem as curvas de força e de velocidade x impedância, que representam a média dos sinosis obtidos dos instrumentos. Acima dessas curvas, na tela central, aparecem os dados de identificação da análise, e finalmente na parte inferior da tela aparece um quadro resumo dos resultados da análise efetuada.

Na folha seguinte apresenta-se os significados das principais siglas empregadas, para os dados de entrada, dados de identificação e para os resultados.

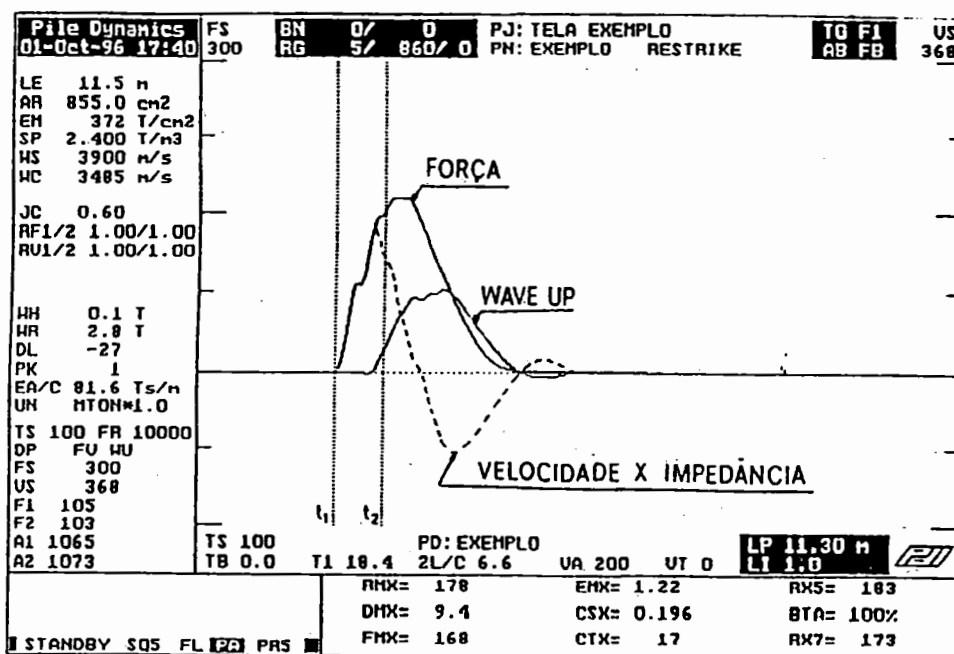


FIGURA 12: Exemplo dos Sinais Obtidos em Campo com o PDA.

**SIGLAS QUE APARECEM NA TELA DO PDA - Análise CASE para um golpe.****Principais dados de entrada:**

- LE:** Comprimento da estaca abaixo dos instrumentos;
- AR:** Área da seção transversal da estaca;
- EM:** Módulo de elasticidade dinâmico da estaca;
- SP:** Massa específica do material da estaca;
- WS:** Velocidade de propagação da onda descendente no instante do impacto;
- WC:** Velocidade de propagação da onda refletida no topo da estaca;
- JC:** Constante de amortecimento do solo (“damping”);
- WH:** Massa do capacete;
- WR:** Massa do martelo;
- EA/c:** Impedância da estaca.

**Principais dados de identificação:**

- BN:** Identificação do golpe mostrado na tela;
- RG:** Registro do golpe;
- PJ:** Identificação do projeto em questão;
- LP:** Comprimento cravado da estaca;
- 2L/c:** Tempo de chegada de uma onda de compressão, refletida na ponta.

**Principais resultados apresentados na tela:**

- RMX:** Resistência máxima, pelo método CASE, para o  $J_c$  arbitrado - em tf;
- DMX:** Deslocamento máximo medido - em cm;
- FMX:** Força de compressão máxima calculada - em tf;
- EMX:** Valor máximo da energia transmitida - em tf.cm;
- CTX:** Força máxima de tração calculada, abaixo dos sensores - em tf;
- BTA:** Fator de integridade da estaca, para verificação da ocorrência de dano .

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir de 1980, tem sido apresentado um crescente número de trabalhos relatando experiências diversas no campo da instrumentação. Proposições teóricas, métodos de análises, instrumentos e equipamentos desenvolvidos, além de diversos estudos de resultados de capacidades de carga de estacas, previstos por análises de ondas, comparados com resultados de provas de carga estáticas.

Neste capítulo, selecionamos alguns trabalhos publicados, para apresentá-los de forma resumida, com o intuito de situar, ainda que de forma precária, o atual estágio de desenvolvimento dos métodos de análises por instrumentação da cravação de estacas, dando ênfase, para aqueles que tratam da comparação dessas análises com resultados de provas de carga estáticas.

Um trabalho importante de levantamento bibliográfico, onde são analisados resultados comparativos apresentados por diversos autores, foi apresentado por FUJITA et.al.(1988) Nesse trabalho, os resultados dos levantamentos direcionam para concordâncias satisfatórias, e uma série de sugestões de procedimentos são indicados, no sentido de melhorar cada vez mais a precisão das previsões de capacidade de carga de estacas apoiadas em instrumentação de campo, e análises por equação da onda.

Os autores levantaram 53 estudos comparativos, e alertam para dois fatos importantes: O primeiro refere-se à pobreza de informações sobre procedimentos, características das estacas e do subsolo local, que impediram uma avaliação comparativa mais profunda, e o segundo fato ressalta a importância e a necessidade de uma maior padronização dos procedimentos de campo e das análises, para aperfeiçoamento das técnicas de instrumentação. Apesar desses fatos, os autores relatam que as concordâncias encontradas foram bastante satisfatórias.

A publicação por GOBLE et.al. (1980), dos resultados encontrados no programa mais extenso de pesquisas por eles realizado até então, no atual "Case Western Reserve Institute", iniciado em 1964, visou mostrar o estágio à época, de desenvolvimento das técnicas de monitoração da cravação de estacas, e constituiu-se, sem dúvidas, num marco importante para o aprimoramento posterior da instrumentação de estacas cravadas. Além de importante embasamento teórico sobre o tema, os autores apresentaram resultados e comentários práticos, sobre previsões de capacidade de carga empregando os métodos CASE, para 102 estacas monitoradas e CAPWAP para 79 dessas estacas, comparando-os com resultados obtidos por provas de carga estáticas, empregando o método de Davisson para avaliação da capacidade de carga.

A figura 13, ilustra os resultados já bastante satisfatórios à época, obtidos nesse estudo comparativo, com resultados de provas de carga estáticas.

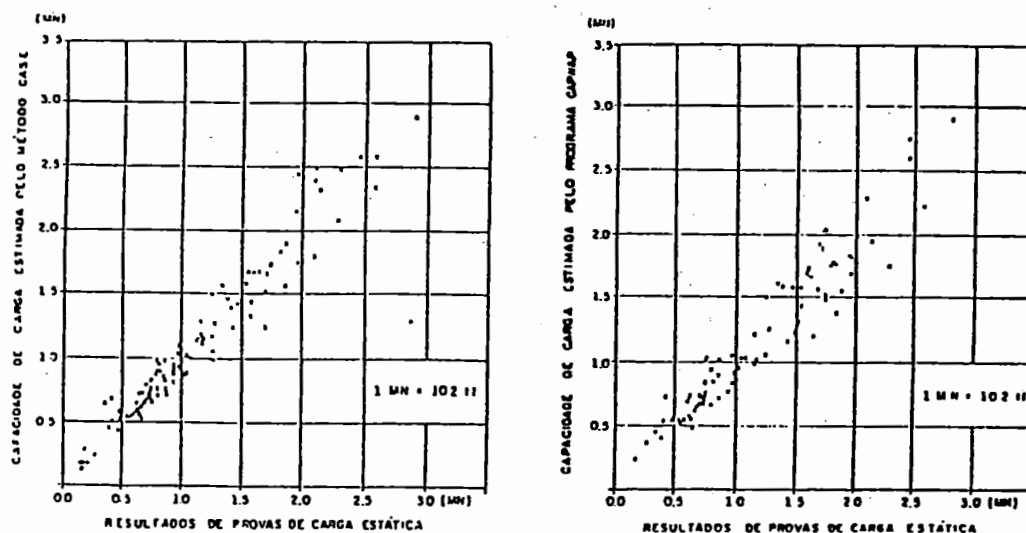


FIGURA 13: Correlação dos resultados avaliados pelos métodos CASE e CAPWAP, com resultados de provas de carga estáticas. (Apud GOBLE et.al. - 1980)



THOMPSON et.al.(1980), apresentaram resultados de um programa de ensaios estáticos e análises CASE / CAPWAP, realizados em estacas de diferentes materiais e características, em duas localidades do Canadá: Buttonville e Toronto, com o objetivo de definir para duas obras nessas localidades, o tipo de estaca mais indicado. Foram comparados resultados de estacas metálicas, perfil H, tubulares de ponta fechada, estacas de madeira e estacas pré-fabricadas de concreto.

Nas provas de carga estáticas, foi empregado o método de Davisson, para definição de carga última, e as análises dinâmicas foram feitas tanto no final da cravação, quanto em recravações posteriores. As análises CAPWAP, feitas nas recravações, indicaram concordâncias bastante satisfatórias com os resultados dos ensaios estáticos. Observou-se ganho de resistência do solo com o tempo ("set-up"), em todas as estacas ensaiadas. Nenhum resultado obtido desviou em mais de 20% do valor correspondente obtido pela prova de carga estática.

TABELA 2: Análises CAPWAP x PCE - THOMPSON et.al.(1980).

estaca	tipo	compr. cravado (m)	PR(kN) capwap	PR(kN) PCE Mét. de Davisson
TP 1	Metalica - Perfil H	34.9	3200	3605
TP 2	Tubular- pta.fechada	32.7	1780	2000
TP 3	Pré-fabr.de concreto	34.8	2310	2225
TP 4	Pré-fabr.de concreto	16.6	2090	2225
TP 5	Madeira tratada	8.7	930	850

Localidade:Buttonville

P 1	Metalica - Perfil H	14.6	1160	1420
P 4	Tubular- pta.fechada	14.7	1600	1335
P 5	Metalica - Perfil H	27.6	2890	2800
P 6	Tubular -pta.fechada	27.5	2580	2450
P 7	Madeira Tratada	12.7	620	670
P 10	Pré-fabr. de concreto	14.7	1510	1740

Localidade: Toronto

LIANG et.al. (1984), apresentaram um método de análise de instrumentação de estacas, por eles desenvolvido na China, designado por Programa CH83. Com o intuito de comprovar a eficiência desse procedimento, realizaram monitorações da cravação e posteriores provas de carga estáticas convencionais, sobre 47 estacas de diferentes formas, secções e comprimentos, pré-moldadas e moldadas "in loco".

O artigo apresenta descrição sucinta sobre os equipamentos e método de análise desenvolvidos. A figura abaixo ilustra os valores comparativos dos resultados obtidos nessas análises, indicando terem obtido correlações bastante satisfatórias entre os mesmos.

Os dados obtidos correspondem estatisticamente a um intervalo de variação da relação entre PR (CH83) / PR (PCE) entre 0.79 e 1.18, com uma distribuição normal de frequência.

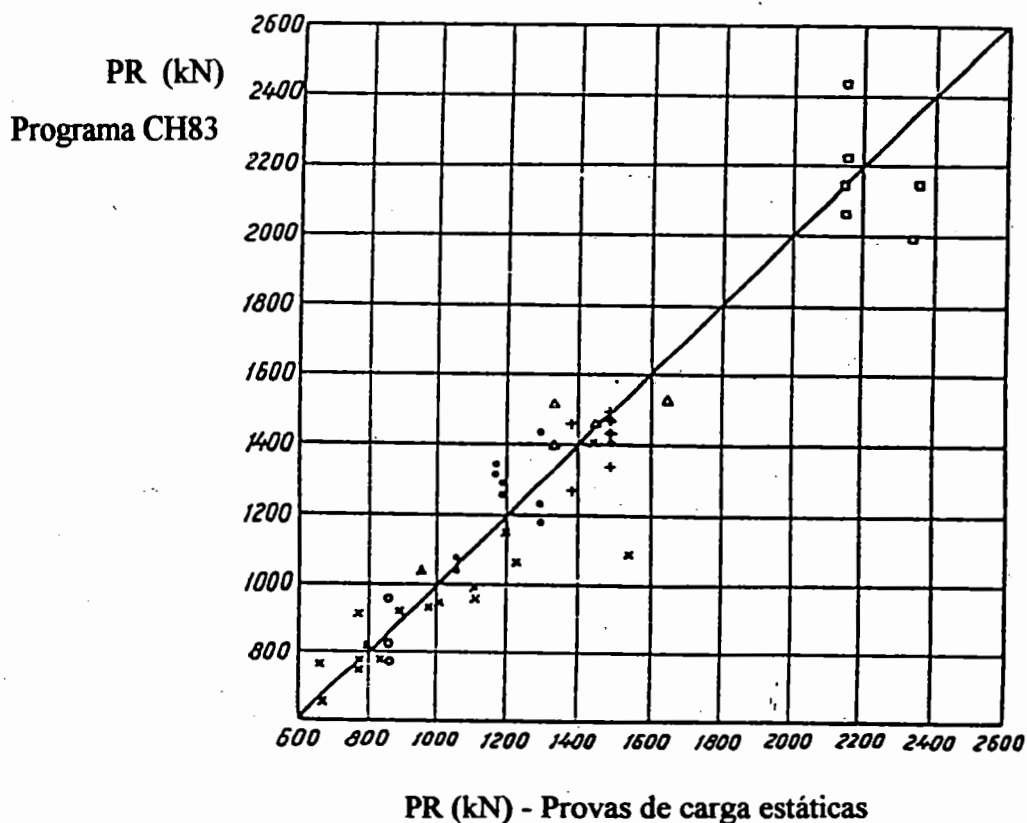


FIGURA 14: Comparação de resultado: provas de carga estática e programa CH83.

Apud. LIANG et. al. (1984)

GOMES. & LOPES (1986) relatam estudos comparativos entre métodos de previsão e controle de estacas pré-fabricadas de concreto centrifugado, cravadas dinamicamente no terminal marítimo da Petroquímica União, em Alemoa, Santos - SP. Foram realizadas medidas de negas no final da cravação e de registros das compressões elásticas das estacas (repiques), e também monitoradas com PDA, pelo IPT, com análises CASE e CAPWAP dos resultados.

Foram também posteriormente realizadas três provas de carga estáticas. Para essas três estacas ensaiadas, os autores compararam resultados de previsão de capacidade de carga, empregando o método empírico de Aoki e Veloso, a formulação dinâmica de Hiley, com parâmetros obtidos dos repiques elásticos registrados, a fórmula de Uto et.al. empregando resultados da equação de onda e o método de Chellis-Aoki. Os resultados obtidos estão mostrados na tabela 3 abaixo:

TABELA 3: Capacidade de Carga por diferentes métodos. GOMES et.al.(1986)

		CAPACIDADE DE CARGA (kN)			
		estaca E332 D = 26 cm	estaca E14 D = 33 cm	estaca E21 D = 38 cm	
Método empírico de Aoki-Veloso		1000	1300	1800	
Fórmula dinâmica clássica de Hiley		630	1030	890	
Fórmula de Uto et.al.		880	1260	1580	
Método de Chellis -Aoki		880	1250	1600	
MONITORAÇÃO	CASE	Jc = 0.0	960	970	810
		Jc = 0.1	920	930	800
	CAPWAP	CRAVAÇÃO	-	750	650
		RECRAV.	900	1110	950
DAVISSON		900	1100	1500	
PROVA CARGA	NBR 6122	940	1220	1650	
VAN DER VEEN		1030	1600	1900	

SILVA et.al.(1986) apresentaram também resultados comparativos de capacidade de carga obtidas pelo método CASE ou por análises CAPWAP e por provas de carga estáticas para quatro estacas de concreto armado e uma estaca tubular metálica, cravadas em diferentes localidades. Os resultados das provas de carga foram obtidos pelos métodos de Van der Veen e de Davisson. A tabela abaixo reproduz os resultados encontrados pelos autores.

TABELA 4 Capacidade de Carga - CASE/CAPWAP x PCE - SILVA et.al. (1986).

Local	estaca	l cravado (m)	CAPACIDADE DE CARGA (kN)			
			Prova de carga estática		Prova de carga dinâmica	
			PR (kN) V.derVeen	PR (kN) Davisson	PR (kN) Met.CASE	PR (kN) CAPWAP
Belo Horizonte	Concreto D = 23cm	17.70	1470	810	880	-
Brasília I	Concreto D = 50 cm	15.45	4360	3780	3230	3100
Brasília II	Concreto D = 50 cm	11.75	10020	4380	4110	-
Tuburão	Concreto D = 70 cm	11.90	9240	8540	8700	7400
Baixada Santista	Tubular Metálica D=80 cm	22.00	10000	9600	5400	4000

Os resultados apresentados indicaram uma concordância razoável entre os resultados das provas de carga estáticas, empregando-se o método de Davisson, com os valores obtidos da instrumentação dinâmica. Tal concordância não foi, todavia, verificada para a estaca tubular metálica cravada na Baixada Santista. Os autores comentam que por se tratar de uma estaca longa, atravessando solo mole, e em virtude do equipamento não dispor de energia suficiente para mobilizar toda a resistência do solo, os valores da instrumentação resultaram sub-avaliados.

CHENG et. al. (1988), comentam que para ser possível a previsão da capacidade de carga da estaca é necessário que a energia aplicada seja suficiente para mobilizar toda a resistência disponível do solo. No trabalho apresentado, comentam que tal mobilização de resistência do solo é obtida quando a penetração da estaca no solo for da ordem de 2mm/golpe.

Apresentam resultados comparativos entre resultados de provas de carga estáticas e de análises CAPWAP, realizadas sobre cinco estacas ensaiadas em diferentes obras em Ontário, região que foi coberta por gelo, tendo portanto um solo glacial típico. O subsolo local normalmente é competente para suportar edifícios através de fundações diretas convencionais. Entretanto, nas obras onde foram realizadas essas análises, pela presença de aterros de solos argilosos moles, ou de areias fofas, impôs-se a necessidade de emprego de fundações profundas.

Os ensaios estáticos foram realizados posteriormente aos ensaios dinâmicos de recriação, com análises CAPWAP. As estacas eram tubulares metálicas. Os resultados obtidos são apresentados no quadro abaixo, para ilustrar a concordância bastante satisfatória encontrada também por esses autores.

TABELA 5: Capacidade de Carga - CAPWAP x PCE - por CHENG et. al. (1988).

ESTACA No.	PR (kN) análises CAPWAP	PR (kN) - Provas de Carga Estáticas
1	2180	2240
2	1525	1630
3	2375	2400
4	920	1080
5	2715	2935

Nota-se, neste trabalho também, uma tendência já observada por outros autores, dos valores obtidos pelo CAPWAP resultarem ligeiramente inferiores aos obtidos pelas provas estáticas.

Os autores recomendam que os ensaios de monitoração devam ser conduzidos sempre que possível, tanto no final da cravação, quanto em recravações posteriores, de modo a permitir detectar eventuais tendências de relaxação do solo, evitando nesses casos, considerar-se os valores obtidos de análises a partir de dados obtidos no final da cravação, que estariam superestimando a capacidade de carga, em solos passíveis de apresentarem o fenômeno de relaxação.

LANGER. et.al. (1988), apresentaram resultados comparativos de provas de carga estáticas e análises "WEAP", para avaliação de capacidades de carga de doze estacas metálicas perfis H, cravadas em Pittsburg -EUA, com discrepâncias nos resultados.

Acreditam que a correlação pobre obtida nesses resultados, esteja associada à presença de pequenos blocos cimentados de argilito, encontrados dispersos nos solos argilosos do local dos ensaios. Comentam que valores baixos de capacidade de carga obtidos por análises dinâmicas são frequentemente encontrados na região, e diversos exemplos têm sido narrados de redução dessa capacidade de carga com o tempo, descritos como ocorrência de "relaxação" do solo.

O estudo em questão revelou que em ensaios sobre recravações posteriores a perda de resistência observada foi bastante pequena, da ordem de 10%, em relação aos resultados das análises realizadas com resultados do final da cravação. Provas de carga estáticas realizadas posteriormente sobre essas estacas, e levadas até à ruptura, indicaram valores extremamente maiores de capacidade de carga do que aqueles obtidos das análises dinâmicas. Tal fato sugere que o fenômeno que ocorre nesses solos, não seja o que tradicionalmente é descrito como relaxação do solo, e talvez estejam associados à uma quebra da cimentação dos solos locais, provocada pelos ensaios dinâmicos de cravação, e de recravação. Os resultados obtidos estão ilustrados na tabela 6.

TABELA 6: Capacidade de Carga - WEAP x PCE - por LANGER et.al. (1988).

ESTACA	PR (kN) - ANALISES WEAP	PR (kN) - Provas de Carga Estáticas
1	703	1512
2	863	1646
3	925	1690
4	1379	1824
5	1495	1957
6	738	1512
7	747	1957
8	1263	1557
9	1067	2002
10	1348	1868
11	1619	2402
12	2135	2491

SEIDEL et. al. (1988) apresentaram resultados comparativos de capacidade de carga obtidos por análises CAPWAP e por provas de carga estáticas, realizados em três estacas pré-fabricadas de concreto protendido, atravessando depósitos aluvionares arenosos, e com a ponta embutida em solo calcário.

Para avaliação da influência do tempo no aumento da resistência do terreno (“set-up”), as estacas foram ensaiadas em recravações realizadas 7 e 535 dias após o final da cravação. Os resultados comparativos estão indicados abaixo revelando significativa concordância.

ESTACA	PR (kN) capwap	PR (kN) ensaio estático
1	3700	3900
2	4118	4200
3	3416	3600

Os dados abaixo indicam o ganho de resistência com o tempo, para a estaca 2, como ilustração do “set-up” significativo verificado para essas estacas:

PR (kN)	PR (kN)	PR (kN)
final da cravação	recravação 7 dias	recravação 535 dias
2289	3289	4118

Os autores comentam que obtiveram resultados excelentes, não só nos resultados comparativos de capacidade de carga, como também em relação às previsões da distribuição de resistências, e do comportamento carga - deslocamento.

Nas recravações, para golpes posteriores, observou-se novamente uma redução da resistência, com perda parcial do “set-up” adquirido decorrente do amolgamento. Este comportamento é considerado raro quando os materiais de fundações são predominantemente granulares, com pequena porcentagem de finos.



NIYAMA & AOKI (1991) apresentaram uma avaliação comparativa entre provas de carga estáticas e dinâmicas realizadas no campo experimental da EPUSP/ABEF, em São Paulo, sobre duas estacas de concreto centrifugado com diâmetros externos de 50 cm e espessura de parede de 9 cm, designadas por PRÉ 2, e PRÉ 4, encontrando correlações altamente satisfatórias.

Nas análises dos resultados da monitoração empregaram um novo conceito para designar Prova de Carga Dinâmica, introduzido por AOKI (1989), que consiste em se aplicar ao final da cravação, uma série de golpes com energias crescentes, aumentando-se gradativamente a altura de queda, permitindo avaliar para cada um desses golpes pares de valores RMX (resistência máxima mobilizada) e DMX (deslocamento máximo verificado). Assim, é possível traçar uma curva carga x deslocamento, semelhante à obtida em ensaios estáticos, a partir da qual, avalia-se a capacidade de carga total da estaca.

Como ilustração dos resultados obtidos pelos autores, reproduzimos na figura 15, as curvas carga x deslocamento para uma das estacas ensaiadas referentes aos dois ensaios. Observou-se excelente concordância entre as mesmas.

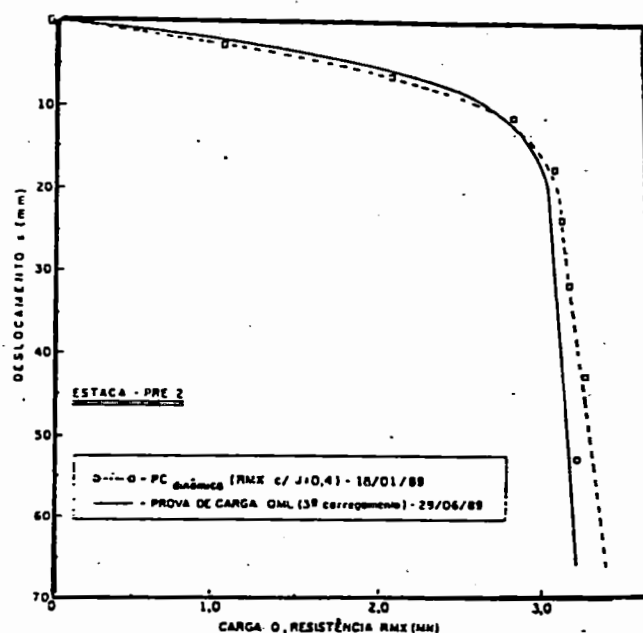


FIGURA 15: Comparação das curvas carga x deslocamento para a estaca PRE2  
Apud. NIYAMA & AOKI (1991)

Um trabalho interessante foi apresentado por CHAPMAN et.al (1992), onde é analisado o fenômeno de estacas longas atravessando espessas camadas de solo mole, e os autores propõem uma metodologia para apurar resultados de instrumentação nessas situações. Recomendam que sejam efetuadas monitorações do final da cravação e também de recravação posterior, tendo em vista que nessas condições de subsolo, os resultados entre as duas monitorações tendem a apresentar-se bastante distintos.

No final da cravação, há uma forte tendência de que os valores medidos para as parcelas de atrito lateral ou adesão entre as paredes do fuste da estaca e o solo, medidas sejam bem inferiores àquelas que serão mobilizadas nas condições de trabalho da estaca, em virtude das perturbações que ocorrem nessas camadas decorrentes da própria cravação da estaca, e também em virtude das elevadas poro-pressões de água geradas ao longo da superfície de contato solo-estaca que tendem a reduzir o atrito lateral. Assim, no final da cravação a parcela resistente do solo na ponta da estaca é a principal responsável pela resistência oferecida pelo solo, à penetração da estaca.

Já no ensaio realizado na recravação, efetuada após decorrido pelo menos 24 horas, com a acomodação do solo ao longo do fuste e dissipadas as poro-pressões induzidas, a parcela de atrito lateral obtida na instrumentação tende a ser muito mais representativa da resistência lateral ao longo do fuste da estaca. Todavia, tendo em vista a limitação de energia possível de ser aplicada, pelo fato de se tratar de estacas muito longas, via de regra, a energia dispendida na recravação não é suficiente para mobilizar totalmente a parcela resistente do solo abaixo da ponta ou da base da estaca, sendo essa parcela, desse modo, subavaliada.

Os autores comentam a realização de ensaios de cravação e de recravação com dezenas de estacas longas na região de Melbourne, onde o perfil típico do subsolo local é composto por uma espessa camada de solo mole, de cerca de 15 metros de espessura, sotoposto a solos mais resistentes, ou argilas rijas, ou solos granulares provenientes da decomposição de siltitos.

A proposta dos autores consiste em se compor a capacidade de carga da estaca, considerando-se como a soma da parcela de ponta obtida do ensaio do final da cravação, com a parcela lateral obtida na recravação. Os valores assim obtidos, comparados com resultados de cinco provas de carga estáticas em estacas pré fabricadas de concreto de 350 mm de diâmetro revelaram excelentes concordância para todas elas, principalmente no que se refere aos níveis de cargas de trabalho.

RIKER et.al. (1992), apresentaram resultados comparativos entre análises CAPWAP realizadas no final da cravação e em recravação posterior com resultados de prova de carga estática em estacas instrumentada com “strain-gages” e “tell-tales”, de concreto protendido, com diâmetro de 510 mm e de aproximadamente 40 metros de comprimento enterrado, visando avaliar a máxima carga de projeto, considerando conjuntamente critério de capacidade e de deslocamentos..

Por se tratar de estaca longa atravessando solo compressível, da mesma forma que proposto por Chapman (1992), esses autores também combinaram os valores obtidos na cravação e na recravação, como forma de obter um resultado de capacidade de carga mais realístico. Os resultados obtidos na instrumentação dinâmica são mostrados no quadro abaixo:

	PR (kN)	PL (kN)	PP (kN)	DMEX (mm)
Final da cravação	2500	960	1540	9.65
Recravação	3250	2040	1210	5.59
Combinados	3580	2040	1540	-

Para avaliação da capacidade de carga a partir dos resultados da prova de carga os autores empregaram três critérios de extrapolação da curva: Davisson, Brinch-Hansen e Chin-Konder, obtendo-se os valores indicados abaixo:

<b>Critério:</b>	<b>PR (kN)</b>
Davisson	6000
Brinch-Hansen	7500
Chin-Konder	8300

Observa-se que os resultados das análises CAPWAP, mesmo combinados, resultaram bastante inferiores aos obtidos na prova de carga estática. Segundo os autores, dois aspectos parecem ter contribuído para essa discrepância: o tempo decorrido entre a realização das análises CAPWAP e a realização da prova de carga estática, bem como o deslocamento do solo da ponta, para o golpe analisado ter sido bem inferior, ao deslocamento referente à capacidade de carga, obtido no ensaio estático.

Durante a cravação de uma estaca, as ondas de tensão provocadas pelo impacto do martelo, percorrendo o fuste da estaca, podem induzi-la a elevadas tensões. Quando as características do subsolo não oferecem uma resistência oposta de maneira a equilibrar essas tensões, surge em decorrência uma onda trativa como reflexão à onda provocada pelo golpe. Em se tratando de estacas de concreto, dependendo fundamentalmente das características geotécnicas do perfil de subsolo local, a magnitude dessas ondas de tração pode atingir valor suficiente para danificar a estaca.

Esse fenômeno é principalmente verificado em estacas longas atravessando espessas camadas de solos argilosos moles, onde é possível também a ocorrência de atritos laterais negativos. Através da monitoração da cravação de uma estaca de prova empregando o PDA, pode-se avaliar o efeito dessas ondas de tração reflexivas, quando houver suspeitas de que tais tensões poderão acarretar danos às estacas. Este tema tem sido objeto de muitos trabalhos. GONÇALVES et.al. (1996) apresentam alternativas para esse aspecto, tais como modificação do sistema de cravação, fabricação de estacas especiais, ou mesmo alteração do projeto.

A experiência brasileira de monitoração de estacas moldadas "in loco" é bastante limitada. BEIM et.al. (1992) apresentaram resultados de instrumentação com PDA e posteriores análises CAPWAP, realizados sobre estacas tipo Franki, em três obras no estado de Minas Gerais. Os ensaios foram realizados após decorridos pelo menos 14 dias do final da execução das estacas, a fim de garantir que o concreto tenha adquirido resistência adequada para a realização do ensaio.

Os autores comentam que antes da realização dos ensaios foi necessário preparar a estaca para o ensaio dinâmico. Para isso, foi removido pelo menos 400 mm da camada superior de concreto da estaca, que geralmente não é de boa qualidade, cortando-se as ferragens e procurando nivelar o topo da estaca. Para a instalação dos instrumentos foi necessário escavar cerca de 1,5m ao redor da estaca, e aplinar as superfícies rugosas das mesmas. Foi colocado um capacete especial e coxins de madeira compensada para receber os golpes do pilão.

Empregou-se o próprio pilão de execução, de 30 KN ou 40 KN, dependendo do diâmetro da estaca, pois por razões de custos não seria viável a mobilização de bate-estacas. Segundo os autores, este sistema não apresentou maiores dificuldades operacionais, e obteve-se uma eficiência de 13% a 28%.

O autor comenta que por razões de custos envolvidos não foi realizada nenhuma prova de carga estática para comparar os resultados, o que certamente contribuiria bastante para uma avaliação comparativa dos resultados mais representativa.

As capacidades de carga das estacas encontradas pelas análises CAPWAP, foram comparadas com o método empírico de Aoki-Veloso, já incorporado na rotina brasileira como um método adequado de previsão de capacidade de carga dessas estacas. Tais resultados não são apresentados pelos autores, mas relatam terem obtidos concordâncias extremamente satisfatórias.

GOBLE, RAUSCHE, LIKINS & Associates, Inc.- GRL, Inc. (1996) apresentou extensivo e atualizado programa de correlação empregando resultados de análises CAPWAP, conforme procedimento normatizado pela ASTM - D4945-89. Tais estudos objetivaram primeiramente demonstrar estatisticamente, a confiabilidade de predições de capacidade de carga de estacas, através dessas análises. Também objetivaram reavaliar criticamente os procedimentos e resultados anteriormente obtidos, visando novos aperfeiçoamentos. Outro objetivo foi o de estudar o modelo de amortecimento radial do solo ("radiation damping"), recentemente incluído no programa de análises CAPWAP, para a partir dos resultados desse estudo, apresentar diretrizes e recomendações para emprego desse modelo. Finalmente, o trabalho teve também o objetivo de investigar relações entre os parâmetros dinâmicos ("damping" e "quake"), conforme o tipo de solo. Resultados de ensaios sobre 82 estacas foram empregados nesse estudo.

Essas estacas foram selecionadas a partir de um banco de dados que a GRL tem mantido sempre atualizado, onde constam resultados comparativos entre mais de duas centenas de estacas, enviados por usuários de PDA, de diferentes localidades do mundo. O critério de seleção foi rigoroso e criterioso. Escolheram-se apenas aquelas estacas, cujas informações sobre os procedimentos de ambos os ensaios (estático e dinâmico) fossem completas e detalhadas, tanto no que se refere às características das estacas, dos tipos de solos locais através de sondagens e eventuais ensaios "in situ", das técnicas de execução dos ensaios, monitoração da cravação e recravação das estacas, registro das datas de realização dos ensaios, energias aplicadas, etc.

A avaliação da capacidade de carga empregando as análises CAPWAP foram desenvolvidas empregando-se três procedimentos distintos, designados por "automático" ("automatic"), "melhor ajuste" ("best match") e "amortecimento radial" ("radiation damping"). No primeiro citado, a busca do valor da capacidade de carga é realizada automaticamente, sem interferência do engenheiro-analista, e nos outros dois procedimentos, é necessário uma iteração do usuário com o programa, e portanto, de certa forma dependem, de sua habilidade.

Cada um dos valores obtidos por esses três procedimentos, foram comparados com os respectivos valores obtidos dos ensaios estáticos.

Um aspecto importante que afeta significativamente a correlação entre os resultados, segundo os autores, refere-se ao tempo decorrido entre o final da cravação e a realização dos ensaios de recravação, e da prova de carga estática. Apresentam estudos dessa influência, empregando o conceito de Relação Tempo, que designaram como sendo a relação entre os valores  $T_1$  e  $T_2$ , definidos como os intervalos de tempo decorridos entre a data final da cravação, e a data da realização da prova de carga estática, e entre o final da cravação e a data da realização do ensaio dinâmico da recravação, respectivamente.

As estacas ensaiadas foram divididas para esse estudo em três lotes distintos, de acordo com o valor da relação  $T_1/T_2$ , da seguinte forma:

lote 1: - quando o valor dessa relação fosse menor do que 0,8.

lote 2: - quando o valor se situava na faixa entre 0,8 e 3,0.

lote 3: - quando o valor de  $T_1/T_2$  fosse maior do que 3,0.

A tabela 7 resume os resultados encontrados, para cada um desses lotes, para análises CAPWAP efetuadas, pelas três metodologias já anteriormente, comentadas.

TABELA 7: Influência da Relação Tempo na precisão dos resultados obtidos:

RESUMO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES CAPWAP CONF. REL. $T_1/T_2$							
relação $T_1/T_2$	Nº de estacas	média dos resultados da relação $PR_{capwap} / PR_{pcc}$			COEFICIENTE DE VARIAÇÃO - COV		
		“Auto- mático”	“Melhor Ajuste”	“Amort. Radial”	“Auto- mático”	“Melhor Ajuste”	“Amort. Radial”
< 0,8	11	0,97	0,96	1,04	0,20	0,16	0,13
0,8 a 3,0	41	0,98	0,95	1,03	0,18	0,15	0,09
> 3,0	30	0,94	0,89	1,0	0,29	0,17	0,21

Os resultados obtidos demonstram a importância de que ambos os ensaios sejam realizados algum tempo após a estaca já ter sido cravada, e que quando a relação de tempo decorrido se situa entre 0,8 e 3,0 obtem-se os melhores resultados, o que significa que se os ensaios, estático e dinâmico, forem realizados muito espaçados entre si, as discrepâncias entre os resultados obtidos serão maiores. A maior variação nas previsões de capacidade de carga ocorre quando a prova de carga estática foi realizada significativamente depois do ensaio dinâmico, com relações de tempo, maiores do que 3,0.

Na prática geral, para minimizar custos, e garantir um ritmo determinado para a seqüência de cravação que facilite a produção do estaqueamento, ou como forma de cumprir compromissos, freqüentemente o ensaio dinâmico da recravação é realizado no máximo 48 horas após o final da cravação, enquanto que a prova de carga estática, devido as dificuldades inerentes à montagem, é realizada uma semana ou mais, após a instalação da estaca, o que acaba contribuindo para uma maior discrepância entre os resultados obtidos por cada um dos ensaios, estático e dinâmico.

Para solos essencialmente arenosos, considera-se que a capacidade de carga não varie muito após a cravação. Todavia, nos casos usuais de ensaios em estacas instaladas em solos estratificados, ou contendo grãos finos, ocorrem "set-ups" adicionais, após a realização do ensaio dinâmico e antes da prova de carga estática ser realizada, o que faz com que os resultados comparativos entre esses ensaios sejam diferentes, sendo normalmente sub-avaliados os resultados dos ensaios dinâmicos. Isto fica revelado quando os resultados obtidos para  $T1/T2$  são maiores do que 3,0.

Por outro lado, em determinados solos muito sensíveis, se o ensaio dinâmico com muitos golpes é realizado num tempo relativamente curto antes do ensaio estático, a capacidade de carga pode decrescer temporariamente, golpe por golpe, e a resistência do solo não terá tempo suficiente para recuperar-se, resultando numa redução da carga de ruptura obtida na prova de carga estática. O mais recomendável, segundo os autores, seria que o ensaio dinâmico fosse realizado tão logo possível, após ter se realizado o ensaio estático.



Os ensaios de carregamentos estáticos foram realizados de acordo com a ASTM D1143. Para a obtenção da capacidade de carga na ruptura, vários métodos podem ser empregados. Dependendo da configuração da curva carga x recalque, os valores obtidos por cada um desses métodos usuais podem ser bastante distintos. Nesses casos, normalmente o valor obtido pelo critério de Davisson tende a ser um limite inferior, e o obtido pelo critério de Chin, normalmente apresenta-se como um limite superior.

Os autores comentam que em todos os casos analisados nesse estudo os valores obtidos nas análises CAPWAP, situaram-se entre esses dois limites. O critério adotado para essas análises comparativas, foi o de Davisson, pois os autores argumentam que por se tratar de um método mais conservativo, ter maior aceitação na prática corrente nos EUA, além do fato de ser o que tem apresentado melhores concordâncias com resultados de capacidade de carga obtidos por análises CAPWAP.

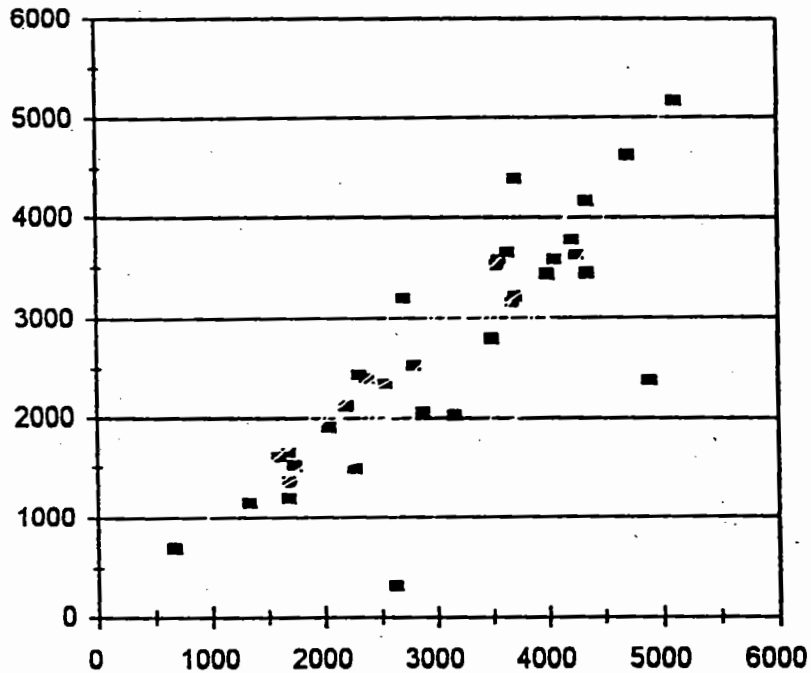
Uma série de estudos comparativos foi apresentada nesse trabalho, com análises estatísticas interessantes, e os resultados comentados mostram que as correlações foram sempre satisfatórias, tendo sido os melhores resultados obtidos para as análises empregando o procedimento designado por "amortecimento radial", para aquelas 41 estacas onde a relação tempo  $T1/T2$  situou-se no intervalo entre 0,8 e 3,0, ou seja, para aquelas estacas em que as datas de realização dos ensaios estático e dinâmico foram mais próximas. Para ilustrar esse aspecto, consideramos oportuno apresentar e comentar alguns resultados encontrados pelos autores.

Os gráficos apresentados na figura 16 foram construídos a partir dos resultados obtidos pela GRL, Inc., para um lote que selecionamos das 33 estacas pré-fabricadas de concreto armado e outro das 15 estacas metálicas, perfil H, a partir do banco de dados publicado. Esses gráficos apresentam as correlações obtidas entre resultados de capacidades de carga obtidos pelas análises CAPWAP e pelas provas de carga estáticas. A simples observação visual dos mesmos atestam que concordâncias externamente satisfatórias foram obtidas para os dois tipos de estacas mencionadas.

**ESTACAS DE CONCRETO ARMADO**  
Pr PCE x CAPWAP

PR (kN)

Análise CAPWAP



PR (kN) Prova de Carga Estática

**ESTACAS METÁLICAS PERFIS H**  
Pr PCE x CAPWAP

PR (kN)

Análise CAPWAP

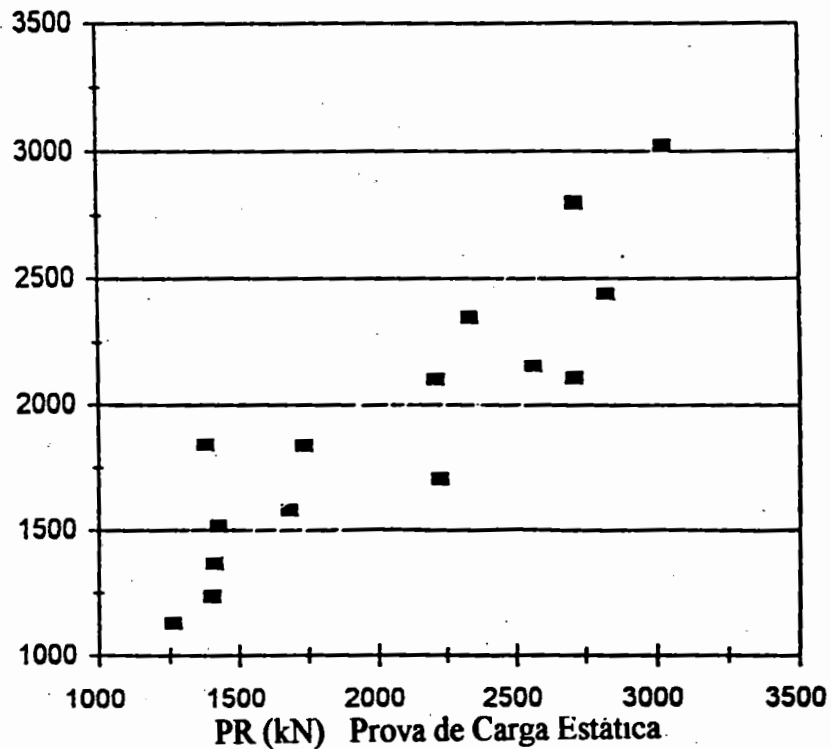


FIGURA 16: CAPWAP x PCE a partir do banco de dados da GRL, Inc.(1996).

A figura 17, ilustra os gráficos estatísticos obtidos pelos autores da função densidade de probabilidade log-normal para previsões de capacidade de carga das 82 estacas selecionadas no trabalho, por análises CAPWAP empregando o procedimento designado por “amortecimento radial” (“radiation damping”), que forneceu os melhores resultados comparativos com os resultados dos ensaios estáticos.

Nesta ilustração, são mostradas as curvas estatísticas de distribuição, por esse procedimento, para os 3 lotes em que as estacas foram subdivididas, com base nas diferentes relações de tempo  $T1/T2$ , já citadas. A curva em negrito, referente à relação  $T1/T2$  na faixa entre 0,8 a 3,0, mostra a sensível melhoria na precisão dos resultados, quando os ensaios estático e dinâmico são realizados em datas mais próximas entre si. A análise dos resultados feita pelos autores revelaram que para 95% das estacas ensaiadas a relação entre os valores de capacidade de carga obtidos nos ensaios estáticos e dinâmicos situou-se numa faixa entre 0,8 a 1,2, o que segundo os autores é uma concordância até melhor do que a que se obtém quando compara-se resultados capacidades de carga obtidos pelos diferentes métodos usuais conhecidos, para resultados de uma mesma prova de carga estática.

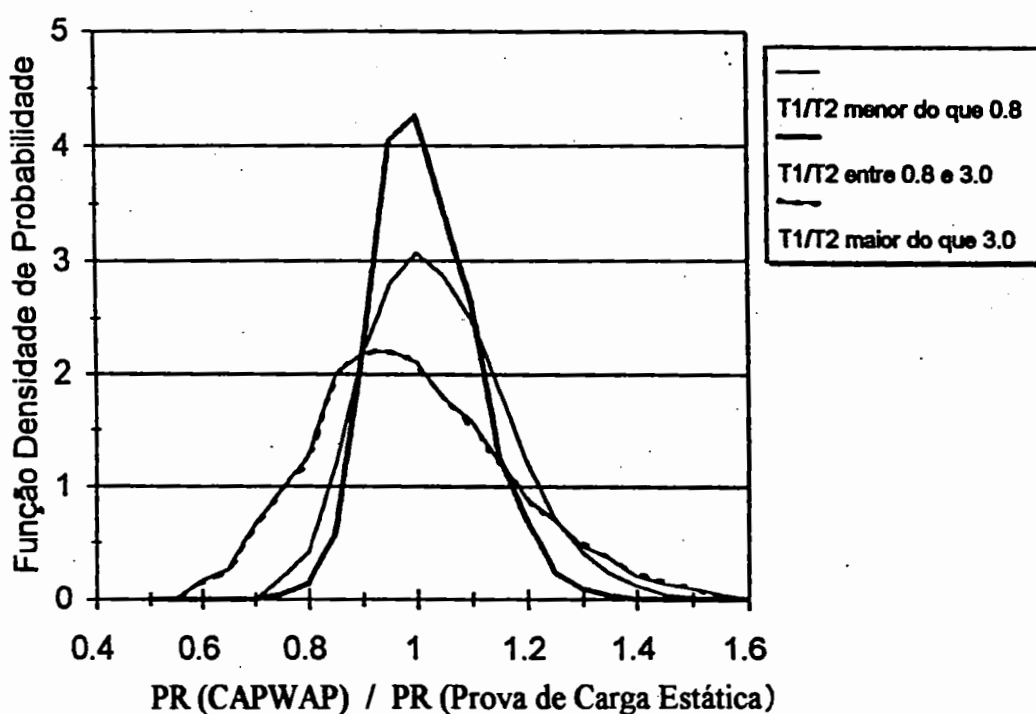


FIGURA 17: Densidade de Probabilidades para diferentes relações de tempo  $T1/T2$

Apud GRL, Inc. (1996)

Finalizando essa parte da revisão bibliográfica onde tratamos fundamentalmente do emprego da monitoração da cravação de estacas, da instrumentação, análises e resultados obtidos, julgamos interessante alguns comentários sobre a confiabilidade nos resultados dessas análises por instrumentação, e algumas recomendações sugeridas por especialistas, para que as análises conduzam a resultados mais satisfatórios.

Embora amplamente difundidas, e já incorporadas na rotina do controle de estacas cravadas, a instrumentação da cravação com posterior análise empregando a teoria da equação da onda, ainda não está totalmente consolidada como um procedimento plenamente satisfatório de garantia da capacidade de carga da estaca ensaída.

Em que pese as evidentes diferenças de comportamento do solo sob carregamentos estáticos e dinâmicos, o elevado número de trabalhos publicados atestando que boas correlações foram encontradas, entre os resultados dessas análises comparados com resultados obtidos de provas de carga estáticas, sugere, com maior confiabilidade, que a instrumentação constitui-se num procedimento bastante adequado de controle do comportamento de estacas cravadas.

Apresenta uma série de vantagens adicionais relevantes, tais como, a rapidez e a praticidade do ensaio, os custos associados, a quantidade de estacas que podem ser ensaiadas num período curto de tempo, além de fornecer várias informações adicionais importantes como as tensões de compressão ou de tração induzidas à estaca pela cravação, a integridade da estaca, as parcelas resistentes por atrito lateral e na ponta ( no caso das análises CAPWAP), além de permitir uma interferência no momento da cravação, visando adequar a energia aplicada às condições locais.

É verdade que alguns poucos autores, conforme comenta NIYAMA (1991), publicaram trabalhos onde não foram obtidas correlações razoáveis, levando-os inclusive a concluírem de modo equivocado pela inadequação da técnica de instrumentação

Mas os especialistas consideram que em situações isoladas, quando não são bem conduzidas ou interpretadas, realmente os resultados não se mostrarão satisfatórios. Dessa forma apresentam uma série de aspectos que devem ser observados, e sugerem alguns cuidados que devem ser tomados, visando uma maior confiabilidade nos resultados obtidos.

Um aspecto fundamental, nesse sentido, refere-se à energia transferida para a estaca decorrente do golpe do martelo selecionado para a análise. É importante que essa energia seja tal que garanta a total mobilização da resistência disponível na interação solo-estaca. Para que isso ocorra, tal energia deve ser suficiente para provocar uma penetração da estaca no terreno, capaz de produzir o deslocamento máximo do solo "quake".

A elevação da altura de queda do martelo, aplicando-se assim maior energia à estaca, conseqüentemente aumentará a resistência mobilizada. Como é pouco provável que por intuição, se conheça qual é a altura de queda indicada para tal, constitui-se um procedimento extremamente adequado, a técnica de realização do ensaio sugerida por AOKI (1989), já referida neste trabalho, designada por Prova de Carga Dinâmica. Esse procedimento consiste em, no final da cravação, ou de preferência na recravação da estaca, se aplicar à mesma, golpes com energias crescentes, elevando-se gradativamente a altura de queda do martelo, avaliando-se para cada golpe, através de análise, a carga resistente mobilizada.

Outro aspecto importante que merece ser comentado refere-se ao tempo de repouso decorrido entre o final da cravação e a data da realização dos ensaios. Diversos trabalhos publicados relatam fenômenos de ganho de resistência do solo com o tempo, conhecido como "set-up", tendo sido inclusive esse aspecto tema de recente dissertação de mestrado defendida Por CAMPOS, G. (1997) na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Alguns outros trabalhos, relatam a ocorrência de um fenômeno oposto, ou seja de perda de resistência do solo, com o tempo, fenômeno esse designado por relaxação.

No capítulo 4 desta dissertação, apresentaremos resultados comparativos entre resultados de avaliação de capacidade de carga de estacas através de análises CAPWAP, com resultados de capacidade de carga dessas estacas, avaliados empregando-se algumas fórmulas dinâmicas conhecidas, baseadas na teoria do choque de Newton.

Inúmeras proposições de previsão de capacidade de carga de estacas cravadas empregando formulações dinâmicas, já foram apresentadas no passado, por muitos pesquisadores, sendo que a maioria delas resultaram numa aplicação bastante restrita, ou mesmo demonstraram-se na prática, inadequadas.

Essa inadequação se explica pelo fato do fenômeno representado pela cravação de uma estaca no terreno, mediante a aplicação de energia dinâmica, proveniente de golpes de um martelo, içado e deixado cair de uma certa altura, sobre o topo da estaca, pouco se assemelha ao fenômeno representado na teoria do choque elástico formulada por Newton. Em adição aos erros teóricos, há que se considerar também que a ocorrência de diversas formas de perdas de energia no processo, e que são normalmente difíceis de serem quantificadas, contribui ainda mais, para que os resultados obtidos não sejam satisfatórios.

Assim, no intuito de ilustrar estudos comparativos que empregaram fórmulas dinâmicas, nesta revisão bibliográfica selecionamos dois trabalhos publicados a esse respeito, para apresentá-los de forma resumida.

O primeiro deles, foi apresentado há três décadas, por OLSON et.al. (1967), mostrando relações entre 6 das fórmulas dinâmicas mais difundidas, com resultados de ensaios estáticos realizados sobre um total de 115 estacas de diferentes características.

O segundo trabalho que comentaremos aqui, mais recente, foi desenvolvido por JIMENEZ (1991) e apresenta correlações de análises CAPWAP, com algumas fórmulas dinâmicas, realizadas sobre um lote de 50 estacas metálicas.

OLSON et.al. (1967), apresentou resultados de estudos comparativos entre resultados de capacidade de carga de estacas, obtidos empregando algumas formulações dinâmicas clássicas, já amplamente difundidas, e resultados apresentados por FLAATE (1964), obtidos de ensaios de provas de carga estáticas realizadas sobre um total de 115 estacas, sendo 43 estacas de madeira, 17 estacas de concreto armado, e 55 estacas metálicas. O quadro apresentado na figura 18 ilustra as fórmulas dinâmicas empregadas neste trabalho, e as figuras 19 e 20 ilustram gráficos comparativos dos resultados apresentados pelos autores, para as estacas de concreto e para as estacas de madeira.

Engineering News	$PR = (e_h E_n) / (s + e)$
Hiley	$PR = \{ (e_h E_n) / s + 0,5 (c_1 + c_2 + c_3) \} \{ (W_h + n^2 W_p) / (W_h + W_p) \}$
Pacific Coast Unif. Building Code	$PR = S E / 2L \{ -s + [s^2 (4 e_h E_n W_h + n^2 W_p) / (S E) (W_h + W_p)]^{1/2} \}$
Janbu	$PR = E_n / (k_u s)$ onde: $k_u = C_d \{ 1 + [1 + \lambda_c / C_d] \}^{1/2}$ com: $\lambda_c = E_n L / S E s^2$ $C_d = 0,75 + 0,15 (W_p / W_h)$
Dinamarquesa	$PR = e_h E_n / \{ s + [e_h E_n L / 2 S E]^{1/2} \}$
Gates	$PR = 4,0 \{ [e_h E_n]^{1/2} \log (25 / s) \}$

FIGURA 18: Fórmulas Dinâmicas Empregadas por OLSON et.al. (1967)

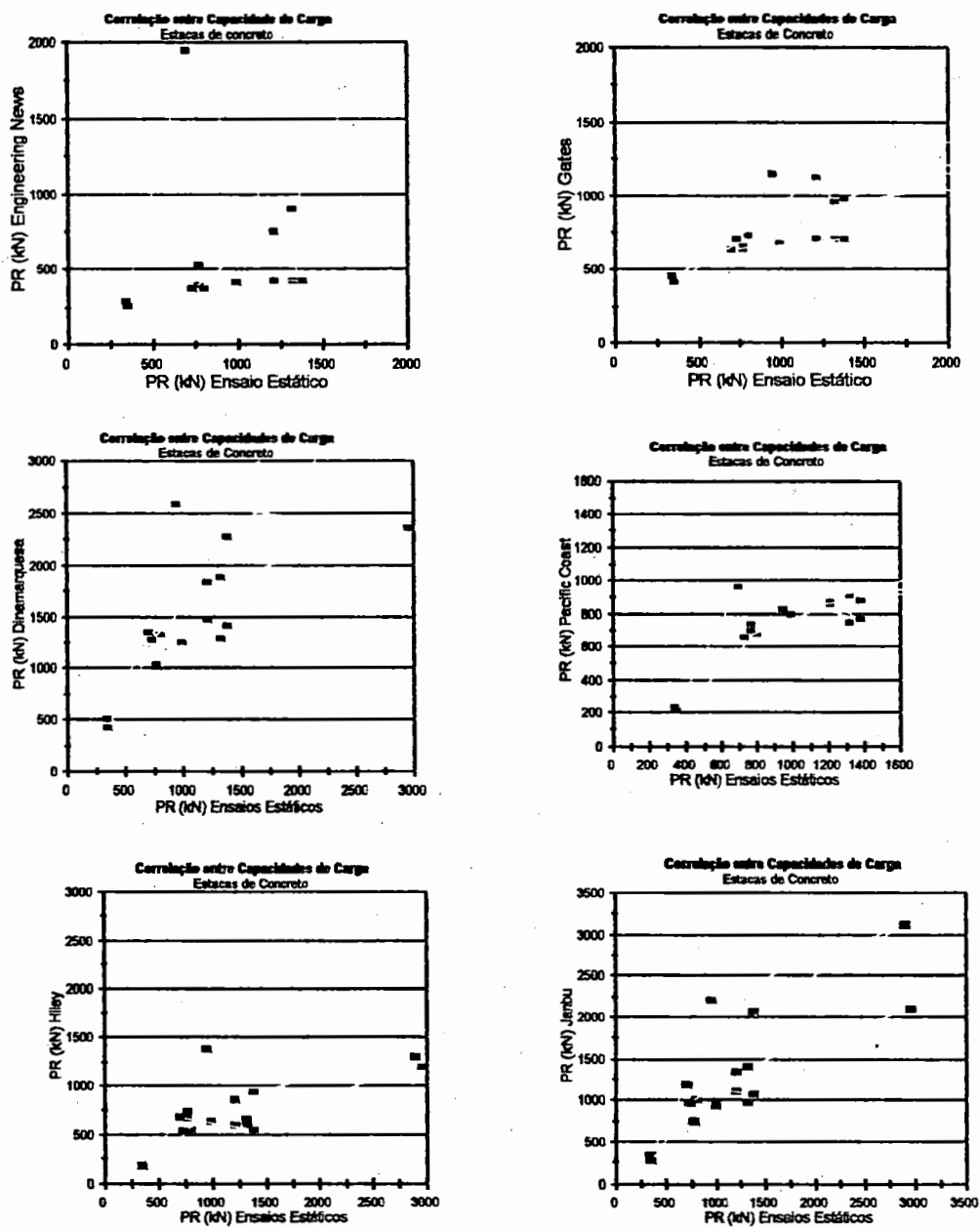


FIGURA 19: Correlações entre fórmulas dinâmicas e provas de carga estática, para estacas de concreto armado, obtidas por OLSON et. al. (1967).



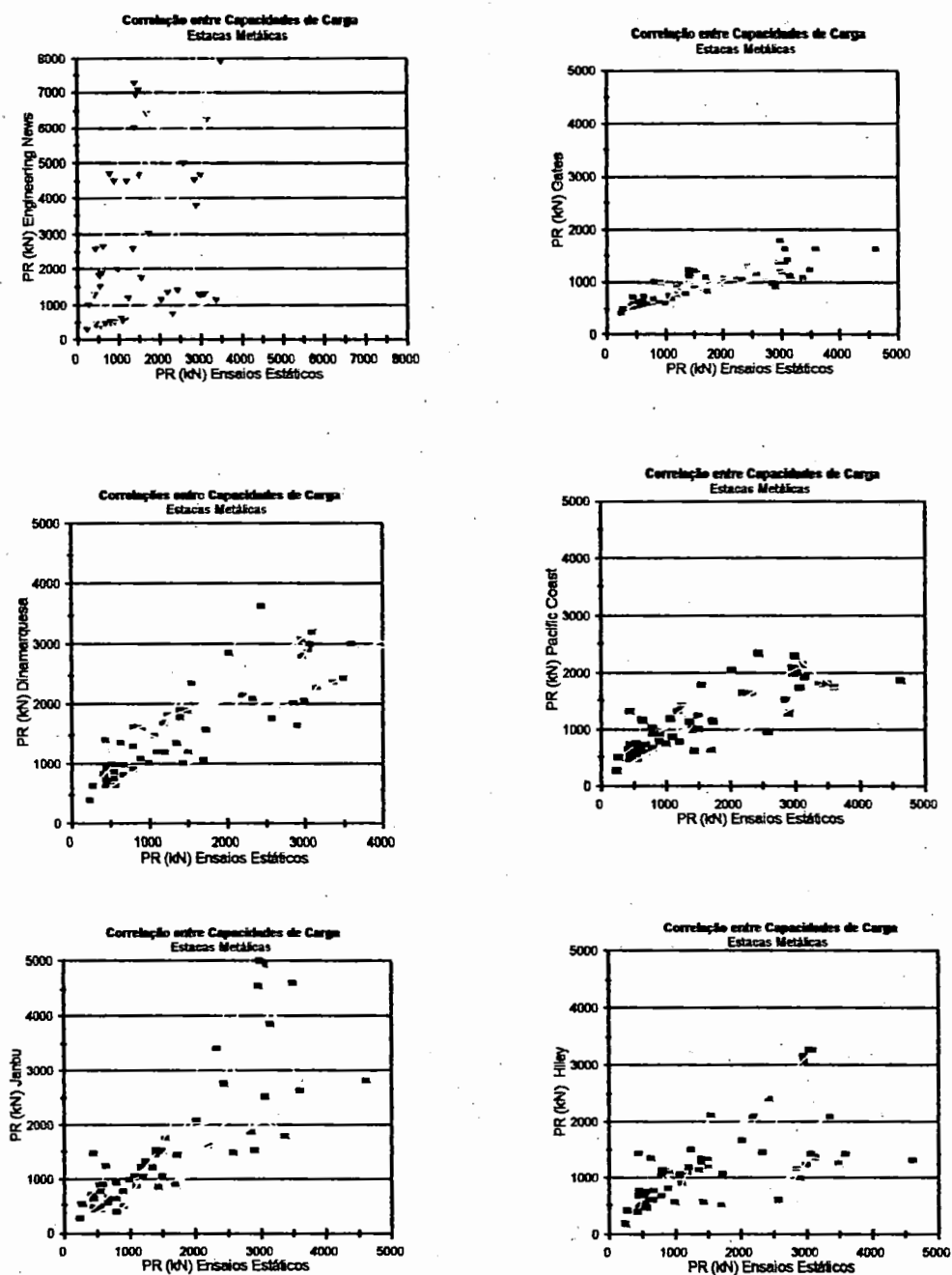


FIGURA 20: Correlações entre fórmulas dinâmicas e provas de carga estática, para estacas metálicas, obtidas por OLSON et.al. (1967).

Os valores de capacidade de carga calculados e medidos pelos autores, foram comparados estatisticamente. Foi assumida uma relação linear entre esse valores e por regressão, obteve-se expressões de correlações do tipo  $Prpce = A * PRfd + B$ , onde  $Prpce$  é o valor da prova de carga estática e  $PRfd$  é o valor obtido pela fórmula dinâmica em questão. Os parâmetros de correlação  $A$  e  $B$  encontrados, estão mostrados na figura 21, além dos valores dos coeficientes de correlação “ $r$ ” obtidos.

Uma correlação perfeita deve apresentar o parâmetro  $A$  igual a unidade, e o parâmetro  $B$  igual a zero. Também quanto mais o coeficiente de correlação “ $r$ ” se aproximar da unidade, menor será a dispersão entre os resultados avaliados. Uma avaliação dos valores obtidos, apresentados na tabela, mostra que para as estacas de concreto nenhuma das formulações apresentou concordância razoável, enquanto que para as estacas metálicas, apenas para as formulações de Janbu, de Hiley e do Pacific Coast, os resultados se apresentaram relativamente satisfatórios.

Estaca	Fórmula	Nº de estacas	Parâmetro A	Parâmetro B (kN)	Coef.de Correl. r r
Concreto	Eng.News	15	0,20	720	0,11
	Hiley	15	1,08	240	0,43
	Pacific Coast	15	1,57	-190	0,75
	Janbu	15	0,66	230	0,64
	Dinamarquesa	15	0,60	110	0,69
	Gates	15	1,62	-270	0,65
Metálica	Eng.News	41	0,28	430	0,37
	Hiley	41	1,14	-100	0,76
	Pacific Coast	41	1,07	0	0,79
	Janbu	41	0,91	70	0,83
	Dinamarquesa	41	0,89	-160	0,82
	Gates	41	2,34	-830	0,84

FIGURA 21: Compilação dos parâmetros estatísticos

JIMMENEZ (1991), confrontou resultados de previsões de capacidade de carga obtidas através do emprego de três fórmulas dinâmicas clássicas, já citadas neste trabalho, com os resultados obtidos através de análises CAPWAP feitas a partir dos registros de instrumentação de ensaios de campo realizados sobre 50 estacas metálicas, perfis H, cravadas em Porto Rico, quando da construção de uma ponte sobre o rio Manati

No intuito de apresentar os resultados comparativos encontrados pelo autor, apresenta-se nas figuras 22 e 23 gráficos de correlação entre esses resultados de previsão de capacidade de carga obtidas pelas formulações dinâmicas clássicas empregadas no estudo, (Dinamarquesa, de Gates e de Janbu), com os resultados obtidos das análises CAPWAP.

Observou-se que essas correlações não se mostraram satisfatórias, sendo que as duas primeiras citadas apresentaram uma tendência acentuada de fornecerem valores bem superiores aos obtidos na instrumentação da cravação ou da recravação dessas estacas. Já os valores obtidos na formulação de Janbu, apresentaram dispersão mais acentuada ainda, não indicando nenhuma tendência de correlação, ora resultando valores superestimados, ou subestimados, quando comparados com os resultados da instrumentação.

No artigo, o autor apresenta também considerações sobre o efeito de ganho de resistência com o tempo, "set-ups", obtidos pela comparação de resultados de monitoração da cravação e da recravação das estacas. Esse ganho verificou-se tanto no que se refere à resistência por atrito lateral ao longo do fuste, quanto na parcela resistente na ponta da estaca. Esse ganho situou-se numa faixa média de 11%.

Em cinco dessas estacas realizou-se também provas de carga estáticas, e os resultados comparados com os obtidos pela instrumentação correlacionaram-se de maneira bastante satisfatória.

### Fórmulas Dinâmicas x Análises CAPWAP

Estacas Metálicas Perfis H

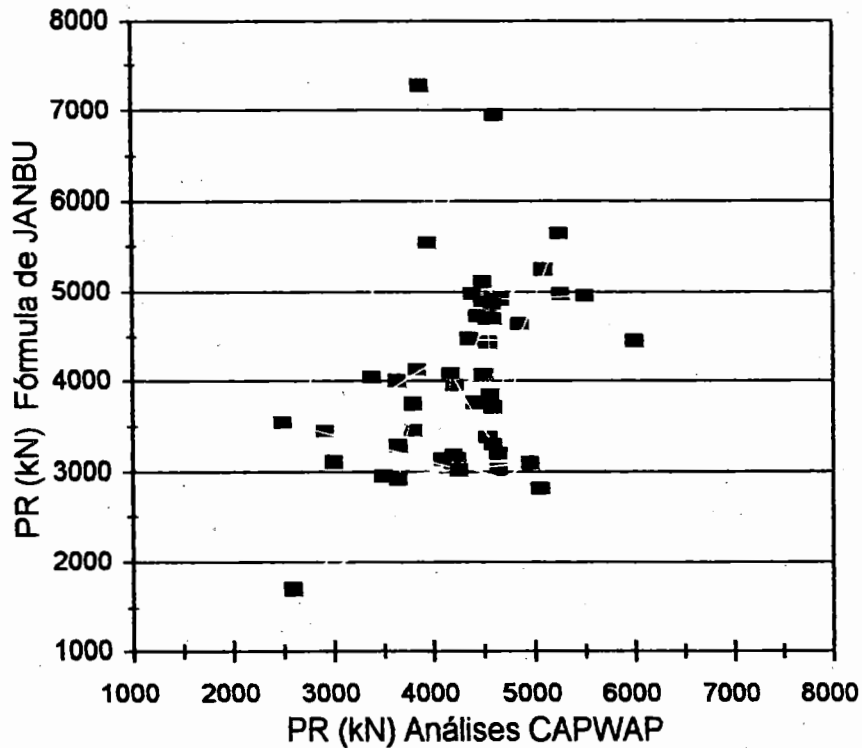
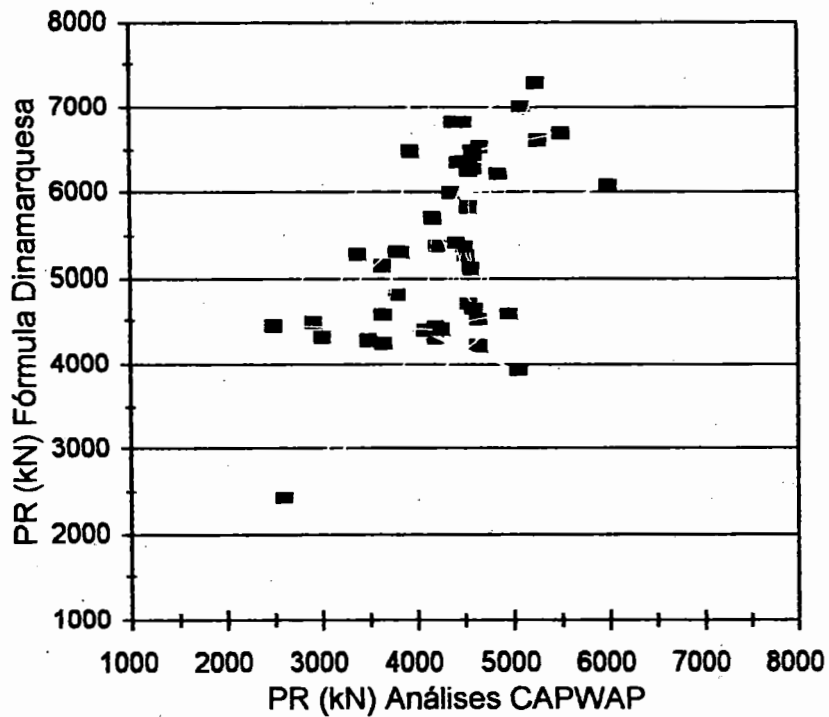


FIGURA 22: Correlações CAPWAP x Fórmulas Dinâmicas de Janbu e Dinamarquesa Resultados obtidos por JIMENEZ (1991).

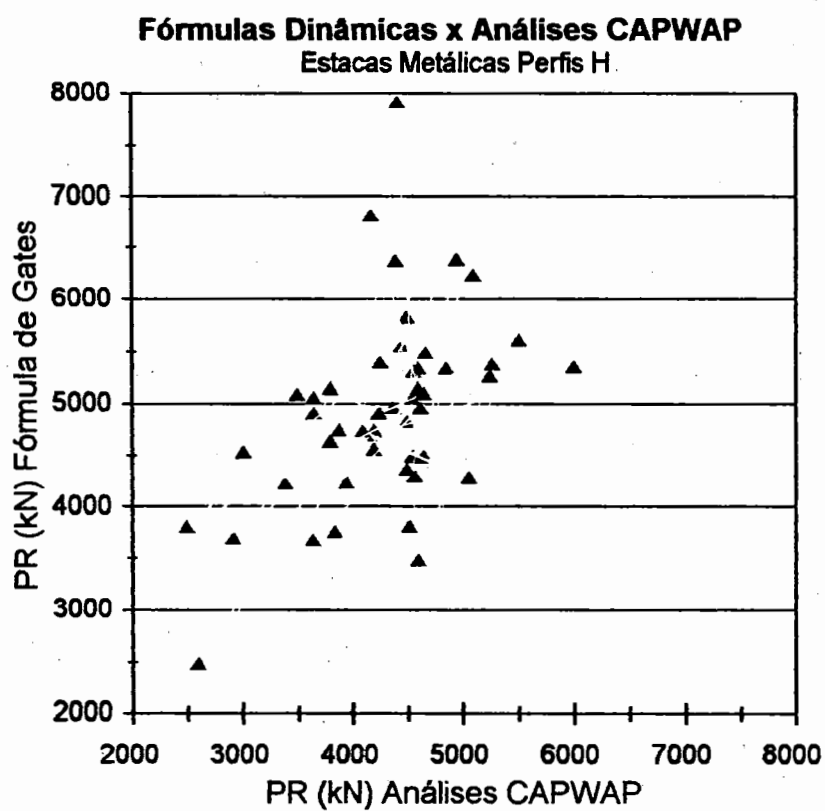


FIGURA 23: Correlação CAPWAP x Fórmula de GATES - Valores obtidos por JIMENEZ (1991)

A seguir teceremos algumas considerações sobre a técnica relativamente recente de se controlar a cravação de estacas, a partir de medidas de campo denominadas de repiques elásticos. Nesse sentido, apresentamos um breve histórico dos fundamentos em que se apóia essa técnica

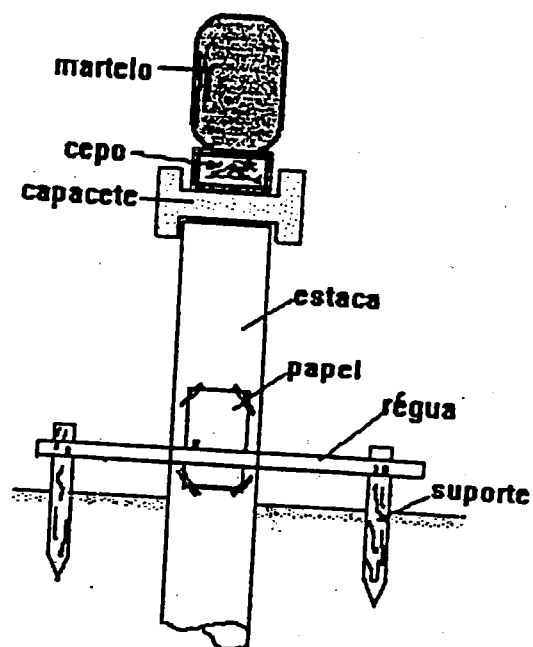
CHELLIS, (1951) relatou a possibilidade de se registrar a função deslocamento do topo da estaca ao longo do tempo, durante a sua cravação. A partir de medidas do deslocamento máximo, pode-se obter separadamente o valor da penetração permanente da estaca no terreno (nega,  $s$ ) e a soma das parcelas de compressão elástica da estaca ( $c_2$ ) e do solo ( $c_3$ ). Essa soma das compressões elásticas foi designada por repique elástico  $K = c_2 + c_3$ .

Esse deslocamento máximo, designado por DMX, pode ser obtido no campo, no final da cravação, empregando-se o procedimento ilustrado na figura 24, e consiste no seguinte: Uma folha de papel é fixada próxima ao topo da estaca. Uma régua horizontal apoiada em suportes verticais é colocada de frente à folha de papel. Durante a aplicação dos golpes do martelo, move-se lentamente e de forma contínua, um lápis comprimindo sobre o papel ao longo do topo da régua. A figura 25 ilustra um registro típico de repiques elásticos através desse procedimento de controle, para uma série de golpes.

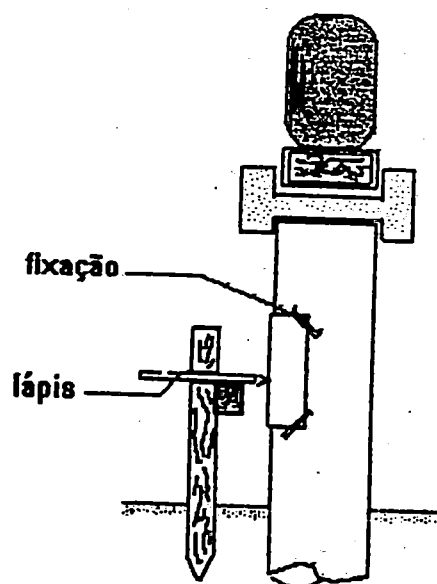
O registro do deslocamento do topo da estaca para cada golpe tem a configuração ilustrada na figura 26, de onde se obtém, separadamente as parcelas da nega e do repique elástico. O deslocamento da ponta da estaca para o mesmo golpe, se fosse registrado, seria como indicado na figura 27, ou seja, apenas a parcela de compressão elástica do solo  $c_3$  e a nega "s", seriam registrados. Assim poder-se-ia obter com os dois registros a parcela  $c_2$ .

Esta parcela  $C_2$ , segundo Chellis, relaciona-se diretamente com a resistência oferecida pelo solo à cravação da estaca  $R_u$ , através da seguinte expressão:

$$c_2 = R_u l / A E \quad (1)$$



(a) vista frontal



(b) vista lateral

FIGURA 24: - Esquema do procedimento para medidas de repiques elásticos.

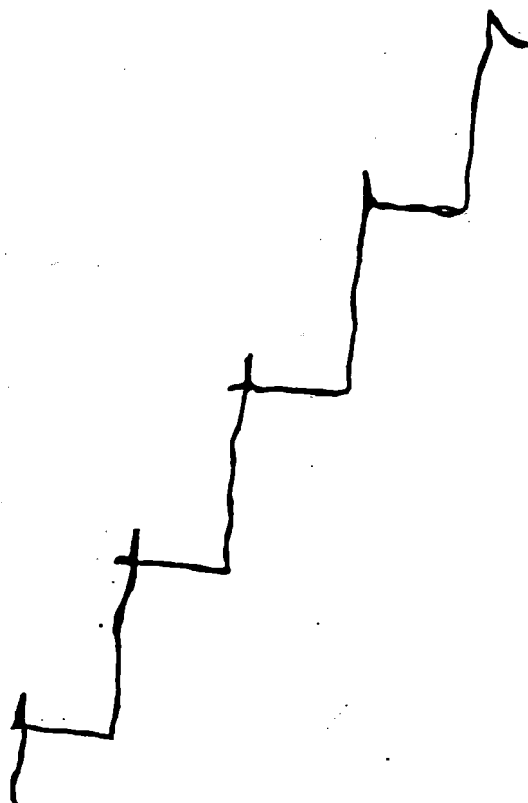


FIGURA 25: - Ilustração dos sinais registrados para uma série de golpes.

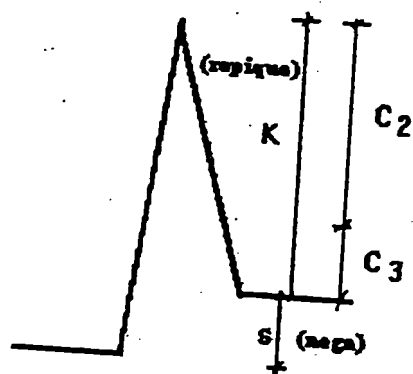


FIGURA 26: - Deslocamento do topo da estaca

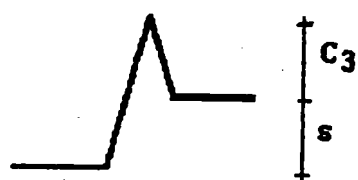


FIGURA 27: - Deslocamento da ponta da estaca.



A partir dessas considerações, é que foi proposta por YOKOYAMA & KUSAKABE (1985) uma forma de avaliação da capacidade de carga última de uma estaca, através de medidas de repique elástico, conforme descrito acima. Esse procedimento vem sendo cada vez mais rotineiro em diversos países, como por exemplo relata o interessante trabalho de UTO et al. (1985).

BROMS & CHOO (1988) relatam também o emprego dessa técnica, como controle de muitas obras de estaqueamento em Singapura.

No Brasil, também vem sendo bastante empregadas medidas de repique elástico para controle de cravação de estacas, conforme trabalhos pioneiros de AOKI (1986) e VELLOSO (1987).

O procedimento manual de medida de repique é bastante rudimentar e não permite a obtenção do desenvolvimento do sinal ao longo do tempo. NAKAO(1983) e SAKIMOTO et.al. (1985) empregaram meios óticos para registro da curva deslocamento-tempo. ZEITLEN (1988), TRINDADE (1989) e AOKI et.al.(1990), comentam métodos mecânicos simples de medidas de DMX e da nega. Estes últimos apresentam um equipamento denominado Registrador Dinâmico de Deslocamentos - RDD , que permitem obter a função deslocamento ao longo do tempo.

Nesse equipamento, uma ponta metálica é pressionada contra um carbono. Quando o pilão é levantado, o motor do RDD é acionado e aguarda-se sua estabilização de giro. Com o cilindro girando, deixa-se cair o pilão, obtendo-se assim o registro de deslocamentos da estaca em função do tempo. O esquema básico deste equipamento está ilustrado na figura 28.

DIONISIO et.al (1992) apresentaram na Feira da Dinâmica em Construção Civil um equipamento denominado Repicômetro Eletrônico, desenvolvido pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo) . O funcionamento do aparelho é descrito resumidamente pelos autores conforme transcrito no parágrafo seguinte..

“Esse sistema registra e processa os sinais provenientes de um sensor, os quais descrevem o deslocamento de uma seção instrumentada da estaca ao longo do tempo, devido ao golpe do martelo de cravação. É constituído de um software que controla a aquisição de dados e realiza a análise, e de um aparato de medição composto por um sensor de deslocamento, um dispositivo mecânico e uma placa (circuito eletrônico) de interface com um microcomputador”. A figura 29, ilustra o esquema do repicômetro eletrônico

O controle da cravação de estacas via medidas de repiques elásticos, em geral, é associado às formulações dinâmicas baseadas na Teoria de Impacto Newtoniano. A expressão de Hiley, conforme descrita por Chellis, é a de emprego mais usual, para esse fim.

BROMS et.al.(1988) propôs uma simplificação no emprego dessa formulação, ao estabelecer a consideração de que a energia líquida que chega ao sistema pode ser expressa por:

$$EMX = \int_0^{t_a} F(t) v(t) dt \quad (2)$$

onde  $t_a$  refere-se ao tempo decorrido até que a velocidade da partícula se anule, e conseqüentemente, o valor do deslocamento do topo da estaca  $DMX$ , torna-se máximo.

Pelo princípio da conservação de energia, e com a consideração simplificada de que não ocorrerão perdas de energia para deformar o solo adjacente ao fuste da estaca, chega-se à seguinte relação entre a energia aplicada  $EMX$  e a carga resistente estática, mobilizada pelo solo para o golpe em questão  $RMX$ :

$$EMX = RMX (s + 1/2 K) \quad (3)$$

Lembrando que o deslocamento máximo do topo da estaca  $DMX = K + s$ , combinando com a expressão (3) acima, resulta:

$$EMX = 1/2 RMX (DMX + s)$$

(4)

Dessa maneira, observa-se que a energia EMX deve ser menor do que a energia líquida aplicada ao sistema, obtida da monitoração.

Conforme pode-se observar, da expressão (1), é possível obter-se uma avaliação da capacidade de carga mobilizada  $R_u$  do solo, se o valor de  $c_2$  for conhecido.

Através do repique obtém-se o deslocamento máximo DMX e a nega  $s$ , e conseqüentemente o valor do repique K.

É usual assumir-se que  $c_3$  seja da ordem da nega  $s$ , para valores de negas inferiores a 3,0 mm. A formulação de UTO et.al. (1985), recomendada pela "Specification For Bridge Substructure Design", é válida para valores de  $c_3$  da ordem da nega, e é decorrente da teoria da equação da onda.

VELLOSO (1987), propõe empregar  $c_3 = 2,5$  mm, e também introduz um fator  $f$ , que depende dos mecanismos de transferência de carga. O autor propõe os seguintes valores para esse fator:

$$f = 1 \quad \text{para estacas trabalhando apenas por ponta}$$

$$f = 0,5 \quad \text{para estacas trabalhando apenas por atrito lateral}$$

Casos correntes de estacas trabalhando por ponta e por atrito lateral é usual adotar-se  $f = 0,75$ .

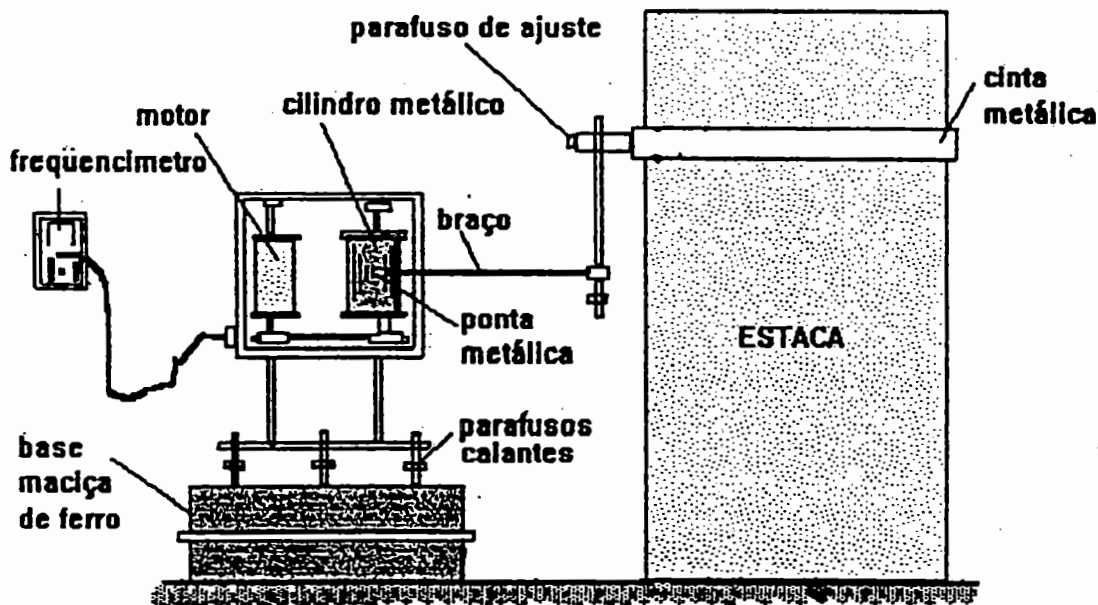


FIGURA 28: Secção esquemática do Registrador Dinâmico de Deslocamentos - RDD.

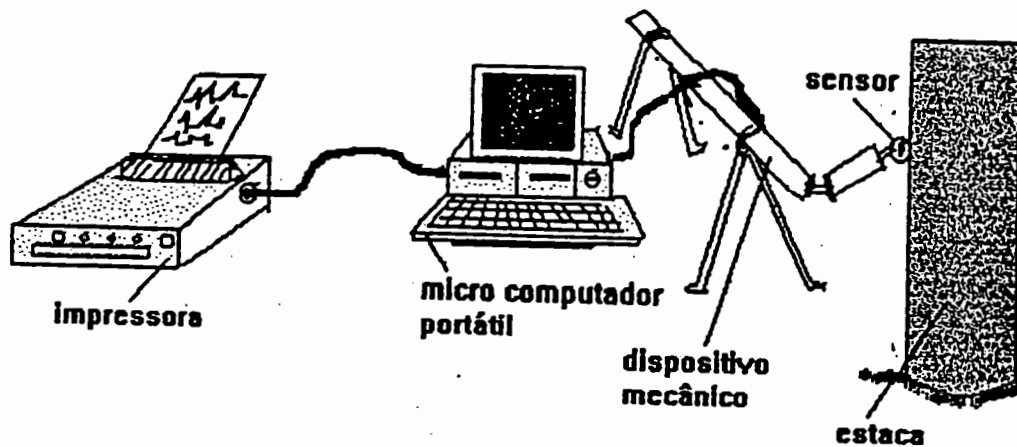


FIGURA 29: - Ilustração do esquema de aquisição de sinais, empregando o Repechômetro Eletrônico desenvolvido pelo IPT.

#### 4. CAPWAP x FÓRMULAS DINÂMICAS

Neste capítulo, apresenta-se estudo comparativo entre resultados de capacidades de carga mobilizadas, obtidos a partir da instrumentação da recravação de trinta e uma estacas de concreto armado, executadas em diversas cidades do Estado de São Paulo, empregando-se o Analisador de Cravação de Estacas PDA (Pile Driving Analyser), com posteriores análises CAPWAP, no escritório. Estes resultados foram comparados com resultados de previsão da capacidade de carga dessas estacas obtidos empregando fórmulas dinâmicas baseadas na energia de cravação, amplamente conhecidas.

Todas as estacas foram fabricadas pela Protendit, e as monitorações, seguidas das análises CAPWAP foram realizadas pela PDI Prova Dinâmica e Instrumentação. Acompanhou-se grande parte desses ensaios de "Provas de Carga Dinâmicas".

As características das estacas bem como os dados referentes à recravação para o golpe do martelo, considerado na análise CAPWAP, estão apresentados na tabela 8.

As fórmulas dinâmicas empregadas neste estudo estão mostradas na figura 30, deste trabalho.

A tabela 9 resume os resultados de capacidade de carga obtidos pelas análises CAPWAP, e os avaliados pelas formulações dinâmicas mencionadas, para todas as estacas.

Finalmente, a figura 31 apresenta gráficos comparativos entre os valores encontrados nas avaliações de capacidades de carga mencionadas.

TABELA 8: Características das Estacas e Dados Referentes à Cravação:

est. Nº	CARACTERÍSTICAS DAS ESTACAS						DADOS DA CRAVAÇÃO			
	forma seção	dim (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	L (m)	E (kN/m <sup>2</sup> )	Wp (kN)	Wh (kN)	h (cm)	s (mm)	efic. n
1	Quadr.	17.0	289.00	10.70	34.2	7.58	16.6	110	7.0	0.64
2	Quadr.	17.0	289.00	11.30	34.2	8.00	16.6	80	1.0	0.59
3	Quadr.	17.0	289.00	11.00	34,2	7.79	23.0	100	3.0	0.22
4	Quadr.	21.5	462.25	14.00	36.2	15.86	24.0	100	2.5	0.34
5	Quadr.	17.0	289.00	9.00	36.1	6.37	15.0	50	1.3	0.32
6	Quadr.	17.0	289.00	4.50	36.1	3.19	15.0	50	2.0	0.36
7	Octog.	42.0	908.00	10.00	29.5	22.47	29.0	160	0.8	0.30
8	Octog.	42.0	908.00	9.90	29.5	22.02	29.0	200	0.5	0.35
9	Quadr.	21.5	462.25	11.60	36.1	13.14	23.5	120	2.0	0.36
10	Quadr.	17.0	289.00	6.30	36.1	4.46	20.6	30	0.4	0.28
11	Quadr.	17.0	289.00	6.56	36.1	4.65	20.6	80	0.9	0.50
12	Quadr.	17.0	289.00	6.58	36.1	4.66	15.0	70	0.7	0.35
13	Quadr.	23.5	552.25	3.90	36.1	5.28	20.6	80	2.2	0.33
14	Quadr.	17.0	289.00	7.20	36.1	5.10	16.0	40	0.2	0.50
15	Quadr.	23.5	552.25	5.60	36.1	7.58	16.0	60	1.1	0.48
16	Quadr.	26.5	702.25	7.30	36.1	12.56	16.0	80	0.5	0.27
17	Quadr.	23.5	552.25	5.45	36.1	7.37	16.0	60	1.2	0.50
18	Quadr.	17.0	289.00	28.40	36.1	20.11	13.5	80	0.7	0.30
19	Quadr.	17.0	289.00	30.80	36.1	21.81	13.5	100	0.6	0.32
20	Octog.	21.5	462.25	28.90	36.1	32.73	13.5	180	1.1	0.36
21	Quadr.	42.0	908.00	14.80	29.5	32.92	23.0	140	1.3	0.30
22	Quadr.	23.5	552.25	30.50	36.1	41.67	15.0	120	0.9	0.28
23	Quadr.	17.0	289.00	6.20	34.2	4.39	15.0	50	1.1	0.35
24	Octog.	17.0	289.00	8.00	34.2	5.66	15.0	60	1.4	0.34
25	Quadr.	36.0	788.00	21.20	29.5	40.93	23.5	70	1.6	0.30
25	Octog.	23.5	552.25	11.40	34.2	15.42	16.0	100	1.3	0.31
27	Octog.	42.0	908.00	9.80	33.0	21.80	29.0	160	0.7	0.33
28	Quadr.	21.5	462.25	9.80	34.2	24.35	24.0	90	1.5	0.35
29	Octog.	36.0	788.00	31.60	26.1	61.01	42.0	80	2.0	0.56
30	Quadr.	26.5	702.25	33.00	34.2	56.78	42.0	70	4.0	0.42
31	Octog.	36.0	462.25	23.00	29.5	26.05	23.0	200	0.8	0.32

<b>FÓRMULA DE BRIX</b>	$PR = (W_p * W_h^2 * h) / [(W_h + W_p)^2 * s]$
<b>FÓRMULA DE WOLTMANN</b>	$PR = (W_h^2 * h) / [(W_p + W_h) * s]$
<b>FÓRMULA DO ENGINEERING NEWS</b>	$PR = (W_h * h) / (s + c)$ <p>com: <math>c = 2,5</math> cm para martelos de queda livre</p>
<b>FÓRMULA DINAMARQUESA</b>	$PR = (n * h * W_h) / [s + (e_o / 2)]$ <p>com: <math>e_o = [(2 * n * h * W_h * L) / (S * E)]^{0,5}</math></p>

FIGURA 30: Fórmulas dinâmicas empregadas neste estudo de correlação

Onde:

PR = capacidade de carga obtida empregando fórmula dinâmica;

$W_p$  = peso da estaca;

$W_h$  = peso do martelo;

$h$  = altura de queda do martelo;

$s$  = “nega” - penetração permanente para um golpe;

$n$  = eficiência do sistema de cravação;

$L$  = comprimento enterrado da estaca;

$S$  = área da seção transversal da estaca;

$E$  = módulo de elasticidade do material da estaca.

TABELA 9: Valores de Capacidade de Carga - CAPWAP x Fórmulas Dinâmicas.

estaca No.	PR (kN) CAPWAP	PR (kN) BRIX	PR (kN) WOLTMANN	PR (kN) eng.NEWS	PR (kN) Dinamarquesa
1	760	560	1790	570	780
2	940	2910	8960	700	1020
3	610	1450	5730	1610	610
4	770	2300	5780	1480	980
5	520	1210	4050	1380	530
6	570	540	3090	1730	610
7	860	14270	32680	4150	2360
8	1520	28460	65930	3740	3060
9	640	3240	9040	1750	1280
10	400	2260	12700	2480	640
11	820	2750	14940	1460	1380
12	780	2710	11450	1970	900
13	920	1220	5960	3810	1210
14	740	5860	24270	1390	910
15	670	1900	5920	2600	1260
16	880	6310	14340	5140	1260
17	780	1730	5480	2510	1280
18	980	3710	6200	590	440
19	1100	5310	8600	520	500
20	1950	4570	6450	770	890
21	1810	4100	6970	2560	1370
22	1100	3910	5330	1100	710
23	690	1190	5270	1710	660
24	480	1280	4670	1420	620
25	1540	2380	3750	1550	780
26	1510	3080	6270	2200	960
27	1500	16240	37840	4330	2680
28	1070	3600	7150	1990	1190
29	1570	4060	6850	560	1340
30	1340	1800	3130	760	930
31	2200	14320	26960	910	1230



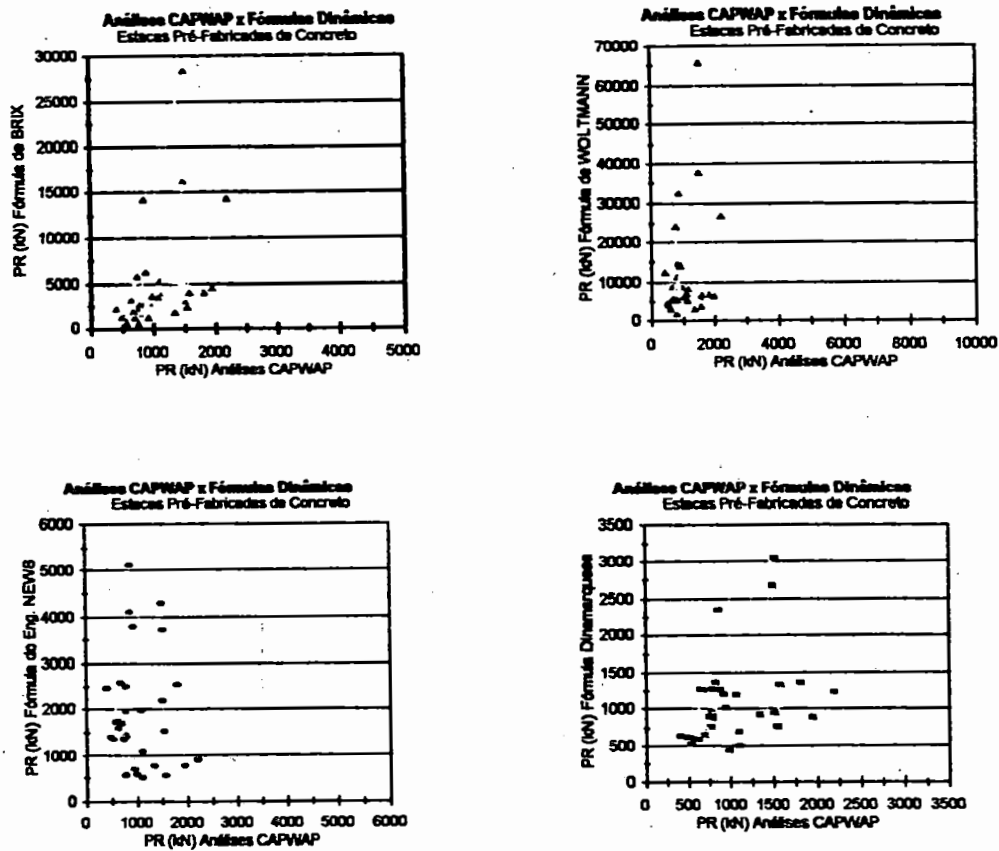


FIGURA 31: Gráficos Comparativos - Análises CAPWAP x Fórmulas Dinâmicas

Os resultados obtidos, apresentados na tabela 9 e representados nos gráficos da figura 31, mostram que quando a penetração da estaca no terreno (nega), para o golpe analisado, for muito pequena (menor do que 1,0 mm), os valores de PR obtidos pelas formulações dinâmicas ficam extremamente exagerados, principalmente no caso das fórmulas propostas por BRIX e por WOLTMANN. Essas expressões embutem o conceito errôneo de que quanto menor a penetração da estaca, maior a resistência do solo, independente da energia aplicada.

**Comentários:**

Os gráficos comparativos ilustrados na figura 31 mostram que não foram obtidas correlações satisfatórias entre os resultados de capacidade de carga obtidos pelas fórmulas dinâmicas, e aqueles obtidos pelas análises CAPWAP, efetuadas com as estacas instrumentadas.

É importante ressaltar que os valores de capacidades de carga, encontrados pelas análises CAPWAP, referem-se às cargas mobilizadas pelo golpe do martelo que despertou maior resistência total do solo ( lateral + ponta ), para a estaca em questão. Não significa, todavia, que esta carga obtida represente a capacidade de carga real que o solo oferece ao carregamento estático da estaca. Trata-se como mencionado, de carga resistente estática do solo, *mobilizada*, para o nível de energia que foi transferido da estaca para o solo decorrente do golpe do martelo considerado. Muitas vezes, negas muito pequenas são verificadas, mas isso não significa que foi mobilizada toda a resistência do solo. É fácil perceber isso, pois a penetração da estaca no solo está intimamente ligada também ao nível de energia transferida pela cravação.

Considerando que as formulações dinâmicas baseadas no choque elástico, não representam o fenômeno da cravação de estacas satisfatoriamente, e o fato de diversos pesquisadores já terem comentado enormes dispersões nos resultados obtidos pela quase totalidade das inúmeras fórmulas dinâmicas que foram ao longo do tempo propostas, pode-se inferir que as mesmas não devam ser empregadas como método de previsão de capacidade de carga de estaca, na fase de projeto, mesmo porque já se dispõe de procedimentos simples, mais confiáveis, para tal, por exemplo, como o emprego de algum dos métodos empíricos de correlação com valores de medidas de índices de resistência à penetração de amostradores-padrão (SPT) obtidos das sondagens a percussão. Embora também correlacionando energia dinâmica com resistência estática, esses métodos tem se mostrado bastante satisfatórios, ainda que alguns estudos tem mostrado, que esses métodos são, muitas vezes, conservativos.

## 5. CORRELAÇÕES CAPWAP x MÉTODOS -EMPÍRICOS

### 5.1. Introdução:

Neste capítulo apresenta-se resultados comparativos de previsões de capacidade de carga de estacas obtidas por análises CAPWAP, e através do emprego de métodos empíricos de correlações com resultados de índices de resistência à penetração (SPT), obtidos de sondagens a percussão realizadas próximas aos locais de implantação das referidas estacas.

Compara-se também separadamente os resultados obtidos para as parcelas referentes às resistências oferecidas pelo terreno por atrito lateral ao longo do fuste, e na ponta da estaca, empregando-se análises CAPWAP, com os resultados obtidos para essas parcelas, avaliados pelos métodos semi-empíricos.

Neste estudo, foram avaliados resultados de 47 estacas de concreto armado ou protendido, monitoradas no final da cravação, ou em recravação posterior, implantadas em diferentes localidades do Estado de São Paulo, sendo 14 delas fabricadas pela PROTENDIT, e as demais 33 estacas, fabricadas e implantadas pela BENATON. A Tabela 10 apresenta as características técnicas dessas estacas.

Os métodos semi-empíricos de correlações com valores de SPT empregados, foram os designados de Método de Aoki-Veloso, e Método de Décourt-Quaresma, os quais são bastante conhecidos e difundidos na rotina prática de projetos no Brasil, para previsão do comprimento enterrado necessário, e da carga admissível de estacas.

Os resultados comparativos, obtidos neste estudo, estão apresentados nas TABELAS de n<sup>os</sup>. 11 a 17, com os valores de capacidades de carga e das parcelas resistentes por atrito lateral e por ponta, com as estacas divididas em 7 lotes, conforme suas características.

TABELA 10: Características técnicas das estacas monitoradas

qtde. de estacas	fabricante	forma da seção	dimensão da seção (cm)	carga adm. estrut. (kN)	perímetro (cm)	seção de concreto (cm <sup>2</sup> )	seção cheia (cm <sup>2</sup> )	peso nominal (kg/m)
3	PRO TEN DIT	quadr.	17	350	68	289	289	73
2		quadr.	21.5	550	86	462	462	116
2		quadr.	23.5	750	94	552	552	138
3		octog.	$\Phi_{eq} = 36$	1250	116	788	1015	197
4		octog.	$\Phi_{eq} = 42$	1450	132	908	1324	227
6	BENA TON	octog.	17	250	53.5	227	227	54
6		circular	20	350	62.83	314.16	314.16	72
7		circular	23	450	72.26	415.47	415.47	82
8		circular	26	550	81.68	530.93	530.93	119
2		circular	28	650	87.96	615.75	615.75	160
3		circular	33	750	103.7	855.30	855.30	210
1		circular	38	950	119.4	1134.1	1134.1	270

## 5.2. Tabelas com os resultados obtidos CAPWAP x Métodos Empíricos:

TABELA 11: Estacas de concreto, seção quadrada de lados 17 cm, 21.5 cm e 23.5 cm.

est. n°	lado (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki Veloso PR(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PR(kN) (%)	Análise CAPWAP PR (kN)
01	17	6,30	354 (43)	449 (55)	820
02	17	6,20	348 (50)	336 (49)	690
03	17	8,00	432 (90)	384 (80)	480
04	21,5	11,00	290 (45)	383 (60)	640
05	21,5	9,80	509 (48)	431 (40)	1070
06	23,5	11,40	705 (47)	627 (42)	1510
07	23,5	30,50	1052 (96)	1280 (116)	1100

est	lado (cm)	$l_{ent}$ (m)	método Aoki-Veloso PL (kN) (%)	método Décourt-Quaresma PL (kN) (%)	Análise CAPWAP PL (kN)
01	17	6,30	169 (67)	195 (77)	254
02	17	6,20	125 (36)	175 (50)	350
03	17	8,00	323 (71)	261 (57)	457
04	21,5	11,00	211 (39)	272 (50)	540
05	21,5	9,80	234 (57)	215 (52)	413
06	23,5	11,40	545 (49)	464 (41)	1120
07	23,5	30,50	515 (101)	780 (154)	505

est	lado (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki-Veloso PP (kN)..... (%)	Método Décourt-Quaresma PP (kN) (%)	Análise CAPWAP PP (kN)
01	17,0	6,30	185 (33)	254 (45)	566
02	17,0	6,20	223 (66)	161 (47)	340
03	17,0	8,00	109 (473)	123 (535)	23
04	21,5	11,00	79 (79)	111 (111)	100
05	21,5	9,80	275 (42)	216 (33)	657
06	23,5	11,40	160 (41)	163 (42)	390
07	23,5	30,50	536 (90)	420 (71)	595

Obs: os valores entre parênteses indicam a porcentagem que o valor da célula representa em relação ao CAPWAP

TABELA 12: Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto armado seções octogonais com diâmetros equivalentes de 36 cm e de 42 cm.

est.	$\Phi_{eq}$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki Veloso PR(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PR(kN) (%)	Análise CAPWAP PR(kN)
01	36	21,20	655 (43)	851 (55)	1540
02	36	31,60	574 (37)	1250 (80)	1570
03	36	23,00	960 (44)	1372 (62)	2200
04	42	10,00	840 (98)	1180 (137)	860
05	42	14,80	1209 (67)	1203 (66)	1810
06	42	10,80	845 (56)	843 (56)	1500
07	42	13,10	729 (59)	958 (78)	1230

est	$\Phi_{eq}$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	método Aoki-Veloso PL(kN) (%)	método Décourt-Quaresma PL(kN) (%)	Análise CAPWAP PL(kN)
01	36	21,20	507 (60)	769 (90)	850
02	36	31,60	252 (23)	1027 (94)	1095
03	36	23,00	624 (33)	1202 (64)	1890
04	42	10,00	383 (153)	502 (200)	250
05	42	14,80	327 (47)	585 (84)	700
06	42	10,80	534 (167)	603 (188)	320
07	42	13,10	488 (98)	607 (121)	500

est	$\Phi_{eq}$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki-Veloso PP(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PP(kN) (%)	Análise CAPWAP PP(kN)
01	36	21,20	149 (22)	82 (12)	690
02	36	31,60	252 (53)	223 (47)	475
03	36	23,00	282 (91)	170 (55)	310
04	42	10,00	457 (75)	678 (111)	610
05	42	14,80	882 (80)	618 (56)	1100
06	42	10,80	311 (26)	240 (20)	1180
07	42	13,10	241 (33)	351 (48)	730

Obs: os valores entre parênteses indicam a porcentagem que o valor na célula representa em relação ao CAPWAP.

**TABELA 13: Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto armado seção circular diâmetro de 17 cm**

est.	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki Veloso PR(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PR(kN) (%)	Análise CAPWAP PR(kN)
01	17,00	9,40	346 (83)	352 (84)	417
02	17,0	8,45	237 (40)	285 (48)	593
03	17,0	9,50	285 (47)	285 (47)	604
04	17,0	8,50	438 (159)	394 (143)	275
05	17,0	11,10	182 (26)	244 (35)	690
06	17,0	14,15	314 (51)	344 (55)	620

est	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	método Aoki-Veloso PL(kN) (%)	método Décourt-Quaresma PL(kN) (%)	Análise CAPWAP PL(kN)
01	17,0	9,40	167 (69)	172 (71)	241
02	17,0	8,45	142 (48)	201 (68)	295
03	17,0	9,50	199 (77)	219 (84)	257
04	17,0	8,50	183 (96)	154 (80)	195
05	17,0	11,10	120 (44)	162 (60)	271
06	17,0	14,15	150 (68)	205 (93)	220

est	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki-Veloso PP(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PP(kN) (%)	Análise CAPWAP PP(kN)
01	17,0	9,40	179 (102)	180 (102)	176
02	17,0	8,45	95 (32)	84 (28)	298
03	17,0	9,50	86 (25)	66 (19)	347
04	17,0	8,50	254 (317)	240 (300)	80
05	17,0	11,10	62 (15)	82 (20)	419
06	17,0	14,15	163 (41)	139 (35)	400

Obs: Os valores entre parênteses representam as porcentagens do respectivo valor em relação ao obtido pelo CAPWAP

**TABELA 14: Análises CAPWAP x Métodos Empíricos. - Estacas de concreto armado seção circular diâmetro de 20 cm**

est.	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki-Veloso PR(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PR(kN) (%)	Análise CAPWAP PR(kN)
01	20,0	14,00	604 (70)	519 (60)	860
02	20,0	9,10	258 (26)	245 (25)	990
03	20,0	8,80	337 (54)	371 (60)	619
04	20,0	7,70	343 (51)	293 (44)	670
05	20,0	14,05	403 (56)	434 (60)	719
06	20,0	8,90	392 (40)	385 (40)	982

est	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	método Aoki-Veloso PL(kN) (%)	método Décourt-Quaresma PL(kN) (%)	Análise CAPWAP PL(kN)
01	20,0	14,00	397 (56)	396 (56)	710
02	20,0	9,10	141 (22)	195 (30)	640
03	20,0	8,80	179 (86)	237 (114)	208
04	20,0	7,70	195 (63)	195 (63)	308
05	20,0	14,05	177 (72)	241 (98)	245
06	20,0	8,90	250 (49)	293 (57)	522

est	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki-Veloso PP(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PP(kN) (%)	Análise CAPWAP PP(kN)
01	20,0	14,00	207 (138)	127 (85)	150
02	20,0	9,10	117 (33)	50 (14)	350
03	20,0	8,80	158 (38)	134 (33)	411
04	20,0	7,70	148 (41)	98 (27)	362
05	20,0	14,05	226 (48)	193 (41)	473
06	20,0	8,90	142 (31)	92 (20)	460

Obs: Os valores entre parênteses representam as porcentagens do respectivo valor em relação ao obtido pelo CAPWAP.



TABELA 15: Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto armado seção circular diâmetro de 23 cm.

est.	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki Veloso PR(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PR(kN) (%)	Análise CAPWAP PR(kN)
01	23,0	10,30	591 (76)	636 (89)	781
02	23,0	14,00	731 (69)	618 (58)	1065
03	23,0	8,50	419 (49)	449 (53)	853
04	23,0	8,50	525 (78)	424 (63)	676
05	23,0	24,30	1104 (76)	1028 (71)	1445
06	23,0	9,20	475 (50)	459 (48)	949
07	23,0	9,60	950 (94)	645 (64)	1000

est	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	método Aoki-Veloso PL(kN) (%)	método Décourt-Quaresma PL(kN) (%)	Análise CAPWAP PL(kN)
01	23,0	10,30	306 (168)	287 (158)	182
02	23,0	14,00	457 (47)	455 (47)	963
03	23,0	8,50	205 (65)	273 (87)	314
04	23,0	8,50	282 (108)	267 (103)	259
05	23,0	24,30	534 (47)	518 (45)	1146
06	23,0	9,20	287 (54)	337 (63)	534
07	23,0	9,60	298 (122)	258 (106)	244

est	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki-Veloso PP(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PP(kN) (%)	Análise CAPWAP PP(kN)
01	23,0	10,30	285 (43)	349 (59)	595
02	23,0	14,00	274 (268)	163 (160)	102
03	23,0	8,50	209 (39)	176 (33)	539
04	23,0	8,50	243 (58)	157 (38)	417
05	23,0	24,30	570 (190)	510 (171)	299
06	23,0	9,20	188 (45)	122 (29)	415
07	23,0	9,60	653 (85)	388 (51)	766

Obs: Os valores entre parênteses representam as porcentagens do respectivo valor em relação ao obtido pelo CAPWAP

TABELA 16: CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas seção circular diâmetro 26 cm.

est.	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki Veloso PR(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PR(kN) (%)	Análise CAPWAP PR(kN)
01	26,0	9,60	710 (84)*	770 (91)	846
02	26,0	9,05	807 (60)	724 (54)	1350
03	26,0	13,10	545 (50)	644 (59)	1088
04	26,0	14,70	1220 (66)	988 (54)	1843
05	26,0	9,80	281 (21)	373 (28)	1322
06	26,0	24,30	1332 (96)	1237 (89)	1390
07	26,0	8,90	449 (35)	525 (41)	1289
08	26,0	30,8	2408 (200)	1951 (162)	1203

est	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	método Aoki-Veloso PL(kN) (%)	método Décourt-Quaresma PL(kN) (%)	Análise CAPWAP PL(kN)
01	26,0	9,60	346 (74)	446 (96)	466
02	26,0	9,05	322 (37)	355 (40)	877
03	26,0	13,10	313 (41)	392 (52)	758
04	26,0	14,70	695 (49)	653 (49)	1341
05	26,0	9,80	217 (26)	286 (34)	843
06	26,0	24,30	604 (59)	585 (57)	1030
07	26,0	8,90	248 (50)	242 (48)	500
08	26,0	30,8	1195 (227)	917 (175)	525

est	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki-Veloso PP(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PP(kN) (%)	Análise CAPWAP PP(kN)
01	26,0	9,60	364 (96)	324 (85)	380
02	26,0	9,05	485 (100)	369 (78)	473
03	26,0	13,10	232 (70)	252 (76)	330
04	26,0	14,70	565 (112)	335 (67)	502
05	26,0	9,80	64 (13)	87 (18)	479
06	26,0	24,30	728 (202)	652 (181)	360
07	26,0	8,90	200 (25)	283 (36)	789
08	26,0	30,8	1214 (179)	1034 (153)	678

Obs: Os valores entre parênteses representam as porcentagens do respectivo valor em relação ao CAPWAP

**TABELA 17: Análises CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas de concreto armado seções circulares diâmetros de 28 cm., 33 cm, e 38 cm.**

est.	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki Veloso PR(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PR(kN) (%)	Análise CAPWAP PR(kN)
01	28,0	8,10	564 (48)	465 (40)	1177
02	28,0	14,10	797 (48)	907 (54)	1675
03	33,0	11,30	734 (48)	685 (42)	1617
04	33,0	10,70	1169 (67)	1108 (63)	1753
05	33,0	20,55	1079 (53)	1321 (65)	2040
06	38,0	9,34	791 (51)	959 (62)	1555

est	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	método Aoki-Veloso PL(kN) (%)	método Décourt-Quaresma PL(kN) (%)	Análise CAPWAP PL(kN)
01	28,0	8,10	274 (43)	273 (42)	643
02	28,0	14,10	332 (30)	431 (39)	1107
03	33,0	11,30	316 (59)	380 (71)	537
04	33,0	10,70	444 (78)	516 (91)	566
05	33,0	20,55	649 (74)	864 (99)	877
06	38,0	9,34	364 (41)	354 (40)	890

est	$\Phi$ (cm)	$l_{ent}$ (m)	Método Aoki-Veloso PP(kN) (%)	Método Décourt-Quaresma PP(kN) (%)	Análise CAPWAP PP(kN)
01	28,0	8,10	290 (54)	192 (36)	534
02	28,0	14,10	465 (82)	476 (84)	568
03	33,0	11,30	468 (43)	305 (28)	1080
04	33,0	10,70	725 (61)	592 (50)	1187
05	33,0	20,55	43 (37)	456 (39)	1163
06	38,0	9,34	428 (64)	605 (91)	665

Obs: Os valores entre parênteses representam as porcentagens do respectivo valor em relação ao obtido pelo CAPWAP

As figuras 32, 33 e 34, a seguir, apresentam gráficos comparativos dos resultados obtidos pelas análises CAPWAP e pelos Métodos Empíricos, para as 47 estacas instrumentadas.

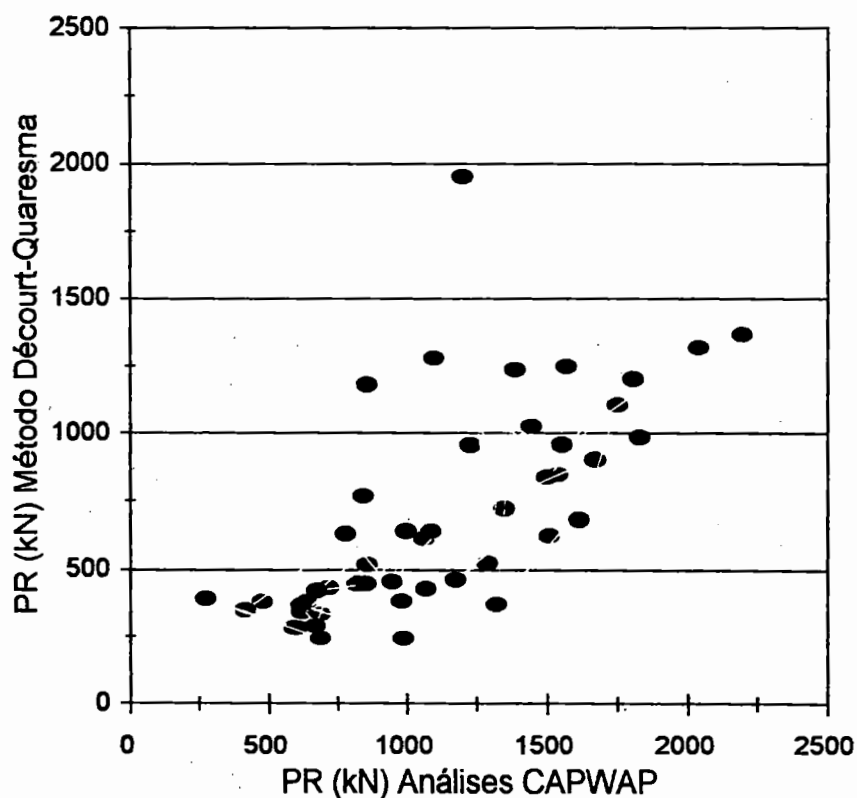
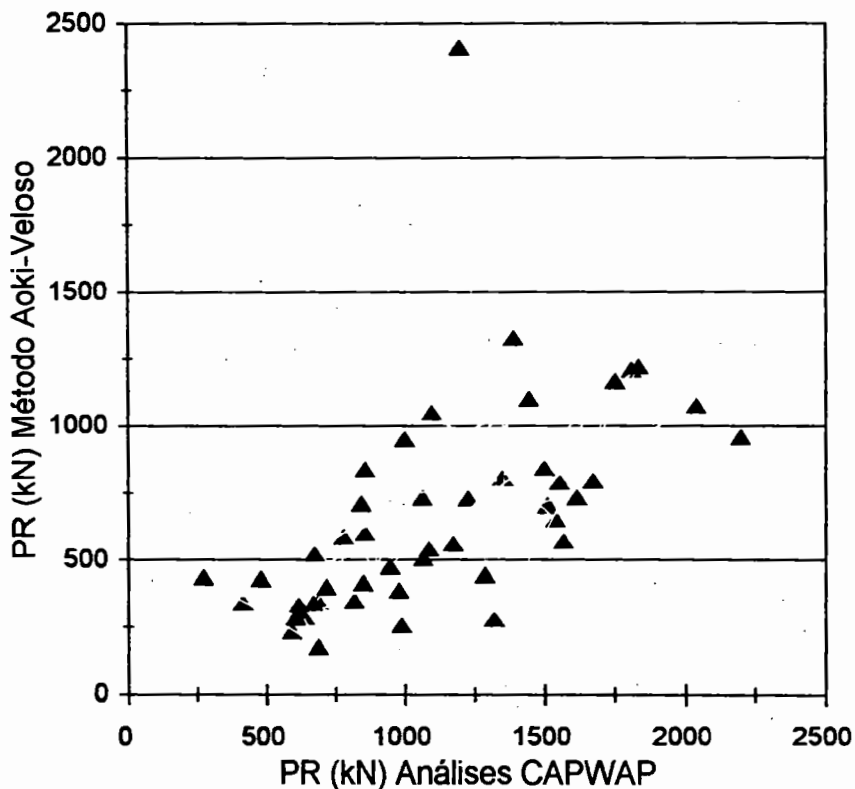


FIGURA 32: PR (CAPWAP) x PR (Métodos Empíricos).

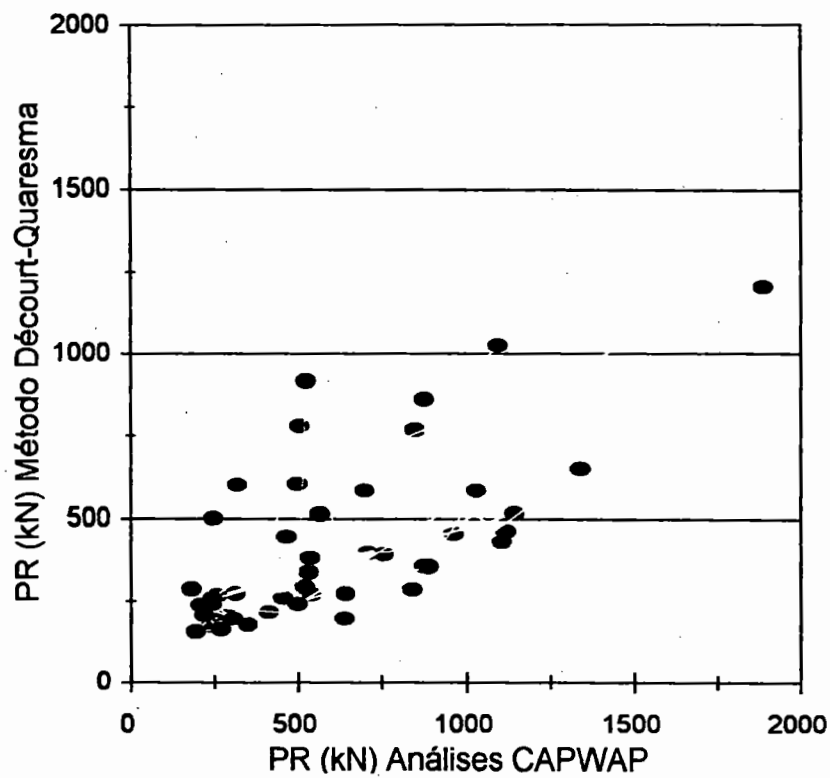
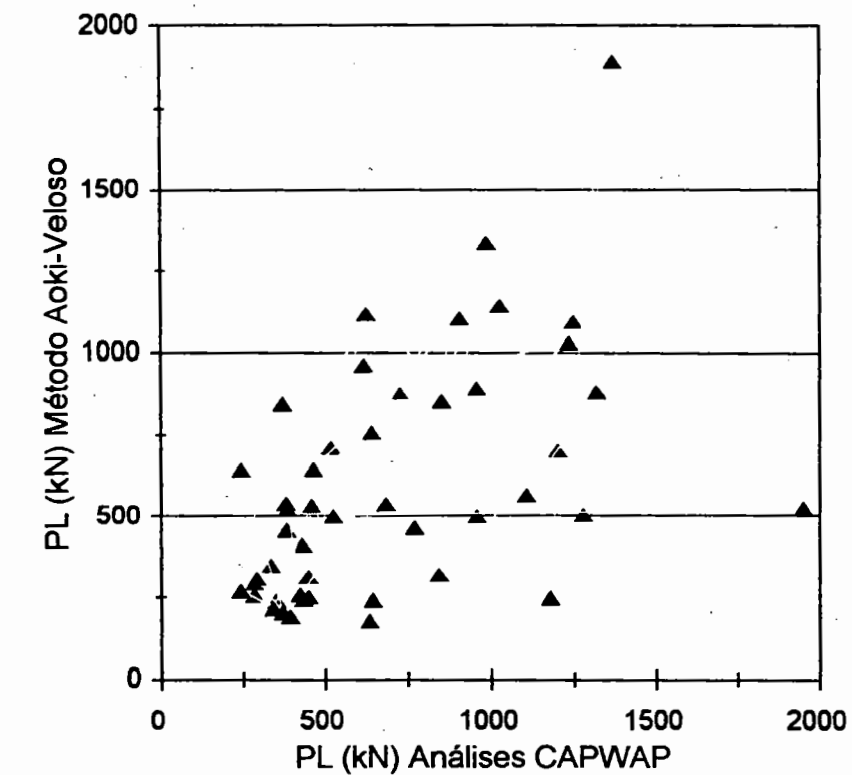


FIGURA 33: PL (CAPWAP) x PL (Métodos Empíricos).

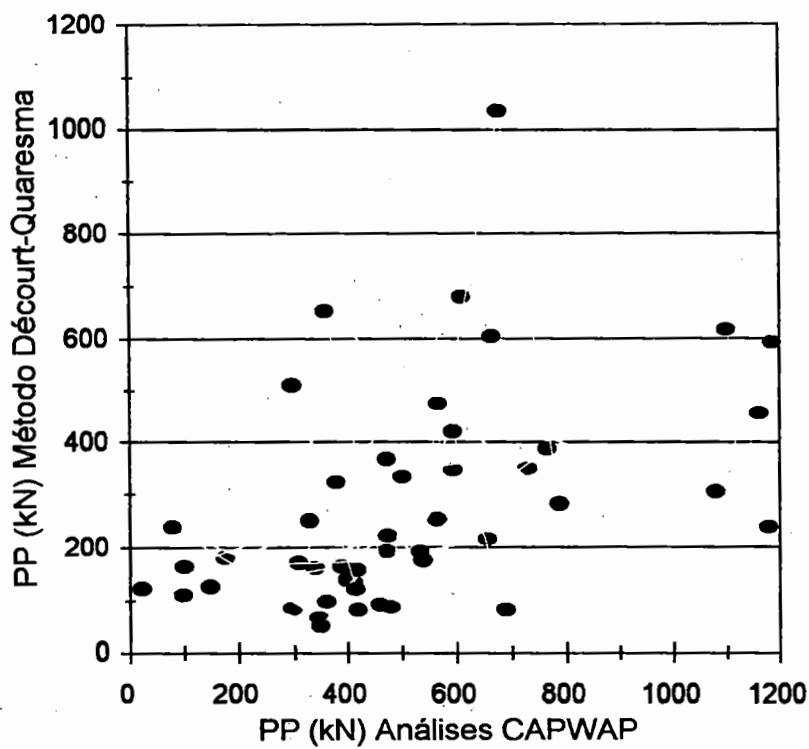
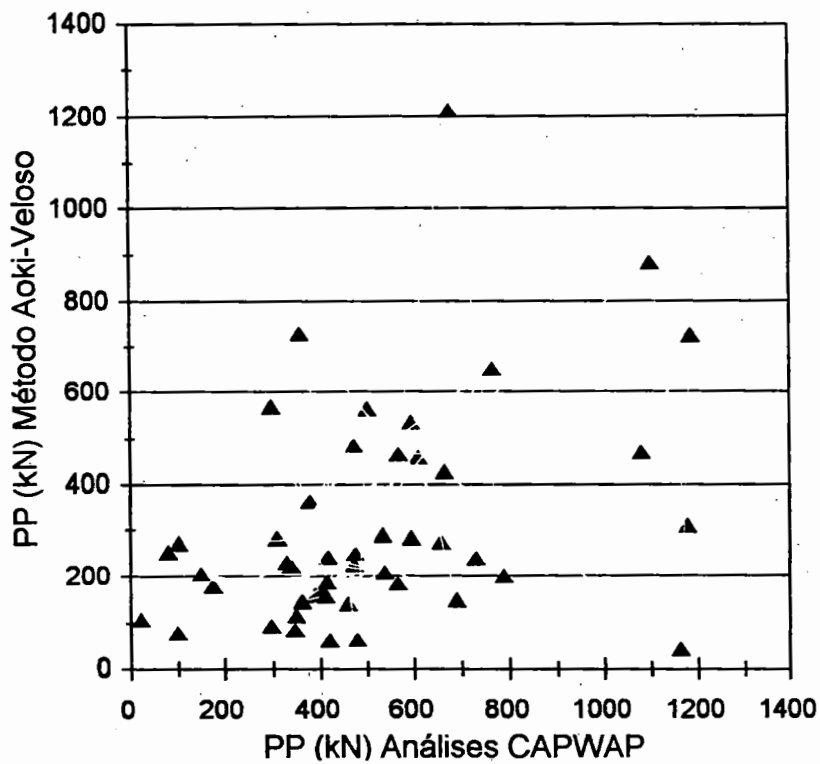
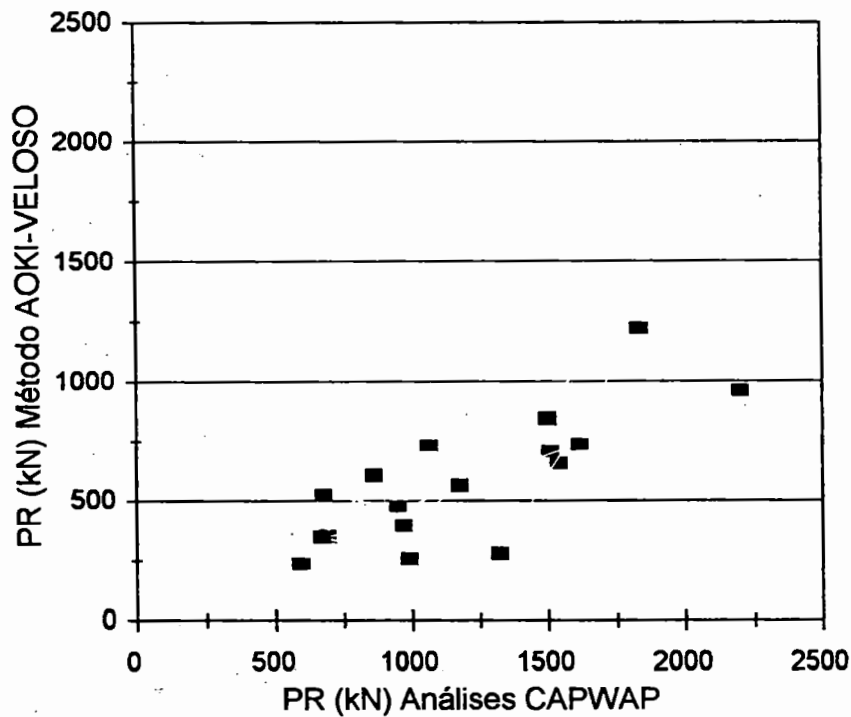
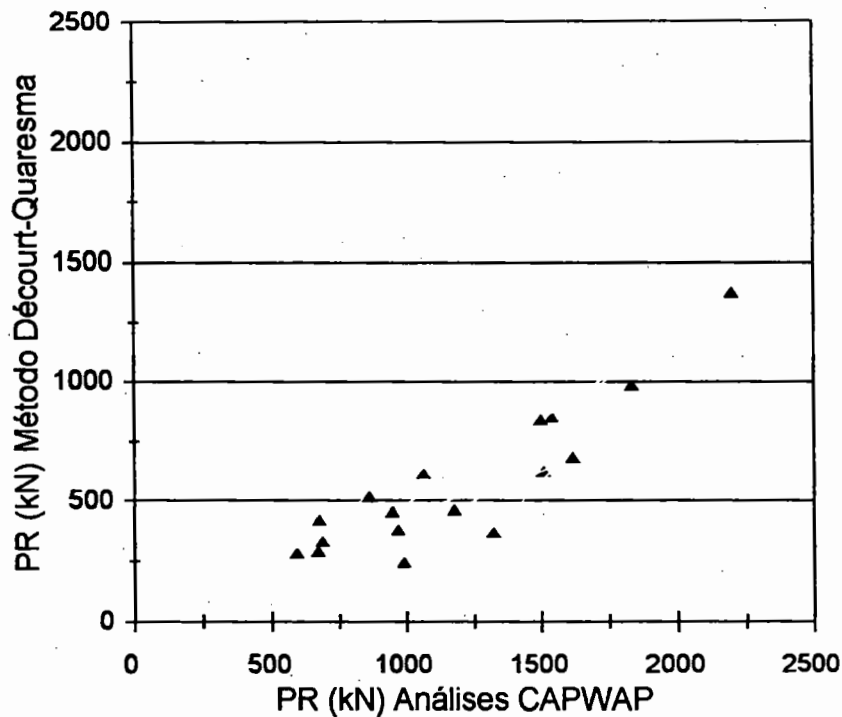


FIGURA 34: PP (CAPWAP) x PP (Métodos Empíricos).

**CAPWAP X CORRELAÇÕES EMPÍRICAS  
ESTACAS EM SOLOS ARGILOSOS**



**CAPWAP X MÉTODOS EMPÍRICOS  
ESTACAS EM SOLOS ARGILOSOS**



**FIGURA 35: Capacidade de Carga PR - CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas em Solos Predominantemente Argilosos.**

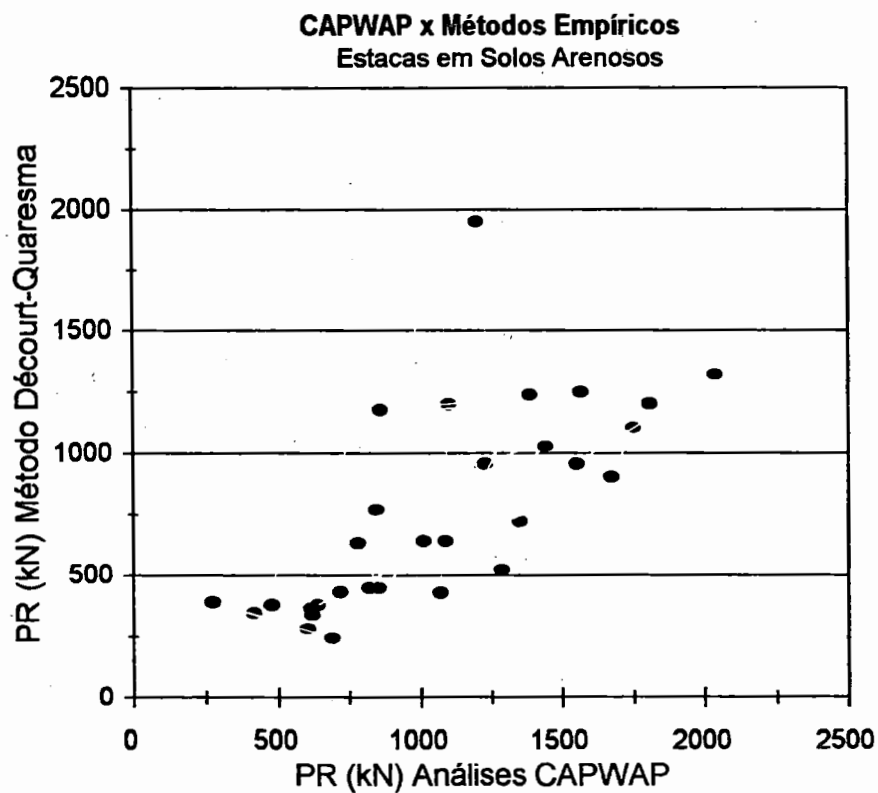
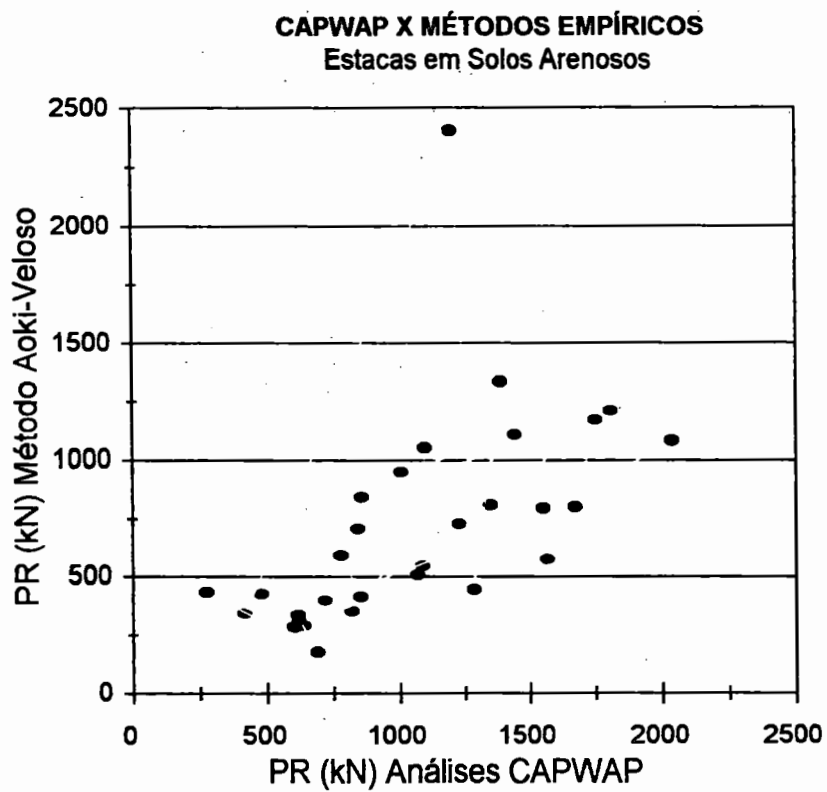


FIGURA 36: Capacidade de Carga PR - CAPWAP x Métodos Empíricos Estacas em Solos Predominantemente Arenosos.



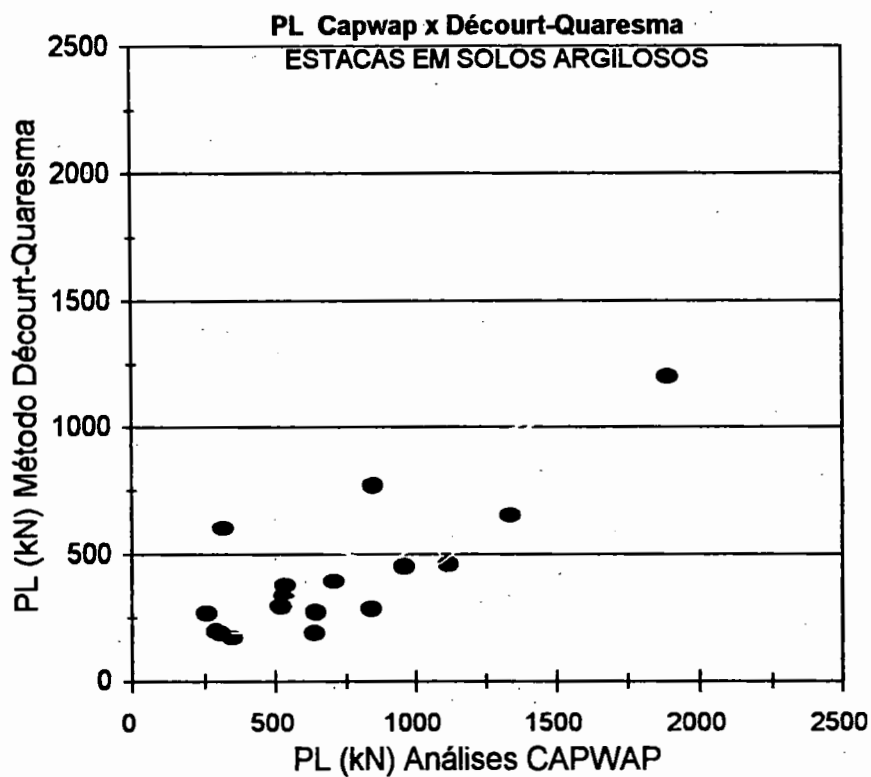
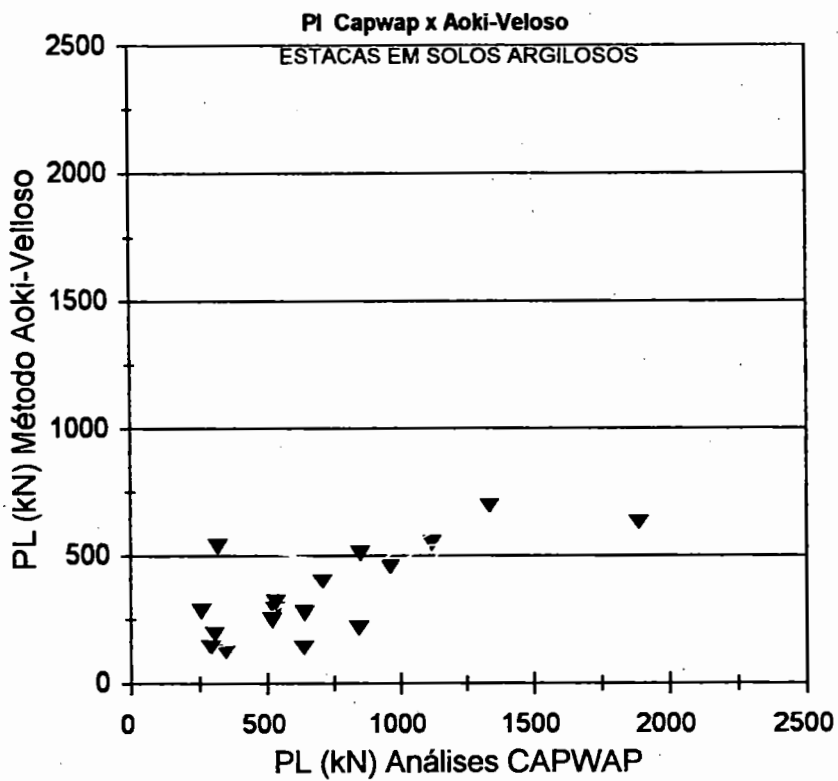


FIGURA 37: Parcela de Atrito Lateral PL -CAPWAP x Métodos Empíricos - Estacas em Solos Predominantemente Argilosos

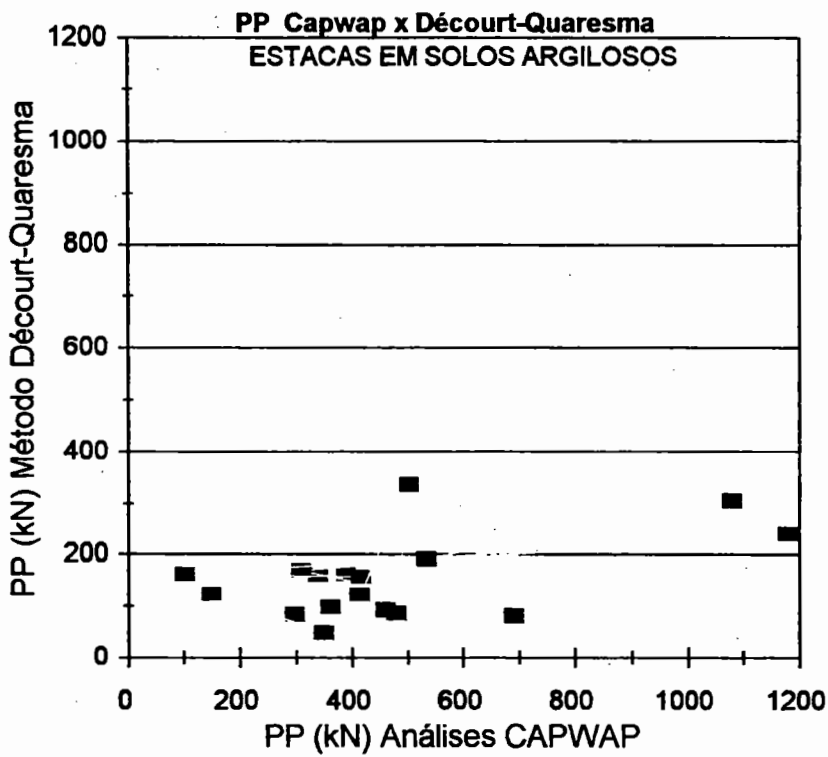
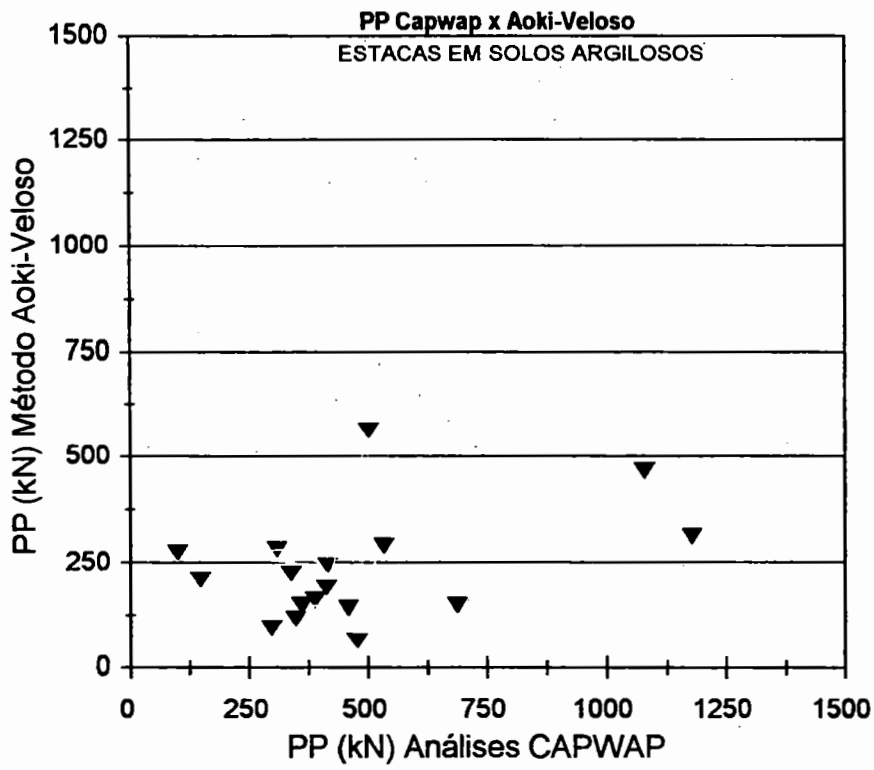


FIGURA 38: Parcela de Ponta PP - CAPWAP x Métodos Empíricos Estacas em solos predominantemente argilosos

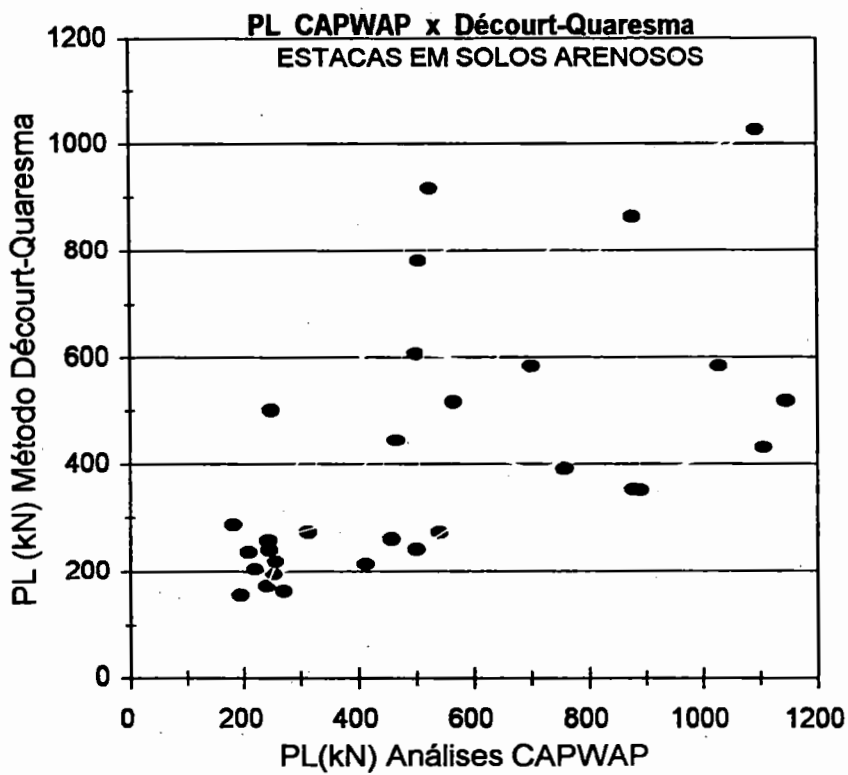
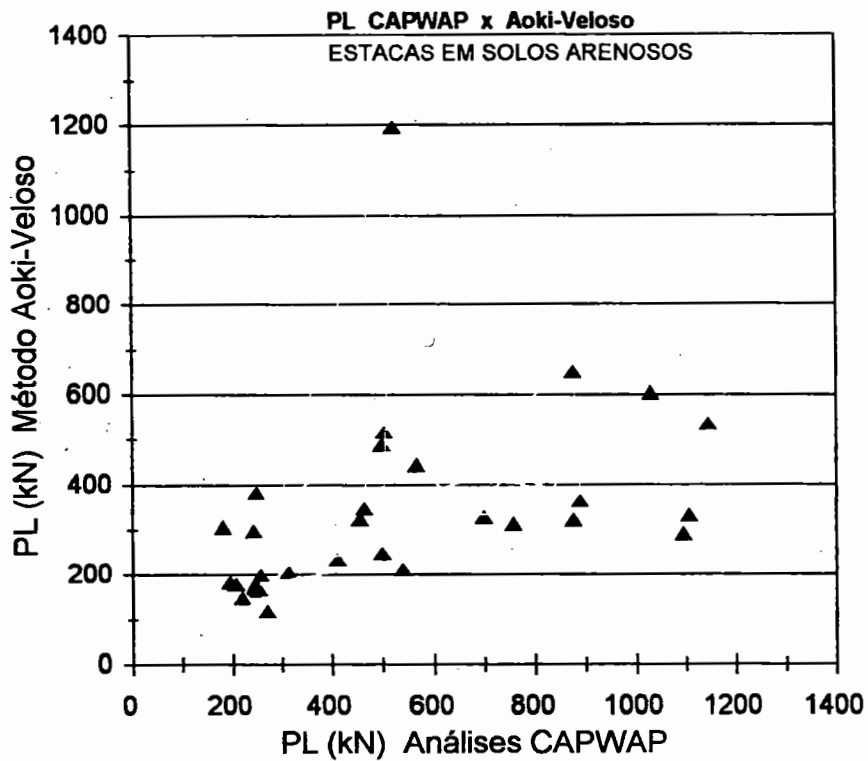


FIGURA 39: Parcela de Atrito Lateral PL - CAPWAP x Métodos Empíricos Estacas em Solos Predominantemente Arenosos.

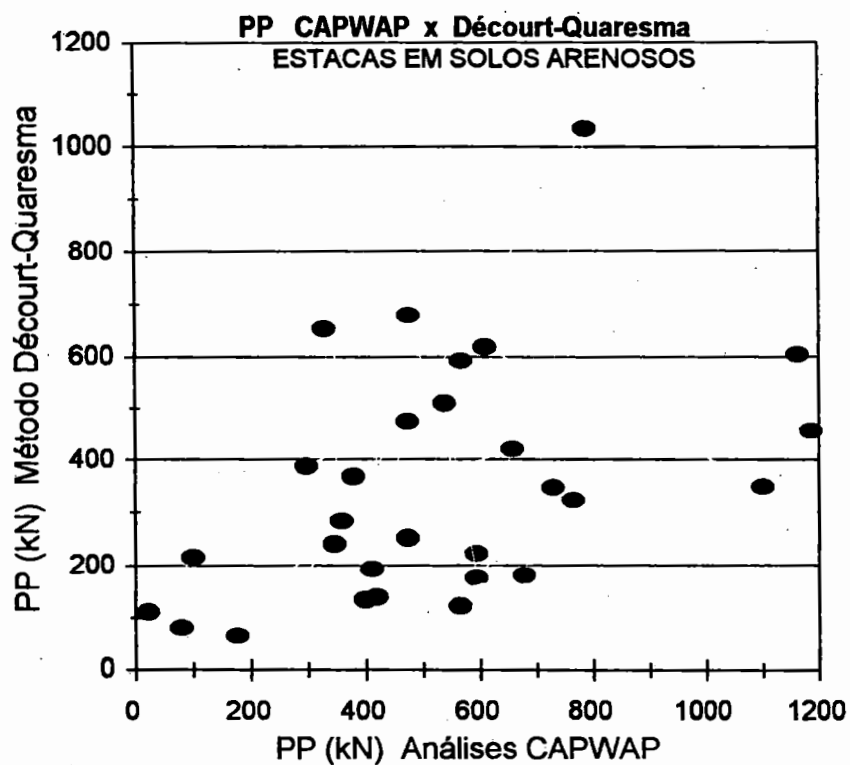
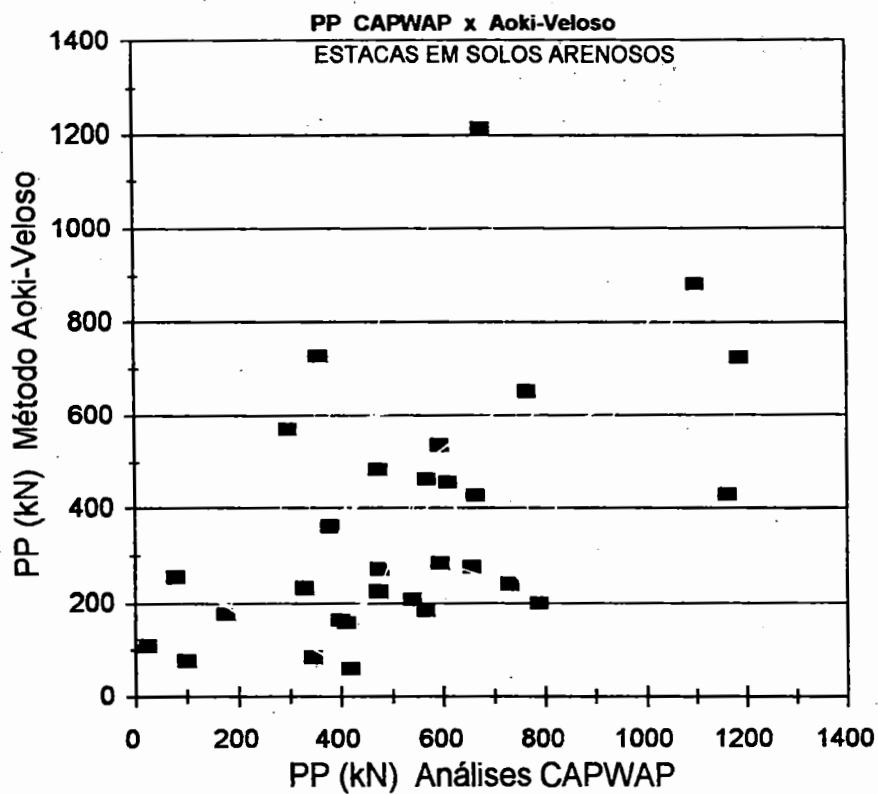


FIGURA 40: Parcela de Ponta PP - CAPWAP x Métodos Empíricos  
Estacas em Solos Predominantemente Arenosos.

### 5.3. Comentários sobre os resultados encontrados:

As figuras 35 a 40 ilustram gráficos comparativos, dos valores de capacidade de carga PR, e das parcelas resistentes por atrito lateral PL e na ponta da estaca PP, avaliados pelas análises CAPWAP e pelos métodos empíricos, separando as estacas instrumentadas em dois lotes distintos: estacas embutidas e com a ponta apoiada em solos predominantemente arenosos, e estacas embutidas e apoiadas em solos com predominância argilosa.

Com relação à capacidade de carga prevista empregando o método de Aoki-Veloso, considerando todas as estacas ensaiadas, observou-se que para um número significativo dessas estacas, os valores encontrados resultaram inferiores a 60% do respectivo valor, encontrado através da análise CAPWAP, a partir dos registros da instrumentação.

Para apenas cerca de 4% das estacas comparadas, o valor da capacidade de carga previsto empregando o método de Aoki-Veloso, resultou superior àquele encontrado pela análise CAPWAP. Nesses casos, a instrumentação indicou valores extremamente baixos para a parcela de ponta, o que induz a crer que nesses ensaios a energia aplicada pelo martelo à estaca, para o golpe selecionado para análise, foi insuficiente para mobilizar totalmente essa parcela resistente do solo, e conseqüentemente o resultado obtido na análise estaria sub-avaliando a capacidade de carga da estaca.

Quando comparou-se os valores de capacidade de carga previstos empregando o método de Décourt-Quaresma, com os resultados encontrados através das análises CAPWAP, também considerando-se todas as estacas ensaiadas, observou-se que para a grande maioria das estacas instrumentadas (cerca de 91%), os valores obtidos pelo método citado resultaram inferiores aos obtidos pelo CAPWAP. Essa porcentagem subiu para 100% (ou seja, para todas as estacas ensaiadas) quando se considerou apenas aquelas com ponta apoiada em solo predominantemente argiloso.

No que se refere à parcela de ponta especificamente, observou-se que quando a ponta da estaca encontrava-se em solos predominantemente argilosos, os valores dessa parcela previstos pelo método de Aoki-Veloso resultaram, na grande maioria das vezes bastante inferiores aos respectivos valores encontrados nos ensaios dinâmicos. Já para as estacas com ponta em solos predominantemente arenosos, embora os valores previstos pelo referido método resultaram conservativos, quando comparados com os valores encontrados nas análises CAPWAP, a discrepância observada foi significativamente menos acentuada.

Com relação aos valores previstos para a parcela de ponta obtidos pelo emprego do método de Décourt-Quaresma, comparados com os valores encontrados na instrumentação, observou-se que para cerca de 15% apenas das estacas obteve-se essa parcela superior no método empírico do que o respectivo valor encontrado no ensaio dinâmico. E também observou-se que tal fato ocorreu para aquelas estacas em que a energia do golpe do martelo selecionado para análise, foi insuficiente para despertar toda a resistência disponível do solo sob a ponta da estaca.

Também para os valores referentes à parcela por atrito lateral ou adesão solo-estaca, ao longo do fuste, os valores previstos empregando o método de Aoki-Veloso se mostraram bem conservativos quando comparados aos respectivos valores encontrados pelas análises CAPWAP. Para apenas cerca de 10% das estacas os valores encontrados para essa parcela por esse método citado resultaram superiores aos respectivos valores obtidos da monitoração.

Os valores da parcela lateral previstos pelo método de Décourt-Quaresma para a maioria das estacas ensaiadas, (cerca de 83%) resultaram inferiores aos respectivos valores obtidos pelo CAPWAP. Todavia essa discrepância não foi muito acentuada, no que se refere especificamente a essa parcela. Se considerarmos que o fator de segurança parcial, proposto pelos autores para essa parcela é bastante reduzido (1,3), os resultados obtidos parecem indicar que a previsão da parcela lateral por esse método fornece resultados adequados, na etapa de projeto.

#### 5.4. Influência do comprimento cravado

Procurou-se, neste ítem, avaliar qual a influência que o comprimento cravado da estaca exerceu sobre essa análise comparativa dos resultados obtidos pelos métodos semi-empíricos citados, e dos resultados obtidos pelas análises CAPWAP, tanto para a capacidade de carga das estacas ensaiadas, como também, separadamente, para as parcelas resistentes por atrito lateral e ponta.

Dessa forma, as estacas foram classificadas, para esse estudo, em três categorias arbitradas. Assim consideramos estacas curtas, aquelas cujos comprimentos cravados resultaram inferiores a 10 metros; estacas médias, quando esse comprimento situou-se entre 10 a 20 metros, e designamos por estacas longas, aquelas com comprimentos cravados superiores a 20 metros.

A tabela 18, apresenta valores médios obtidos para as porcentagens que os resultados de PR, PL e PP obtidos por cada um dos dois métodos empregados, representaram em relação aos respectivos valores obtidos pelas análises CAPWAP.

TABELA 18: - Influência do comprimento cravado das estacas

INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO CRAVADO DAS ESTACAS						
TIPO DE ESTACA	MÉTODO DE AOKI-VELOSO			MÉTODO DE DÉCOURT-QUARESMA		
	$PR_{av}/PR_{cpw}$	$PL_{av}/PL_{cpw}$	$PP_{av}/PP_{cpw}$	$PR_{dq}/PR_{cpw}$	$PL_{dq}/PL_{cpw}$	$PP_{dq}/PP_{cpw}$
estaca curta 1 < 10 m	52%	64%	51%	54%	60%	44%
estaca média 10 < 1 < 20m	58%	55%	56%	62%	70%	54%
estaca longa 1 > 20 m	55%	48%	50%	66%	75%	45%

Os resultados mostrados na tabela acima são resultados médios, mas ressalta-se que os valores obtidos indicaram acentuadas dispersões entre si.

De um modo geral, observando-se esses valores tabelados, não ficou evidenciada nenhuma tendência conclusiva, em relação à influência do comprimento cravado da estaca e os valores de PR, PL e PP, obtidos por ambos os métodos semi-empíricos citados, quando comparados com os respectivos valores obtidos das análises CAPWAP, a partir dos ensaios dinâmicos, por instrumentação da cravação ou da recravação dessas estacas.

O número reduzido de estacas ensaiadas de comprimentos e diâmetros diferentes, aliados aos diferentes locais em que foram instaladas, não permite que se tire conclusões gerais nesse estudo. Todavia, os resultados mostraram uma tendência de que as melhores correlações ocorrem para as parcelas resistentes por atrito lateral, principalmente para estacas longas, obtidas pelo método de Décourt-Quaresma.

Os valores de parcela de ponta obtidos pelo método de Aoki-Veloso, concordaram um pouco melhor com resultados pelo CAPWAP, do que o método de Décourt-Quaresma. Já com relação a parcela lateral, os resultados obtidos pelo método Aoki-Veloso, apresentaram menores concordâncias, com uma tendência de serem mais discrepantes quanto maior for o trecho embutido da estaca no terreno. Porém, como comentado no parágrafo anterior, essas tendências observadas não podem ser vistas como conclusivas, dado o número reduzido de estacas monitoradas, e as diferenças já comentadas.

### **5.5. Influência da seção da estaca:**

Procurou-se fazer um estudo análogo ao apresentado no item anterior, separando as estacas ensaiadas em 3 lotes distintos, de acordo com o seu porte. As estacas foram divididas em estacas “leves”, quando a seção transversal fosse de até  $350 \text{ cm}^2$ ; estacas “médias” aquelas cuja seção transversal situou-se na faixa entre  $350$  e  $700 \text{ cm}^2$ ; e finalmente estacas “pesadas”, aquelas com seção transversal superiores a  $700 \text{ cm}^2$ . Todavia, os resultados obtidos apresentaram fortes dispersões, e não indicaram nenhuma tendência, que pudesse servir de algum indicativo interessante a respeito da influência do porte da estaca, nos resultados comparados.



## 6. ANÁLISES CAPWAP x REPIQUES ELÁSTICOS:

Para um lote de 25 das 47 estacas pré-fabricadas de concreto monitoradas, compara-se os resultados de capacidade de carga mobilizada, obtidos de análises CAPWAP, a partir dos registros do final da cravação ou da recravação, com resultados de avaliação da capacidade de carga dessas estacas, empregando as formulações comentadas anteriormente, que se fundamentam em medidas do deslocamento do topo da estaca, do repique elástico e da nega observados, para o golpe do martelo considerado na análise CAPWAP. As características dessas estacas, a energia e a eficiência da cravação, estão mostradas na Tabela 19.

Os resultados de capacidade de carga mobilizada, obtidos das análises CAPWAP foram comparados com resultados da resistência  $R_{MX}$ , obtidos da expressão (4) e com valores de  $R_u$  obtidos empregando a proposição de Chellis. Os valores de  $DMX$ , de  $s$ , e de  $EMX$  empregados resultaram da monitoração da cravação. O valor de  $c_3$  foi considerado, conforme proposição mencionada, igual ao valor da nega, para valores de nega inferiores a 3,0 mm. A Tabela 20. e os gráficos da Figura 41. apresentam esses resultados.

Observou-se melhor concordância entre os valores de  $R_{MX}$ , quando comparados com os resultados das análises CAPWAP, do que entre os valores de  $R_u$ , os quais apresentaram distorções bem acentuadas, comparadas com os resultados da instrumentação. No caso de  $R_{MX}$ , observa-se uma tendência de valores ligeiramente superiores, sugerindo que o fator  $f=0,75$ , recomendado por Velloso, já comentado, conduz a resultados ainda melhores do que os aqui obtidos.

Embora os resultados comparados não tenham apresentado correlações satisfatórias, a técnica de controle de estacas via medidas de repique elástico, conforme atestam diversos relatos, tem fornecido bons resultados. O emprego crescente desse procedimento poderá indicar que o mesmo se constitui numa alternativa econômica de complementação do controle do comportamento de estacas, a partir de registros simples da cravação dinâmica.

TABELA 19: Características das Estacas e dos Sistemas de Cravação.

Estaca n°	Lado ou Diâmetro (cm)	Comprimento enterrado no solo (cm)	Peso do martelo (kN)	Altura de queda (cm)	Energia total (kN.cm)	Energia transf. (kN.cm)	Eficiência (%)
1	17	12.4	19.5	70	1370	680	50
2	17	12.3	19.5	60	1170	530	45
3	17	13.3	19.5	70	1370	520	38
4	21.5	14.8	24.0	100	2400	830	35
5	21.5	14.0	24.0	100	2400	810	34
6	17	9.0	15.0	50	750	230	32
7	17	6.0	15.0	50	750	300	40
8	17	4.5	15.0	50	750	270	36
9	17	8.0	15.0	50	750	280	37
10	42	10.0	23.0	200	4600	1610	35
11	42	10.0	23.0	200	4600	1400	30
12	42	9.9	23.0	200	4600	2040	35
13	42	9.6	23.0	200	4600	1510	33
14	21.5	11.6	23.5	120	2800	1350	35
15	17	6.3	20.6	80	1650	820	50
16	17	6.6	15.0	70	1050	440	42
17	17	6.5	15.0	100	1500	690	46
18	17	6.6	15.0	70	1050	370	35
19	23.5	3.9	20.6	80	1650	550	33
20	17	7.2	16.0	40	640	320	50
21	23.5	5.6	16.0	60	960	460	48
22	26.5	7.3	16.0	80	1280	350	27
23	23.5	5.5	16.0	60	960	480	50
24	36	31.6	42.0	80	3360	1880	53
25	26.5	33.0	42.0	70	2940	1830	62

TABELA 20: Valores de Capacidade de Carga obtidos por análises CAPWAP e via medidas de Repiques Elásticos.

Estaca n°	Deslocamento máximo do topo DMX (mm)	Nega por golpes (mm)	RMX = PR (kN)	R <sub>v</sub> = PR (kN) Chellis	PR <sub>CAPWAP</sub> (kN)
1	19.9	2.8	600	1200	320
2	17.8	2.9	510	1010	310
3	14.8	2.9	590	710	440
4	11.9	2.5	1150	780	970
5	12.8	4.6	930	430	770
6	7.3	1.3	530	540	520
7	8.6	4.0	480	100	480
8	8.3	2.0	520	990	570
9	7.4	2.5	570	310	530
10	12.8	1.0	2330	2890	1750
11	14.5	3.0	1600	2280	900
12	14.2	2.0	2520	2760	1520
13	12.9	2.0	2030	2480	1410
14	19.7	3.7	1150	1770	640
15	14.76	9.0	690	980	820
16	8.3	0.6	990	1130	940
17	11.0	5.0	860	160	820
18	7.41	0.7	910	950	780
19	8.6	2.0	1020	2140	920
20	6.96	0.2	890	950	740
21	8.74	1.1	930	2330	670
22	5.3	0.5	1210	1490	880
23	8.6	1.2	980	2250	780
24	18.3	2.0	1850	1220	1570
25	18.0	4.0	1660	630	1260

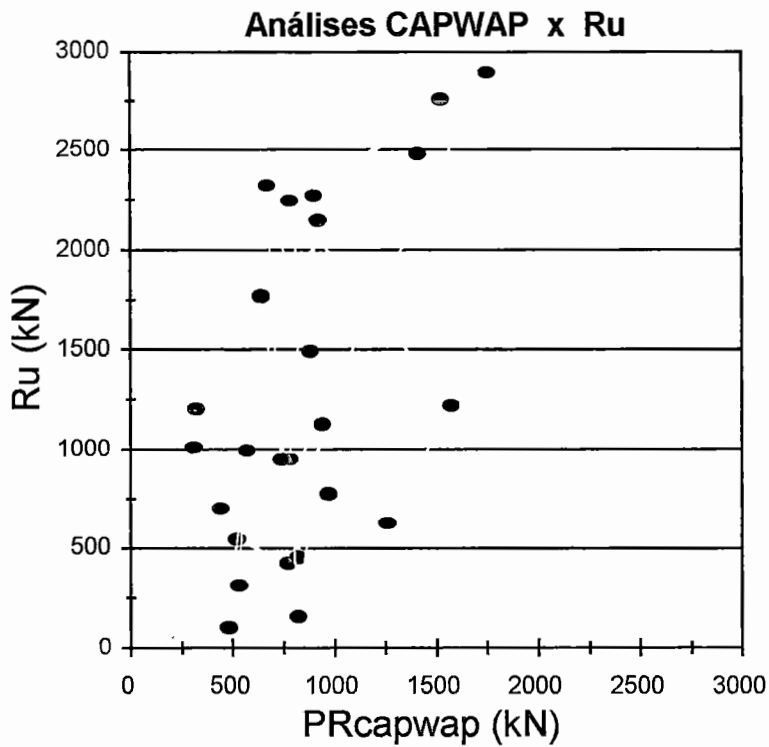
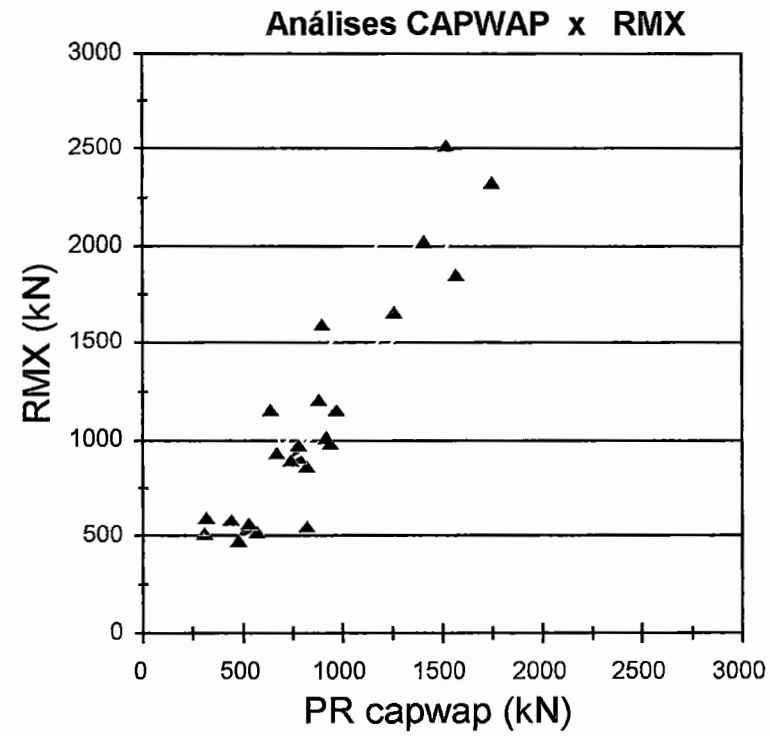


FIGURA 41: Análises CAPWAP x Fórmulas que empregam medidas de repiques elásticos

## 7. CONCLUSÕES

O elevado número de trabalhos já publicados, mostrando boas e até excelentes correlações dentre resultados de capacidade de carga obtidos a partir de registros dos sinais de instrumentação da cravação dinâmica de estacas, empregando métodos de análises fundamentados na teoria da equação da onda, quando comparados com resultados obtidos de provas de carga estáticas, confirmam que essa técnica constitui-se procedimento adequado para controle do comportamento de estacas, aliando rapidez, eficiência e economia.

Uma vantagem inegável dessa técnica, quando comparada aos ensaios de carregamentos estáticos, consiste na praticidade, e no tempo requerido para esse controle. Possibilita ainda que um número elevado de estacas sejam ensaiadas num tempo comparativamente bem reduzido. Além disso trata-se de um ensaio de custo bastante inferior.

Em obras marítimas (estruturas "off-shore"), a realização de provas de carga estáticas, é bastante trabalhosa, e com risco significativo de acidentes, em virtude da magnitude das cargas envolvidas. Também nessa situação, os ensaios dinâmicos apresentam-se como alternativas bastante atraentes.

Além de permitir avaliação separadamente das parcelas resistentes por atrito lateral e na ponta da estaca, permite ainda avaliar as tensões induzidas na cravação, tanto de compressão quanto de tração, avaliar a eficiência do sistema de cravação que está sendo empregado, e se a integridade da estaca não está comprometida. Esses aspectos são extremamente importantes, e uma vez avaliados durante o final da cravação da estaca, será possível intervir, através de medidas corretivas, quando estas se mostrarem necessárias.

Importante, porém, ressaltar que mesmo a instrumentação da cravação dinâmica das estacas não garantirá plenamente o comportamento adequado das fundações. É necessário que a energia transferida mobilize totalmente a resistência disponível do solo, para que os resultados não sejam sub-avaliações das capacidades de carga reais das estacas ensaiadas. Aspectos importantes devem ser observados, tais como eventual tendência de que o subsolo local apresente fenômenos tais como “relaxação”, isto é, de redução da resistência com o tempo.

Solos de comportamentos peculiares, como os solos resilientes, os solos expansivos, os solos colapsíveis, ou aqueles que apresentam elevada sensibilidade, por exemplo, merecem interpretação adequada dos resultados. Neste trabalho comentamos sobre algumas sugestões de procedimentos e recomendações referentes à execução do ensaio, e interpretação correta dos resultados, propostas por vários autores, que uma vez observadas, conduzirão certamente a resultados mais confiáveis.

Outro aspecto que em obras de estaqueamento merece sempre atenção especial, refere-se à possibilidade de ocorrência de atrito lateral negativo, normalmente associado a adensamento de camadas moles existentes no perfil, ainda não totalmente consolidadas em decorrência do peso próprio das camadas sobrejacentes, mas que também pode ocorrer em virtude da quebra da estrutura do solo decorrente da própria cravação, ou ainda em virtude de rebaixamento do lençol freático. Todos os aspectos acima citados, não corretamente observados, poderão conduzir a interpretações inadequadas dos resultados, com conseqüências perigosas.

A proposta do professor Aoki, já comentada de realização da monitoração com análises realizadas para uma série de golpes com energias crescentes, aumentando-se gradativamente a altura de queda do martelo, procedimento este designado no meio como Prova de Carga Dinâmica, tem sido cada vez mais difundida, e tem mostrado se constituir num procedimento que avança significativamente no sentido de melhor interpretação dos resultados da monitoração.

Outro procedimento adequado consiste em, sempre que possível, se realizar o ensaio de instrumentação tanto no final da cravação da estaca, como também realizá-lo em recravação posterior, de preferência após decorrido pelo menos 48 horas do ensaio anterior. A comparação dos resultados desses ensaios possibilita avaliar a ocorrência dos fenômenos frequentes de ganhos de resistência com o tempo (“set-up”), decorrente de “cicatrização” do solo, ou mesmo permite a avaliação de eventuais perdas de resistência com o tempo (“relaxação” do solo), possível de ocorrerem em determinados subsolos típicos.

Os resultados de capacidade de carga, bem como as respectivas parcelas resistentes por atrito lateral e de ponta, avaliados empregando-se os métodos empíricos de Aoki-Veloso e de Décourt-Quaresma, mostraram-se bastante conservativos, nesse estudo, quando comparados com os respectivos resultados obtidos a partir da instrumentação dinâmica, fundamentada na teoria da equação da onda, e empregando o programa de análise CAPWAP.

Esses métodos empíricos estão consagrados e incorporados na rotina de projetos de estaqueamento no Brasil, pela simplicidade, e porque normalmente dispõe-se apenas de índices de resistência SPT, das sondagens a percussão. Como não se dispõe de um número significativo de provas de carga estáticas para aprimoramento da precisão desses métodos, o refinamento desses métodos poderá ser possível através da realização de estudos mais completos de correlação com provas de carga dinâmicas. GONÇALVES et.al. (1996), apresentaram estudo comparativo nesse sentido, em diversos projetos de estaqueamentos implantados, comentando que resultaram em economias significativas. (em média, os custos desses estaqueamentos tiveram foram reduzidos em torno de 40%).

A técnica complementar de medidas de repiques elásticos, embora ainda não consolidada, poderá resultar num procedimento adequado de complementação do controle de estaqueamentos, de forma bastante simples e econômica.

## Referências Bibliográficas:

- ABNT - NBR 1320 - (1994). - Estacas - Ensaio de Carregamento Dinâmico.
- ALONSO,U.R.(1991) - Previsão e Controle de Fundações Profundas - Editora Edgard Blucher Ltda.
- ALVIN,F.M.; CAMPOS,G.C.; VALVERDE,S. (1988) - Testes de Integridade de Estacas - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE II - São Paulo.
- AOKI,N. & VELLOSO,D.A (1975) - Na Approximated Method to Estimated the Bearing Capacity to Piles - 5º. Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações - Buenos Aires.
- AOKI,N. (1985) - Notas sobre a Filosofia de Projeto e Execução de Fundações - Ciclo de Palestras sobre Fundações Profundas - ABMS - Curitiba.
- AOKI,N. (1986) - Controle "In Situ" da Capacidade de Carga de Estacas Pré-fabricadas via Repique Elástico da Cravação. - Publicação da ABMS - Núcleo Regional de São Paulo.
- AOKI,N. (1989) - A New Dynamic Load Test Concept - Proc. for the discussion Session 14, XII ICSMFE, TC Pile Driving - Rio de Janeiro.
- AOKI,N.; ALONSO,U.R.;TRINDADE,O.A. (1990) - Aplicação do Registrador Dinâmico (RDD) na Avaliação da Carga Mobilizada em Estacas Cravadas. - Anais do SINGEO - Rio de Janeiro.
- AZEVEDO,N.;NIYAMA; S.;VALVERDE,S.; MÜLLER,M.; YASSUDA,A.J. (1985) - Provas de Cargas Estáticas e Dinâmicas em Estacas Metálicas Cravadas. - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - São Paulo.
- BEIM, J.W.; PARAISO,S.C.; BEIM,G.K. (1992) - Dynamic Testing of Enlarged Base Franki Piles - Proc. of the Fourth Intl. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles - Rotterdam.
- BERNARDI,E. et.al. (1988) - IPT CASE - Um Sistema para Análise de Sinais Obtidos Durante a Cravação Dinâmica de Estacas. - Simpósio sobre Novos Conceitos em Ensaio de Campo e Laboratório. - Rio de Janeiro.
- BERNARDI,E.; CAMPOS,G.C.. (1991) - O método CAPWAPC e sua Aplicação no caso do Campo Experimental da EPUSP/ABEF. - Anais do SEFE II - São Paulo.
- BERNARDI,E. et.al. (1992) - Ensaio de Carregamento Dinâmico em Estacas - Feira da Dinâmica em Construção Civil -São Paulo.
- BROMS,B.B.; CHOO,L.P.(1988) - A Simple Pile Formula Based on Stress-Wave Measurements. Third Intl.Conf.on Application of Stress-Wave Theory to Piles - Ottawa



BOZOZUK, M. ; FELLENIUS, B.H. (1980) - Evaluation of Bearing Capacity on different piles - Int. Seminar on the Application of Stress-Wave Theory to Piles - Stockholm

CHAPMAN, G.A.; WAGSTAFF, J.P. (1992) - Predictions of Pile Performance Using Dynamic Testing - Proc. of the Fourth Intl. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles - Rotterdam.

CHELLIS, R.D. (1951) - Pile Foundation - McGraw-Hill Books Co. New York.

CHENG, S.M.; AHMAD, S.A. (1988) - Dynamic Testing versus Static Loading Testing: Five Cases Histories - Third Intl. Conf. on Application of Stress-Wave Theory to Piles. Ottawa

CORTÉ, J.F. & BRISTAMANTE, M. (1984) - Experimental Evaluation of the Determination of Pile Bearing Capacity from Dynamic Test. Second International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. - Stockholm.

DAVISSON, M.T. (1966) - Summary of knowledge gained from tests and instruments piles. Seminar on Pile Foundations ASCE (Metropolitan section) New York.

DÉCOURT, L. & QUARESMA, A.R. (1982) - Capacidade de Carga de Estacas a partir de valores de SPT - 6º. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações - Rio de Janeiro.

DIONISIO, A. et.al. (1992) - Repicômetro Eletrônico - Feira da Dinâmica em Construção Civil - IPT/SP - São Paulo.

FLAATE, K.S. (1964) - An Investigation of the validity of three pile driving formulas in cohesionless material.- Publication No. 56 - Norwegian Geotechnical Inst. Oslo

FELLENIUS, B.H. (1988) - Variation of CAPWAP Results as a function of the Operator - Thirt Intl. Conf. on Application of Stress-Wave Theory to Piles. Ottawa

FUJITA, K & KUSAKABE, O. (1988) - On the Evaluation of Static Bearing Capacity - Third Intl. Conf. on Application of Stress-Wave Theory to Piles. - Ottawa.

GOBLE, G.G. et.al. (1980) - The Analysis of Pile Driving - A State of the Art. - Intl. Seminar on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. - Stockholm.

GOBLE, RAUSCHE, LIKINS & Associates Inc. GRL - (1996) - CAPWAP Correlation Studies - Publicação distribuída para os usuários do Pile Driving Analyser - PDA.

GOMES, R.C.; LOPES, F.R. (1986) - Uma avaliação de Métodos de Controle da Cravação de Estacas - Anais do VII COBRANSEF, Porto Alegre.

GONÇALVES, C. et.al. (1996) - Ensaio de Carregamento Dinâmico - publicação da Estacas Benaton - Guarulhos/SP

JIMENEZ, P. (1991) - The use of the PDA in the construction of the Manati river bridge- In: PDA Users Days. The Hague, Pile Dynamics,

- LANGER, J.A.; MASLAND, J.C. (1988) - Comparison of Pile Capacities Determined from Static and Dynamic Testing and WEAP - Third Intl. Conf. on Application of Stress-Wave Theory to Piles. - Ottawa.
- LIANG, S.; ZHOU, F.; MENG, X.; YANG, X. (1984) - Prediction of Bearing Capacity by Stress-Wave Theort - Intl. Conf. on Application of Stress-Wave Theory to Piles - Stockolm
- MACHADO, J.R. & DIONISI, A. (1991) - Repicômetro: Um Sistema para Medição do Repique Elástico de Estacas. Anais do SEFE II - São Paulo.
- NAKAO, R. (1983) - Aplicação da Equação de Onda na Análise do Comportamento de Estacas Cravadas - Dissertação de Mestrado - COPPE - Rio de Janeiro.
- NYIAMA, S. (1983) - Medições Dinâmicas na Cravação de Estacas - Fundamentos - Instrumentação, e Aplicações Práticas. - Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica USP - São Paulo.
- NYIAMA, S. (1985) - Provas de Carga Dinâmicas - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE II - São Paulo.
- NYIAMA, S. & AOKI, N. (1991) - Correlação entre Provas de Carga Dinâmica e Estática no Campo Experimental da EPUSP/ABEF - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - São Paulo.
- OLSON, R.E. et. al. (1967) - Pile Driving Formulas for Friction Piles in Sand. - Journal of Soil Mechanics of American Society of Civil Engineering. Proc. ASCE.
- RIKER, R.E. et. al. (1992) - A comparison of Static and Dynamic Pile Test Results - Proc. of the Fourth Intl. Conf. on Application of Stress-Wave Theory to Piles. - Rotterdam.
- SAKIMOTO, J.; HAGA, T.; KONDO, J.. (1985 - The Penetration Behavior of Driven Piles Measured by Electro-optical Displacement Meter - Intl. Symp. On Penetrability and Drivability of Pile - San Francisco.
- SEIDEL, J. & RAUSCHE, F. (1984) - Correlation of Static and Dynamic Pile Tests on Large Diameter Drilled Shaft. - Second Intl. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory on Piles - Stockolm.
- SILVA, A.B.; MARTINS, J.A.; VALVERDE, S. (1986) - Provas de Carga Estáticas "versus" Dinâmica: Confrontação de Alguns Resultados. - Anais do VII COBRAMSEF - Porto Alegre
- SEIDEL, J.P. et. al. (1988) - Comparison of Dynamic and Static Testing for Piles Founded into Limestone - Third Intl. Conf. on the Appication of Stress-Wave Theory on Piles - Ottawa.
- SMITH, E.A.L. (1960) - Pile Driving Analysis by the Wave Equation. - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division - Proc. of ASCE.
- THOMPSON, C.D.; DEVAT, M.; (1980) - Evaluation of Ultimate Bearing Capacity of Different Piles - Intl. Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles - Stockolm.
- TRINDADE, D.A. (1989) - Determinação da Capacidade de Carga de Estacas Cravadas - Anais do VII COBRAMSEF - Porto Alegre.

UTO, K.; FUYUKI, M. ; SAKURAI, M.; HASHIZUME, T.; OSHIMA, I. (1985) - Dynamic Bearing Capacity, Wave Theory, Pile Driving Control. Intl. Symp. On Penetrability and Driveability of Piles - San Francisco.

VELLOSO, P.P.C. (1987) - Fundações - Aspectos Geotécnicos - 3 vol. Publicação da PUC - RJ - Rio de Janeiro

YOKOYAMA, Y. et.al. (1985) - General Report on Pile Driving in Japan - Proc. on Penetrability and Driveability of Piles. - San Francisco.