



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia

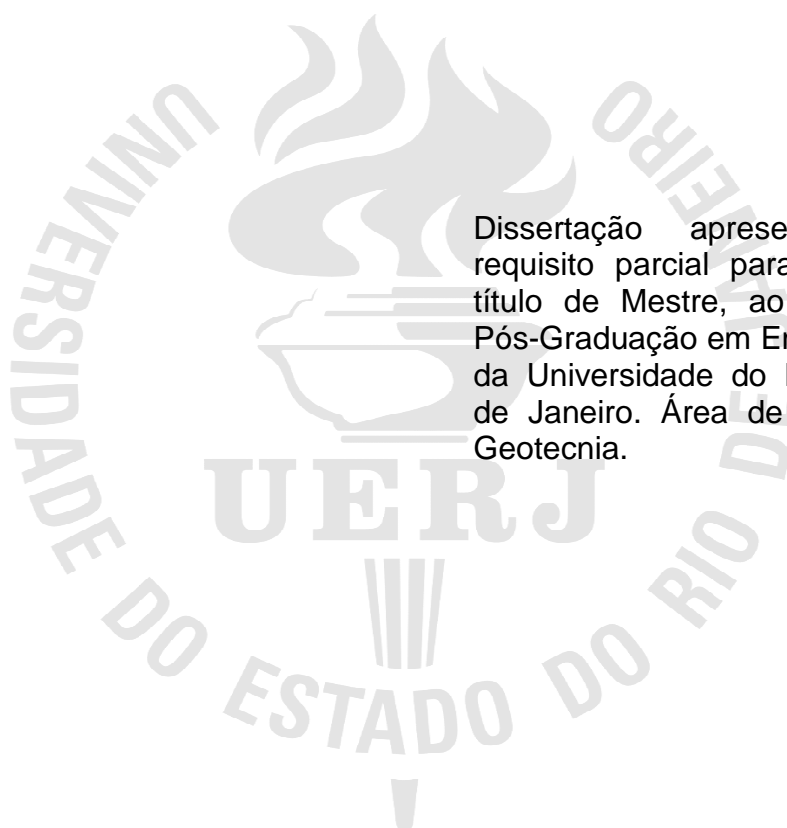
Emerson Romão da Silva

**Estudo de confiabilidade de um extenso estaqueamento em estacas  
pré-moldadas na Baixada de Jacarepaguá**

Rio de Janeiro  
2018

Emerson Romão da Silva

**Estudo de confiabilidade de um extenso estaqueamento em estacas pré-  
moldadas na Baixada de Jacarepaguá**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadores: Prof. Dra. Bernadete Ragoni Danziger  
Prof. Dr. Marcus Peigas Pacheco

Rio de Janeiro

2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S586 Silva, Emerson Romão da.  
Estudo de confiabilidade de um extenso estaqueamento em estacas pré-moldadas na Baixada de Jacarepaguá / Emerson Romão da Silva. – 2018.  
159f.

Orientadores: Bernadete Ragoni Danziger e Marcus Peigas Pacheco.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Estacas de concreto - Teses. 3. Teoria bayesiana de decisão estatística - Teses. 4. Confiabilidade (Engenharia) - Métodos estatísticos - Teses. I. Danziger, Bernadete Ragoni. II. Pacheco, Marcus Peigas. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.154

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Emerson Romão da Silva

**Estudo de confiabilidade de um extenso estaqueamento em estacas pré-moldadas na Baixada de Jacarepaguá**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 27 de Fevereiro de 2018.

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Bernadete Ragoni Danziger, D.Sc – Orientadora  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Marcus Peigas Pacheco, Ph.D – Orientador  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, Ph.D  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ

---

Prof. Bruno Teixeira Lima, D.Sc  
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2018

## DEDICATÓRIA

À minha amada esposa Elizabeth e minha linda filha Sophia.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

À Prof. Dra. Bernadete Ragoni Danziger, minha orientadora, por ir muito além do apoio acadêmico, pela inspiração pessoal e profissional, exemplo de dedicação e amor pela profissão e pelo saber, profissional irretocável e pessoa iluminada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcus Peigas Pacheco, pela contribuição acadêmica no mestrado e no processo de pesquisa.

Aos Professores, Prof. Dr Paulo Eduardo Lima de Santa Maria e Prof. Dr. Bruno Teixeira Lima, pela generosidade de participar da Banca Examinadora.

Aos demais professores da UERJ, pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula, durante a época da graduação e agora do mestrado.

Aos engenheiros Eduardo Vidal Cabral e Bruno Lúcio Moura da Silva, pela atenção e material cedido para a pesquisa.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário.

À UERJ, por abrir as portas a mim e a milhares de alunos, provando que a educação pública pode sim ser de excelência, apesar dos desmandos do poder público.

À minha família pelo apoio e dedicação.

A todos aqueles não citados, que contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

Daria tudo que sei pela metade do que ignoro.

*Rene Descartes*

## RESUMO

SILVA, Emerson Romão da. *Estudo de confiabilidade de um extenso estaqueamento em estacas pré-moldadas na Baixada de Jacarepaguá*. 2018. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Diante das inúmeras incertezas inerentes às fundações de uma obra civil, é papel do engenheiro adequar o projeto de forma a otimizá-lo, sem comprometer a segurança. A NBR6122/2010 da ABNT adota a abordagem determinística de adoção de fatores de segurança globais ou parciais. Por outro lado, o Eurocode já exige a verificação da probabilidade de ruína das fundações, em paralelo à adoção de fatores de segurança parciais existentes em cada país. No Brasil, a abordagem probabilística já é utilizada em grandes projetos, sob exigência de companhias de seguro para o cálculo dos prêmios de seguro de grandes obras. A presente pesquisa estuda o índice de confiabilidade de um estaqueamento e a influência da atualização bayesiana na redução de incertezas, utilizando como função de máxima verossimilhança fórmulas dinâmicas com base em registros obtidos durante a cravação das estacas. Uma análise inicial das estacas que foram submetidas ao ensaio de carregamento dinâmico levou a dois procedimentos e adoção de duas funções de verossimilhança: no primeiro procedimento foram considerados apenas os dados obtidos na cravação (nega e repique) e no segundo foi utilizado também o conhecimento dos ensaios de carregamento dinâmico e estimativa do mecanismo de transferência de carga ao solo na ruptura. As estimativas *a priori* foram calculadas por métodos semi-empíricos de Aoki-Velloso e Decourt-Quaresma. As funções de máxima verossimilhança permitiram, por meio do procedimento de Bayes, a atualização das estimativas *a priori*, resultando em estimativas *a posteriori* com menor coeficiente de variação. Entre as fórmulas dinâmicas adotadas como função de verossimilhança, Chellis(1951) ou Sorensen-Hansen (1957), foi verificada àquela que melhor se ajustou aos resultados dos ensaios de carregamento dinâmico. Com a adoção desta fórmula e do primeiro procedimento, foi procedida a análise de um conjunto bem maior de estacas, num banco de dados extenso. Nesta análise de um conjunto maior de estacas, foi quantificado o índice de confiabilidade do grupo, inicialmente para as estimativas *a priori* e, finalmente, após a redução da incerteza pela atualização de Bayes. Observou-se um expressivo incremento do índice de confiabilidade, com conseqüente redução da probabilidade de ruína. Concluiu-se sobre a relevância dos registros de cravação, capazes de revelar a variabilidade natural do solo, bem como a capacidade do procedimento de atualização de Bayes na redução das incertezas e aumento da confiabilidade do estaqueamento. Este é um aspecto a se considerar quanto à necessidade de um controle executivo, como o registro da nega e repique de estacas cravadas, na redução da incerteza e melhoria da confiabilidade em outros tipos de estacas.

Palavras-chave: Análise Bayesiana; Confiabilidade; Estacas pré-moldadas de concreto.



## ABSTRACT

SILVA, Emerson Romão da. *Reliability study of an extensive piling in precast piles in the Baixada de Jacarepaguá*. 2018. 159f. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

In view of the innumerable uncertainties inherent in a foundation design it is the engineer's task to conceive and optimize it without compromising safety. ABNT's NBR6122 rule adopts the deterministic approach of global or partial safety factors. On the other hand, Eurocode already requires the verification of the probability of foundations' failure, together with the adoption of partial safety factors in each country. In Brazil, the probabilistic approach is already used in large projects, under the requirement of insurance companies to define insurance premiums for large constructions. The present research investigates the reliability index of a piling and the influence of the Bayesian update procedure in reduction uncertainties, using as the likelihood function dynamic formulas based on records obtained during pile driving. An initial analysis of the piles that were submitted to dynamic loading test led to two procedures and two likelihood functions: in the first procedure only the data obtained during driving (set and rebound) were considered; in the second, the dynamic load tests results and soil load transfer mechanism at failure were also taken into account. The a priori estimates were calculated using the semi-empirical methods of Aoki-Velloso and Decourt-Quaresma. The updating Bayesian procedure using two distinct likelihood functions resulted in a posteriori estimates with a lower coefficient of variation. Both dynamic formulas adopted as a likelihood function, Chellis (1951) or Sorensen-Hansen (1957), were compared to verify the one that best fitted to the dynamic loading test. With the adoption of Sorensen-Hansen (1957) formula and the first procedure, a much larger number of piles was analyzed forming an extensive database. In this analysis of a larger database, the reliability index was quantified, initially for a priori estimates and, in sequence, after the uncertainty reduction by the Bayesian update. A significant increase in the reliability index was observed by updating, with a consequent reduction in the probability of failure. It was concluded on the relevance of the driving records and its ability to reveal the natural soil variability, as well as the capability of the Bayesian update procedure in reducing the uncertainties and increasing the piling reliability. This is a significant aspect to be considered during the piling control, such as the set and rebound registered in driven piles. The lack of accurate alternative registers for other pile types is the reason for much high uncertainty compared to driven piles.

Keywords: Bayesian theory; Reliability index; pre cast piles.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores indicativos para o sistema de cravação, adaptado de Velloso e Lopes (2010) .....	28
Tabela 2 - Propriedades físicas dos materiais de estacas (adaptado de Velloso e Lopes (2010)).....	33
Tabela 3 - Valores de $J_c$ , adimensionais, sugeridos por Rausche, adaptado de Goble e Linkin (1985).....	40
Tabela 4 - Valores de $\beta$ em função de $p_f$ (distribuição normal) .....	47
Tabela 5 - Resumo das regiões representativas e o número de estacas ensaiadas.	60
Tabela 6 - Resumo dos dados obtidos do CAPWAP .....	65
Tabela 7 - Resumo dos dados e dos procedimentos utilizados .....	66
Tabela 8 - Resumo das atualizações bayesianas .....	67
Tabela 9 - Resumo das variáveis para aplicação da metodologia FOSM .....	69
Tabela 10 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação para a estimativa a priori pelo Método de Aoki-Velloso (1975) .....	72
Tabela 11 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação para a estimativa a priori pelo Método de Decourt-Quaresma (1978) .....	74
Tabela 12 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação do primeiro procedimento usando a fórmula dinâmica Chellis-Aoki (1989).....	77
Tabela 13 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação para a fórmula Dinâmica de Sorensen-Hansen (1957) .....	80
Tabela 14 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação do segundo procedimento usando a fórmula dinâmica de Chellis-Aoki (1989).....	82
Tabela 15 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação do segundo procedimento para a fórmula Dinâmica de Sorensen-Hansen (1957) .....	83
Tabela 16 - Comparação entre o primeiro e segundo procedimento na avaliação da distribuição estatística da função de verossimilhança utilizando a fórmula de Chellis-Aoki (1989) .....	84
Tabela 17 - Comparação entre o primeiro e segundo procedimento na avaliação da distribuição estatística da função de verossimilhança utilizando a fórmula de Sorensen-Hansen (1957) .....	85

Tabela 18 - Atualização pela teoria Bayesiana, primeiro procedimento, estimativa a priori pelo modelo de Aoki-Velloso (1975) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Chellis- Aoki (1989).....	86
Tabela 19 - Atualização pela teoria Bayesiana, primeiro procedimento, estimativa a priori Aoki-Velloso (1975) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957) .....	87
Tabela 20 - Atualização pela teoria Bayesiana, primeiro procedimento, estimativa a priori pelo modelo de cálculo de Decourt-Quaresma (1978) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Chellis-Aoki (1989).....	89
Tabela 21 - Atualização pela teoria Bayesiana, primeiro procedimento, estimativa a priori Decourt-Quaresma (1978) e função de verossimilhança fórmula dinâmica Sorensen-Hansen (1957) .....	90
Tabela 22 - Atualização pela teoria Bayesiana, segundo procedimento, estimativa a priori pelo modelo de Aoki-Velloso (1975) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Chellis- Aoki (1989).....	91
Tabela 23 - Atualização pela teoria Bayesiana, segundo procedimento, a priori pelo modelo de cálculo de Aoki-Velloso (1975) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957).....	92
Tabela 24 - Atualização pela teoria Bayesiana, segundo procedimento, estimativa a priori pelo modelo de cálculo de Decourt-Quaresma (1978) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Chellis (1951).....	93
Tabela 25 - Atualização pela teoria Bayesiana, segundo procedimento, estimativa a priori pelo modelo de cálculo de Decourt-Quaresma (1978) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957).....	94
Tabela 26 - Resumo dos parâmetros de correlação .....	116
Tabela 27 - Atualização pela teoria Bayesiana, estimativa a posteriori.....	121
Tabela 28 - Solicitação de projeto .....	123
Tabela 29 - Índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura para as funções a priori, e a posteriori, após atualização pela fórmula de Sorenden-Hansen. ....	124
Tabela 30 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 15cm .....	132
Tabela 31 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 30cm .....	133

Tabela 32 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 45cm .....	134
Tabela 33 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 60cm .....	135
Tabela 34 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 75cm .....	135
Tabela 35 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 15cm .....	136
Tabela 36 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 30cm .....	137
Tabela 37 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 45cm .....	137
Tabela 38 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 60cm .....	137
Tabela 39 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 75cm .....	138
Tabela 40 - CAPWAP estaca E4-S2A, distribuição de carga e cálculos de C2, $\alpha$ e C3.....	139
Tabela 41 – Dados do CAPWAP estaca E49-S2A, distribuição de carga e cálculos de C2, $\alpha$ e C3.....	140
Tabela 42 – Dados do CAPWAP estaca E44-S3D, distribuição de carga e cálculos de C2, $\alpha$ e C3.....	141
Tabela 43 – Dados do CAPWAP estaca E25-S1A, distribuição de carga e cálculos de C2, $\alpha$ e C3.....	142
Tabela 44 – Dados do CAPWAP estaca E213-5-S3A, distribuição de carga e cálculos de C2, $\alpha$ e C3.....	143
Tabela 45 - Dados do CAPWAP estaca E61-S1A, distribuição de carga e cálculos de C2, $\alpha$ e C3.....	144
Tabela 46 - Dados do CAPWAP estaca E93-S2A, distribuição de carga e cálculos de C2, $\alpha$ e C3.....	145
Tabela 47 - Dados do CAPWAP estaca E26-S4E, distribuição de carga e cálculos de C2, $\alpha$ e C3.....	146
Tabela 48 - Coeficiente K e razão de atrito $\alpha$ , Monteiro(1997).....	148

Tabela 49 - Fatores de correção F1 e F2 Aoki e Velloso (1975) atualizado Aoki (1985).....	149
Tabela 50 - Valores de Decourt e Quaresma, (1978).....	153
Tabela 51 - Resumo dos boletins de cravação utilizados na pesquisa .....	159

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de carga ao longo da estaca .....	30
Figura 2 - Transdutores de deformação e aceleração: (A) detalhes de instalação dos transdutores; (B) vista lateral do transdutor de deformação; (C) vista lateral do acelerômetro, adaptado de Cintra et al. (2013).....	34
Figura 3 - Equipamento PDA, adaptado de Cintra et al. (2013). .....	35
Figura 4 - Registro típico de força e de velocidade x impedância, adaptado de Velloso e Lopes (2010) .....	36
Figura 5 – (a) Estaca com ponta livre; (b) estaca com ponta fixa; (c) estaca com resistência de ponta finita; (d) estaca com atrito lateral, adaptado de Beringen et al. (1980) e Niyama (1983) .....	37
Figura 6 - Registros de força e de velocidade vezes impedância e sua relação com o comprimento da estaca e as resistências encontradas, adaptado de Velloso e Lopes (2010).....	39
Figura 7 - Sequência de ajuste de um sinal pelo método CAPWAP: linha cheia = sinal medido; linha tracejada = solução pela equação da onda, adaptado de Velloso e Lopes (2010) .....	41
Figura 8 - Curvas de densidade de probabilidade de resistência e solicitação, adaptado de Cintra e Aoki (2010).....	43
Figura 9 - Curva de probabilidade de ruína, adaptado de Cintra e Aoki (2010). .....	44
Figura 10 - Curvas de solicitação e de resistência mais próximas entre si, adaptado de Cintra e Aoki (2010). .....	45
Figura 11 - Relação entre as distribuições a priori, a função de verossimilhança e a distribuição a posteriori, adaptado de Cabral (2008).....	50
Figura 12 - Empreendimento com aterro estruturado de grande extensão na Baixada de Jacarepaguá.....	53
Figura 13 - Perfil típico do terreno após a conclusão do aterro convencional, 1º etapa da obra, Spotti (2006).....	54
Figura 14 - Perfil típico do subsolo na região central do terreno, Almeida et al. (2000) .....	55
Figura 15 - Fase inicial da construção, adaptado de Spotti (2006) .....	55
Figura 16 - Regiões representativas .....	56

Figura 17 - Perfil da região representativa 1 .....	57
Figura 18 - Perfil da região representativa 2 .....	58
Figura 19 - Perfil da região representativa 3 .....	59
Figura 20 - Perfil da região representativa 4 .....	59
Figura 21 - Perfil da região representativa 5 .....	60
Figura 22 - Planta de locação das estacas (rosa) incluídas na presente pesquisa, conforme setores e regiões representativas .....	70
Figura 23 - Coeficientes de variação e valor esperado das funções a posteriori do primeiro procedimento.....	96
Figura 24 - Coeficientes de variação das funções a posteriori do segundo procedimento.....	97
Figura 25 - Coeficientes de variação e valor esperado da função a posteriori Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen.....	99
Figura 26 - Correlação previsão a priori Decourt-Quaresma x Aoki-Velloso .....	101
Figura 27 - Correlação ECD x previsão a priori Decourt-Quaresma .....	102
Figura 28 - Correlação ECD x previsão a priori Aoki-Velloso .....	103
Figura 29 - Correlação função a posteriori Aoki-Velloso/Chellis-Aoki x Decourt-Quaresma/Chellis-Aoki.....	104
Figura 30 - Correlação previsão a posteriori Decourt-Quaresma/Chellis-Aoki x ECD .....	105
Figura 31 - Correlação previsão a posteriori Aoki-Velloso/Chellis-Aoki x ECD .....	106
Figura 32 - Correlação função a posteriori Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen x Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen.....	107
Figura 33 - Correlação previsão a posteriori Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen x ECD.....	108
Figura 34 - Correlação previsão a posteriori Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen x ECD .....	109
Figura 35 - Correlação função a posteriori Aoki-Velloso/Chellis-Aoki x Decourt-Quaresma /Chellis-Aoki.....	110
Figura 36 - Correlação previsão a posteriori Decourt-Quaresma/Chellis-Aoki x ECD .....	111
Figura 37 - Correlação previsão a posteriori Aoki-Velloso/Chellis-Aoki x ECD .....	112
Figura 38 - Correlação função a posteriori Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen x Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen.....	113

Figura 39 - Correlação previsão a posteriori Decourt-Quaresma/ Sorensen-Hansen x ECD.....	114
Figura 40 - Correlação previsão a posteriori Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen x ECD .....	115
Figura 41 - Locação das 213 estacas da análise de grupo .....	117
Figura 42 - Distribuição estatística a priori pelo método de Aoki-Velloso (1975)....	118
Figura 43 - Distribuição estatística a priori pelo método de Decourt-Quaresma (1978).....	119
Figura 44 - Distribuição estatística da função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Danish, Sorensen-Hansen.....	120
Figura 45 - Distribuição estatística da atualização bayesiana Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen.....	121
Figura 46 - Distribuição estatística da atualização bayesiana Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen.....	122
Figura 47 - Gráfico Coeficiente de Variação x Índice de Confiabilidade/Probabilidade de Ruína – Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen .....	125
Figura 48 - Gráfico Coeficiente de Variação x Índice de Confiabilidade/Probabilidade de Ruína – Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen.....	125
Figura 49 - Nuvem de Nspt da Região Representativa RR1.....	154
Figura 50 - Nuvem de Nspt da Área Representativa AR2.....	155
Figura 51 - Nuvem de Nspt da Área Representativa AR3.....	156
Figura 52 - Nuvem de Nspt da Área Representativa AR4.....	157
Figura 53 - Nuvem de Nspt da Região Representativa RR5.....	158



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPT	Cone Penetration Test
CPTu	Cone Penetration Test com medida de poropressão
FEN	Faculdade de Engenharia
NGI	Norwegian Geotechnical Institute
PGECIV	Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
SPT	Standard Penetration Test
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
PCE	Prova de Carga Estática
ECD	Ensaio de Carregamento Dinâmico
FOSM	First Ordem Second Moment

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_p$	Área de ponta total da estaca
$c_a$	Adesão entre a argila e a estaca
$\eta$	Eficiência
$W$	Peso do martelo do bate-estaca
$h$	Altura de queda do martelo
$R$	Resistência mobilizada
$s$	Nega para os dez últimos golpes
$X$	Perdas de energia no choque e nas deformações elásticas
$M_1$	Massa do corpo 1
$M_2$	Massa do corpo 2
$v_1$	Velocidade do corpo 1
$v_2$	Velocidade do corpo 2
$e$	Coefficiente de reconstituição do choque
$k$	Repique
$c_3$	Quake
$\alpha$	Fator alfa de transferência de carga
$H_{cr}$	Comprimento Cravado
$H_{em}$	Comprimento em solo resistente
$E$	Módulo de elasticidade
$\rho$	Massa específica
$c$	Velocidade da onda
$R_t$	Resistência da estaca
$R_p$	Resistência de ponta
$R_L$	Resistência por atrito lateral
$Z$	Impedância
$J_c$	Fator de Amortecimento
$R_u$	Resistência Estática
$f_r(R)$	Função de densidade da probabilidade de resistência
$f_s(S)$	Função de densidade da probabilidade de solicitação
$\sigma_R$	Desvio padrão resistência

$\sigma_S$	Desvio padrão solicitação
$v$	Coeficiente de variação
$FS$	Fator de Segurança
$p_f$	Probabilidade de ruína
$\beta$	Índice de confiabilidade
$C_C$	Índice de compressão virgem
$D_C$	Profundidade crítica
$e$	Índice de vazios
$e_f$	Valor médio da eficiência do ensaio SPT
$L$	Comprimento da estaca
$n$	Número de camadas de solo
$N_q$	Fator de capacidade de carga
$N_C$	Fator de capacidade de carga
$N_{SPT}$	Valor do $N_{SPT}$ padrão brasileiro
$N_{SPT\text{EUA}}$	Valor do $N_{SPT}$ padrão americano
$p_a$	Tensão de referência
$P$	Perímetro da estaca
$q_C$	Resistência de ponta do cone
$q_p$	Resistência unitária de ponta
$Q_P$	Parcela de carga de ruptura resultante da ponta da estaca
$Q_{rupt}$	Capacidade de carga da estaca
$q_S$	Adesão ao longo do fuste
$Q_S$	Parcela de carga de ruptura resultante do atrito ao longo do fuste
$Q_U$	Carga de ruptura da estaca
$R$	Coeficiente de explicação
$S_U$	Resistência não drenada da argila.
$S_{UNC}$	Resistência não drenada das argilas normalmente adensadas
$S_{ur}$	Resistência amolgada da argila
$\alpha$	Fator de adesão

$\phi$	Diâmetro da Estaca
$\phi'$	Ângulo de atrito interno do solo
$\phi_{tc}$	Ângulo de atrito para camadas de solos arenosos em ensaios triaxiais de compressão
$\mu_Q^P$	Valor esperado da resistência prevista originalmente ( <i>a priori</i> )
$\mu_Q^L$	Valor esperado da resistência a partir da extrapolação da curva carga-recalque (função de verossimilhança)
$\mu_{Q_{rupt}}$	Valor esperado da capacidade de carga
$k$	Coeficiente de empuxo
$\sigma_Q^P$	Desvio padrão <i>a priori</i>
$\sigma_Q^2$	Variância da distribuição atualizada da capacidade de carga ( <i>a posteriori</i> )
$\sigma_P^{2,P}$	Variância da distribuição prevista originalmente, pelos ensaios de campo, <i>a priori</i>
$\sigma_Q^{2,L}$	Variância obtida a partir das provas de carga (pela função de verossimilhança)
$\sigma_{Q_{rupt}}^2$	Variância da capacidade de carga
$\tau_s$	Resistência unitária por atrito lateral

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	22
<b>1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	26
1.1 Fórmulas Dinâmicas .....	26
1.1.1 Sorensen e Hansen (1957).....	27
1.1.2 Chellis (1951).....	29
1.2 Provas de Carga Dinâmica (CASE e CAPWAP) .....	31
1.2.1 Histórico.....	31
1.2.2 Equipamento e Instrumentação .....	33
1.2.3 Execução dos ensaios.....	35
1.2.4 Interpretação dos resultados .....	35
1.3 Probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade .....	42
1.3.1 Introdução.....	42
1.3.2 Insuficiência do fator de segurança global.....	42
1.3.3 Margem de segurança .....	45
1.3.4 Índice de confiabilidade .....	46
1.4 Aplicação da teoria Bayesiana.....	48
1.4.1 Generalidades .....	48
1.4.3 Determinação da Capacidade de Carga <i>a priori</i> , verossimilhança e <i>a posteriori</i> .....	51
<b>2. CASO DE OBRA</b> .....	53
2.1 Descrição.....	53
2.2 Caracterização Geotécnica.....	54
2.3 Definição de regiões representativas.....	56
2.4 Tipo de estaca .....	61
2.5 Controle de estaqueamento.....	61
2.5.1 Registros de cravação .....	61
2.5.2 Campanhas de ensaios de carregamento dinâmico.....	61
2.5.3 Campanhas de prova de carga estática .....	62
<b>3. ESTIMATIVAS PARA APLICAÇÃO DA TEORIA BAYESIANA</b> .....	63
<b>4. ANÁLISE DAS ESTACAS ISOLADAS</b> .....	68
4.1 Generalidades .....	68

4.2	Métodos semi-empíricos (a priori) .....	70
4.2.1	Aoki-Velloso.....	70
4.2.2	Decourt-Quarema .....	73
4.3	Estimativas de resistência a partir dos registros de cravação (primeiro procedimento de obtenção da função de verossimilhança).....	75
4.3.1	Fórmulas dinâmicas.....	75
4.4	Estimativas de resistência contemplando também os registros dos ECD (segundo procedimento de obtenção da função de verossimilhança) .....	81
4.4.1	Generalidades .....	81
4.4.2	Fórmulas dinâmicas.....	81
4.5	Comparação entre o primeiro e segundo procedimento para a obtenção da função de Verossimilhança.....	83
4.6	Atualização da capacidade de carga ( <i>a posteriori</i> ) .....	86
4.6.1	Primeiro procedimento de obtenção da função de verossimilhança.....	86
4.6.2	Segundo procedimento de obtenção da função de verossimilhança.....	91
4.7	Interpretação dos resultados .....	100
4.7.1	Comparação dos modelos de cálculo <i>a priori</i> .....	100
4.7.2	Comparação dos modelos de cálculo <i>a posteriori</i> .....	104
5	<b>ANÁLISE DE UM CONJUNTO DE ESTACAS</b> .....	117
5.1	Estimativas <i>a priori</i> .....	118
5.1.1	Aoki-Velloso.....	118
5.1.2	Decourt-Quaresma .....	119
5.2	Distribuição estatística da função de máxima verossimilhança .....	119
5.3	Atualização da capacidade de carga (estimativa <i>a posteriori</i> ).....	120
6	<b>ÍNDICE DE CONFIABILIDADE E PROBABILIDADE DE RUPTURA</b> .....	123
7	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b> .....	126
7.1	Conclusões.....	126
7.2	Sugestões para pesquisas futuras.....	127
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	128
	<b>ANEXO A – RESUMO DOS ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA</b> .....	132
	<b>ANEXO B – CÁLCULO DE C2, <math>\alpha</math> E C3 A PARTIR DOS ENSAIOS CAPWAP</b> .....	139
	<b>ANEXO C – DETERMINAÇÃO DO VALOR ESPERADO E VARIÂNCIA PARA O MÉTODO DE AOKI-VELLOSO</b> .....	147

<b>ANEXO D – DETERMINAÇÃO DO VALOR ESPERADO E VARIÂNCIA PARA O MÉTODO DE DECOURT-QUARESMA .....</b>	<b>151</b>
<b>ANEXO E - SETORES ANALISADOS, DADOS DAS SONDAgens E DIAGRAMAS DE CRAVAÇÃO DAS ESTACAS ANALISADAS.....</b>	<b>154</b>
<b>ANEXO F – RESUMO DOS BOLETINS DE CRAVAÇÃO UTILIZADOS .....</b>	<b>159</b>

## **INTRODUÇÃO**

### **Relevância e objetivos**

As incertezas inerentes aos projetos de fundações são inúmeras, devidas desde a variabilidade dos maciços de solo que interagem com as fundações, a insuficiência de dados, imprecisões de sondagens, erros humanos, até a imprecisão e simplificação dos modelos de cálculo utilizados nos projetos.

Diante de tais incertezas fica claro que a toda fundação está associada a um risco de ruína, sendo tarefa do engenheiro civil a quantificação e adequação deste risco ao tipo e porte de estrutura que está sendo construída, levando em conta nas análises os custos econômicos e perdas humanas envolvidas.

A norma NBR 6122-2010 adota a abordagem determinística de fatores de segurança globais ou parciais, cuja determinação não observa, de forma direta, a influência das variações descritas na segurança e eventual otimização do projeto de fundações.

Conforme comentado por Cintra e Aoki (2010), o Eurocode, aplicado nos países do continente Europeu, já exige a verificação da probabilidade de ruína das fundações, em paralelo à adoção de fatores de segurança parciais existentes em cada país. No Brasil, a abordagem probabilística já é utilizada em grandes projetos, sob exigência de companhias de seguro para o cálculo dos prêmios de seguro de grandes obras.

Na presente dissertação é realizada a retro análise de dados de cravação de uma grande obra, possibilitando a observação da influência da aplicação da teoria bayesiana na análise da confiabilidade do projeto de fundações, bem como o grau de concordância de diferentes métodos de previsão de capacidade de carga quando comparados aos resultados experimentais de campo, a partir de ensaios de carregamento dinâmico e a influência da atualização de Bayes na redução das incertezas da capacidade de carga das estacas da obra.

### **Motivação**

Durante o curso da disciplina Probabilidade e Estatística aplicada à Geotecnia, ministrado no mestrado acadêmico da UERJ, foi abordada a



contemporaneidade e crescente interesse em relação à abordagem probabilística e teoria bayesiana. Este fato, aliado ao interesse do autor pela especialidade de fundações, em particular pela análise dinâmica da cravação, e ao vasto banco de dados disponibilizado à esta pesquisa, propiciaram o cenário para a elaboração da presente dissertação. O autor pretende, com suas análises, verificar a adequação dos métodos de previsão de capacidade de carga ao caso de obra em análise, testando os diferentes controles de cravação e efetuando a atualização da capacidade de carga, usando os diferentes registros, de forma a indicar as estimativas atualizadas de capacidade de carga com maior proximidade aos resultados experimentais de campo e contemplando uma menor incerteza.

### **Estrutura da Dissertação**

Após esta introdução é apresentada, no capítulo 2, uma revisão bibliográfica com a abordagem das previsões de capacidade de carga a partir das fórmulas dinâmicas utilizadas nas análises dos dados, Chellis (1951), modificado por Aoki (1989), e Sorensen-Hansen (1957), utilizadas como funções de verossimilhança. Posteriormente, aborda-se o Ensaio de Carregamento Dinâmico e as interpretações da capacidade de carga mobilizada pelos métodos CASE e CAPWAP. São apresentados, também no capítulo 2, os conceitos de probabilidade de ruína e índice de confiabilidade, bem como o procedimento de atualização bayesiana. Os modelos de cálculo adotados para as estimativas *a priori* não foram incluídos na revisão por serem bastante conhecidos da comunidade geotécnica e, em particular, dos especialistas em Fundações no Brasil, mas são citados e incluídos nas referências bibliográficas, para o leitor não especializado no tema.

O capítulo 3 resume os registros da obra, caracterizando o subsolo, o tipo de estaca empregada e o controle do estaqueamento. É abordada ainda a definição e apresentação das regiões representativas, identificadas a partir do traçado dos perfis geotécnicos com base nas sondagens existentes à época do projeto.

O capítulo 4 aborda as considerações utilizadas nas estimativas *a priori*, função de máxima verossimilhança e *a posteriori*, discutindo a motivação da utilização de duas funções distintas de máxima verossimilhança (designada como

primeira e segunda função), bem como os parâmetros e registros adotados na consideração de cada função de verossimilhança analisada.

A dissertação é, então, dividida em dois grandes blocos, com análises com enfoques distintos. O primeiro enfoque é apresentado no capítulo 5 e o segundo no capítulo 6.

No capítulo 5, as estacas são analisadas individualmente, com estimativa *a priori* pelos métodos semi-empíricos de Aoki-Velloso e Decourt-Quaresma e função de verossimilhança com as estimativas das fórmulas dinâmicas de Chellis e Sorensen-Hansen. Na análise individual, os valores de verossimilhança e desvio padrão são obtidos a partir da metodologia FOSM (First Order Second Moment) e é procedida a atualização pela metodologia bayesiana. Os resultados obtidos para cada função são comparados com os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico de cada uma das estacas, permitindo a comparação dos resultados entre as diferentes estimativas, antes e após a atualização bayesiana, definindo qual metodologia que melhor se adequou ao estudo de obra.

As funções de verossimilhança da capacidade de carga são obtidas no capítulo 5 de duas formas distintas: a primeira considerando os dados obtidos nos registros de cravação e os dados de algumas variáveis obtidos na literatura, gerando a primeira função de verossimilhança para cada fórmula dinâmica. Esta primeira forma de análise foi designada pelo autor como primeiro procedimento. Na segunda forma de análise, designada pelo autor como segundo procedimento, os dados obtidos dos ensaios de carregamento dinâmico e as previsões semi-empíricas foram utilizadas para a correção das variáveis obtidas na literatura técnica.

A partir da metodologia de atualização que apresentou maior adequação aos ensaios realizados nas estacas instrumentadas da obra, realizada de forma individualizada no capítulo 5, foi realizada no capítulo 6 uma nova análise. Esta nova análise contemplou um maior número de estacas do mesmo empreendimento, cravadas sob as mesmas condições. Nesta nova análise, as estacas formaram um banco de dados muito maior, formando um conjunto de estacas, analisado de forma não individualizada. A distribuição estatística dos resultados *a priori* e da função de verossimilhança do conjunto são utilizados na atualização bayesiana para obtenção da função *a posteriori*.

No capítulo 7 são analisados os resultados das atualizações do grupo de estacas em relação ao índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura, antes e depois da atualização bayesiana.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema.

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 Fórmulas Dinâmicas

A execução de estacas cravadas, pré-moldadas de concreto, metálicas ou de madeira, é um processo dinâmico que envolve a ruptura do solo e a penetração da estaca (deslocamento permanente) no maciço, sempre que o esforço dinâmico aplicado supera a resistência disponível do solo.

As estimativas de capacidade de carga de estacas realizadas a partir do controle da cravação, relacionando a resistência à cravação com a energia de cravação e a penetração da estaca, provocada pelo impacto do martelo, são chamadas de fórmulas dinâmicas. Muitas fórmulas dinâmicas surgiram no século XIX com base no impacto entre corpos rígidos.

Sendo a cravação um processo dinâmico, além da resistência estática do solo são também mobilizadas parcelas de resistência dinâmica, de natureza viscosa e, em alguns modelos, também são consideradas as parcelas de natureza inerciais. Por este motivo, costuma-se designar como resistência mobilizada durante a cravação à parcela estática da resistência total mobilizada durante a instalação das estacas cravadas. Na estimativa da resistência estática a parcela de natureza dinâmica é desconsiderada.

As primeiras Fórmulas Dinâmicas baseavam-se na lei de conservação de energia, considerando o impacto newtoniano entre corpos rígidos, igualando a energia potencial do martelo ao trabalho realizado na cravação da estaca, que é a resistência dinâmica multiplicada pela penetração da estaca (nega), somado às perdas de energia. Inúmeras fórmulas dinâmicas foram desenvolvidas e implementadas, considerando diferentes parcelas de perdas de energia: no bate estaca, no choque e nas deformações elásticas.

Posteriormente, foram introduzidas fórmulas com a utilização do repique, que é o encurtamento elástico medido no topo da estaca, possuindo uma parcela relativa ao solo (C3) e outra devida ao encurtamento da estaca (C2).

A presente pesquisa utilizou em suas análises uma fórmula baseada nas medidas obtidas do registro da nega, conhecida como fórmula dos dinamarqueses, de Sorensen e Hansen (1957), e outra baseada na medida de repique, de Chellis (1951), adaptada por Aoki (1991).

### 1.1.1 Sorensen e Hansen (1957)

A implementação das fórmulas dinâmicas baseadas na lei de conservação de energia considera uma série de perdas de energia envolvidas no processo de cravação, desde aquelas inerentes às operações do bate estaca, às que ocorrem nos acessórios de cravação, cepo e coxim, e a parcela da energia consumida nas deformações elásticas da estaca e do solo.

A incorporação das perdas de energia é feita pela comparação da energia potencial do martelo no golpe com o trabalho realizado na cravação da estaca, ao qual são somadas as perdas de energia, ou seja:

$$\eta Wh = Rs + X \quad (2.1)$$

Onde  $\eta$  representa a eficiência do martelo

$W$  o peso do martelo

$h$  a altura de queda do martelo

$R$  a resistência mobilizada pelo solo no trecho de embutimento da estaca

$s$  a nega (penetração por golpe do martelo)

$X$  as perdas de energia no choque e nas deformações elásticas

Segundo Velloso e Lopes (2010) a perda de energia no choque entre dois corpos é prevista pela Lei de Newton da seguinte forma:

$$\frac{(1-e^2)M_1M_2(v_1-v_2)^2}{2(M_1+M_2)} \quad (2.2)$$

onde:  $M_1$  = massa de um corpo (ex. o martelo)

$M_2$  = massa do segundo corpo (ex. a estaca)

$v_1$  = velocidade de um corpo (ex. o martelo)

$v_2$  = velocidade do segundo corpo (ex. a estaca)

$e$  = coeficiente de restituição do choque

Para a cravação de estacas tem-se  $g$  aceleração da gravidade e  $P$  o peso da estaca, logo:

$$M_1 = \frac{W}{g}, \quad M_2 = \frac{P}{g}, \quad v_1 = \sqrt{2gh}, \quad v_2 = 0$$

Desta forma, a perda de energia  $X$  pode-se ser expressa como:

$$X = \frac{(1-e^2)WPh}{W+P} \quad (2.4)$$

Utilizando esta perda de energia na equação (2.1), para  $\eta = 1$ , se obtém:

$$\frac{W+e^2P}{W+P}Wh = Rs \quad (2.5)$$

A formulação apresentada por Sorensen e Hansen (1957), também conhecida como Fórmula dos Dinamarqueses (Danish formula), segue esta linha, com a perda de energia,  $X$ , sendo expressa por:

$$X = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{2\eta WhL}{AE}} \quad (2.6)$$

onde o fator  $\eta$  é chamado de fator de eficiência do sistema de cravação, que representa as perdas de energia no bate estaca e que varia, segundo os autores, de 0,7, para martelos de queda livre operados por guincho, a 0,9, para martelos automáticos.  $E$  é o módulo de elasticidade do material da estaca.

Desta forma a resistência mobilizada durante a cravação é obtida por:

$$R_{mob} = \frac{\eta Wh}{s + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\eta WhL}{AE}}} \quad (2.7)$$

Velloso e Lopes (2010) relatam que, a título de orientação para o sistema de cravação, as seguintes proporções entre a eficiência do bate-estacas, a altura de queda, o peso do martelo e o peso da estaca, indicadas na tabela 1, devem ser atendidas.

Tabela 1 - Valores indicativos para o sistema de cravação, adaptado de Velloso e Lopes (2010)

<b>Estaca</b>	$(\eta h)_{m\acute{a}x}$	$(W/P)_{m\acute{i}n}$
Pré-moldada de concreto	1,00m	0,5
Metálica	2,00m	1,5
Madeira	4,00m	0,75

### 1.1.2 Chellis (1951)

Uma fórmula dinâmica amplamente difundida e que foi a primeira a utilizar o repique como meio de controle da cravação é a de Chellis (1951), em que o valor da resistência é considerado diretamente proporcional ao encurtamento elástico da estaca ( $C_2$ ). O  $C_2$ , por sua vez, é igual ao repique ( $k$ ), deslocamento elástico total do conjunto estaca solo, subtraído do encurtamento elástico do solo ( $C_3$ ), chamado de quake. De fato, à medida que a estaca atinge maiores profundidades, próximas daquelas necessárias à mobilização de sua capacidade de carga de projeto, a resistência diminui e o repique aumenta, como preconizado pelo autor, e indicado na equação:

$$R_{mob} = c_2 \frac{AE}{L'} \quad (2.8)$$

onde  $L'$  é comprimento equivalente da estaca, que depende do seu mecanismo de transferência de carga.

Velloso (1987) propõe a estimativa de  $L'$  pela relação:

$$L' = \alpha L \quad (2.9)$$

onde  $\alpha = 1$ , se toda a carga da estaca for resistida pela ponta, e  $\alpha = 0,5$  se toda a carga for resistida por atrito lateral Aoki (1991) afirma que em casos intermediários pode-se utilizar  $\alpha = 0,7$ .

De forma geral, o valor de  $\alpha$  pode ser obtido em função da distribuição da carga resistida pela estaca na ruptura (% de ponta e % de atrito lateral) e do comprimento cravado da estaca em solo resistente e em argila mole, se este for o caso, como ilustrado na figura 1. Qualquer outra estratigrafia poderá ser analisada, gerando valores distintos de  $\alpha$ . Cabe destacar, no entanto, que o valor de  $\alpha$  por ocasião da cravação pode ser distinto do seu valor por ocasião do carregamento estático. O autor selecionou a ilustração da figura 1, pois é compatível à estratigrafia presente no caso de obra que será analisado nesta dissertação: espessa camada de argila mole sobrejacente ao solo resistente.

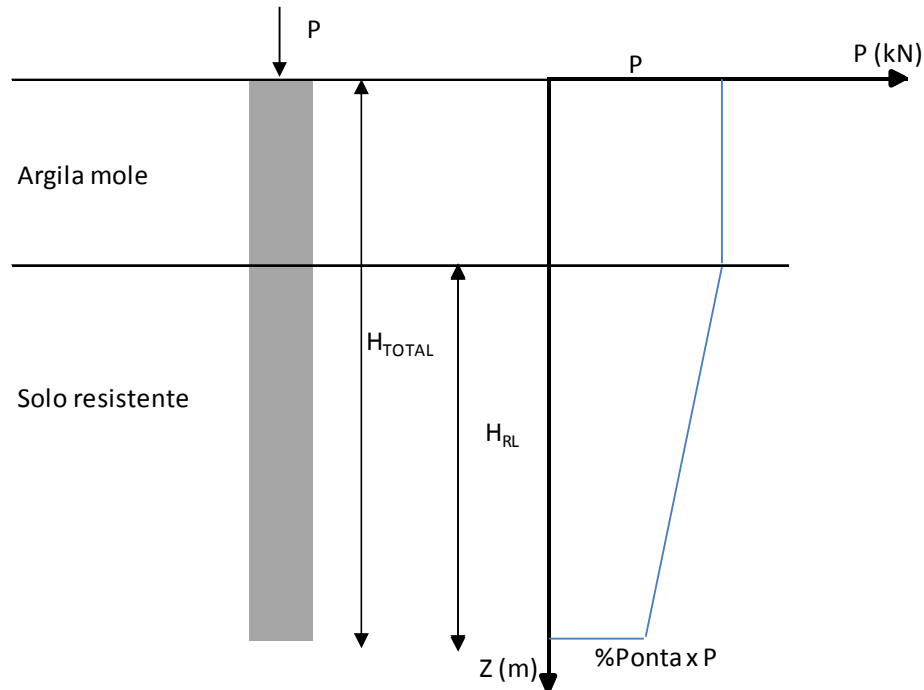


Figura 1 - Distribuição de carga ao longo da estaca

Com a distribuição de carga da figura 1, o encurtamento  $\Delta l_1$  da estaca seria definido pela equação 2.10:

$$\Delta l_1 = \frac{\left(\frac{\%ponta \times P + P}{2}\right) \times H_{RL} + P \times (H_T - H_{RL})}{EA} \quad (2.10)$$

Onde: %ponta = percentual de ponta da estaca na ruptura

P = Capacidade de carga total da estaca na ruptura

$H_{RL}$  = Comprimento da estaca cravado em solo resistente, com resistência por atrito lateral

$H_T$  = Comprimento total da estaca

E = Módulo de elasticidade do material da estaca

A = Área da seção da estaca

Para estaca com toda a capacidade de carga resistida pela ponta  $\alpha = 1$ , tem-se:

$$\Delta l_2 = \frac{P \times H_T}{EA} \quad (2.11)$$

Explicitando-se o valor de  $C_2$  em (2.8) e igualando  $C_2$  a  $\Delta l_1$  (2.10), e sabendo-se que  $L' = \alpha L = \alpha H_T$ , tem-se:



$$\alpha = \frac{(H_T - H_{RL}) + \frac{(1 + \% \text{ponta}) \cdot H_{RL}}{2}}{H_T} \quad (2.12)$$

Uma das dificuldades da utilização da fórmula de Chellis (1951) é a estimativa do valor de  $C_3$ , sendo que Chellis (1951) considera que seu valor varia entre 0 e 2,5mm, em função da dificuldade da cravação da estaca. Aoki (1986) considera o valor de  $C_3$  igual a 2,5mm, em estacas pré-moldadas.

Souza Filho e Abreu (1990) mediram o valor de  $C_3$  em solos do Distrito Federal por meio de dispositivo instalado no interior de uma estaca, e encontraram valores de até 10mm. Aoki (1989) indica que, em solos resilientes, o quake pode atingir valores na ordem de 20mm e até 30mm.

Avelino (2006), utiliza a equação 2.13 para a determinação de  $C_3$ , a partir da relação entre parâmetros do solo da região de cravação da estaca e a carga na estaca:

$$C_3 = \frac{P_r}{r_B \frac{G_B}{\rho}} \times \frac{1-u}{4} \quad (2.13)$$

Onde:  $P_r$  = Carga aplicada no topo da estaca

$G_B$  = Módulo de cisalhamento na profundidade da base

$r_B$  = raio de base da estaca

$u$  = coeficiente de Poison

Segundo Avelino (2006) o valor de  $\rho$  pode ser estimado a partir da aplicação de um método de cálculo que quantifique a distribuição da força normal de compressão ao longo do eixo da estaca.

## 1.2 Provas de Carga Dinâmica (CASE e CAPWAP)

### 1.2.1 Histórico

A utilização de formulação baseada na teoria de impacto newtoniano envolve algumas considerações e simplificações que começaram a ser analisadas mais apropriadamente com o advento da teoria da equação da onda.

A equação da onda estuda a cravação de estacas como um fenômeno de propagação de ondas de tensão em barras e permite distinguir as componentes estática e dinâmica da resistência do solo, examinar os efeitos do martelo e dos acessórios de cravação. Por meio de simulações numéricas, a análise pela equação da onda permite verificar se um dado martelo e sistema de cravação são capazes de cravar a estaca até a profundidade de projeto, além de fornecer a nega para controle do campo e a determinação das tensões (compressão e tração) que ocorrem na estaca durante a cravação.

Smith (1960) desenvolveu um método numérico para a solução da Equação da Onda aplicado à cravação de estacas onde martelo, sistema de amortecimento, estaca e solo são representados por componentes como massas, molas e amortecedores. Maiores detalhes são encontrados em Smith (1960).

O desenvolvimento do modelo de Smith aliado ao desenvolvimento da eletrônica tornou possível o registro, ao longo do tempo, da força e aceleração no topo da estaca durante a cravação, criando as condições necessárias ao desenvolvimento do ensaio chamado ensaio de carregamento dinâmico (ECD), no Case Institute of Technology, em Cleveland.

O sistema desenvolvido no Case Institute of Technology, em Cleveland no ano de 1964, permitiu a avaliação da capacidade de carga em campo, por meio do próprio sistema de cravação. Este sistema vem sendo aperfeiçoado ao longo dos anos. O desenvolvimento tecnológico e os modelos atuais permitem a transmissão de dados pela internet, além de simular os resultados a tempo real, possibilitando inclusive o ajuste e adequação dos procedimentos de ensaio.

O Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD) tem seu procedimento executivo especificado pela NBR 13208-2007, permitindo, inclusive, que para fins de comprovação do desempenho das fundações, sejam utilizados os ECD's em substituição às Provas de Carga Estáticas (PCE), na proporção de cinco para uma, observando-se alguns critérios estabelecidos na NBR 6122-2010.

O ensaio consiste na aplicação de um ciclo de impactos, geralmente dez golpes, em energia constante ou crescente, sobre o conjunto de amortecimento posicionado na cabeça da estaca.

### 1.2.2 Equipamento e Instrumentação

Na execução do ECD pode-se utilizar o mesmo bate-estaca utilizado na cravação, com o impacto necessário sendo gerado pela queda do martelo de altura controlada, posicionado axialmente em relação à estaca.

A instrumentação das estacas ensaiadas é feita com a instalação de transdutores de deformação específica e acelerômetros para obtenção, respectivamente, da força e da velocidade durante a propagação da onda ao longo do fuste da estaca (descendente e ascendente). A força é determinada a partir da adoção de módulo de elasticidade dinâmico do material da estaca:

$$E = \rho c^2 \quad (2.14)$$

onde,  $\rho$  é a massa específica e  $c$  é a velocidade de propagação da onda no material, com seus valores mais comuns expressos na tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades físicas dos materiais de estacas (adaptado de Velloso e Lopes (2010))

<b>Material</b>	<b>E (GPa)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>c (m/s)</b>
Aço	210	8.000	5.120
Concreto	23	2.500	3.000

Os instrumentos, para medição de força e velocidade, são fixados por meio de parafusos e chumbadores (estacas de concreto) ou solda (estacas metálicas), próximos ao topo da estaca, sempre aos pares, em posições diametralmente opostas, visando com isso compensar efeitos de flexão.

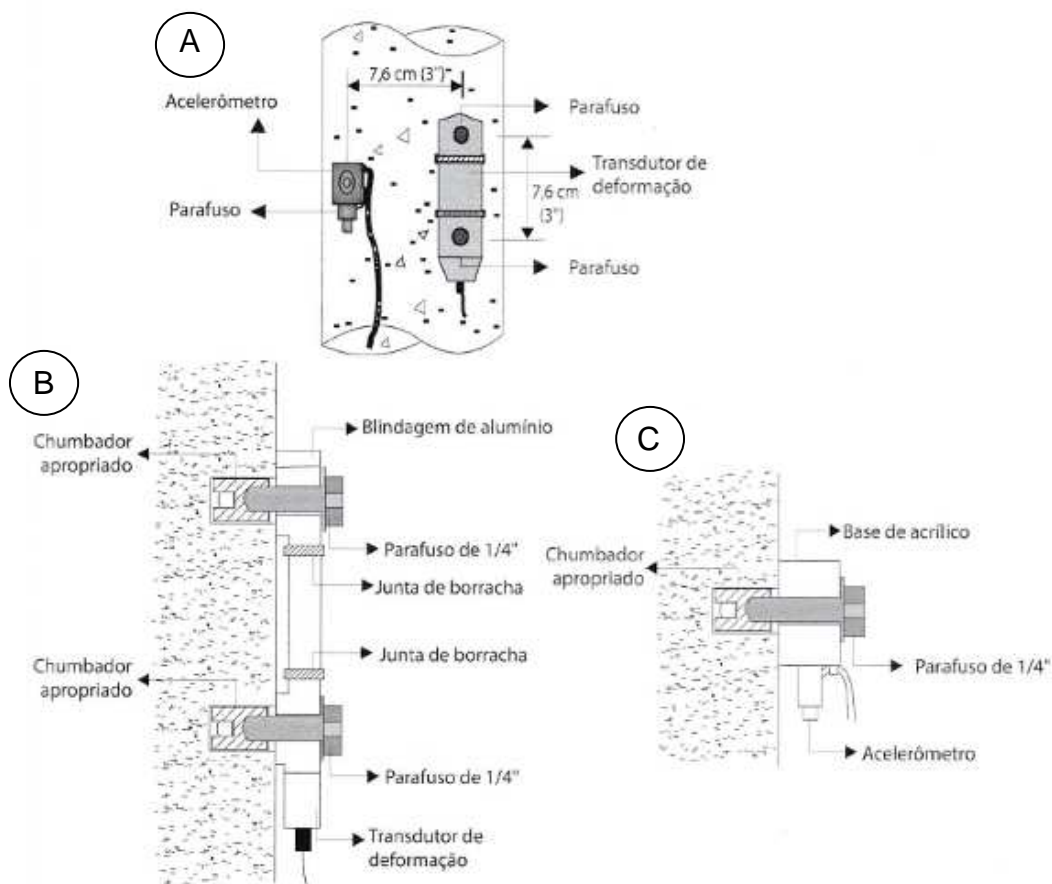


Figura 2 - Transdutores de deformação e aceleração: (A) detalhes de instalação dos transdutores; (B) vista lateral do transdutor de deformação; (C) vista lateral do acelerômetro, adaptado de Cintra *et al.* (2013).

Os sinais dos sensores instalados são condicionados, analisados e armazenados em um Analisador de Cravação de Estacas (PDA), indicado na Figura 3, com os dados obtidos transferidos para arquivos de computador, visando análises posteriores. O analisador processa os sinais obtidos por meio da instrumentação utilizando a teoria de propagação das ondas, visando obter os resultados de:

- força máxima no impacto (FMX);
- energia máxima no golpe (EMX);
- resistência estática mobilizada (RMX);
- deslocamento máximo da estaca durante o impacto (DMX);
- integridade da estaca;
- tensões máximas na estaca;

- eficiência do sistema de cravação;

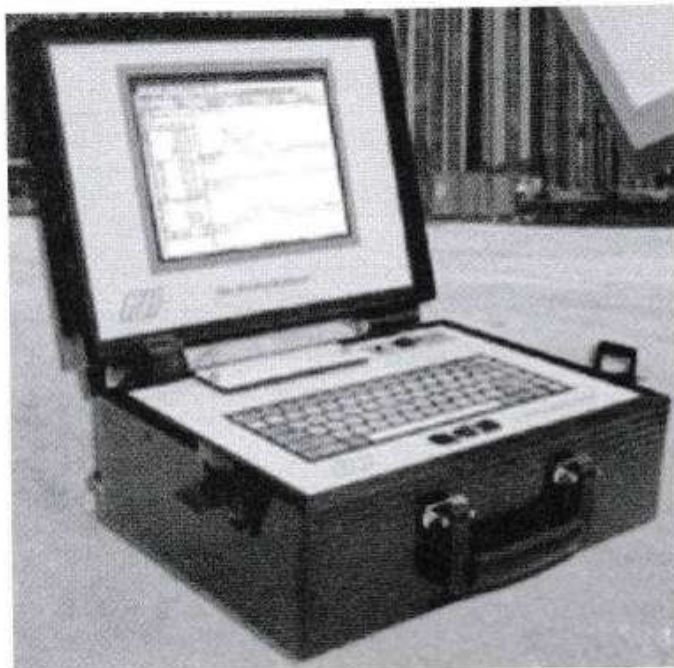


Figura 3 - Equipamento PDA, adaptado de Cintra *et al.* (2013).

Cintra *et al.* (2013) destacam que o acompanhamento das tensões geradas durante o ensaio, possibilita ao operador limitar o impacto de forma a não prejudicar a integridade estrutural da estaca. De forma geral, se procede o ensaio no mínimo até duas vezes a carga de trabalho da estaca.

### **1.2.3 Execução dos ensaios**

A NBR 13208-2007 indica os procedimentos para a realização do Ensaio de Carregamento Dinâmico, desde a forma de fixação dos transdutores e acelerômetros à forma de montagem dos sistemas e execução do ensaio, sendo sua leitura recomendada, para maiores detalhes acerca dos seus procedimentos executivos.

### **1.2.4 Interpretação dos resultados**

Os sinais coletados em campo são interpretados, na seção instrumentada, ao longo do tempo da propagação da onda, como curvas de força, velocidade x

impedância, wave up (onda ascendente), wave down (onda descendente), deslocamento e energia.

Quando a onda se propaga no sentido descendente, cada vez que é oferecida resistência ao longo da estaca ela é refletida no sentido ascendente. Como a onda de força medida na seção instrumentada é a sobreposição da onda descendente com a onda ascendente, a curva de força afasta-se da curva velocidade x impedância após o momento de máxima intensidade do impacto ( $t=t_1$ ), conforme mostrado na Figura 4, quando a seção instrumentada está logo acima do nível do terreno. No caso da cravação de estacas offshore, as curvas se separam apenas quando a onda incidente atinge o leito marinho, num intervalo de tempo muito afastado do momento do impacto.

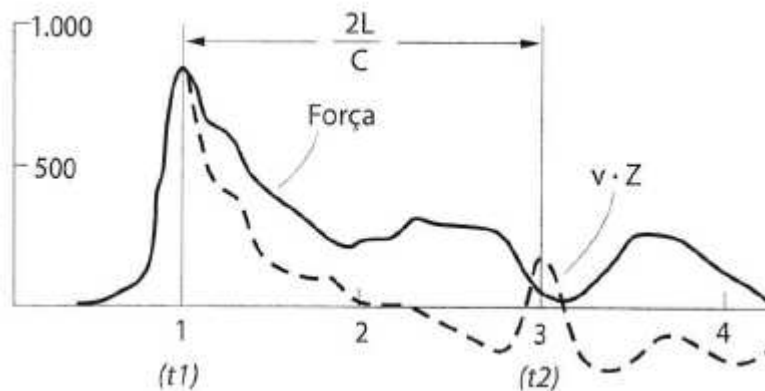


Figura 4 - Registro típico de força e de velocidade x impedância, adaptado de Velloso e Lopes (2010)

Se não houvesse resistência do solo ao longo da estaca, as duas curvas da figura anterior estariam sobrepostas até o tempo  $t_2 = t_1 + 2L/c$ . No entanto, como é despertada a resistência no maciço de solo que envolve a estaca, as curvas de força e de velocidade x impedância afastam-se. Pela diferença entre as curvas é definida a resistência por atrito lateral, que provocou as ondas refletidas. Após o tempo  $2L/c$ , entretanto, a diferença decorre também da resistência de ponta da estaca.

Conforme descrito por Cintra *et al.* (2013), para avaliação da qualidade do sinal da instrumentação utilizada no Ensaio de Carregamento Dinâmico, verifica-se se a curva velocidade x impedância coincide com a curva de força no momento do impacto ( $t=t_1$ ). Obviamente, os sinais são considerados satisfatórios quando essas

curvas se sobrepõem no início da onda, que corresponde a seção da estaca que não está envolvida pelo solo (não apresenta resistência) e em que as curvas devem ser coincidentes.

Se a resistência de ponta da estaca for pequena ou nula, a onda refletida é de tração e soma-se à onda descendente, de modo que a velocidade aumenta e a força diminui ao longo do tempo  $2L/c$ . No caso contrário, de estaca com resistência de ponta elevada, a onda refletida é de compressão, o que provoca o aumento do sinal da força e diminui o sinal da velocidade. Na Figura 5 são as ilustradas três situações para a resistência de ponta da estaca.

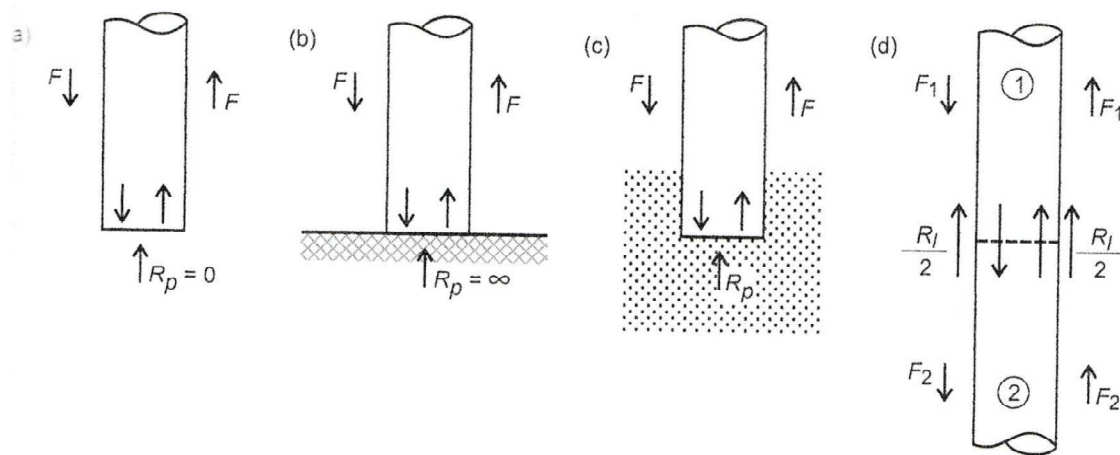


Figura 5 – (a) Estaca com ponta livre; (b) estaca com ponta fixa; (c) estaca com resistência de ponta finita; (d) estaca com atrito lateral, adaptado de Beringen *et al.* (1980) e Niyama (1983)

De acordo com a PDI (2012), a superposição das ondas só é razoavelmente correta se:

- a estaca for uniforme e elástica;
- a estaca não tiver fissuras;
- a onda não se alterar significativamente entre a região instrumentada e o local de máxima tensão.

Para a interpretação dos resultados obtidos no ensaio de carregamento dinâmico pela teoria da equação da onda, podem ser utilizados os métodos CASE e CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program), ambos desenvolvidos no CASE Institute of Technology.

Por se tratar de procedimento mais simplificado, o método Case, como se verá a seguir, deve ser confirmado e calibrado por meio de análise numérica rigorosa, do tipo CAPWAP, e/ou por uma prova de carga estática, segundo a NBR13208-2007.

Em relação ao ensaio de carregamento dinâmico, a NBR6122-2010 recomenda a sua realização em pelo menos 5% das estacas da obra, e no mínimo três ensaios; para cada estaca ensaiada deve ser processada pelo menos uma análise do tipo CAPWAP.

#### **1.2.4.1 Método CASE**

Segundo Cintra *et al.* (2013) o método simplificado de CASE possibilita a estimativa imediata da resistência estática de estaca submetida ao impacto dinâmico, por meio da interpretação das medidas de força e velocidade em seu topo. Ele foi elaborado usando-se a solução fechada da equação da onda por intermédio de correlações empíricas com resultados de provas de carga estáticas.

A resistência à penetração da estaca ( $R_t$ ) é estimada, nesse método, pela soma da resistência de ponta ( $R_p$ ) e por atrito lateral ( $R_L$ ), supondo-se que todas as reflexões da onda decorram da resistência do solo e que o atrito mobilizado seja igual para as ondas descendentes e ascendentes. Considera também um modelo rígido plástico para a resistência do solo. Conforme destacado anteriormente, a ocorrência do atrito lateral ao longo do fuste é indicada pelo afastamento das curvas de força ( $F$ ) e de velocidade x impedância ( $v \times Z$ ), conforme ilustrado na Figura 6.



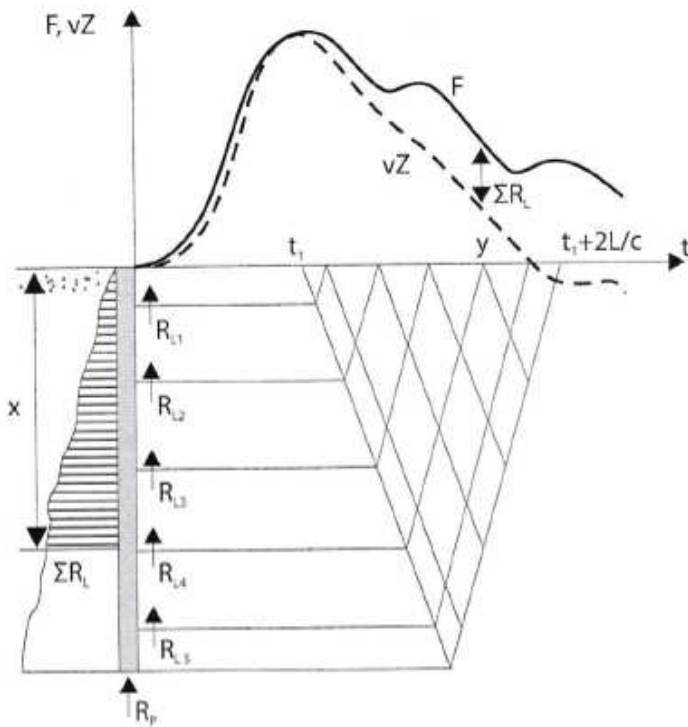


Figura 6 - Registros de força e de velocidade vezes impedância e sua relação com o comprimento da estaca e as resistências encontradas, adaptado de Velloso e Lopes (2010).

Cintra *et al.* (2013) mostram a solução da impedância que, por meio da análise das ondas incidentes e refletidas, chega-se à resistência total mobilizada no golpe do martelo, no método de Case, obtida pela equação:

$$R_t = R_p + \sum R_L = \frac{1}{2}[F(t_1) + F(t_2)] + \frac{1}{2}Z \times [v(t_1) - v(t_2)] \quad (2.15)$$

Onde:  $t_1$  tempo de maior intensidade do golpe

$$t_2 = t_1 + 2L/c$$

$F(t_1)$  = força no instante  $t_1$

$v(t_1)$  = velocidade no instante  $t_1$

$F(t_2)$  = força no instante  $t_2$

$v(t_2)$  = velocidade no instante  $t_2$

A metodologia CASE adota a hipótese de Smith (1960), pela qual a resistência total à penetração da estaca ( $R_t$ ) é composta por uma parcela estática ( $R_u$ ) e outra dinâmica ( $R_d$ ). Por simplificação do CASE, a parcela dinâmica é proporcional à velocidade na ponta da estaca ( $v_p$ ), sendo essa proporção

representada por um fator de amortecimento ( $J_c$ ) que depende do solo da ponta da estaca:

$$R_d = J_c \times Z \times v_p \quad (2.16)$$

Onde:  $v_p$  é a velocidade na ponta da estaca =  $(2F \downarrow - R_p)/Z$

$Z$  é a impedância =  $(EA)/c$  e  $F \downarrow$  é a força descendente que atinge a ponta da estaca

Assim a resistência estática resulta em:

$$R_u = R_t - J_c \times Z \times v_p \quad (2.17)$$

Tabela 3 - Valores de  $J_c$ , adimensionais, sugeridos por Rausche, adaptado de Goble e Linkin (1985)

Tipo de Solo	Variação de $J_c$	Valor sugerido de $J_c$
Areia	0,05 – 0,20	0,05
Areia siltosa ou silte arenoso	0,15 – 0,30	0,15
Silte	0,20 – 0,45	0,30
Argila siltosa ou silte argiloso	0,40 – 0,70	0,55
Argila	0,60 – 1,10	1,10

#### 1.2.4.2 Método CAPWAP

Cintra *et al.* (2013), mostram que para a aplicação do método CAPWAP o sistema estaca-solo é modelado de acordo com a proposição de Smith (1960) e com base no perfil geotécnico do local em que a estaca está instalada. Após o ensaio, utilizando-se as medidas registradas de força e velocidade na cabeça da estaca, o sistema estaca-solo modelado é comparado com os resultados de força ou velocidade medidos. A modelagem do sistema é ajustada para coincidir com as respostas medidas, e o resultado desse ajuste é assumido como a resistência real. Para esse procedimento, utiliza-se o programa de computador conhecido por CAPWAP.

De acordo com Cintra *et al.* (2013) a precisão do valor de resistência estática ( $R_u$ ) será maior quanto melhor for o ajuste entre as curvas, sendo a análise CAPWAP um processo iterativo no qual os parâmetros da estaca (conhecidos) e do solo (assumidos) devem ser adotados para a modelagem inicial. Nesse processo, pode-se utilizar tanto os registros de força quanto os de velocidade como função imposta para a verificação dos parâmetros.

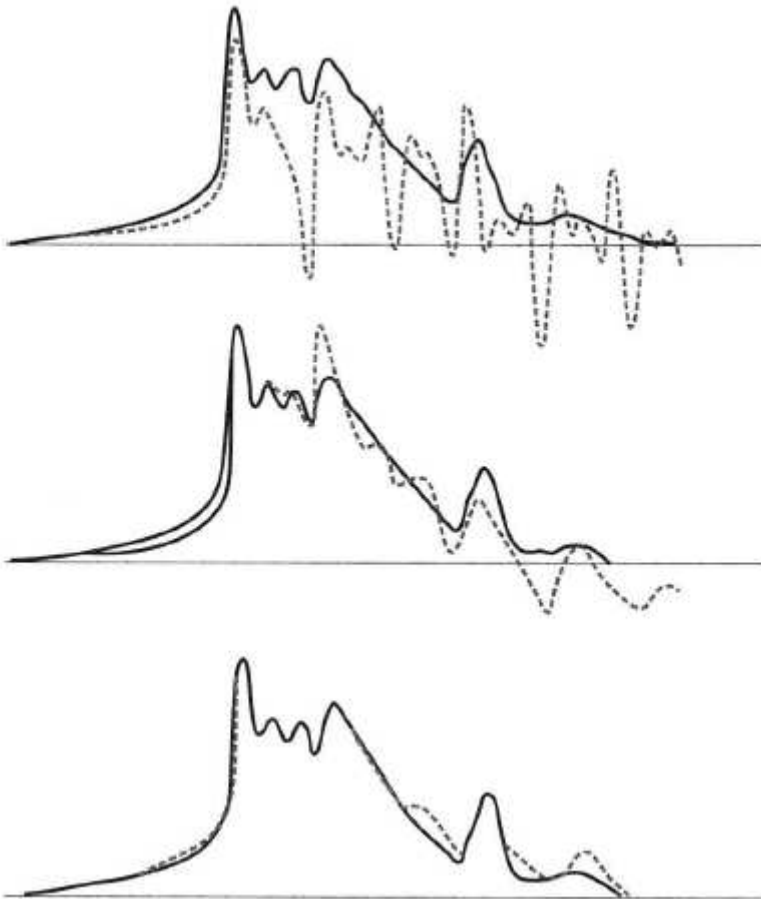


Figura 7 - Sequência de ajuste de um sinal pelo método CAPWAP: linha cheia = sinal medido; linha tracejada = solução pela equação da onda, adaptado de Velloso e Lopes (2010)

### **1.3 Probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade**

#### **1.3.1 Introdução**

Segundo Aoki (2001), o maciço de solo sobre o qual ou ao longo do qual o sistema de fundações transfere as cargas provenientes da superestrutura possui diversas camadas de solo com diferentes arranjos, granulometrias e composições, apresentando considerável variabilidade ao longo do local de implantação de qualquer projeto. A NBR6122-2010 – Projeto e Execução de Fundações, utiliza o conceito determinístico do coeficiente de segurança (global ou parcial), na verificação de um projeto de fundações. Dada a variabilidade tanto das condições do maciço de solo quanto das solicitações provenientes da superestrutura, este conceito passa a não ser suficiente para garantir a confiabilidade de uma fundação, sendo necessária uma abordagem probabilística a fim de atender um risco aceitável ao padrão e tipo de projeto a ser implantado.

Silva (2015) salienta que a análise de confiabilidade permite que as incertezas sejam mapeadas e avaliadas. Lacasse e Nadim (1994) ressaltam que a previsão do comportamento de fundações não pode ser feita com exatidão face às variações espaciais das propriedades do solo, investigação limitada do subsolo, limitação nos modelos de cálculo, incerteza nos parâmetros do solo e incertezas nas cargas atuantes. Lacasse e Nadim (1994) discorrem sobre a importância da adoção de enfoques de projeto racionais e bem documentados que informem e levem em conta as incertezas na análise dos parâmetros.

#### **1.3.2 Insuficiência do fator de segurança global**

Conforme relatam Cintra e Aoki (2010), uma fundação composta por uma série de estacas, de mesma seção transversal, cravadas ao longo do terreno, apresentarão isoladamente valores de capacidade de carga ( $R$ ) e carga atuante ou solicitação ( $S$ ), sendo as mesmas variáveis, em virtude da heterogeneidade do maciço de solo e das variações nas cargas atuantes na superestrutura que serão transmitidas aos elementos de fundação. Dadas estas variabilidades, torna-se possível traçar as curvas das funções de densidade das probabilidades de resistência e solicitação  $f_r(R)$  e  $f_s(S)$ , de forma a possibilitar uma análise estatística da fundação, conforme Figura 8.

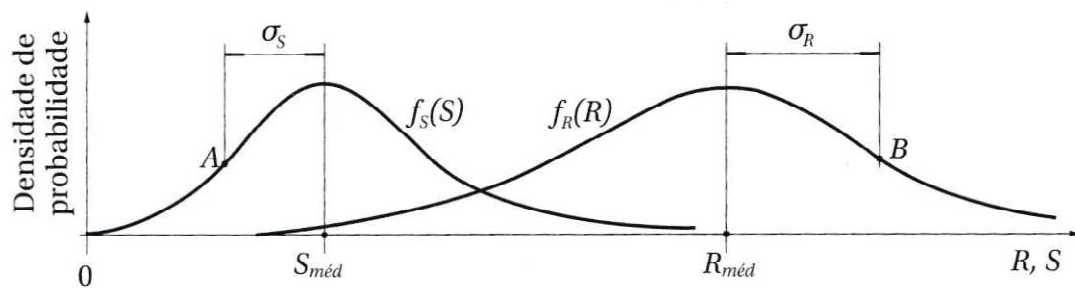


Figura 8 - Curvas de densidade de probabilidade de resistência e solicitação, adaptado de Cintra e Aoki (2010).

Segundo Cintra e Aoki (2010), tanto os valores de R e S apresentarão seus parâmetros estatísticos, como o valor médio ( $R_{\text{médio}}$  e  $S_{\text{médio}}$ ) e pontos de inflexão, A e B, que caracterizam os respectivos desvios padrão ( $\sigma_R$  e  $\sigma_S$ ), indicados na Figura 8, que quantificam a dispersão da distribuição em torno do valor médio das variáveis independentes aleatórias analisadas. A dispersão pode ser expressa como a relação entre o desvio padrão e o valor médio, chamada de coeficiente de variação ( $v$ ):

$$V_S = \frac{\sigma_S}{S_{\text{médio}}} \quad (2.18)$$

$$V_R = \frac{\sigma_R}{R_{\text{médio}}} \quad (2.19)$$

O conceito determinístico de fator de segurança (FS) utilizado na NBR6122-2010, envolve apenas a relação entre os valores médios de R e S, sem levar em conta a variabilidade de ambos:

$$F_S = \frac{R_{\text{médio}}}{S_{\text{médio}}} \quad (2.20)$$

Cintra e Aoki (2010) afirmam que o conceito determinístico cria a ilusão que observado o fator de segurança, não há qualquer probabilidade de ruína da fundação, o que não se considera como sendo verossímil.

Sendo o fator de segurança global a razão entre  $R_{\text{médio}}$  e  $S_{\text{médio}}$ , observa-se que o mesmo indica, no gráfico, o afastamento entre as curvas de resistência e solicitação. Quanto maior o fator de segurança, maior o afastamento entre as curvas, conforme indica a Figura 9.

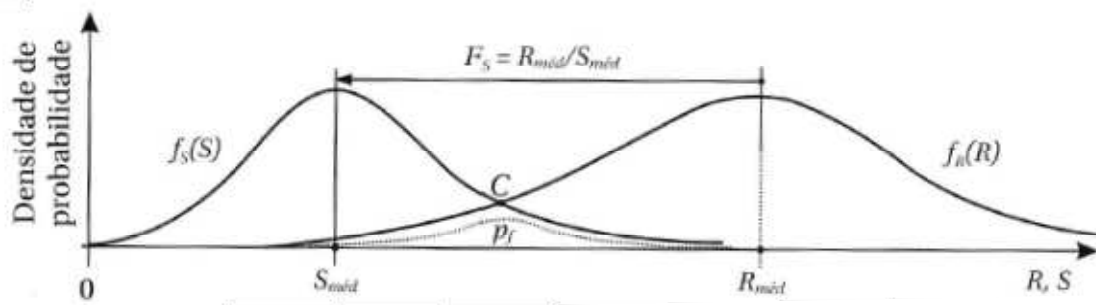


Figura 9 - Curva de probabilidade de ruína, adaptado de Cintra e Aoki (2010).

Observa-se, na Figura 9, que as curvas de resistência e solicitação se interceptam no ponto C. Também se constata que existem pontos em que a solicitação excede a resistência, indicando uma situação de ruptura. Incluindo a curva de densidade de probabilidade de ruína na região de superposição das curvas, indicada pela linha pontilhada, temos a probabilidade total de ruína ( $p_f$ ) representada pela área sob a curva pontilhada. A área correspondente a  $p_f$  é obtida pela integral da curva de densidade de probabilidade de ruína, Cintra e Aoki (2010):

$$p_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_s(S)F_R(S)dS \quad (2.21)$$

A área representada na Figura 10 é inferior à área abaixo das curvas  $f_s(S)$  e  $f_r(R)$ , porque a probabilidade de ruína corresponde, no cálculo integral, a uma convolução de duas funções: as funções  $f_s(S)$  e  $f_r(R)$ , em que  $F_R(S)$  é a distribuição acumulada de  $f_r(R)$ , condicionada por valores da função  $f_s(S)$ . Após o ponto C, os valores da função R são maiores que de os valores da função S, e no cálculo de  $F_R(S)$ , deve-se limitar o valor  $f_r(S)$  ao valor de  $f_s(S)$  disponível. Essa limitação condiciona a convolução.

Conforme observado, o fator de segurança indica o afastamento entre as curvas de S e R, sendo que a diminuição do mesmo leva a uma aproximação das curvas, aumentando a área de  $p_f$ , sendo o raciocínio oposto válido, ou seja, com o aumento do  $F_s$  ocorre o afastamento das curvas e a conseqüente diminuição de  $p_f$ . Este aspecto é indicado na Figura 10.

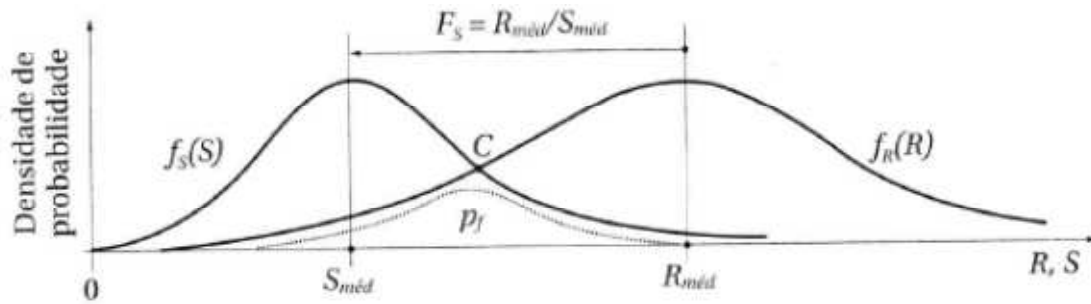


Figura 10 - Curvas de solicitação e de resistência mais próximas entre si, adaptado de Cintra e Aoki (2010).

Observa-se também que o formato das distribuições probabilísticas de  $S$  e  $R$  também influirão na área de  $p_f$ , independente do afastamento entre elas. Curvas com maior dispersão, ou seja, mais abertas, apresentarão uma maior  $p_f$  para um mesmo  $F_S$ , levando que a adoção da abordagem determinística pode resultar em valores indesejáveis de  $p_f$  mesmo com a adoção do  $F_S$  indicado na norma. Da mesma forma, a diminuição da incerteza entre as variáveis envolvidas proporcionará curvas mais fechadas, proporcionando um menor valor de  $p_f$ , possibilitando até uma diminuição do  $F_S$  sob a abordagem probabilística.

Sendo o formato da curva fator de influência na análise probabilística, conhecido os valores médios de  $S$  e  $R$ , basta a consideração dos valores do coeficiente de variação das curvas, chegando a quatro variáveis envolvidas na análise:  $F_S$ ,  $p_f$ ,  $v_S$  e  $v_R$ .

Observa-se também que os valores médios,  $S_{médio}$  e  $R_{médio}$ , indicam pontos das curvas de  $S$  e  $R$ , portando a análise determinística substitui em sua análise uma curva por um de seus pontos, podendo levar a conclusões equivocadas quanto à segurança da fundação, segundo Cintra e Aoki (2010).

### 1.3.3 Margem de segurança

Conforme observado por Cintra e Aoki (2010), sendo as variáveis  $S$  e  $R$  independentes, pode-se definir a função margem e segurança  $f_Z(Z)$  pela diferença entre as curvas de resistência  $R$  e de solicitação  $S$ , com a ruína ocorrendo quando  $Z \leq 0$ , ou seja, quando  $R \leq S$ :

$$f_Z(Z) = f_R(R) - f_S(S) \quad (2.22)$$

Sendo S e R distribuições normais, pode-se escrever:

$$\sigma_Z = \sqrt{(\sigma_R)^2 + (\sigma_S)^2} \quad (2.23)$$

$$Z_{m\u00e9dio} = R_{m\u00e9dio} - S_{m\u00e9dio} \quad (2.24)$$

Sendo

$$F_S = \frac{R_{m\u00e9dio}}{S_{m\u00e9dio}} \quad (2.25)$$

Logo

$$Z_{m\u00e9dio} = S_{m\u00e9dio}(F_S - 1) \quad (2.26)$$

### 1.3.4 \u00cdndice de confiabilidade

O valor m\u00e9dio da margem de seguran\u00e7a de um projeto, ( $Z_{m\u00e9dio}$ ), pode ser tamb\u00e9m expresso em termos de unidades de desvio padr\u00e3o ( $\sigma_Z$ ), por meio de um par\u00e2metro  $\beta$  denominado \u00cdndice de confiabilidade:

$$Z_{m\u00e9dio} = \beta \sigma_Z \quad (2.27)$$

Um valor menor de  $Z_{m\u00e9dio}$  significa uma maior probabilidade de ru\u00edna ( $p_f$ ), para um mesmo desvio padr\u00e3o, conseq\u00fcentemente um menor \u00cdndice de confiabilidade ( $\beta$ ), de onde se conclui que  $\beta$  e  $p_f$  s\u00e3o inversamente proporcionais e que  $\beta$  \u00e9 uma medida indireta de  $p_f$  do estaqueamento. Sendo  $\beta$  inversamente proporcional ao coeficiente de varia\u00e7\u00e3o da margem de seguran\u00e7a, quanto maior a variabilidade da margem de seguran\u00e7a menor ser\u00e1 o \u00cdndice de confiabilidade:

$$\beta = \frac{Z_{m\u00e9dio}}{\sigma_Z} = \frac{1}{v_Z} \quad (2.28)$$

Relacionando o fator de seguran\u00e7a global e o \u00cdndice de confiabilidade, tem-se:

$$S_{m\u00e9d}(F_S - 1) = \beta \sigma_Z \quad (2.29)$$

Indicando a depend\u00eancia estat\u00edstica entre estes dois valores. Desenvolvendo a express\u00e3o 2.26 e colocando em termos de vari\u00e2ncia obt\u00eam-se a seguinte express\u00e3o do segundo grau:

$$F_S^2(\beta^2 v_R^2 - 1) + 2F_S + \beta^2 v_S^2 - 1 = 0 \quad (2.30)$$



Cuja raiz positiva resulta:

$$F_S = \frac{1 + \beta \sqrt{v_S^2 + v_R^2 - \beta^2 v_S^2 v_R^2}}{1 - \beta^2 v_R^2} \quad (2.31)$$

Conforme Cintra e Aoki (2010), Cardoso e Fernandes (2001), deduziram a relação inversa da expressão acima como:

$$\beta = \frac{1 - \frac{1}{F_S}}{\sqrt{v_R^2 + \left(\frac{1}{F_S}\right)^2 v_S^2}} \quad (2.32)$$

Ang e Tang (1984) demonstraram que a probabilidade de ruína é função direta de  $\beta$ , tendo  $\beta$  como uma distribuição normal:

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (2.33)$$

Onde  $\Phi$  é a função de distribuição normal padrão, onde se pode, de maneira prática, utilizar o software Excel para a determinação da probabilidade de ruptura a partir de:

$$p_f = 1 - \text{DIST. NORM}(\beta; 0; 1; \text{VERDADEIRO}) \quad (2.34)$$

Tabela 4 - Valores de  $\beta$  em função de  $p_f$  (distribuição normal)

<b>N=1/p<sub>f</sub></b>	<b>p<sub>f</sub>=1/N</b>	<b>β</b>
2	0,5	0,000
5	0,2	0,842
10	0,1	1,282
20	0,05	1,645
100	0,01	2,326
1.000	0,001	3,090
5.000	0,0002	3,540
10.000	0,0001	3,719
50.000	0,00002	4,107
100.000	0,00001	4,265
1.000.000	0,000001	4,768

## 1.4 Aplicação da teoria Bayesiana

### 1.4.1 Generalidades

Conforme indicado nos itens anteriores, as variabilidades inerentes às previsões de capacidade de carga tornam o modelo determinístico de adoção de um fator de segurança global para o projeto de fundações insuficiente para se atestar a segurança do projeto, fazendo-se necessária a análise estatística do mesmo. Pode-se observar que quanto maiores as incertezas e variabilidades nas curvas de resistência (R) e solicitação (S), maiores serão os valores de probabilidade de ruptura ( $p_r$ ) e, em proporção inversa, menor será o índice de confiabilidade do projeto ( $\beta$ ).

Desta forma, a adoção de modelos que venham a minimizar a variação e as incertezas relativas às previsões, sobretudo da capacidade de carga, propiciarão maior confiabilidade ao projeto de fundações.

### 1.4.2 Atualização da Resistência do Solo durante a Cravação por meio da Metodologia de Bayes

O enfoque de atualização da capacidade de carga de estacas cravadas por meio da metodologia de Bayes é uma aplicação de conceitos da probabilidade condicional

O enfoque de Bayes assume que os parâmetros da distribuição probabilística utilizada são variáveis randômicas. A incerteza do parâmetro é modelada por distribuições *a priori* e *a posteriori*. A distribuição *a posteriori* é calculada pela atualização da distribuição *a priori*, utilizando uma função de máxima verossimilhança, que contém a observação obtida de dados disponíveis.

Segundo Pacheco (2016), e reportando-se a Harr (1987) e Ang e Tang (1984), o teorema de Bayes apresenta-se muito útil em aplicações de Engenharia e resulta da regra da multiplicação, qual seja:

$$p(A_i / B) = \frac{p(B / A_i) \times p(A_i)}{\sum_{i=1}^m p(B / A_i) \times p(A_i)} \quad (2.35)$$

Onde:

$p(A_i / B)$  é a probabilidade (condicional) de ocorrência do evento  $A_i$ , dado que o evento  $B$  ocorreu, também chamada de probabilidade posterior (ou *a posteriori*),

$p(B / A_i)$  é a probabilidade (condicional) de ocorrência do evento  $B$  dado que o evento  $A_i$  ocorreu, que representa a nova informação (ou função de verossimilhança),

$p(A_i)$  é a probabilidade de ocorrer o evento  $A_i$ , chamada também de probabilidade anterior, ou *a priori*.

O valor de  $\sum_{i=1}^m p(B / A_i) \times p(A_i)$  é chamado fator de normalização ou de ponderação. Segundo Pacheco (2016), a expressão acima pode ser vista como uma média ponderada, sendo muito útil na atualização de probabilidades.

Esta ferramenta será utilizada na presente pesquisa para atualizar o valor esperado, bem como a variância, da distribuição probabilística da resistência oferecida pelo solo durante a cravação de estacas pré-moldadas executadas em um extenso estaqueamento. A metodologia é ilustrada na Figura 11, tendo sido utilizada originalmente por Guttormsen (1987) em aplicações a fundações offshore, segundo Cabral (2008). Guttormsen (1987) ressalta que a metodologia de atualização de Bayes permite que um julgamento subjetivo, baseado em cálculos realizados *a priori*, sejam combinados com observações objetivas (função de verossimilhança), como, por exemplo, os registros obtidos por ocasião da cravação, resultando numa estimativa atualizada da resistência do solo oferecida por ocasião da instalação. Guttormsen (1987) também comenta que este procedimento auxilia o engenheiro na organização, avaliação e acúmulo da experiência fornecida pelos registros de cravação, além de prover elementos para decisões in-situ quanto ao desempenho das estacas.

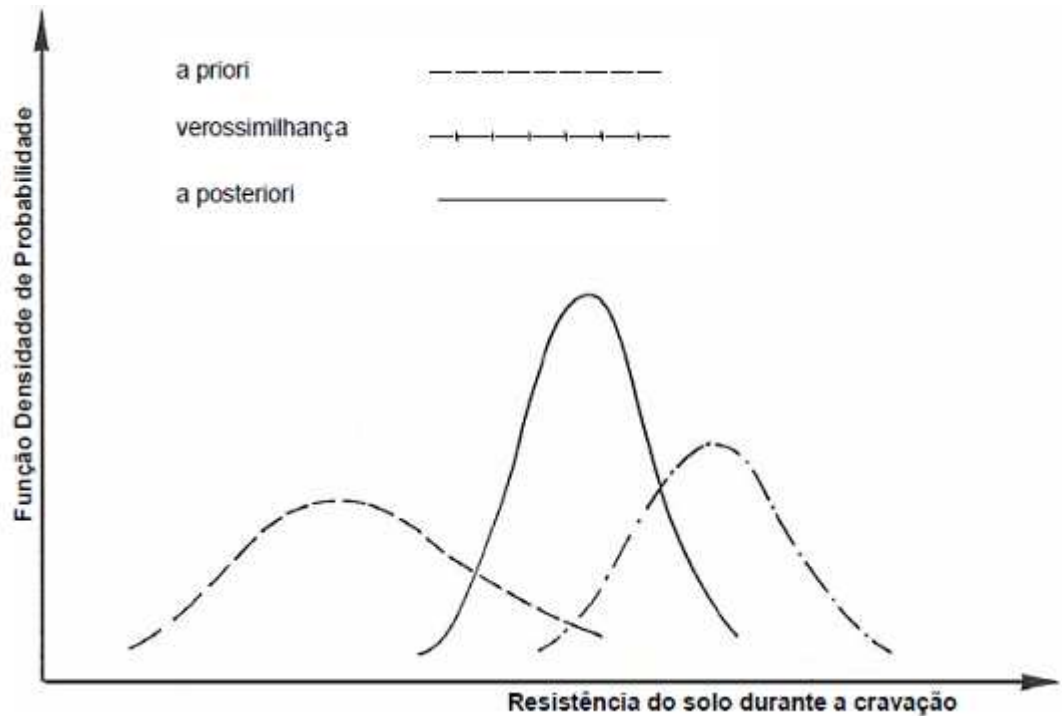


Figura 11 - Relação entre as distribuições *a priori*, a função de verossimilhança e a distribuição *a posteriori*, adaptado de Cabral (2008).

Este enfoque de atualização da estimativa da resistência do solo durante a cravação, segundo Silva (2015), também é reportado por Vrouwenvelder (1992), que ressalta que esta estimativa atualizada pode ser obtida também por meio da execução de provas de carga estáticas e ensaios de carregamento dinâmicos e/ou do simples acompanhamento do processo de instalação das estacas. Esta alternativa, na sua forma mais simples, pode ser considerada como o registro do número de golpes durante a cravação para uma certa penetração. Em função dos dados dos ensaios, ou dos registros da cravação, pode-se atualizar a estimativa da capacidade de carga. Além disso, como a nova estimativa é baseada em informações adicionais, as incertezas são menores, o que justificaria o emprego de um fator de segurança menor. O autor apresenta um resumo dos diferentes métodos de ensaio e da forma como os resultados podem ser combinados para se chegar a uma estimativa atualizada, considerando também a questão dos fatores de segurança.

Vrouwenvelder (1992) faz referência ao trabalho de Lacasse *et al.* (1989), que resume as análises realizadas por Guttormsen (1987), que serão empregadas e

adaptadas na presente pesquisa. Vrouwenvelder (1992) destaca ser este um campo interessante para pesquisas, demandando mais atenção no futuro.

Um detalhamento mais profundo da teoria de Bayes pode ser encontrado em livros texto de estatística aplicada à engenharia, como Ang e Tang (1984).

### 1.4.3 Determinação da Capacidade de Carga *a priori*, verossimilhança e *a posteriori*

A Figura 11, apresentada no item anterior, mostra a função densidade de probabilidade da resistência do solo durante a cravação. O teorema de Bayes permite a obtenção da distribuição *a posteriori*, a partir da estimativa da distribuição *a priori* e da distribuição da função de verossimilhança. As equações (2.35) e (2.36) apresentadas por Lacasse e Goulois (1989) e Lacasse *et al.* (1991), baseadas no teorema de Bayes, possibilitam, assim, o cálculo da estimativa do valor esperado e da variância da resistência atualizada do solo durante a cravação, *a posteriori*, em função do valor esperado e da variância da estimativa *a priori* e da distribuição probabilística da função de verossimilhança.

$$\mu_Q = \frac{\sigma_Q^{2,L} \cdot \mu_Q^P + \sigma_Q^{2,P} \cdot \mu_Q^L}{\sigma_Q^{2,L} + \sigma_Q^{2,P}} \quad (2.36)$$

$$\sigma_Q^2 = \frac{\sigma_Q^{2,L} \cdot \sigma_Q^{2,P}}{\sigma_Q^{2,L} + \sigma_Q^{2,P}} \quad (2.37)$$

Na equação (2.35)  $\mu_Q$  é o valor esperado da resistência atualizada das estacas analisadas, ou seja, obtida *a posteriori*, enquanto  $\mu_Q^P$  e  $\mu_Q^L$  são, respectivamente, o valor esperado da resistência prevista pelos métodos de capacidade de carga (*a priori*) e aquela obtida a partir das provas de carga estáticas, ensaios de carregamento dinâmico ou registros obtidos durante a cravação (função de verossimilhança). O valor de  $\sigma_Q^2$  designa a variância da distribuição atualizada da resistência das estacas (*a posteriori*) e,  $\sigma_Q^{2,P}$  e  $\sigma_Q^{2,L}$  são, respectivamente, as variâncias da distribuição prevista pelos métodos de capacidade de carga, *a priori*, e a partir das provas de carga estática, ensaios de carregamento dinâmico ou registros obtidos durante a cravação (função de verossimilhança).

Cabe lembrar que as equações acima são idênticas àquelas resumidas por Vrouwenvelder (1992) e serão também utilizadas nas análises desta dissertação. Como Cabral (2008) apresentou detalhadamente este assunto, o autor recomenda a leitura de Cabral (2008) para um conhecimento mais aprofundado neste tema.

## 2. CASO DE OBRA

### 2.1 Descrição

Os dados utilizados na presente dissertação se referem às fundações do aterro convencional estruturado de um grande empreendimento construído na baixada de Jacarepaguá.

O empreendimento é composto por diversas edificações, sendo o aterro estruturado apoiado em estacas pré-moldadas, executado no entorno das mesmas.

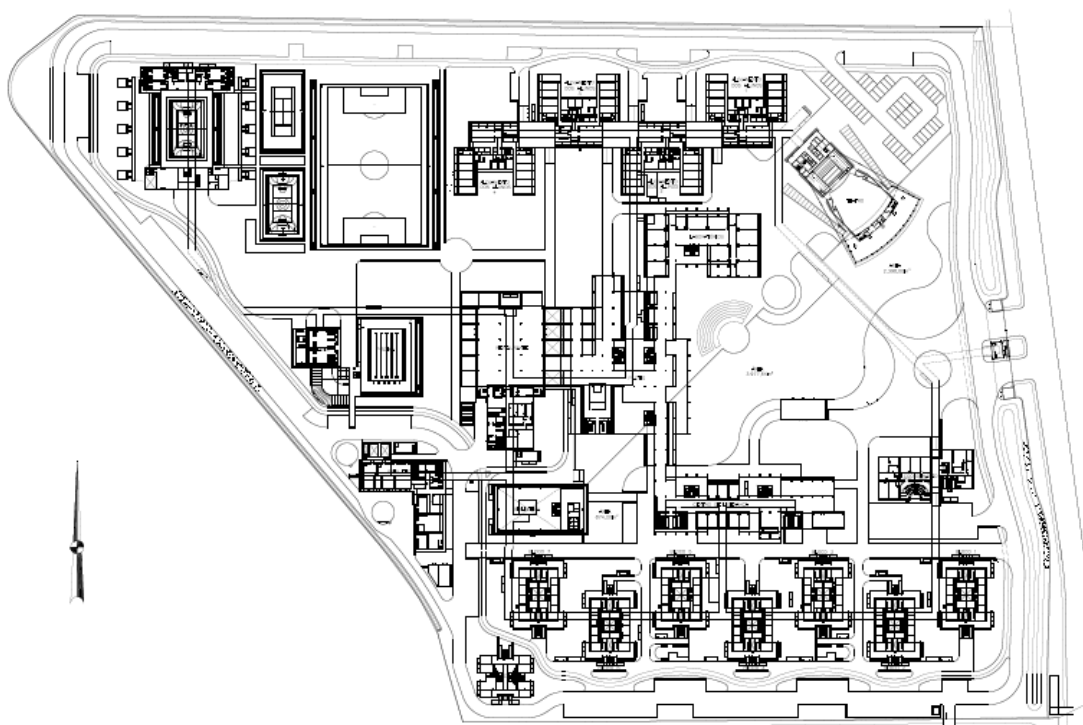


Figura 12 - Empreendimento com aterro estruturado de grande extensão na Baixada de Jacarepaguá

A área de implantação do empreendimento apresenta um perfil geotécnico com espessa camada de argila mole superficial de espessura bastante variável, na faixa de 2,00 até 13,00m de espessura.

A partir do banco de dados da obra, observa-se que a caracterização do solo foi feita a partir de ensaios de campo e de laboratório, incluindo sondagens a percussão e mistas, Vane Tests, Ensaios de Piezocone e Ensaios triaxiais UU.





Borba (2007) descreve o subsolo da região da obra definido em 2005, como composto por camada superficial de 1,0 a 2,0m de turfa seguida por uma camada de argila orgânica muito mole com espessura variando entre 2,0 e 13,0m. Almeida *et al.* (2000) traça o perfil típico da região central da obra na Figura 14. Na Figura 15 tem-se a vista geral da área do empreendimento.

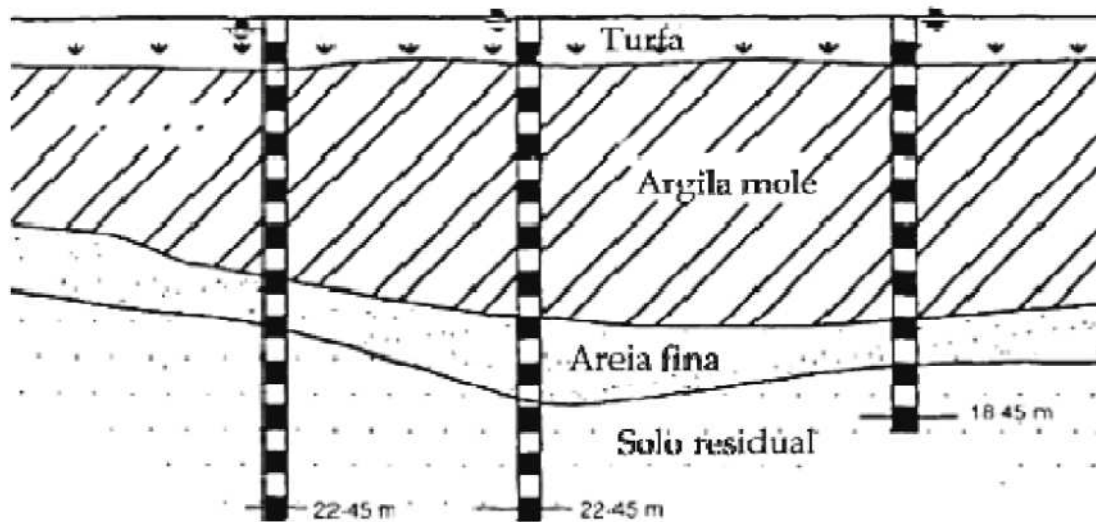


Figura 14 - Perfil típico do subsolo na região central do terreno, Almeida *et al.* (2000)



Figura 15 - Fase inicial da construção, adaptado de Spotti (2006)

### 2.3 Definição de regiões representativas

A partir das sondagens executadas à época da realização do empreendimento, foram definidas regiões representativas, contíguas, cujas sondagens apresentavam similaridades entre si, de forma a separar a área em trechos, onde foram feitas as previsões semi-empíricas, designadas como estimativas *a priori*, com base no perfil representativo (típico) traçado para cada região representativa.

O traçado do perfil representativo utilizou a média do  $N_{SPT}$  para cada profundidade, obtido das  $n$  sondagens relacionadas em cada região representativa. Da mesma forma, foram obtidos o desvio padrão e coeficiente de variação do  $N_{SPT}$  para cada profundidade. As locações das diferentes regiões representativas estão indicadas na Figura 16.

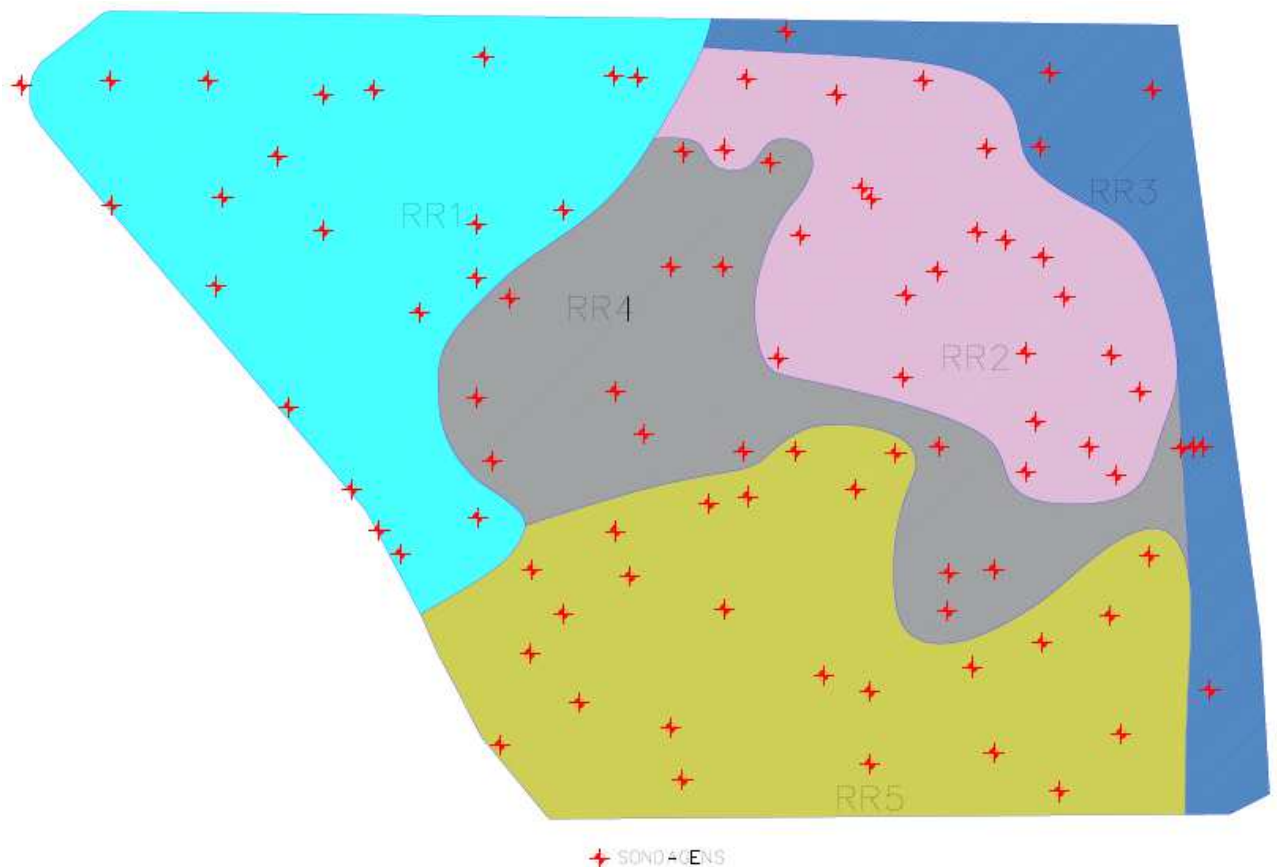


Figura 16 - Regiões representativas

As Figuras 16 à 20 indicam os perfis médios das sondagens de cada uma das cinco regiões representativas, com seus respectivos parâmetros estáticos (média, variância e desvio padrão).

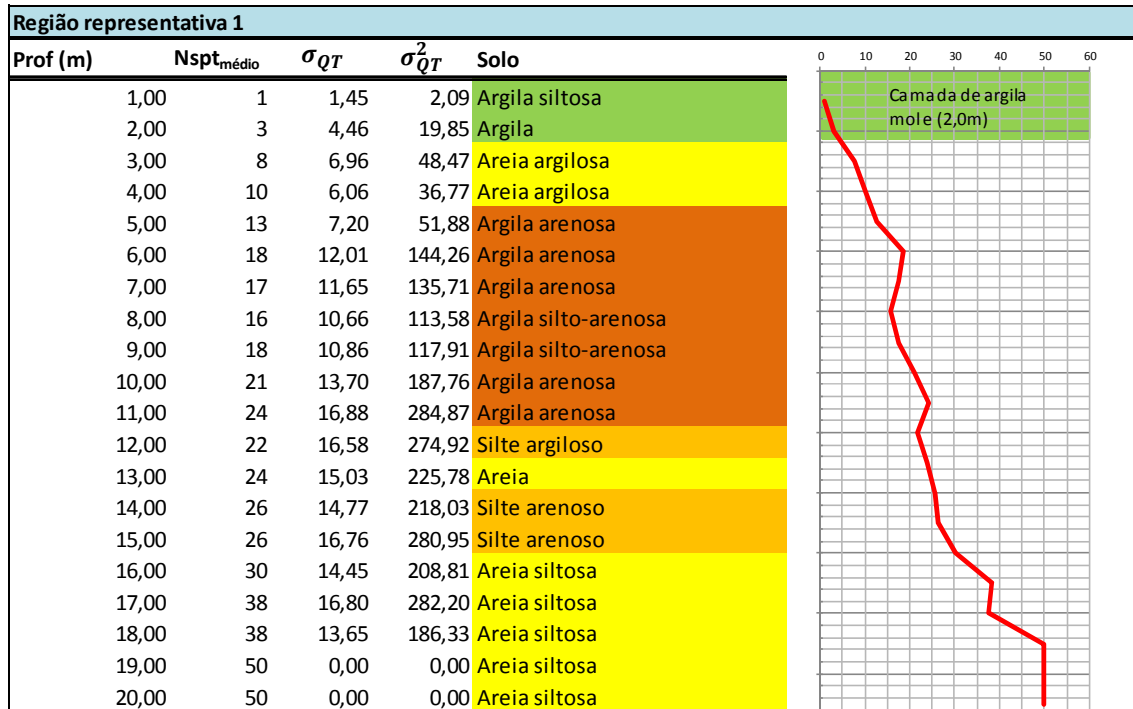


Figura 17 - Perfil da região representativa 1

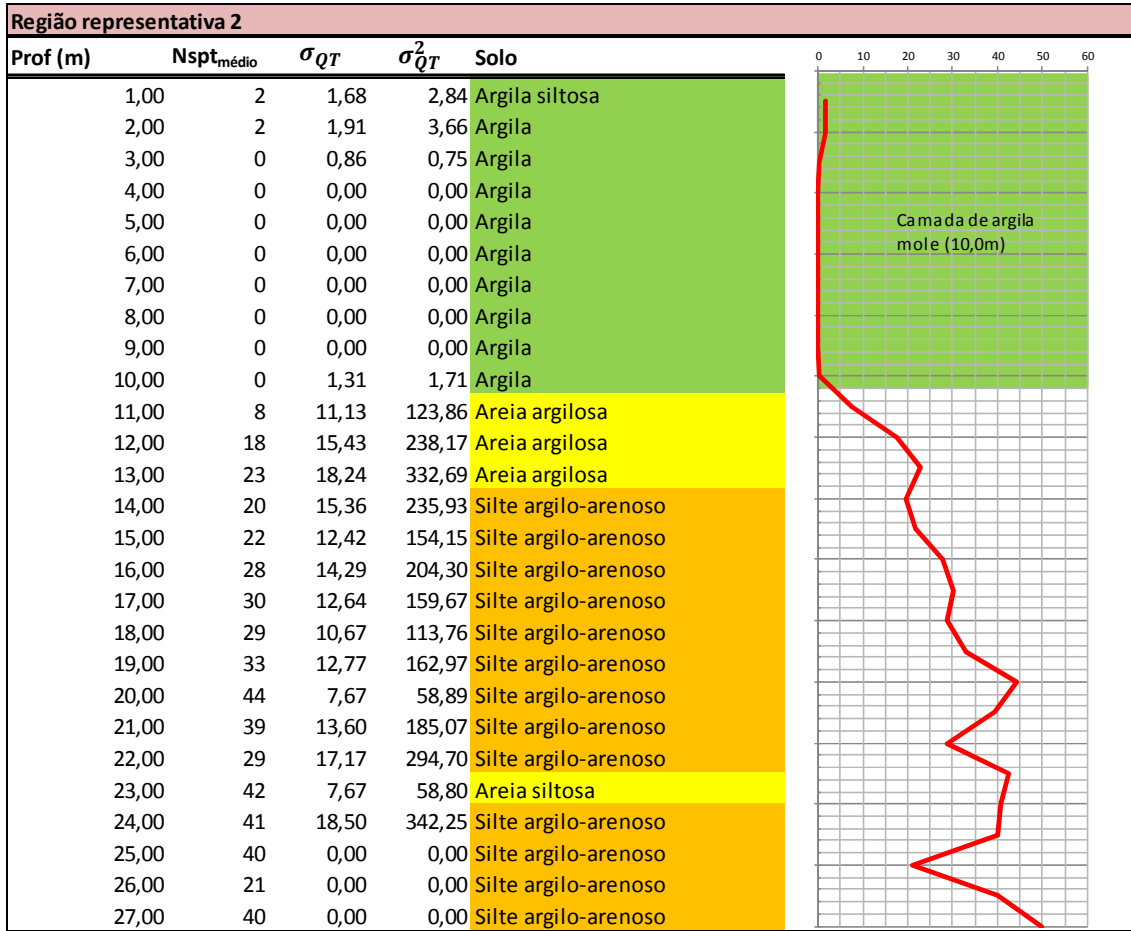


Figura 18 - Perfil da região representativa 2

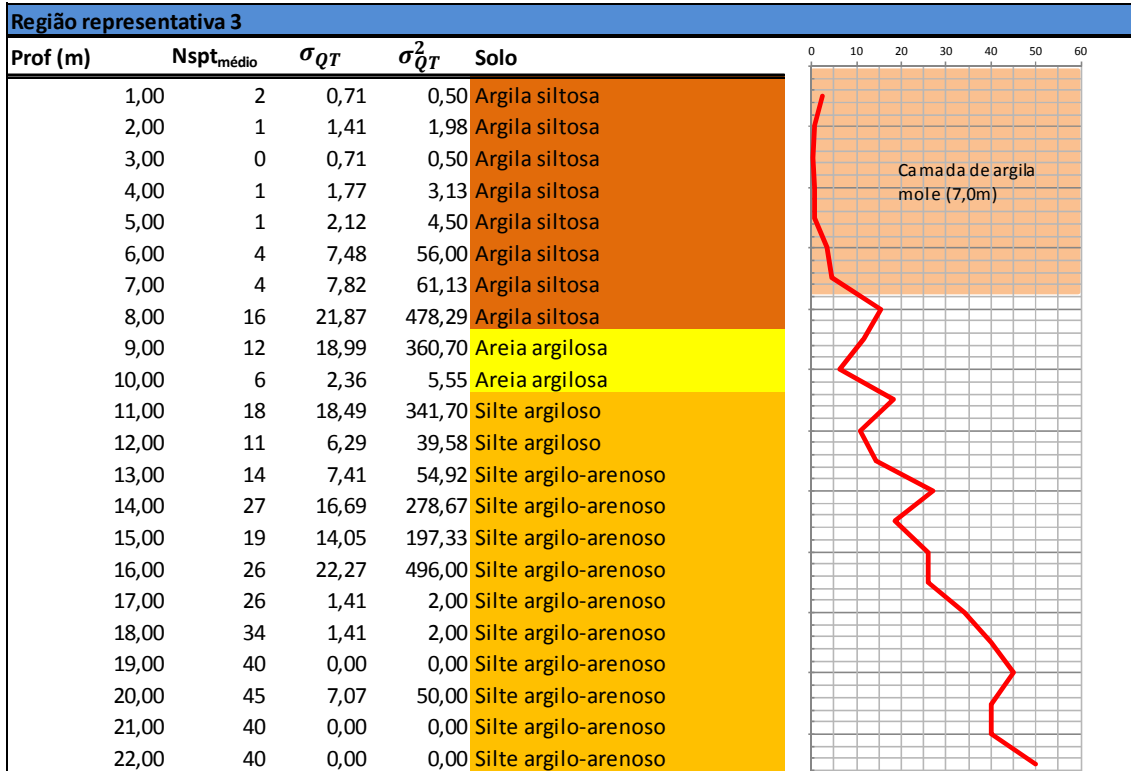


Figura 19 - Perfil da região representativa 3

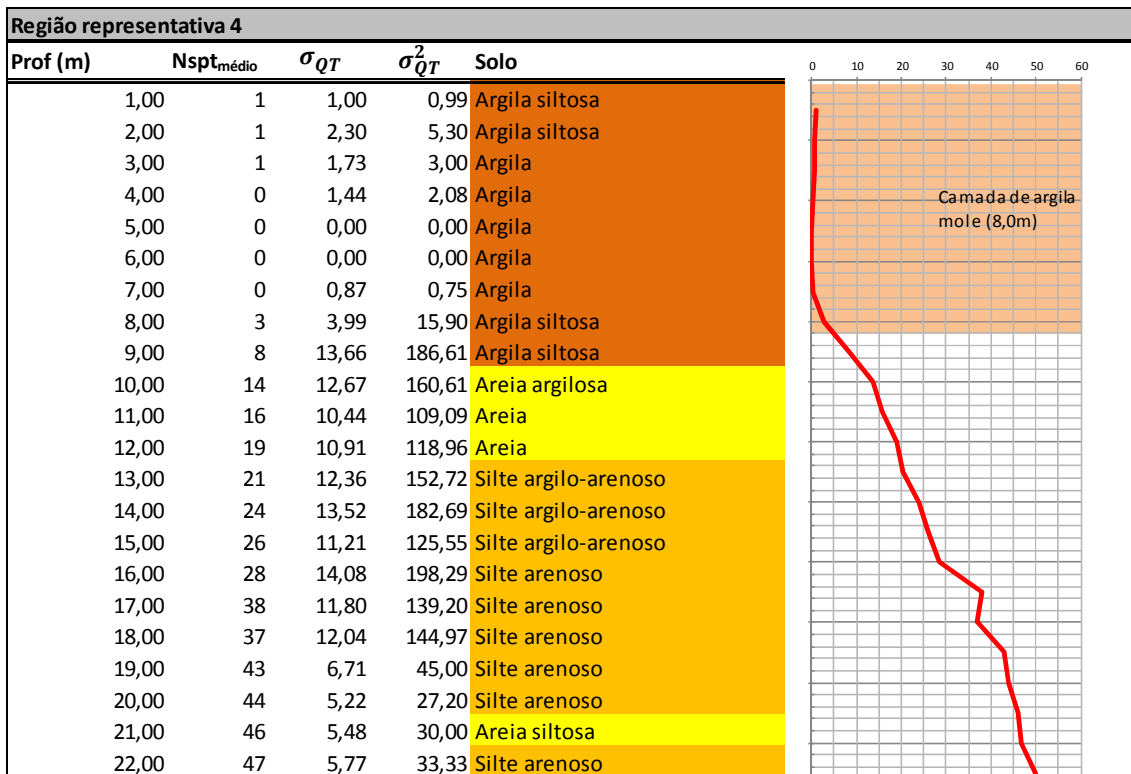


Figura 20 - Perfil da região representativa 4

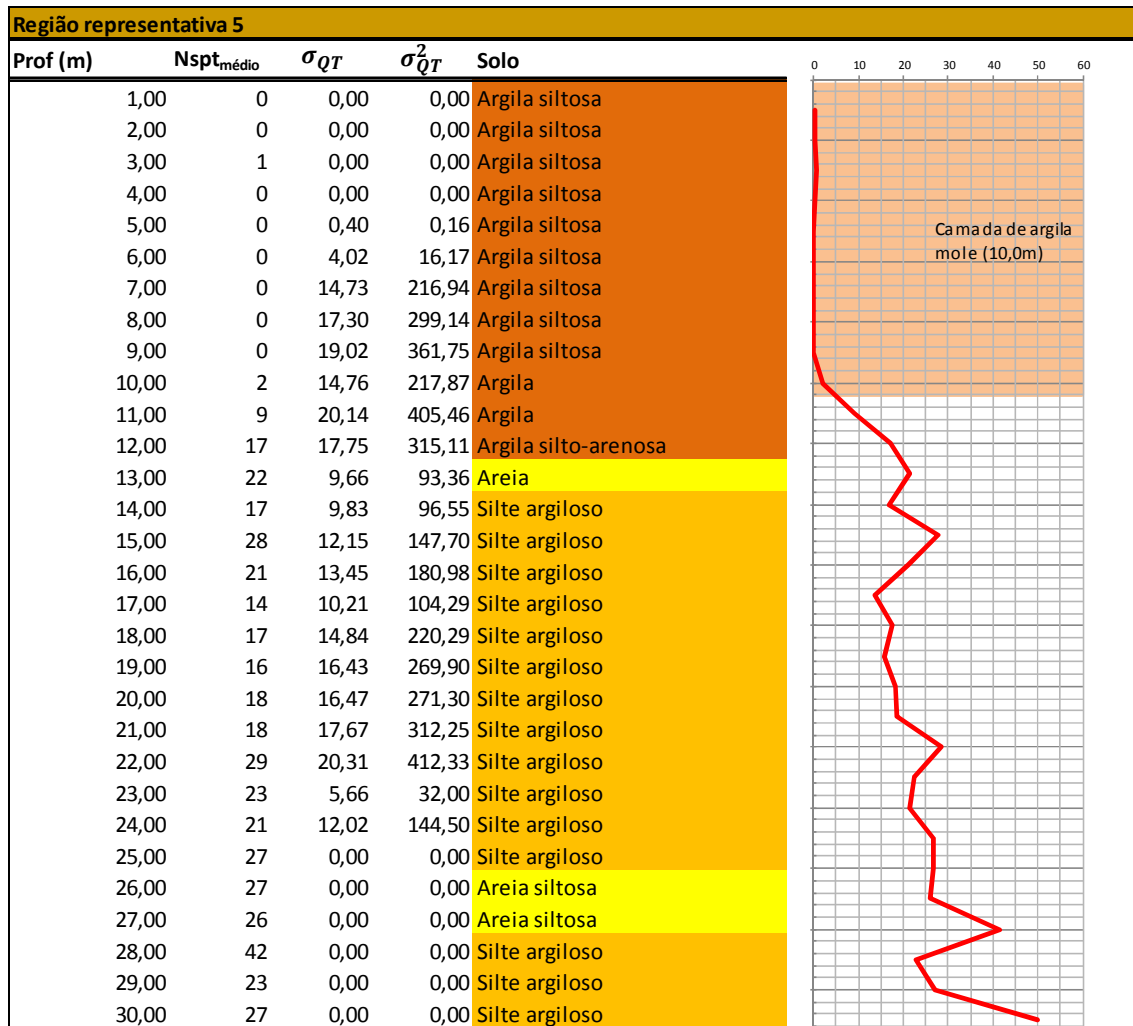


Figura 21 - Perfil da região representativa 5

Em resumo, as regiões representativas apresentaram as características indicadas na tabela 5.

Tabela 5 - Resumo das regiões representativas e o número de estacas ensaiadas.

Região representativa	Qtd. Sondagens	Camada de argila mole (m)	Qtd. Estacas
RR1	20	2,00	1
RR2	23	10,00	20
RR3	8	7,00	11
RR4	12	8,00	2
RR5	25	10,00	
<b>Total</b>	<b>88</b>		<b>34</b>

## **2.4 Tipo de estaca**

As estacas são pré-moldadas de concreto armado protendido de fabricação das empresas Benaton e Cassol, todas com seção transversal de 200x200mm. As emendas dos elementos foram feitas por meio de solda de topo com anéis metálicos.

## **2.5 Controle de estaqueamento**

### **2.5.1 Registros de cravação**

A cravação de todas as estacas da obra gerou boletins de cravação nos quais foram descritas todas as características dos equipamentos de cravação, tais como: peso do martelo, altura de queda, etc, além dos registros da cravação, como número de golpes por metro de estaca cravada, profundidade cravada e nega para os dez golpes finais. Nos boletins de cravação consta ainda o registro gráfico do repique, obtido a partir da colagem de uma folha de papel na estaca cravada e marcação do deslocamento elástico do conjunto estaca/solo com uma caneta.

### **2.5.2 Campanhas de ensaios de carregamento dinâmico**

Parte das estacas cravadas foi selecionada pelo projetista para a realização de ensaios de carregamento dinâmico, visando aferição da capacidade de carga. Segundo Avelino (2006), no referido empreendimento foram realizados 85 ensaios de carregamento dinâmico, sendo 41 analisados pelo método CAPWAP, e 8 provas de carga estática. Os ensaios foram realizados em sua maioria, alguns dias após a cravação da estaca, podendo com isso incorporar os efeitos do set up na capacidade de carga.

Para análise da capacidade de carga foram utilizados pelo autor na presente pesquisa, os resultados de 34 ensaios dinâmicos, os quais foram analisados pelo método CASE (em 34 estacas) e CAPWAP (em algumas estacas, total de 9).

### **2.5.3 Campanhas de prova de carga estática**

Foram realizadas duas campanhas de prova de carga estática em parte das estacas cravadas, previamente selecionadas pelo projetista. Cabe ressaltar que as provas de carga estática foram realizadas até duas vezes a carga de trabalho das estacas (450 kN), ficando muito aquém da capacidade de carga das estacas. Desta forma, estes ensaios não foram considerados na presente dissertação, pois apresentaram um comportamento apenas elástico em todo o trecho instrumentado.



### 3. ESTIMATIVAS PARA APLICAÇÃO DA TEORIA BAYESIANA

O banco de dados para utilização da teoria bayesiana, tanto para as análises individuais das estacas como para análise de um conjunto maior, foi obtido a partir dos registros de todo o material disponível da obra: sondagens, ensaios de campo e laboratório, boletins de cravação e relatório de ensaios de carregamento dinâmico, tendo sido descartadas as provas de carga estáticas, uma vez que elas indicaram um comportamento ainda elástico até a carga máxima de ensaio, não permitindo a extrapolação de valores na ruptura.

Para estimativa *a priori* foram retro analisadas as estacas posicionadas em cada uma das regiões representativas, a partir de seu comprimento cravado, obtido dos boletins de cravação e com a utilização as fórmulas semi-empíricas de Aoki-Velloso (1975) e Decourt-Quaresma (1978).

As funções de máxima verossimilhança foram estimadas pela aplicação das fórmulas dinâmicas de Chellis (1951) modificada por Aoki (1989) e Sorensen-Hansen (1957), conhecida como fórmula dos dinamarqueses, ou *Danish formula*. Nota-se que, na aplicação destas equações, algumas variáveis não são simplesmente obtidas por meio do controle de cravação das estacas (como o valor do quake, parâmetro alfa e eficiência do sistema). O autor da presente pesquisa procurou incluir tais variáveis tanto contemplando sua incerteza, bem como, numa análise mais refinada, ajustando-as aos valores obtidos na própria instrumentação. Embora este segundo procedimento possa ser considerado como não adequado, por incluir, na verossimilhança, ajustes que são apenas conhecidos de ensaios específicos, o autor teve como objetivo vislumbrar diferentes formas de aplicação, visando refinar a atualização bayesiana e comparar os resultados dos diferentes procedimentos de análise.

Desta forma, optou-se por considerar dois procedimentos na obtenção da função de máxima verossimilhança, para aplicação de cada uma das fórmulas dinâmicas adotadas nesta pesquisa. No primeiro procedimento a função de verossimilhança considera apenas os valores obtidos nos boletins de cravação, sendo os valores das variáveis eficiência ( $\eta$ ), quake ( $C_3$ ) e parâmetro alfa ( $\alpha$ ) obtidos a partir da literatura técnica, sendo a eficiência adotada ( $\eta$ ) de 0,70, conforme

Velloso e Lopes (2010), quake ( $C_3$ ) de 2,5mm, conforme Aoki (1986) e parâmetro alfa ( $\alpha$ ) de 0,70, conforme Aoki (1991).

No segundo procedimento, designado como mais refinado pelo autor desta dissertação, a função de verossimilhança foi obtida com utilização também de alguns parâmetros aferidos pelo CAPWAP, obtidos nos relatórios dos ensaios de carregamento dinâmico, cujos resumos são apresentados no Anexo A. A partir da análise destes relatórios, foi possível obter a eficiência do sistema em cada prova de carga, bem como aferir os valores de nega e repique obtidos nos boletins de cravação, a partir da leitura do Dfn e DMX obtidos na instrumentação. O Dfn vem a ser a deformação permanente da estaca ocasionada por 1 golpe correspondente à energia transferida durante o ensaio de carregamento dinâmico, ou seja, a própria nega. Já o DMX é o deslocamento máximo da estaca no mesmo golpe instrumentado. A obtenção do  $C_2$  pode ser feita subtraindo, do valor de DMX, os valores do Dfn e do  $C_3$ , cuja média de 3,25mm foi obtida a partir da interpretação de 8 (oito) ensaios CAPWAP conforme tabela 6, onde ( $Q_T$ ) é a Carga Mobilizada e ( $k$ ) o deslocamento elástico. Os valores aferidos do parâmetro alfa ( $\alpha$ ), para cada estaca, foram obtidos a partir do mecanismo de transferência de carga da estaca, utilizando a fórmula (2.10), conforme sugerido por Aoki (1989), porém com os valores de distribuição de resistências obtidos do ensaio, pela análise CAPWAP. Nas estacas em que não foram realizadas análises CAPWAP, a distribuição de resistência foi obtida pela aplicação do método semi empírico de Aoki e Velloso (1975).

Tabela 6 - Resumo dos dados obtidos do CAPWAP

Estaca	$Q_T$ (kN)	C2 (mm)	$\alpha$	C3 (mm)	k (mm)
E4-S2A	1.000,00	5,22	0,91	6,91	12,13
E25-S1A	1.000,00	13,44	0,89	3	16,44
E61-S1A	1.150,00	15,89	0,89	2,04	17,93
E93-S2A	940,00	9,82	0,88	1,1	10,92
E49-S2A	1.090,00	5,62	0,86	6,06	11,68
E213-5-S3A	1.080,00	11,58	0,8	0,94	12,52
E16-S5A	950,00	12,04	0,76	2,49	14,53
E26-S4E	950,00	10,21	0,77	0,637	10,847
E44-S3D	960,00	10,6	0,81	6,06	16,66
<b>Resultados</b>					
Média $\mu_Q^P$	1.013,33	10,49	0,84	3,25	13,74
Desvio Padrão $\sigma_Q^P$	75,50	3,42	0,06	2,45	2,71
Variância $\sigma_Q^{2,P}$	5.700,00	11,69	0,00	6,01	7,33
Coef. Variação	0,07	0,33	0,07	0,75	0,20

A interpretação dos ensaios CAPWAP que resultaram na tabela 6, é mostrado no Anexo B.

Observa-se, da Tabela 6, que enquanto o coeficiente de variação da resistência mobilizada foi de apenas 7%, o do quake foi de 75% e do deslocamento elástico da estaca de 33%. O deslocamento elástico total, k, soma destes dois valores, teve um coeficiente de variação intermediário, de 20%.

Na Tabela 7 são resumidas as análises elaboradas pelo autor, para melhor acompanhamento do leitor.

Tabela 7 - Resumo dos dados e dos procedimentos utilizados

Função	Metodologia	Autor	Dados	Fonte
A priori	Semi-empírica	Aoki-Velloso (1975)	$N_{spt}$	SPT's, plantas de locação, Região Representativa
			Perfil estratigráfico	
			Comprimento Cravado	Boletim de cravação
		Decourt-Quaresma (1978)	$N_{spt}$	SPT's, plantas de locação, Região Representativa
			Perfil estratigráfico	
			Comprimento Cravado	Boletim de cravação
Verossimilhança (Primeiro procedimento)	Fórmulas dinâmicas	Sorensen-Hansen (1957)	Comprimento Cravado	Boletim de cravação
			Nega	
			Peso Martelo	
			Altura de Queda	Dados Estaca
			Região Estaca	
			Módulo de elasticidade concreto	
		Chellis (1951) modificada por Aoki (1989)	Comprimento Cravado	Boletim de cravação
			Repique	Dados Estaca
			Região Estaca	
			Módulo de elasticidade concreto	
			Parâmetro Alfa	0,70, Aoki (1991)
			Quake (C3)	2,5mm, Aoki (1986)
Verossimilhança (Segundo procedimento)	Fórmulas dinâmicas	Sorensen-Hansen (1957)	Comprimento Cravado	Relatório do ensaio de carga dinâmica
			$D_{fn}$	
			Peso Martelo	
			Altura de Queda	Dados Estaca
			Eficiência	
			Região Estaca	
		Chellis (1951) modificada por Aoki (1989)	Comprimento Cravado	Relatório do ensaio de carga dinâmica
			Repique	Dados Estaca
			Região Estaca	
			Módulo de elasticidade concreto	
			Parâmetro Alfa	Cálculo de alfa utilizando CAPWAP e previsão semi-empírica
			Quake (C3)	3,25m CAPWAP

Estimadas as funções *a priori* e de máxima verossimilhança, as mesmas foram combinadas duas a duas, de forma a se obter as estimativas *a posteriori* a partir da aplicação da teoria bayesiana, para a análise individual das estacas, conforme tabela 8.

Tabela 8 - Resumo das atualizações bayesianas

<i>A priori</i>	Função de verossimilhança		<i>A posteriori</i>
Aoki-Velloso (1975)	Primeiro procedimento	Sorensen-Hansen (1957)	Aoki-Velloso (1975) x Sorensen-Hansen (1957)
		Chellis (1951) mod. Aoki (1991)	Aoki-Velloso (1975) x Chellis (1951) mod. Aoki (1991)
Decourt-Quaresma (1978)		Sorensen-Hansen (1957)	Decourt-Quaresma (1978) x Sorensen-Hansen (1957)
		Chellis (1951) mod. Aoki (1991)	Decourt-Quaresma (1978) x Chellis (1951) mod. Aoki (1991)
Aoki-Velloso (1975)	Segundo procedimento	Sorensen-Hansen (1957)	Aoki-Velloso (1975) x Sorensen-Hansen (1957)
		Chellis (1951) mod. Aoki (1991)	Aoki-Velloso (1975) x Chellis (1951) mod. Aoki (1991)
Decourt-Quaresma (1978)		Sorensen-Hansen (1957)	Decourt-Quaresma (1978) x Sorensen-Hansen (1957)
		Chellis (1951) mod. Aoki (1991)	Decourt-Quaresma (1978) x Chellis (1951) mod. Aoki (1991)

## 4. ANÁLISE DAS ESTACAS ISOLADAS

### 4.1 Generalidades

Conforme descrito no capítulo 1.3 (Estrutura da Dissertação) as análises do presente trabalho foram divididas em dois diferentes enfoques: inicialmente com a análise individual de cada estaca, com a variação estatística dos parâmetros que influenciam na sua capacidade de carga, como elaborado por Cabral (2008), e num segundo com um conjunto de estacas, com a variação estatística dos resultados determinísticos de cada uma das estimativas *a priori*.

No enfoque com a análise individual das estacas, designada também por análise das estacas isoladas, foram procedidas às previsões *a priori*, função de máxima verossimilhança e estimativa *a posteriori*, utilizando a metodologia FOSM (First Order Second Moment). Este enfoque usou a atualização das capacidades de carga obtidas *a priori* por meio de métodos semi-empíricos e com as funções de máxima verossimilhança obtidas com a aplicação das fórmulas dinâmicas para cada uma das estacas, fazendo, posteriormente, a análise de adequação dos resultados obtidos com os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico.

Para aplicação da metodologia FOSM, a variância de cada uma das grandezas presentes nas estimativas foi obtida, para cada estaca, sendo apresentada na tabela 9, de forma esquemática. São também apresentadas, de forma esquemática, as variáveis aleatórias estatisticamente independentes utilizadas para cada metodologia, bem como a forma de obtenção de sua média ( $m$ ), variância ( $\sigma^2$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ).

Tabela 9 - Resumo das variáveis para aplicação da metodologia FOSM

Função	Metodologia	Autor	Variável	Média ( m )	Variância ( s <sup>2</sup> )	Desvio Padrão ( s )
A priori	Semi-empírica	Aoki-Velloso (1975)	N <sub>spt</sub>	Média de N <sub>spt</sub> para cada profundidade, obtida das sondagens de cada Região Representativa	Variância do N <sub>spt</sub> para cada profundidade, obtida das sondagens de cada Região Representativa	Raiz da variância
		Decourt-Quaresma (1978)	N <sub>spt</sub>	Média de N <sub>spt</sub> para cada profundidade, obtida das sondagens de cada Região Representativa	Variância do N <sub>spt</sub> para cada profundidade, obtida das sondagens de cada Região Representativa	Raiz da variância
Verossimilhança (Primeiro procedimento)	Fórmulas dinâmicas	Sorensen-Hansen (1957)	h	Eficiência obtida da literatura, η=0,70, Velloso e Lopes (2016)	Variância da eficiência obtida dos ensaios de carregamento dinâmicos do conjunto de estacas	Raiz da variância
		Chellis (1951) mod. Aoki (1989)	C <sub>3</sub>	Quake obtido da literatura, C <sub>3</sub> =2,5mm, Aoki (1986)	Variância do Quake obtido da interpretação dos ensaios CAPWAP	Raiz da variância
Verossimilhança (Segundo procedimento)	Fórmulas dinâmicas	Sorensen-Hansen (1957)	h	Eficiência média obtida dos ensaios de carregamento dinâmico	Variância da eficiência obtida dos ensaios de carregamento dinâmicos do conjunto de estacas	Raiz da variância
		Chellis (1951) mod. Aoki (1989)	C <sub>3</sub>	Quake médio obtido da interpretação dos ensaios CAPWAP	Variância do Quake obtido da interpretação dos ensaios CAPWAP	Raiz da variância

A fim de se realizar a aferição das estimativas *a posteriori* da capacidade de carga com os resultados obtidos nos ensaios de carregamento dinâmico, foram selecionadas as estacas testadas por ensaio de carregamento dinâmico para as análises das estacas de forma isolada.

O aterro estaqueado foi constituído por mais de nove mil estacas, posicionadas segundo uma malha de estaqueamento separando a obra por setores. Na figura 22 são mostradas as estacas selecionadas para a análise individualizada na presente pesquisa conforme locação em relação aos respectivos setores e regiões representativas.

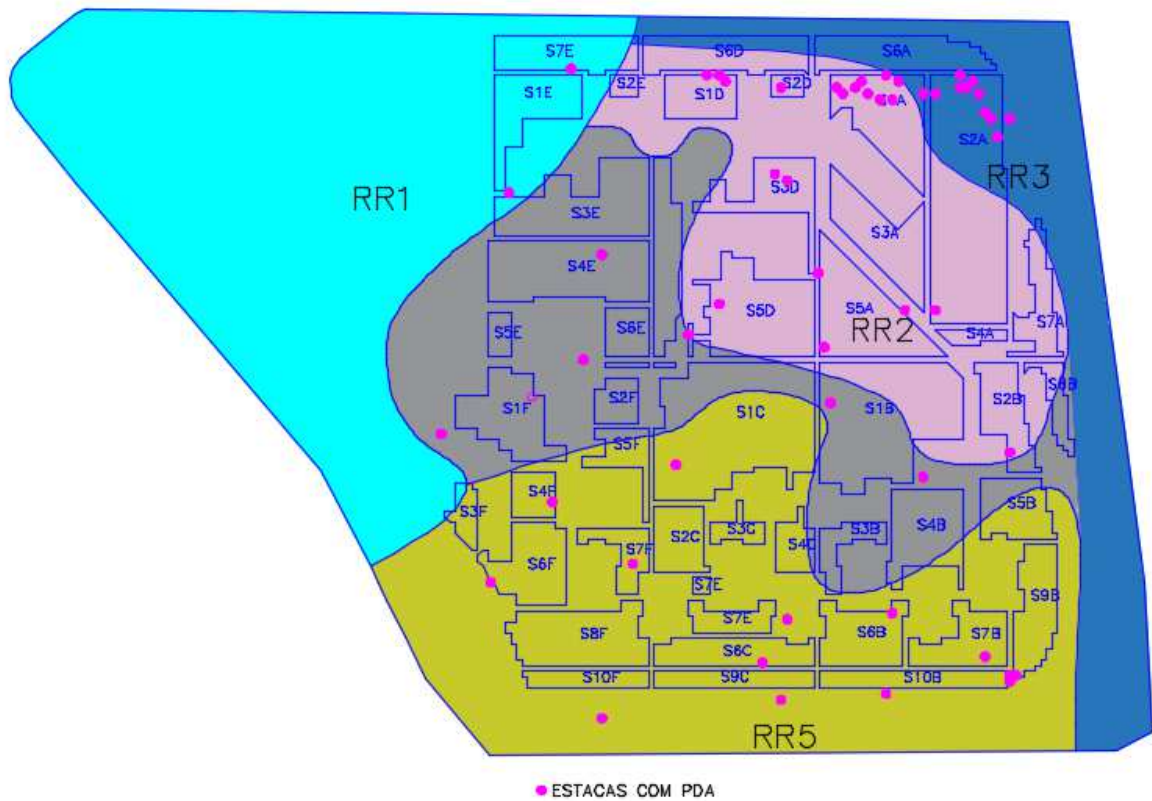


Figura 22 - Planta de localização das estacas (rosa) incluídas na presente pesquisa, conforme setores e regiões representativas

## 4.2 Métodos semi-empíricos (a priori)

Após o traçado das regiões representativas e obtenção dos perfis típicos associados a cada região, foram realizadas as previsões *a priori* pelos métodos semi-empíricos, com a estratigrafia do solo na vertical de cada uma das estacas sendo associada ao perfil típico da região representativa em que cada estaca está localizada.

### 4.2.1 Aoki-Velloso

Para o cálculo dos valores esperados de capacidade carga lateral e ponta ( $\mu_{Ql}$  e  $\mu_{Qp}$ ) e variância ( $\sigma_{Ql}^2$  e  $\sigma_{Qp}^2$ ) foram utilizadas as fórmulas a seguir, cujo desenvolvimento em Série de Taylor (FOSM, first order second moment) para o Método de Aoki-Velloso (1975), é apresentado no Anexo C conforme Alves e Amadori (2012). O valor esperado total da capacidade de carga ( $\mu_{QT}$ ) é calculado a



partir da expressão 5.5, e a variância total ( $\sigma_{Q_T}^2$ ) pela expressão 5.6. O desvio padrão total ( $\sigma_{Q_T}$ ) é obtido a partir da raiz quadrada da variância total e o coeficiente de variação ( $\Omega$ ) pela razão entre desvio padrão total e valor esperado total ( $\sigma_{Q_T}/\mu_{Q_T}$ ). O valor esperado total ( $\mu_{Q_T}$ ) vem a ser a soma entre os valores esperados de capacidade carga lateral e ponta ( $\mu_{Q_l}$  e  $\mu_{Q_p}$ ).

$$\mu_{Q_l} = \frac{\pi \times D \times 1 \times \alpha \times K \times \bar{N}_{SPT}}{F_2} \quad (5.1)$$

$$\sigma_{Q_l}^2 = V[Q_l] \text{ (para cada metro)} = \left( \frac{\pi \times D \times 1 \times \alpha \times K}{F_2} \right)^2 \times V[\bar{N}_{SPT}] \quad (5.2)$$

$$\mu_{Q_p} = \pi \times \frac{D^2}{4} \times \frac{K \times \bar{N}_{SPT}}{F_1} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{Q_p}^2 = \left[ \frac{\pi \times D^2}{4} \right]^2 \times \left[ \frac{K}{F_1} \right]^2 \times V[\bar{N}_{SPT}] \quad (5.4)$$

$$\mu_{Q_T} = \mu_{Q_{l\text{acum}}} + \mu_{Q_p} \quad (5.5)$$

$$\sigma_{Q_T}^2 = \sigma_{Q_{l\text{acum}}}^2 + \sigma_{Q_p}^2 \quad (5.6)$$

Os resultados das análises das estimativas *a priori* da capacidade de carga, assim como seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação para a estimativa *a priori* pelo Método de Aoki-Velloso (1975)

Setor	Estaca	N	E	Área repres.	Compr. Cravado(m)	$\mu_{Qp}$ (kN)	$\mu_{Qt}$ (kN)	$\mu_{QT}$ (kN)	$\sigma_{QT}^2$	$\sigma_{QT}$ (kN)	$\Omega$
1A	10	120	89	AR2	20,60	564,35	1.016,50	1.580,85	45.512,32	213,34	0,13
1A	25	119	85	AR2	17,50	388,22	598,41	986,63	56.035,20	236,72	0,24
1A	30	119	91	AR2	16,70	355,97	475,62	831,59	60.498,44	245,96	0,30
1A	38	118	81	AR2	17,10	388,22	598,41	986,63	56.035,20	236,72	0,24
1A	41	118	84	AR2	15,90	279,30	370,80	650,10	48.638,19	220,54	0,34
1A	57	117	82	AR2	17,00	388,22	598,41	986,63	56.035,20	236,72	0,24
1A	61	117	86	AR2	18,60	366,34	722,91	1.089,25	50.542,93	224,82	0,21
1A	70	117	95	AR3	16,70	332,80	613,29	946,09	121.837,32	349,05	0,37
1A	72	117	97	AR3	16,30	332,80	613,29	946,09	121.837,32	349,05	0,37
1A	81	116	88	AR2	16,60	355,97	475,62	831,59	60.498,44	245,96	0,30
1A	83	116	90	AR2	17,30	388,22	598,41	986,63	56.035,20	236,72	0,24
1B	52	67	80	AR4	17,45	608,00	820,11	1.428,11	63.923,23	252,83	0,18
1D	9	120	60	AR2	15,50	279,30	370,80	650,10	48.638,19	220,54	0,34
1D	11	120	62	AR2	15,90	279,30	370,80	650,10	48.638,19	220,54	0,34
1D	26	119	63	AR2	17,30	388,22	598,41	986,63	56.035,20	236,72	0,24
2A	20	119	103	AR3	15,20	238,98	518,95	757,93	64.054,05	253,09	0,33
2A	32	118	101	AR3	14,90	345,60	422,49	768,09	73.858,85	271,77	0,35
2A	93	114	105	AR3	13,80	182,40	335,37	517,77	32.227,63	179,52	0,35
2A	108	113	106	AR3	15,10	238,98	518,95	757,93	64.054,05	253,09	0,33
2A	110	113	109	AR3	14,50	345,60	422,49	768,09	73.858,85	271,77	0,35
2A	150	110	107	AR3	12,70	110,08	282,57	392,65	26.400,87	162,48	0,41
2D	17	118	72	AR2	16,50	355,97	475,62	831,59	60.498,44	245,96	0,30
3A	208-5	82	92	AR2	16,00	355,97	475,62	831,59	60.498,44	245,96	0,30
3A	213-5	82	97	AR2	16,00	355,97	475,62	831,59	60.498,44	245,96	0,30
3D	30	104	71	AR2	17,00	388,22	598,41	986,63	56.035,20	236,72	0,24
3D	44	103	73	AR2	15,80	279,30	370,80	650,10	48.638,19	220,54	0,34
3E	57	101	28	AR1	17,11	831,23	1.367,17	2.198,40	189.665,69	435,51	0,20
4E	26	91	43	AR4	16,00	454,88	660,68	1.115,56	75.842,01	275,39	0,25
5A	16	88	78	AR2	19,25	424,32	853,37	1.277,69	61.514,61	248,02	0,19
5A	155	76	79	AR2	17,50	388,22	598,41	986,63	56.035,20	236,72	0,24
5D	62	83	62	AR2	17,40	388,22	598,41	986,63	56.035,20	236,72	0,24

Nas estimativas *a priori* pelo método de Aoki-Velloso (1975) três estacas, E4, E49 e E33R, todas localizadas no setor 2A, apresentaram uma previsão de capacidade de carga muito inferior às demais estacas. O comprimento cravado destas estacas está muito aquém das demais estacas, tendo as mesmas alcançado a nega de projeto em profundidades muito menores das previstas com base nas sondagens. Tal fato pode denotar a ocorrência de um trecho de solo com maior resistência que não foi detectado pelas sondagens. Em virtude disto, as três estacas

foram excluídas da análise. A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,13-0,41], com média de 0,28.

#### 4.2.2 Decourt-Quarema

Para o cálculo dos valores esperados de capacidade carga lateral e ponta ( $\mu_{Ql}$  e  $\mu_{Qp}$ ) e variância ( $\sigma_{Ql}^2$  e  $\sigma_{Qp}^2$ ) foram utilizadas as fórmulas a seguir, cujo desenvolvimento por meio da expansão em Série de Taylor (FOSM) para o Método de Decourt-Quaresma (1978), Anexo D, foi desenvolvido por Cabral (2008). O valor esperado total da capacidade de carga ( $\mu_{QT}$ ) é calculado a partir da expressão 5.11, e a variância total ( $\sigma_{QT}^2$ ) pela expressão 5.12. O desvio padrão total ( $\sigma_{QT}$ ) é obtido a partir da raiz quadrada da variância total e o coeficiente de variação ( $\Omega$ ) pela razão entre desvio padrão total e valor esperado total ( $\sigma_{QT}/\mu_{QT}$ ). O valor esperado total ( $\mu_{QT}$ ) vem a ser a soma entre os valores esperados de capacidade carga lateral e ponta ( $\mu_{Ql}$  e  $\mu_{Qp}$ ).

$$\mu_{Ql} = \pi \times D \times 1 \left( \frac{\bar{N}_{SPT}}{0,30} + 10 \right) \quad (5.7)$$

$$\sigma_{Ql}^2 = V[Ql] \text{ (para cada metro)} = [\pi \times D \times l]^2 \times \left( \frac{1}{0,3} \right)^2 \times V[\bar{N}_{SPT}] \quad (5.8)$$

$$\mu_{Qp} = \pi \times \frac{D^2}{4} 10 \times C \times \bar{N}_{SPT} \quad (5.9)$$

$$\sigma_{Qp}^2 = \left[ \frac{\pi \times D^2}{4} \right]^2 \times [10 \times C]^2 \times V[\bar{N}_{SPT}] \quad (5.10)$$

$$\mu_{QT} = \mu_{Ql_{acum}} + \mu_{Qp} \quad (5.11)$$

$$\sigma_{QT}^2 = \sigma_{Ql_{acum}}^2 + \sigma_{Qp}^2 \quad (5.12)$$

Os resultados das análises das estimativas *a priori* da capacidade de carga, assim como seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação para a estimativa *a priori* pelo Método de Decourt-Quaresma (1978)

Setor	Estaca	Área repres.	Compr. Cravado(m)	$\mu_{Qp}$ (kN)	$\mu_{Qt}$ (kN)	$\mu_{QT}$ (kN)	$\sigma_{QT}^2$	$\sigma_{QT}$ (kN)	$\Omega$
1A	10	AR2	20,60	310,85	846,19	1.157,04	16.521,65	128,54	0,11
1A	25	AR2	17,50	231,36	539,89	771,25	20.584,65	143,47	0,19
1A	30	AR2	16,70	213,23	451,01	664,24	22.305,51	149,35	0,22
1A	38	AR2	17,10	231,36	539,89	771,25	20.584,65	143,47	0,19
1A	41	AR2	15,90	184,43	368,85	553,28	17.643,69	132,83	0,24
1A	57	AR2	17,00	231,36	539,89	771,25	20.584,65	143,47	0,19
1A	61	AR2	18,60	245,60	624,21	869,81	18.455,33	135,85	0,16
1A	70	AR3	16,70	188,45	556,32	744,77	48.671,76	220,62	0,30
1A	72	AR3	16,30	188,45	556,32	744,77	48.671,76	220,62	0,30
1A	81	AR2	16,60	213,23	451,01	664,24	22.305,51	149,35	0,22
1A	83	AR2	17,30	231,36	539,89	771,25	20.584,65	143,47	0,19
1B	52	AR4	17,45	344,20	666,64	1.010,84	23.887,97	154,56	0,15
1D	9	AR2	15,50	184,43	368,85	553,28	17.643,69	132,83	0,24
1D	11	AR2	15,90	184,43	368,85	553,28	17.643,69	132,83	0,24
1D	26	AR2	17,30	231,36	539,89	771,25	20.584,65	143,47	0,19
2A	20	AR3	15,20	191,12	478,99	670,11	26.029,98	161,34	0,24
2A	32	AR3	14,90	159,79	421,20	580,99	29.832,05	172,72	0,30
2A	93	AR3	13,80	138,67	341,20	479,87	13.530,42	116,32	0,24
2A	108	AR3	15,10	191,12	478,99	670,11	26.029,98	161,34	0,24
2A	110	AR3	14,50	159,79	421,20	580,99	29.832,05	172,72	0,30
2A	150	AR3	12,70	115,20	295,20	410,40	12.158,57	110,27	0,27
2D	17	AR2	16,50	213,23	451,01	664,24	22.305,51	149,35	0,22
3A	208-5	AR2	16,00	213,23	451,01	664,24	22.305,51	149,35	0,22
3A	213-5	AR2	16,00	213,23	451,01	664,24	22.305,51	149,35	0,22
3D	30	AR2	17,00	231,36	539,89	771,25	20.584,65	143,47	0,19
3D	44	AR2	15,80	184,43	368,85	553,28	17.643,69	132,83	0,24
3E	57	AR1	17,11	565,39	975,49	1.540,88	90.972,82	301,62	0,20
4E	26	AR4	16,00	308,53	557,31	865,84	28.806,67	169,73	0,20
5A	16	AR2	19,25	282,29	720,61	1.002,91	22.764,21	150,88	0,15
5A	155	AR2	17,50	231,36	539,89	771,25	20.584,65	143,47	0,19
5D	62	AR2	17,40	231,36	539,89	771,25	20.584,65	143,47	0,19

Tal como nas estimativas *a priori* pelo método de Aoki-Velloso (1975), na estimativa pelo método de Decourt-Quaresma (1978) três estacas, E4, E49 e E33R, todas localizadas no setor S2A, apresentaram uma previsão de capacidade de carga muito inferior às demais, sendo pertinentes os mesmos comentários anteriores. A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,11-0,30], com média de 0,22.

### 4.3 Estimativas de resistência a partir dos registros de cravação (primeiro procedimento de obtenção da função de verossimilhança)

Os registros de nega e repique observados nos boletins de cravação de cada estaca foram utilizados para a obtenção da distribuição estatística de verossimilhança de capacidade de carga a partir da aplicação das fórmulas dinâmicas de Chellis (1951) modificada por Aoki (1989) e Sorensen-Hansen (1957).

Nota-se que para aplicação de tais equações, algumas informações não são obtidas com a simples observação da cravação, tais como a eficiência, o quake e o parâmetro alfa. No primeiro procedimento, aqui também chamado de estimativa inicial, em que serão utilizados os dados dos boletins de cravação, serão adotados, para estas variáveis, os valores obtidos de literatura, a partir de sugestões de diversos autores.

#### 4.3.1 Fórmulas dinâmicas

##### 4.3.1.1 Chellis

O desenvolvimento das expressões para o valor esperado e a variância da função capacidade de carga, com base na solução aproximada por meio da expansão em Série de Taylor (FOSM, first order second moment) para o Método de Chellis (1951)-Aoki (1989), foi realizado pelo autor, sendo apresentado a seguir.

Tomando as equações 2.8 e 2.9, e sabendo que  $C_2$  é igual a  $k-C_3$ , a resistência mobilizada durante a cravação pela fórmula dinâmica de Chellis (1951) modificada por Aoki(1989) é:

Se  $f_s$  é a função  $y$ , o valor esperado de  $y$  é igual a  $y = \bar{y} = E[f(x)] \cong f(\bar{x})$ .

A resistência mobilizada é dada por:

$$R = (k - C_3) \frac{AE}{\alpha L} \quad (5.13)$$

Sendo o quake  $C_3$  a variável aleatória estatisticamente independente, tem-se como valor esperado da resistência mobilizada:

$$\mu_R = (k - \bar{C}_3) \frac{AE}{\alpha L} \quad (5.14)$$

O valor esperado de  $C_3$  corresponde ao valor médio obtido na literatura (primeiro procedimento) ou a média dos valores calculados na área do empreendimento obtida a partir das análises CAPWAP dos ensaios de carregamento dinâmico (segundo procedimento).

A variância da função é dada por:

$$V[y] = V[f(x)] \cong [f'(\bar{x})]^2 \times V[x] \quad (5.15)$$

Aplicando a expressão 5.15 à resistência mobilizada pela fórmula de Chellis (1951) modificada por Aoki (1989), obtém-se:

$$V[y] = V[f(c_3)] = \left[ \frac{A \times E}{\alpha \times L} \right]^2 \times V[\bar{C}_3] \quad (5.16)$$

e

$$\sigma_{Q_p}^2 = \left[ \frac{A \times E}{\alpha \times L} \right]^2 \times V[\bar{C}_3] \quad (5.17)$$

A variância do parâmetro  $C_3$  foi obtida a partir da interpretação dos ensaios CAPWAP realizados, tanto para o primeiro procedimento quanto para o segundo procedimento conforme tabela 6.

Os resultados das análises do primeiro procedimento utilizando a fórmula dinâmica de Chellis-Aoki (1989) como função de máxima verossimilhança, com a estimativa da resistência durante a cravação das estacas analisadas, assim como seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação, estão apresentados na Tabela 12. Neste primeiro procedimento foram utilizados  $\alpha=0,70$  e  $C_3 = 2,50\text{mm}$ , conforme descrito na tabela 9.

Tabela 12 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação do primeiro procedimento usando a fórmula dinâmica Chellis-Aoki (1989)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	K (mm)	V(C <sub>3</sub> )	$\mu_Q$ (kN)	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q$ (kN)	$\Omega$
1A	10	20,60	11,00	0,000006	707,35	41.618,99	204,01	0,29
1A	25	17,50	9,00	0,000006	636,73	57.669,99	240,15	0,38
1A	30	16,70	6,00	0,000006	359,28	63.327,60	251,65	0,70
1A	38	17,10	12,00	0,000006	952,38	60.399,56	245,76	0,26
1A	41	15,90	14,00	0,000006	1.239,89	69.860,51	264,31	0,21
1A	57	17,00	15,00	0,000006	1.260,50	61.112,23	247,21	0,20
1A	61	18,60	10,00	0,000006	691,24	51.050,51	225,94	0,33
1A	70	16,70	12,00	0,000006	975,19	63.327,60	251,65	0,26
1A	72	16,30	14,00	0,000006	1.209,47	66.473,84	257,83	0,21
1A	81	16,60	13,00	0,000006	1.084,34	64.092,88	253,17	0,23
1A	83	17,30	13,00	0,000006	1.040,46	59.011,11	242,92	0,23
1B	52	17,45	9,00	0,000006	638,56	58.000,95	240,83	0,38
1D	9	15,50	10,00	0,000006	829,49	73.512,74	271,13	0,33
1D	11	15,90	15,00	0,000006	1.347,71	69.860,51	264,31	0,20
1D	26	17,30	15,00	0,000006	1.238,65	59.011,11	242,92	0,20
2A	20	15,20	11,00	0,000006	958,65	76.443,19	276,48	0,29
2A	32	14,90	8,00	0,000006	632,79	79.552,43	282,05	0,45
2A	93	13,80	12,00	0,000006	1.180,12	92.740,15	304,53	0,26
2A	108	15,10	12,00	0,000006	1.078,52	77.459,04	278,31	0,26
2A	110	14,50	10,00	0,000006	886,70	84.002,07	289,83	0,33
2A	150	12,70	10,00	0,000006	1.012,37	109.501,11	330,91	0,33
2D	17	16,50	13,00	0,000006	1.090,91	64.872,12	254,70	0,23
3A	208-5	16,00	7,00	0,000006	482,14	68.989,98	262,66	0,54
3A	213-5	16,00	7,00	0,000006	482,14	68.989,98	262,66	0,54
3D	30	17,00	14,00	0,000006	1.159,66	61.112,23	247,21	0,21
3D	44	15,80	14,00	0,000006	1.247,74	70.747,62	265,98	0,21
3E	57	17,11	13,00	0,000006	1.052,02	60.328,98	245,62	0,23
4E	26	16,00	11,00	0,000006	910,71	68.989,98	262,66	0,29
5A	16	19,25	16,00	0,000006	1.202,23	47.661,15	218,31	0,18
5A	155	17,50	9,00	0,000006	636,73	57.669,99	240,15	0,38
5D	62	17,40	11,00	0,000006	837,44	58.334,77	241,53	0,29

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,18-0,70], com média de 0,30.

#### 4.3.1.2 Sorensen-Hansen

O desenvolvimento das expressões para o valor esperado e a variância da função capacidade de carga, com base na solução aproximada por meio da expansão em Série de Taylor (FOSM) para a fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957), foi realizado pelo autor, sendo apresentado a seguir.

A partir da equação 2.7 se obtém a resistência mobilizada durante a cravação para a fórmula dinâmica de Sorensen e Hansen. Se  $f_s$  é a função  $y$ , o valor esperado de  $y$  é igual a  $y = \bar{y} = E[f(x)] \cong f(\bar{x})$ .

Adotando como variável aleatória a eficiência ( $\eta$ ), tem-se, como valor esperado de  $R_{mob}$ :

$$\mu_{R_{mob}} = \frac{\bar{\eta}Wh}{s + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2\bar{\eta}WhL}{AE}}} \quad (5.18)$$

O valor esperado de  $\eta$  corresponde ao valor médio obtido na literatura (primeiro procedimento) ou obtido pela instrumentação dos ensaios de carregamento dinâmico (segundo procedimento).

A variância da função é dada por:

$$V[y] = V[f(x)] \cong [f'(\bar{x})]^2 \times V[x] \quad (5.19)$$

Para o cálculo da variância da função, observa-se que a derivada da função em relação à  $\eta$  se torna muito complexa, dificultando os cálculos. No entanto, observou-se que os demais parâmetros constantes da equação são conhecidos para cada uma das estacas. Desta forma, o autor procedeu a uma simplificação da equação, com a substituição das variáveis conhecidas por valores numéricos, obtendo as constantes A e B, onde:

$$A = wh \quad (5.20)$$

$$B = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2WhL}{AE_p}} \quad (5.21)$$

A substituição das constantes na equação 2.7 resulta na equação simplificada 5.22:



$$R_{mob} = \frac{\eta A}{s + \sqrt{\eta} B} \quad (5.22)$$

Com a simplificação da função, é realizada a derivação que resulta na variância como:

$$V[y] = V[f(\bar{\eta})] = \left[ \frac{2As + \sqrt{\bar{\eta}} AB}{2s^2 + 4sB\sqrt{\bar{\eta}} + 2B^2\bar{\eta}} \right]^2 \times V[\bar{\eta}] \quad (5.23)$$

$$\sigma_{Q_p}^2 = \left[ \frac{2As + \sqrt{\bar{\eta}} AB}{2s^2 + 4sB\sqrt{\bar{\eta}} + 2B^2\bar{\eta}} \right]^2 \times V[\bar{\eta}] \quad (5.24)$$

A variância do parâmetro  $\eta$  foi obtida a partir dos ensaios de carregamento dinâmicos realizados.

Os resultados das análises do primeiro procedimento utilizando a fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957) como função de máxima verossimilhança, com a estimativa da resistência durante a cravação das estacas analisadas, assim como seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação, estão apresentados na Tabela 13. Neste primeiro procedimento foi utilizado  $\eta=0,70$ , conforme tabela 9.

Tabela 13 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação para a fórmula Dinâmica de Sorensen-Hansen (1957)

Setor	Estaca	N	E	Área repres.	Compr. Cravado(m)	S (mm)	W (kN)	h (m)	V[ $\bar{\Gamma}$ ]	$\mu_Q$ (kN)	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q$ (kN)	$\Omega$
1A	10	120	89	AR2	20,60	0,0004	26,30	0,30	0,02	758,11	6.819,82	82,58	0,11
1A	25	119	85	AR2	17,50	0,0003	25,40	0,30	0,02	816,03	7.767,31	88,13	0,11
1A	30	119	91	AR2	16,70	0,0002	25,40	0,30	0,02	847,71	8.157,29	90,32	0,11
1A	38	118	81	AR2	17,10	0,0008	25,40	0,30	0,02	765,85	7.773,35	88,17	0,12
1A	41	118	84	AR2	15,90	0,0003	25,40	0,30	0,02	854,18	8.545,48	92,44	0,11
1A	57	117	82	AR2	17,00	0,0003	25,40	0,30	0,02	827,39	7.994,82	89,41	0,11
1A	61	117	86	AR2	18,60	0,0012	25,40	0,30	0,02	699,13	6.980,23	83,55	0,12
1A	70	117	95	AR3	16,70	0,0003	26,60	0,30	0,02	854,84	8.523,92	92,33	0,11
1A	72	117	97	AR3	16,30	0,0002	26,60	0,30	0,02	878,38	8.752,68	93,56	0,11
1A	81	116	88	AR2	16,60	0,0005	25,40	0,30	0,02	811,38	8.128,18	90,16	0,11
1A	83	116	90	AR2	17,30	0,0003	25,40	0,30	0,02	820,52	7.856,74	88,64	0,11
1B	52	67	80	AR4	17,45	0,0000	25,60	0,30	0,02	859,88	7.884,08	88,79	0,10
1D	9	120	60	AR2	15,50	0,0002	26,50	0,30	0,02	898,30	9.168,86	95,75	0,11
1D	11	120	62	AR2	15,90	0,0005	26,50	0,30	0,02	846,79	8.853,46	94,09	0,11
1D	26	119	63	AR2	17,30	0,0005	26,50	0,30	0,02	814,36	8.144,12	90,24	0,11
2A	20	119	103	AR3	15,20	0,0002	26,30	0,30	0,02	903,29	9.278,74	96,33	0,11
2A	32	118	101	AR3	14,90	0,0003	26,60	0,30	0,02	902,58	9.549,02	97,72	0,11
2A	93	114	105	AR3	13,80	0,0001	26,30	0,30	0,02	962,97	10.235,74	101,17	0,11
2A	108	113	106	AR3	15,10	0,0004	26,30	0,30	0,02	877,39	9.284,77	96,36	0,11
2A	110	113	109	AR3	14,50	0,0002	26,30	0,30	0,02	924,12	9.725,71	98,62	0,11
2A	150	110	107	AR3	12,70	0,0002	26,30	0,30	0,02	985,18	11.100,76	105,36	0,11
2D	17	118	72	AR2	16,50	0,0002	25,40	0,30	0,02	852,67	8.255,97	90,86	0,11
3A	208-5	82	92	AR2	16,00	0,0000	25,00	0,50	0,02	1.145,64	13.995,08	118,30	0,10
3A	213-5	82	97	AR2	16,00	0,0000	25,00	0,50	0,02	1.145,64	13.995,08	118,30	0,10
3D	30	104	71	AR2	17,00	0,0006	26,50	0,30	0,02	809,05	8.250,29	90,83	0,11
3D	44	103	73	AR2	15,80	0,0005	26,50	0,30	0,02	849,26	8.908,89	94,39	0,11
3E	57	101	28	AR1	17,11	0,0005	26,70	0,30	0,02	821,85	8.296,41	91,08	0,11
4E	26	91	43	AR4	16,00	0,0001	26,70	0,30	0,02	902,33	8.963,40	94,68	0,10
5A	16	88	78	AR2	19,25	0,0003	26,50	0,30	0,02	797,16	7.370,83	85,85	0,11
5A	155	76	79	AR2	17,50	0,0000	27,00	0,30	0,02	881,82	8.291,49	91,06	0,10
5D	62	83	62	AR2	17,40	0,0001	25,40	0,30	0,02	844,17	7.841,04	88,55	0,10

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,10-0,12] com média de 0,11.

Os resultados obtidos no primeiro procedimento apontam para um coeficiente de variação muito maior para os valores de resistência mobilizada calculados com a fórmula de Chellis-Aoki (1989).

#### **4.4 Estimativas de resistência contemplando também os registros dos ECD (segundo procedimento de obtenção da função de verossimilhança)**

##### **4.4.1 Generalidades**

Para o segundo procedimento de obtenção da função de verossimilhança, os registros de nega e repique observados nos boletins de cravação serão substituídos pelos valores ( $s = D_{fn}$  e  $k = DMX - D_{fn}$ ) dos relatórios dos ensaios de carregamento dinâmico.

Tendo em vista que a maior parte dos ECD's foi realizada dias após a cravação das estacas, sua comparação com os resultados obtidos das fórmulas dinâmicas pode contemplar diferenças relativas aos ganhos de resistência por set-up. A utilização dos valores de  $D_{fn}$  e  $DMX$  para o cálculo da resistência mobilizada já contempla este ganho de resistência, diferente das leituras dos boletins de cravação.

O segundo procedimento utilizou o resultado da análise CASE dos ECD's para uma altura de queda de 60cm. No entanto, nem todas as estacas utilizadas no primeiro procedimento foram ensaiadas com esta altura de queda. Em virtude disto, a análise do segundo procedimento foi realizada com um número menor de estacas (25 estacas).

##### **4.4.2 Fórmulas dinâmicas**

###### **4.4.2.1 Chellis-Aoki (1989)**

Os resultados das análises do segundo procedimento utilizando o Chellis-Aoki (Aoki, 1989) como função de máxima verossimilhança da resistência, assim como seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação, estão apresentados na Tabela 14. Nesta análise, o valor de  $\alpha$  é obtido a partir da aplicação da equação 2.12 com a distribuição de carga obtida pela interpretação dos ensaios CAPWAP. Nas estacas não contempladas com a análise CAPWAP, o valor de  $\alpha$  foi obtido pela estimativa semi-empírica pelo método de Aoki-Velloso (1975). O valor médio de  $C_3$  e sua variância são mostrados na tabela 6, também obtidos a partir da interpretação dos ensaios CAPWAP.

Tabela 14 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação do segundo procedimento usando a fórmula dinâmica de Chellis-Aoki (1989)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	Dfn (mm)	DMX (mm)	$\alpha$	$\bar{C}_3$ (mm)	$V(C_3)$	$\mu_Q$ (kN)	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q$ (kN)	$\Omega$
1A	10	20,60	0,60	14,60	0,83	3,25	0,000006	754,58	29.602,71	172,05	0,23
1A	25	17,50	0,10	12,20	0,87	3,25	0,000006	697,65	37.334,25	193,22	0,28
1A	30	16,70	0,50	11,80	0,89	3,25	0,000006	650,05	39.175,01	197,93	0,30
1A	38	17,10	0,00	14,40	0,87	3,25	0,000006	899,49	39.101,31	197,74	0,22
1A	41	15,90	0,50	13,60	0,89	3,25	0,000006	835,40	43.216,32	207,89	0,25
1A	57	17,00	1,00	16,20	0,88	3,25	0,000006	958,67	38.668,64	196,64	0,21
1A	61	18,60	1,00	15,10	0,85	3,25	0,000006	823,64	34.622,49	186,07	0,23
1A	70	16,70	0,50	15,10	0,87	3,25	0,000006	937,55	40.996,86	202,48	0,22
1A	81	16,60	0,20	15,10	0,89	3,25	0,000006	946,37	39.648,42	199,12	0,21
1A	83	17,30	0,30	15,20	0,87	3,25	0,000006	928,96	38.202,46	195,45	0,21
1B	52	17,45	0,80	13,00	0,88	3,25	0,000006	699,51	36.699,98	191,57	0,27
1D	9	15,50	0,60	13,40	0,90	3,25	0,000006	821,63	44.470,67	210,88	0,26
1D	26	17,30	0,40	15,70	0,87	3,25	0,000006	960,85	38.202,46	195,45	0,20
2A	20	15,20	0,80	11,90	0,77	3,25	0,000006	805,00	63.176,19	251,35	0,31
2A	32	14,90	0,10	12,40	0,82	3,25	0,000006	888,99	57.972,47	240,77	0,27
2A	108	15,10	0,60	15,90	0,79	3,25	0,000006	1.212,32	60.815,46	246,61	0,20
2A	150	12,70	0,50	11,20	0,81	3,25	0,000006	869,23	81.779,52	285,97	0,33
2D	17	16,50	0,30	11,60	0,89	3,25	0,000006	657,93	40.130,46	200,33	0,30
3A	208-5	16,00	0,70	11,70	0,89	3,25	0,000006	653,21	42.677,81	206,59	0,32
3A	213-5	16,00	0,50	11,50	0,89	3,25	0,000006	653,21	42.677,81	206,59	0,32
3D	44	15,80	0,80	11,50	0,90	3,25	0,000006	628,81	42.797,94	206,88	0,33
4E	26	16,00	2,10	12,40	0,83	3,25	0,000006	637,18	49.071,11	221,52	0,35
5A	16	19,25	0,80	13,70	0,84	3,25	0,000006	716,25	33.098,02	181,93	0,25
5A	155	17,50	1,50	15,60	0,87	3,25	0,000006	855,29	37.334,25	193,22	0,23
5D	62	17,40	0,70	13,20	0,85	3,25	0,000006	750,62	39.562,68	198,90	0,26

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,20-0,35], com média de 0,26.

A análise comparativa entre os resultados obtidos entre o primeiro e o segundo procedimento serão realizadas no item 5.5.

#### 4.4.2.2 Sorensen-Hansen

Os resultados das análises do segundo procedimento utilizando a fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957) como função de máxima verossimilhança, assim como seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação, estão apresentados na Tabela 15. Nesta análise o valor esperado e a variância de  $\eta$  são obtidos dos ensaios de carregamento dinâmico.

Tabela 15 - Valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação do segundo procedimento para a fórmula Dinâmica de Sorensen-Hansen (1957)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	Dfn (m)	$\bar{\eta}$	W (kN)	h (m)	$V[\bar{\eta}]$	$\mu_Q$ (kN)	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q$ (kN)	$\Omega$
1A	10	20,60	0,0006	0,49	26,60	0,60	0,02	886,62	16.677,70	129,14	0,15
1A	25	17,50	0,0001	0,49	25,40	0,60	0,02	995,51	18.916,34	137,54	0,14
1A	30	16,70	0,0005	0,49	26,60	0,60	0,02	989,76	20.598,54	143,52	0,15
1A	38	17,10	0,0000	0,49	25,40	0,60	0,02	1.020,77	19.365,79	139,16	0,14
1A	41	15,90	0,0005	0,49	25,40	0,60	0,02	988,14	20.643,28	143,68	0,15
1A	57	17,00	0,0010	0,49	25,40	0,60	0,02	899,70	18.911,74	137,52	0,15
1A	61	18,60	0,0010	0,49	25,40	0,60	0,02	864,75	17.324,21	131,62	0,15
1A	70	16,70	0,0005	0,49	26,60	0,60	0,02	989,76	20.598,54	143,52	0,15
1A	81	16,60	0,0002	0,49	25,40	0,60	0,02	1.007,90	19.919,69	141,14	0,14
1A	83	17,30	0,0003	0,49	25,40	0,60	0,02	974,88	19.082,54	138,14	0,14
1B	52	17,45	0,0008	0,49	25,60	0,60	0,02	915,19	18.762,30	136,98	0,15
1D	9	15,50	0,0006	0,49	26,50	0,60	0,02	1.009,50	22.018,31	148,39	0,15
1D	26	17,30	0,0004	0,49	26,50	0,60	0,02	983,93	19.867,90	140,95	0,14
2A	20	15,20	0,0008	0,49	26,60	0,60	0,02	994,59	22.340,39	149,47	0,15
2A	32	14,90	0,0001	0,49	26,60	0,60	0,02	1.103,19	23.265,80	152,53	0,14
2A	108	15,10	0,0006	0,49	26,30	0,60	0,02	1.017,56	22.422,29	149,74	0,15
2A	150	12,70	0,0005	0,49	26,30	0,60	0,02	1.117,66	26.714,51	163,45	0,15
2D	17	16,50	0,0003	0,49	25,40	0,60	0,02	997,29	20.004,86	141,44	0,14
3A	208-5	16,00	0,0007	0,49	25,00	0,60	0,02	951,51	20.034,15	141,54	0,15
3A	213-5	16,00	0,0005	0,49	25,00	0,60	0,02	976,95	20.189,59	142,09	0,15
3D	44	15,80	0,0008	0,49	26,50	0,60	0,02	975,41	21.425,24	146,37	0,15
4E	26	16,00	0,0021	0,49	27,50	0,60	0,02	853,26	20.236,54	142,26	0,17
5A	16	19,25	0,0008	0,49	26,50	0,60	0,02	892,14	17.644,38	132,83	0,15
5A	155	17,50	0,0015	0,49	27,00	0,60	0,02	868,58	19.033,59	137,96	0,16
5D	62	17,40	0,0007	0,49	25,40	0,60	0,02	923,79	18.744,21	136,91	0,15

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,14-0,17], com média de 0,15.

Assim como no primeiro procedimento, os resultados obtidos no segundo procedimento apontam para um coeficiente de variação maior para os valores de resistência mobilizada calculados com a fórmula de Chellis-Aoki (1989) em relação aos valores calculados pela fórmula de Sorensen-Hansen (1957).

#### 4.5 Comparação entre o primeiro e segundo procedimento para a obtenção da função de Verossimilhança

A seguir são apresentadas na Tabela 16 as distribuições estatísticas da função de verossimilhança obtidas com os dois diferentes procedimentos para cada uma das estacas analisadas de forma isolada. O objetivo de tal comparação é aferir

a influência, na análise da função de verossimilhança, do conhecimento prévio dos resultados dos ECDs na redução da incerteza de algumas variáveis.

Tabela 16 - Comparação entre o primeiro e segundo procedimento na avaliação da distribuição estatística da função de verossimilhança utilizando a fórmula de Chellis- Aoki (1989)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	Primeiro Procedimento		Segundo Procedimento	
			$\mu_Q$ (kN)	$\Omega$	$\mu_Q$ (kN)	$\Omega$
1A	10	20,60	707,35	0,29	754,58	0,23
1A	25	17,50	636,73	0,38	697,65	0,28
1A	30	16,70	359,28	0,70	650,05	0,30
1A	38	17,10	952,38	0,26	899,49	0,22
1A	41	15,90	1.239,89	0,21	835,40	0,25
1A	57	17,00	1.260,50	0,20	958,67	0,21
1A	61	18,60	691,24	0,33	823,64	0,23
1A	70	16,70	975,19	0,26	937,55	0,22
1A	81	16,60	1.084,34	0,23	946,37	0,21
1A	83	17,30	1.040,46	0,23	928,96	0,21
1B	52	17,45	638,56	0,38	699,51	0,27
1D	9	15,50	829,49	0,33	821,63	0,26
1D	26	17,30	1.238,65	0,20	960,85	0,20
2A	20	15,20	958,65	0,29	805,00	0,31
2A	32	14,90	632,79	0,45	888,99	0,27
2A	108	15,10	1.078,52	0,26	1.212,32	0,20
2A	150	12,70	1.012,37	0,33	869,23	0,33
2D	17	16,50	1.090,91	0,23	657,93	0,30
3A	208-5	16,00	482,14	0,54	653,21	0,32
3A	213-5	16,00	482,14	0,54	653,21	0,32
3D	44	15,80	1.247,74	0,21	628,81	0,33
4E	26	16,00	910,71	0,29	637,18	0,35
5A	16	19,25	1.202,23	0,18	716,25	0,25
5A	155	17,50	636,73	0,38	855,29	0,23
5D	62	17,40	837,44	0,29	750,62	0,26

A maior parte dos valores esperados obtidos no primeiro procedimento é maior que os valores esperados obtidos no segundo procedimento, enquanto os coeficientes de variação apresentam-se, em geral, ligeiramente menores para o segundo procedimento. No item 5.7 os valores obtidos serão comparados e analisados, de forma a observar os que apresentaram, em média, melhor adequação aos resultados dos ensaios.

A seguir é apresentada na Tabela 17 a comparação entre os dois procedimentos para a verossimilhança pela fórmula de Sorensen-Hansen (1957).

Tabela 17 - Comparação entre o primeiro e segundo procedimento na avaliação da distribuição estatística da função de verossimilhança utilizando a fórmula de Sorensen-Hansen (1957)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	Primeiro Procedimento		Segundo Procedimento	
			$\mu_Q$ (kN)	$\Omega$	$\mu_Q$ (kN)	$\Omega$
1A	10	20,60	758,11	0,11	886,62	0,15
1A	25	17,50	816,03	0,11	995,51	0,14
1A	30	16,70	847,71	0,11	989,76	0,15
1A	38	17,10	765,85	0,12	1.020,77	0,14
1A	41	15,90	854,18	0,11	988,14	0,15
1A	57	17,00	827,39	0,11	899,70	0,15
1A	61	18,60	699,13	0,12	864,75	0,15
1A	70	16,70	854,84	0,11	989,76	0,15
1A	81	16,60	811,38	0,11	1.007,90	0,14
1A	83	17,30	820,52	0,11	974,88	0,14
1B	52	17,45	859,88	0,10	915,19	0,15
1D	9	15,50	898,30	0,11	1.009,50	0,15
1D	26	17,30	814,36	0,11	983,93	0,14
2A	20	15,20	903,29	0,11	994,59	0,15
2A	32	14,90	902,58	0,11	1.103,19	0,14
2A	108	15,10	877,39	0,11	1.017,56	0,15
2A	150	12,70	985,18	0,11	1.117,66	0,15
2D	17	16,50	852,67	0,11	997,29	0,14
3A	208-5	16,00	1.145,64	0,10	951,51	0,15
3A	213-5	16,00	1.145,64	0,10	976,95	0,15
3D	44	15,80	849,26	0,11	975,41	0,15
4E	26	16,00	902,33	0,10	853,26	0,17
5A	16	19,25	797,16	0,11	892,14	0,15
5A	155	17,50	881,82	0,10	868,58	0,16
5D	62	17,40	844,17	0,10	923,79	0,15

Neste caso a maior parte dos valores esperados obtidos no primeiro procedimento é menor que os valores esperados obtidos no segundo procedimento, enquanto os coeficientes de variação apresentam-se, em geral, ligeiramente maiores para o segundo procedimento.

No item 5.7 os valores obtidos serão comparados e analisados, de forma a observar os que apresentaram, em média, melhor adequação aos resultados dos ensaios.

#### 4.6 Atualização da capacidade de carga (*a posteriori*)

##### 4.6.1 Primeiro procedimento de obtenção da função de verossimilhança

##### 4.6.1.1 Aoki-Velloso (*a priori*) x Chellis-Aoki (*verossimilhança*)

A seguir são indicados, para cada uma das estacas consideradas de forma isolada, os resultados da atualização utilizando a estimativa *a priori* pelo método de Aoki e Velloso (1975), e adotando o primeiro procedimento para a obtenção da função de verossimilhança, com o emprego da fórmula dinâmica de Chellis-Aoki (1989). Estes resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Atualização pela teoria Bayesiana, primeiro procedimento, estimativa *a priori* pelo modelo de Aoki-Velloso (1975) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Chellis- Aoki (1989)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	"A PRIORI"				VEROSSIMILHANÇA				"A POSTERIORI"			
			$\mu_Q$ (kN)	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q$ (kN)	$\Omega$	$\mu_Q$ (kN)	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q$ (kN)	$\Omega$	$\mu_Q$ (kN)	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q$ (kN)	$\Omega$
1A	10	20,6	1.580,85	45.512,32	213,34	0,13	707,35	41.618,99	204,01	0,29	1.124,59	21.739,34	147,44	0,13
1A	25	17,5	986,63	56.035,20	236,72	0,24	636,73	57.669,99	240,15	0,38	814,20	28.420,42	168,58	0,21
1A	30	16,7	831,59	60.498,44	245,96	0,30	359,28	63.327,60	251,65	0,70	600,83	30.940,35	175,90	0,29
1A	38	17,1	986,63	56.035,20	236,72	0,24	952,38	60.399,56	245,76	0,26	970,15	29.067,79	170,49	0,18
1A	41	15,9	650,10	48.638,19	220,54	0,34	1.239,89	69.860,51	264,31	0,21	892,18	28.674,48	169,34	0,19
1A	57	17	986,63	56.035,20	236,72	0,24	1.260,50	61.112,23	247,21	0,20	1.117,63	29.231,85	170,97	0,15
1A	61	18,6	1.089,25	50.542,93	224,82	0,21	691,24	51.050,51	225,94	0,33	891,24	25.397,73	159,37	0,18
1A	70	16,7	946,09	121.837,32	349,05	0,37	975,19	63.327,60	251,65	0,26	965,24	41.669,15	204,13	0,21
1A	72	16,3	946,09	121.837,32	349,05	0,37	1.209,47	66.473,84	257,83	0,21	1.116,50	43.008,57	207,39	0,19
1A	81	16,6	831,59	60.498,44	245,96	0,30	1.084,34	64.092,88	253,17	0,23	954,32	31.121,91	176,41	0,18
1A	83	17,3	986,63	56.035,20	236,72	0,24	1.040,46	59.011,11	242,92	0,23	1.012,85	28.742,33	169,54	0,17
1B	52	17,45	1.428,11	63.923,23	252,83	0,18	638,56	58.000,95	240,83	0,38	1.014,16	30.409,13	174,38	0,17
1D	9	15,5	650,10	48.638,19	220,54	0,34	829,49	73.512,74	271,13	0,33	721,53	29.271,38	171,09	0,24
1D	11	15,9	650,10	48.638,19	220,54	0,34	1.347,71	69.860,51	264,31	0,20	936,43	28.674,48	169,34	0,18
1D	26	17,3	986,63	56.035,20	236,72	0,24	1.238,65	59.011,11	242,92	0,20	1.109,38	28.742,33	169,54	0,15
2A	20	15,2	757,93	64.054,05	253,09	0,33	958,65	76.443,19	276,48	0,29	849,44	34.851,19	186,68	0,22
2A	32	14,9	768,09	73.858,85	271,77	0,35	632,79	79.552,43	282,05	0,45	702,95	38.299,99	195,70	0,28
2A	93	13,8	517,77	32.227,63	179,52	0,35	1.180,12	92.740,15	304,53	0,26	688,58	23.916,53	154,65	0,22
2A	108	15,1	757,93	64.054,05	253,09	0,33	1.078,52	77.459,04	278,31	0,26	903,04	35.060,82	187,25	0,21
2A	110	14,5	768,09	73.858,85	271,77	0,35	886,70	84.002,07	289,83	0,33	823,58	39.302,29	198,25	0,24
2A	150	12,7	392,65	26.400,87	162,48	0,41	1.012,37	109.501,11	330,91	0,33	513,04	21.272,13	145,85	0,28
2D	17	16,5	831,59	60.498,44	245,96	0,30	1.090,91	64.872,12	254,70	0,23	956,73	31.304,50	176,93	0,18
3A	208-5	16	831,59	60.498,44	245,96	0,30	482,14	68.989,98	262,66	0,54	668,32	32.232,89	179,54	0,27
3A	213-5	16	831,59	60.498,44	245,96	0,30	482,14	68.989,98	262,66	0,54	668,32	32.232,89	179,54	0,27
3D	30	17	986,63	56.035,20	236,72	0,24	1.159,66	61.112,23	247,21	0,21	1.069,40	29.231,85	170,97	0,16
3D	44	15,8	650,10	48.638,19	220,54	0,34	1.247,74	70.747,62	265,98	0,21	893,58	28.822,82	169,77	0,19
3E	57	17,11	2.198,40	189.665,69	435,51	0,20	1.052,02	60.328,98	245,62	0,23	1.328,67	45.770,32	213,94	0,16
4E	26	16	1.115,56	75.842,01	275,39	0,25	910,71	68.989,98	262,66	0,29	1.008,29	36.126,95	190,07	0,19
5A	16	19,25	1.277,69	61.514,61	248,02	0,19	1.202,23	47.661,15	218,31	0,18	1.235,17	26.854,47	163,87	0,13
5A	155	17,5	986,63	56.035,20	236,72	0,24	636,73	57.669,99	240,15	0,38	814,20	28.420,42	168,58	0,21
5D	62	17,4	986,63	56.035,20	236,72	0,24	837,44	58.334,77	241,53	0,29	913,54	28.580,93	169,06	0,19

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,13-0,29], com média de 0,20.



#### 4.6.1.2 Aoki-Velloso (a priori) x Sorensen-Hansen (verossimilhança)

Em seguida são indicados, para cada uma das estacas consideradas de forma isolada, os resultados da atualização utilizando a estimativa *a priori* pelo método de Aoki e Velloso (1975), e adotando o primeiro procedimento para a obtenção da função de verossimilhança, com o emprego da fórmula dinâmica de Danish, Sorensen-Hansen (1957). Esses resultados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Atualização pela teoria Bayesiana, primeiro procedimento, estimativa *a priori* Aoki-Velloso (1975) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	"A PRIORI"				VEROSSIMILHANÇA				"A POSTERIORI"			
			$\mu_Q$ (kN)	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q$ (kN)	$\Omega$	$\mu_Q$ (kN)	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q$ (kN)	$\Omega$	$\mu_Q$ (kN)	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q$ (kN)	$\Omega$
1A	10	20,6	1.580,85	45.512,32	213,34	0,13	758,11	6.819,82	82,58	0,11	865,33	5.931,07	77,01	0,09
1A	25	17,5	986,63	56.035,20	236,72	0,24	816,03	7.767,31	88,13	0,11	836,80	6.821,72	82,59	0,10
1A	30	16,7	831,59	60.498,44	245,96	0,30	847,71	8.157,29	90,32	0,11	845,79	7.188,09	84,78	0,10
1A	38	17,1	986,63	56.035,20	236,72	0,24	765,85	7.773,35	88,17	0,12	792,75	6.826,38	82,62	0,10
1A	41	15,9	650,10	48.638,19	220,54	0,34	854,18	8.545,48	92,44	0,11	823,69	7.268,45	85,26	0,10
1A	57	17	986,63	56.035,20	236,72	0,24	827,39	7.994,82	89,41	0,11	847,28	6.996,58	83,65	0,10
1A	61	18,6	1.089,25	50.542,93	224,82	0,21	699,13	6.980,23	83,55	0,12	746,47	6.133,20	78,31	0,10
1A	70	16,7	946,09	121.837,32	349,05	0,37	854,84	8.523,92	92,33	0,11	860,81	7.966,56	89,26	0,10
1A	72	16,3	946,09	121.837,32	349,05	0,37	878,38	8.752,68	93,56	0,11	882,92	8.166,04	90,37	0,10
1A	81	16,6	831,59	60.498,44	245,96	0,30	811,38	8.128,18	90,16	0,11	813,77	7.165,47	84,65	0,10
1A	83	17,3	986,63	56.035,20	236,72	0,24	820,52	7.856,74	88,64	0,11	840,95	6.890,60	83,01	0,10
1B	52	17,45	1.428,11	63.923,23	252,83	0,18	859,88	7.884,08	88,79	0,10	922,27	7.018,45	83,78	0,09
1D	9	15,5	650,10	48.638,19	220,54	0,34	898,30	9.168,86	95,75	0,11	858,93	7.714,57	87,83	0,10
1D	11	15,9	650,10	48.638,19	220,54	0,34	846,79	8.853,46	94,09	0,11	816,50	7.490,07	86,55	0,11
1D	26	17,3	986,63	56.035,20	236,72	0,24	814,36	8.144,12	90,24	0,11	836,22	7.110,66	84,32	0,10
2A	20	15,2	757,93	64.054,05	253,09	0,33	903,29	9.278,74	96,33	0,11	884,90	8.104,71	90,03	0,10
2A	32	14,9	768,09	73.858,85	271,77	0,35	902,58	9.549,02	97,72	0,11	887,18	8.455,79	91,96	0,10
2A	93	13,8	517,77	32.227,63	179,52	0,35	962,97	10.235,74	101,17	0,11	855,66	7.768,43	88,14	0,10
2A	108	15,1	757,93	64.054,05	253,09	0,33	877,39	9.284,77	96,36	0,11	862,26	8.109,31	90,05	0,10
2A	110	14,5	768,09	73.858,85	271,77	0,35	924,12	9.725,71	98,62	0,11	905,96	8.594,05	92,70	0,10
2A	150	12,7	392,65	26.400,87	162,48	0,41	985,18	11.100,76	105,36	0,11	809,79	7.814,85	88,40	0,11
2D	17	16,5	831,59	60.498,44	245,96	0,30	852,67	8.255,97	90,86	0,11	850,13	7.264,60	85,23	0,10
3A	208-5	16	831,59	60.498,44	245,96	0,30	1.145,64	13.995,08	118,30	0,10	1.086,64	11.365,83	106,61	0,10
3A	213-5	16	831,59	60.498,44	245,96	0,30	1.145,64	13.995,08	118,30	0,10	1.086,64	11.365,83	106,61	0,10
3D	30	17	986,63	56.035,20	236,72	0,24	809,05	8.250,29	90,83	0,11	831,84	7.191,46	84,80	0,10
3D	44	15,8	650,10	48.638,19	220,54	0,34	849,26	8.908,89	94,39	0,11	818,42	7.529,70	86,77	0,11
3E	57	17,11	2.198,40	189.665,69	435,51	0,20	821,85	8.296,41	91,08	0,11	879,54	7.948,71	89,16	0,10
4E	26	16	1.115,56	75.842,01	275,39	0,25	902,33	8.963,40	94,68	0,10	924,87	8.016,03	89,53	0,10
5A	16	19,25	1.277,69	61.514,61	248,02	0,19	797,16	7.370,83	85,85	0,11	848,58	6.582,14	81,13	0,10
5A	155	17,5	986,63	56.035,20	236,72	0,24	881,82	8.291,49	91,06	0,10	895,33	7.222,74	84,99	0,09
5D	62	17,4	986,63	56.035,20	236,72	0,24	844,17	7.841,04	88,55	0,10	861,66	6.878,52	82,94	0,10

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,09-0,11], com média de 0,10.

Comparando os resultados das funções a posteriori pode-se notar que atualização bayesiana utilizando como função de verossimilhança a resistência

mobilizada calculada pela fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957) ocasiona resultados de coeficiente de variação muito menores que a atualização pela fórmula de Chellis-Aoki (1989).

No item 5.7 os resultados serão comparados e interpretados.

#### **4.6.1.3 Decourt-Quarema (a priori) x Chellis-Aoki (verossimilhança)**

A seguir são indicados, para cada uma das estacas consideradas de forma isolada, os resultados da atualização utilizando a estimativa *a priori* pelo método de Decourt Quaresma (1978), e adotando o primeiro procedimento para a obtenção da função de verossimilhança, com o emprego da fórmula dinâmica de Chellis-Aoki (1989). Estes resultados são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Atualização pela teoria Bayesiana, primeiro procedimento, estimativa *a priori* pelo modelo de cálculo de Decourt-Quaresma (1978) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Chellis-Aoki (1989)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	"A PRIORI"				VEROSSIMILHANÇA				"A POSTERIORI"			
			$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$
1A	10	20,6	1.157,04	16.521,65	128,54	0,11	707,35	41.618,99	204,01	0,29	1.029,25	11.826,74	108,75	0,11
1A	25	17,5	771,25	20.584,65	143,47	0,19	636,73	57.669,99	240,15	0,38	735,87	15.169,92	123,17	0,17
1A	30	16,7	664,24	22.305,51	149,35	0,22	359,28	63.327,60	251,65	0,70	584,80	16.495,43	128,43	0,22
1A	38	17,1	771,25	20.584,65	143,47	0,19	952,38	60.399,56	245,76	0,26	817,29	15.352,42	123,90	0,15
1A	41	15,9	553,28	17.643,69	132,83	0,24	1.239,89	69.860,51	264,31	0,21	691,72	14.086,15	118,69	0,17
1A	57	17	771,25	20.584,65	143,47	0,19	1.260,50	61.112,23	247,21	0,20	894,53	15.398,07	124,09	0,14
1A	61	18,6	869,81	18.455,33	135,85	0,16	691,24	51.050,51	225,94	0,33	822,40	13.555,04	116,43	0,14
1A	70	16,7	744,77	48.671,76	220,62	0,30	975,19	63.327,60	251,65	0,26	844,91	27.520,39	165,89	0,20
1A	72	16,3	744,77	48.671,76	220,62	0,30	1.209,47	66.473,84	257,83	0,21	941,20	28.098,33	167,63	0,18
1A	81	16,6	664,24	22.305,51	149,35	0,22	1.084,34	64.092,88	253,17	0,23	772,70	16.546,89	128,63	0,17
1A	83	17,3	771,25	20.584,65	143,47	0,19	1.040,46	59.011,11	242,92	0,23	840,87	15.261,15	123,54	0,15
1B	52	17,45	1.010,84	23.887,97	154,56	0,15	638,56	58.000,95	240,83	0,38	902,24	16.919,56	130,08	0,14
1D	9	15,5	553,28	17.643,69	132,83	0,24	829,49	73.512,74	271,13	0,33	606,74	14.228,68	119,28	0,20
1D	11	15,9	553,28	17.643,69	132,83	0,24	1.347,71	69.860,51	264,31	0,20	713,46	14.086,15	118,69	0,17
1D	26	17,3	771,25	20.584,65	143,47	0,19	1.238,65	59.011,11	242,92	0,20	892,13	15.261,15	123,54	0,14
2A	20	15,2	670,11	26.029,98	161,34	0,24	958,65	76.443,19	276,48	0,29	743,40	19.417,91	139,35	0,19
2A	32	14,9	580,99	29.832,05	172,72	0,30	632,79	79.552,43	282,05	0,45	595,11	21.696,06	147,30	0,25
2A	93	13,8	479,87	13.530,42	116,32	0,24	1.180,12	92.740,15	304,53	0,26	569,02	11.807,72	108,66	0,19
2A	108	15,1	670,11	26.029,98	161,34	0,24	1.078,52	77.459,04	278,31	0,26	772,83	19.482,81	139,58	0,18
2A	110	14,5	580,99	29.832,05	172,72	0,30	886,70	84.002,07	289,83	0,33	661,10	22.014,09	148,37	0,22
2A	150	12,7	410,40	12.158,57	110,27	0,27	1.012,37	109.501,11	330,91	0,33	470,56	10.943,45	104,61	0,22
2D	17	16,5	664,24	22.305,51	149,35	0,22	1.090,91	64.872,12	254,70	0,23	773,41	16.598,36	128,83	0,17
3A	208-5	16	664,24	22.305,51	149,35	0,22	482,14	68.989,98	262,66	0,54	619,75	16.855,78	129,83	0,21
3A	213-5	16	664,24	22.305,51	149,35	0,22	482,14	68.989,98	262,66	0,54	619,75	16.855,78	129,83	0,21
3D	30	17	771,25	20.584,65	143,47	0,19	1.159,66	61.112,23	247,21	0,21	869,12	15.398,07	124,09	0,14
3D	44	15,8	553,28	17.643,69	132,83	0,24	1.247,74	70.747,62	265,98	0,21	691,90	14.121,85	118,84	0,17
3E	57	17,11	1.540,88	90.972,82	301,62	0,20	1.052,02	60.328,98	245,62	0,23	1.246,94	36.273,84	190,46	0,15
4E	26	16	865,84	28.806,67	169,73	0,20	910,71	68.989,98	262,66	0,29	879,06	20.321,47	142,55	0,16
5A	16	19,25	1.002,91	22.764,21	150,88	0,15	1.202,23	47.661,15	218,31	0,18	1.067,34	15.405,93	124,12	0,12
5A	155	17,5	771,25	20.584,65	143,47	0,19	636,73	57.669,99	240,15	0,38	735,87	15.169,92	123,17	0,17
5D	62	17,4	771,25	20.584,65	143,47	0,19	837,44	58.334,77	241,53	0,29	788,52	15.215,53	123,35	0,16

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,11-0,25], com média de 0,17.

#### 4.6.1.4 Decourt-Quaresma (a priori) x Sorensen-Hansen (verossimilhança)

Em seguida são indicados, para cada uma das estacas consideradas de forma isolada, os resultados da atualização utilizando a estimativa *a priori* pelo método de Decourt-Quaresma (1978), e adotando o primeiro procedimento para a

obtenção da função de verossimilhança, com o emprego da fórmula dinâmica de Danish, Sorensen-Hansen (1957). Estes resultados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Atualização pela teoria Bayesiana, primeiro procedimento, estimativa *a priori* Decourt-Quaresma (1978) e função de verossimilhança fórmula dinâmica Sorensen-Hansen (1957)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	"A PRIORI"				VEROSSIMILHANÇA				"A POSTERIORI"			
			$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$
1A	10	20,6	1.157,04	16.521,65	128,54	0,11	758,11	6.819,82	82,58	0,11	874,67	4.827,23	69,48	0,08
1A	25	17,5	771,25	20.584,65	143,47	0,19	816,03	7.767,31	88,13	0,11	803,77	5.639,38	75,10	0,09
1A	30	16,7	664,24	22.305,51	149,35	0,22	847,71	8.157,29	90,32	0,11	798,58	5.972,94	77,28	0,10
1A	38	17,1	771,25	20.584,65	143,47	0,19	765,85	7.773,35	88,17	0,12	767,33	5.642,56	75,12	0,10
1A	41	15,9	553,28	17.643,69	132,83	0,24	854,18	8.545,48	92,44	0,11	756,00	5.757,10	75,88	0,10
1A	57	17	771,25	20.584,65	143,47	0,19	827,39	7.994,82	89,41	0,11	811,69	5.758,35	75,88	0,09
1A	61	18,6	869,81	18.455,33	135,85	0,16	699,13	6.980,23	83,55	0,12	745,97	5.064,66	71,17	0,10
1A	70	16,7	744,77	48.671,76	220,62	0,30	854,84	8.523,92	92,33	0,11	838,44	7.253,59	85,17	0,10
1A	72	16,3	744,77	48.671,76	220,62	0,30	878,38	8.752,68	93,56	0,11	858,02	7.418,59	86,13	0,10
1A	81	16,6	664,24	22.305,51	149,35	0,22	811,38	8.128,18	90,16	0,11	772,08	5.957,32	77,18	0,10
1A	83	17,3	771,25	20.584,65	143,47	0,19	820,52	7.856,74	88,64	0,11	806,91	5.686,37	75,41	0,09
1B	52	17,45	1.010,84	23.887,97	154,56	0,15	859,88	7.884,08	88,79	0,10	897,34	5.927,69	76,99	0,09
1D	9	15,5	553,28	17.643,69	132,83	0,24	898,30	9.168,86	95,75	0,11	780,32	6.033,46	77,68	0,10
1D	11	15,9	553,28	17.643,69	132,83	0,24	846,79	8.853,46	94,09	0,11	748,72	5.895,27	76,78	0,10
1D	26	17,3	771,25	20.584,65	143,47	0,19	814,36	8.144,12	90,24	0,11	802,14	5.835,40	76,39	0,10
2A	20	15,2	670,11	26.029,98	161,34	0,24	903,29	9.278,74	96,33	0,11	842,01	6.840,39	82,71	0,10
2A	32	14,9	580,99	29.832,05	172,72	0,30	902,58	9.549,02	97,72	0,11	824,60	7.233,60	85,05	0,10
2A	93	13,8	479,87	13.530,42	116,32	0,24	962,97	10.235,74	101,17	0,11	754,91	5.827,36	76,34	0,10
2A	108	15,1	670,11	26.029,98	161,34	0,24	877,39	9.284,77	96,36	0,11	822,89	6.843,67	82,73	0,10
2A	110	14,5	580,99	29.832,05	172,72	0,30	924,12	9.725,71	98,62	0,11	839,75	7.334,54	85,64	0,10
2A	150	12,7	410,40	12.158,57	110,27	0,27	985,18	11.100,76	105,36	0,11	710,86	5.802,80	76,18	0,11
2D	17	16,5	664,24	22.305,51	149,35	0,22	852,67	8.255,97	90,86	0,11	801,76	6.025,68	77,63	0,10
3A	208-5	16	664,24	22.305,51	149,35	0,22	1.145,64	13.995,08	118,30	0,10	960,05	8.599,51	92,73	0,10
3A	213-5	16	664,24	22.305,51	149,35	0,22	1.145,64	13.995,08	118,30	0,10	960,05	8.599,51	92,73	0,10
3D	30	17	771,25	20.584,65	143,47	0,19	809,05	8.250,29	90,83	0,11	798,24	5.889,71	76,74	0,10
3D	44	15,8	553,28	17.643,69	132,83	0,24	849,26	8.908,89	94,39	0,11	749,95	5.919,79	76,94	0,10
3E	57	17,11	1.540,88	90.972,82	301,62	0,20	821,85	8.296,41	91,08	0,11	881,94	7.603,04	87,20	0,10
4E	26	16	865,84	28.806,67	169,73	0,20	902,33	8.963,40	94,68	0,10	893,67	6.836,25	82,68	0,09
5A	16	19,25	1.002,91	22.764,21	150,88	0,15	797,16	7.370,83	85,85	0,11	847,49	5.567,97	74,62	0,09
5A	155	17,5	771,25	20.584,65	143,47	0,19	881,82	8.291,49	91,06	0,10	850,07	5.910,67	76,88	0,09
5D	62	17,4	771,25	20.584,65	143,47	0,19	844,17	7.841,04	88,55	0,10	824,06	5.678,14	75,35	0,09

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,08-0,10], com média de 0,10.

Novamente se observa que o resultado das funções a posteriori obtidas a partir da função de verossimilhança que utiliza a fórmula de Sorensen-Hansen (1957) ocasiona valores de variância, desvio padrão e coeficientes de variação menores que a função a posteriori atualizada pela função de verossimilhança que utiliza a fórmula de Chellis-Aoki (1989).

No item 5.7 os resultados serão comparados e interpretados.

## 4.6.2 Segundo procedimento de obtenção da função de verossimilhança

### 4.6.2.1 Aoki-Velloso (*a priori*) x Chellis-Aoki (*verossimilhança*)

A seguir são indicados, para cada uma das estacas consideradas de forma isolada, os resultados da atualização utilizando a estimativa *a priori* pelo método de Aoki e Velloso (1975), e adotando o segundo procedimento para a obtenção da função de verossimilhança, com o emprego da fórmula dinâmica de Chellis-Aoki (1989). Estes resultados são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Atualização pela teoria Bayesiana, segundo procedimento, estimativa *a priori* pelo modelo de Aoki-Velloso (1975) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Chellis- Aoki (1989)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	"A PRIORI"				VEROSSIMILHANÇA				"A POSTERIORI"			
			$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$
1A	10	20,6	1.580,85	45.512,32	213,34	0,13	754,58	29.602,71	172,05	0,23	1.080,21	17.936,33	133,93	0,12
1A	25	17,5	986,63	56.035,20	236,72	0,24	697,65	37.334,25	193,22	0,28	813,20	22.405,96	149,69	0,18
1A	30	16,7	831,59	60.498,44	245,96	0,30	650,05	39.175,01	197,93	0,30	721,40	23.777,92	154,20	0,21
1A	38	17,1	986,63	56.035,20	236,72	0,24	899,49	39.101,31	197,74	0,22	935,31	23.030,59	151,76	0,16
1A	41	15,9	650,10	48.638,19	220,54	0,34	835,40	43.216,32	207,89	0,25	748,22	22.883,62	151,27	0,20
1A	57	17	986,63	56.035,20	236,72	0,24	958,67	38.668,64	196,64	0,21	970,09	22.879,80	151,26	0,16
1A	61	18,6	1.089,25	50.542,93	224,82	0,21	823,64	34.622,49	186,07	0,23	931,62	20.547,33	143,34	0,15
1A	70	16,7	946,09	121.837,32	349,05	0,37	937,55	40.996,86	202,48	0,22	939,70	30.675,06	175,14	0,19
1A	81	16,6	831,59	60.498,44	245,96	0,30	946,37	39.648,42	199,12	0,21	900,93	23.951,50	154,76	0,17
1A	83	17,3	986,63	56.035,20	236,72	0,24	928,96	38.202,46	195,45	0,21	952,34	22.715,79	150,72	0,16
1B	52	17,45	1.428,11	63.923,23	252,83	0,18	699,51	36.699,98	191,57	0,27	965,25	23.314,52	152,69	0,16
1D	9	15,5	650,10	48.638,19	220,54	0,34	821,63	44.470,67	210,88	0,26	739,70	23.230,58	152,42	0,21
1D	26	17,3	986,63	56.035,20	236,72	0,24	960,85	38.202,46	195,45	0,20	971,30	22.715,79	150,72	0,16
2A	20	15,2	757,93	64.054,05	253,09	0,33	805,00	63.176,19	251,35	0,31	781,63	31.806,05	178,34	0,23
2A	32	14,9	768,09	73.858,85	271,77	0,35	888,99	57.972,47	240,77	0,27	835,82	32.479,23	180,22	0,22
2A	108	15,1	757,93	64.054,05	253,09	0,33	1.212,32	60.815,46	246,61	0,20	991,02	31.196,38	176,62	0,18
2A	150	12,7	392,65	26.400,87	162,48	0,41	869,23	81.779,52	285,97	0,33	508,96	19.957,87	141,27	0,28
2D	17	16,5	831,59	60.498,44	245,96	0,30	657,93	40.130,46	200,33	0,30	727,18	24.126,57	155,33	0,21
3A	208-5	16	831,59	60.498,44	245,96	0,30	653,21	42.677,81	206,59	0,32	726,99	25.024,57	158,19	0,22
3A	213-5	16	831,59	60.498,44	245,96	0,30	653,21	42.677,81	206,59	0,32	726,99	25.024,57	158,19	0,22
3D	44	15,8	650,10	48.638,19	220,54	0,34	628,81	42.797,94	206,88	0,33	638,77	22.765,77	150,88	0,24
4E	26	16	1.115,56	75.842,01	275,39	0,25	637,18	49.071,11	221,52	0,35	825,11	29.793,92	172,61	0,21
5A	16	19,25	1.277,69	61.514,61	248,02	0,19	716,25	33.098,02	181,93	0,25	912,66	21.519,45	146,70	0,16
5A	155	17,5	986,63	56.035,20	236,72	0,24	855,29	37.334,25	193,22	0,23	907,81	22.405,96	149,69	0,16
5D	62	17,4	986,63	56.035,20	236,72	0,24	750,62	39.562,68	198,90	0,26	848,29	23.189,87	152,28	0,18

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,12-0,28], com média de 0,19.

#### 4.6.2.2 Aoki-Velloso (*a priori*) x Sorensen-Hansen (verossimilhança)

Em seguida são indicados, para cada uma das estacas consideradas de forma isolada, os resultados da atualização utilizando a estimativa *a priori* pelo método de Aoki e Velloso (1975), e adotando o segundo procedimento para a obtenção da função de verossimilhança, com o emprego da fórmula dinâmica de Danish, Sorensen-Hansen (1957). Estes resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Atualização pela teoria Bayesiana, segundo procedimento, *a priori* pelo modelo de cálculo de Aoki-Velloso (1975) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	"A PRIORI"				VEROSSIMILHANÇA				"A POSTERIORI"			
			$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$
1A	10	20,6	1.580,85	45.512,32	213,34	0,13	886,62	16.677,70	129,14	0,15	1.072,79	12.205,19	110,48	0,10
1A	25	17,5	986,63	56.035,20	236,72	0,24	995,51	18.916,34	137,54	0,14	993,27	14.142,22	118,92	0,12
1A	30	16,7	831,59	60.498,44	245,96	0,30	989,76	20.598,54	143,52	0,15	949,59	15.366,54	123,96	0,13
1A	38	17,1	986,63	56.035,20	236,72	0,24	1.020,77	19.365,79	139,16	0,14	1.012,01	14.391,93	119,97	0,12
1A	41	15,9	650,10	48.638,19	220,54	0,34	988,14	20.643,28	143,68	0,15	887,42	14.492,36	120,38	0,14
1A	57	17	986,63	56.035,20	236,72	0,24	899,70	18.911,74	137,52	0,15	921,64	14.139,64	118,91	0,13
1A	61	18,6	1.089,25	50.542,93	224,82	0,21	864,75	17.324,21	131,62	0,15	922,05	12.901,92	113,59	0,12
1A	70	16,7	946,09	121.837,32	349,05	0,37	989,76	20.598,54	143,52	0,15	983,45	17.619,66	132,74	0,13
1A	81	16,6	831,59	60.498,44	245,96	0,30	1.007,90	19.919,69	141,14	0,14	964,23	14.985,55	122,42	0,13
1A	83	17,3	986,63	56.035,20	236,72	0,24	974,88	19.082,54	138,14	0,14	977,86	14.234,91	119,31	0,12
1B	52	17,45	1.428,11	63.923,23	252,83	0,18	915,19	18.762,30	136,98	0,15	1.031,58	14.504,92	120,44	0,12
1D	9	15,5	650,10	48.638,19	220,54	0,34	1.009,50	22.018,31	148,39	0,15	897,50	15.156,86	123,11	0,14
1D	26	17,3	986,63	56.035,20	236,72	0,24	983,93	19.867,90	140,95	0,14	984,64	14.667,41	121,11	0,12
2A	20	15,2	757,93	64.054,05	253,09	0,33	994,59	22.340,39	149,47	0,15	933,39	16.563,48	128,70	0,14
2A	32	14,9	768,09	73.858,85	271,77	0,35	1.103,19	23.265,80	152,53	0,14	1.022,92	17.692,58	133,01	0,13
2A	108	15,1	757,93	64.054,05	253,09	0,33	1.017,56	22.422,29	149,74	0,15	950,24	16.608,46	128,87	0,14
2A	150	12,7	392,65	26.400,87	162,48	0,41	1.117,66	26.714,51	163,45	0,15	753,01	13.278,38	115,23	0,15
2D	17	16,5	831,59	60.498,44	245,96	0,30	997,29	20.004,86	141,44	0,14	956,11	15.033,71	122,61	0,13
3A	208-5	16	831,59	60.498,44	245,96	0,30	951,51	20.034,15	141,54	0,15	921,68	15.050,24	122,68	0,13
3A	213-5	16	831,59	60.498,44	245,96	0,30	976,95	20.189,59	142,09	0,15	940,58	15.137,79	123,04	0,13
3D	44	15,8	650,10	48.638,19	220,54	0,34	975,41	21.425,24	146,37	0,15	875,93	14.873,45	121,96	0,14
4E	26	16	1.115,56	75.842,01	275,39	0,25	853,26	20.236,54	142,26	0,17	908,51	15.974,22	126,39	0,14
5A	16	19,25	1.277,69	61.514,61	248,02	0,19	892,14	17.644,38	132,83	0,15	978,08	13.711,48	117,10	0,12
5A	155	17,5	986,63	56.035,20	236,72	0,24	868,58	19.033,59	137,96	0,16	898,52	14.207,65	119,20	0,13
5D	62	17,4	986,63	56.035,20	236,72	0,24	923,79	18.744,21	136,91	0,15	939,55	14.045,79	118,51	0,13

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,10-0,15], com média de 0,13.

Ambos os procedimentos indicaram, na atualização *a posteriori*, menor coeficiente de variação com a utilização da fórmula de Sorensen-Hansen (1957), como função de verossimilhança, quando comparada à fórmula de Chellis-Aoki (1989).

No item 5.7 os resultados serão comparados e interpretados.

#### 4.6.2.3 Decourt-Quarema (*a priori*) x Chellis-Aoki (*verossimilhança*)

A seguir são indicados, para cada uma das estacas consideradas de forma isolada, os resultados da atualização utilizando a estimativa *a priori* pelo método de Decourt Quaresma (1978), e adotando o segundo procedimento para a obtenção da função de verossimilhança, com o emprego da fórmula dinâmica de Chellis-Aoki (1989). Estes resultados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Atualização pela teoria Bayesiana, segundo procedimento, estimativa *a priori* pelo modelo de cálculo de Decourt-Quaresma (1978) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Chellis (1951)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	"A PRIORI"				VEROSSIMILHANÇA				"A POSTERIORI"			
			$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$
1A	10	20,60	1.157,04	16.521,65	128,54	0,11	754,58	29.602,71	172,05	0,23	1.012,88	10.603,63	102,97	0,10
1A	25	17,5	771,25	20.584,65	143,47	0,19	697,65	37.334,25	193,22	0,28	745,09	13.268,77	115,19	0,15
1A	30	16,7	664,24	22.305,51	149,35	0,22	650,05	39.175,01	197,93	0,30	659,09	14.212,94	119,22	0,18
1A	38	17,1	771,25	20.584,65	143,47	0,19	899,49	39.101,31	197,74	0,22	815,48	13.485,36	116,13	0,14
1A	41	15,9	553,28	17.643,69	132,83	0,24	835,40	43.216,32	207,89	0,25	635,07	12.528,68	111,93	0,18
1A	57	17	771,25	20.584,65	143,47	0,19	958,67	38.668,64	196,64	0,21	836,36	13.433,52	115,90	0,14
1A	61	18,6	869,81	18.455,33	135,85	0,16	823,64	34.622,49	186,07	0,23	853,76	12.038,35	109,72	0,13
1A	70	16,7	744,77	48.671,76	220,62	0,30	937,55	40.996,86	202,48	0,22	849,41	22.252,93	149,17	0,18
1A	81	16,6	664,24	22.305,51	149,35	0,22	946,37	39.648,42	199,12	0,21	765,82	14.274,77	119,48	0,16
1A	83	17,3	771,25	20.584,65	143,47	0,19	928,96	38.202,46	195,45	0,21	826,48	13.376,82	115,66	0,14
1B	52	17,45	1.010,84	23.887,97	154,56	0,15	699,51	36.699,98	191,57	0,27	888,09	14.469,68	120,29	0,14
1D	9	15,5	553,28	17.643,69	132,83	0,24	821,63	44.470,67	210,88	0,26	629,51	12.631,97	112,39	0,18
1D	26	17,3	771,25	20.584,65	143,47	0,19	960,85	38.202,46	195,45	0,20	837,64	13.376,82	115,66	0,14
2A	20	15,2	670,11	26.029,98	161,34	0,24	805,00	63.176,19	251,35	0,31	709,47	18.434,54	135,77	0,19
2A	32	14,9	580,99	29.832,05	172,72	0,30	888,99	57.972,47	240,77	0,27	685,63	19.696,46	140,34	0,20
2A	108	15,1	670,11	26.029,98	161,34	0,24	1.212,32	60.815,46	246,61	0,20	832,62	18.228,07	135,01	0,16
2A	150	12,7	410,40	12.158,57	110,27	0,27	869,23	81.779,52	285,97	0,33	469,79	10.584,87	102,88	0,22
2D	17	16,5	664,24	22.305,51	149,35	0,22	657,93	40.130,46	200,33	0,30	661,99	14.336,78	119,74	0,18
3A	208-5	16	664,24	22.305,51	149,35	0,22	653,21	42.677,81	206,59	0,32	660,45	14.649,15	121,03	0,18
3A	213-5	16	664,24	22.305,51	149,35	0,22	653,21	42.677,81	206,59	0,32	660,45	14.649,15	121,03	0,18
3D	44	15,8	553,28	17.643,69	132,83	0,24	628,81	42.797,94	206,88	0,33	575,33	12.493,27	111,77	0,19
4E	26	16	865,84	28.806,67	169,73	0,20	637,18	49.071,11	221,52	0,35	781,26	18.151,20	134,73	0,17
5A	16	19,25	1.002,91	22.764,21	150,88	0,15	716,25	33.098,02	181,93	0,25	886,09	13.487,65	116,14	0,13
5A	155	17,5	771,25	20.584,65	143,47	0,19	855,29	37.334,25	193,22	0,23	801,12	13.268,77	115,19	0,14
5D	62	17,4	771,25	20.584,65	143,47	0,19	750,62	39.562,68	198,90	0,26	764,19	13.539,82	116,36	0,15

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,10-0,22], com média de 0,16.

#### 4.6.2.4 Decourt-Quaresma (*a priori*) x Sorensen-Hansen (*verossimilhança*)

Em seguida são indicados, para cada uma das estacas consideradas de forma isolada, os resultados da atualização utilizando a estimativa *a priori* pelo método de Decourt-Quaresma (1978), e adotando o segundo procedimento para a obtenção da função de verossimilhança, com o emprego da fórmula dinâmica de Danish, Sorensen-Hansen (1957). Estes resultados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Atualização pela teoria Bayesiana, segundo procedimento, estimativa *a priori* pelo modelo de cálculo de Decourt-Quaresma (1978) e função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957)

Setor	Estaca	Compr. Cravado(m)	"A PRIORI"				VEROSSIMILHANÇA				"A POSTERIORI"			
			$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$	$\mu_Q(\text{kN})$	$\sigma_Q^2$	$\sigma_Q(\text{kN})$	$\Omega$
1A	10	20,6	1.157,04	16.521,65	128,54	0,11	886,62	16.677,70	129,14	0,15	1.022,47	8.299,65	91,10	0,09
1A	25	17,5	771,25	20.584,65	143,47	0,19	995,51	18.916,34	137,54	0,14	888,12	9.857,63	99,29	0,11
1A	30	16,7	664,24	22.305,51	149,35	0,22	989,76	20.598,54	143,52	0,15	833,48	10.709,04	103,48	0,12
1A	38	17,1	771,25	20.584,65	143,47	0,19	1.020,77	19.365,79	139,16	0,14	899,82	9.978,31	99,89	0,11
1A	41	15,9	553,28	17.643,69	132,83	0,24	988,14	20.643,28	143,68	0,15	753,68	9.512,99	97,53	0,13
1A	57	17	771,25	20.584,65	143,47	0,19	899,70	18.911,74	137,52	0,15	838,20	9.856,38	99,28	0,12
1A	61	18,6	869,81	18.455,33	135,85	0,16	864,75	17.324,21	131,62	0,15	867,20	8.935,95	94,53	0,11
1A	70	16,7	744,77	48.671,76	220,62	0,30	989,76	20.598,54	143,52	0,15	916,91	14.473,26	120,30	0,13
1A	81	16,6	664,24	22.305,51	149,35	0,22	1.007,90	19.919,69	141,14	0,14	845,78	10.522,60	102,58	0,12
1A	83	17,3	771,25	20.584,65	143,47	0,19	974,88	19.082,54	138,14	0,14	876,92	9.902,58	99,51	0,11
1B	52	17,45	1.010,84	23.887,97	154,56	0,15	915,19	18.762,30	136,98	0,15	957,27	10.508,57	102,51	0,11
1D	9	15,5	553,28	17.643,69	132,83	0,24	1.009,50	22.018,31	148,39	0,15	756,23	9.794,87	98,97	0,13
1D	26	17,3	771,25	20.584,65	143,47	0,19	983,93	19.867,90	140,95	0,14	879,47	10.109,96	100,55	0,11
2A	20	15,2	670,11	26.029,98	161,34	0,24	994,59	22.340,39	149,47	0,15	844,72	12.022,23	109,65	0,13
2A	32	14,9	580,99	29.832,05	172,72	0,30	1.103,19	23.265,80	152,53	0,14	874,38	13.071,46	114,33	0,13
2A	108	15,1	670,11	26.029,98	161,34	0,24	1.017,56	22.422,29	149,74	0,15	856,77	12.045,91	109,75	0,13
2A	150	12,7	410,40	12.158,57	110,27	0,27	1.117,66	26.714,51	163,45	0,15	631,61	8.355,66	91,41	0,14
2D	17	16,5	664,24	22.305,51	149,35	0,22	997,29	20.004,86	141,44	0,14	839,82	10.546,32	102,70	0,12
3A	208-5	16	664,24	22.305,51	149,35	0,22	951,51	20.034,15	141,54	0,15	815,58	10.554,45	102,73	0,13
3A	213-5	16	664,24	22.305,51	149,35	0,22	976,95	20.189,59	142,09	0,15	828,38	10.597,44	102,94	0,12
3D	44	15,8	553,28	17.643,69	132,83	0,24	975,41	21.425,24	146,37	0,15	743,92	9.675,73	98,37	0,13
4E	26	16	865,84	28.806,67	169,73	0,20	853,26	20.236,54	142,26	0,17	858,45	11.886,40	109,02	0,13
5A	16	19,25	1.002,91	22.764,21	150,88	0,15	892,14	17.644,38	132,83	0,15	940,51	9.939,98	99,70	0,11
5A	155	17,5	771,25	20.584,65	143,47	0,19	868,58	19.033,59	137,96	0,16	821,82	9.889,38	99,45	0,12
5D	62	17,4	771,25	20.584,65	143,47	0,19	923,79	18.744,21	136,91	0,15	851,09	9.810,68	99,05	0,12

A atualização da função *a priori* de Decourt-Quaresma (1977) realizada a partir da função de verossimilhança obtida no segundo procedimento com a fórmula de Sorensen-Hansen, obteve melhores resultado em comparação a atualização com



a fórmula de Chellis-Aoki (1989), obtendo valores bem menores de variância, desvio padrão e coeficiente de variação.

A faixa observada no coeficiente de variação foi de [0,09-0,14], com média de 0,12.

Os resultados das atualizações (a posteriori) de todas as análises realizadas pela metodologia FOSM, para o primeiro e segundo procedimento de obtenção da função de verossimilhança são apresentados nos gráficos das figuras 23 e 24, com o intuito de se comparar os resultados obtidos.

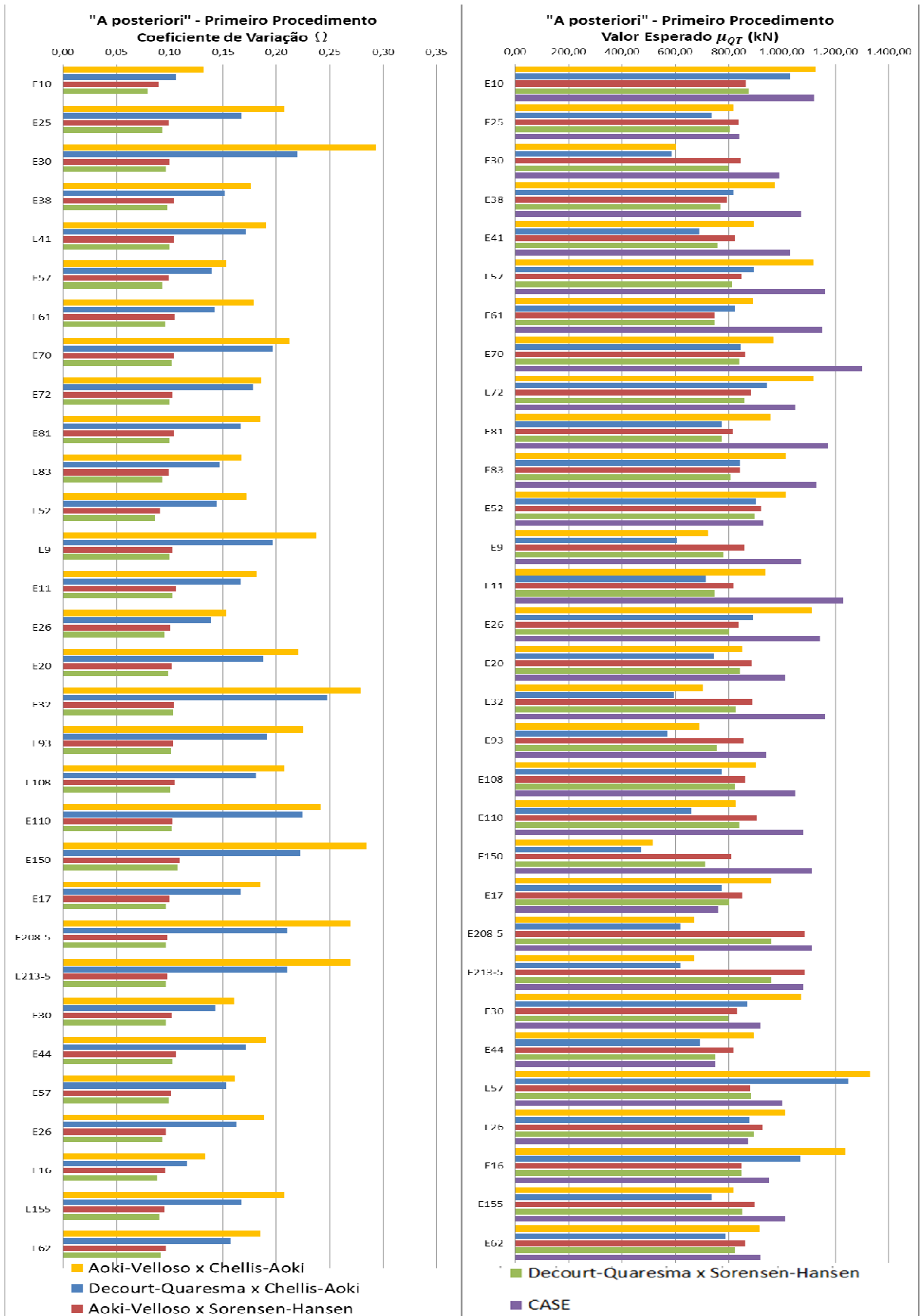


Figura 23 - Coeficientes de variação e valor esperado das funções a posteriori do primeiro procedimento

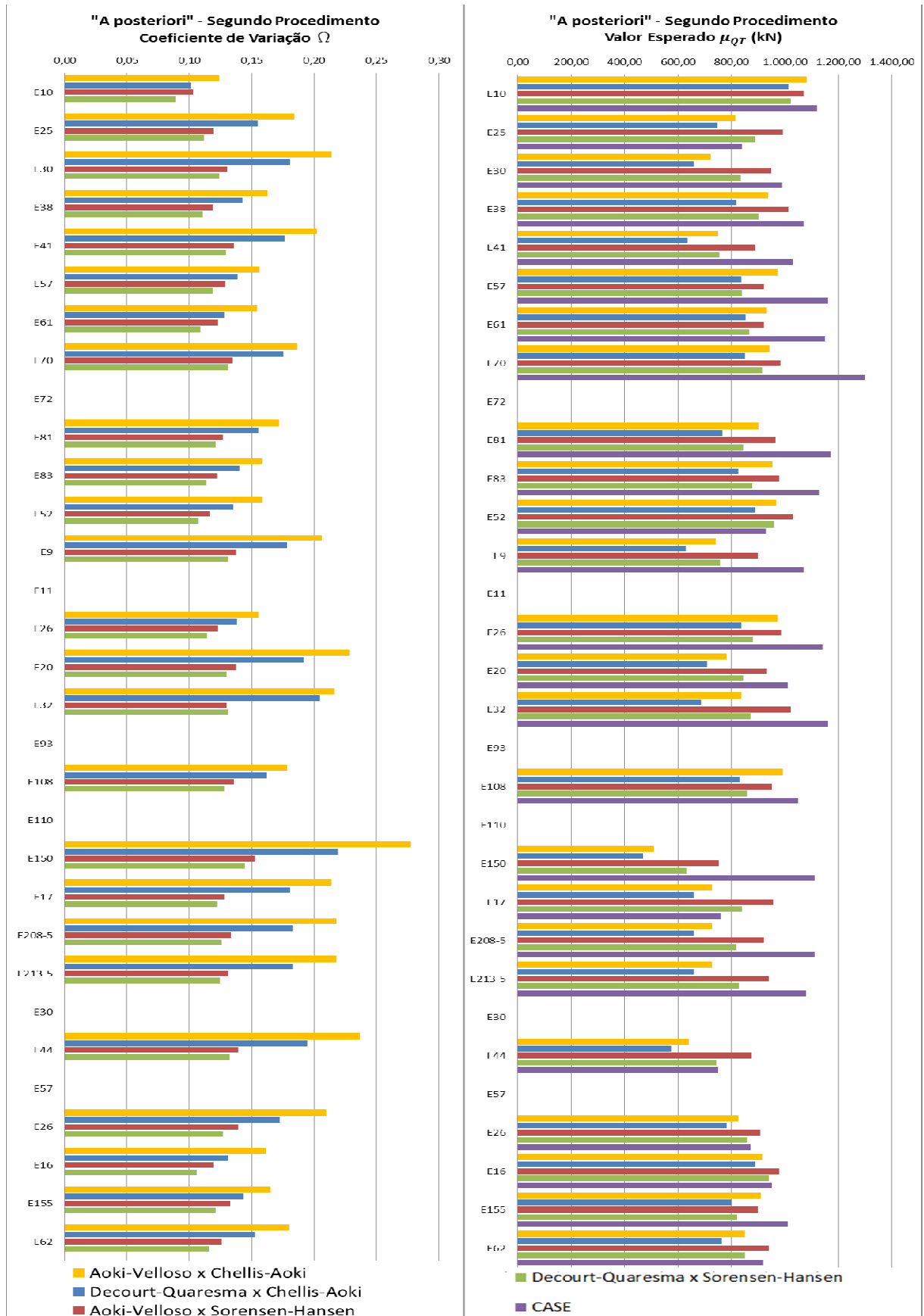


Figura 24 - Coeficientes de variação das funções a posteriori do segundo procedimento

A atualização que apresentou um menor valor médio de coeficiente de variação para o primeiro e segundo procedimentos foi a função *a priori* de Decourt-Quaresma (1978) atualizada pela fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957). No gráfico da figura 25 os resultados destas funções *a posteriori* são comparados (primeiro procedimento x segundo procedimento).



Figura 25 - Coeficientes de variação e valor esperado da função *a posteriori* Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen

Em geral, os coeficientes de variação obtidos no primeiro e segundo procedimento são muito próximos, com os do primeiro procedimento sendo em sua maioria ligeiramente menores, ou seja, mesmo sem o conhecimento preciso da variável eficiência ( $h$ ), a utilização do valor indicado na literatura técnica,  $h = 0,70$ , Velloso e Lopes (2010), na fórmula de Sorensen-Hansen (1957) obtêm resultados compatíveis em relação à variância dos resultados, com os valores obtidos após o ajuste da eficiência, por meio de ensaios de carregamento dinâmico.

Comparando todas as atualizações, nota-se que a função *a posteriori* obtida quando se utiliza para verossimilhança a fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957) resulta em menores coeficientes de variação, em relação à fórmula de Chellis-Aoki (1989), tendo se mostrado mais adequada nesta pesquisa.

#### **4.7 Interpretação dos resultados**

Como verificação do procedimento de Bayes na redução da incerteza na atualização da estimativa da capacidade de carga, com utilização da metodologia FOSM na análise individual das estacas, foram feitas comparações entre os diferentes métodos de cálculo utilizados *a priori* e depois da atualização por cada função de verossimilhança empregada.

As comparações entre os resultados das estimativas *a priori* pelas fórmulas semi-empíricas e as atualizadas *a posteriori*, fornecem uma indicação do modelo de cálculo que resulta em estimativas atualizadas com menor incerteza.

##### **4.7.1 Comparação dos modelos de cálculo *a priori***

A Figura 26 ilustra, no eixo das abcissas, as estimativas pelo método de Aoki e Velloso (1975) e no eixo das ordenadas as estimativas pelo método de Decourt e Quaresma (1978).

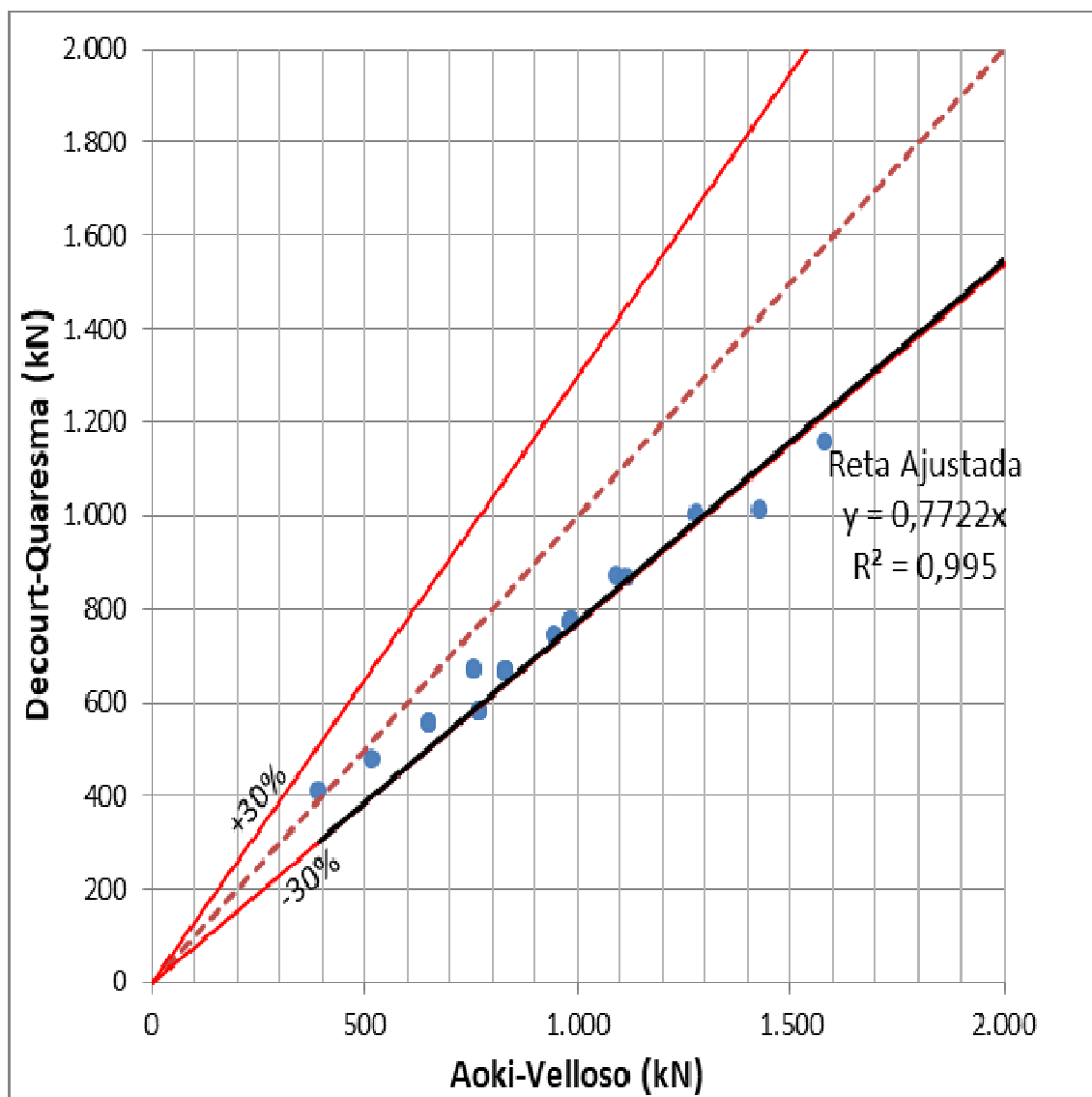


Figura 26 - Correlação previsão *a priori* Decourt-Quaresma x Aoki-Velloso

As estimativas da capacidade de carga *a priori* apontam para valores menores de Decourt e Quaresma, sendo cerca de 77% dos valores obtidos com a utilização do método de Aoki-Velloso, neste caso de obra. Observa-se que para as estacas mais curtas, com menor capacidade de carga global, os resultados de ambos os métodos são mais próximos, já que os pontos se aproximam da reta de 45 graus. Com o aumento da capacidade de carga, os resultados vão se distanciando, mas mantendo um ajuste razoável entre os dois métodos, com resultados superiores para o Aoki e Velloso (1975).

Nas Figuras 27 e 28, as estimativas *a priori* para cada um dos métodos são comparadas com os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico (ECD's).

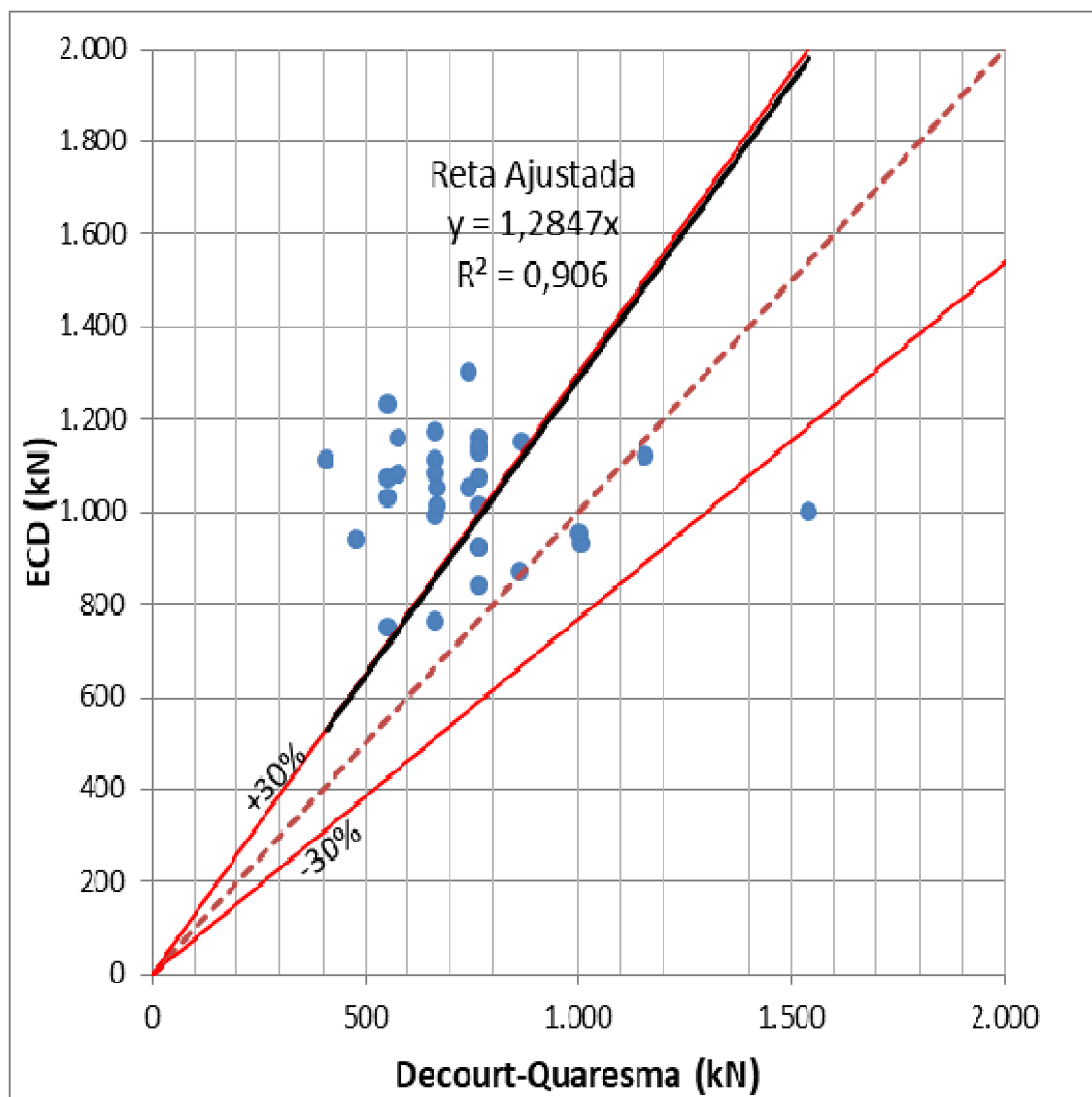


Figura 27 - Correlação ECD x previsão *a priori* Decourt-Quaresma



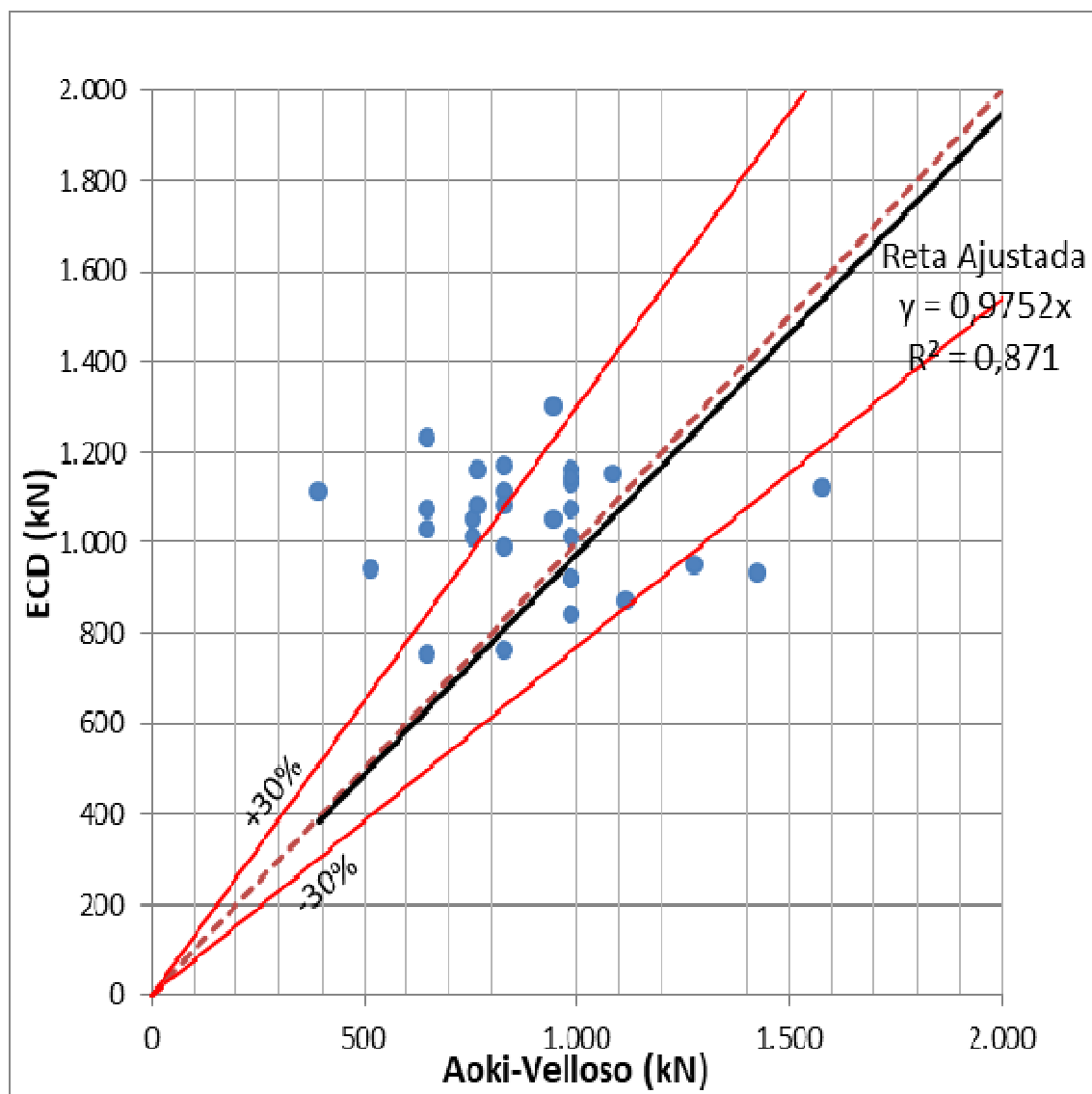


Figura 28 - Correlação ECD x previsão *a priori* Aoki-Velloso

#### 4.7.2 Comparação dos modelos de cálculo *a posteriori*

##### 4.7.2.1 Atualização com base no primeiro procedimento de obtenção da função de verossimilhança

Na Figura 29 são comparados os resultados das estimativas *a posteriori* do primeiro procedimento, utilizando como função de verossimilhança a fórmula dinâmica de Chellis-Aoki.

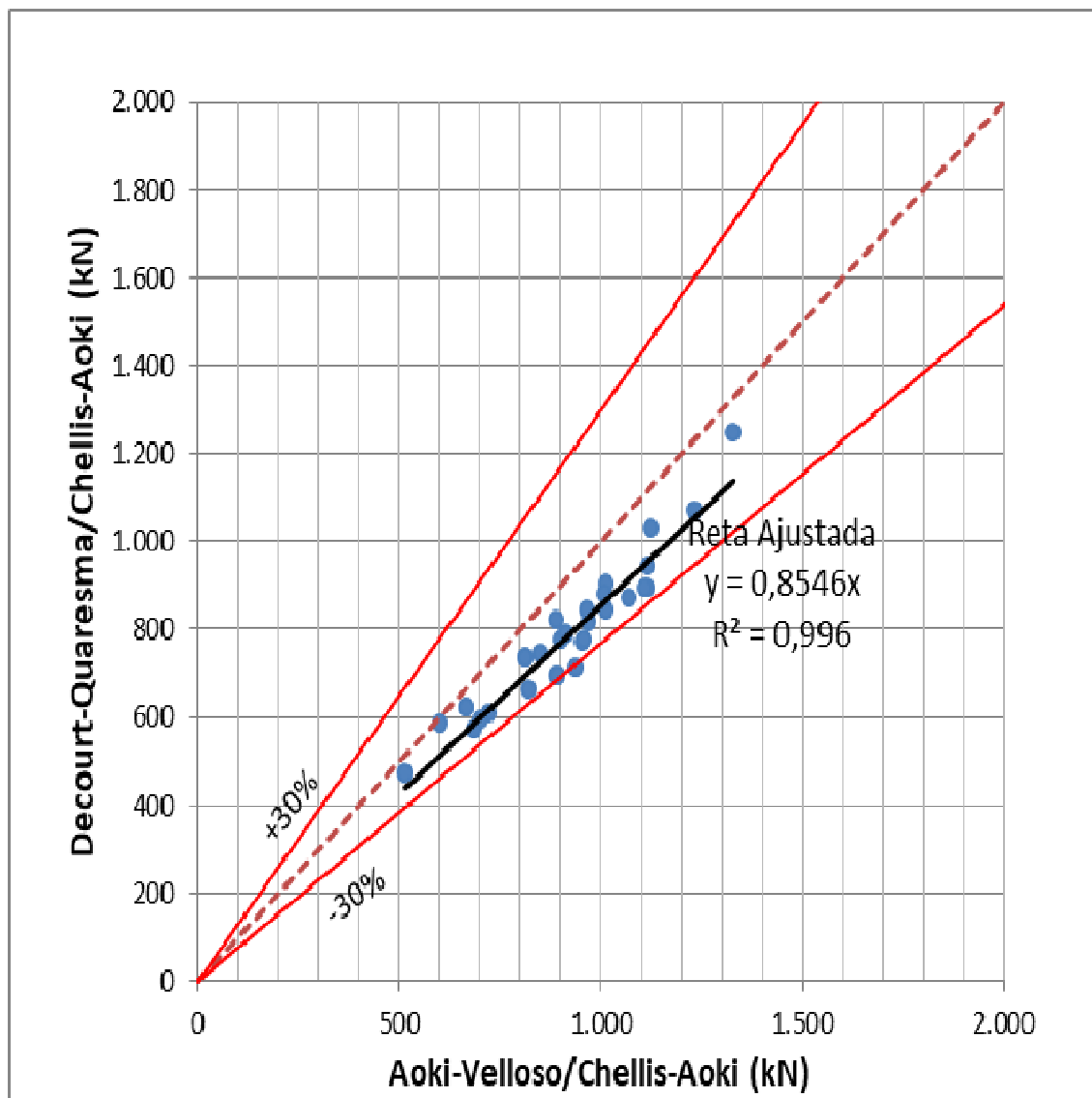


Figura 29 - Correlação função *a posteriori* Aoki-Velloso/Chellis-Aoki x Decourt-Quaresma/Chellis-Aoki

Nas Figuras 30 e 31 os resultados das estimativas *a posteriori* do primeiro procedimento, utilizando como função de verossimilhança a fórmula dinâmica de Chellis-Aoki, são comparados com os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico (ECD's).

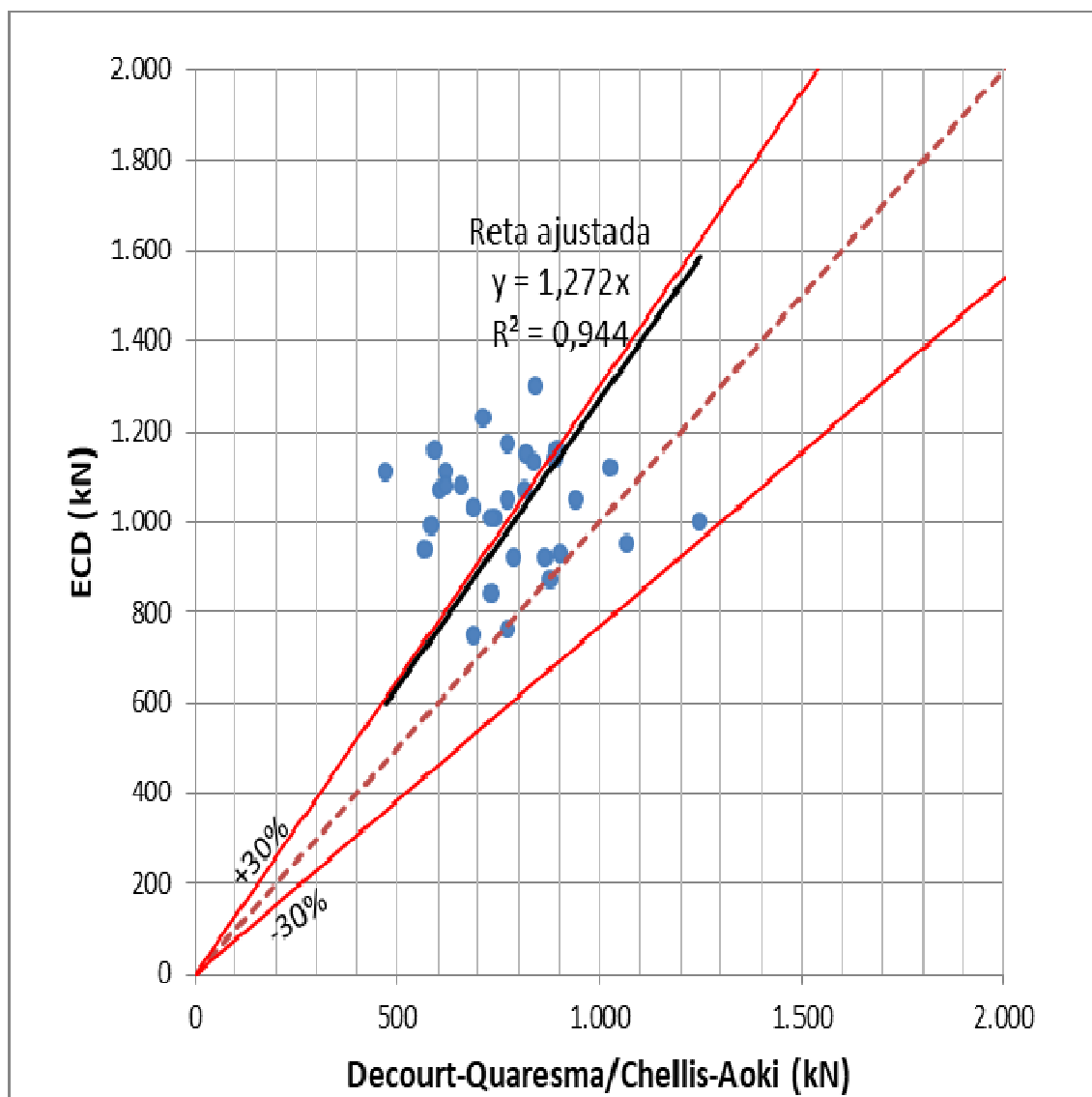


Figura 30 - Correlação previsão a posteriori Decourt-Quaresma/Chellis-Aoki x ECD

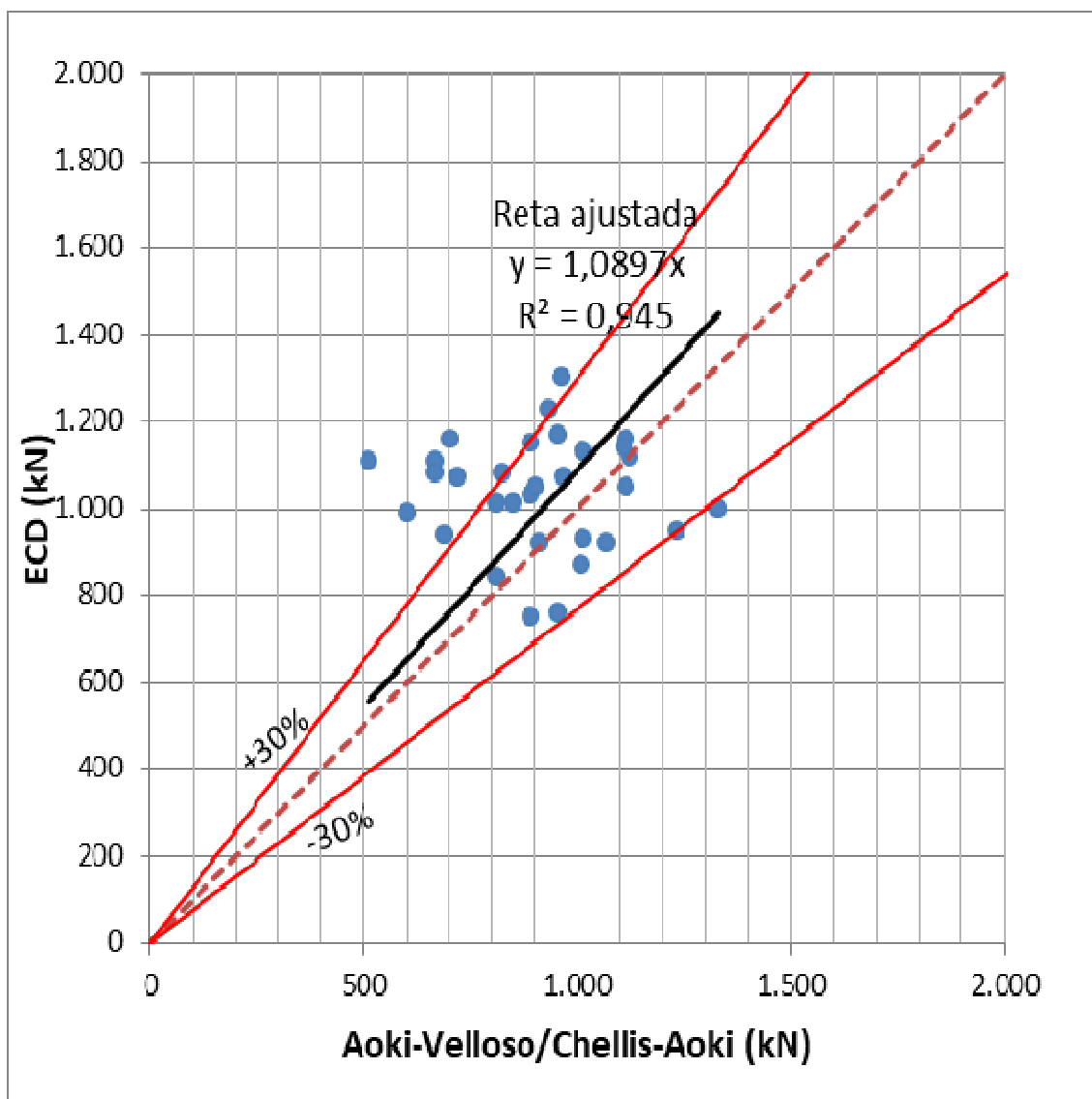


Figura 31 - Correlação previsão a posteriori Aoki-Velloso/Chellis-Aoki x ECD

Na Figura 32 são comparados os resultados das estimativas *a posteriori* do primeiro procedimento, utilizando como função de verossimilhança a fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen.

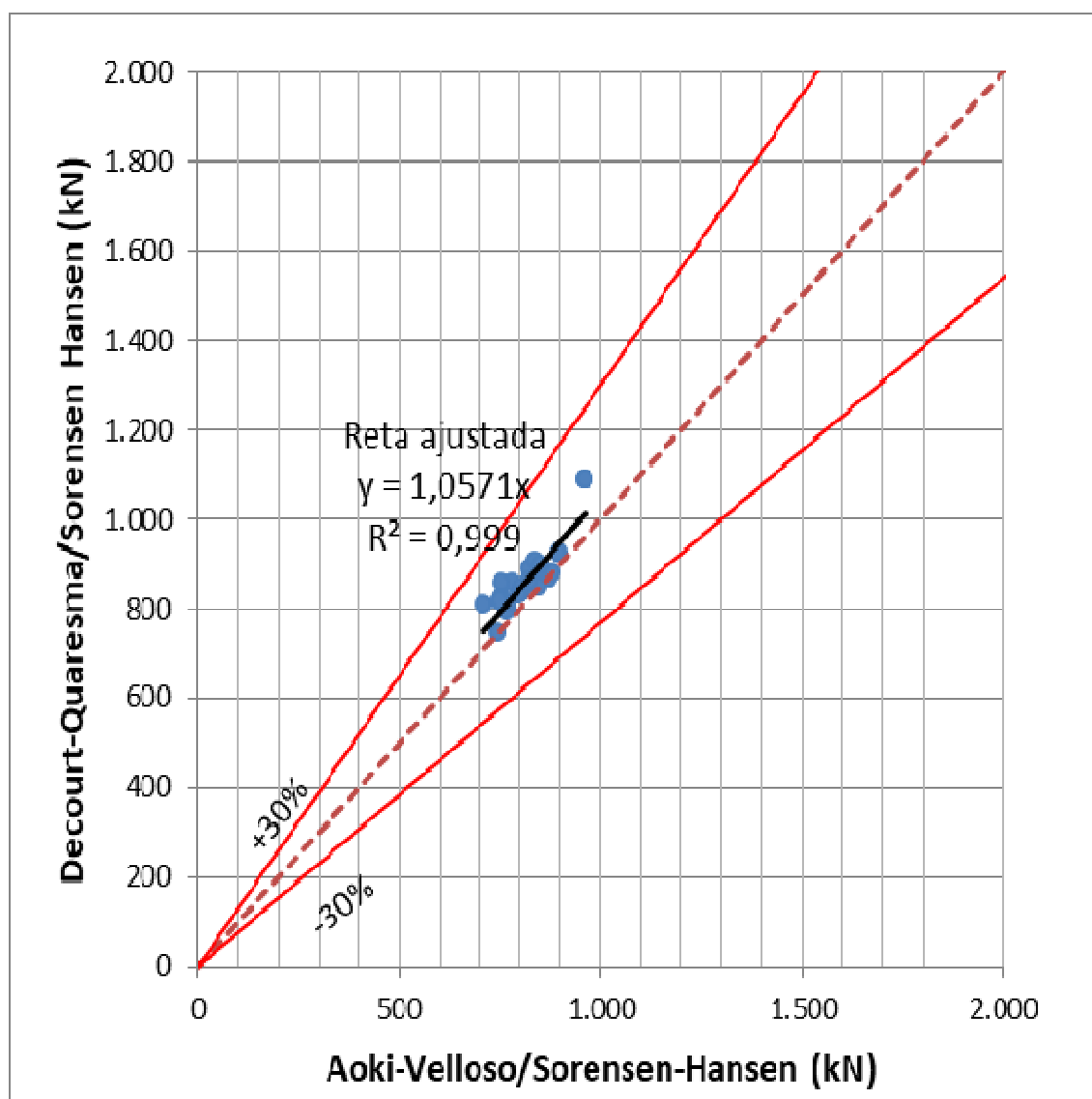


Figura 32 - Correlação função a posteriori Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen x Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen

Nas Figuras 33 e 34 os resultados das estimativas *a posteriori*, utilizando como função de verossimilhança a fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen, são comparados com os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico (ECD's).

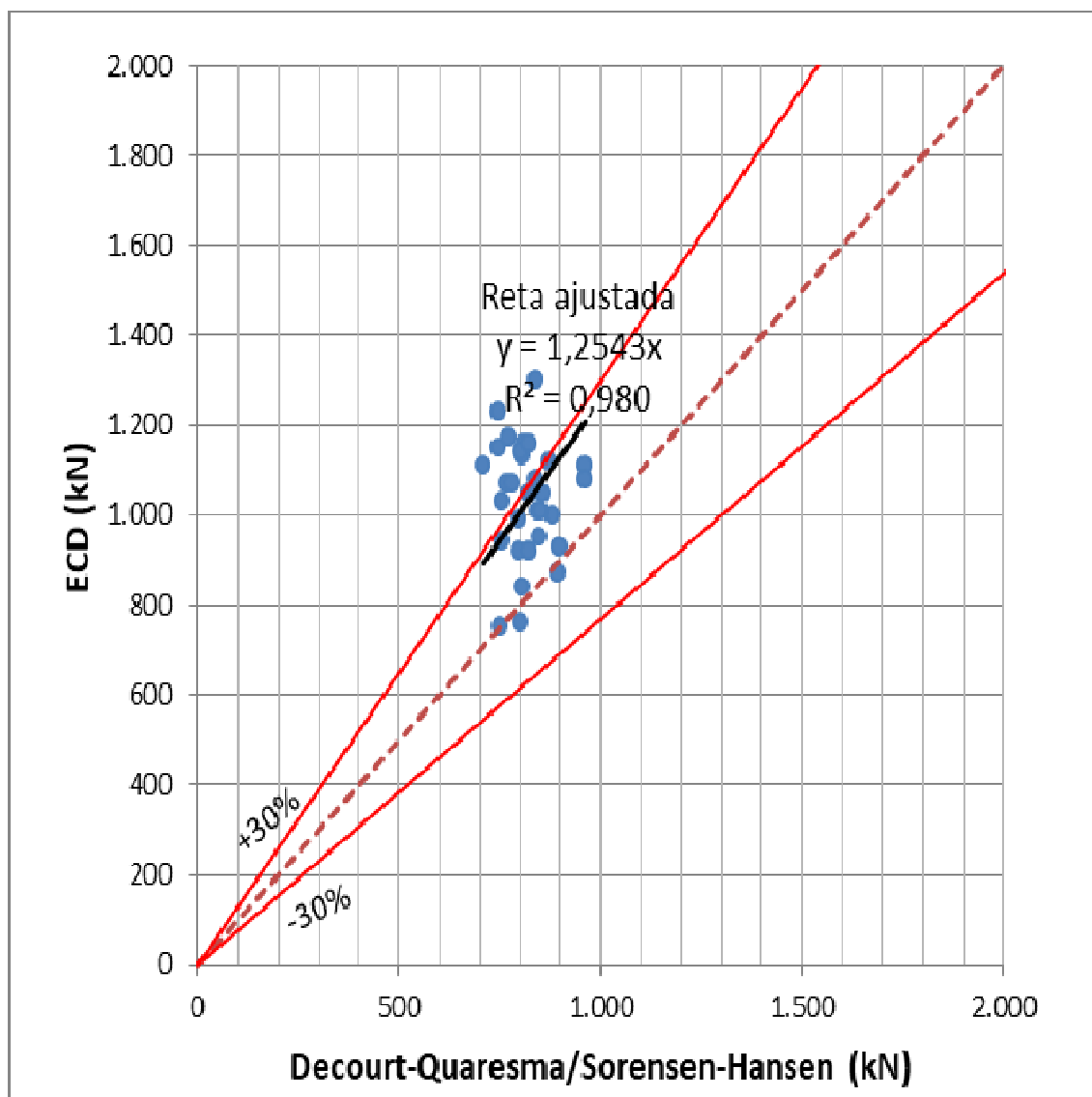


Figura 33 - Correlação previsão a posteriori Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen x ECD

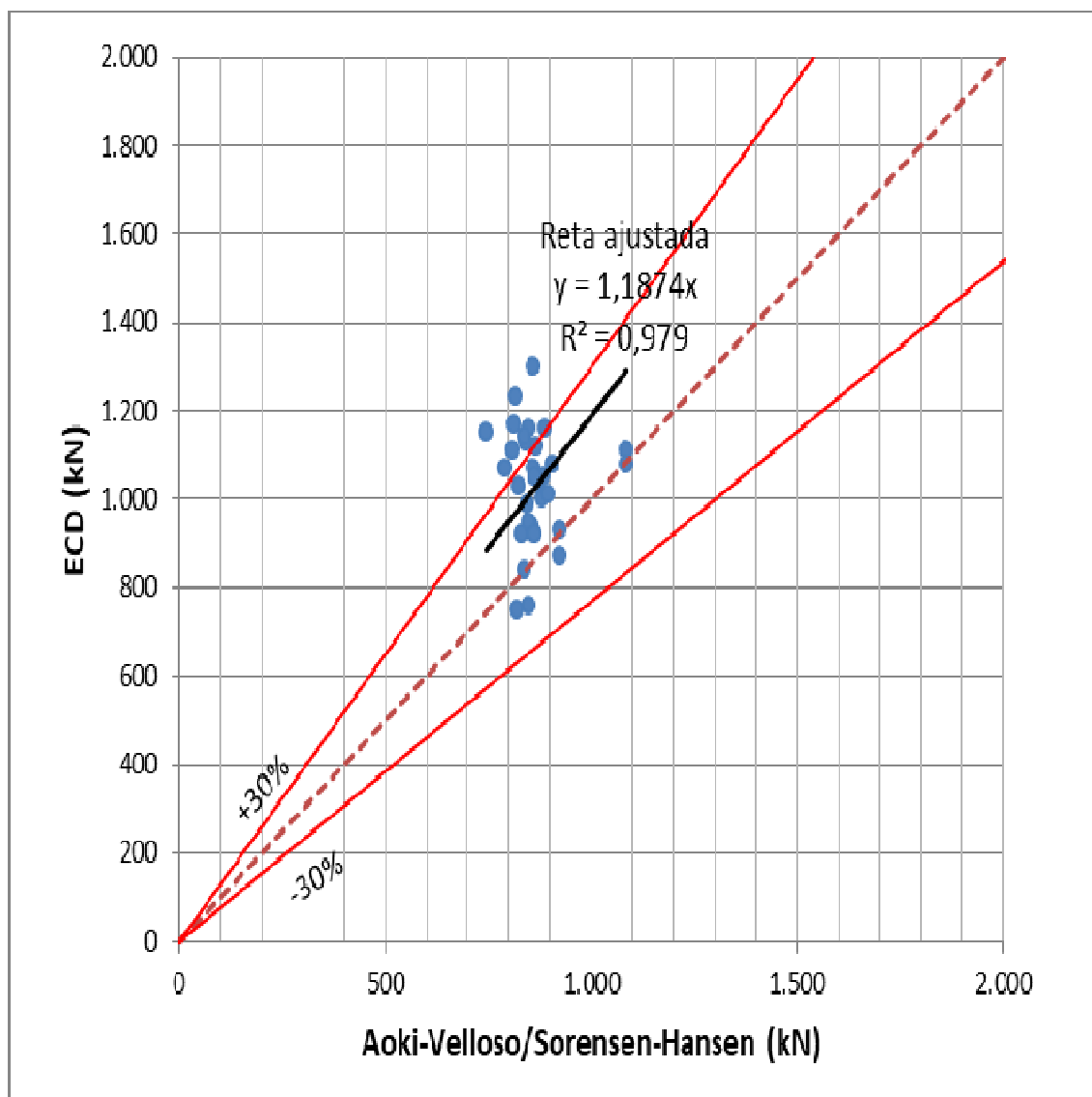


Figura 34 - Correlação previsão a posteriori Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen x ECD

Observa-se que a atualização aproximou as estimativas à reta de 45°, indicando a redução da incerteza quanto ao modelo de cálculo. Na atualização utilizando a função de verossimilhança de Sorensen-Hansen, os valores são praticamente coincidentes, com as incertezas do modelo tendo sido praticamente eliminadas após a atualização.

#### 4.7.2.2 Atualização com o segundo procedimento de obtenção da função de verossimilhança

Na Figura 35 são comparados os resultados das estimativas a posteriori do segundo procedimento, utilizando como função de verossimilhança a fórmula dinâmica de Chellis-Aoki.

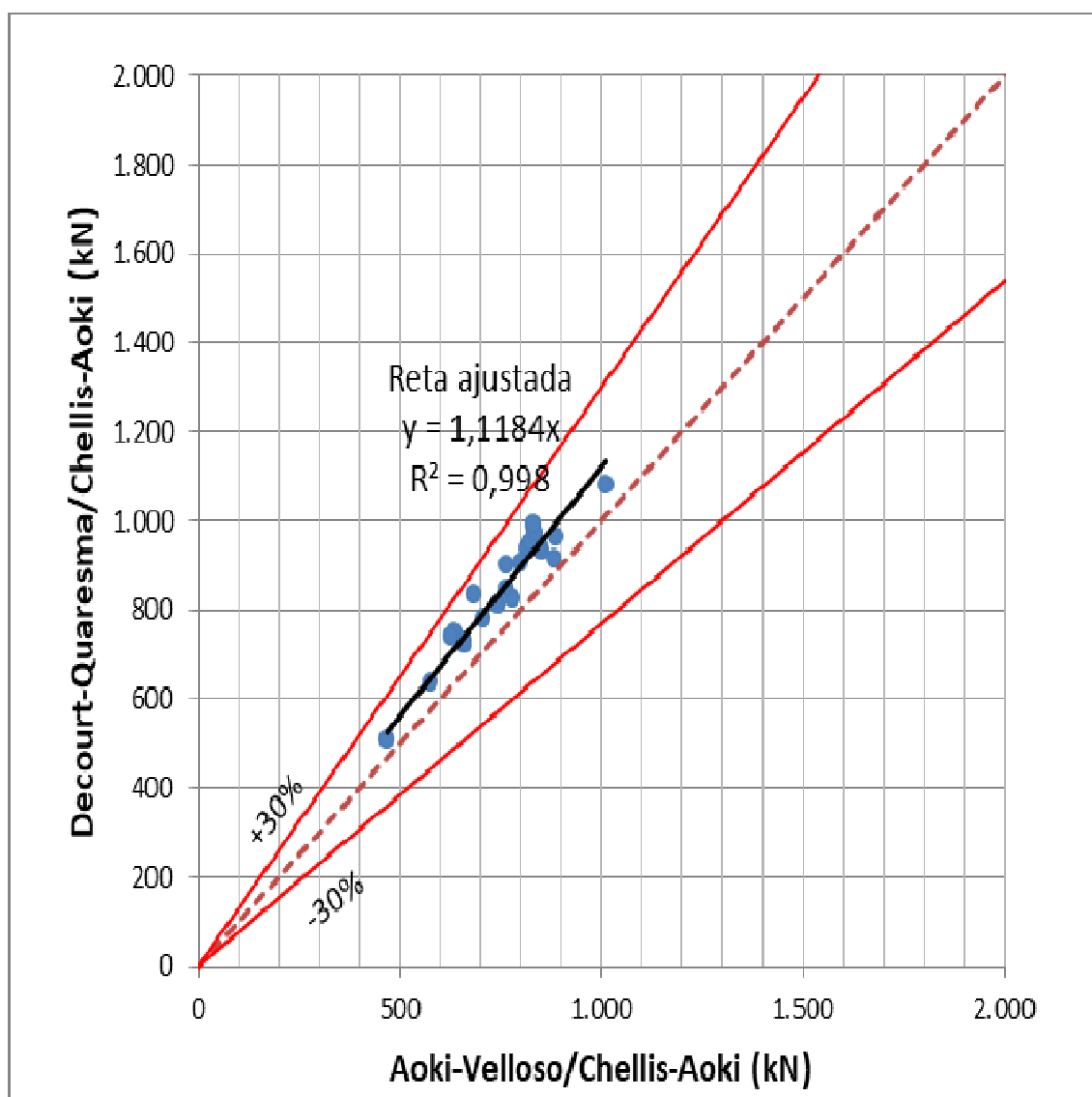


Figura 35 - Correlação função a posteriori Aoki-Velloso/Chellis-Aoki x Decourt-Quaresma /Chellis-Aoki

Nas Figuras 36 e 37 os resultados das estimativas *a posteriori* do segundo procedimento, utilizando como função de verossimilhança a fórmula dinâmica de Chellis-Aoki, são comparados com os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico (ECD's).



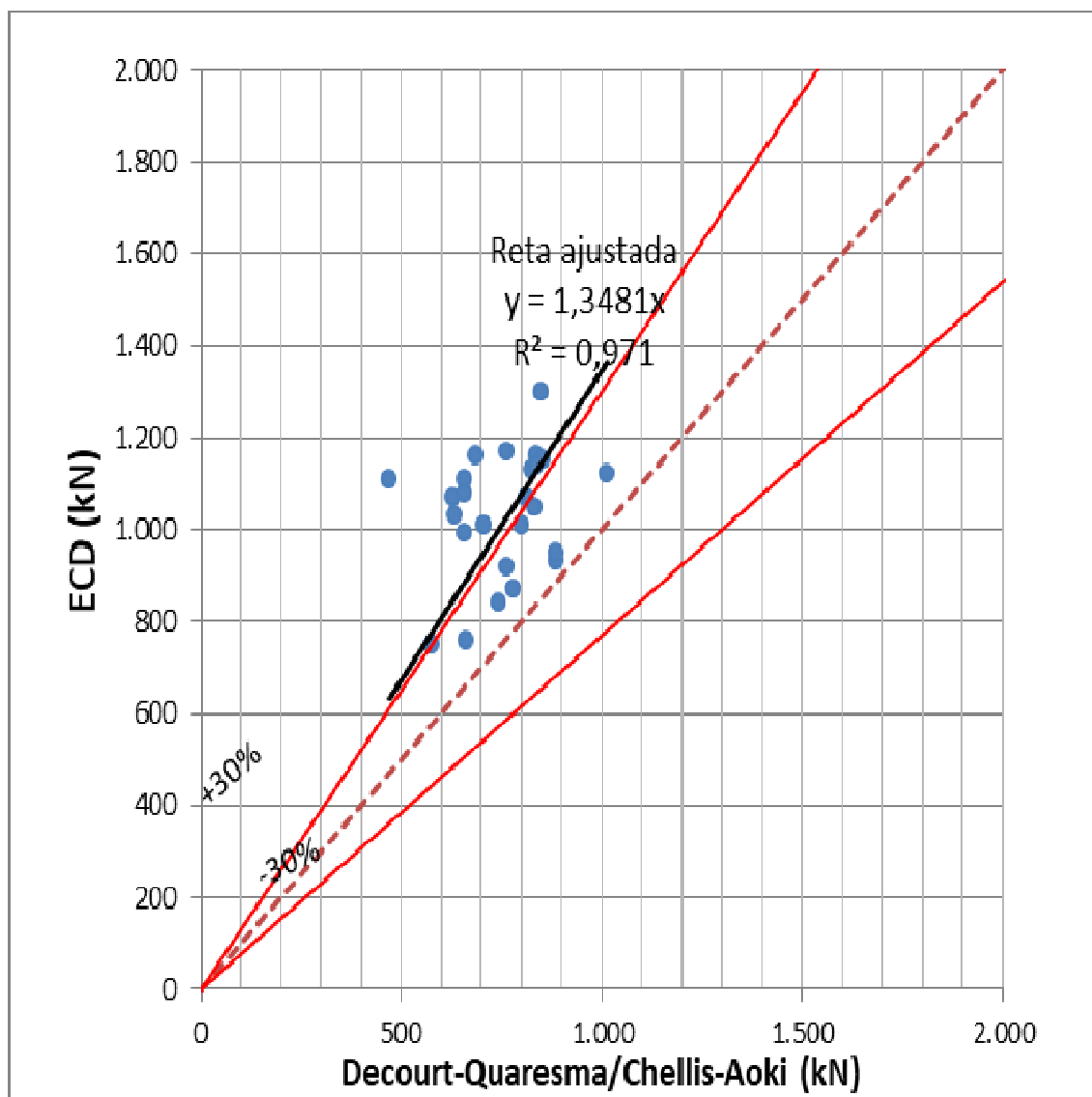


Figura 36 - Correlação previsão a posteriori Decourt-Quaresma/Chellis-Aoki x ECD

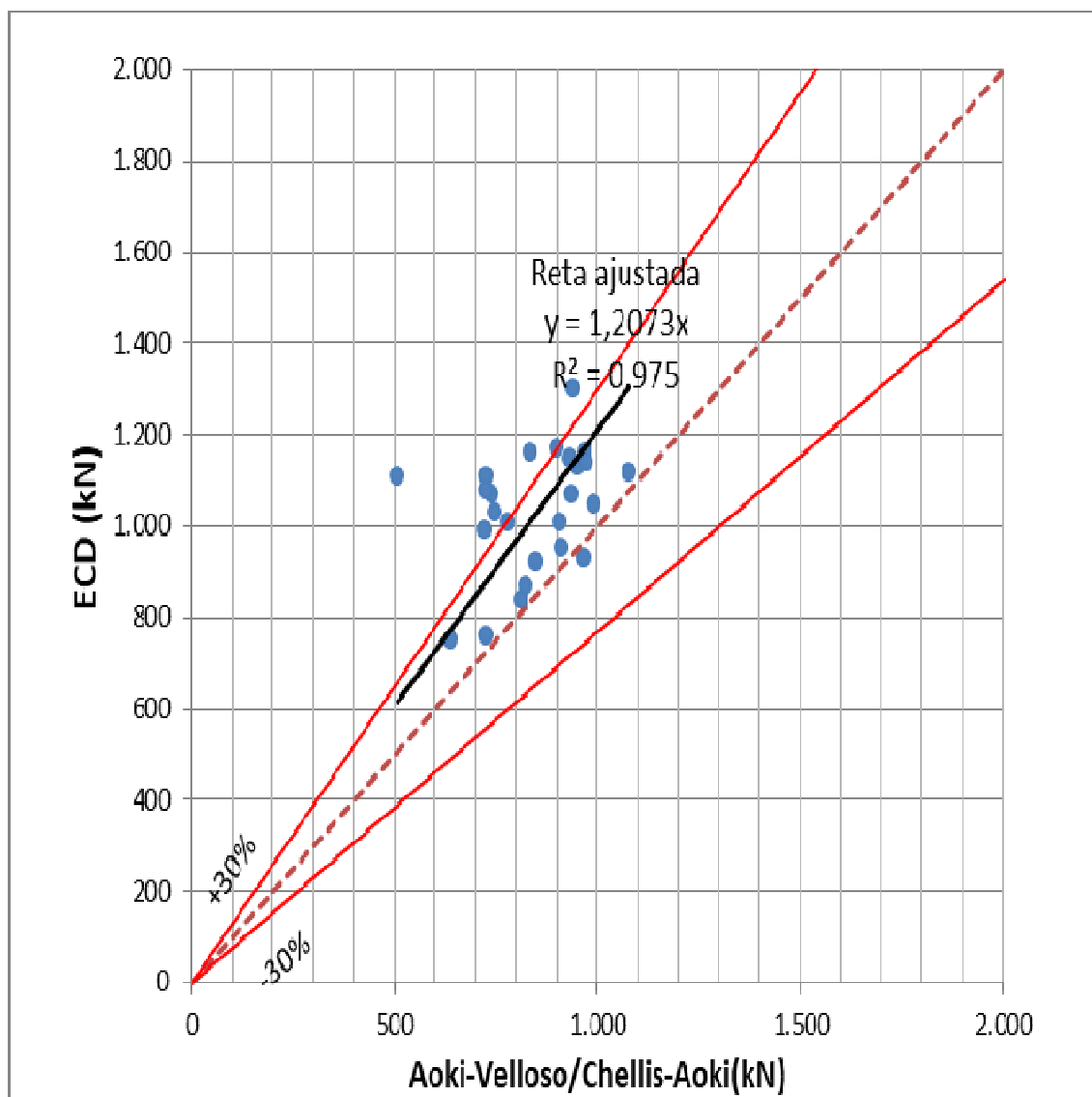


Figura 37 - Correlação previsão a posteriori Aoki-Velloso/Chellis-Aoki x ECD

Na Figura 38 são comparados os resultados das estimativas *a posteriori* do segundo procedimento, utilizando como função de verossimilhança a fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen.

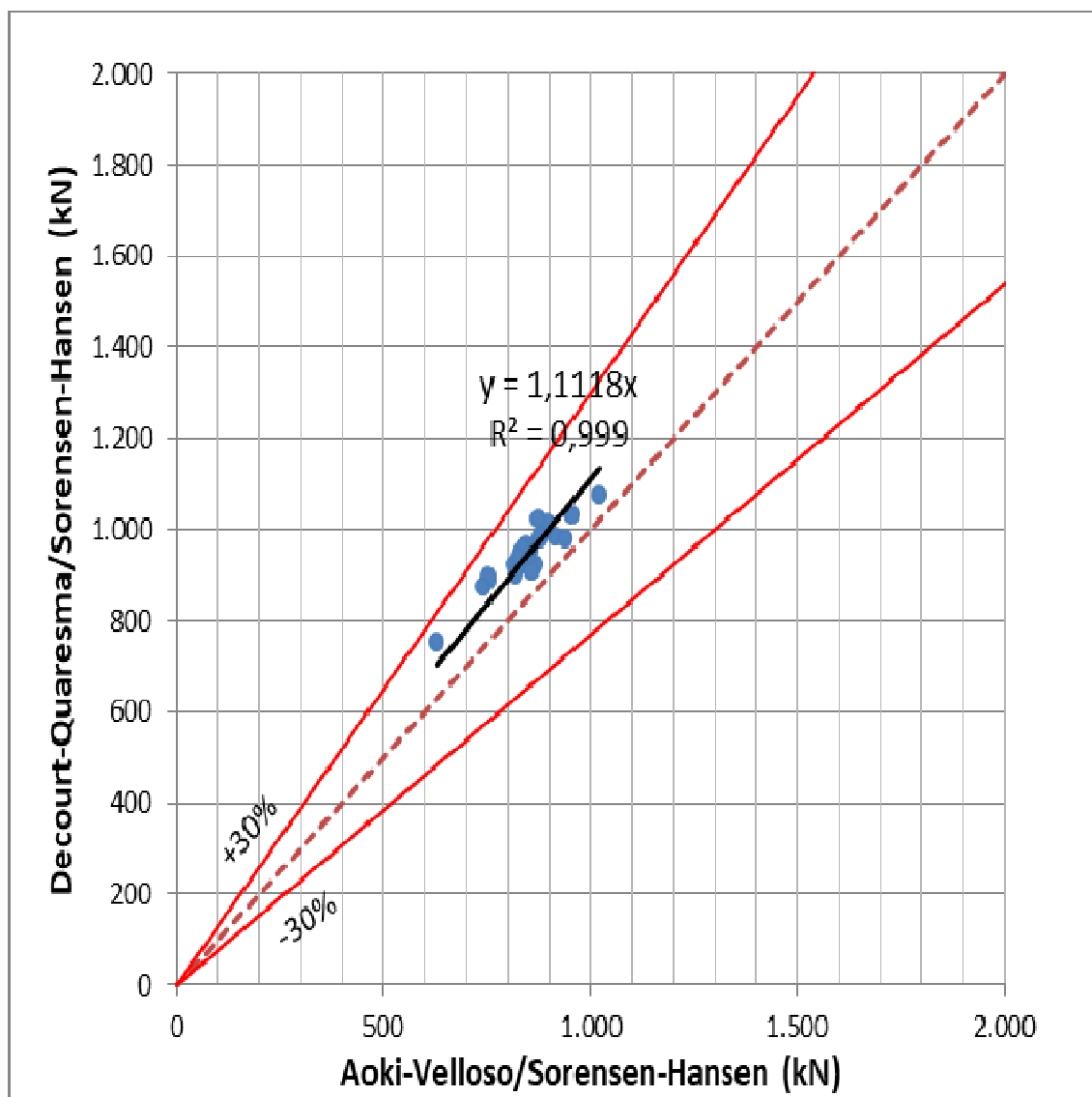


Figura 38 - Correlação função a posteriori Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen x Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen

Nas Figuras 39 e 40 os resultados das estimativas *a posteriori* do segundo procedimento, utilizando como função de verossimilhança a fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen, são comparados com os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico (ECD's).

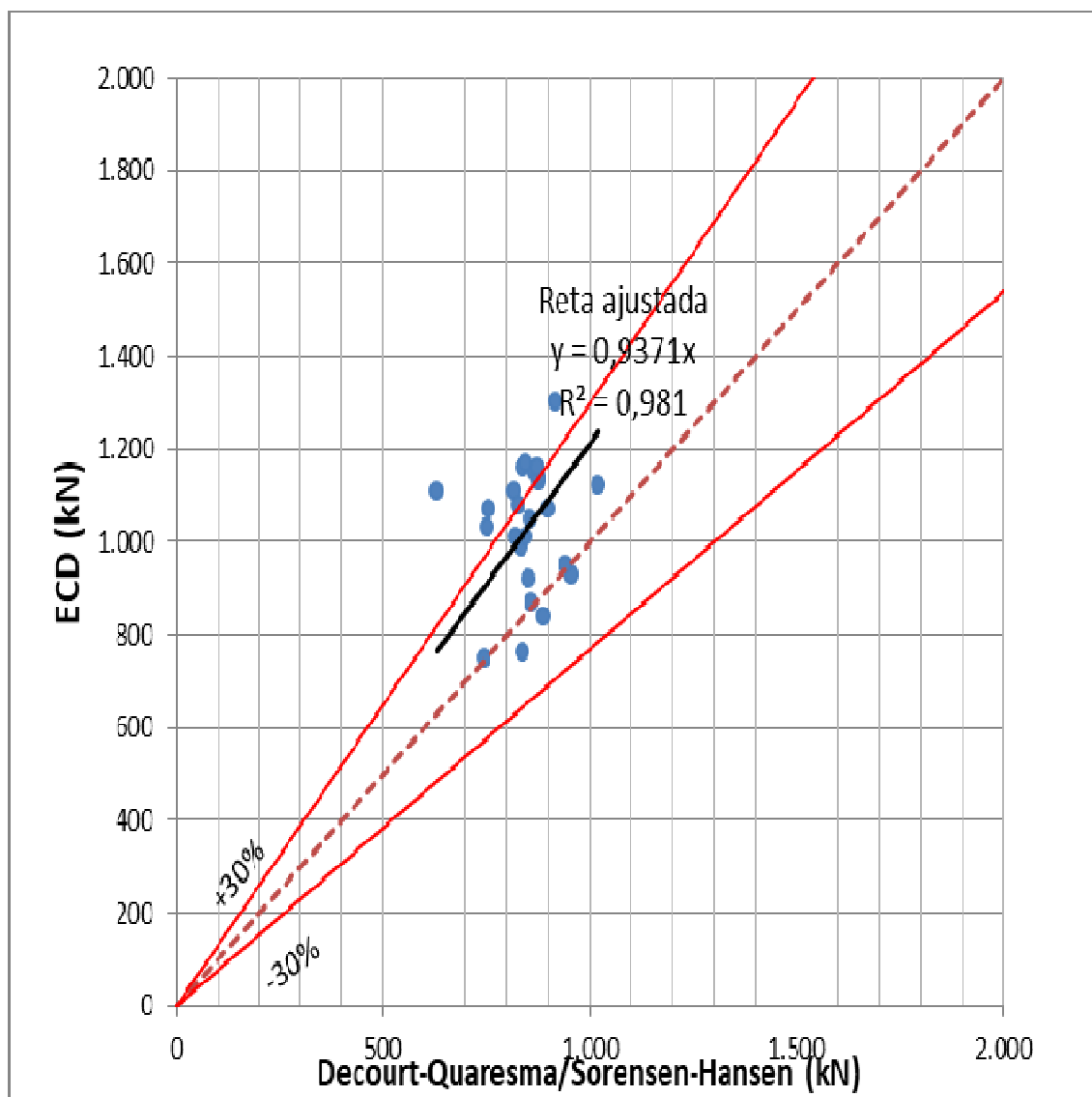


Figura 39 - Correlação previsão a posteriori Decourt-Quaresma/ Sorensen-Hansen x ECD

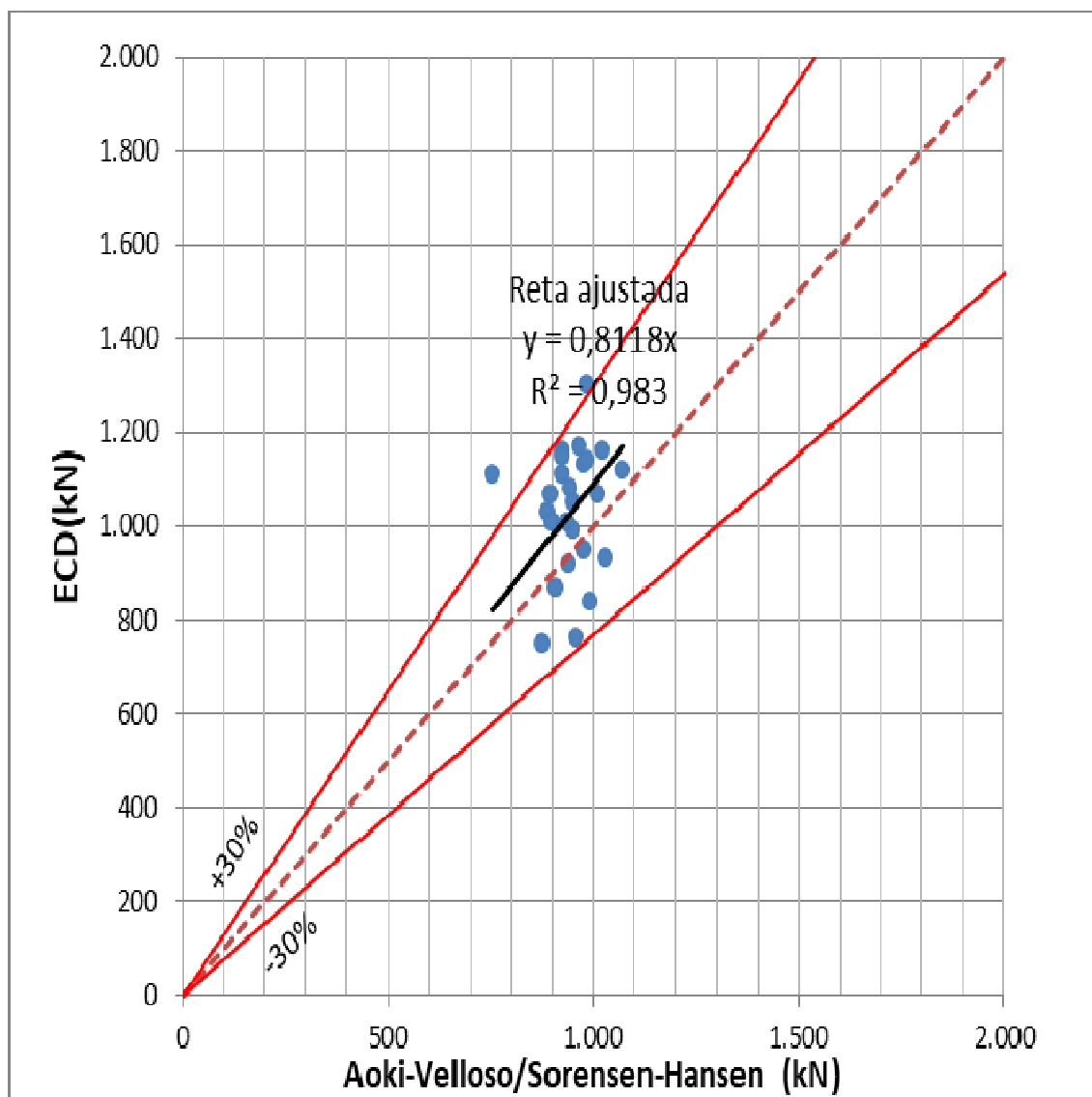


Figura 40 - Correlação previsão a posteriori Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen x ECD

Contrariando a expectativa do autor, o segundo procedimento não apresentou, de forma tão significativa, a redução da incerteza do modelo de cálculo.

Também não se observou, no segundo procedimento, um aumento dos valores de capacidade de carga atualizada devido ao set-up, já que os valores dos parâmetros obtidos dos ensaios poderiam levar a valores de capacidade de carga superiores, em decorrência do período de repouso e ganho de resistência.

A Tabela 26 resume os resultados.



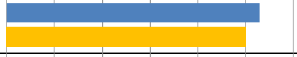


RESUMO DOS PARÂMETROS DE CORRELAÇÃO						
ENTRE MÉTODOS						
		Eixo		Reta ajustada (y=Bx)		■ Coeficiente Angular(B) ■ R <sup>2</sup>
		Horizontal	Vertical	Coeficiente Angular(B)	R <sup>2</sup>	0 0,2 0,4 0,6 0,8 1 1,2
Primário Processamento	<i>A priori</i>	Aoki-Velloso	Decourt-Quaresma	0,7722	0,995	
	<i>A posteriori</i>	Aoki-Velloso / Chellis-Aoki	Decourt-Quaresma/Chellis-Aoki	0,8549	0,996	
		Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen	Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen	1,0571	0,999	
Segundo Processamento	<i>A posteriori</i>	Aoki-Velloso / Chellis-Aoki	Decourt-Quaresma/Chellis-Aoki	1,1184	0,998	
		Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen	Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen	1,1118	0,999	

Tabela 26 - Resumo dos parâmetros de correlação

A análise da tabela 26 mostra que as funções *a posteriori* obtidas com a atualização a partir da fórmula de Sorensen-Hansen (1957) proporcionam uma maior adequação entre os métodos, apresentando coeficientes angulares, B, mais próximos da unidade e com menor dispersão.

## 5 ANÁLISE DE UM CONJUNTO DE ESTACAS

Observou-se, ao analisar as estacas isoladamente, que os melhores resultados foram obtidos na atualização bayesiana considerando a função de verossimilhança de Sorensen-Hansen (1957). Desta forma, a análise de um conjunto maior de estacas da mesma obra (213 estacas), cravadas sob as mesmas condições, será realizada neste capítulo apenas para a função de verossimilhança utilizando a fórmula dinâmica de Danish. Nesta análise de um conjunto de 213 estacas, os valores de variância, desvio padrão e coeficiente de variação serão obtidos em relação ao conjunto de estacas.

Com base nas análises individualizadas das estacas, o autor optou pela utilização do primeiro procedimento, ou seja, a utilização da eficiência de 70%, conforme Velloso e Lopes (2016).

A figura 31 apresenta a locação do grupo de estacas analisado neste capítulo em relação aos setores e regiões representativas do empreendimento. As estacas estão representadas pelos pontos em vermelho.

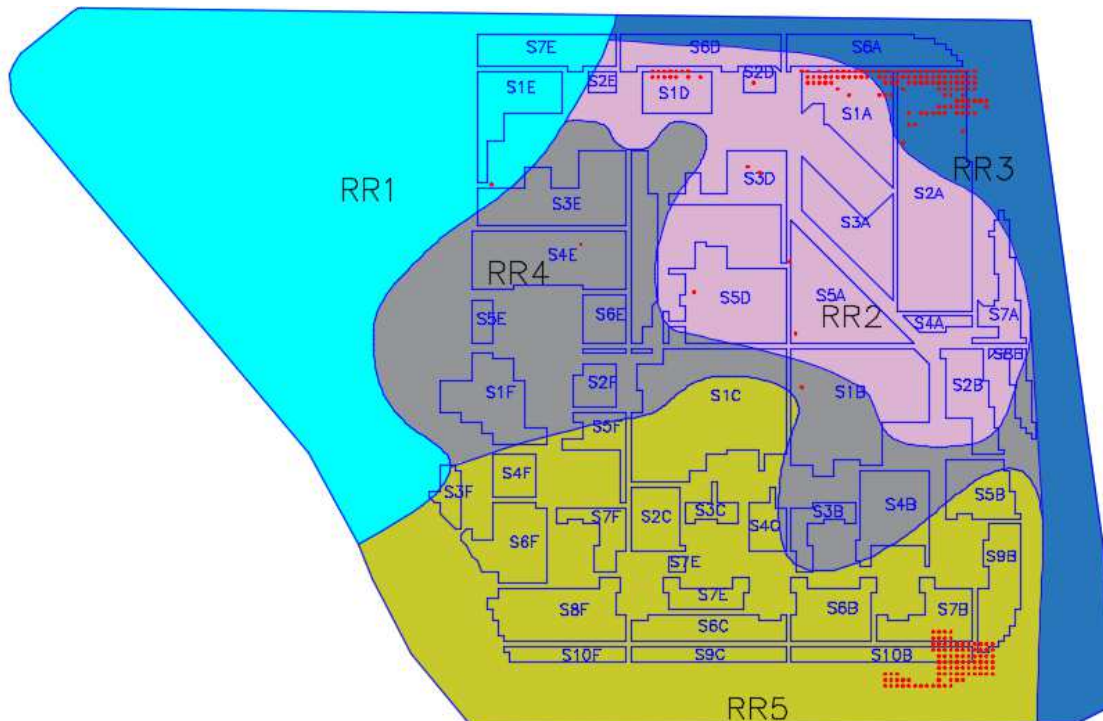


Figura 41 - Locação das 213 estacas da análise de grupo

## 5.1 Estimativas *a priori*

Para as estimativas *a priori* da análise de um conjunto de estacas, tal como na análise individualizada das estacas, foram utilizados os perfis geotécnicos das regiões representativas e os boletins de cravação de cada uma das 213 estacas estudadas.

### 5.1.1 Aoki-Velloso

A distribuição estatística dos resultados das estimativas *a priori* utilizando o método de Aoki-Velloso (1975) é mostrada no gráfico da figura 32.

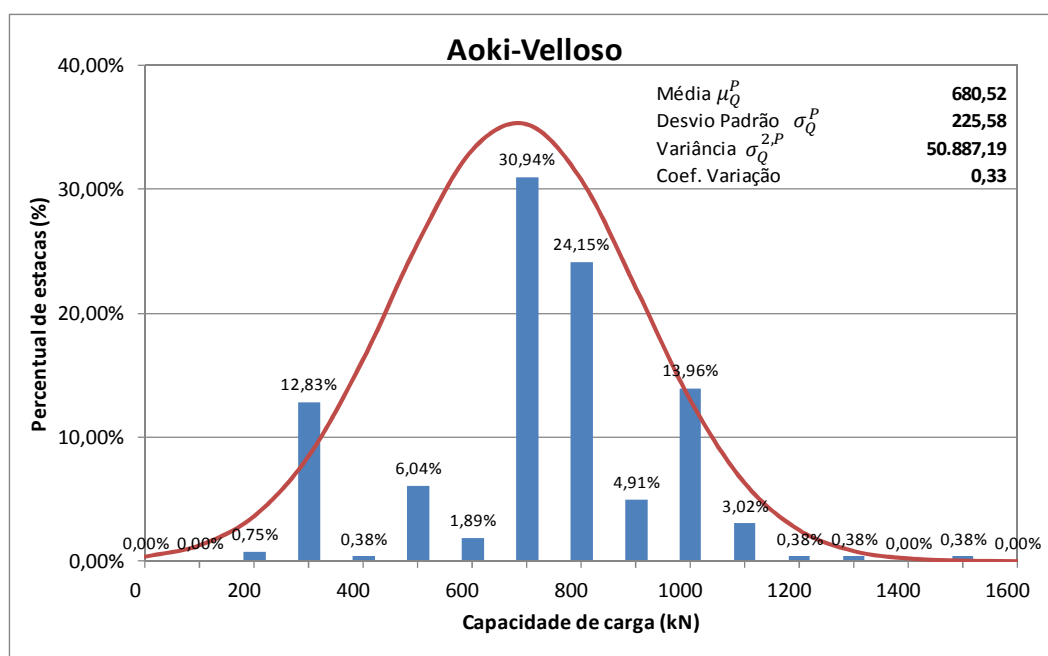


Figura 42 - Distribuição estatística *a priori* pelo método de Aoki-Velloso (1975)



### 5.1.2 Decourt-Quaresma

A distribuição estatística dos resultados das estimativas a priori utilizando o método de Decourt e Quaresma (1978) é mostrada no gráfico da figura 33.

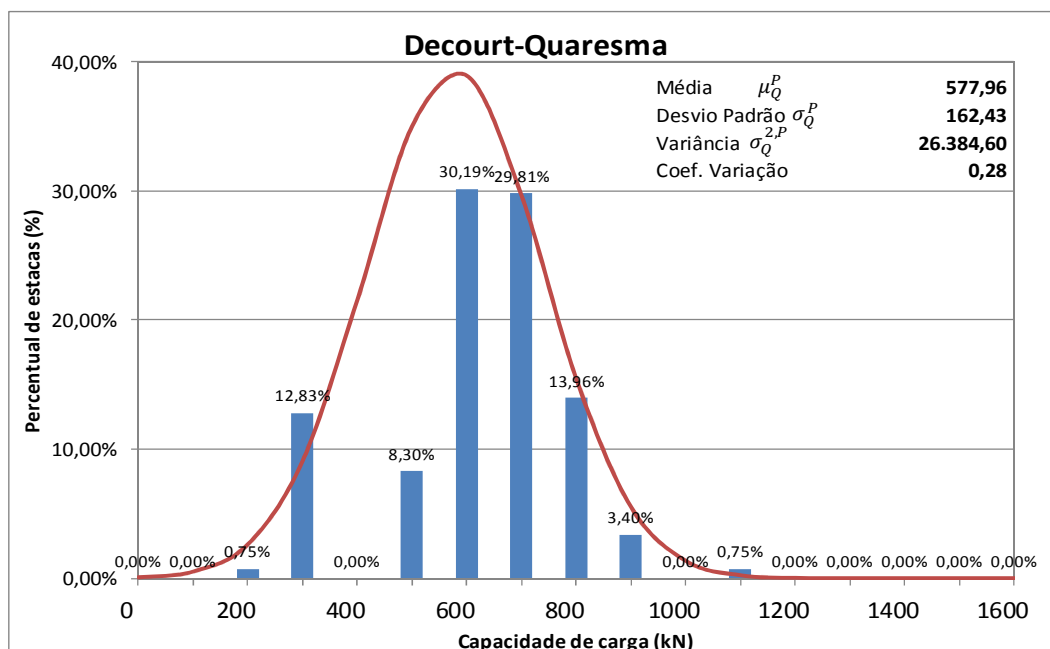


Figura 43 - Distribuição estatística *a priori* pelo método de Decourt-Quaresma (1978)

Cabe destacar os valores de coeficientes de variação de 0,33, da estimativa pelo método de análise de Aoki e Velloso (1975) e de 0,28 da estimativa pelo método de Decourt e Quaresma (1978), bem como os maiores valores de estimativa de capacidade de carga obtidos pelo método de Aoki e Velloso (1975), para este caso de obra.

## 5.2 Distribuição estatística da função de máxima verossimilhança

Os resultados das estimativas de resistência mobilizada utilizando a fórmula dinâmica de Danish, de Sorensen-Hansen (1957), são mostrados no gráfico da figura 34. Os dados utilizados para as estimativas, foram obtidos dos boletins de cravação de cada uma das 213 estacas analisadas.

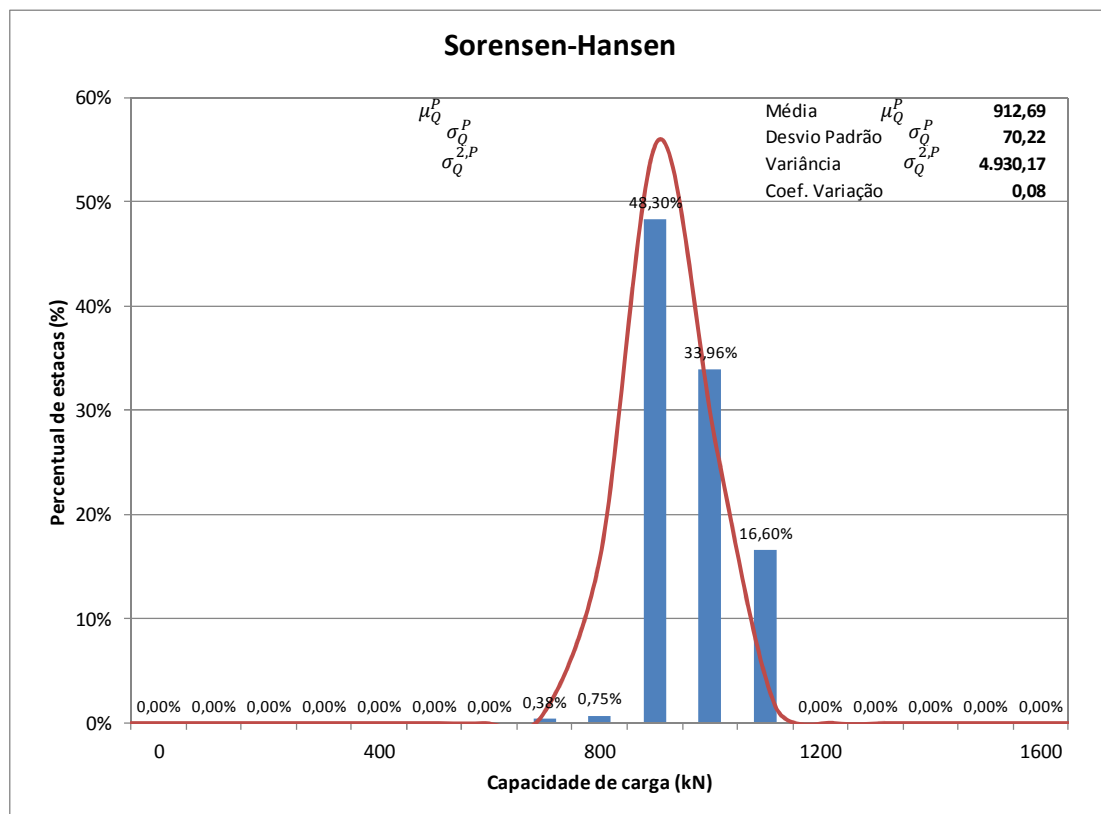


Figura 44 - Distribuição estatística da função de verossimilhança pela fórmula dinâmica de Danish, Sorensen-Hansen.

Destaca-se o reduzido coeficiente de variação da fórmula de Danish, 0,08, uma vez que a incerteza é menor quando se tem as informações de cada registro das 213 estacas. Destaca-se também o maior valor esperado da estimativa, quando comparado a estimativas *a priori*. Este fato pode estar relacionado à eficiência adotada, de 70%. Nos ensaios de carregamento dinâmico, valores menores de eficiência foram registrados.

### 5.3 Atualização da capacidade de carga (estimativa *a posteriori*)

Na tabela 27 são apresentadas as atualizações das estimativas *a priori* de capacidade de carga, utilizando como função de máxima verossimilhança a previsão de resistência mobilizada obtida pela fórmula dinâmica de Danish, Sorensen-Hansen (1957).

Tabela 27 - Atualização pela teoria Bayesiana, estimativa a posteriori

Método		"a priori"	Verossimilhança	"a posteriori"
Semi Empírico x Fórmula Dinâmica		(kN)	(kN)	(kN)
Aoki-Velloso x Sorensen-Hansen	Média $\mu_Q^P$	680,52	912,69	892,19
	Desvio Padrão $\sigma_Q^P$	225,58	70,22	67,04
	Variância $\sigma_Q^{2,P}$	50.887,19	4.930,17	4.494,71
	Coef. Variação - $\Omega$	0,33	0,08	0,08
Decourt-Quaresma x Sorensen-Hansen	Média $\mu_Q^P$	577,96	912,69	859,99
	Desvio Padrão $\sigma_Q^P$	162,43	70,22	64,45
	Variância $\sigma_Q^{2,P}$	26.384,60	4.930,17	4.153,97
	Coef. Variação - $\Omega$	0,28	0,08	0,07

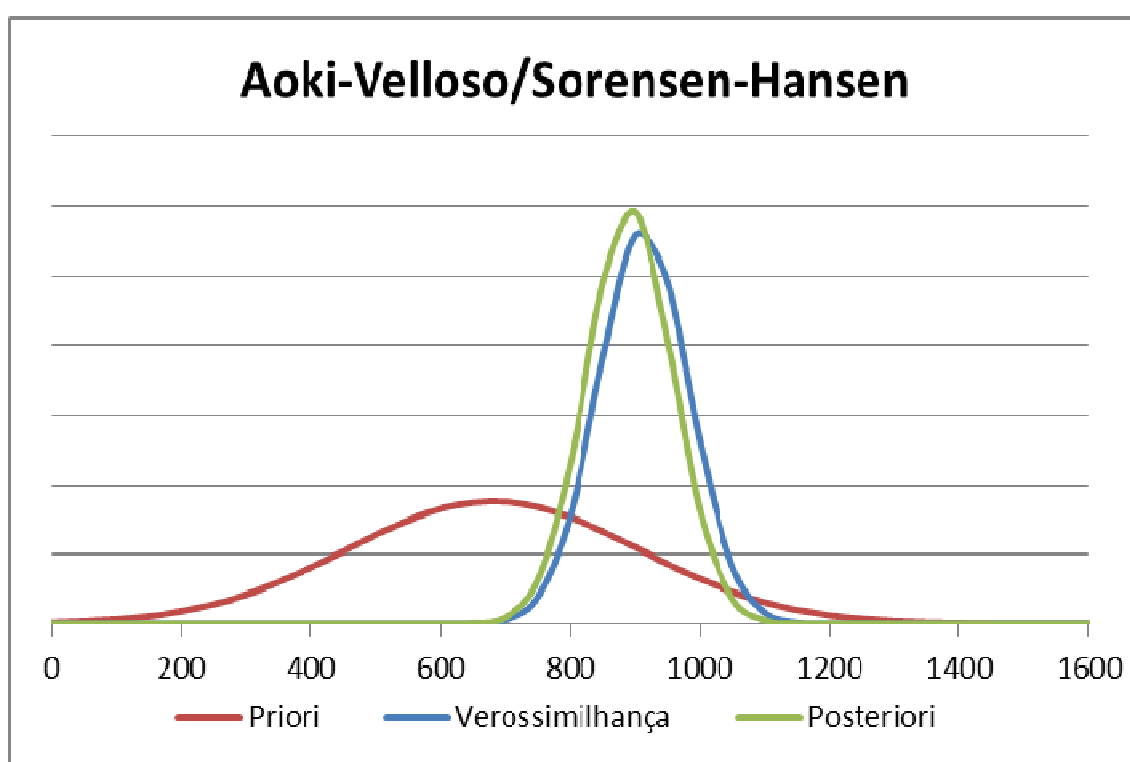


Figura 45 - Distribuição estatística da atualização bayesiana Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen

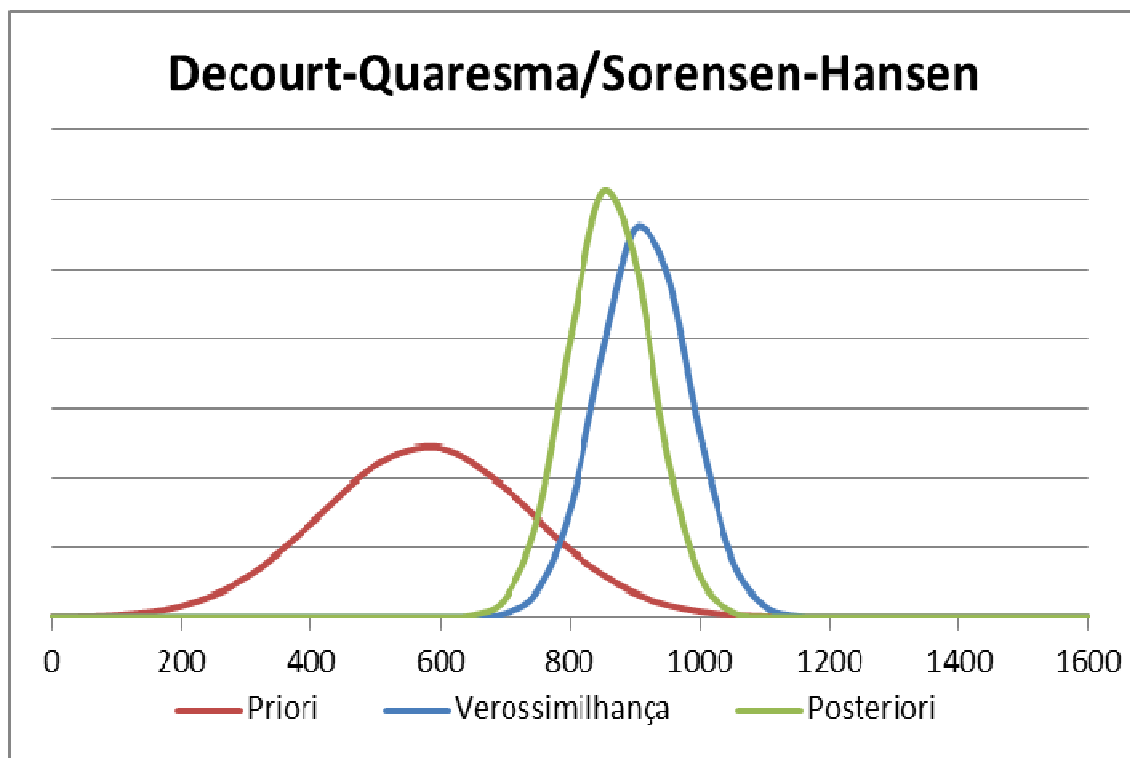


Figura 46 - Distribuição estatística da atualização bayesiana Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen

O emprego da atualização bayesiana, por definição, ocasiona a diminuição da variância na estimativa *a posteriori*, fato este observado nos resultados da análise de um grupo do estaqueamento e na análise individualizada. A redução da variância acarreta em significativa diminuição das incertezas inerentes ao processo de previsão de capacidade de carga do estaqueamento, possibilitando por meio da observação e controle da cravação e posterior aplicação de fórmulas dinâmicas uma maior acurácia das estimativas finais.

Quando comparadas, a média dos valores atualizados das estacas analisadas isoladamente, para o primeiro procedimento utilizando-se a fórmula de Danish, obtém-se o valor de 867,1 kN, para o modelo de Aoki e Velloso (1975) e 824,1 kN, para o modelo de Decourt e Quaresma (1978), próximos às estimativas *a posteriori* para o conjunto de 213 estacas (892,2 e 860,0, respectivamente) .

Destaca-se também que o valor médio dos resultados dos ensaios de carregamento dinâmico, de 1035,0 kN, se aproxima do valor de estimativa atualizada. A razão, em termos numéricos, de  $1035/892 = 1,16$  e  $1036/860 = 1,2$ , pode ser atribuída ao set-up. Uma vez que a camada de argila mole é de muito baixa consistência, com pequena influência na capacidade de carga global, este valor parece bem razoável, para o caso em estudo.

## 6 ÍNDICE DE CONFIABILIDADE E PROBABILIDADE DE RUPTURA

O índice de confiabilidade do estaqueamento e sua probabilidade de ruptura são funções da variância das solicitações e resistência do estaqueamento. Desta forma, um menor coeficiente de variação de ambos implicará em uma menor probabilidade de ruptura da obra para um mesmo fator de segurança determinístico aplicado no projeto. Expandindo este raciocínio, seria possível, com um maior conhecimento das estimativas e consequente redução na variabilidade da capacidade de carga das estacas, empregar um menor fator de segurança, mantendo o empreendimento dentro de parâmetros aceitáveis de probabilidade de ruína em função do tipo de obra.

Como realizado por Alves *et al.* (2017), em relação ao estaqueamento do Porto Novo de Rio Grande, neste capítulo foi analisada a probabilidade de ruína e o índice de confiabilidade do grupo de estacas analisado, para as estimativas *a priori* e estimativas *a posteriori*. Pretende-se, com isso, observar o efeito da atualização bayesiana e consequente minoração do coeficiente de variação da capacidade de carga no aumento do índice de confiabilidade do estaqueamento e, consequentemente, redução da probabilidade de ruptura.

Para os cálculos do índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura, foi utilizada a solicitação de projeto do estaqueamento (450 kN/estaca) e considerada nula sua variação, já que o carregamento é conhecido (peso de aterro):

Tabela 28 - Solicitação de projeto

Solicitação		
Média $\mu_Q^P$		450,00 kN
Desvio Padrão	$\sigma_Q^P$	0,00 kN
Variância	$\sigma_Q^{2,P}$	0,00
Coef. Variação - $\Omega$		0,00

Avelino (2006), em sua análise para o mesmo empreendimento, não considerou a solicitação do estaqueamento determinística (sem variação), tendo calculado a variância da solicitação com base na variância dos parâmetros de cálculo do carregamento, chegando aos seguintes valores:  $\mu_Q^P = 215,04$ ,  $\sigma_Q^P = 16,87$ ,  $\sigma_Q^{2,P} = 284,75$  e  $\Omega = 0,08$ .

A tabela 29 contém os valores dos índices de confiabilidade das funções probabilísticas *a priori* e *a posteriori* para as diferentes combinações de metodologias. Nota-se que as probabilidades de ruína calculadas para as funções *a priori* obtidas das estimativas semi-empíricas são significativamente maiores que as probabilidades obtidas das estimativas atualizadas a partir da função de máxima verossimilhança, em virtude da diminuição do coeficiente de variação obtido por meio da atualização bayesiana

Tabela 29 - Índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura para as funções *a priori*, e *a posteriori*, após atualização pela fórmula de Sorenden-Hansen.

	" A priori"		" A posteriori"	
	Aoki	Decourt	Aoki-Velloso x Sorensen-Hansen	Decourt- Quaresma x Sorensen- Hansen
Média $\mu_Q^P$	680,52	577,96	892,19	859,99
Desvio Padrão $\sigma_Q^P$	225,58	162,43	67,04	64,45
Variância $\sigma_Q^{2,P}$	50.887,19	26.384,60	4.494,71	4.153,97
Coef. Variação	0,331	0,281	0,075	0,075
FS	1,51	1,28	1,98	1,91
$\beta$	1,02	0,78	6,59	6,36
Pr	15,39%	21,77%	0,000000002%	0,000000010%

Avelino (2006) obtém  $\beta = 3,09$ , tendo considerado em sua pesquisa a variância da solicitação nas estacas e a distribuição das curvas de solicitação e capacidade de carga, como log-normais.

Nos gráficos das funções *a posteriori*, pode-se observar o aumento do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) à medida que o coeficiente de variação ( $\Omega$ ) diminui e a diminuição da probabilidade de ruína à medida que  $\Omega$  diminuí, sendo as funções *a posteriori* as funções com maior índice de confiabilidade e menor probabilidade de ruína.

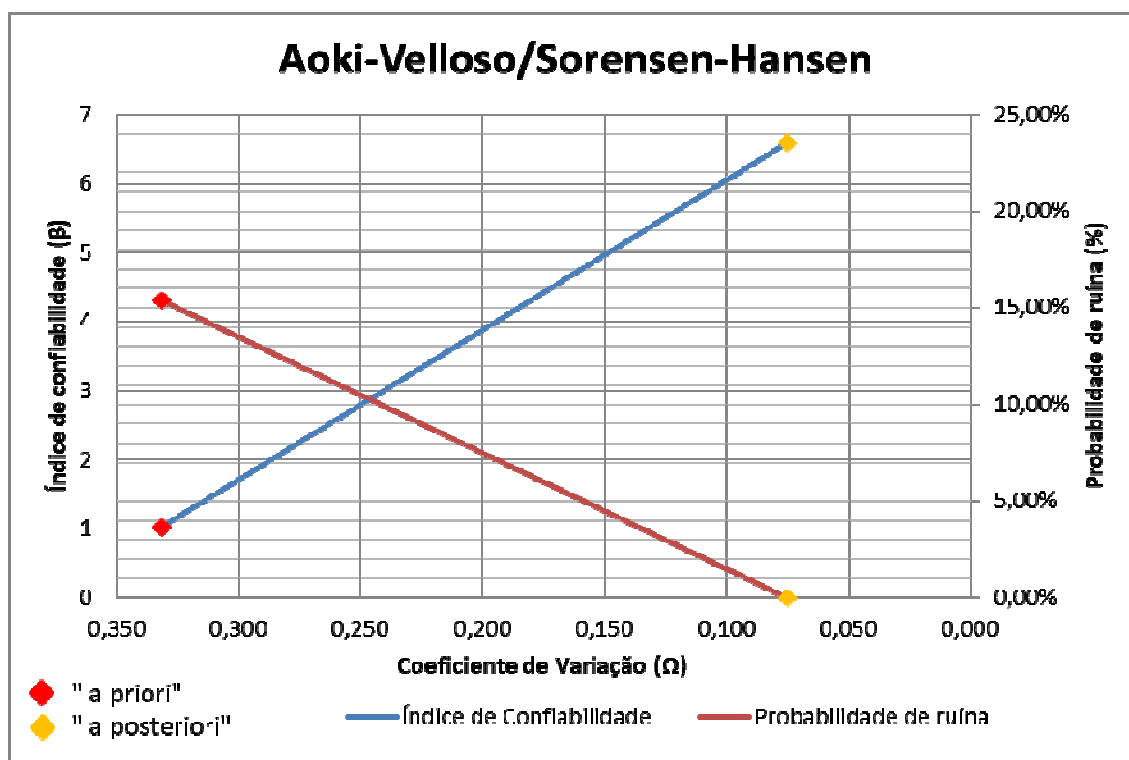


Figura 47 - Gráfico Coeficiente de Variação x Índice de Confiabilidade/Probabilidade de Ruína – Aoki-Velloso/Sorensen-Hansen

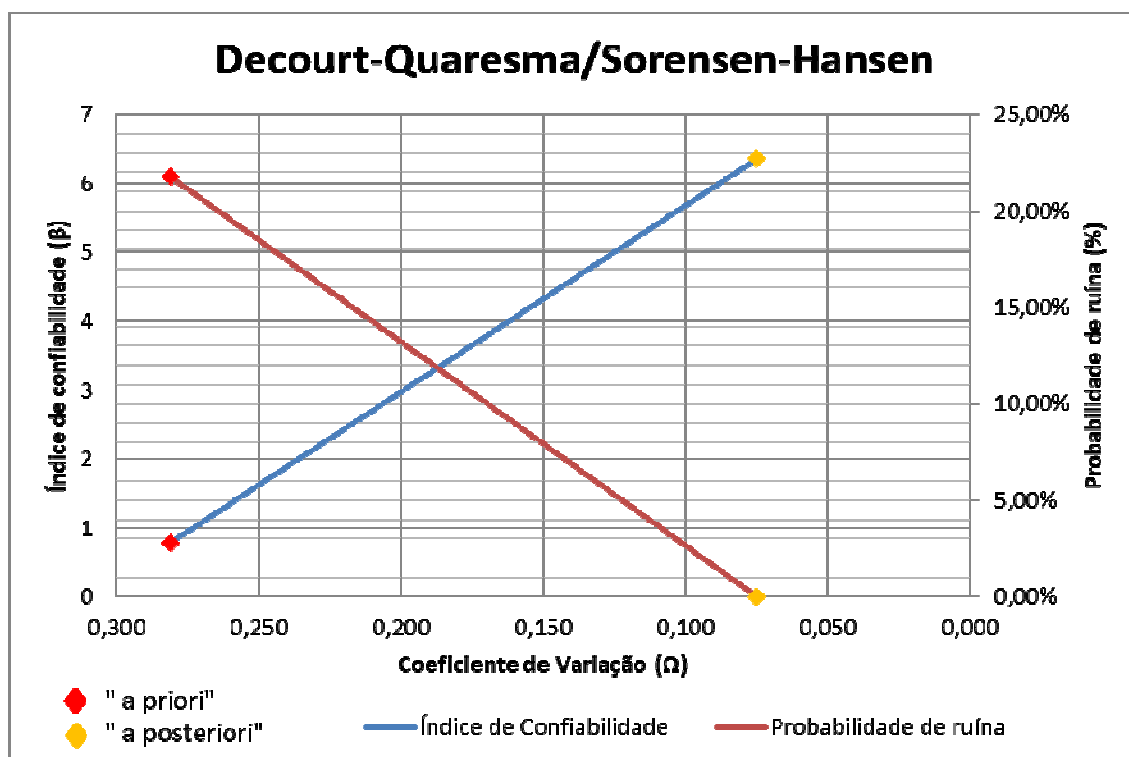


Figura 48 - Gráfico Coeficiente de Variação x Índice de Confiabilidade/Probabilidade de Ruína – Decourt-Quaresma/Sorensen-Hansen

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

### 7.1 Conclusões

A utilização das fórmulas dinâmicas para a estimativa da capacidade de carga das estacas, utilizadas nesta dissertação como função de verossimilhança, apresentaram maior proximidade aos valores obtidos nos ensaios de carga dinâmica que as previsões *a priori* pelas fórmulas semi-empíricas de Aoki-Velloso (1975) e Decourt-Quaresma (1978). Tal observação indica a utilidade dos controles de nega e repique durante a execução da obra como forma de aferição das capacidades de carga previstas em projeto, por meio do emprego das fórmulas dinâmicas.

A utilização da fórmula dinâmica de Sorensen – Hansen (1957) se mostrou mais adequada nas estimativas de capacidade de carga, que a fórmula de Chellis (1951), fato comprovado ao serem observados os gráficos comparativos entre as estimativas obtidas versus os resultados das provas de carga dinâmicas. A adequação da fórmula se deu tanto para o primeiro procedimento de obtenção função de verossimilhança (eficiência do sistema obtida da literatura) quanto para o segundo procedimento (eficiência do sistema obtida dos relatórios de prova de carga). Conclui-se, portanto que o controle de nega durante a cravação e emprego da fórmula dinâmica de Sorensen-Hansen (1957) consistiu em ferramenta adequada à aferição e atualização das estimativas *a priori* feitas pelos métodos semi-empíricos, na presente dissertação.

Observa-se que a estaca cuja execução possa ser comprovada por alguma medida na vertical da locação da estaca (como a nega e repique da estaca cravada), apresenta a possibilidade de atualização da estimativa *a priori*, com redução na incerteza e na probabilidade de insucesso. Já uma estaca do tipo escavada, moldada *in situ*, cuja execução não contemple um controle executivo que possa mensurar seu desempenho, terá sempre uma incerteza maior, com maior chance de insucesso, quando utilizados apenas o critério de fator de segurança da norma.

De certa forma, as normas já contemplam, indiretamente, estes aspectos. Uma estaca prensada, por exemplo, em que se conhece a capacidade de carga de cada estaca por ocasião da execução, costuma ser projetada com um fator de segurança muito menor do que, por exemplo, uma estaca escavada, uma estaca do tipo broca ou uma estaca raíz, por exemplo. Na estaca prensada, a incerteza em



relação à resistência mobilizada é nula, pois é conhecido o valor da capacidade de carga em cada vertical. Já nas estacas tipo raiz, por exemplo, é muito comum se executar uma mesma profundidade média em um grande trecho da obra, sendo muito maior a incerteza. A análise Bayesiana auxilia o projetista no conhecimento e avaliação das incertezas presentes no projeto e melhor avaliar o seu desempenho futuro.

Como por definição a atualização bayesiana conduz a estimativas a posteriori com menor variância, como esperado, foram obtidos bons resultados para ambas as fórmulas e procedimentos de obtenção das funções de verossimilhança, conduzindo a redução dos coeficientes de variação nas estimativas a posteriori. Aplicados os valores atualizados a previsões do índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura da obra, obtém-se significativa melhora em virtude da redução das incertezas propiciada pela utilização das observações de campo (funções de verossimilhança) para a atualização das estimativas *a priori*.

## **7.2 Sugestões para pesquisas futuras**

- Estabelecimento de diferentes funções de verossimilhança, adotando outras fórmulas dinâmicas para atualização;
- Análise de outros bancos de dados, com outros tipos de estacas e perfis de solo;
- Análise em relação a bancos de dados com provas de carga estáticas mais próximas a ruptura;
- Análise isolada das variáveis ( $C_3$  e  $\alpha$ ) da fórmula de Chellis-Aoki (1989) de forma a medir o impacto de cada uma na estimativa de resistência mobilizada.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010. 91 p.

\_\_\_\_\_. NBR 13208: Estacas – Ensaio de carregamento dinâmico. Rio de Janeiro, 2007. 12 p.

ALMEIDA, M.S.S., OLIVEIRA, J.R.M.S., SPOTTI, A.P. Previsão e desempenho de aterro sobre solos moles: estabilidade, recalques e análises numéricas. In: Anais do encontro técnico Previsão do Desempenho vs. Comportamento Real 2000, São Paulo, p. 69-94. 2000.

ALMEIDA, M.S.S. e MARQUES, M.E.S. Aterros sobre camadas espessas de solos muito compressíveis. In: 2º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, 2004, Aveiro, p.103-112. 2004.

ALVES, A.M.L. e AMADORI, T. Variância Estatística Associada a Métodos Semi-Empíricos para Estimativa da Capacidade de Carga de Estacas. Teoria e prática na Engenharia Civil, nº 20 p.61-67. 2012.

ANG, A. H. S. e TANG, W, H. Probability Concepts in Engineering Planning and Design. John Wiley & Sons, Inc, Vol. 1 e 2, 1984.

AOKI, N. e VELLOSO, D. A. An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles. Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, vol. 1, 1975.

AOKI, N. Controle "in situ" da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas via repique elástico da cravação. ABMS. 1986.

AOKI, N. A new dynamic load test concept. XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1989.

AOKI, N. Conceitos de segurança e carga admissível em estacas cravadas. In: SEMINÁRIO DEP. ENGENHARIA CIVIL FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, s/n. 1991, Brasília. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA; ABMS. 18 p. 1991.

AOKI, N. Confiabilidade e segurança em fundações. In: WORKSHOP “PRÁTICA ATUAL DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS”, s/n. 2001, São Paulo. SINDUSCON-SP; ABMS. 10 p. 2001.

AVELINO, J. D., Análise de Desempenho de Estacas de Fundação em um Terreno com Presença de Solos Moles. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

BORBA, M.A., Análise de Desempenho de Aterro Experimental na Vila Pan-Americana. 2007. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2008.

CABRAL, E. V. Contribuição à Confiabilidade de Estacas Cravadas através de um Estudo de Caso com Aplicação da Teoria Bayesiana. 2008. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração: Geotecnia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

CABRAL, S. Mapeamento geológico geotécnico da Baixada de Jacarepaguá e Maciços Circunvizinhos do Rio de Janeiro, Solos e Rochas - ABMS/ABGE, v. 6, n. 2, p. 21-40. 1983.

CINTRA, J.C.A. e AOKI, N. Probabilidade de ruína. In: Fundações por estacas: projeto geotécnico. Oficina de Textos, São Paulo, cap.4, 2010.

CINTRA, J.C.A., AOKI, N., TSUHA, C.H.C, GIACHETI, H.L. Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos. Oficina de Textos, São Paulo, cap.4, 2013.

CHELLIS, R.D. Pile foundations. New York: McGraw-Hill, 1951.

DECOURT, L. e QUARESMA, A. R. Capacidade de Carga de Estacas a partir de Valores de SPT. Anais do 6º COBRAMSEF, Rio de Janeiro, vol.1, p. 45-53, 1978.

EUROCODE 7: Geotechnical design - Part 1: General rules [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

GUTTORMSEN, T. R. Uncertainty in Offshore Geotechnical Engineering. Application of Bayesian Theory to Pile Driving Predictions. Research Report Societe Nationale Elf Aquitaine. NGI Report 85307-9, 1987.

HARR, M. E. Reliability-based Design in Civil Engineering, Mc. Graw-Hill, Inc, USA, 1987.

LACASSE, S. e GOULOIS, A. Reliability Analysis of Axial Pile Capacity. Proceedings of the XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, 1989. Anais, Rotterdam, 1989.

LACASSE, S., TAN, A. H. e KEAVENY, J. M. Expert Assistant for Updating Axial pile Capacity from Pile Driving observations. Proc. Field Measurements in Geotechnics. Sorum, Balkema, 1991.

LACASSE, S. e NADIM, F. Reliability Issues and Future Challenges in Geotechnical Engineering for Offshore Structures. NGI Publication, No 191, p. 1-30, 1994.

PACHECO, M. P. Notas de Aula do Curso de Métodos Probabilísticos em Geotecnia, UERJ, 2016.

PDI – PILE DYNAMICS INC. Ensaio de carregamento dinâmico e monitoração de cravação de estacas (Pile Driving Analyser e CAPWAP). Workshop. São Paulo, 2012.

SILVA, B.L.M. Contribuição à confiabilidade de estacas tipo raiz através de um estudo de provas de carga estáticas com aplicação da teoria bayesiana. 2015. 230 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração: Geotecnia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SORENSEN, T. e HANSEN, B. Pile driving formulae—an investigation based on dimensional considerations and a statistical analysis. In: Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Held in London, 1957.

SOUZA FILHO e J.M, ABREU, P.S.B. Procedimentos Para Controle de Cravação de Estacas Pré-moldadas de Concreto. 6o CBGE/IX COBRAMSEF, Vol.2, 1990. São Paulo, 1990.

SPOTTI, A.P. Aterro estaqueado reforçado instrumentado sobre solo mole. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

SMITH, E. A. L. Pile Driving Analysis by the Wave Equation. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 127, part I, p. 1145-1193. 1960.

VELLOSO, P.P.C. Fundações: aspectos geotécnicos. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica, v.2/3. 1987.

VELLOSO, D.A. e LOPES, F.R. A cravação de estacas e os métodos dinâmicos. In: *Fundações: critérios de projeto, investigação de subsolo, fundações superficiais, fundações profundas por estacas: projeto geotécnico*. Oficina de Textos, São Paulo, cap.13, 2010.

VROUWENVELDER, A. *Effects of Inspection on the Reliability of Foundation Piles*. In: Barends, F.B.J. (ed), *Application of Stress Wave Theory to Piles*, Rotterdam, 1992.

## ANEXO A – RESUMO DOS ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA

Tabela 30 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 15cm

### 1º CAMPANHA DE ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA

#### Altura de queda de 15cm

Estaca	L (m)	W (kN)	H (m)	Dfn (m)	DMX (mm)	Ef.	RMX (kN)
E4-S2A	6,6	26,6	0,15	0,0005	2,6	0,133	310
E10-S1A	20,6	26,6	0,15	0,0001	6,2	0,399	490
E20-S2A	15,2	26,6	0,15	0,0002	2,6	0,131	350
E25-S1A	17,5	25,4	0,15	0	5,4	0,358	410
E30-S1A	16,7	26,6	0,15	0	3,3	0,173	350
E32-S2A	14,9	26,6	0,15	0	2,5	0,139	370
E38-S1A	17,1	25,4	0,15	0	7,6	0,761	630
E41-S1A	15,9	25,4	0,15	0	6,7	0,565	560
E57-S1A	17	25,4	0,15	0,0001	8,1	0,74	630
E61-S1A	18,6	25,4	0,15	0,0004	6,9	0,644	590
E70-S1A	16,7	26,6	0,15	0,0001	5,4	0,37	470
E72-S1A	16,3	26,6	0,15	0	6,7	0,546	590
E81-S1A	16,6	25,4	0,15	0	6,6	0,505	540
E83-S1A	17,3	25,4	0,15	0	5,1	0,309	410
E93-S2A	13,8	26,3	0,15	0	3,1	0,147	340
E110-S2A	14,5	26,3	0,15	0,0001	4,3	0,296	430
E9-S1D	15,5	26,5	0,15	0	5,8	0,458	540
E26-S1D	17,3	26,5	0,15	0	6,7	0,501	520
E33R-S2A	7	26,6	0,15	0,0004	4,7	0,379	500
E49-S2A	6,9	26,3	0,15	0,0003	2,4	0,128	350
E150-S2A	12,7	26,3	0,15	0,0002	3,4	0,203	400
E208-5-S3A	16	25	0,15	0	5,6	0,461	590
E213-5-S3A	16	25	0,15	0	4,8	0,294	460

Tabela 31 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 30cm

**1º CAMPANHA DE ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA****Altura de queda de 30cm**

<b>Estaca</b>	<b>L (m)</b>	<b>W (kN)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Dfn (m)</b>	<b>DMX (mm)</b>	<b>Ef.</b>	<b>RMX (kN)</b>
E4-S2A	6,6	26,6	0,3	0,0007	4,8	0,203	540
E10-S1A	20,6	26,6	0,3	0,0003	9,2	0,472	760
E20-S2A	15,2	26,6	0,3	0,0004	5,9	0,286	630
E25-S1A	17,5	25,4	0,3	0	6,8	0,284	520
E30-S1A	16,7	26,6	0,3	0,0001	7,9	0,406	720
E32-S2A	14,9	26,6	0,3	0	6,5	0,389	790
E38-S1A	17,1	25,4	0,3	0	9,3	0,573	770
E41-S1A	15,9	25,4	0,3	0,0001	8,6	0,471	730
E57-S1A	17	25,4	0,3	0,0005	11,3	0,727	870
E61-S1A	18,6	25,4	0,3	0,0006	9,6	0,601	810
E70-S1A	16,7	26,6	0,3	0	7,5	0,36	680
E72-S1A	16,3	26,6	0,3	0,0006	9,0	0,509	820
E81-S1A	16,6	25,4	0,3	0	9,9	0,601	820
E83-S1A	17,3	25,4	0,3	0,0001	10,2	0,583	790
E93-S2A	13,8	26,3	0,3	0	8,7	0,508	790
E110-S2A	14,5	26,3	0,3	0,0001	8,3	0,459	820
E9-S1D	15,5	26,5	0,3	0	8,7	0,46	750
E11-S1D	15,9	26,5	0,3	0,0003	10,4	0,631	840
E26-S1D	17,3	26,5	0,3	0,0002	9,4	0,464	720
E33R-S2A	7	26,6	0,3	0,0008	7,6	0,443	780
E49-S2A	6,9	26,3	0,3	0,0005	6,8	0,407	790
E150-S2A	12,7	26,3	0,3	0,0003	5,7	0,271	650
E208-5-S3A	16	25	0,3	0,0001	7,4	0,374	740
E213-5-S3A	16	25	0,3	0,0003	7,6	0,361	700

Tabela 32 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 45cm

**1º CAMPANHA DE ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA****Altura de queda de 45cm**

<b>Estaca</b>	<b>L (m)</b>	<b>W (kN)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Dfn (m)</b>	<b>DMX (mm)</b>	<b>Ef.</b>	<b>RMX (kN)</b>
E4-S2A	6,6	26,6	0,45	0,001	8,2	0,375	850
E10-S1A	20,6	26,6	0,45	0,0003	11,8	0,491	920
E20-S2A	15,2	26,6	0,45	0,0006	9,3	0,403	860
E25-S1A	17,5	25,4	0,45	0	9,3	0,322	660
E30-S1A	16,7	26,6	0,45	0,0002	11,2	0,499	950
E32-S2A	14,9	26,6	0,45	0	9,7	0,509	1020
E38-S1A	17,1	25,4	0,45	0	12,2	0,609	930
E41-S1A	15,9	25,4	0,45	0,0003	11,5	0,527	910
E57-S1A	17	25,4	0,45	0,001	14,0	0,744	1050
E61-S1A	18,6	25,4	0,45	0,0008	12,3	0,632	990
E70-S1A	16,7	26,6	0,45	0,0004	11,8	0,591	1050
E72-S1A	16,3	26,6	0,45	0,001	12,5	0,609	1050
E81-S1A	16,6	25,4	0,45	0,0001	12,5	0,632	1010
E83-S1A	17,3	25,4	0,45	0,0002	12,2	0,552	940
E93-S2A	13,8	26,3	0,45	0,0002	10,5	0,472	940
E110-S2A	14,5	26,3	0,45	0,0003	11,3	0,546	1080
E9-S1D	15,5	26,5	0,45	0,0006	10,5	0,476	910
E11-S1D	15,9	26,5	0,45	0,0003	10,4	0,668	1050
E26-S1D	17,3	26,5	0,45	0,0003	12,7	0,569	950
E33R-S2A	7	26,6	0,45	0,0007	10,2	0,534	1020
E49-S2A	6,9	26,3	0,45	0,0009	8,4	0,414	920
E208-5-S3A	16	25	0,45	0,0004	10,3	0,459	980
E213-5-S3A	16	25	0,45	0,0004	10,7	0,461	980



Tabela 33 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 60cm

**1º CAMPANHA DE ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA****Altura de queda de 60cm**

<b>Estaca</b>	<b>L (m)</b>	<b>W (kN)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Dfn (m)</b>	<b>DMX (mm)</b>	<b>Ef.</b>	<b>RMX (kN)</b>
E4-S2A	6,6	26,6	0,6	0,002	9,9	0,388	930
E10-S1A	20,6	26,6	0,6	0,0006	14,6	0,56	1120
E20-S2A	15,2	26,6	0,6	0,0008	11,9	0,447	1010
E25-S1A	17,5	25,4	0,6	0,0001	12,2	0,404	840
E30-S1A	16,7	26,6	0,6	0,0005	11,8	0,414	990
E32-S2A	14,9	26,6	0,6	0,0001	12,4	0,557	1160
E38-S1A	17,1	25,4	0,6	0	14,4	0,633	1070
E41-S1A	15,9	25,4	0,6	0,0005	13,6	0,522	1030
E57-S1A	17	25,4	0,6	0,001	16,2	0,718	1160
E61-S1A	18,6	25,4	0,6	0,001	15,1	0,688	1150
E70-S1A	16,7	26,6	0,6	0,0005	15,1	0,707	1300
E81-S1A	16,6	25,4	0,6	0,0002	15,1	0,669	1170
E83-S1A	17,3	25,4	0,6	0,0003	15,2	0,644	1130
E108-S2A	14,1	26,3	0,6	0,0006	15,9	0,596	1050
E9-S1D	15,5	26,5	0,6	0,0006	13,4	0,529	1070
E26-S1D	17,3	26,5	0,6	0,0004	15,7	0,633	1140
E33R-S2A	7	26,6	0,6	0,0011	12,9	0,635	1180
E49-S2A	6,9	26,3	0,6	0,0011	9,9	0,421	1040
E150-S2A	12,7	26,3	0,6	0,0005	11,2	0,433	1110
E208-5-S3A	16	25	0,6	0,0007	11,7	0,448	1110
E213-5-S3A	16	25	0,6	0,0005	11,5	0,409	1080

Tabela 34 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 75cm

**1º CAMPANHA DE ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA****Altura de queda de 75cm**

<b>Estaca</b>	<b>L (m)</b>	<b>W (kN)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Dfn (m)</b>	<b>DMX (mm)</b>	<b>Ef.</b>	<b>RMX (kN)</b>
E4-S2A	6,6	26,6	0,75	0,0035	12,9	0,484	1000
E20-S2A	15,2	26,6	0,75	0,001	14,3	0,494	1160
E25-S1A	17,5	25,4	0,75	0,0002	15,1	0,478	1000
E30-S1A	16,7	26,6	0,75	0,0007	15,9	0,583	1260
E32-S2A	14,9	26,6	0,75	0,0003	14,6	0,611	1290
E38-S1A	17,1	25,4	0,75	0,0002	16,3	0,631	1150
E11-S1D	15,9	26,5	0,75	0,0006	16,4	0,605	1230
E49-S2A	6,9	26,3	0,75	0,0021	12,2	0,48	1090
E208-5-S3A	16	25	0,75	0,0009	13,9	0,486	1280

Tabela 35 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 15cm

**2º CAMPANHA DE ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA****Altura de queda de 15cm**

<b>Estaca</b>	<b>L (m)</b>	<b>W (kN)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Dfn (m)</b>	<b>DMX (mm)</b>	<b>Ef.</b>	<b>RMX (kN)</b>
E16-S5A	19,25	26,5	0,15	0,0005	4,2	0,192	320
E17-S2D	16,5	25,4	0,15	0,0002	4,1	0,174	280
E26-S4E	16	27,5	0,15	0,0006	5,3	0,349	450
E30-S3D	17	26,5	0,15	0,0005	3,5	0,165	290
E44-S3D	15,8	26,5	0,15	0,0005	4,5	0,229	320
E52-S1B	17,45	25,6	0,15	0,0005	2,9	0,114	260
E57-S3E	17,11	26,7	0,15	0,0004	7,1	0,476	480
E62-S5D	17,4	25,4	0,15	0,0001	5,1	0,355	420
E155-S5A	17	27	0,15	0,0008	3,0	0,13	290

Tabela 36 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 30cm

**2º CAMPANHA DE ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA****Altura de queda de 30cm**

<b>Estaca</b>	<b>L (m)</b>	<b>W (kN)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Dfn (m)</b>	<b>DMX (mm)</b>	<b>Ef.</b>	<b>RMX (kN)</b>
E16-S5A	19,25	26,5	0,3	0,0004	6,6	0,267	520
E17-S2D	16,5	25,4	0,3	0,0001	6,0	0,202	420
E26-S4E	16	27,5	0,3	0,0005	7,2	0,299	590
E30-S3D	17	26,5	0,3	0,0004	5,3	0,173	390
E44-S3D	15,8	26,5	0,3	0,0004	6,3	0,217	440
E52-S1B	17,45	25,6	0,3	0,0004	5,5	0,191	450
E57-S3E	17,11	26,7	0,3	0,0008	11,9	0,668	810
E62-S5D	17,4	25,4	0,3	0,0003	7,0	0,328	570
E155-S5A	17	27	0,3	0,0006	7,4	0,352	590

Tabela 37 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 45cm

**2º CAMPANHA DE ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA****Altura de queda de 45cm**

<b>Estaca</b>	<b>L (m)</b>	<b>W (kN)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Dfn (m)</b>	<b>DMX (mm)</b>	<b>Ef.</b>	<b>RMX (kN)</b>
E16-S5A	19,25	26,5	0,45	0,0005	9,8	0,365	740
E17-S2D	16,5	25,4	0,45	0,0002	9,1	0,291	600
E26-S4E	16	27,5	0,45	0,001	9,3	0,319	720
E30-S3D	17	26,5	0,45	0,0006	7,4	0,207	530
E44-S3D	15,8	26,5	0,45	0,0006	8,6	0,253	570
E52-S1B	17,45	25,6	0,45	0,0006	9,7	0,38	740
E57-S3E	17,11	26,7	0,45	0,001	14,7	0,695	1000
E62-S5D	17,4	25,4	0,45	0,0005	10,1	0,411	740
E155-S5A	17	27	0,45	0,0008	12,6	0,661	900

Tabela 38 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 60cm

**2º CAMPANHA DE ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA****Altura de queda de 60cm**

<b>Estaca</b>	<b>L (m)</b>	<b>W (kN)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Dfn (m)</b>	<b>DMX (mm)</b>	<b>Ef.</b>	<b>RMX (kN)</b>
E16-S5A	19,25	26,5	0,6	0,0008	13,7	0,481	950
E17-S2D	16,5	25,4	0,6	0,0003	11,6	0,343	760
E26-S4E	16	27,5	0,6	0,0021	12,4	0,384	870
E44-S3D	15,8	26,5	0,6	0,0008	11,5	0,323	750
E52-S1B	17,45	25,6	0,6	0,0008	13,0	0,485	930
E62-S5D	17,4	25,4	0,6	0,0007	13,2	0,508	920
E155-S5A	17	27	0,6	0,0015	15,6	0,672	1010

Tabela 39 - Resumo 1º campanha de ensaios dinâmicos altura de queda de 75cm

**2º CAMPANHA DE ENSAIOS DE CARGA DINÂMICA****Altura de queda de 75cm**

<b>Estaca</b>	<b>L (m)</b>	<b>W (kN)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Dfn (m)</b>	<b>DMX (mm)</b>	<b>Ef.</b>	<b>RMX (kN)</b>
E17-S2D	16,5	25,4	0,75	0,0005	14,8	0,438	940
E30-S3D	17	26,5	0,75	0,001	13,7	0,381	920
E44-S3D	15,8	26,5	0,75	0,001	15,5	0,465	960
E62-S5D	17,4	25,4	0,75	0,0009	15,7	0,558	1030

## ANEXO B – CÁLCULO DE C2, $\alpha$ E C3 A PARTIR DOS ENSAIOS CAPWAP

Tabela 40 - CAPWAP estaca E4-S2A, distribuição de carga e cálculos de C2,  $\alpha$  e C3.

E4-S2A			
Pf(m)	N (kN)	li(m)	$\Delta l$ (mm)
0,00	1.000,00		
		1,60	1,37
1,60	981,00		
		1,00	0,84
2,60	961,00		
		1,00	0,82
3,60	932,00		
		1,00	0,79
4,60	892,00		
		1,00	0,75
5,60	851,00		
		1,00	0,65
6,60	654,00		
		C2	5,22
		$\alpha$	0,91
		E	28900000
		C3	6,91

Tabela 41 – Dados do CAPWAP estaca E49-S2A, distribuição de carga e cálculos de C2,  $\alpha$  e C3

E49-S2A			
Pf(m)	N (kN)	li(m)	$\Delta l$ (mm)
0,00	1.090,00		
		1,80	1,66
1,80	1.047,00		
		1,00	0,89
2,80	1.004,00		
		1,10	0,93
3,90	954,00		
		1,00	0,79
4,90	883,00		
		1,00	0,72
5,90	787,00		
		1,00	0,63
6,90	677,00		
		C2	5,62
		$\alpha$	0,86
		E	28900000
		C3	6,06

Tabela 42 – Dados do CAPWAP estaca E44-S3D, distribuição de carga e cálculos de C2,  $\alpha$  e C3.

<b>E44-S3D</b>			
<b>Pf(m)</b>	<b>N (kN)</b>	<b>li(m)</b>	<b><math>\Delta l</math> (mm)</b>
0,00	960,00		
		1,60	1,33
1,60	951,00		
		2,10	1,72
3,70	932,00		
		2,00	1,62
5,70	932,00		
		2,00	1,59
7,70	899,00		
		2,00	1,47
9,70	795,00		
		2,10	1,27
11,80	602,00		
		2,00	0,92
13,80	463,00		
		2,00	0,68
15,80	321,00		
		C2	10,6
		$\alpha$	0,81
		E	28820000
		C3	6,06

Tabela 43 – Dados do CAPWAP estaca E25-S1A, distribuição de carga e cálculos de C2,  $\alpha$  e C3.

<b>E25-S1A</b>			
<b>Pf(m)</b>	<b>N (kN)</b>	<b>li(m)</b>	<b><math>\Delta l</math> (mm)</b>
0,00	1.000,00		
		3,00	2,56
3,00	974,00		
		2,10	1,76
5,10	962,00		
		2,00	1,66
7,10	962,00		
		2,10	1,73
9,20	948,00		
		2,10	1,67
11,30	892,00		
		2,10	1,50
13,40	764,00		
		2,00	1,28
15,40	716,00		
		2,10	1,28
17,50	689,00		
		C2	13,44
		$\alpha$	0,89
		E	28900000
		C3	3



Tabela 44 – Dados do CAPWAP estaca E213-5-S3A, distribuição de carga e cálculos de C2,  $\alpha$  e C3

<b>E213-5-S3A</b>			
<b>Pf(m)</b>	<b>N (kN)</b>	<b>li(m)</b>	<b><math>\Delta l</math> (mm)</b>
0,00	1.080,00		
		1,90	1,71
1,90	1.079,00		
		2,00	1,79
3,90	1.073,00		
		2,00	1,77
5,90	1.052,00		
		2,00	1,72
7,90	1.007,00		
		2,10	1,71
10,00	943,00		
		2,00	1,27
12,00	584,00		
		2,00	0,88
14,00	467,00		
		2,00	0,73
16,00	408,00		
		C2	11,58
		$\alpha$	0,8
		E	30000000
		C3	0,94

Tabela 45 - Dados do CAPWAP estaca E61-S1A, distribuição de carga e cálculos de C2,  $\alpha$  e C3.

<b>E61-S1A</b>			
<b>Pf(m)</b>	<b>N (kN)</b>	<b>li(m)</b>	<b><math>\Delta l</math> (mm)</b>
0,00	1.150,00		
		2,10	1,99
2,10	1.121,00		
		2,00	1,86
4,10	1.107,00		
		2,10	1,93
6,20	1.103,00		
		2,10	1,92
8,30	1.091,00		
		2,00	1,80
10,30	1.073,00		
		2,10	1,83
12,40	1.013,00		
		2,10	1,69
14,50	918,00		
		2,00	1,46
16,50	830,00		
		2,10	1,41
18,60	779,00		
		C2	15,89
		$\alpha$	0,89
		E	30000000
		C3	2,04

Tabela 46 - Dados do CAPWAP estaca E93-S2A, distribuição de carga e cálculos de C2,  $\alpha$  e C3.

<b>E93-S2A</b>			
<b>Pf(m)</b>	<b>N (kN)</b>	<b>li(m)</b>	<b><math>\Delta l</math> (mm)</b>
0,00	940,00		
		1,80	1,45
1,80	928,00		
		2,00	1,59
3,80	908,00		
		2,00	1,55
5,80	887,00		
		2,00	1,49
7,80	832,00		
		2,00	1,38
9,80	760,00		
		2,00	1,25
11,80	684,00		
		2,00	1,11
13,80	604,00		
		C2	9,82
		$\alpha$	0,88
		E	28900000
		C3	1,1

Tabela 47 - Dados do CAPWAP estaca E26-S4E, distribuição de carga e cálculos de C2,  $\alpha$  e C3

E26-S4E			
Pf(m)	N (kN)	li(m)	$\Delta l$ (mm)
0,00	950,00	1,40	1,15
1,40	940,00	2,10	1,69
3,50	916,00	2,10	1,61
5,60	850,00	2,10	1,48
7,70	774,00	2,00	1,25
9,70	667,00	2,10	1,14
11,80	585,00	2,10	1,01
13,90	525,00	2,10	0,88
16,00	445,00		
		C2	10,21
		$\alpha$	0,77
		E	28820000
		C3	0,637

## ANEXO C – DETERMINAÇÃO DO VALOR ESPERADO E VARIÂNCIA PARA O MÉTODO DE AOKI-VELLOSO

### C.1 Atrito Lateral

Segundo Alves e Amadori (2012), o atrito lateral nas diversas camadas é calculado segundo as expressões abaixo. Os valores esperados das variáveis  $x_i$  são designados como  $\mu_{x_i}$  e sua variância como  $\sigma_{x_i}^2$ .

Se  $f_s$  é a função  $y$ , o valor esperado de  $y$  é igual a  $y = \bar{y} = E[f(x)] \cong f(\bar{x})$ .

O atrito lateral unitário é dado por:

$$f_s = \alpha \times K \times N_{SPT} \quad (C.1)$$

em que  $K$  é função do tipo de solo

onde a variável aleatória  $x = \bar{N}_{SPT}$ , é o valor esperado do  $N_{SPT}$ .

Considerando a aplicação para cada camada de 1m,  $x = \bar{N}_{SPT}$  e

$$f_s(x) = \alpha \times K \times x \quad (C.2)$$

$$\mu_{f_s} = E[f_s(x)] = \alpha \times K \times \bar{x} \quad (C.3)$$

$$\mu_{Ql} = \frac{\pi \times D \times 1 \times \alpha \times K \times \bar{x}}{F_2} \quad (C.4)$$

Então, tem-se:

$$\mu_{Ql} = \frac{\pi \times D \times 1 \times \alpha \times K \times \bar{N}_{SPT}}{F_2} \quad (C.5)$$

Sendo  $\mu_{Ql}$  o valor esperado da resistência de atrito a cada metro de profundidade em função do valor esperado do  $N_{SPT}$  para a profundidade correspondente. O valor esperado do  $N_{SPT}$  pode ser o valor médio, entre as  $n$  sondagens representativas, ou o valor ajustado, para a profundidade de cálculo, para a camada considerada.

A variância é dada por:

$$V[y] = V[f(x)] \cong [f'(\bar{x})]^2 \times V[x] \quad (C.6)$$

Aplicando a expressão acima, ao atrito lateral por Decourt e Quaresma (1978), a cada intervalo de 1m, vem:

$$V[f_s] = V[f_s(N_{SPT})] = (\alpha \times K)^2 \times V[N_{SPT}] \quad (C.7)$$

e

$$\sigma_{Q_l}^2 = V[Q_l] \text{ (para cada metro)} = \left( \frac{\pi \times D \times 1 \times \alpha \times K}{F_2} \right)^2 \times V[N_{SPT}] \quad (C.8)$$

A variância do  $N_{SPT}$  corresponde ao quadrado do desvio padrão a uma dada profundidade, entre as n sondagens representativas, ou o cálculo da variância pode ser procedido por regressão linear em função da profundidade tomando-se a variância da resistência média do  $N_{SPT}$  em função da profundidade, para camada do perfil atravessada durante a cravação da estaca.

## C.2 Resistência de ponta

Se  $q_p$  é a função y, o valor esperado de y é igual a  $y = \bar{y} = E[f(x)] = f(\bar{x})$ .

O valor esperado de ponta é:

$$\mu_{q_p} = \frac{K \times E[N_{SPT}]}{F_1} \quad (C.9)$$

$$\mu_{Q_p} = \pi \times \frac{D^2}{4} \times \frac{K \times E[N_{SPT}]}{F_1} \quad (C.10)$$

A variância é dada por:

$$\sigma_{q_p}^2 = \left[ \frac{K}{F_1} \right]^2 \times V[N_{SPT}] \quad (C.11)$$

$$\sigma_{Q_p}^2 = \left[ \frac{\pi \times D^2}{4} \right]^2 \times \left[ \frac{K}{F_1} \right]^2 \times V[N_{SPT}] \quad (C.12)$$

Os valores de K,  $\alpha$ ,  $F_1$  e  $F_2$  do método de Aoki e Velloso (1975) dependem do tipo de solo e do tipo de estaca e são dados pelas tabelas à seguir:

Tabela 48 - Coeficiente K e razão de atrito  $\alpha$ , Monteiro(1997)

Tipo de Solo	$\alpha$ (%)	K (kN/m <sup>2</sup> )
Areia	2,1	730,0
Areia argilosa	2,8	540,0
Areia argilo-siltosa	2,9	570,0

Areia silto-argilosa	2,4	630,0
Areia siltosa	2,3	680,0
Argila	5,5	250,0
Argila arenosa	3,2	440,0
Argila areno-siltosa	3,8	300,0
Argila silto-arenosa	4,1	330,0
Argila siltosa	4,5	260,0
Silte	3,2	480,0
Silte areno-argiloso	3,2	450,0
Silte arenoso	3,0	500,0
Silte argilo-arenoso	3,3	400,0
Silte argiloso	3,6	320,0

Tabela 49 - Fatores de correção  $F_1$  e  $F_2$  Aoki e Velloso (1975) atualizado Aoki (1985)

<b>Tipo de Estaca</b>	<b><math>F_1</math></b>	<b><math>F_2</math></b>
Franki	2,5	2 $F_1$
Metálica	1,75	2 $F_1$
Pré-moldada	1+D/0,80	2 $F_1$
Escavada	3,0	2 $F_1$
Raiz, hélice contínua e ômega	2,0	2 $F_1$

O valor esperado do  $N_{SPT}$  corresponde ao valor médio, entre as  $n$  sondagens representativas, ou o valor ajustado, para a profundidade de cálculo, para a camada considerada.

Em termos globais, para o valor esperado e a variância da resistência total do solo durante a cravação, admitindo-se independência estatística entre  $Q_L$  e  $Q_P$  tem-se:

$$\mu_{Q_T} = \mu_{Q_{l_{acum}}} + \mu_{Q_p} \quad (C.13)$$

$$\sigma_{Q_T}^2 = \sigma_{Q_{l_{acum}}}^2 + \sigma_{Q_p}^2 \quad (C.14)$$



## ANEXO D – DETERMINAÇÃO DO VALOR ESPERADO E VARIÂNCIA PARA O MÉTODO DE DECOURT-QUARESMA

### D.1 Atrito Lateral

Segundo Cabral (2008), o atrito lateral nas diversas camadas é calculado segundo as expressões abaixo. Os valores esperados das variáveis  $x_i$  são designados como  $\mu_{x_i}$  e sua variância como  $\sigma_{x_i}^2$ .

Se  $f_s$  é a função  $y$ , o valor esperado de  $y$  é igual a  $y = \bar{y} = E[f(x)] \cong f(\bar{x})$ .

O atrito lateral unitário é dado por:

$$f_s = \left( \frac{N_{SPT}}{0,30} + 10 \right) \quad (D.1)$$

em kN/m<sup>2</sup>

onde a variável aleatória  $x = \bar{N}_{SPT}$ , é o valor esperado do  $N_{SPT}$ .

Considerando a aplicação para cada camada de 1m,  $x = \bar{N}_{SPT}$  e

$$f_s(x) = \left( \frac{x}{0,30} + 10 \right) \quad (D.2)$$

$$\mu_{f_s} = E[f_s(x)] = \left( \frac{\bar{x}}{0,30} + 10 \right) \quad (D.3)$$

$$\mu_{Ql} = \pi \times D \times 1 \left( \frac{\bar{x}}{0,30} + 10 \right) \quad (D.4)$$

Então, tem-se:

$$\mu_{Ql} = \pi \times D \times 1 \left( \frac{\bar{N}_{SPT}}{0,30} + 10 \right) \quad (D.5)$$

Sendo  $\mu_{Ql}$  o valor esperado da resistência de atrito a cada metro de profundidade em função do valor esperado do  $N_{SPT}$  para a profundidade correspondente. O valor esperado do  $N_{SPT}$  pode ser o valor médio, entre as  $n$  sondagens representativas, ou o valor ajustado, para a profundidade de cálculo, para a camada considerada.

A variância é dada por:

$$V[y] = V[f(x)] \cong [f'(\bar{x})]^2 \times V[x] \quad (D.6)$$

Aplicando a expressão acima, ao atrito lateral por Decourt e Quaresma (1978), a cada intervalo de 1m, vem:

$$V[f_s] = V[f_s(N_{SPT})] = (1/0,3)^2 \times V[N_{SPT}] \quad (D.7)$$

e

$$\sigma_{Q_l}^2 = V[Q_l] \text{ (para cada metro)} = [\pi \times D \times l]^2 \times \left(\frac{1}{0,3}\right)^2 \times V[N_{SPT}] \quad (D.8)$$

A variância do  $N_{SPT}$  corresponde ao quadrado do desvio padrão a uma dada profundidade, entre as  $n$  sondagens representativas, ou o cálculo da variância pode ser procedido por regressão linear em função da profundidade tomando-se a variância da resistência média do  $N_{SPT}$  em função da profundidade, para camada do perfil atravessada durante a cravação da estaca.

## D.2 Resistência de ponta

Se  $q_p$  é a função  $y$ , o valor esperado de  $y$  é igual a  $y = \bar{y} = E[f(x)] = f(\bar{x})$ .

O valor esperado de ponta é:

$$\mu_{q_p} = 10 \times C \times E[N_{SPT}] \quad (D.9)$$

$$\mu_{Q_p} = \pi \times \frac{D^2}{4} 10 \times C \times E[N_{SPT}] \quad (D.10)$$

A variância é dada por:

$$\sigma_{q_p}^2 = [10 \times C]^2 \times V[N_{SPT}] \quad (D.11)$$

$$\sigma_{Q_p}^2 = \left[\frac{\pi \times D^2}{4}\right]^2 \times [10 \times C]^2 \times V[N_{SPT}] \quad (D.12)$$

O valor de  $C$  do método Decourt e Quaresma depende do tipo de solo, de acordo com a Tabela abaixo.

Tabela 50 - Valores de Decourt e Quaresma, (1978)

<b>Tipo de Solo</b>	<b>C (tf/m<sup>2</sup>)</b>
Argilas	12
Siltos Argilosos (alteração de rocha)	20
Siltos Arenosos (alteração de rocha)	25
Areias	40

O valor esperado do  $N_{SPT}$  corresponde ao valor médio, entre as  $n$  sondagens representativas, ou o valor ajustado, para a profundidade de cálculo, para a camada considerada.

No caso da ponta, cabe acessar os valores de  $N_{SPT}$  correspondentes à profundidade anterior, à profundidade da ponta e à profundidade posterior de todas as sondagens representativas.

Em termos globais, para o valor esperado e a variância da resistência total do solo durante a cravação, admitindo-se independência estatística entre  $Q_L$  e  $Q_P$  tem-se:

$$\mu_{Q_T} = \mu_{Q_{lacum}} + \mu_{Q_p} \quad (D.13)$$

$$\sigma_{Q_T}^2 = \sigma_{Q_{lacum}}^2 + \sigma_{Q_p}^2 \quad (D.14)$$

## ANEXO E - SETORES ANALISADOS, DADOS DAS SONDAGENS E DIAGRAMAS DE CRAVAÇÃO DAS ESTACAS ANALISADAS

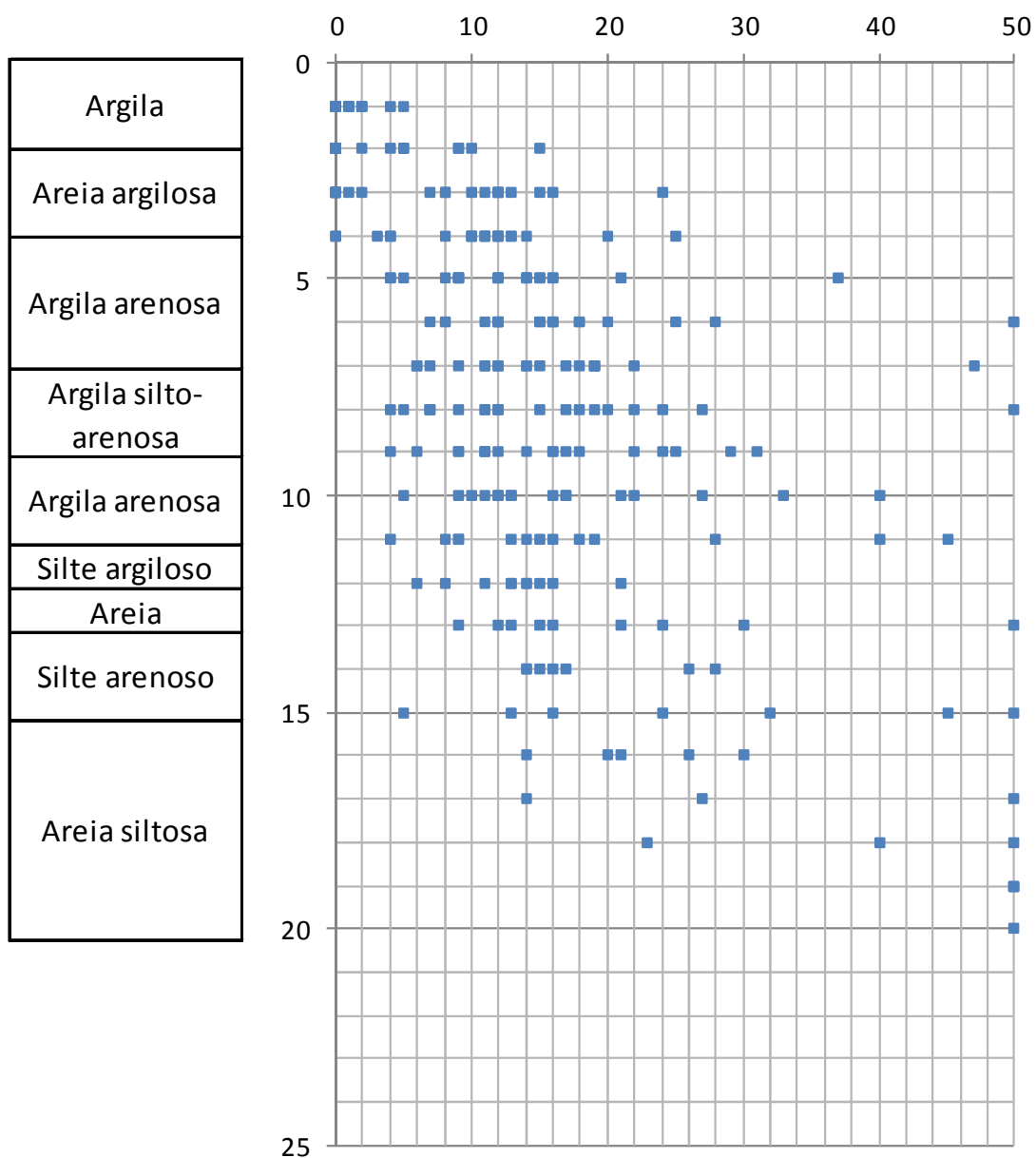


Figura 49 - Nuvem de Nspt da Região Representativa RR1

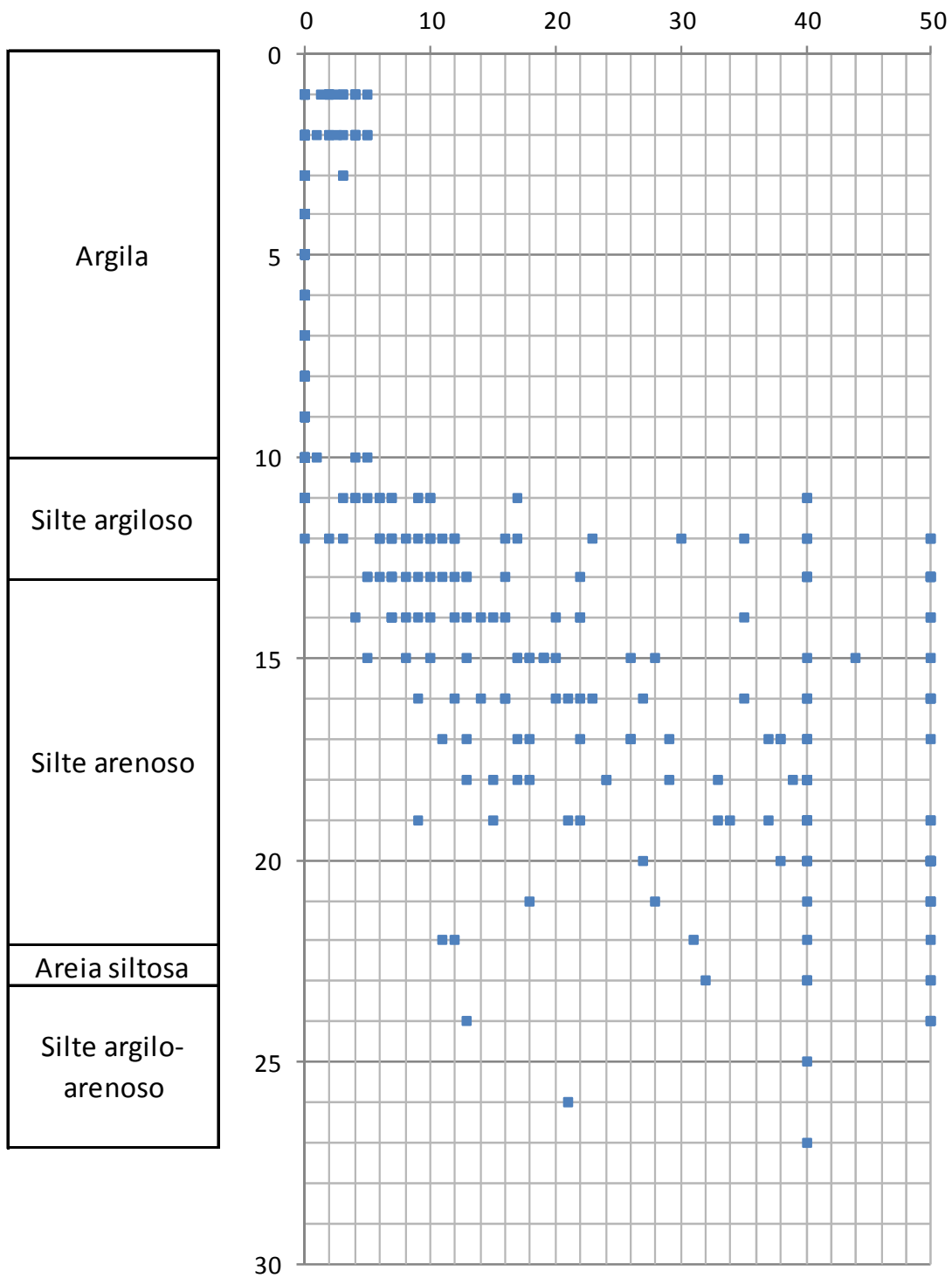


Figura 50 - Nuvem de Nspt da Área Representativa AR2

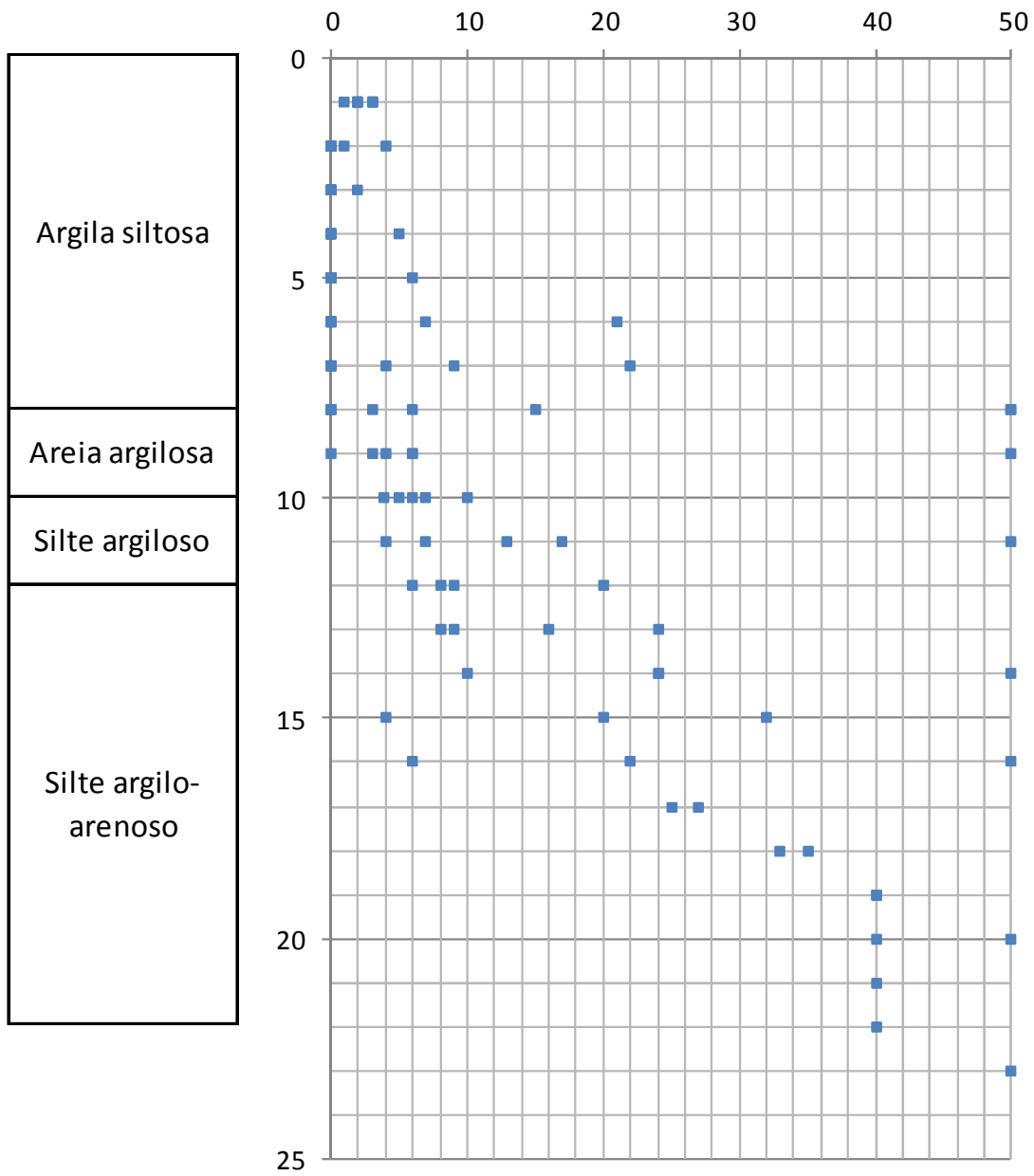


Figura 51 - Nuvem de Nspt da Área Representativa AR3

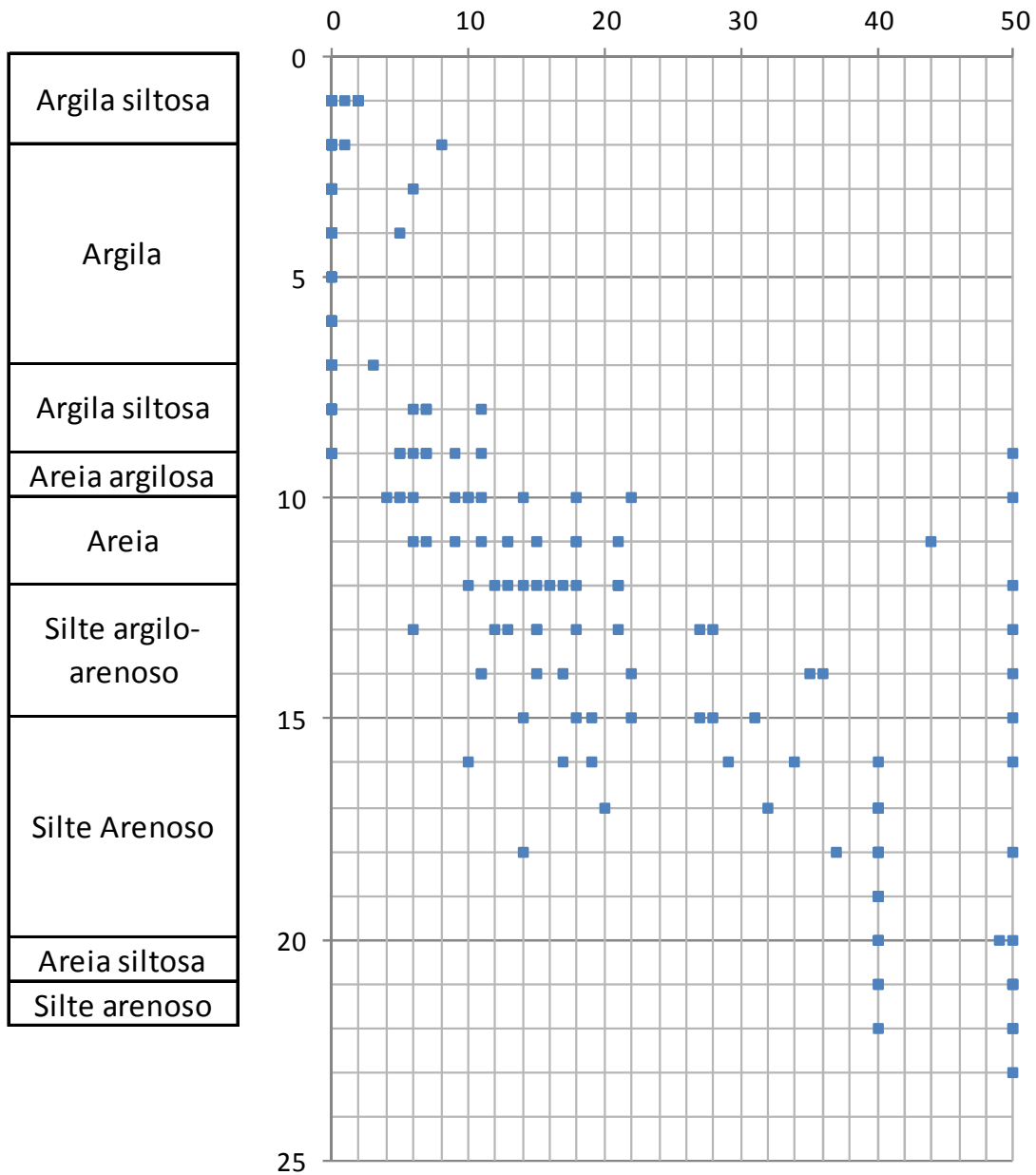


Figura 52 - Nuvem de Nspt da Área Representativa AR4

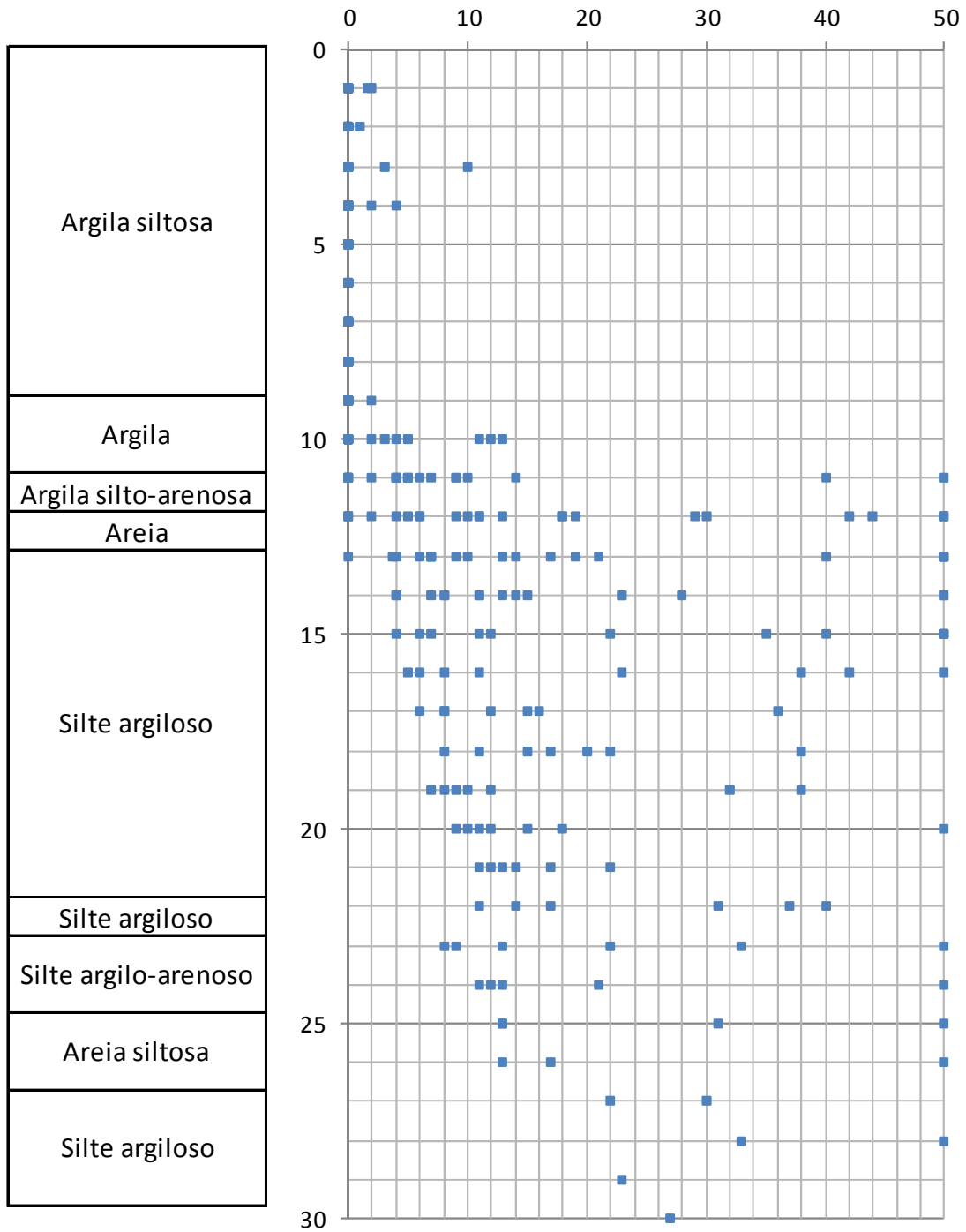


Figura 53 - Nuvem de Nspt da Região Representativa RR5



## ANEXO F – RESUMO DOS BOLETINS DE CRAVAÇÃO UTILIZADOS

Tabela 51 - Resumo dos boletins de cravação utilizados na pesquisa

Setor	Estaca	N	E	K (mm)	Nega p/10 Golpes (mm)	Compr. Cravado (m)	Alt. Cepo (cm)	Alt. Tortas (cm)	Martelo (kg)	Capacete (kg)	Altura de Queda (cm)	Data
1A	10	120	89	11	4	20,6	20	6	2630	250	30	28/12/2004
1A	25	119	85	9	3	17,5			2540		30	
1A	30	119	91	6	2	16,7	30	6	2540	290	30	04/01/2005
1A	38	118	81	12	8	17,1	30	6	2540	210	30	10/01/2005
1A	41	118	84	14	3	15,9	30	6	2540	210	30	10/01/2005
1A	57	117	82	15	3	17	30	6	2540	210	30	14/01/2005
1A	61	117	86	10	12	18,6	30	6	2540	210	30	12/01/2005
1A	70	117	95	12	3	16,7	30	6	2660	290	30	12/01/2005
1A	72	117	97	14	2	16,3	30	6	2660	290	30	12/01/2005
1A	81	116	88	13	5	16,6	30	6	2540	210	30	12/01/2005
1A	83	116	90	13	3	17,3			2540		30	
1B	52	67	80	9	0	17,45	30	6	2560	140	30	17/02/2005
1B	390	55	95	7	1	10,07	30	6	2660	290	30	14/03/2005
1C	338	57	55	7	0	23,85			2700		50	
1D	9	120	60	10	2	15,5	30	6	2650	290	30	06/01/2005
1D	11	120	62	15	5	15,9	30		2650		30	06/01/2005
1D	26	119	63	15	5	17,3	30	6	2650	140	30	13/01/2005
1F	81	62	17	7	1	16,78			2750		30	
2A	4	120	101	7	7	6,6	30	6	2630	250	30	30/12/2004
2A	20	119	103	11	2	15,2	30	6	2630	250	30	04/01/2005
2A	32	118	101	8	3	14,9	30	6	2660	290	30	06/01/2005
2A	49	117	104	12	2	6,9	30	6	2630	290	30	06/01/2005
2A	93	114	105	12	1	13,8			2630		30	
2A	108	113	106	12	4	15,1	30	6	2630	250	30	03/01/2005
2A	110	113	109	10	2	14,5			2630	250	30	12/01/2005
2A	150	110	107	10	2	12,7	30	6	2630	250	30	17/01/2005
2A	33R	118	102	10	1	7	30	6	2660	290	40	17/01/2005
2B	90	59	109	8	1	19,29			2670		30	
2C	31	41	48	6	0	18,8			2650		50	
2D	17	118	72	13	2	16,5	30	6	2540	220	30	01/02/2005
3A	208-5	82	92	7	0	16			2500		50	
3A	213-5	82	97	7	0	16			2500		50	
3D	30	104	71	14	6	17	30	6	2650	140	30	27/01/2005
3D	44	103	73	14	5	15,8	30	6	2650	140	30	28/01/2017
3E	57	101	28	13	5	17,11	30	6	2670	290	30	10/03/2005
4B	183	33	90	9	1	17,2			2660		30	
4C	80	32	73	11	0	23,85			2700		50	19/04/2005
4E	26	91	43	11	1	16	30	6	2670	290	30	15/02/2005
5A	16	88	78	16	3	19,25	30	6	2650	140	30	15/02/2005
5A	155	76	79	9	0	17,5	30	6	2700	140	30	10/02/2005
5C	15	25	69	9	1	19,4			2670		30	
5D	62	83	62	11	1	17,4	30	6	2540	220	30	14/02/2005
5D	159	78	57	11	3	17,7	30	6	2540	330	30	25/02/2005
5F	69	51	35	11	0	20,6			2500		50	
6B	91	20	89	10	1	19,42			2650		30	25/02/2005
6C	22	19	72			22,05			2540		30	
6E	47	74	40	8	2	15,38			2660		30	
6F	35	38	25	9	1	18,1			2650		30	
7B	4	26	105	12	1	14,88			2780		30	
7B	27	23	109	8	1	12,69	30	6	2780	290	30	06/07/2005
7B	28	23	110	9	1	12,83	30	6	2660	290	30	06/07/2005
7B	37	22	109	7	1	12			2780		30	06/07/2005
7E	180	121	38	10	1	12,04			2650		30	
8F	231	16	43	11	1	17,13			2660		30	