

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE
TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

ELIS REGINA HALITSKI

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE MÉTODOS
SEMIEMPÍRICOS NO DIMENSIONAMENTO DE ESTACAS
PRÉ-MOLDADAS NO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA- PR**

PONTA GROSSA

2022

ELIS REGINA HALITSKI

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE MÉTODOS
SEMIEMPÍRICOS NO DIMENSIONAMENTO DE ESTACAS
PRÉ-MOLDADAS NO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA- PR**

Trabalho apresentado à disciplina de OTCC como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Prof. MSc. Bianca Penteado de Almeida Tonus

PONTA GROSSA

2022

ELIS REGINA HALITSKI

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE MÉTODOS
SEMIEMPÍRICOS NO DIMENSIONAMENTO DE ESTACAS
PRÉ-MOLDADAS NO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA- PR**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. MSc. Bianca Penteado de Almeida Tonus
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba

Ponta Grossa, 04 de março de 2022

RESUMO

A metodologia semiempírica é a mais difundida para a estimativa da capacidade de carga em estacas, contudo, sabe-se que esta apresenta restrições quanto a sua abrangência. Este trabalho estudou a aplicabilidade dos métodos semiempíricos a região do município de Ponta Grossa, para isso dispôs de 93 resultados de ensaio de carregamento dinâmico (ECD) realizados em estacas pré-fabricadas. Foi apresentado a estimativa da capacidade de carga referente a essas estacas seguindo os seguintes métodos: Decourt-Quaresma (1978), Aoki- Velloso (1975), Teixeira (1996), Laprovitera e Benegas (1988; 1983); Lobo (2005) e Vorcaro- Velloso (2000). Essas estimativas foram então comparadas aos resultados do ensaio de carregamento dinâmico disponíveis, sendo possível verificar que de maneira geral os métodos tendem a ser conservadores em relação a resistência lateral, e que quanto maior for a parcela de argila presente no solo maior será a representatividade do método. Neste trabalho a busca por um coeficiente de adaptação para a estimativa da capacidade de carga teve como foco apenas a capacidade de carga na ponta das estacas, e o método adotado para estudo foi o de Decourt-Quaresma. Após a definição dos novos coeficientes para o método de Decourt-Quaresma, foi realizado novamente a comparação entre o obtido pelo método e o observado pelo ECD, mas os novos coeficientes também não foram suficientes para a adequação dos resultados. Conclui-se que é necessário um maior aprofundamento nas variáveis que levam a capacidade de carga apresentada por estaca, com uma expansão da amostra disponível, para poder-se ter um melhor controle das variáveis, que influenciam nas respostas apresentadas pelas estacas.

Palavra-chave: Semiempírico; capacidade de carga de estacas; ensaio de carregamento dinâmico; estacas pré-moldadas de concreto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tipo de fundações: a) Fundação rasa; b) Fundação profunda.	7
Figura 2- Bate- estacas.....	8
Figura 3- a) Estaca metálica com perfil laminado; b) Estaca metálica com perfil tubular.	8
Figura 4- a) Estaca pré-fabricada de concreto com seção quadrada; b) Estaca pré-fabricada de concreto com seção circular vazada.	9
Figura 5- Mobilização progressiva da resistência do elemento de fundação por estaca	10
Figura 6- Equipamento para ensaio SPT	13
Figura 7- Exemplo de boletim de sondagem SPT	14
Figura 8- Ruptura Nítida.....	27
Figura 9- Ruptura Física	27
Figura 10- Ruptura Convencional.....	29
Figura 11- Execução de ECD.....	30
Figura 12- Modelo de PDA (<i>Pile Driving analyser</i>)	31
Figura 13- representação do sistema de Smith (1960).....	33
Figura 14- Obra 01: Capacidade de carga total (tf) X Estacas	41
Figura 15- Obra 01: Resistência de Ponta (tf) X Estacas	42
Figura 16- Obra 01: Resistência Lateral (tf) X Estacas.....	43
Figura 17- Obra 02: Capacidade de carga total (tf) X Estacas	44
Figura 18- Obra 02: Resistência de Ponta (tf) X Estacas	45
Figura 19- Obra 02: Resistência Lateral (tf) X Estacas.....	46
Figura 20- Obra 03: Capacidade de carga total (tf) X Estacas	47
Figura 21- Obra 03: Resistência de Ponta (tf) X Estacas	49
Figura 22- Obra 03: Resistência Lateral (tf) X Estacas.....	50
Figura 23- Obra 04: Capacidade de carga total (tf) X Estacas	51
Figura 24- Obra 04: Resistência de Ponta (tf) X Estacas	52
Figura 25- Obra 04: Resistência Lateral (tf) X Estacas.....	53
Figura 26- Obra 05: Capacidade de carga total (tf) X Estacas	54
Figura 27- Obra 05: Resistência de Ponta (tf) X Estacas	56

Figura 28- Obra 05: Resistência Lateral (tf) X Estacas.....	57
Figura 29- Obra 06: Capacidade de carga total (tf) X Estacas	58
Figura 30- Obra 06: Resistência de Ponta (tf) X Estacas	59
Figura 31- Obra 06: Resistência Lateral (tf) X Estacas.....	60
Figura 32- Obra 07: Capacidade de carga total (tf) X Estacas	61
Figura 33- Obra 07: Resistência de Ponta (tf) X Estacas	62
Figura 34- Obra 07: Resistência Lateral (tf) X Estacas.....	63
Figura 35- Ponta da estaca em Areia Argilosa: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.	65
Figura 36- Ponta da estaca em Argila: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.	66
Figura 37- Ponta da estaca em Argila Siltoarenosa: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.	67
Figura 38- Ponta da estaca em Argila Siltosa: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.	69
Figura 39- Ponta da estaca em Silte: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.	70
Figura 40- Ponta da estaca em Silte arenoso: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.	71
Figura 41- Ponta da estaca em Silte Argiloarenoso: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.	73
Figura 42- Ponta da estaca em Silte Argiloso: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.	74
Figura 43- Gráfico Areia Argilosa relacionando o N_{spt} com a capacidade de carga unitária da ponta.	78

Figura 44- Gráfico Argila pura relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.	79
Figura 45- Gráfico Argila Siltoarenosa relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.	80
Figura 46- Gráfico Argila Siltosa relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.	81
Figura 47- Gráfico Silte Arenoso relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.	82
Figura 48- Gráfico Silte Argiloarenoso relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.	83
Figura 49- Gráfico Silte Argiloso relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.	83
Figura 50: Gráficos para comparação visual entre valores obtidos para capacidade de carga utilizando coeficiente C proposto e o original do método de Decourt- Quaresma e também os obtidos através do ECD. Dados agrupados segundo o tipo de solo na ponta da estaca	87
Figura 51: Gráficos para comparação visual entre valores obtidos para capacidade de carga utilizando coeficiente C proposto e o original do método de Decourt- Quaresma e também os obtidos através do ECD. Dados agrupados segundo a obra a qual pertencem.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Coeficiente característico do solo C	17
Tabela 2-Valores do fator α em função do tipo de estaca e do tipo de solo	18
Tabela 3-Valores do fator β em função do tipo de estaca e do tipo de solo	18
Tabela 4- Coeficiente K e razão de atrito α	19
Tabela 5- Fatores de Correção $F1$ e $F2$	20
Tabela 6- Valores do Parâmetro α	21
Tabela 7- Valores do parâmetro β	21
Tabela 8- Valores de atrito lateral rL	21
Tabela 9- Valores de K e α para Laprovitera e Benegas (1988)	22
Tabela 10- Valores de $F1$ e $F2$ para Laprovitera (1988) e Benegas (1993).....	23
Tabela 11- Valores de α e β	24
Tabela 12- Grupos de Solos	26
Tabela 13- Tipos de estacas presentes no banco de dados.....	36
Tabela 14- Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total para a obra 01, calculados para os seis métodos	41
Tabela 15- Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta para a obra 01, calculados para os seis métodos.	43
Tabela 16- Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral das estacas da obra 01 para todos os métodos.....	43
Tabela 17- Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total para obra 02, calculados para os seis métodos	45
Tabela 18- Obra 02: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.	46
Tabela 19- Obra 02: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral de estacas para todos os métodos.....	46
Tabela 20- Obra 03: Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total, calculados para os seis métodos	48
Tabela 21- Obra 03: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.	49
Tabela 22- Obra 03: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral para todos os métodos.....	50

Tabela 23- Obra 04: Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total, calculados para os seis métodos	51
Tabela 24-Obra 04: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.	53
Tabela 25- Obra 04: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral para todos os métodos.....	53
Tabela 26- Obra 05: Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total, calculados para os seis métodos	55
Tabela 27- Obra 05: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.	56
Tabela 28- Obra 05: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral para todos os métodos.....	57
Tabela 29- Obra 06: Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total, calculados para os seis métodos	58
Tabela 30- Obra 06: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.	59
Tabela 31- Obra 06: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral para todos os métodos.....	60
Tabela 32- Obra 07: Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total, calculados para os seis métodos	61
Tabela 33- Obra 07: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.	62
Tabela 34- Obra 07: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral para todos os métodos.....	63
Tabela 35- Estaca com ponta em solo tipo areia siltosa: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.....	65
Tabela 36- Estaca com ponta em solo tipo argila: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.....	66
Tabela 37- Estaca com ponta em solo tipo Argila Siltoarenosa: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.	68

Tabela 38- Estaca com ponta em solo tipo argila siltosa: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.....	69
Tabela 39- Estaca com ponta em solo tipo Silte: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.....	70
Tabela 40- Estaca com ponta em solo tipo Silte Arenoso: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.....	72
Tabela 41- Estaca com ponta em solo tipo Silte Argiloarenoso: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.	73
Tabela 42- Estaca com ponta em solo tipo silte argiloso: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.....	74
Tabela 43- Resumo das formulações utilizadas para o cálculo da capacidade de carga de ponta e lateral de cada método.	76
Tabela 44- Valores originais e valores propostos para o coeficiente C do método de Decourt- Quaresma.....	84
Tabela 45- Coeficientes estatísticos obtidos utilizando o coeficiente C original e o proposto para o método de Decourt-Quaresma, análise aplicada apenas a capacidade de carga da ponta das estacas quanto ao tipo de solo na ponta da estaca.....	86
Tabela 46- Coeficientes estatísticos obtidos utilizando o coeficiente C original e o proposto para o método de Decourt-Quaresma, análise aplicada apenas a capacidade de carga da ponta das estacas quanto a obra a qual pertencem.	91

QUADROS

Quadro 1: Descrição obras analisadas	37
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	OBJETIVOS	3
1.2	JUSTIFICATIVA	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	FUNDAÇÕES	6
2.1.1	Estaca pré-moldada	7
2.2	CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS	9
2.3	INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS	12
2.3.1	Ensaio SPT	12
2.3.2	Ensaio de Cone (CPT)	15
2.4	MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS	16
2.4.1	Decourt-Quaresma (1978)	16
2.4.2	Aoki-Velloso (1975)	18
2.4.3	Teixeira (1996)	20
2.4.4	Laprovitera e Benegas (1988;1983)	22
2.4.5	Lobo (2005)	23
2.4.6	Vorcaro- Velloso (2000)	25
2.5	PROVA DE CARGA ESTÁTICA	26
2.6	ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO	29
2.6.1	Teoria da Equação da Onda	31
2.6.2	Método de Smith	32
2.6.3	Métodos CAPWAP e CASE	34
3	METODOLOGIA	35
4	RESULTADOS	40
4.1	ANÁLISE POR OBRA	40
4.1.1	Obra 01	40

4.1.2	Obra 02.....	44
4.1.3	Obra 03.....	47
4.1.4	Obra 04.....	50
4.1.5	Obra 05.....	54
4.1.6	Obra 06.....	57
4.1.7	Obra 07.....	60
4.2	ANALISE DE ACORDO COM O TIPO DE SOLO DA PONTA DA ESTACA...	63
4.2.1	Areia Argilosa.....	64
4.2.2	Argila.....	65
4.2.3	Argila Siltoarenosa	66
4.2.4	Argila Siltosa	68
4.2.5	Silte.....	69
4.2.6	Silte Arenoso.....	70
4.2.7	Silte Argiloarenoso	72
4.2.8	Silte Argiloso	73
4.3	DISCUSSÃO SOBRE MÉTODOS A SEREM ADAPTADOS	75
4.4	ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE DECOURT-QUARESMA.....	77
4.5	VERIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES PROPOSTOS PARA DECOURT-QUARESMA	84
4.5.1	Quanto ao tipo de solo na ponta da estaca	84
4.5.2	Quanto a obra a qual pertencem.....	90
5	CONCLUSÃO	96
5.1	TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

Toda edificação precisa de um sistema que transfira as cargas provenientes da estrutura para o solo, essas estruturas de transferência de carga são chamadas fundações.

A NBR 6122/2019 que regulamenta o projeto e a execução de fundações no Brasil apresenta duas categorias de fundações, as diretas ou rasas, onde a base está assente a uma profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão do elemento. E as fundações profundas ou indiretas, que possuem as bases assentes a uma profundidade superior a essa, sendo seus principais exemplos as estacas e tubulões.

Para o dimensionamento das fundações foram desenvolvidos diversos métodos, os quais buscam estimar a capacidade de carga do conjunto solo/estrutura, dentre esses métodos teóricos, semiempíricos e empíricos. Para o dimensionamento de estacas, os métodos mais usuais são os métodos semiempíricos, que consistem em correlações empíricas com ensaios *in situ* sendo calibrados com provas de carga, estáticas e, mais recentemente, com ensaios de carregamento dinâmico (CINTRA e AOKI, 2010).

Esses métodos foram desenvolvidos em sua maioria a partir de sondagens à percussão (SPT) ou sofreram adaptações para poderem usar os resultados fornecidos por estes, precisamente por ser o ensaio mais realizado no Brasil. (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

Como a própria NBR 6122/2019 preconiza, devido esses métodos serem desenvolvidos a partir de uma determinada região, é necessário que ao serem aplicados fora da sua região de origem passem por adequações e estudos. Assim este trabalho busca - a partir de observações feitas comparando resultados de capacidade de carga estimados por métodos semiempíricos e os obtidos pelo ECD - levantar hipóteses sobre variáveis que influenciem na capacidade de carga das estacas. Ainda, apresenta o início de uma busca por um coeficiente de adaptação dos métodos estudados para a realidade da região de Ponta Grossa-PR.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a aplicabilidade de métodos semiempíricos no dimensionamento de estacas pré-moldadas de concreto e buscar a

adequação de um método para a capacidade de carga da ponta de estacas para a região do município de Ponta Grossa – PR.

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Atualizar o banco de dados de obras executadas em Ponta Grossa com estacas pré-moldadas de concreto realizado por Moreira (2021);
- Aplicar os métodos semiempíricos de Aoki- Velloso (1975); Decourt-Quaresma (1978); Vorcaro-Velloso (2000) e Lobo (2005) para o dimensionamento das novas estacas;
- Aplicar os métodos semiempíricos de Teixeira (1996), Laprovitera e Benegas (1988;1983); para todas as estacas;
- Realizar a comparação entre os resultados obtidos pelos métodos semiempíricos e a capacidade de carga obtida em ensaios de carregamento dinâmico;
- Concluir sobre a aplicabilidade de cada método semiempírico;
- Escolher dentre os seis métodos semiempíricos disponíveis, um para a calibração dos coeficientes relacionados a capacidade de carga da ponta;
- Definir um coeficiente de ajuste para o método semiempírico buscando adequar os resultados fornecidos a realidade dos solos do município de Ponta Grossa-PR;
- Concluir sobre a aplicabilidade e validade do coeficiente proposto.

1.2 JUSTIFICATIVA

As fundações são inerentes a todas as estruturas e estão sujeitas a apresentarem patologias. As causas dessas patologias podem ser desde fatos relacionados ao projeto, até mesmo a execução ou ainda fatos após sua execução. O que pode acarretar inúmeros problemas como: aumento do custo inicial das fundações, estigma da obra, estigma do profissional envolvido, evacuação de prédios, interdição da estrutura dentre muitos outros, sendo assim, é de extrema importância evitar que essas patologias aconteçam. A observação de patologias em obras nacionais e internacionais é comum, como exemplo, os casos da Torre de Pisa, da

Cidade do México e o da cidade de Santos, no litoral de São Paulo. (MILITITSKY, CONSOLI e SCHNAID, 2015).

Como mencionado no parágrafo anterior, a causa do surgimento de patologias pode ser algum equívoco cometido ainda na parte do projeto e como salientam Velloso e Lopes (2010) os métodos semiempíricos foram criados a partir de solos de experiências locais, portanto, não podem ser utilizados indiscriminadamente, dessa forma o uso incorreto dos métodos pode ser uma possível causa do surgimento de patologias.

Segundo Carboni (2021) os métodos semiempíricos são resultados de situações regionais, onde o método foi calibrado em razão dos materiais locais, do método de investigação geotécnica adotado, além de outros fatores inerentes ao processo. E ainda, a própria NBR 6122/2019 expressa o fato de que os métodos semiempíricos a serem utilizados para o dimensionamento das fundações profundas devem ter seus domínios de validade observados, e as limitações regionais de cada método devem ser respeitadas.

A verificação da aplicabilidade dos métodos semiempíricos, em regiões fora da área para a qual foram desenvolvidos, tem sido realizada com a comparação da estimativa de capacidade de carga, obtida pelo método com os resultados apresentados pelo ensaio de prova de carga. Após a comparação os métodos são classificados em “conservadores” ou “contra a segurança”, na maioria das vezes, a pesquisa finaliza nesse ponto sem apresentar uma solução para os resultados observados, tornando o método mais adequado ao solo estudado (AMANN, 2010).

Dessa forma, este trabalho vem dar continuidade ao trabalho iniciado em Moreira (2021), com a expansão do banco de dados disponível e com a inserção de mais três resultados de ensaio de carregamento dinâmico. Contudo, este trabalho busca não apenas a classificação dos métodos, mas sim, inicia os estudos sobre o desenvolvimento de possíveis coeficientes de adaptação para os métodos semiempíricos utilizados, contribuindo para que os métodos aqui estudado se tornem mais adequados a região de Ponta Grossa-Pr.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAÇÕES

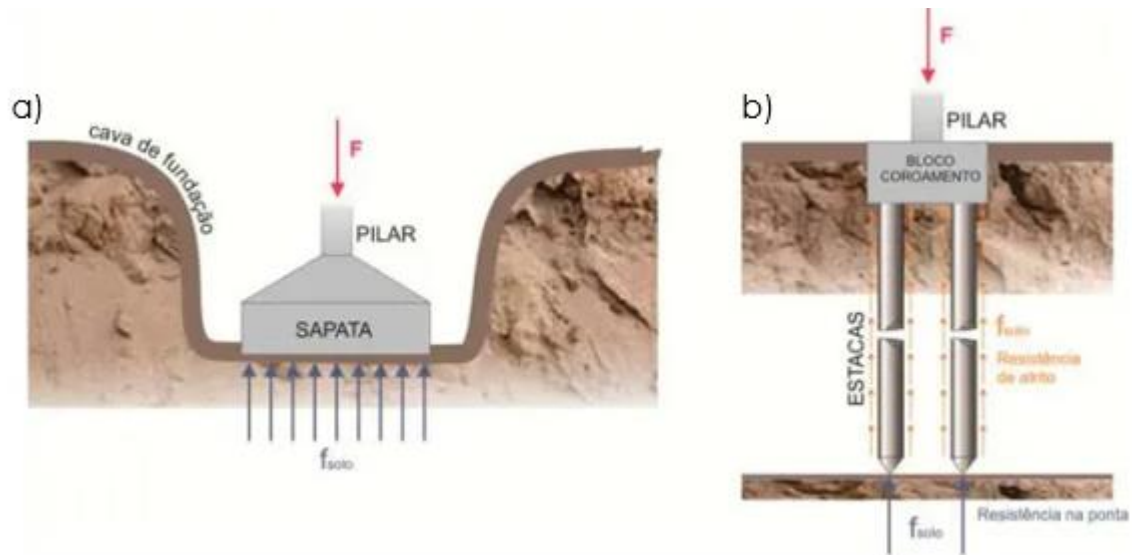
Fundações são os elementos responsáveis por transferir o carregamento proveniente da estrutura para o solo. Elas são divididas em fundações profundas e rasas, sendo que o que as distingue é que as fundações rasas são aquelas com a base assente até duas vezes sua menor dimensão enquanto as fundações profundas estão apoiadas a pelo menos oito vezes sua menor dimensão ou 3 (três) metros (ABNT NBR 6122:2019).

As fundações rasas transmitem os esforços através da base. Seus representantes mais conhecidos são as sapatas e os radiers. Diversos autores desenvolveram formas de determinar a capacidade de carga para essas fundações, seja por métodos teóricos ou semiempíricos. Alguns exemplos, seriam, a teoria de Terzaghi e a teoria de Meyerhof, ambos considerados métodos teóricos (VELLOSO e LOPES, 2010).

Já as fundações profundas podem transmitir seus esforços para o solo através da lateral (resistência de fuste), da base (resistência de ponta) ou ainda uma combinação de ambos. Tendo assim, dois tipos de fundações profundas apresentadas na NBR 6122/2019. Os tubulões que se caracterizam pela descida de um funcionário - geralmente ao final da escavação - para alargamento da base e as estacas, que ao contrário dos tubulões, não possuem a entrada de funcionários, ambos podem ter dimensões similares. (VELLOSO e LOPES, 2010).

A Figura 1 ilustra os dois modelos de fundação, rasa e profunda, e também demonstra como acontece a mobilização da resistência em cada uma.

Figura 1- Tipo de fundações: a) Fundação rasa; b) Fundação profunda.



Fonte: (RJ, 2014)

Dentre as fundações profundas tipo estaca existe ainda uma subdivisão, as estacas de deslocamento e as estacas escavadas. As estacas de deslocamento são introduzidas no solo sem que ocorra a retirada do mesmo, os exemplos mais conhecidos são as pré-moldadas de concreto armado e as metálicas. Já as estacas escavadas são aquelas que promovem a retirada do solo, realizadas *in situ*, elas podem ser executadas com ou sem revestimento, com fluido estabilizante ou não. Alguns exemplos de estacas escavadas são a hélice contínua e a escavada com fluido estabilizante. (HACHICH, FALCONI, *et al.*, 1998).

2.1.1 Estaca pré-moldada

As estacas pré-moldadas fazem parte do grupo de estacas de deslocamento. Essas estacas podem ser feitas de materiais como concreto armado, concreto protendido e aço, ou ainda a união de dois dos elementos anteriores, somente dois, conhecidas como estacas mistas. Elas podem ser cravadas no solo por percussão, prensagem ou vibração, a Figura 2 mostra o exemplo de um bate-estacas utilizado para a cravação das estacas pré-fabricadas (HACHICH, FALCONI, *et al.*, 1998).

Figura 2- Bate- estacas



Fonte: (PEDROZO, 2020)

a) Estacas Metálicas

As estacas metálicas podem ser dos mais diversos formatos, de perfis laminados a tubos (Figura 3), com a união de mais de um perfil quando necessário. Elas possuem como vantagem o fato de terem uma seção mais esbelta, assim atravessam horizontes de solos mais resistentes do que as de concreto, ainda em relação as de concreto possuem uma maior facilidade de emenda em canteiro. Mas possuem como desvantagem o preço mais elevado e a suscetibilidade a corrosão em determinadas situações (HACHICH, FALCONI, *et al.*, 1998).

Figura 3- a) Estaca metálica com perfil laminado; b) Estaca metálica com perfil tubular.



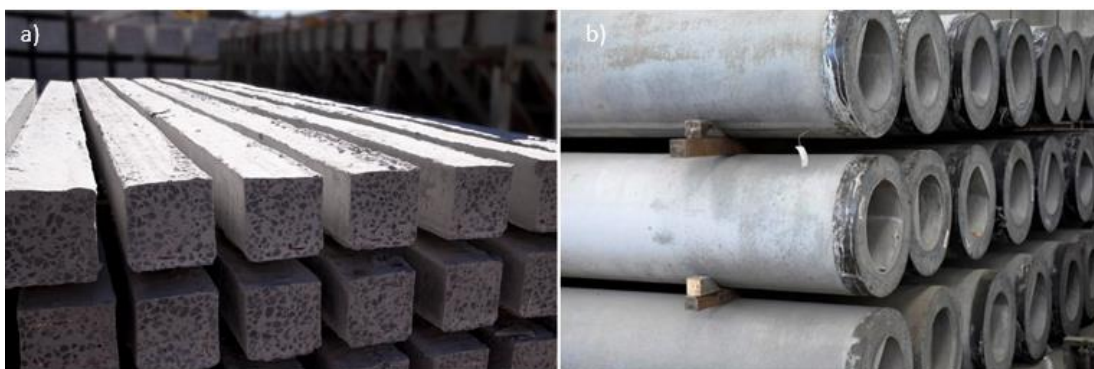
Fonte: (SERKI Fundações Especiais) e (JJ LIMA Reforços)

b) Estacas pré-moldadas em Concreto

As estacas de concreto podem ser classificadas quanto a forma de confecção em três tipos: concreto vibrado; concreto centrifugado e concreto extrudido. Também podem ser classificadas quanto ao tipo de armadura: em concreto armado e concreto protendido (VELLOSO e LOPES, 2010).

Essas estacas costumam ser produzidas com seções quadradas, hexagonais, ou ainda circulares que podem ser vazadas ou não (Figura 4). Devido às tensões que surgem durante o cravamento essas estacas exigem um reforço de armadura em suas extremidades (VELLOSO e LOPES, 2010).

Figura 4- a) Estaca pré-fabricada de concreto com seção quadrada; b) Estaca pré-fabricada de concreto com seção circular vazada.



Fonte: (SERKI Fundações Especiais)

Em relação às estacas moldadas in loco de concreto, as pré-moldadas possuem como vantagem o maior controle tecnológico empregado e a transposição de horizontes de solo muito frágeis, mas ao contrário das metálicas possuem uma maior dificuldade em relação a emendas e cortes em canteiro (VELLOSO e LOPES, 2010).

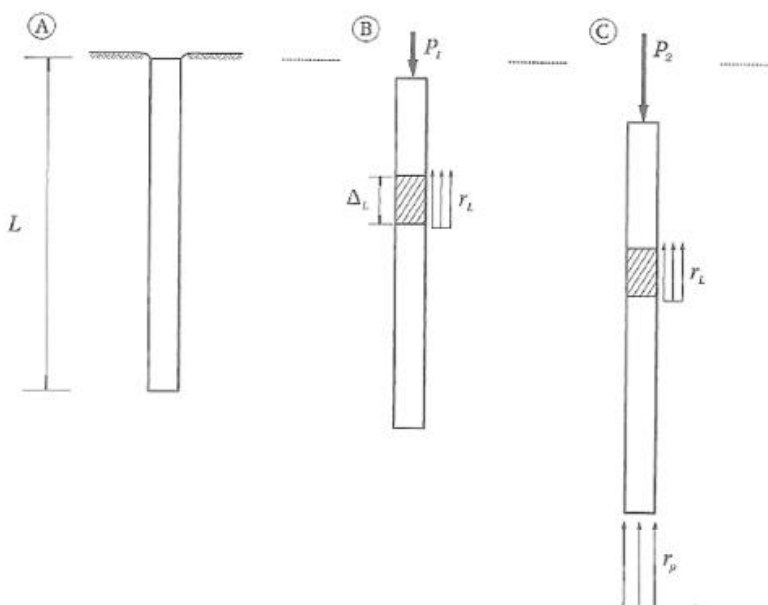
Outro ponto de atenção para essas estacas é a cravação, qual deve ser executada sempre considerando que a tensão produzida pela cravação não pode ser superior a 80% da resistência do concreto. Por isso, são utilizados amortecedores e alturas de queda de martelo menores. (VELLOSO e LOPES, 2010).

2.2 CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS

Cintra e Aoki (2010), explicam a forma de mobilização de resistência em uma estaca, como no exemplo ilustrado pela Figura 5, onde é apresentada uma estaca a

qualquer profundidade, na qual em um primeiro momento é aplicada uma força P_1 progressivamente, sendo essa força resistida pela resistência lateral, ou de fuste. Essa resistência em argilas se deve à adesão enquanto em areias ao atrito, contudo é popularmente conhecida por atrito lateral para qualquer tipo de solo. Com a aplicação dessa carga, em certo ponto, ela ultrapassa a resistência imposta pelo atrito lateral passando a ser a carga P_2 na ilustração, o que poderia acarretar um recalque excessivo da estaca. Porém, o que acontece depois desse ponto é que a resistência que passa a ser mobilizada em conjunto com a lateral é a resistência de ponta da estaca. A partir daí a carga P_2 aumentará até que ela chegue ao limite da resistência de ponta causando a ruptura da estaca. Esse valor máximo de P_2 , antes da estaca romper, é o valor conhecido como capacidade de carga, representado pela letra R nas equações a seguir.

Figura 5- Mobilização progressiva da resistência do elemento de fundação por estaca



Fonte: CINTRA e AOKI (2010)

Com essas considerações tem-se que a capacidade de carga de qualquer estaca é a soma de sua resistência lateral com a sua resistência de ponta, como mostrado pela Equação 1.

$$R = R_l + R_p$$

Equação 1

Sendo que tanto a resistência de ponta (R_p) quanto a lateral (R_l) são, de maneira simplificada, a multiplicação da resistência em unidades de tensão (r) e a área correspondente. A resistência de ponta é apresentada na Equação 2.

$$R_p = r_p * A_p \quad \text{Equação 2}$$

Já para a resistência lateral é feito um somatório, sendo que a resistência varia com cada camada do perfil de solo atravessado. Sendo U o perímetro e Δ_l a extensão da camada em análise, tem-se:

$$R_l = U * \sum \Delta_l * r_l \quad \text{Equação 3}$$

As afirmações acima são uma simplificação, já que em obras comuns podem ocorrer situações em que apenas o atrito lateral é mobilizado, caracterizadas comumente como estacas flutuantes. Em outras situações podem ocorrer somente a mobilização da ponta ou ainda, estacas que mobilizem as duas resistências. Essa diferenciação de qual resistência será predominante está relacionada ao tipo de solo e também ao método construtivo. Uma estaca em argila mole trabalha com atrito lateral, ou ainda, estacas cravadas tendem a oferecer melhor resistência de ponta enquanto escavadas melhor resistência lateral (CINTRA e AOKI, 2010).

Ainda as unidades de tensão (r_l e r_p) podem ser obtidas de formas variadas, como nos é apresentado por diversos autores. Alguns métodos populares são o de Aoki e Velloso (1975) e o de Decourt-Quaresma (1978), ambos, são métodos estáticos. (VELLOSO e LOPES, 2010).

Os métodos estáticos dividem-se em teóricos (racionais) e semiempíricos. Os métodos teóricos usam parâmetros teóricos para descrever as características dos solos e a resistência correspondente. Já os semiempíricos utilizam dados das investigações geotécnicas, principalmente CPT e SPT (VELLOSO e LOPES, 2010).

Um e/ou outro costumam ser utilizados para a determinação de carga em estacas. Porém, para a utilização desses métodos fixa-se o tipo de estaca e o diâmetro desta, e a partir disso determina-se o comprimento correspondente da estaca, baseado nos ensaios SPT e na capacidade de carga desejada. Entretanto, quando a estaca é executada, a capacidade de carga que ela realmente terá pode ser diferente da do projeto, considerando que ela pode ter um comprimento variado, ou ainda as condições de resistência do solo podem ser diferentes daquelas estimadas pelo

ensaio SPT. Dessa forma, tem-se duas capacidades de carga: a teórica (fornecida pelos métodos semiempíricos ou teóricos) e a real, que pode ser fornecida pelo ensaio de carregamento dinâmico e pela prova de carga estática (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

Para que a diferença entre a capacidade de carga teórica e a real não seja expressiva, é fundamental que seja executada uma campanha de investigação geotécnica adequada à obra em estudo.

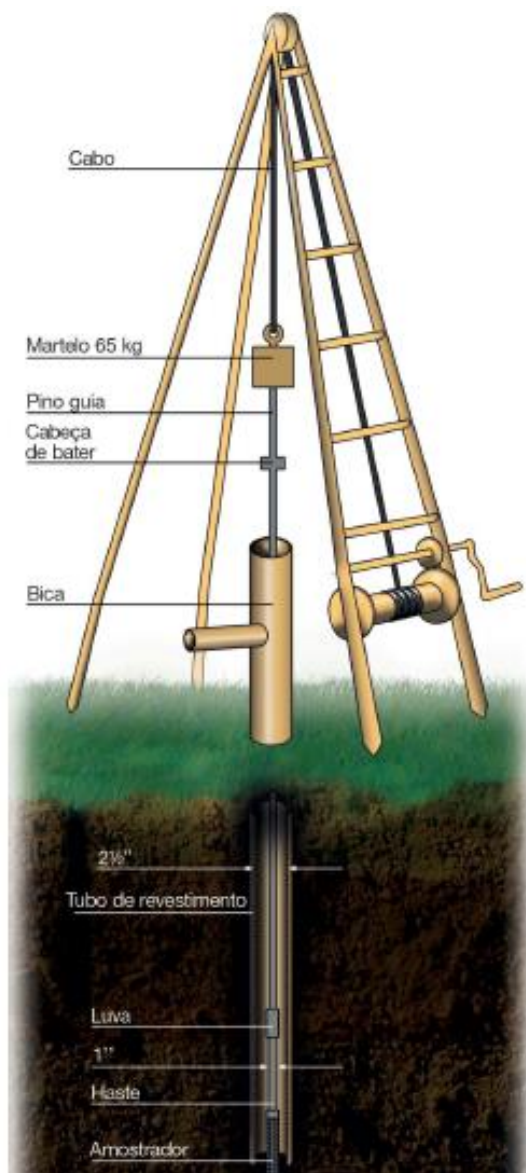
2.3 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

2.3.1 Ensaio SPT

O ensaio de SPT (Standard Penetration Test) é um dos ensaios de investigação mais difundidos no Brasil e é a NBR 6484 (2020) que o regulamenta. Ele apresenta em seus relatórios o tipo de solo em cada camada, o nível d'água e ainda o índice de penetração, N, para cada metro analisado. (NBR 6484, 2020).

O ensaio pode ser realizado de maneira manual ou mecanizada. Da forma manual, com o auxílio de uma ferramenta como cavadeira manual é feita a escavação do primeiro metro, a partir desse ponto é feita a escavação com trado helicoidal até que se atinja o nível d'água ou que a escavação com trado seja inferior a 50 mm em 10 minutos, desse ponto passa-se a usar um método de perfuração com circulação de água. A Figura 6 ilustra o equipamento utilizado na realização do ensaio (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012)

Figura 6- Equipamento para ensaio SPT

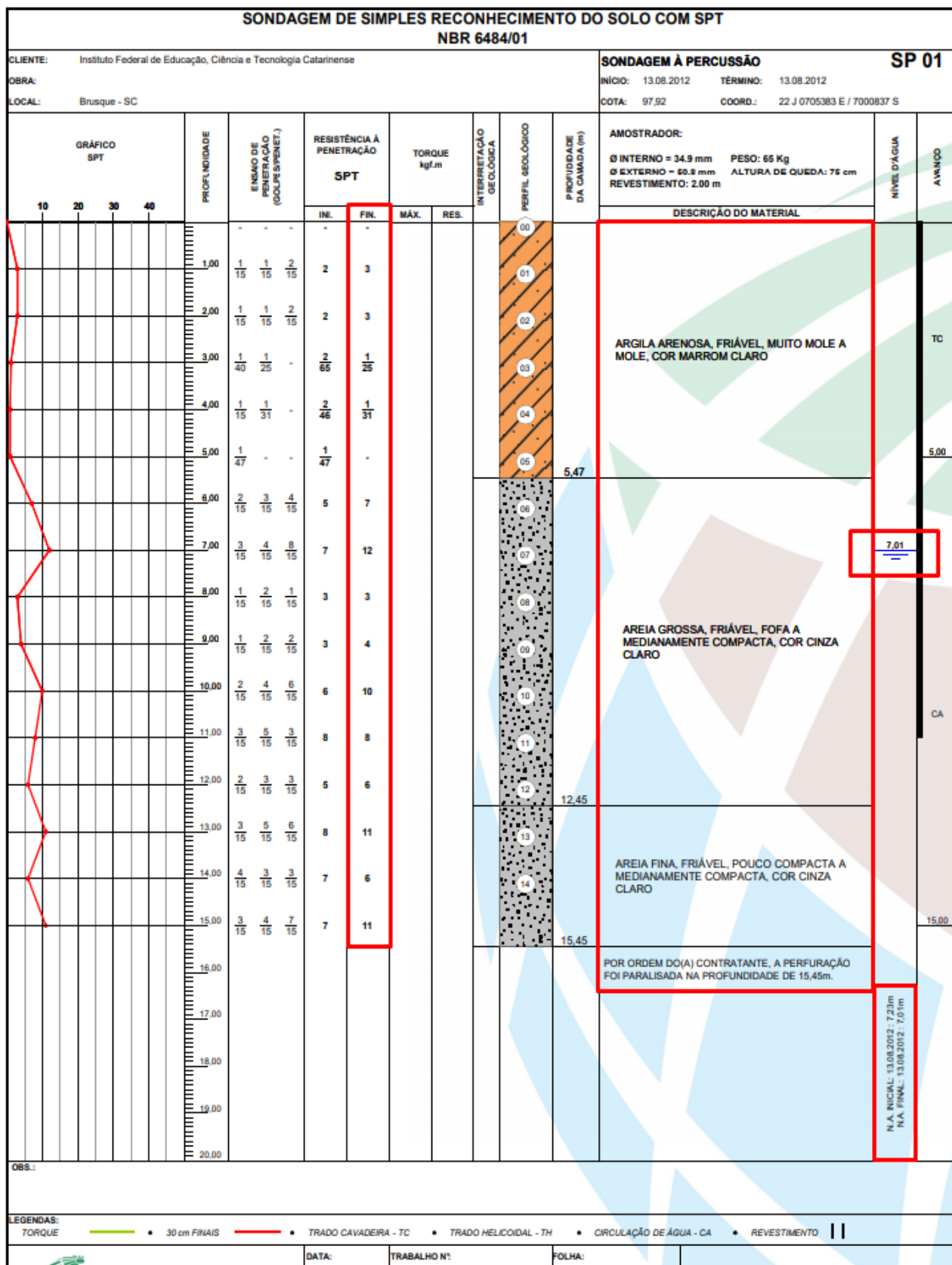


Fonte: (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012)

A cada metro deve ser feita a amostragem do solo, que consiste no apoio do amostrador padrão na cota onde está parada a escavação, e após isso o martelo padrão (65kg) será suspenso a 75 cm e depois solto em queda livre.

O boletim de sondagem apresenta a quantidade de golpes para a penetração a cada 15cm, em um total de 45cm. A Figura 7 apresenta um boletim parcial de sondagem SPT (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

Figura 7- Exemplo de boletim de sondagem SPT



Fonte: (ARCIERI, 2020).

Em alguns casos o simples apoio do amostrador, ou amostrador mais martelo, já causam a entrada do equipamento no solo, essas são medidas que devem estar presentes no boletim. O amostrador padrão tem seção vazada o que possibilita a retirada de amostras deformadas para ensaios posteriores e para a classificação tátil-visual do solo (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

O número N do ensaio SPT corresponde a quantos golpes foram necessários para cravar os 30 cm finais em cada metro. O ensaio pode ser finalizado quando em 10 metros consecutivos, o número N for igual ou superior a 25 golpes; 8 metros consecutivos com N igual ou maior que 36 metros com N igual ou maior que 35, depois desse ponto pode continuar o avanço do ensaio com o método de circulação de água, caso seja necessário (ABNT NBR 6484:2020).

No ensaio mecanizado a escavação pode ser realizada de maneira mecanizada, e as formas possíveis de serem utilizadas são descritas na NBR 6484 (2020), aqui também o martelo se movimenta de maneira automatizada, garantindo uma maior padronização dos resultados. Deve ser realizada a coleta de amostras pelo amostrador e as considerações sobre o número N são as mesmas utilizadas no ensaio manual (ABNT NBR 6484:2020).

2.3.2 Ensaio de Cone (CPT)

O Ensaio de Cone ou *Cone Penetration Test* (CPT) no momento deste trabalho é realizado seguindo as normas internacionais, uma delas sendo a ASTM 05778. Esse ensaio como o SPT apresenta resultados de estratigrafia do solo e relações de resistências das camadas de solo atravessadas. Contudo, ao contrário do SPT esse é um ensaio estático e contínuo, a ponteira do equipamento tem sensores e as leituras são feitas ao longo de todo o perfil analisado. Com esses sensores é possível diferenciar a parte da resistência correspondente a ponta e aquela correspondente ao atrito lateral.

Em uma evolução e adequação do ensaio para solos moles, existe ainda o ensaio de Piezômetro (CPTU) que é uma extensão do ensaio CPT onde também é medida a poro pressão das camadas de solo, fator de extrema importância em determinadas situações. Para a classificação dos solos a partir desses ensaios, diversos autores desenvolveram cartas de classificação, onde relacionam a resistência de ponta ao tipo de solo atravessado (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

Tendo-se os resultados das investigações geotécnicas, é importante saber qual metodologia aplicar no dimensionamento das fundações, além de saber como os resultados das investigações são aplicados dentro dessas metodologias. Para isso no próximo item serão estudados alguns métodos semiempíricos.

2.4 MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS

Cintra e Aoki (2010) apontam o fato de que muitas vezes os métodos teóricos não fornecem resultados confiáveis, pela dificuldade na obtenção das variáveis. Por isso diferentes autores apresentam métodos baseados em ensaios *in situ*, quais foram ajustados a partir de provas de carga conhecidos como métodos semiempíricos.

Existem diversos métodos dentre eles cita-se: Decourt-Quaresma (1978); Aoki-Velloso (1975); Teixeira (1996); Laprovitera e Benegas (1988;1983); Lobo (2005); Vorcaro- Velloso (2000).

2.4.1 Decourt-Quaresma (1978)

Cintra e Aoki (2010) apresentam o método semiempírico propostos pelos autores Luciano Decourt e Arthur R. Quaresma, desde sua versão inicial em 1978 até a que é utilizada atualmente. Esse método foi desenvolvido primeiramente para estacas pré-moldadas de concreto utilizando-se de ensaios SPT.

Para a estimativa da capacidade de carga junto a ponta Decourt e Quaresma consideram duas variáveis, N_p e C . Adotam ainda N_p como a média entre três valores apresentados no ensaio SPT: o valor na cota de assentamento da estaca, o valor imediatamente superior e o imediatamente inferior. O coeficiente C é relacionado ao tipo de solo na ponta da estaca. A Equação 4 apresenta a estimativa para a capacidade de carga junto a ponta e a Tabela 1 os valores para o coeficiente C (CINTRA e AOKI, 2010).

$$r_p = CN_p$$

Equação 4

Tabela 1- Coeficiente característico do solo C

Tipo de Solo	C (kPa)
Argila	120
Silte Argiloso *	200
Silte Arenoso *	250
Areia	400

* Alteração de rocha (solos residuais)

Fonte: Decourt e Quaresma (1978) apud Cintra e Aoki (2010)

Já para a estimativa de capacidade de carga lateral os autores apresentam a Equação 5.

$$r_L = \frac{N_L}{3} + 1 \text{ (tnf/m}^2\text{)} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo:

N_L - A média dos valores do ensaio SPT acima da ponta da estaca, menos os considerados no cálculo de N_p . Sendo que para estacas de deslocamento e escavadas com bentonita N_L deve estar entre 3 e 50 (CINTRA e AOKI, 2010).

Para ampliar o horizonte de aplicação do método, quanto ao tipo de estaca, os autores incluíram os coeficientes α e β , responsáveis por fazer a adequação do método para cada tipo de estaca. Nota-se que para estacas pré-moldadas em concreto, metálicas e tipo Franki $\alpha = \beta = 1$. A formulação completa para a obtenção da estimativa da capacidade de carga está apresentada na Equação 6, enquanto a Tabela 2 e 3 apresentam os valores dos coeficientes (CINTRA e AOKI, 2010).

$$R = \alpha C N_p A_p + \beta \left(\frac{N_1}{3} + 1 \right) UL \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

A_p : área da ponta da estaca (m²);

U : perímetro da estaca (m);

L : comprimento da estaca (m).

Tabela 2-Valores do fator α em função do tipo de estaca e do tipo de solo

Tipo de solo	Tipo de estaca				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice Continua	Raiz	Injetada sob alta pressão
Argilas	0,85	0,85	0,3*	0,85*	1,0*
Solos intermediários	0,6	0,6	0,3*	0,6*	1,0*
Areias	0,5	0,5	0,3*	0,5*	1,0*

*valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis

Fonte: Decourt (1996) apud Cintra e Aoki (2010)

Tabela 3-Valores do fator β em função do tipo de estaca e do tipo de solo

Tipo de solo	Tipo de estaca				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice Continua	Raiz	Injetada sob alta pressão
Argilas	0,80*	0,9*	1,0*	1,5*	3,0*
Solos intermediários	0,65*	0,75*	1,0*	1,5*	3,0*
Areias	0,5*	0,6*	1,0*	1,5*	3,0*

*valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis

Fonte: Decourt (1996) apud Cintra e Aoki (2010)

2.4.2 Aoki-Velloso (1975)

O método de Aoki-Velloso foi desenvolvido a partir de ensaios CPT, mas como o ensaio SPT é mais comum no Brasil os autores desenvolveram uma adaptação do método. A Equação 7 e a Equação 8 trazem as fórmulas já adaptadas para o ensaio SPT (CINTRA e AOKI, 2010).

$$r_p = \frac{KN_p}{F_1} \quad \text{Equação 7}$$

$$r_L = \frac{\alpha KN_L}{F_2} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo:

N_p : Índice de resistência a penetração na ponta da estaca;

N_L : Índice de resistência a penetração médio para cada camada de solo atravessada;

K: coeficiente que varia de acordo com o tipo de solo- Tabela 4

α : razão de atrito- Tabela 4

F_1 e F_2 : Fatores de correção devido o tipo de estaca- Tabela 5

Dessa forma a equação para a estimativa da capacidade de carga segundo Aoki - Velloso é expressa pela Equação 9:

$$R = \frac{KN_p}{F_1} A_p + \frac{U}{F_2} \sum_1^n (\alpha KN_L \Delta_L) \quad \text{Equação 9}$$

Sendo:

A_p : Área da ponta da estaca;

U : perímetro da estaca;

Δ_L : Comprimento da camada de solo analisada.

Tabela 4- Coeficiente K e razão de atrito α

(continua)

Solo	K (MPa)	α (%)
Areia	1,00	1,4
Areia siltosa	0,8	2,0
Areia siltoargilosa	0,7	2,4
Areia argilosa	0,6	3,0
Areia siltoargilosa	0,5	2,8
Silte	0,4	3,0
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte arenoargiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,23	3,4
Silte argiloarenoso	0,25	3,0
Argila	0,2	6,0

(conclusão)

Solo	K (MPa)	α (%)
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila arenosiltosa	0,3	2,8
Argila siltosa	0,22	4,0
Argila Siltoarenosa	0,33	3,0

Fonte: Aoki e Velloso (1975) apud Cintra e Aoki (2010)

Tabela 5- Fatores de Correção F_1 e F_2

Tipo de estaca	F_1	F_2
Franki	2,50	5,0
Metálica	1,75	3,5
Pré-moldada	1+D/0,8	2.F ₁

Fonte: Aoki e Velloso (1975) apud Cintra e Aoki (2010).

2.4.3 Teixeira (1996)

Teixeira traz uma unificação dos métodos já consagrados, como Aoki-Velloso e Decourt-Quaresma. Essa unificação se dá pela utilização de dois parâmetros α e β . O parâmetro α está relacionado a resistência de ponta e varia com o tipo de solo e o tipo de estaca e está apresentado na Tabela 6, já o parâmetro β está relacionado com a resistência lateral, mas não leva em consideração o tipo de solo apenas o tipo de estaca e está apresentado na Tabela 7 (CINTRA e AOKI, 2010).

A Equação 10 resume o método de Teixeira:

$$R = \alpha N_p A_p + \beta N_L U L \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

N_p : corresponde à média dos valores no intervalo entre quatro diâmetros acima da ponta da estaca e um abaixo;

N_L : corresponde à média dos N_{spt} ao longo do fuste da estaca;

A_p : Área da ponta da estaca;

U : Perímetro da estaca;

L : Comprimento considerado para o atrito lateral.

Tabela 6- Valores do Parâmetro α

Solo (4<N_{spt}<40)	Tipo de estaca- α (kPa)			
	Pré-moldada/	Franki	Escavada a céu	Raiz
Argila Siltosa	110	100	100	100
Silte Argiloso	160	120	110	110
Argila arenosa	210	160	130	140
Silte arenoso	260	210	160	160
Areia Argilosa	300	240	200	190
Areia siltosa	360	300	240	220
Areia	400	340	270	260
Areia com pedregulhos	440	380	310	290

Fonte: Teixeira (1996) apud CINTRA e AOKI (2010).

Tabela 7- Valores do parâmetro β

Tipo de estaca	β (kPa)
Pré-moldada e Perfil metálico	4
Franki	5
Escavada a céu aberto	4
Raiz	6

Fonte: Teixeira (1996) apud CINTRA e AOKI (2010).

O autor predefiniu valores para a resistência lateral quando se trata de estacas em espessas camadas de argila mole (NSPT<3), conforme pode ser visto na Tabela 8 (CINTRA e AOKI, 2010).

Tabela 8- Valores de atrito lateral r_L

Sedimento	r_L
Argila Fluviolagunar (SFL)*	20 a 30
Argila Transicional (AT)**	60 a 80

* SFL: argilas fluviolagunares e de baías, holocênicas- camadas situadas até cerca de 20 a 25m de profundidade com valores de N_{SPT} inferiores a 3, de coloração cinza-escura, ligeiramente pré adensada.

** AT: Argilas transicionais, pleistocênicas- camadas profundas subjacentes ao sedimento SFL, com valores de N_{SPT} de 4 a 8, às vezes de coloração cinza clara, com as tensões de pré- adensamento maiores do que aquelas das SFL.

Fonte: Teixeira (1996) apud CINTRA e AOKI (2010).

Para as estacas Franki, raiz, pré-moldadas e perfis metálicos, Teixeira recomenda um coeficiente de segurança de 2, enquanto para as escavadas a céu aberto o fator de segurança se diferencia entre resistência de ponta e lateral sendo 4 e 1,5, respectivamente (CINTRA e AOKI, 2010).

2.4.4 Laprovitera e Benegas (1988;1983)

Esse método consiste em um aprofundamento do método proposto por Aoki-Velloso (1975). Os autores do método aumentaram o espaço amostral em relação ao de 1975 e buscaram aperfeiçoar os coeficientes e esclarecer certas incógnitas (LAPROVITERA, 1988).

Os novos coeficientes adotados pelos autores estão apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9- Valores de K_0 e α para Laprovitera e Benegas (1988)

Nº	Classificação do solo	K_0	α PR (%)	$\alpha *PR$ (%)
1	Areia	6	1.4	1.4
2	Areia Siltosa	5.3	1.9	1.9
3	Areia Silto Argilosa	5.3	2.4	2.4
4	Areia Argilo Siltosa	5.3	2.8	2.8
5	Areia Argilosa	5.3	3.0	3.0
6	Silte Arenoso	4.8	3.0	3.0
7	Silte Areno Argiloso	3.8	3.0	3.0
8	Silte	4.8	3.0	3.0
9	Silte argilo arenoso	3.8	3.0	3.0
10	Silte Argiloso	3.0	3.4	3.4
11	Argila Arenosa	4.8	4.0	2.6
12	Argila Areno Siltosa	3.0	4.5	3.0
13	Argila Silto Arenosa	3.0	5.0	3.3
14	Argila Siltosa	2.5	5.5	3.6
15	Argila	2.5	6.0	4.0

K_0 : "Ks" sugerido por Danziger

α_{PR} : " α " proposto por Laprovitera e Benegas

$\alpha *PR$: " α " proposto por Laprovita e Benegas caso de a sondagem não ter boa confiabilidade da parte do projetista.

Fonte: LAPROVITERA (1988)

Tabela 10- Valores de F1 e F2 para Laprovitera (1988) e Benegas (1993)

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2.5	3.0
Metálica	2.4	3.4
Pré-moldada de concreto	2.0	3.5
Escavada	4.5	4.5

Fonte: LAPROVITERA (1988) e BENEGAS (1993) apud SAKATA (2019)

Como o método é uma adaptação de Aoki-Velloso 1975, a equação para a obtenção da estimativa de capacidade de carga é a mesma, Equação 11, com a alteração dos coeficientes. (SAKATA, 2019).

$$R = A_p \cdot \frac{K \cdot \bar{N}_p}{F1} + \sum U \cdot \Delta L \cdot \frac{\alpha \cdot K \cdot \bar{N}_L}{F2} \quad \text{Equação 11}$$

Sendo:

A_p : Área da ponta da estaca;

N_p : média dos N_{SPT} , um diâmetro acima, um baixo e o na cota da ponta da estaca;

U : Perímetro da estaca

ΔL : Comprimento da camada analisada

\bar{N}_L : Média dos demais N_{SPT} que não foram utilizados anteriormente.

2.4.5 Lobo (2005)

Para a determinação de seu método, Lobo utilizou um banco de dados de 367 provas de carga, espalhadas por 11 estados brasileiros e o Distrito Federal. O ensaio também foi desenvolvido inicialmente para estacas cravadas. A Equação 12 apresenta a fórmula proposta por Lobo (LOBO, 2005).

$$R = \beta \cdot 0,7 F_d \frac{A_p}{a_p} + \alpha \frac{0,2 U}{a_l} \sum F_d \Delta L \quad \text{Equação 12}$$

Sendo:

α e β : Fatores de correção devido ao tipo de estaca- Tabela 11

U : perímetro (m)

a_l : área total do amostrador (810,5cm²)

F_d : Força de reação dinâmica do solo ao amostrador- Equação 13

ΔL : Extensão da camada correspondente (m)

A_p : Area da ponta da estaca (m²)

a_p : Área de ponta do amostrador SPT (20,4cm²)

Como é possível ver na equação acima, ao contrário dos métodos anteriores, Lobo passa a considerar uma relação entre a mobilização ocorrida no amostrador SPT e o que ocorre nas estacas efetivamente, assim surgem variáveis ainda não exploradas, como é o caso da força de reação dinâmica do solo ao amostrador expressa na Equação 13.

$$F_d = \frac{\eta_3[\eta_1(0,75+\Delta\rho)M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_H g]}{\Delta\rho} \quad (N) \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

η_3 : 0,907-0,0066.l, sendo l o comprimento da haste em metros;

η_1 :0,761

η_2 : 1

$\Delta\rho$: Penetração do amostrador por golpe

M_m : Massa do martelo do ensaio SPT- 65kg

g : aceleração da gravidade

M_H : Massa da haste no ensaio SPT

Tabela 11- Valores de α e β

Tipo de estaca	α	β
Cravada pré-moldada	1,5	1,1
Cravada metálica	1,0	1,0
Hélice Contínua	1,0	0,6
Escavada	0,7	0,5

Fonte: Lobo (2005)

Nesse método é importante notar que para a determinação do $\Delta\rho$ o N_{SPT} para resistência de ponta, independentemente do tipo de estaca, fica limitado a 40, e para a resistência lateral a 22 para estacas cravadas e 30 para escavadas (LOBO, 2005).

2.4.6 Vorcaro- Velloso (2000)

Vorcaro e Velloso utilizaram a técnica de regressão linear múltipla e desenvolveram equações específicas para a estimativa da capacidade de carga em estacas tipo Franki, pré-moldadas de concreto, escavadas e hélice contínua. Para os três primeiros tipos de estacas tem-se equações de acordo com o tipo de solo, mas para a hélice contínua tem-se apenas uma equação universal (VELLOSO e LOPES, 2010).

Para a utilização desse método o primeiro passo é a classificação do solo segundo um dos cinco grupos apresentados na Tabela 12. Após isso, é possível selecionar a equação mais adequada e realizar a estimativa da capacidade de carga da estaca. Como neste trabalho são apresentadas as estacas pré-moldadas, são citadas apenas as cinco equações sugeridas para esse tipo de estaca (VELLOSO e LOPES, 2010).

$$Q_{EST} = \exp [(61,17 \ln XP + 58,25 \ln XF)^{1/3}], \text{ base em solos do grupo 1} \quad \text{Equação 14}$$

$$Q_{EST} = \exp [66,74 \ln XP + 58,25 \ln XF)^{1/3}], \text{ base em solos do grupo 2} \quad \text{Equação 15}$$

$$Q_{EST} = \exp [(59,72 \ln XP + 58,25 \ln XF)^{1/3}], \text{ base em solos do grupo 3} \quad \text{Equação 16}$$

$$Q_{EST} = \exp [(60,65 \ln XP + 58,25 \ln XF)^{1/3}], \text{ base em solos do grupo 4} \quad \text{Equação 17}$$

$$Q_{EST} = \exp [(67,79 \ln XP + 58,25 \ln XF)^{1/3}], \text{ base em solos do grupo 5} \quad \text{Equação 18}$$

As equações para as variáveis XP e XF são apresentadas a seguir:

$$XP = AN_{ponta} \quad \text{Equação 19}$$

$$XF = U \sum N_{fuste} \Delta l \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

N_{ponta} : N_{SPT} na ponta da estaca;

N_{fuste} : N_{SPT} correspondente a camada analisada;

A : área da ponta da estaca em m^2 ;

U : perímetro da estaca em m ;

Δl : espessura de solo, o , em m , ao longo do qual N pode ser considerado constante; segundo Velloso e Lopes (2010) a natureza do solo ao longo do fuste tem pouca importância.

Tabela 12- Grupos de Solos

Grupo				
1	2	3	4	5
Areia	Areia Siltosa	Silte	Silte	Silte argiloso
	Areia	Silte arenoso	Silte	Argila
	Areia argilosa	Argila arenosa	Argila	Argila siltosa
	Areia	Argila		

Fonte: VELLOSO e LOPES (2010)

Todos os métodos citados retornam estimativas da capacidade de carga da estaca, mas após a estaca ser executada a real capacidade de carga pode ser diferente. Por isso, existem ensaios para determinar a capacidade de carga das estacas já executadas, o mais tradicional deles é a prova de carga estática, da qual falaremos a seguir:

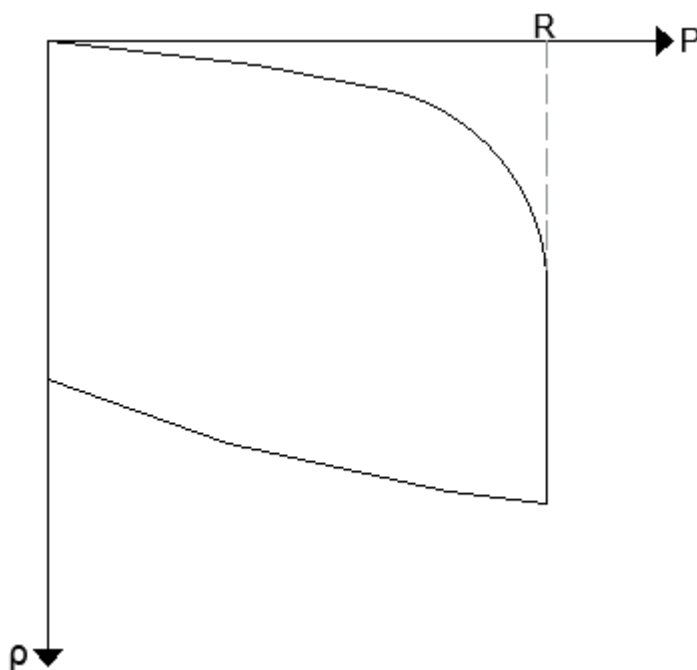
2.5 PROVA DE CARGA ESTÁTICA

Esse ensaio é normalizado pela NBR 16903 (ABNT 2020) e consiste na aplicação de cargas conhecidas no topo da estaca, sendo essas iguais e aplicadas em intervalos constantes, sendo medidos ao longo do processo os deslocamentos da estaca. O ensaio é finalizado quando a estaca sofre um recalque elevado ou se atinge a carga estipulada para o ensaio (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

Como resultado desse ensaio tem-se um gráfico de Carga (P) x Recalque (ρ). A partir desse gráfico é que se define a carga de ruptura da estaca. Cintra e Aoki (2013) citam três tipos de ruptura, sendo elas:

- a) Ruptura nítida: Nesse tipo de ruptura, em certo estágio do carregamento sem novos acréscimos de carga o recalque continua ocorrendo. Essa situação fica visível no gráfico gerado, Figura 8, e dessa forma a capacidade de carga (R) corresponde ao trecho vertical da curva.

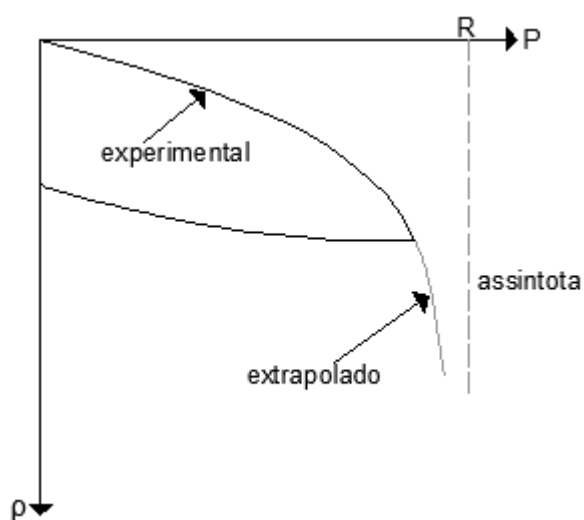
Figura 8- Ruptura Nítida



Fonte: Adaptado de CINTRA e AOKI, 2013.

- b) Ruptura Física: Nesse tipo de ruptura o gráfico carga x recalque produz uma curva assíntota a uma reta vertical, próximo a ruptura os recalques tornam-se elevados tendendo ao infinito, assim a capacidade de carga (R) é dada pela assíntota vertical, que pode ser obtida através de métodos de extrapolação da curva da carga x recalque, conforme ilustrado na Figura 9. (CINTRA e AOKI,2013)

Figura 9- Ruptura Física



Fonte: Adaptado de CINTRA e AOKI, 2013

- c) Ruptura Convencional: Aqui enquadram-se as provas de carga que geram gráficos, que depois de certo carregamento passam a ter uma reta com uma inclinação decrescente, ou seja, um acréscimo de carga gera um recalque proporcional, conforme ilustrado na Figura 10. Como não há um limite bem definido que represente a ruptura da estaca ou a mobilização total do sistema solo estaca, foram convencionados critérios arbitrários para a determinação dessa capacidade de carga (R) (CINTRA e AOKI, 2010).

Dentre os diversos critérios apresentados para a determinação da capacidade carga, aqui destaca-se o apresentado pela NBR 6122/2019, expresso pela Equação 21.

$$\Delta r = \frac{P_r \times L}{A \times E} + \frac{L}{30} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

Δr : recalque de ruptura convencional;

P_r : Carga de ruptura convencional;

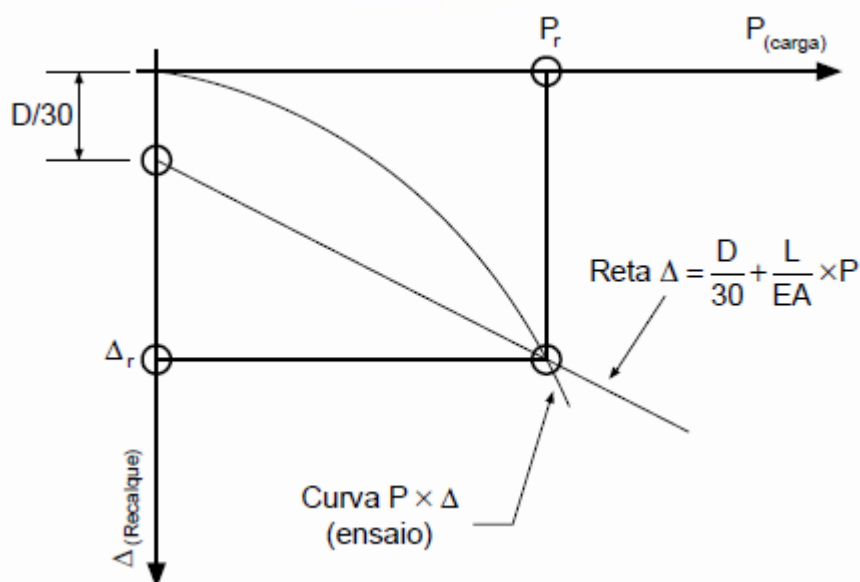
L : comprimento da estaca;

A : área da seção transversal da estaca (estrutura);

E : módulo de elasticidade do material da estaca;

D : diâmetro do círculo circunscrito à seção transversal da estaca, ou, no caso do barrete, o diâmetro do círculo de área equivalente a seção transversal da estaca.

Figura 10- Ruptura Convencional



FONTE: NBR 6122, 2019.

Como as provas de carga estática são mais onerosas e também mais lentas que os ensaios de carregamento dinâmico, a NBR 6122/2019 permite que os ensaios de prova de carga estática sejam substituídos por ensaios de carregamento dinâmico (ECD), na proporção de 5 (cinco) ECD para cada 1 (uma) prova de carga demandada.

2.6 ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO

O Ensaio de carregamento dinâmico (ECD) é um ensaio para verificar a resistência da estaca e sua integridade. Este pode ser realizado tanto em estacas cravadas, já na sequência da sua cravação quanto em estacas moldadas *in-loco*, desde que seja respeitado um intervalo mínimo de 7 dias e a cabeça da estaca seja protegida para que esta seja capaz de suportar o impacto do martelo. O instrumento utilizado para o ensaio é o bate-estacas, e a aplicação do impacto é feita por seu martelo caindo de uma altura controlada, a Figura 11 ilustra um ensaio sendo executado (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

Para a obtenção dos resultados à estaca é instrumentada, com medidores de deformação e acelerômetros, usualmente são colocados no topo da estaca, e são necessários para estimar a força e deslocamento que ocorrem na seção instrumentada da estaca, que por ser a seção de topo os valores obtidos costumam corresponder aos valores absolutos existentes na estaca (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

Para a obtenção dos dados da instrumentação é utilizado o equipamento PDA (*pile driving analyser*), conforme pode ser observado na Figura 12. Esse equipamento utiliza a teoria da equação da onda para obter os seguintes resultados: força máxima no impacto; energia máxima no golpe; resistência estática mobilizada; deslocamento máximo da estaca durante o impacto; integridade da estaca; tensões máximas na estaca e eficiência do equipamento de cravação (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

Figura 11- Execução de ECD



Fonte: (TEKNIER engenharia e tecnologia)

Figura 12- Modelo de PDA (*Pile Driving analyser*)

Fonte: (TRADE- IN PDA)

O ECD traz como uma de suas vantagens a agilidade e custo, o que possibilita que o ensaio seja realizado em um maior número de estacas, gerando uma melhor caracterização da situação das estacas da obra. Já em obras *offshore* esse ensaio é a única alternativa, ou ainda, quando necessita-se de ensaios em estacas com resistência muito elevadas. Além de possuir como vantagem o resultado que é instantâneo, fazendo com que qualquer intervenção que venha a ser necessária possa ser imediata. E ainda ao final da análise o ensaio permite observar a resistência em parcelas separadas, sendo elas: a resistência lateral e a resistência de ponta (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

A teoria que proporciona os resultados obtidos nesse ensaio é a Teoria da equação da onda, sendo que soluções específicas foram desenvolvidas para viabilizar o método.

2.6.1 Teoria da Equação da Onda

Com o desenvolvimento da teoria da equação da onda, a análise da capacidade de carga tornou-se muito mais adequada. Com o desenvolvimento de extensômetros, *strain gages*, e acelerômetros foi possível utilizar meios computacionais para a aplicação dessa teoria (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

Na teoria da equação da onda primeiro considera-se que a queda do martelo gera uma onda descendente, e quando essa onda encontra algum tipo de obstáculo (resistência por atrito, mudança de seção transversal como área, peso específico ou resistência) a onda é refletida o que ocasiona ondas ascendentes. Essas ondas ascendentes podem ser observadas ao realizar medidas de força e impacto na seção instrumentada da estaca, usualmente no topo (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

A equação da onda para o caso de uma estaca sem resistência lateral é expressa pela Equação 22.

$$c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Equação 22}$$

Sendo:

x : Posição da seção transversal analisada;

$u(x, t)$: deslocamento;

t : tempo de análise;

c : velocidade de propagação da onda de tensão pela estaca, Equação 23

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Equação 23}$$

E : módulo de elasticidade do material da estaca;

ρ : massa específica do material da estaca.

A Equação 22 se aplica apenas a situação de estaca sem resistência lateral, quando se parte para a análise de estacas com resistência lateral, a equação disponível é de difícil resolução, assim o emprego dessa teoria passou a ter maior utilização após 1960 com a publicação do Método numérico de Smith (AOKI, 1997).

2.6.2 Método de Smith

Smith, em 1960, desenvolveu a solução da equação da onda, utilizando o método das diferenças finitas. Com seu método é possível verificar os deslocamentos, velocidades, aceleração e forças que ocorrem na estaca (AOKI, 1997).

No modelo numérico de Smith, o martelo é substituído por uma massa ($W1$), à estaca por massas e molas interligadas e o solo por molas e amortecedores. Para

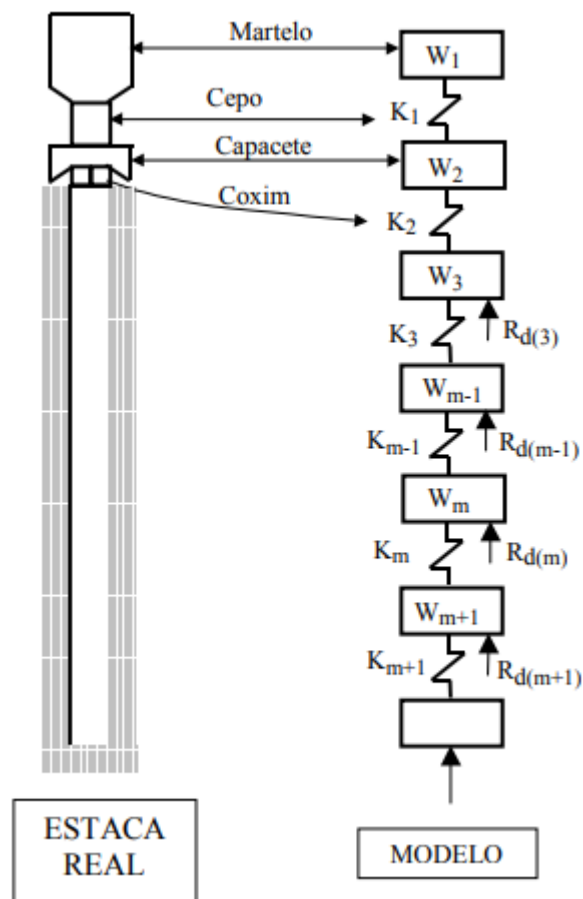
a análise à estaca é dividida em vários segmentos e a resistência a penetração é calculada para cada segmento. A Figura 13 ilustra as variáveis adotadas por Smith (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

Para Smith a resistência total (R_t) possui duas parcelas, uma dinâmica (R_d) e outra estática (R_u), porém o autor concluiu que a resistência dinâmica possui uma relação direta com a resistência estática, assim a equação que descreve o método proposto por Smith pode ser observada na Equação 24, onde tem-se ainda as variáveis J_s que corresponde ao coeficiente de amortecimento do solo e v que corresponde a velocidade da partícula (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

$$R_t = R_u(1 + J_s \cdot v)$$

Equação 24

Figura 13- representação do sistema de Smith (1960)



Fonte: (ALVES, LOPES e DANZIGER, 2004)

Smith desenvolveu os meios para uma correta aplicação da equação da onda aos dados obtidos através do ECD, e hoje para o tratamento dos dados surgiram

diversos métodos, que inclusive seguem sua metodologia, os mais usuais no Brasil são a CAPWAP e o CASE.

2.6.3 Métodos CAPWAP e CASE

O método CASE é o mais simples, tendo sido desenvolvido por correlações empíricas com resultados de prova de carga estática. Esse método possibilita a estimativa imediata da resistência estática de uma estaca submetida a um carregamento dinâmico, e adota como variáveis de entrada a força e velocidade medidas no topo da estaca (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

Porém a NBR 13208/2007 afirma que os dados analisados, previamente pelo método CASE, devem ser confirmados através do método CAPWAP ou por uma prova de carga estática.

O método CAPWAP modela o sistema estaca-solo de acordo com o método proposto por Smith (1960) e também com base no perfil geotécnico do local onde a estaca foi instalada. Usando como variáveis a força e a velocidade medidas no topo da estaca, o sistema solo-estaca é modelado para coincidir com os dados reais obtidos e o resultado desse ajuste é tido como sua resistência real, dessa forma quanto melhor o ajuste melhor a precisão encontrada (CINTRA, AOKI, *et al.*, 2013).

3 METODOLOGIA

Moreira (2021) desenvolveu um trabalho aplicado a região de Ponta Grossa-PR, em que realizou comparações entre os resultados obtidos, através de quatro métodos semiempíricos de dimensionamento de carga de ruptura para estacas (Decourt- Quaresma; Aoki- Velloso; Lobo e Vorcaro- Velloso) e os resultados obtidos através do ensaio de carregamento dinâmico (ECD). Com isso, o autor foi capaz de apontar a aplicabilidade dos métodos para a região em estudo, e em caso de divergências quais as possíveis causas.

O autor utilizou um conjunto de dados formado por 93 ensaios de carregamento dinâmico (ECD) e 42 boletins de sondagem SPT, contudo dentre as 93 estacas que apresentavam ensaios de carregamento dinâmico, 11 (onze) foram executadas com um comprimento superior ao disponível nos boletins de sondagem. No decorrer de seu trabalho, o autor concluiu que essas estacas apresentavam resultados muito divergentes, assim essas estacas não foram incluídas nas análises finais, totalizando 82 estacas viáveis. Essa exclusão de certas estacas ocorreu, pois, um dos objetivos finais do trabalho é um coeficiente de calibração, assim, torna-se necessário a redução das variáveis que possam vir a interferir.

Em continuidade ao trabalho apresentado por Moreira (2021) o presente trabalho realiza a análise da aplicabilidade dos métodos semiempíricos ao dimensionamento de estacas para a região de Ponta Grossa-PR. O banco de dados que é utilizado neste trabalho são as 82 amostras de Moreira (2021), contudo essas amostras são compostas por 5 (cinco) estacas metálicas e 77 (setenta e sete) estacas em concreto pré-moldado, para um maior controle de variáveis são utilizadas apenas as 77 (setenta e sete) estacas em concreto pré-moldado.

Além das estacas já analisadas em Moreira (2021) serão analisadas mais 3 (três) estacas em concreto pré-moldado que estão relacionadas a 2 (dois) novos boletins de sondagem SPT. Assim a amostra final em análise é composta por 80 (oitenta) estacas em concreto pré-moldado, de seções quadradas e hexagonais.

A Tabela 13 apresenta as estacas que serão analisadas separadas de acordo com a obra a qual pertencem e com suas seções transversais. As 80 (oitenta) estacas pertencem a 7 (sete) obras diferentes dentro da região de Ponta Grossa-PR, sendo

que as novas estacas que não estavam presentes no trabalho de Moreira (2021) são as 3 (três) estacas da obra 07.

Tabela 13- Tipos de estacas presentes no banco de dados.

Obra	Seção Transversal ⁽¹⁾	Quantidade	Quantidade Total
OBRA 01	35 x 35	1	5
	40 x 40	1	
	30 x 30	2	
	25 x 25	1	
OBRA 02	22 x 22	4	13
	20 x 20	3	
	18 x 18	3	
	25 x 25	3	
OBRA 03	26 x 26	2	5
	23 x 23	1	
	18 x 18	2	
OBRA 04	30 x 30	14	14
OBRA 05	30 x 30	6	26
	HC330 ⁽²⁾	12	
	22 x 22	2	
	25 x 25	5	
	20 x 20	1	
OBRA 06	30 x 30	14	14
OBRA 07	30 x 30	2	3
	22 x 22	1	
Total Geral			80

Fonte: A Autora, 2022.

⁽¹⁾ As dimensões das estacas pré-moldadas em concreto são dadas em centímetros;

⁽²⁾ A abreviatura HC é referente a estacas pré-moldadas de concreto de seção hexagonal, e o valor ao lado de HC representa o diâmetro da estaca, em milímetros.

Os dados referentes às 80 (oitenta) estacas estão organizados em planilhas, onde são apresentados o comprimento, as seções transversais, os resultados do ECD para cada estaca e o perfil de solo corresponde através dos relatórios dos ensaios de sondagem SPT. É apresentado resumidamente as características de cada obra no Quadro 1. Todos os dados e planilhas utilizadas nos dimensionamentos mencionados a seguir podem ser acessados através do QR Code disponível no ANEXO 1.

(continua)

OBRA	CARACTERÍSTICAS DA OBRA
Obra 01	A obra 1 possui um total de 5 ensaios de carregamento dinâmico, sendo que as estacas nas quais foram realizados os ensaios têm seção quadrada com lado variando entre 25 (vinte e cinco) e 40 (quarenta) centímetros, com seu comprimento variando de 8 (oito) a 11 (onze) metros. Quanto ao perfil do solo tem-se uma argila com Nspt inferior a 12 (doze) até os 6 (seis) metros, com valores que chegam até 50 a partir desse ponto. A exceção é a estaca P14C que possui um Nspt de 31 (trinta e um) já aos 6 (seis) metros.
Obra 02	A obra 02 possui um total de 13 resultados de ECD, sendo que as estacas relacionadas possuem seção quadrada com dimensões variando de 18 (dezoito) a 25 (vinte e cinco) centímetros. O comprimento dessas estacas varia de 8 (oito) a 11 (onze) metros atravessando horizontes de argila em toda sua extensão, sendo que começam a ser observados valores de Nspt superiores a 12 (doze) a partir de 5 (cinco) metros.
Obra 03	A obra 03 possui um total de 5 resultados de ECD, sendo que as estacas relacionadas possuem seção quadrada com dimensões variando de 18 (dezoito) a 26 (vinte e seis) centímetros. Todas as estacas tem 9 (nove) metros de comprimento atravessando horizontes de argila siltosa até 10 (dez) metros, sendo que começam a ser observados valores de Nspt superiores a 10 (dez) a partir de 8 (oito) metros.
Obra 04	A obra 04 possui um total de 14 resultados de ECD, sendo que todas as estacas analisadas têm seção quadrada com lado de 30 (trinta) centímetros. O comprimento dessas estacas varia de 7 (sete) a 11 (onze), e os resultados das sondagens SPT apontam o solo até os 3 (três) metros como solo sendo argila, em algumas estacas com a presença de silte e areia em diferentes proporções, sendo que a partir dos 4 (quatro) metros tem-se silte com presença de areia e argila em algumas estacas e a partir dos 7 (sete) metros quase todas as estacas estão assentes em silte, menos à estaca P16BT1 que passa a solo tipo silte apenas a partir dos 9 (nove) metros.
Obra 05	A obra 05 possui um total de 26 (vinte e seis) resultados de ECD, sendo que 14 estacas possuem seção quadrada com dimensões variando de 22 (vinte e dois) a 30 (trinta) centímetros e 12 seções hexagonal. O comprimento dessas estacas varia de 11 (onze) a 30 (trinta) metros os laudos de sondagem SPT apresentam solos que variam entre argila siltosa e silte argiloso ao longo do fuste de todas as estacas, de modo geral é apresentado um solo com Nspt inferior a 10 (dez) ao longo do fuste.

Quadro 1: Descrição obras analisadas

(conclusão)

OBRA	CARACTERÍSTICAS DA OBRA
Obra 06	A obra 06 possui um total de 14 resultados de ECD, as estacas analisadas possuem seção quadrada com dimensões de 25 (vinte e cinco) centímetros. O comprimento dessas estacas varia de 7 (sete) a 15 (quinze) metros atravessando horizontes de argila com diferentes quantidades de silte e areia ao longo do fuste.
Obra 07	A obra 07 possui um total de 3 resultados de ECD, de seção quadrada com dimensões variando de 22 (vinte e dois) a 30 (trinta) centímetros. Todas as estacas tem 9 (nove) metros de comprimento, e o perfil do solo é composto por argila com diferentes composições de silte e areia.

Quadro 1: Descrição obras analisadas

Fonte: A Autora, 2022.

As 80 (oitenta) estacas foram dimensionadas por seis métodos: Decourt-Quaresma; Aoki- Velloso; Teixeira; Laprovitera- Benegas; Lobo e Vorcaro- Velloso. Seguindo as recomendações citadas no item 2.3. Sendo que para Decourt-Quaresma os N_{SPT} menores que 3 foram considerados como 0, enquanto para Teixeira os N_{SPT} inferiores a 4 foram considerados 0.

Com todas as estacas dimensionadas foi realizada a comparação entre os resultados obtidos através dos métodos e os observados a partir do ECD. Primeiro, em sequência ao trabalho de Moreira (2021), as estacas são agrupadas de acordo com a obra ao qual pertencem e em um segundo momento elas são agrupadas de acordo com o tipo de solo presente na ponta da estaca. Essa comparação entre os resultados dos métodos e os do ECD, foi realizada no intuito de apontar qual método melhor se adequa as situações propostas.

A variável tipo de solo na ponta da estaca está ligada, na maioria dos métodos, a resistência de ponta das estacas. Neste trabalho foi realizado a adaptação dos métodos apenas em relação a resistência de ponta, já que entre ponta e lateral, a ponta é a que possui uma menor complexidade de variáveis dentro dos métodos em estudo, sendo a mais adequada para o estudo inicial proposto neste trabalho.

A análise da dispersão entre os resultados do ensaio de carregamento dinâmico e os dos métodos é realizada através de coeficientes estatísticos, sendo eles: média, desvio padrão, coeficiente de variação e erro médio absoluto ou MAE (*Mean Absolute Error*). Complementando a análise numérica há também os gráficos que apresentam a capacidade de carga obtida através dos métodos semiempíricos e

a apresentada no ECD. Tanto os gráficos quanto os coeficientes são apreciados em três situações: Capacidade de carga total; Capacidade de carga da Ponta e Capacidade de carga do fuste. Essa distinção em três parcelas ocorre para que seja possível observar as diferentes contribuições, que ocorrem em relação ao fuste e a ponta sendo que cada método possui uma abordagem diferente dessas parcelas.

A partir dos itens acima a cada situação é escolhido o método que melhor a representa, se houver, podendo ser mais de um método dependendo do caso. Essa escolha é feita através do método que apresenta um menor coeficiente de variação, uma média mais próxima de 100%, um MAE inferior ou ainda uma combinação destes, a base de cada escolha é justificada situação a situação. Ao final um método é definido para buscar adaptar seus coeficientes relacionados a resistência de ponta.

A adequação dos métodos é realizada através de gráficos de dispersão, onde as amostras estão separadas de acordo com as divisões de solos utilizada anteriormente. Este trabalho busca propor apenas novos coeficientes para a capacidade de carga da ponta, não sendo analisado profundamente o comportamento nas parcelas referentes a resistência lateral. Então é traçada uma linha de tendência, opção disponível no software Excel, respeitando a linha gerada a partir do método em análise, a situação é considerada satisfatória quando o valor de R^2 é superior a 0,85, valor adotado pela autora a partir de análise inicial dos dados para um melhor controle da dispersão, e para isso em algumas situações foram retirados da análise as estacas que apresentam valores discrepantes.

Após a definição dos novos coeficientes tem-se então a validação destes, novamente através dos coeficientes estatísticos e dos gráficos capacidade de carga X estacas. Comparações foram realizadas entre os valores obtidos com os coeficientes modificados e os referentes aos coeficientes originais.

4 RESULTADOS

Já com as 80 (oitenta) estacas dimensionadas através dos seis métodos (Decourt- Quaresma; Aoki- Velloso; Teixeira; Laprovitera- Benegas; Lobo; Vorcaro- Velloso) é possível iniciar as análises das dispersões dos métodos. Os resultados dos dimensionamentos estão disponíveis através do ANEXO 1.

A dispersão é analisada através de quatro coeficientes estatísticos: a média; o desvio padrão; o coeficiente de variação e o erro médio absoluto (MAE). Sendo que a média corresponde à média da divisão da capacidade de carga obtida através do método e a observada no ECD, que quanto mais próxima de 100%, mais próximo o método está de atingir os valores observados durante o ECD. O coeficiente de variação é o resultado da divisão entre a média e o desvio padrão, onde apresenta em porcentagem quão aderente o método é aos resultados obtidos *in loco*, assim valores mais baixos são os desejados. Já o MAE apresenta em valores absolutos a média da diferença entre os resultados obtidos através dos métodos e os observados durante o ECD, quanto menor esse valor mais próximo o valor do método está do real, mas é importante lembrar que esse valor é uma média que pode ser prejudicado caso a amostra possua grande variabilidade. (SILVA, FERNADES e ALMEIDA., 2015)

Moreira (2021) realizou suas análises agrupando as estacas por obra, portanto, a primeira análise realizada aqui é também agrupando por obra. O autor aborda diversas variáveis que podem interferir na capacidade de carga das estacas, dentre elas destaca-se o solo onde está assente a ponta da estaca, e assim as estacas também serão agrupadas, quanto a essa variável e as devidas considerações serão feitas. As considerações obtidas estão apresentadas a seguir.

4.1 ANÁLISE POR OBRA

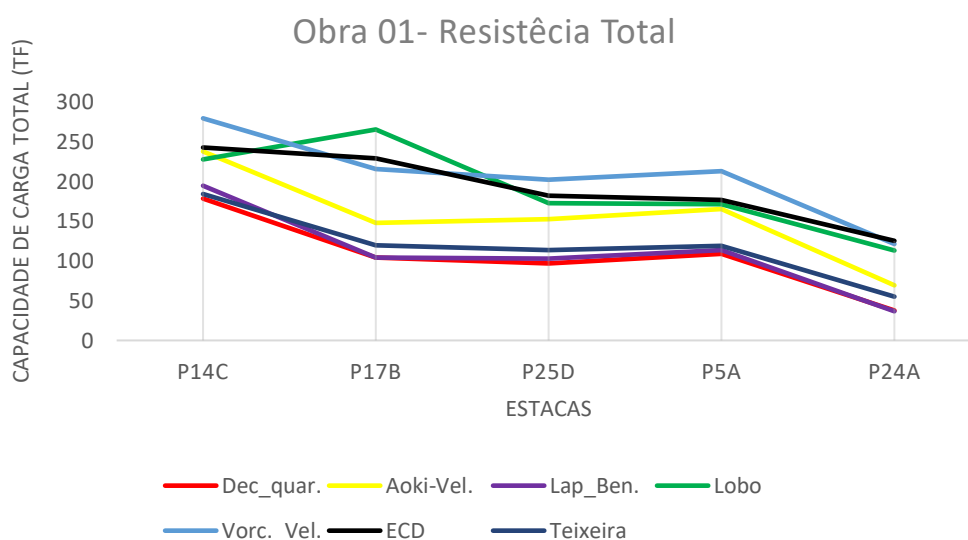
4.1.1 Obra 01

A obra 1 possui um total de 5 ensaios de carregamento dinâmico, sendo que as estacas nas quais foram realizados os ensaios têm seção quadrada que varia de 25 (vinte e cinco) a 40 (quarenta) centímetros, com seu comprimento variando de 8 (oito) a 11 (onze) metros. Quanto ao perfil do solo tem-se uma argila com N_{spt} inferior a 12 (doze) até os 6 (seis) metros, com valores que chegam até 50 a partir desse ponto. A exceção é a estaca P14C que possui um N_{spt} de 31 (trinta e um) já aos 6 (seis) metros.

Para a análise da capacidade de carga total na obra 01 estão disponíveis a Figura 14 e a Tabela 14. A partir delas é possível observar que dentre os métodos usados, Vorcaro- Velloso e Lobo são os que tendem a apresentar valores pelo método superiores ao observados através do ECD, representado numericamente na Tabela 14 pela relação P_r maior ou menor que ECD . Os demais métodos retornam valores inferiores.

Ao analisar as demais variáveis o método que tem melhor aderência as estacas dessa obra é o método de Lobo, sendo o que tem a média mais próxima de 100%, e ainda o desvio padrão, CV e MAE inferiores aos demais, isso ainda é verificado pelo gráfico, onde a curva representada por Lobo segue as tendências da curva apresentada pelo ECD.

Figura 14- Obra 01: Capacidade de carga total (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 14- Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total para a obra 01, calculados para os seis métodos

OBRA 01- RESISTÊNCIA TOTAL												
Métodos	Déc.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc.-Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	1	20%	3	60%
$P_r < ECD$	5	100%	5	100%	5	100%	5	100%	4	80%	2	40%
Média Qrdc/QECD (%)	52,8%		79,0%		55,2%		60,3%		98,4%		107,6%	
Desvio Padrão (%)	14,7%		16,5%		17,2%		11,2%		9,0%		10,2%	
CV (%)	27,8%		20,9%		31,1%		18,6%		9,2%		9,5%	
MAE (tf)	86 ±22		37 ±29		81 ±26		73 ±21		16 ±11		22 ±13	

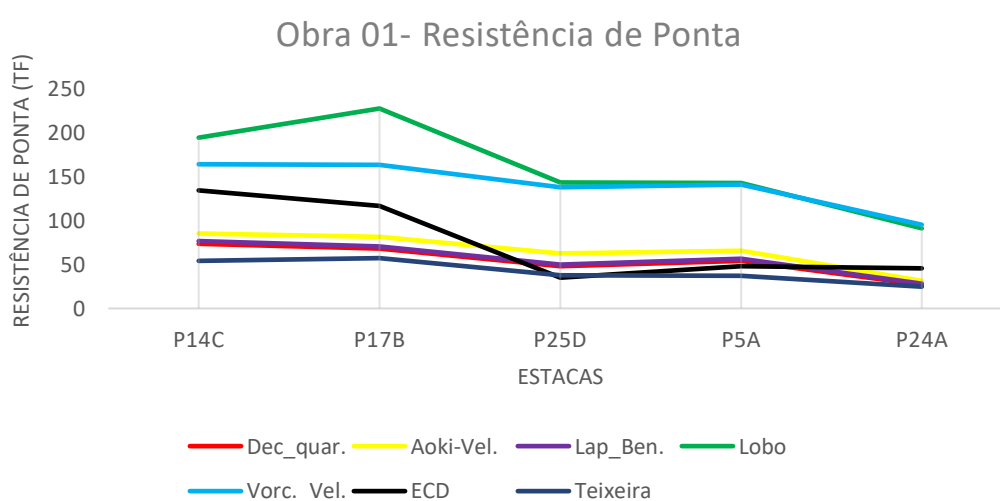
Fonte: A Autora, 2022.

Apesar de Lobo apresentar uma boa relação para a capacidade de carga total, é importante observar as parcelas de resistência do fuste e ponta separadamente, para ver como cada método trata essas parcelas, já que, em algumas situações acontece de apenas uma delas ser responsável pela resistência.

A Tabela 15 e a Figura 15 apresentam os resultados para a resistência de ponta enquanto a Figura 16 e a Tabela 16 para a resistência lateral. Nos elementos que apresentam os valores para a ponta observa-se que Lobo apresenta valores superiores ao obtidos pelo ECD, em algumas situações da ordem de $100tf$ já nos que representam a resistência lateral Lobo apresenta valores inferiores e em situações da ordem de $100tf$, sendo que na capacidade de carga total isso acaba gerando uma boa representação.

Assim Lobo passa a não ser mais um bom método para representar o que acontece nessa obra, sendo interessante estudar mais a fundo o porquê ocorre essa inversão quanto a capacidade de carga de fuste e ponta. Vorcaro- Velloso que também tinha ficado próximo para a capacidade de carga total, quando observado em parcelas distintas apresenta o mesmo que ocorre com Lobo. Os demais métodos tendem a apresentar valores inferiores ao gerado pelo ECD para as três situações em análise: total, ponta e fuste.

Figura 15- Obra 01: Resistência de Ponta (tf) X Estacas



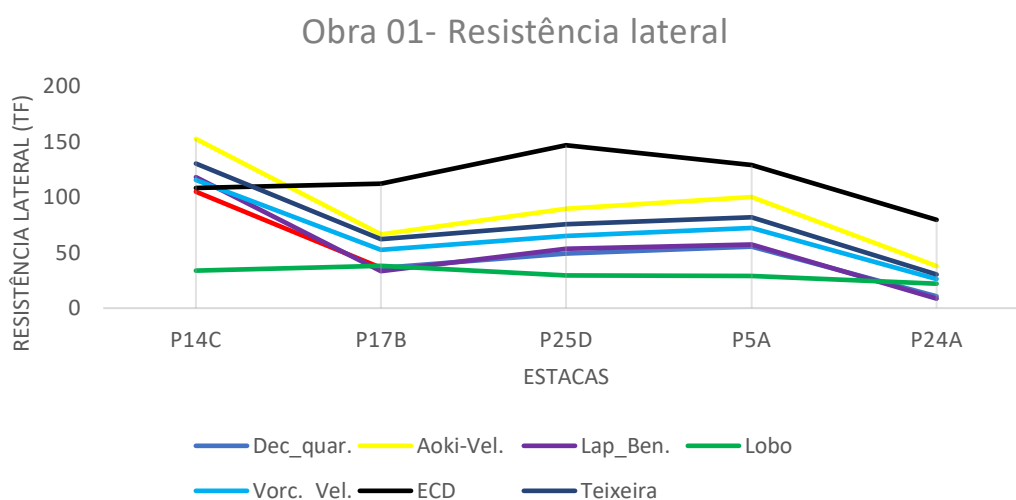
Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 15- Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta para a obra 01, calculados para os seis métodos.

OBRA 01- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Déc.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc.-Vel.	
P _r >ECD	2	40%	2	40%	2	40%	1	20%	5	100%	5	100%
P _r <ECD	3	60%	3	60%	3	60%	4	80%	0	0%	0	0%
Média Qrdc/QECD (%)	84,1%		103,3%		87,6%		65,7%		248,7%		230,8%	
Desvio Padrão (%)	33,8%		46,4%		35,2%		24,5%		94,2%		100,6%	
CV (%)	40,2%		44,9%		40,2%		37,3%		37,9%		43,6%	
MAE tf	29±21		29±13		29±19		35±33		84±26		64±28	

Fonte: A Autora, 2022.

Figura 16- Obra 01: Resistência Lateral (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 16- Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral das estacas da obra 01 para todos os métodos.

OBRA 01- RESISTÊNCIA LATERAL												
Métodos	Déc.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc.-Vel.	
P _r >ECD	0	0%	1	20%	1	20%	1	20%	0	0%	1	20%
P _r <ECD	5	100%	4	80%	4	80%	4	80%	5	100%	4	80%
Média Qrdc/QECD (%)	43,8%		77,2%		46,0%		65,8%		27,1%		57,4%	
Desvio Padrão (%)	28,2%		33,1%		33,3%		28,4%		5,2%		25,6%	
CV (%)	64,3%		42,8%		72,3%		43,1%		19,3%		44,7%	
MAE (tf)	64±32		43±9		65±29		48±18		85±21		52±25	

Fonte: A Autora, 2022

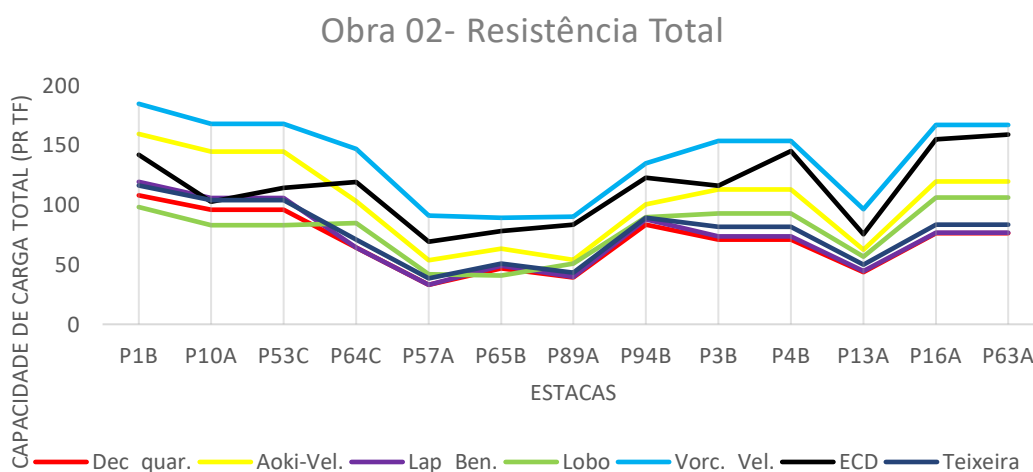
4.1.2 Obra 02

A obra 02 possui um total de 13 resultados de ECD, sendo que as estacas relacionadas possuem seção quadrada com dimensões variando de 18 (dezoito) a 25 (vinte e cinco) centímetros. O comprimento dessas estacas varia de 8 (oito) a 11 (onze) metros atravessando horizontes de argila em toda sua extensão, sendo que começam a ser observados valores de N_{spt} superiores a 12 (doze) a partir de 5 (cinco) metros.

A Figura 17 e a Tabela 17 fornecem os resultados para a análise da obra 02, quanto a capacidade de carga total, um ponto a ser observado é que dentre os métodos apenas Vorcaro-Velloso apresenta todos os valores superiores ao ECD. Os demais métodos apresentam valores inferiores para todas as estacas tendo como exceções as estacas P1B, P10A e P53C que possuem métodos que retornam valores superiores.

Nessa obra apesar de o desvio padrão apresentado na Tabela 17 ser relativamente baixo e pela Figura 17 ser possível observar que para algumas estacas, os métodos tendem a retornar valores com os mesmos comportamentos do ECD. Os métodos têm um comportamento muito similar entre si, o que dificulta a escolha de um deles como o mais adequado a situação.

Figura 17- Obra 02: Capacidade de carga total (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 17- Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total para obra 02, calculados para os seis métodos

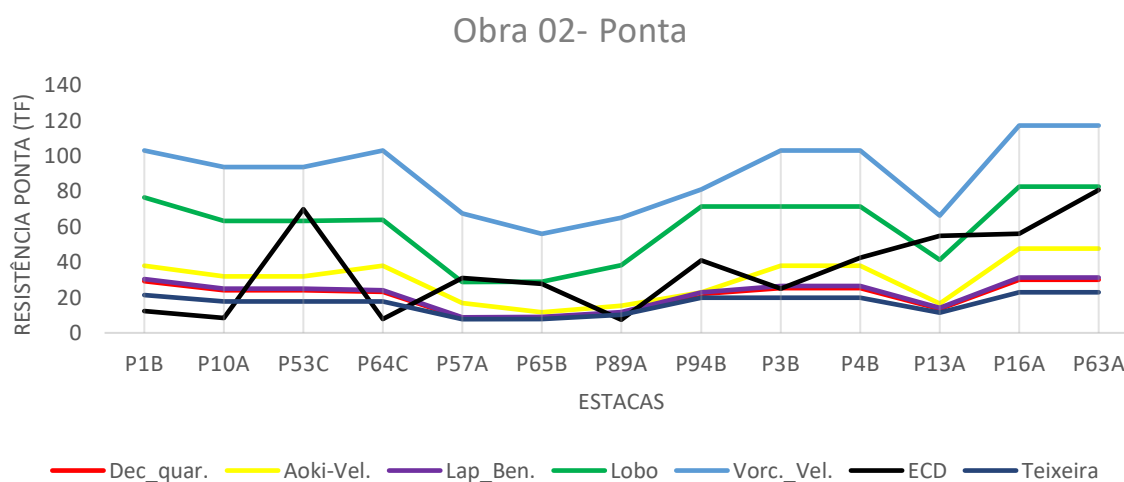
OBRA 02- RESISTÊNCIA TOTAL												
Métodos	Déc.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc.-Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	3	23%	1	8%	1	8%	0	0%	13	100%
$P_r < ECD$	13	100%	10	77%	12	92%	12	92%	13	100%	0	0%
Média Qrdc/QECD (%)	61,2%		90,9%		64,2%		67,5%		68,8%		123,6%	
Desvio Padrão (%)	14,5%		21,5%		17,8%		15,1%		7,7%		17,0%	
CV (%)	23,7%		23,7%		27,7%		22,3%		11,2%		13,8%	
MAE (tf)	44±22		24±11		41±24		38±22		35±11		25±18	

Fonte: A Autora, 2022.

Ao analisar as parcelas de ponta e fuste separadamente, os resultados, Tabela 18 e a Figura 18 para ponta e Tabela 19 com a Figura 19 para fuste, confirmam o que foi apresentado anteriormente para a capacidade de carga total, não havendo nenhum método que possa ser apontado como o mais adequado.

Sendo que na Figura 18 e na Figura 19 é observado que não há uma relação clara entre os valores apresentados pelos métodos e os obtidos através do ECD.

Figura 18- Obra 02: Resistência de Ponta (tf) X Estacas



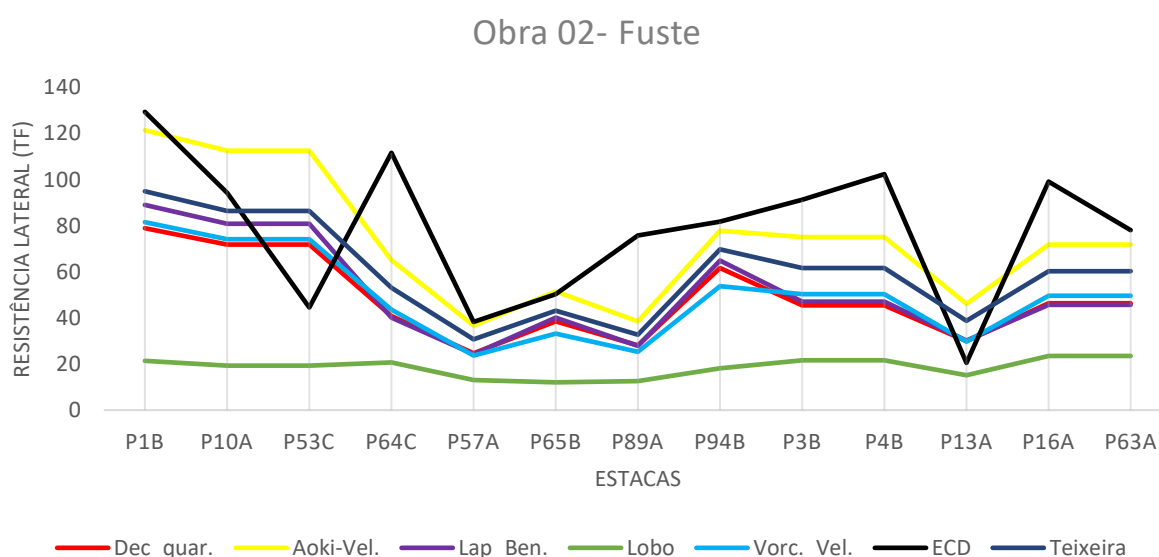
Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 18- Obra 02: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.

OBRA 02- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Déc.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc.-Vel.	
P _r >ECD	5	38%	5	38%	5	38%	4	31%	10	77%	13	100%
P _r <ECD	8	62%	8	62%	8	62%	9	69%	3	23%	0	0%
Média Qrdc/QECD (%)	107,4%		153,9%		111,9%		84,0%		304,4%		464,7%	
Desvio Padrão (%)	97,9%		143,4%		102,0%		73,1%		263,5%		404,2%	
CV (%)	91,2%		93,2%		91,2%		87,0%		86,6%		87,0%	
MAE (tf)	23±14		21±11		22±14		24±18		28±21		54±26	

Fonte: A Autora, 2022.

Figura 19- Obra 02: Resistência Lateral (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 19- Obra 02: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral de estacas para todos os métodos.

OBRA 02- RESISTÊNCIA LATERAL												
Métodos	Déc.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc.-Vel.	
P _r >ECD	2	15%	4	31%	2	15%	2	15%	0	0%	2	15%
P _r <ECD	11	85%	9	69%	11	85%	11	85%	13	100%	11	85%
Média Qrdc/QECD (%)	71,9%		108,8%		75,5%		88,9%		28,4%		72,2%	
Desvio Padrão (%)	37,4%		58,7%		41,6%		45,9%		15,1%		37,8%	
CV (%)	52,0%		53,9%		55,1%		51,6%		53,2%		52,4%	
MAE (tf)	32±19		22±19		33±19		27±17		60±28		35±17	

Fonte: A Autora, 2022

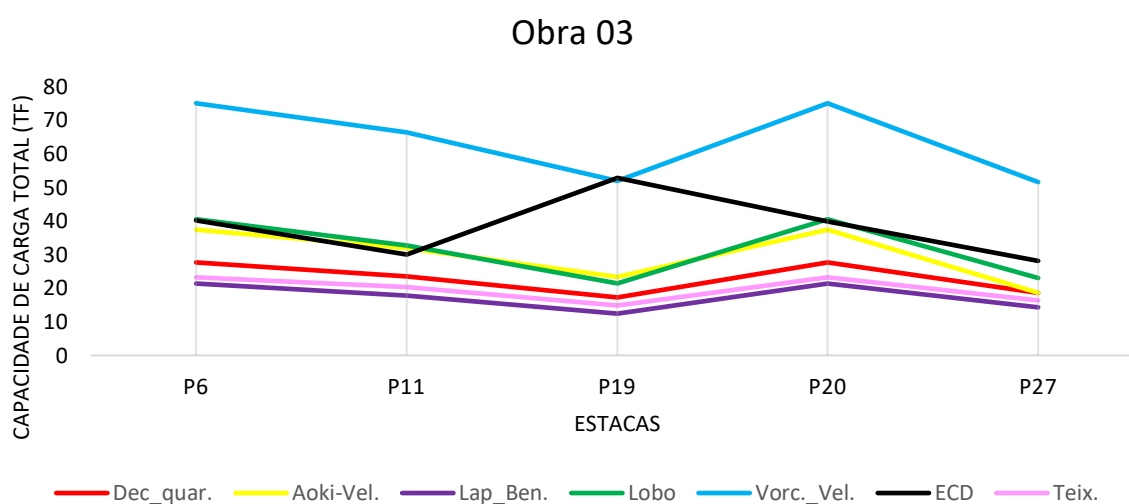
4.1.3 Obra 03

A obra 03 possui um total de 5 resultados de ECD, sendo que as estacas relacionadas possuem seção quadrada com dimensões variando de 18 (dezoito) a 26 (vinte e seis) centímetros. Todas as estacas têm 9 (nove) metros de comprimento atravessando horizontes de argila siltosa até 10 (dez) metros, sendo que começam a ser observados valores de N_{spt} superiores a 10 (dez) a partir de 8 (oito) metros.

A Tabela 20 e a Figura 20 apresentam os resultados para a análise por obra, quanto a capacidade de carga total. A Figura 20 ilustra como todos os métodos tendem a seguir a tendência apresentada pelo ECD, sendo que a estaca P19 é o único ponto de divergência, apontando que o que ocorre nesta estaca merece um estudo mais aprofundado. Percebe-se, então, que com uma análise inicial não é possível observar a causa dessa divergência já que todas as estacas possuem 9 (nove) metros de comprimento e à estaca P19 possui a mesma seção da estaca P27, 18 (dezoito) centímetros. A estaca P19 ainda influencia os valores apresentados pela Tabela 20.

Já a escolha de um método mais representativo não é possível, já que o método de Vorcaro-Velloso retorna valores superiores ao apresentado pelo ECD da ordem $40tf$, e os demais métodos estão muito próximos entre si e ainda muito próximos ao ECD, o que impossibilita de eleger apenas um método.

Figura 20- Obra 03: Capacidade de carga total (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 20- Obra 03: Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total, calculados para os seis métodos

OBRA 03- RESISTÊNCIA TOTAL												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorcaro.-Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	1	20%	0	0%	0	0%	3	60%	4	80%
$P_r < ECD$	5	100%	4	80%	5	100%	5	100%	2	40%	1	20%
Média Qrdc/QECD (%)	63,0%		80,8%		48,0%		54,0%		86,7%		175,6%	
Desvio Padrão (%)	15,7%		22,4%		12,6%		13,5%		24,8%		40,9%	
CV (%)	25,0%		27,8%		26,2%		24,9%		28,5%		23,3%	
MAE (tf)	15±10		9±11		21±10		19±10		8±12		26±14	

Fonte: A Autora, 2022.

Ao separar a resistência em parcelas, referentes a ponta e fuste na Tabela 21, é possível verificar que os métodos de Lobo e Vorcaro-Veloso tendem a apresentar valores superiores ao ECD, para a resistência de ponta. Enquanto Decourt-Quaresma e Teixeira valores inferiores. Já com a Tabela 22 é possível observar como todos os métodos retornam valores inferiores aos apresentados pelo ECD, sendo que os valores apresentados na Tabela 22 sofreram uma grande influência da estaca P19.

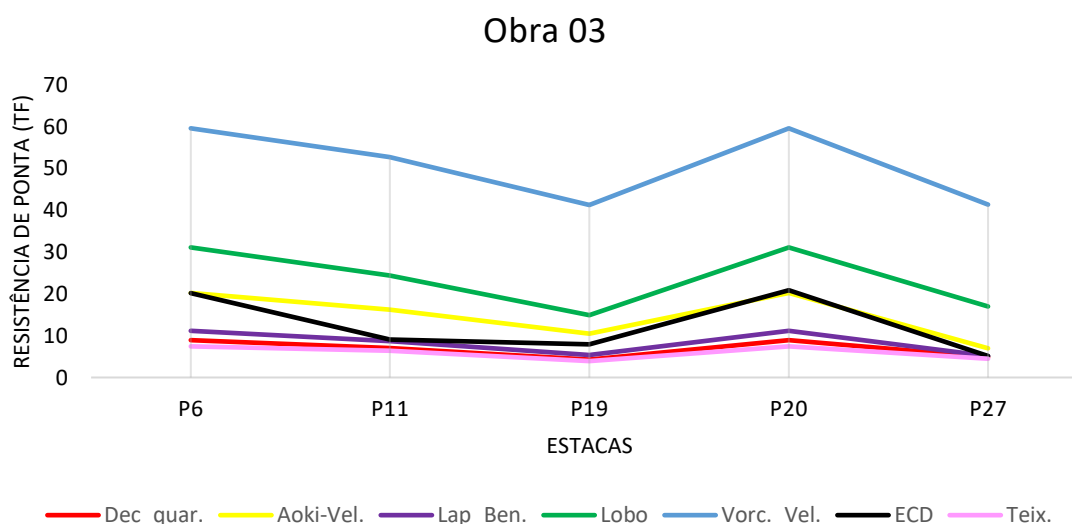
A Figura 22 e a Figura 21 ilustram a influência da estaca P19 nas tabelas e também o comportamento dos métodos em relação aos valores obtidos pelo ECD. Dessa forma é possível observar que quanto a ponta, à estaca P19 não diverge, mas já para o fuste, esta estaca tem sua resistência por métodos consideravelmente inferiores ao apresentado pelo ECD, dentro da ordem de valores apresentada para essa obra, que é consideravelmente inferior ao observado nas anteriores.

Ao observar que a causa da divergência está relacionada a resistência lateral, pode-se supor que, uma das suas causas estaria relacionado com a seção e tipo de solo, já que para esta obra estão disponíveis dois boletins de sondagem SPT. Onde o primeiro apresenta argila siltosa até a profundidade, necessária para o dimensionamento pelos métodos, enquanto o segundo apresenta argila siltoarenosa a partir dos 8 (oito) metros.

Como mencionado, para a capacidade de carga total à estaca P19 e à estaca P27 possuem a mesma seção, porém a P27 foi dimensionada pelo primeiro boletim de sondagem enquanto a P19 pelo segundo.

Novamente como o que aconteceu com a capacidade de carga total, os métodos tendem a estar condensados ao redor dos valores apresentados pelo ECD, exceto Vorcaro-Velloso para ponta, o que torna inadequado eleger apenas um método.

Figura 21- Obra 03: Resistência de Ponta (tf) X Estacas



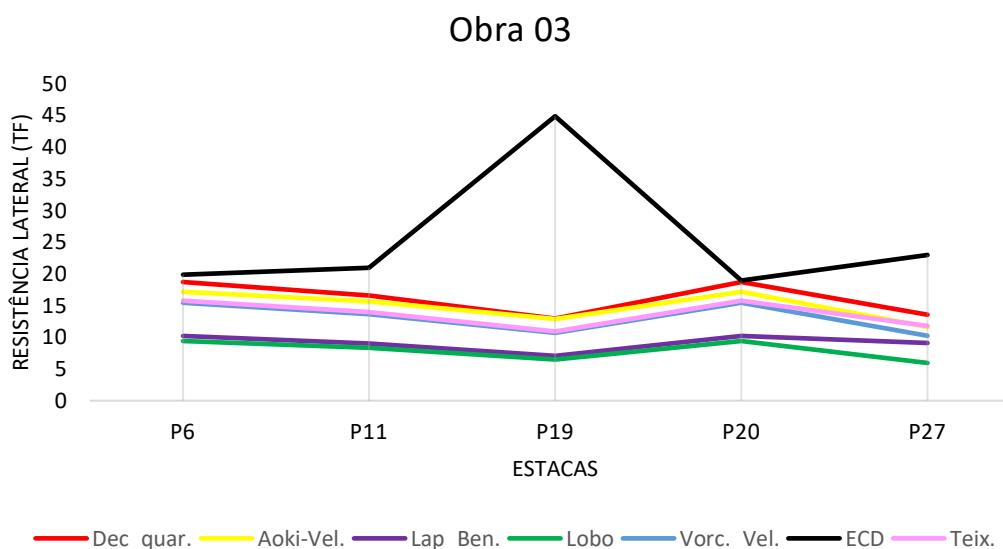
Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 21- Obra 03: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.

OBRA 03- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	3	60%	1	20%	0	0%	5	100%	5	100%
$P_r < ECD$	5	100%	2	40%	4	80%	5	100%	0	0%	0	0%
Média Qrdc/QECD (%)	62,7%		128,7%		74,4%		56,0%		217,8%		496,6%	
Desvio Padrão (%)	20,6%		29,5%		19,8%		20,2%		70,7%		193,7%	
CV (%)	32,8%		22,9%		26,6%		36,1%		32,5%		39,0%	
MAE (tf)	6±5		2±2		4±4		8±5		11±2		38±3	

Fonte: A Autora, 2022.

Figura 22- Obra 03: Resistência Lateral (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 22- Obra 03: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral para todos os métodos.

OBRA 03- RESISTÊNCIA LATERAL												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
$P_r < ECD$	5	100%	5	100%	5	100%	5	100%	5	100%	5	100%
Média Qrdc/QECD (%)	72,0%		66,2%		40,8%		61,0%		35,5%		58,6%	
Desvio Padrão (%)	25,6%		23,4%		13,6%		21,5%		13,4%		21,6%	
CV (%)	35,6%		35,3%		33,3%		35,2%		37,7%		36,9%	
MAE (tf)	9±12		11±11		16±11		12±11		18±11		12±11	

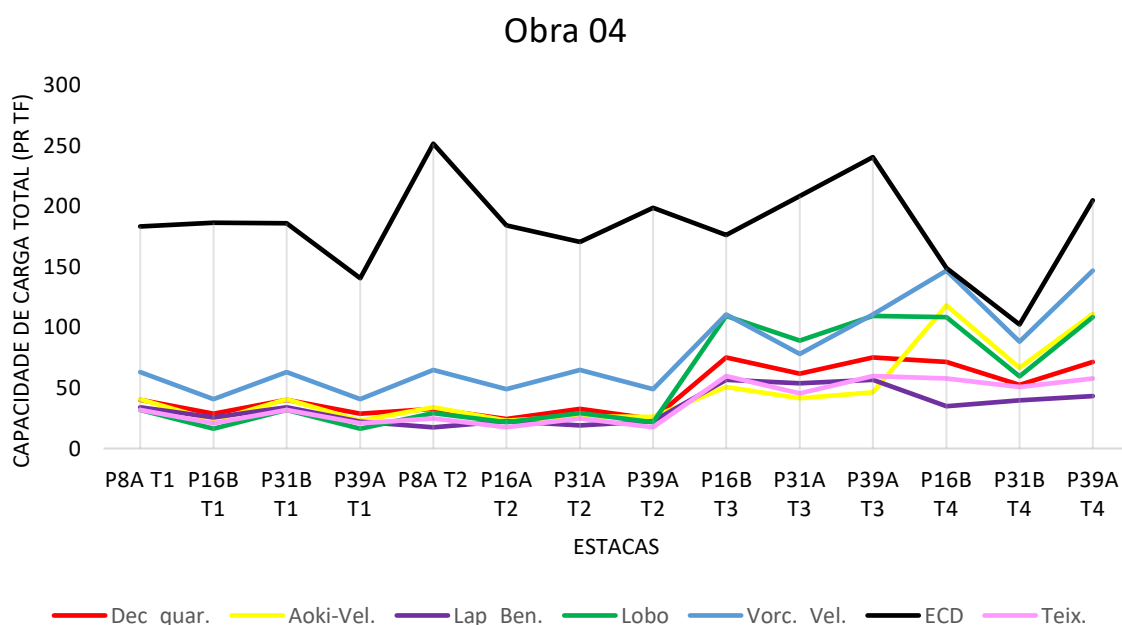
Fonte: A Autora, 2022

4.1.4 Obra 04

A obra 04 possui um total de 14 resultados de ECD, sendo que todas as estacas analisadas têm seção quadrada com lado de 30 (trinta) centímetros. O comprimento dessas estacas varia de 7 (sete) a 11 (onze) metros, e os resultados das sondagens SPT apontam o solo até os 3 (três) metros como argila. Em algumas estacas com a presença de silte e areia em diferentes proporções, sendo que a partir dos 4 (quatro) metros tem-se silte com presença de areia e argila em algumas estacas e a partir dos 7 (sete) metros quase todas as estacas estão assentes em silte, menos à estaca P16BT1 que passa a solo tipo silte apenas a partir dos 9 (nove) metros.

Como é demonstrado através da Tabela 23 e da Figura 23, todos os métodos retornam valores inferiores ao apresentado no ECD da ordem de 100 *tf*, contudo, apenas nas estacas P16B T4, P31B T4 e P39A T4 os valores apresentados pelos métodos e pelo ECD estão mais próximos. Não há um método que se destaque por apresentar um comportamento mais próximo do observado pelo ECD.

Figura 23- Obra 04: Capacidade de carga total (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 23- Obra 04: Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total, calculados para os seis métodos

OBRA 04- RESISTÊNCIA TOTAL												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
$P_r < ECD$	14	100%	14	100%	14	100%	14	100%	14	100%	14	100%
Média Qrdc/QECD (%)	26,7%		28,1%		19,5%		21,4%		31,4%		45,5%	
Desvio Padrão (%)	12,7%		20,9%		8,5%		11,9%		22,1%		23,6%	
CV (%)	47,4%		74,3%		43,6%		55,5%		70,4%		52,0%	
MAE (tf)	137±41		136±52		150±38		147±41		129±50		105±50	

Fonte: A Autora, 2022.

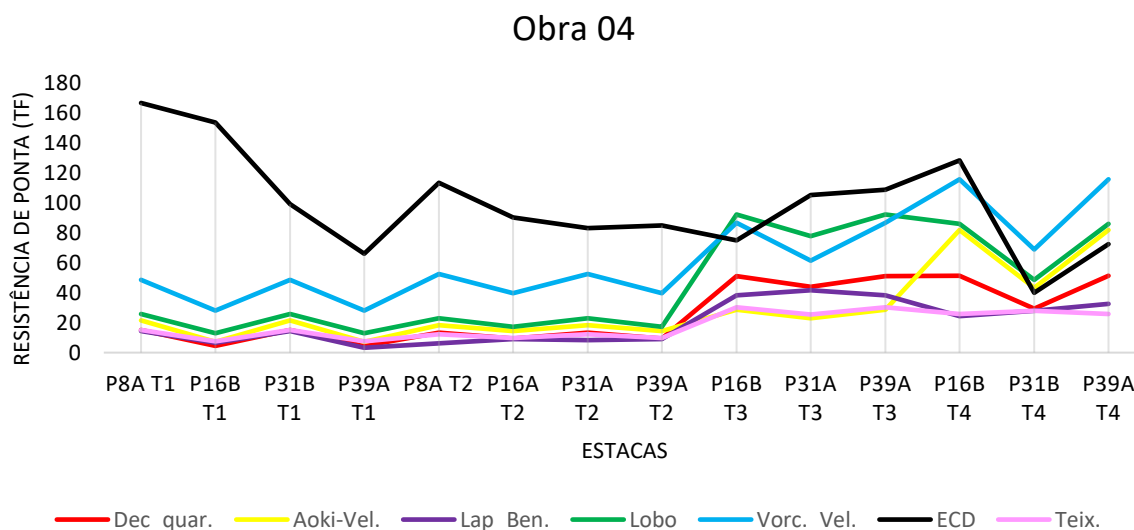
A Figura 24 e a Tabela 24 apresentam os resultados para a resistência de ponta. É interessante observar que as estacas pertencentes as torres T1 e T2 apresentam um comportamento pelos métodos mais distante do observado pelo ECD, enquanto as pertencentes a T3 e T4 tem um comportamento mais próximo. Uma das

possíveis causas para isso acontecer seria o tipo de solo que compõem o volume responsável pela resistência de ponta, que para todas as estacas seria silte com diferentes composições de areia e argila. Assim reforçando a importância de estudar a influência dessas parcelas.

Já a Figura 25 com a Tabela 25 apresentam os resultados para a resistência lateral, aqui os valores apresentados pelos métodos são consideravelmente inferiores aos observados pelo ECD, com exceção do que acontece nas estacas P8A T1, P16B T1 e P16B T4. Apesar de que as médias apresentadas na Tabela 25 não chegam nem a 50%.

Outro fator a ser observado nesta obra é que a maioria dos resultados dos boletins de sondagem SPT retornam valores inferiores a 10, com valores superiores em alguns furos próximos a ponta das estacas. A partir desse fato seria esperado que os valores de resistência apresentados pelo ECD fossem inferiores, como os resultados que os métodos retornam. Desse modo esta obra aponta a importância de um maior aprofundamento sobre a influência do silte na capacidade de carga, principalmente nesta situação, a capacidade de carga lateral.

Figura 24- Obra 04: Resistência de Ponta (tf) X Estacas



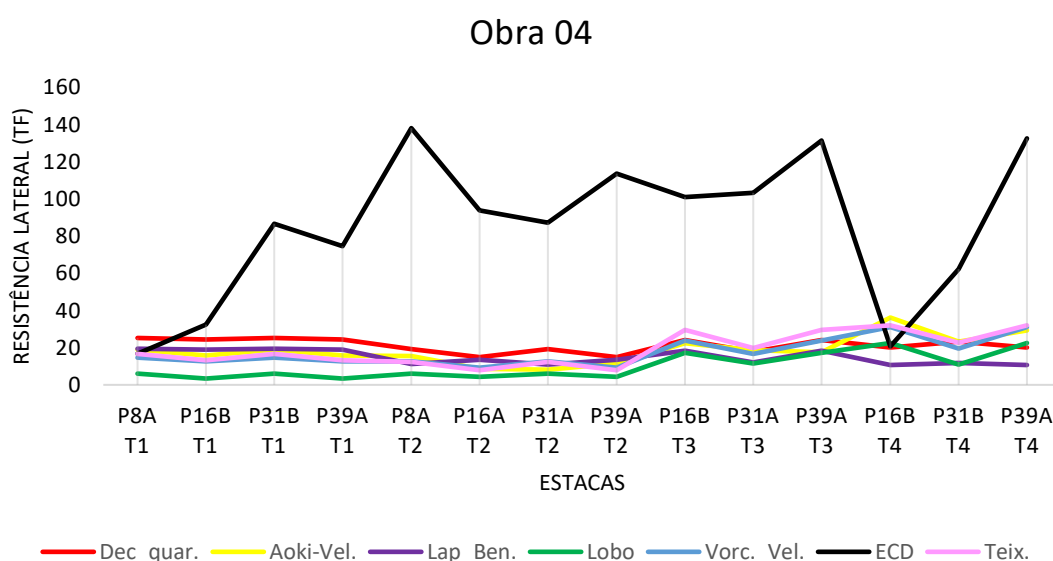
Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 24-Obra 04: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.

OBRA 04- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	2	14%	0	0%	0	0%	3	21%	3	21%
$P_r < ECD$	14	100%	12	86%	14	100%	14	100%	11	79%	11	79%
Média Qrdc/QECD (%)	30,2%		35,2%		23,5%		21,9%		53,2%		72,4%	
Desvio Padrão (%)	24,9%		33,7%		20,2%		16,8%		42,0%		45,0%	
CV (%)	82,5%		95,7%		85,9%		76,5%		78,9%		62,2%	
MAE (tf)	73±41		72±52		80±38		81±41		13±50		49±50	

Fonte: A Autora, 2022.

Figura 25- Obra 04: Resistência Lateral (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 25- Obra 04: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral para todos os métodos.

OBRA 04- RESISTÊNCIA LATERAL												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	1	7%	2	14%	1	7%	1	7%	1	7%	1	7%
$P_r < ECD$	13	93%	12	86%	13	93%	13	93%	13	93%	13	93%
Média Qrdc/QECD (%)	40,1%		38,1%		28,0%		35,8%		18,8%		33,2%	
Desvio Padrão (%)	38,8%		46,2%		28,6%		39,8%		26,4%		37,9%	
CV (%)	96,7%		121,2%		102,1%		111,4%		140,5%		114,1%	
MAE (tf)	65±38		69±37		71±39		68±36		75±38		69±37	

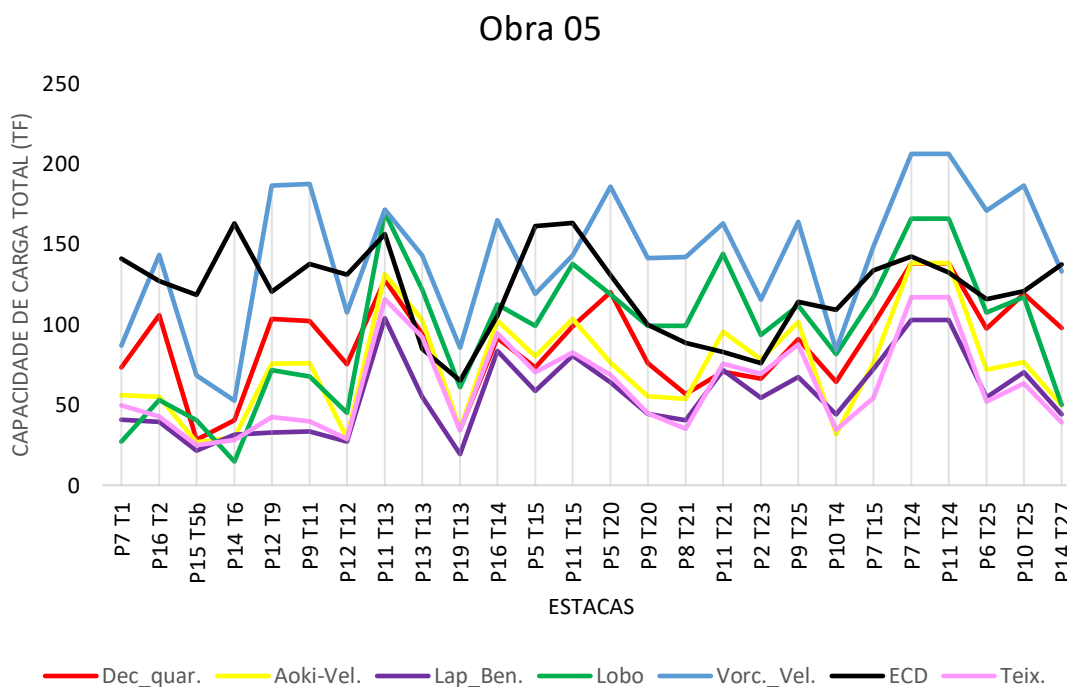
Fonte: A Autora, 2022

4.1.5 Obra 05

A obra 05 possui um total de 26 (vinte e seis) resultados de ECD, onde 14 estacas possuem seção quadrada com dimensões variando de 22 (vinte e dois) a 30 (trinta) centímetros e 12 seções hexagonal. O comprimento dessas estacas varia de 11 (onze) a 30 (trinta) metros, os laudos de sondagem SPT apresentam solos que variam entre argila siltosa e silte argiloso ao longo do fuste de todas as estacas, de modo geral é apresentado um solo com N_{spt} inferior a 10 (dez) ao longo do fuste.

A Figura 26 e a Tabela 26 apresentam os resultados para a capacidade de carga total, como é possível verificar pela Figura 26 não há nenhum método que siga os padrões propostos pelos resultados do ECD. Já a Tabela 26 apresenta como apesar de alguns métodos retornarem valores superiores ao ECD, ainda a média apresentada por esses fica baixa, apesar de Vorcaro-Velloso ser o método que mais retorna valores acima do ECD.

Figura 26- Obra 05: Capacidade de carga total (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 26- Obra 05: Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total, calculados para os seis métodos

OBRA 05- RESISTÊNCIA TOTAL												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorcaro.-Vel.	
P _r >ECD	2	8%	4	15%	0	0%	1	4%	8	31%	18	69%
P _r <ECD	24	92%	22	85%	26	100%	25	96%	18	69%	8	31%
Média Qr _{dc} /Q _{ECD} (%)	73,6%		64,0%		47,4%		53,0%		83,6%		122,6%	
Desvio Padrão (%)	21,5%		28,7%		19,8%		25,5%		39,1%		39,8%	
CV (%)	29,3%		44,8%		41,8%		48,2%		46,8%		32,5%	
MAE (tf)	35±30		50±34		65±31		60±35		41±38		47±24	

Fonte: A Autora, 2022.

Fonte: A Autora, 2022.

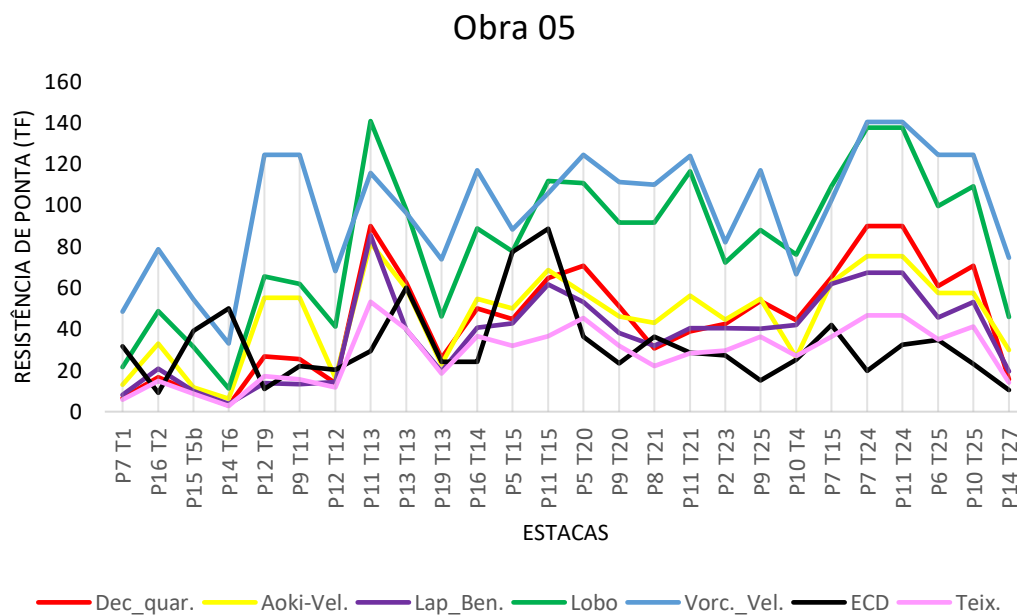
Tanto a Figura 27 quanto a Tabela 27, apresentam resultados referentes a capacidade de carga da ponta, demonstram como não há um método que se adeque mais a essa situação, com desvio padrão superior a 60%. Ainda quanto aos métodos Lobo e Vorcaro-Velloso são os que mais retornam valores acima dos apresentados pelo ECD, com médias superiores a 300%.

A Figura 28 com a Tabela 28 apresentam os resultados para a capacidade de carga lateral. É interessante observar que novamente os métodos são conservadores como aconteceu na obra anterior, com exceção da estaca P13 T13.

Novamente as estacas estão assentes em um solo argiloso com presença de silte, o que pode ser a causa dessa divergência. Contudo não a um motivo obvio do porquê à estaca P13 T13 apresentou uma capacidade de carga inferior ao obtido por alguns métodos, sendo que está estaca foi dimensionado junto com outras a partir do mesmo boletim de sondagem SPT.

Isso tudo reforça apenas que inicialmente nenhum método seria adequado a esta situação e que é preciso estudar mais a fundo as causas dessas divergências.

Figura 27- Obra 05: Resistência de Ponta (tf) X Estacas



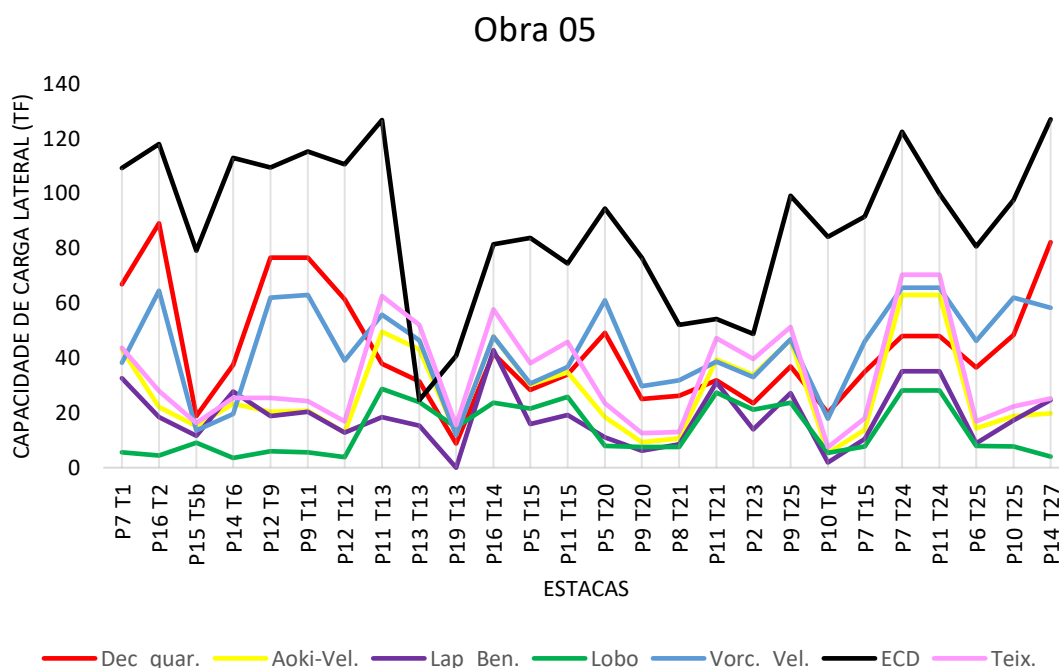
Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 27- Obra 05: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.

OBRA 05- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	19	73%	18	69%	16	62%	14	54%	23	25%	25	96%
$P_r < ECD$	7	27%	8	31%	10	38%	12	46%	3	75%	1	4%
Média Qrdc/QECD (%)	167,6%		187,8%		140,1%		108,1%		319,3%		412,6%	
Desvio Padrão (%)	107,1%		119,7%		84,2%		61,6%		174,1%		254,3%	
CV (%)	63,9%		63,8%		60,1%		57,0%		54,5%		61,6%	
MAE (tf)	26±19		25±15		21±14		16±14		54±31		68±34	

Fonte: A Autora, 2022.

Figura 28- Obra 05: Resistência Lateral (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 28- Obra 05: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral para todos os métodos.

OBRA 05- RESISTÊNCIA LATERAL												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	1	4%	1	4%	0	0%	1	8%	0	0%	1	4%
$P_r < ECD$	25	96%	25	96%	26	100%	12	92%	26	100%	25	96%
Média Qrdc/QECD (%)	49,4%		37,0%		22,3%		44,2%		20,0%		53,3%	
Desvio Padrão (%)	21,2%		33,4%		15,1%		39,9%		20,4%		31,0%	
CV (%)	43,0%		90,4%		67,8%		90,3%		101,8%		58,1%	
MAE (tf)	47±18		62±27		70±25		58±27		75±31		47±20	

Fonte: A Autora, 2022

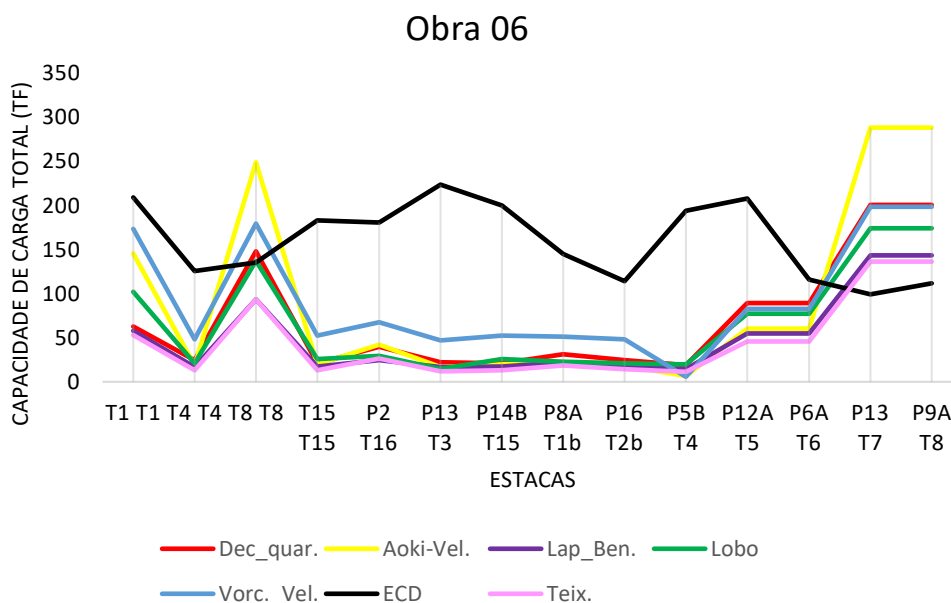
4.1.6 Obra 06

A obra 06 possui um total de 14 resultados de ECD. As estacas analisadas possuem seção quadrada com dimensões de 25 (vinte e cinco) centímetros. O comprimento dessas estacas varia de 7 (sete) a 15 (quinze) metros atravessando horizontes de argila com diferentes quantidades de silte e areia ao longo do fuste.

A Tabela 29 e a Figura 29 apresentam os resultados para a capacidade de carga total da obra 06. É possível observar que na maioria das estacas os valores obtidos pelos métodos são inferiores aos apresentados pelo ECD, contudo é

importante observar as parcelas de ponta e fuste separadamente para tentar entender o porquê dessa divergência.

Figura 29- Obra 06: Capacidade de carga total (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 29- Obra 06: Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total, calculados para os seis métodos

OBRA 06- RESISTÊNCIA TOTAL												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	3	21%	3	21%	2	14%	2	14%	3	21%	3	21%
$P_r < ECD$	11	79%	11	79%	12	86%	12	86%	11	79%	11	79%
Média Qrdc/QECD (%)	54,8%		70,3%		38,1%		35,0%		49,7%		66,9%	
Desvio Padrão (%)	62,1%		94,7%		43,6%		42,2%		53,9%		58,5%	
CV (%)	113,2%		134,8%		114,5%		120,5%		108,4%		87,5%	
MAE (tf)	118±53		139±46		122±56		124±59		114±55		101±47	

Fonte: A Autora, 2022.

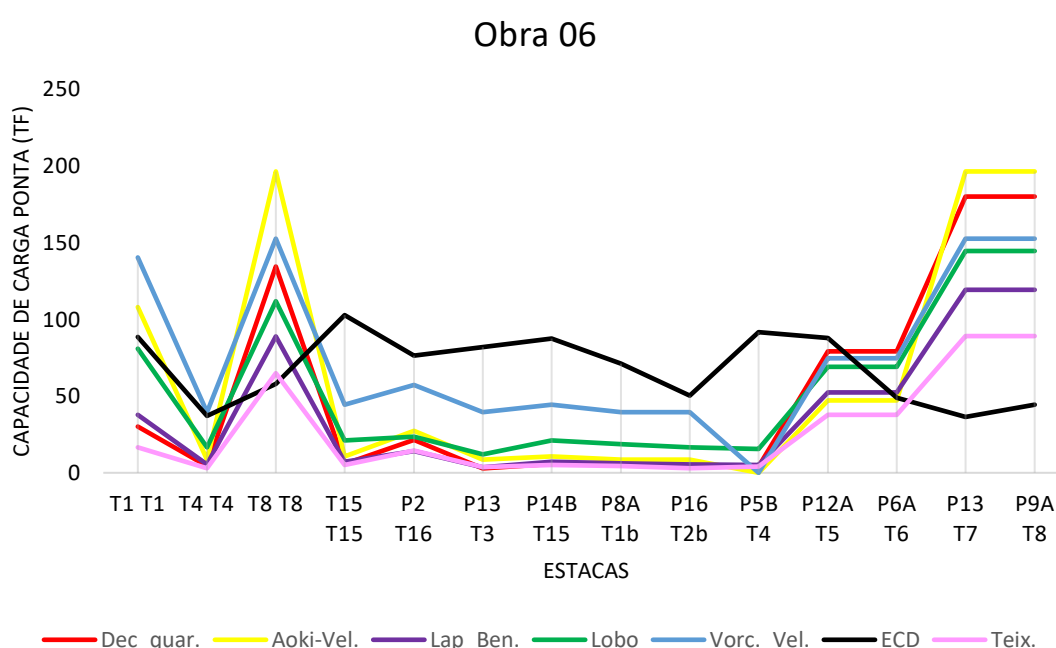
A Figura 30 e a Tabela 30 apresentam os resultados para capacidade de carga da ponta, a tabela apresenta as considerações numericamente, contudo a figura ilustra bem como o comportamento obtido pelos métodos tende a divergir consideravelmente do obtido com o ECD. Tomando as estacas T8T8, P13T7 e P9AT8 como exemplo, em alguns métodos a diferença entre ECD e método é de 150tf.

Já a Tabela 31 e a Figura 31, resultados para a capacidade de carga lateral, demonstram como todos os métodos são conservadores em relação as estacas da obra

06, o que é demonstrado pelos valores baixos das médias na tabela, e a diferença gráfica para quase todas as estacas na Figura 31. Sendo novamente as mesmas três estacas que possuem o comportamento mais divergente das demais.

Nesta obra não é possível apontar causas para as divergências sem um estudo mais aprofundado, já que todas as estacas possuem a mesma seção, comprimentos variáveis e estão assentes em um solo não homogêneo. Isso também dificulta que um método seja escolhido como mais representativo.

Figura 30- Obra 06: Resistência de Ponta (tf) X Estacas



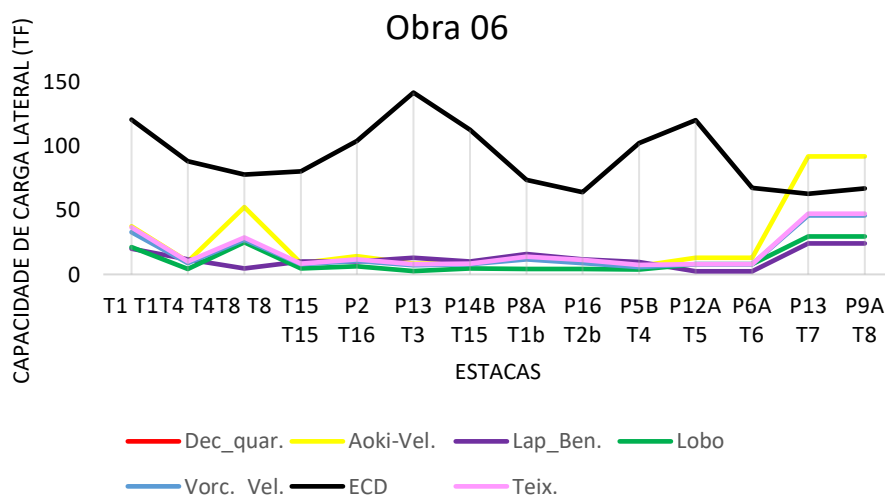
Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 30- Obra 06: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.

OBRA 06- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	4	29%	4	29%	4	29%	3	21%	4	29%	6	43%
$P_r < ECD$	10	71%	10	71%	10	71%	11	79%	10	71%	8	57%
Média Q _{rdc} /Q _{ECD} (%)	106,6%		122,4%		74,1%		53,9%		102,6%		134,3%	
Desvio Padrão (%)	155,6%		173,3%		101,3%		75,9%		117,6%		119,1%	
CV (%)	146,0%		141,6%		136,8%		140,8%		114,6%		88,7%	
MAE (tf)	71±37		73±47		59±26		57±26		55±30		51±37	

Fonte: A Autora, 2022.

Figura 31- Obra 06: Resistência Lateral (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 31- Obra 06: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral para todos os métodos.

OBRA 06- RESISTÊNCIA LATERAL												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	2	14%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
$P_r < ECD$	14	100%	12	86%	14	100%	14	100%	14	100%	14	100%
Média Qrdc/QECD (%)	21,4%		35,9%		14,6%		22,9%		14,2%		21,4%	
Desvio Padrão (%)	8,5%		45,8%		10,6%		22,2%		14,8%		21,7%	
CV (%)	39,5%		127,5%		72,4%		97,0%		104,3%		101,6%	
MAE (tf)	73±25		72±32		80±27		73±32		80±29		21±32	

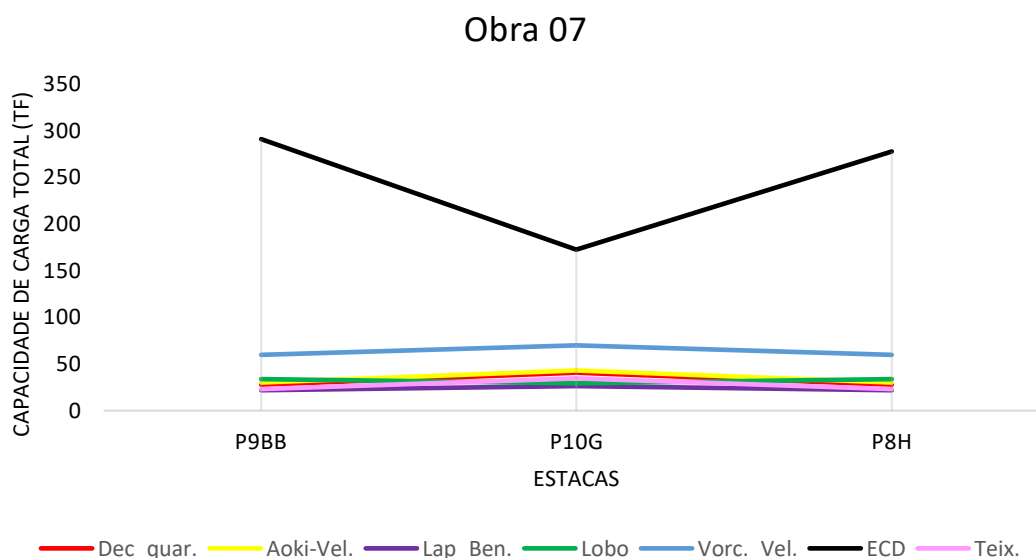
Fonte: A Autora, 2022

4.1.7 Obra 07

A obra 07 possui um total de 3 resultados de ECD, de seção quadrada com dimensões variando de 22 (vinte e dois) a 30 (trinta) centímetros. Todas as estacas têm 9 (nove) metros de comprimento, e o perfil do solo é composto por argila com diferentes composições de silte e areia.

Nesse caso a amostra é pequena, mas a partir do que é apresentado pela Figura 32 e pela Tabela 32 vê-se que a estaca que diverge é a P10G, as outras duas possuem resultados distantes entre ECD e método, mas poderiam ter seus resultados adequados com um coeficiente numérico. Contudo, a P10G com esse mesmo coeficiente não retornaria um valor adequado, o que levanta questionamentos sobre a causa desse comportamento.

Figura 32- Obra 07: Capacidade de carga total (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 32- Obra 07: Coeficientes de dispersão da capacidade de carga total, calculados para os seis métodos

OBRA 07- RESISTÊNCIA TOTAL												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
$P_r < ECD$	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%
Média Qrdc/QECD (%)	14,4%		15,4%		10,2%		12,1%		13,6%		27,6%	
Desvio Padrão (%)	6,5%		6,8%		3,6%		5,6%		2,4%		9,2%	
CV (%)	45,2%		43,9%		34,8%		46,3%		17,8%		33,4%	
MAE (tf)	215±59		212±59		223±55		220±58		215±51		184±58	

Fonte: A Autora, 2022.

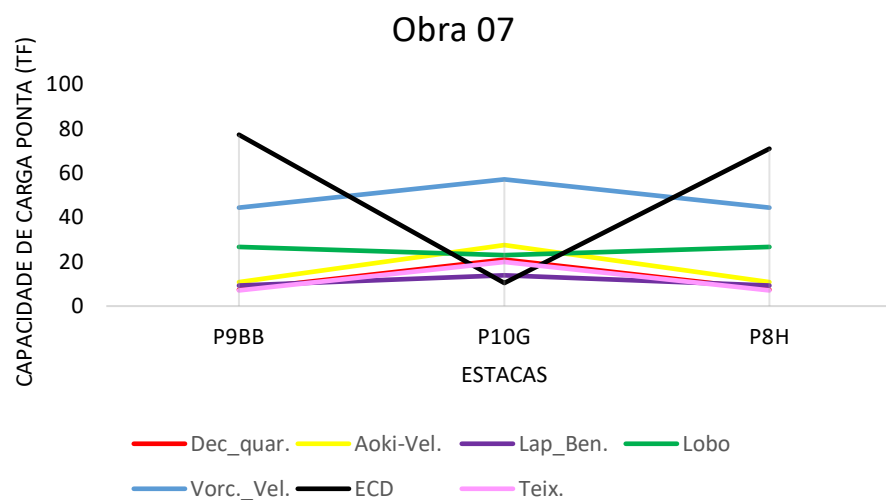
Tabela 33 e a Figura 33 apresentam os resultados para a capacidade de carga de ponta das estacas da obra 07, e confirmam o que foi verificado para a capacidade de carga total. Que enquanto para duas estacas seria possível definir um coeficiente de ajuste para a terceira por algum motivo não seria adequado, pelo menos não com apenas um simples coeficiente de ajuste comum as três.

Tanto a Tabela 34 quanto a Figura 34, responsáveis por apresentar os resultados para capacidade de carga lateral, mostram o quanto a resistência lateral é consideravelmente inferior pelos métodos em relação ao ECD.

Como a amostra é de apenas três estacas e todos os métodos tendem a apresentar o mesmo comportamento, que não se adequa as três estacas estudadas

simultaneamente, não é possível eleger um método que melhor represente essa situação.

Figura 33- Obra 07: Resistência de Ponta (tf) X Estacas



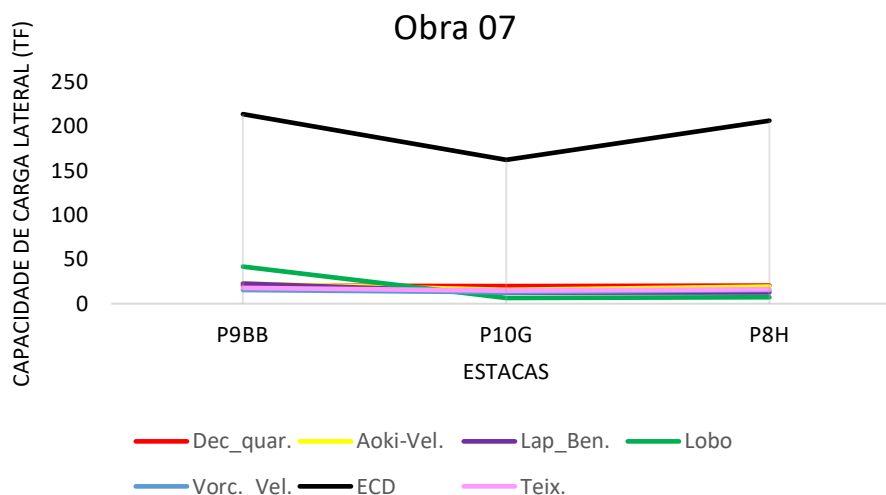
Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 33- Obra 07: Coeficientes de dispersão em relação a resistência de ponta, calculados para os seis métodos.

OBRA 07- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%
$P_r < ECD$	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%
Média Qrdc/QECD (%)	73,8%		97,9%		52,8%		70,1%		97,6%		223,0%	
Desvio Padrão (%)	90,2%		117,7%		57,0%		85,6%		87,0%		230,5%	
CV (%)	122,2%		120,3%		107,9%		122,1%		89,2%		103,4%	
MAE (tf)	48±27		48±22		44±29		48±27		36±17		35±8	

Fonte: A Autora, 2022.

Figura 34- Obra 07: Resistência Lateral (tf) X Estacas



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 34- Obra 07: Coeficientes de dispersão em relação a resistência lateral para todos os métodos.

OBRA 07- RESISTÊNCIA LATERAL												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
$P_r < ECD$	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%
Média Qrdc/QECD (%)	10,6%		9,9%		8,2%		8,4%		9,0%		7,5%	
Desvio Padrão (%)	1,2%		0,5%		1,9%		0,5%		7,5%		0,3%	
CV (%)	11,1%		5,3%		22,8%		6,3%		83,2%		3,9%	
MAE (tf)	178±23		175±20		178±20		178±22		176±18		179±22	

Fonte: A Autora, 2022

4.2 ANÁLISE DE ACORDO COM O TIPO DE SOLO DA PONTA DA ESTACA

Um dos objetivos deste trabalho é o estudo de um possível coeficiente de adequação, dessa forma é preciso se agrupar as variáveis para prosseguir com os estudos.

Como é lembrado por Moreira (2021) em seu trabalho, os métodos semiempíricos carregam em si relações derivadas dos solos que lhes deram origem, e sempre que eles vão ser aplicados a novas regiões, devem passar por averiguações e adequações. O autor ainda apresenta que as obras que são estudadas em seu trabalho pertencem a formação Ponta Grossa e ao grupo Itararé. Com as adequações já citadas anteriormente o grupo de dados pertencentes ao grupo Itararé foi retirado,

era o grupo de estacas metálicas, e agora o grupo de dados acrescido neste trabalho pertence a formação Ponta Grossa, assim todos os dados estudados neste trabalho pertencem a essa formação.

Como todos os dados pertencem a mesma formação geológica a partir desse ponto os dados serão analisados em conjunto, contudo ainda é importante definir uma variável que dará prosseguimento as pesquisas realizadas.

Dentre os muitos fatores apontados por Moreira (2021), que podem causar divergências entre os resultados fornecidos pelos métodos e pelo ECD, um deles é o solo na ponta das estacas. Dessa forma essa vai ser a variável adotada para as análises feitas a seguir, o tipo de solo na ponta das estacas, que são responsáveis pela obtenção de coeficientes tabelados em muitos métodos aqui estudados. Como será observado apenas a contribuição dos solos das pontas das estacas neste item, não serão mais apresentados os valores obtidos para a capacidade de carga total e lateral.

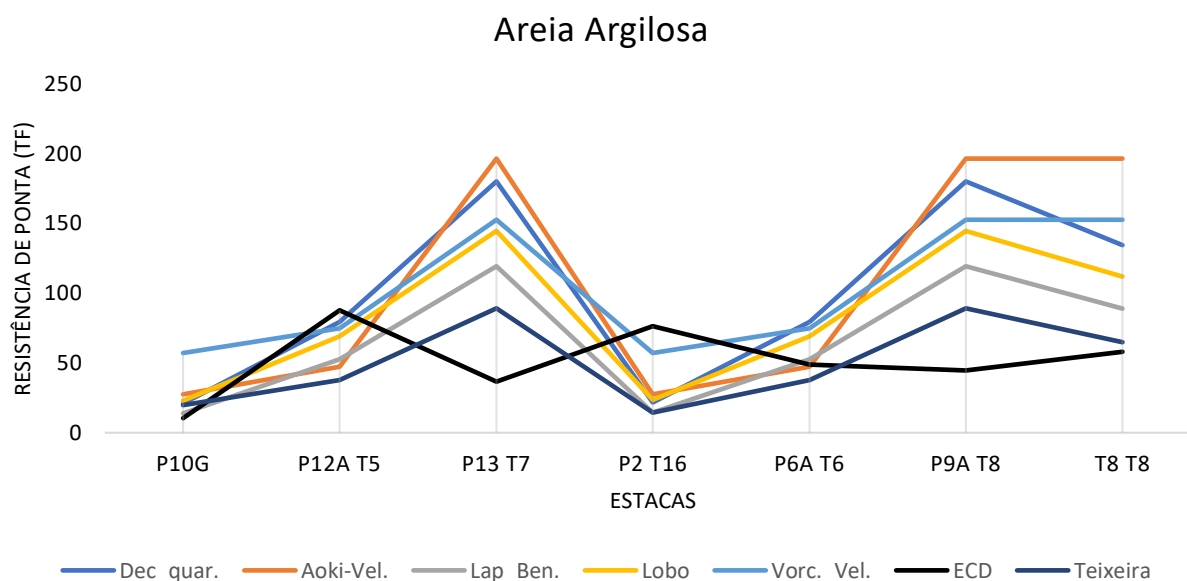
4.2.1 Areia Argilosa

Este conjunto é composto por 7 resultados de ensaio de carregamento dinâmico, as estacas que o compõem possuem seções quadradas e com a profundidade variando de 7 (sete) a 10 (dez) metros.

A Figura 35 e a Tabela 35 apresenta os resultados obtidos quando as estacas são agrupadas quanto ao tipo de solo para areia argilosa. Como é possível ver na Figura 35 em algumas estacas os valores obtidos pelo método ficam próximos aos obtidos pelo ECD e em outras há uma grande divergência. E ainda o comportamento criado pelo ECD não é próximo de nenhum observado pelos métodos, sendo que os métodos têm quase todos o mesmo comportamento. A grande variação que acontece é confirmada na Tabela 35 pelo desvio padrão que é superior a 70%.

Por todos os motivos citados, para esse solo não é adequado eleger um método como seu representante.

Figura 35- Ponta da estaca em Areia Argilosa: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 35- Estaca com ponta em solo tipo areia siltosa: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.

AREIA ARGILOSA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	5	71%	4	57%	5	71%	4	57%	5	71%	5	71%
$P_r < ECD$	2	29%	3	43%	2	29%	3	43%	2	29%	2	29%
Média Qrdc/QECD (%)	230,4%		252,9%		152,6%		126,7%		198,1%		269,6%	
Desvio Padrão (%)	153,9%		183,7%		102,0%		79,9%		120,4%		165,3%	
CV (%)	66,8%		72,6%		66,8%		63,1%		60,8%		61,3%	
MAE tf	66±52		80±63		42±30		34±22		52±36		86±32	

Fonte: A Autora, 2022.

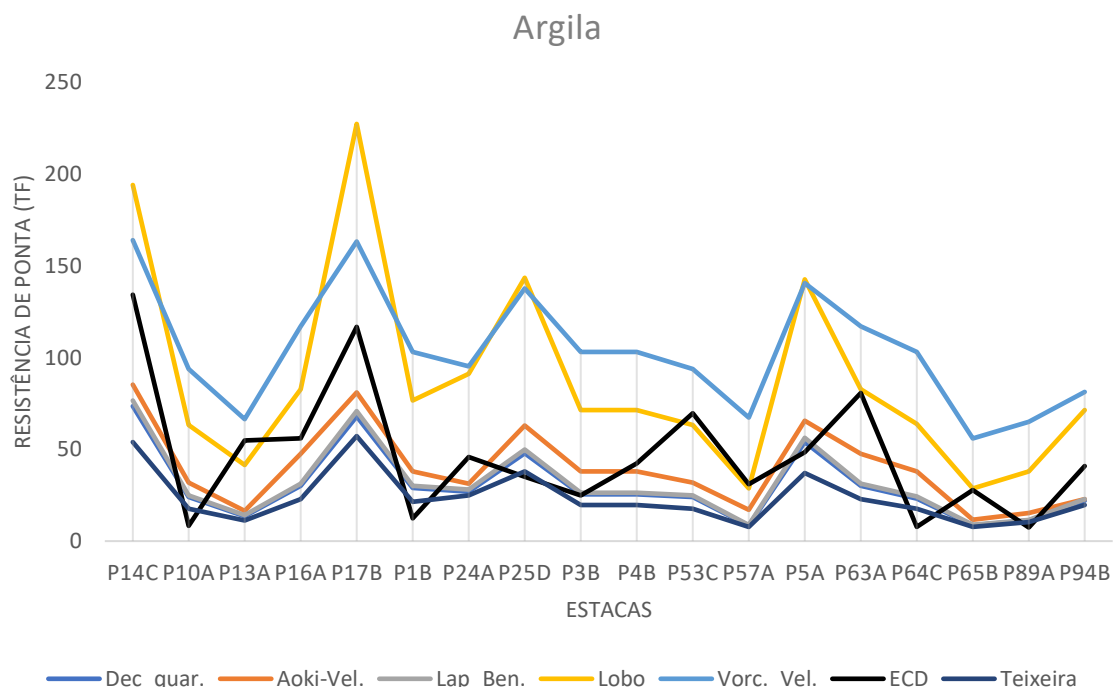
4.2.2 Argila

Esse conjunto é composto por 18 resultados de ECD, sendo que as estacas agrupadas aqui pertencem as obras 01 e 02, com seções quadradas e com a profundidade variando de 8 (oito) a 11 (onze) metros.

A Tabela 36 e a Figura 36 apresentam os resultados para o solo de ponta tipo argila. Como é possível observar, na Figura 36, ao contrário do caso anterior para algumas estacas os métodos tendem a representar o que acontece com o ECD. Contudo, pela Tabela 36 é possível verificar que o desvio padrão ainda é alto e a

maioria dos métodos possui um comportamento semelhante o que torna impróprio a adoção de apenas um como o mais representativo.

Figura 36- Ponta da estaca em Argila: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 36- Estaca com ponta em solo tipo argila: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.

ARGILA- PONTA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	7	39%	7	39%	7	39%	5	29%	15	83%	18	100%
$P_r < ECD$	11	61%	11	61%	11	61%	12	71%	3	17%	0	0%
Média Qrdc/QECD (%)	100,9%		139,8%		105,1%		81,2%		288,9%		399,7%	
Desvio Padrão (%)	85,8%		126,3%		89,3%		65,1%		230,7%		363,0%	
CV (%)	85,0%		90,4%		85,0%		80,2%		79,8%		90,8%	
MAE (tf)	24±27		23±12		24±16		24±19		43±34		57±27	

Fonte: A Autora, 2022.

4.2.3 Argila Siltoarenosa

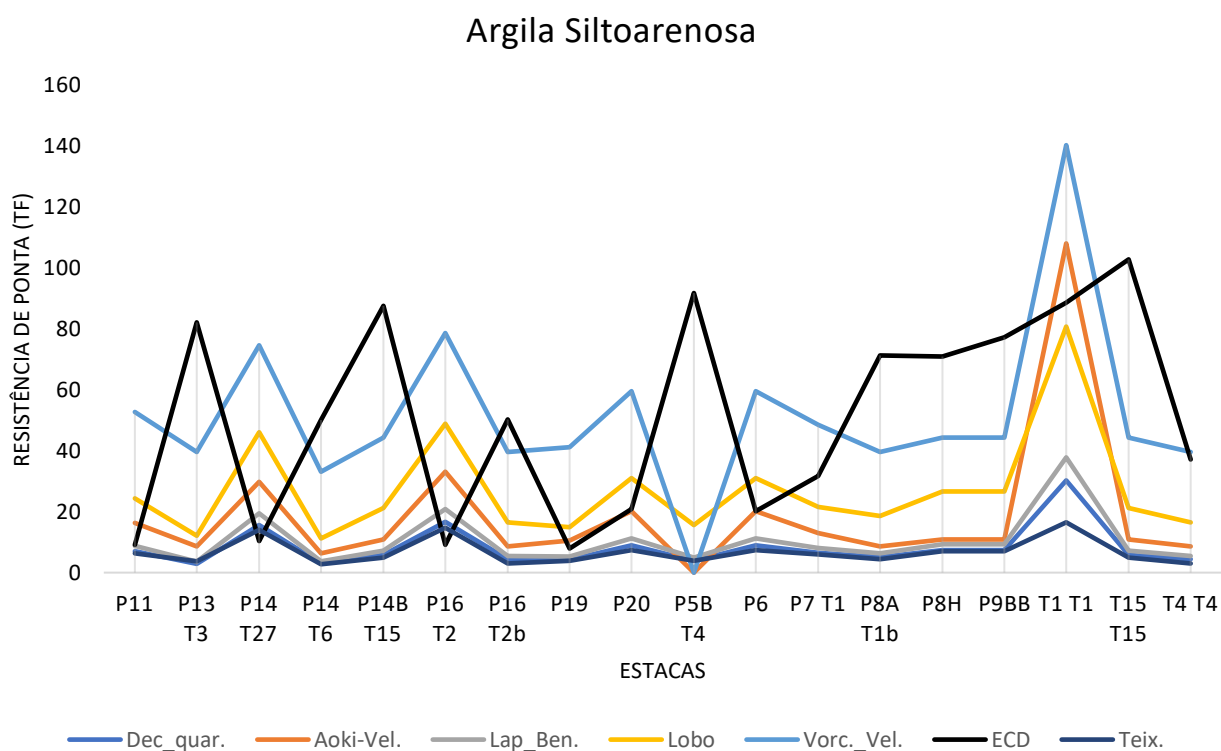
Esse conjunto é composto por 18 resultados de ECD, as estacas possuem seções quadradas e hexagonais e sua profundidade variando de 9 (nove) a 30 (trinta) metros.

Para esse tipo de solo nenhum método chega a oferecer valores satisfatórios, sendo que a Figura 37 e a Tabela 37 apresentam os resultados obtidos para a ponta.

Com o auxílio da Figura 37 é possível verificar que em certas estacas o comportamento apresentado pelos métodos é consideravelmente divergente ao observado pelo ECD, e ainda, a Tabela 37 confirma essa divergência com valores consideravelmente altos de desvio padrão e de coeficientes de variação.

Como todos os métodos apresentam a mesma tendência, que diverge em algumas situações da apresentada pelo ECD, e isso ocorre em um número considerável de amostras, é possível supor que há alguma variável que precisa ser considerada em todos os métodos em análise, contudo, essa variável não pode ser identificada apenas com uma análise inicial.

Figura 37- Ponta da estaca em Argila Siltoarenosa: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 37- Estaca com ponta em solo tipo Argila Siltoarenosa: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.

ARGILA SILTOARENOSA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	2	11%	5	28%	2	11%	2	11%	6	33%	9	50%
$P_r < ECD$	16	89%	13	72%	16	89%	16	89%	12	67%	9	50%
Média Qrdc/QECD (%)	37,7%		80,4%		47,1%		32,8%		120,5%		230,1%	
Desvio Padrão (%)	50,1%		101,3%		62,7%		44,9%		148,1%		254,9%	
CV (%)	133,0%		125,9%		133,0%		136,8%		122,9%		110,8%	
MAE (tf)	44±32		41±31		43±31		45±5		37±24		40±22	

Fonte: A Autora, 2022.

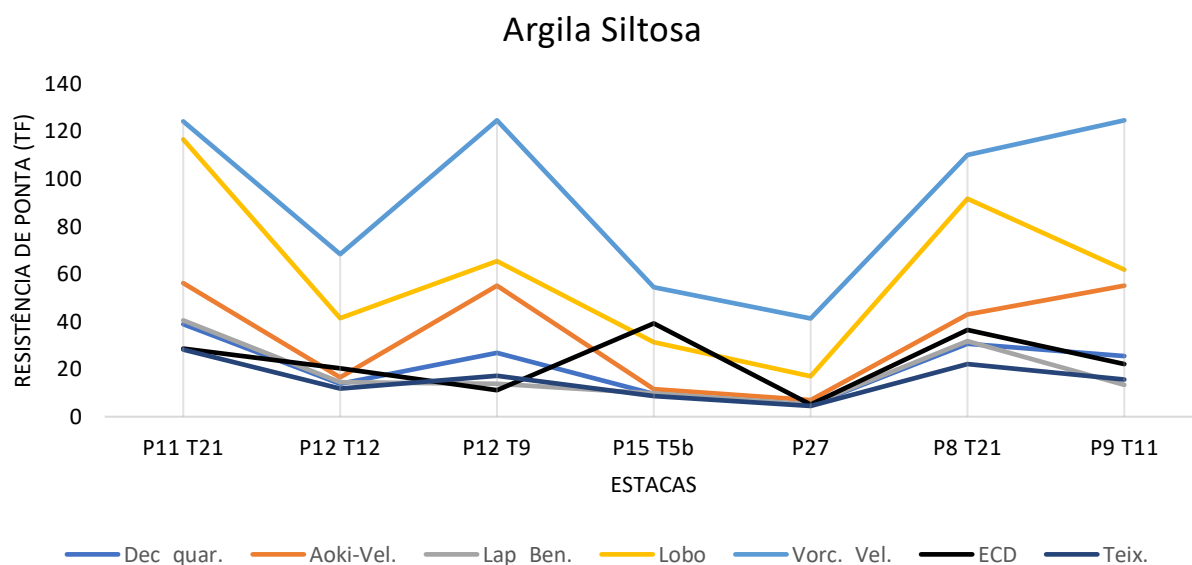
4.2.4 Argila Siltosa

Esse conjunto é composto por 7 estacas, com seções quadradas e hexagonais e com a profundidade variando de 9 (nove) a 29 (vinte e nove) metros, sendo que as estacas fazem parte das obras 3 e 5.

Os resultados obtidos para a ponta em solo tipo argila siltosa são apresentados na Figura 38 e na Tabela 38. A partir da Figura 38 é possível observar que com exceção das estacas P12 T9 e P15 T5b, as demais estacas tendem a retornar valores pelos métodos com comportamento próximo ao observado pelo ECD, tanto valores superiores quanto inferiores. Os valores observados na Tabela 38 sofrem influência do que ocorre nestas duas estacas.

Não é possível concluir qual a causa da divergência observada, sendo que a estaca P12 T9 tem seção hexagonal com 29 metros de comprimento enquanto a P15 T5b seção quadrada com 14 metros. As estacas analisadas aqui fazem parte da obra 05 (exceto P27 que faz parte da obra 03) e existem dentre as demais, estacas com as mesmas características apresentadas por estas, assim sem um fator claro que possa ser apontado como a causa do comportamento de ambas as estacas.

Figura 38- Ponta da estaca em Argila Siltosa: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 38- Estaca com ponta em solo tipo argila siltosa: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.

ARGILA SILTOSA- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	3	43%	5	71%	3	43%	1	14%	6	86%	7	100%
$P_r < ECD$	4	57%	2	29%	4	57%	6	86%	1	14%	0	0%
Média Qrdc/QECD (%)	109,4%		187,1%		87,4%		79,1%		306,7%		529,5%	
Desvio Padrão (%)	63,5%		143,7%		36,9%		38,4%		150,5%		313,1%	
CV (%)	58,0%		76,8%		42,2%		48,6%		49,1%		59,1%	
MAE (tf)	10±9		21±15		9±9		10±10		51±30		69±34	

Fonte: A Autora, 2022.

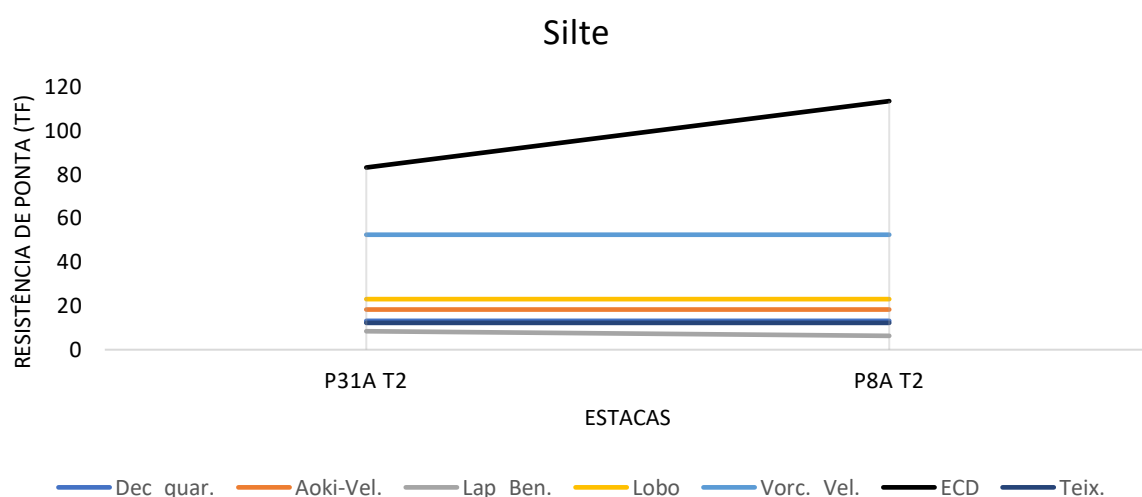
4.2.5 Silte

Esse conjunto é composto por 2 resultados de ECD, as estacas possuem seções quadradas de 30 centímetros com a profundidade de 9 (metros), ambas fazem parte da obra 04 e foram dimensionadas com o mesmo boletim de sondagem SPT.

A Figura 39 ilustra o quão subestimadas são as resistências para as estacas assentes em silte. Já a Tabela 39 retorna valores de coeficiente de variação baixos e médias também baixas o que confirma o observado na Figura 39.

Ainda na Figura 39 é interessante observar que todos os métodos retornam uma reta horizontal, o que é esperado já que ambas possuem as mesmas variáveis para dimensionamento, enquanto o valor obtido pelo ECD uma reta crescente, o que levanta a questão de qual variável ainda precisa ser observada, para que esse comportamento possa ser representado pelos métodos semiempíricos.

Figura 39- Ponta da estaca em Silte: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 39- Estaca com ponta em solo tipo Silte: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.

SILTE- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
$P_r < ECD$	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%
Média Qrdc/QECD (%)	13,7%		19,1%		7,8%		12,8%		24,0%		54,7%	
Desvio Padrão (%)	2,1%		2,9%		2,3%		2,0%		3,7%		8,4%	
CV (%)	15,4%		15,4%		29,1%		15,4%		15,4%		15,4%	
MAE (tf)	85±15		80±15		91±16		86±15		75±15		46±15	

Fonte: A Autora, 2022.

4.2.6 Silte Arenoso

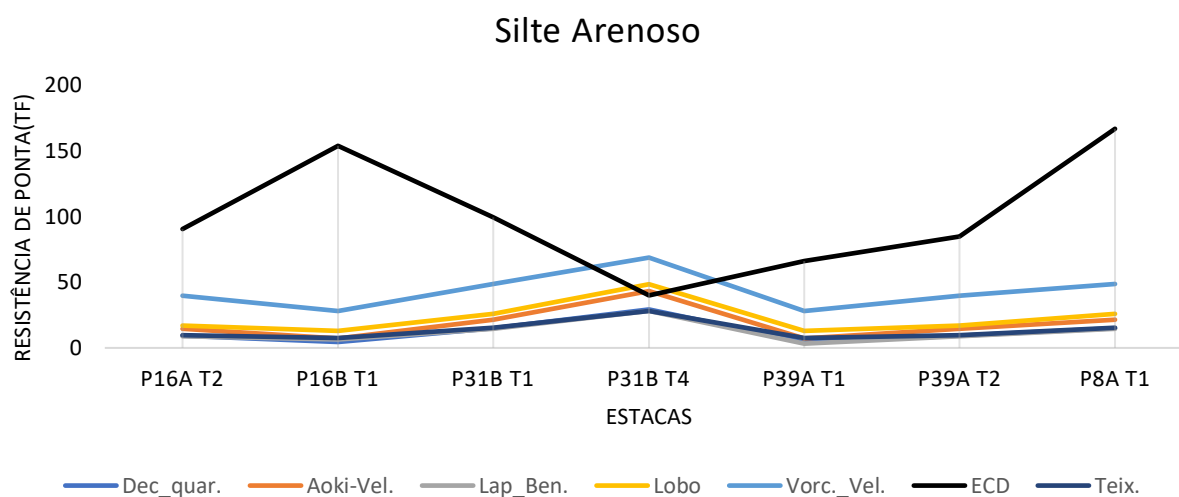
Esse conjunto é composto por 7 estacas, com seções quadradas, todas com 30 centímetros, e com a profundidade variando de 9 (nove) a 11 (onze) metros, todas pertencentes a obra 04.

A Figura 40 e a Tabela 40 apresentam os resultados obtidos para o solo da ponta tipo silte arenoso. Através da Figura 40 é possível observar que os métodos tendem a retornar valores inferiores em relação ao observado pelo ECD, o que é confirmado pela Tabela 40 que apresenta médias inferiores a 60% com um desvio padrão relativamente baixo.

Contudo, observando a Figura 40 vê-se que apesar de todos os métodos seguirem a mesma tendência, os valores obtidos pelo ECD tendem a ser opostos, e isso é mais visível nas estacas P16B T1 e P31B T4, contudo, não há como com apenas uma análise inicial apontar a causa disso.

Como todos os métodos apresentam valores muito similares não é possível indicar qual seria o método mais adequado.

Figura 40- Ponta da estaca em Silte arenoso: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 40- Estaca com ponta em solo tipo Silte Arenoso: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.

SILTE ARENOSO												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	0	0%	1	14%	0	0%	0	0%	1	14%	1	14%
$P_r < ECD$	7	100%	6	86%	7	100%	7	100%	6	86%	6	86%
Média Qrdc/QECD (%)	18,4%		27,4%		17,6%		19,0%		32,8%		57,4%	
Desvio Padrão (%)	22,7%		33,4%		21,8%		21,1%		36,5%		47,9%	
CV (%)	123,4%		122,0%		123,6%		111,1%		111,0%		83,5%	
MAE (tf)	88±37		83±46		88±45		87±45		80±44		65±37	

Fonte: A Autora, 2022.

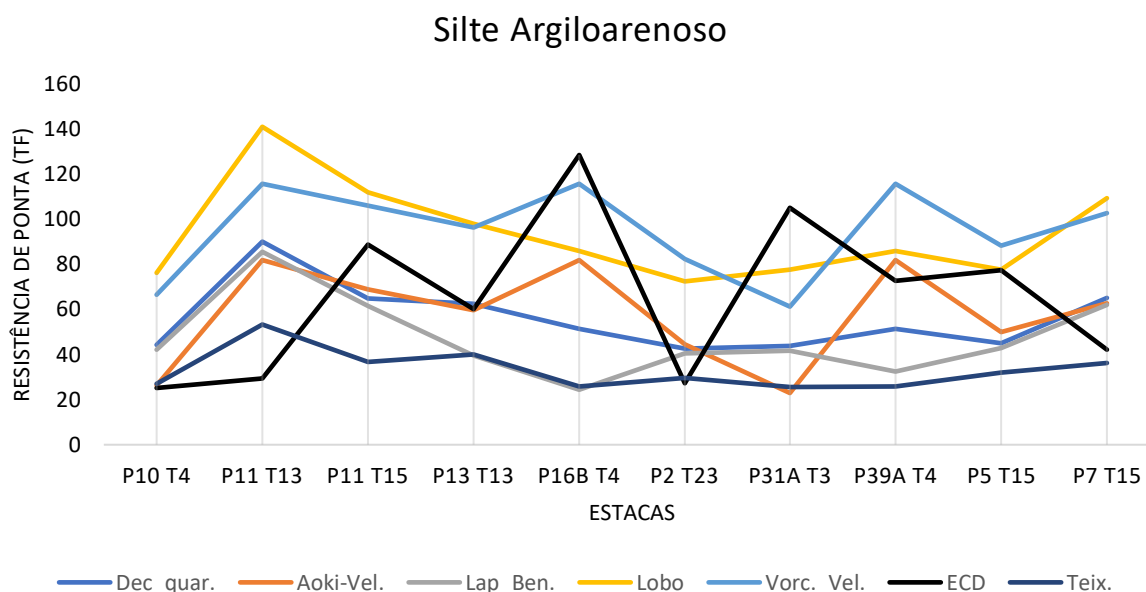
4.2.7 Silte Argiloarenoso

Esse conjunto é composto por 10 estacas, com seções quadradas e hexagonais e com a profundidade variando de 7 (sete) a 16 (dezesesseis) metros, as estacas pertencem as obras 04 e 05.

A Figura 41 e a Tabela 41 apresentam os resultados para as estacas com ponta assente em silte argiloarenoso. A Figura 41 ilustra como apesar dos valores obtidos pelos métodos estarem próximos dos encontrados no ECD, as retas formadas por esses valores não seguem a mesma tendência apresentada pela reta formada pelo ECD na maioria das situações. Essa falta de relação clara entre os métodos e os valores do ECD é confirmado pela Tabela 41 que apresenta valores para desvio padrão e coeficiente de variação consideravelmente altos.

Como essas divergências não acontecem em estacas isoladas, torna-se difícil definir a causa disso, e como nenhum método apresenta uma tendência parecida com o que ocorre aos valores do ECD, não há como eleger um método como mais representativo.

Figura 41- Ponta da estaca em Silte Argiloarenoso: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 41- Estaca com ponta em solo tipo Silte Argiloarenoso: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.

SILTE ARGILOARENOSO- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	5	50%	5	50%	4	40%	3	30%	8	80%	8	80%
$P_r < ECD$	5	50%	5	50%	6	60%	7	70%	2	20%	2	20%
Média Qrdc/QECD (%)	118,1%		113,4%		104,7%		71,3%		195,5%		190,4%	
Desvio Padrão (%)	78,4%		67,6%		79,1%		47,8%		123,7%		101,1%	
CV (%)	66,4%		59,6%		75,6%		67,1%		63,3%		53,1%	
MAE (tf)	34±23		28±24		40±27		38±32		42±30		41±22	

Fonte: A Autora, 2022.

4.2.8 Silte Argiloso

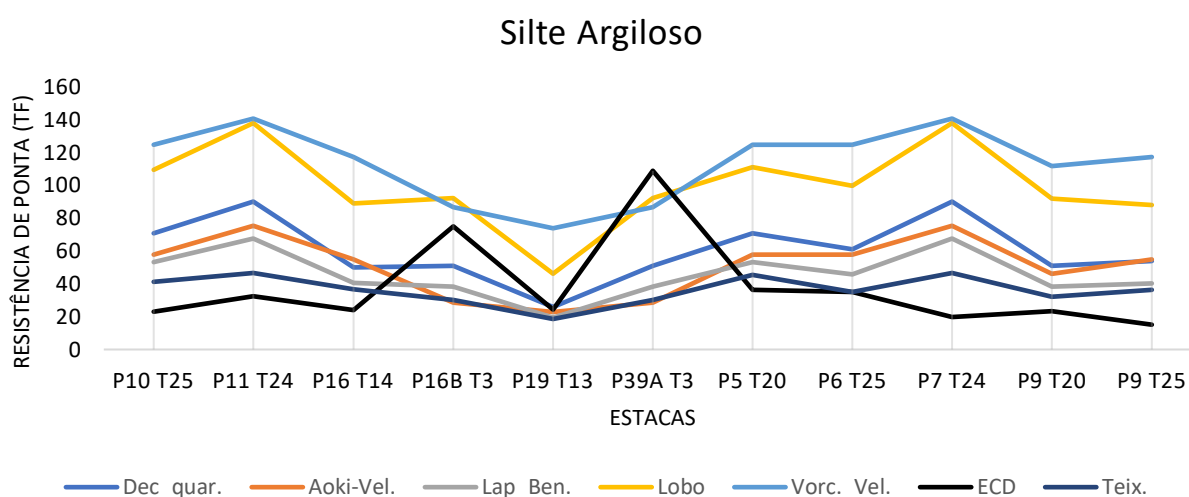
Esse conjunto é composto por 11 estacas, com seções quadradas e hexagonais e com a profundidade variando de 7 (sete) a 16 (dezesesseis) metros.

A Figura 42 e a Tabela 42 apresentam os resultados para as estacas assentes em silte argiloso. A Tabela 42 com seus altos valores de desvio padrão e a Figura 42 com os métodos apresentando o mesmo comportamento e com valores muito próximos entre si, torna difícil definir um método como o mais representativo.

Porém é interessante observar que na Figura 42 até à estaca P39A T3, mesmo que distantes, os valores obtidos pelos métodos retornavam valores com o mesmo comportamento do observado pelo ECD, valores esses que poderiam ser corrigidos com um ajuste numérico. Contudo a partir dessa estaca os valores obtidos passam a ter comportamento contrário ao observado no ECD.

Com uma análise inicial não é possível definir a causa disso, sendo que dentre essas 5 estacas todas pertencem a obra 05 e tem-se tanto seções quadradas quanto hexagonais, comprimentos de 11 a 13 metros com a ponta abaixo do nível d'água e uma composição dos solos similar a outras que fazem parte da mesma obra.

Figura 42- Ponta da estaca em Silte Argiloso: Gráfico para comparação entre valores obtidos através do ECD e do dimensionamento pelos seis métodos considerando apenas a resistência de ponta.



Fonte: A Autora, 2022

Tabela 42- Estaca com ponta em solo tipo silte argiloso: Coeficientes de dispersão para os seis métodos em torno dos valores do ECD considerando apenas a resistência de ponta.

SILTE ARGILOSO- RESISTÊNCIA DE PONTA												
Métodos	Dec.- Quar.		Aoki- Vell.		Lap.-Ben.		Teixeira		Lobo		Vorc. -Vel.	
$P_r > ECD$	9	82%	8	73%	8	73%	8	73%	10	91%	10	91%
$P_r < ECD$	2	18%	3	27%	3	27%	3	27%	1	9%	1	9%
Média Qrdc/QECD (%)	219,4%		193,9%		165,7%		132,5%		357,2%		420,3%	
Desvio Padrão (%)	118,2%		110,3%		88,6%		66,5%		178,7%		205,7%	
CV (%)	53,9%		56,9%		53,5%		50,2%		50,0%		49,0%	
MAE (tf)	37±19		36±20		28±18		22±21		65±32		80±34	

Fonte: A Autora, 2022.

4.3 DISCUSSÃO SOBRE MÉTODOS A SEREM ADAPTADOS

Neste trabalho foram apresentadas análises agrupando o banco de dados disponível em duas situações: quanto a obra a qual pertencem e quanto ao tipo de solo na ponta da estaca.

Quanto a obra a qual pertencem foi possível observar que o método de Lobo tende a retornar valores mais próximos aos obtidos pelo ECD para a capacidade de carga total, no entanto, quando as parcelas de fuste e ponta são observadas separadamente esse método tende a retornar valores inferiores ao ECD para o fuste, enquanto retorna valores superiores para a ponta, o que no somatório final acaba sendo compensado e gerando valores próximos para a capacidade de carga total.

Outro ponto é que dentre os seis métodos analisados Vorcaro-Velloso é o que mais tende a retornar valores acima do ECD, enquanto os outros quatro métodos tendem a ser mais conservadores.

Agora quanto ao tipo de solo da ponta os métodos de Vorcaro-Velloso e Lobo são os que tendem a ser menos conservadores. Contudo para um certo tipo de solo todos os métodos são conservadores, o silte puro, porém esse não é um dado confiável já que a amostra é muito pequena.

Ainda quanto ao tipo de solo, para o silte arenoso todos os métodos se mantem conservadores (exceto estaca P31B T4 como comentado), já para o silte argiloarenoso e argiloso tanto são conservadores quanto não. Os demais solos não retornam um padrão conservador ou não. Mas o fato é que todos os solos, tirando o silte puro e o silte arenoso, possuem alguma parcela de argila e são os que não possuem um comportamento bem definido. Isso leva ao questionamento de como são influenciados por essa parcela de argila, contudo as respostas a esse questionamento não são, em um primeiro momento, o alvo deste trabalho.

Com as informações citadas acima pode-se ver que não há simplesmente um método, que seja mais adequado a situação apresentada pelas estacas pertencentes ao banco de dados. Assim o método a ser estudado a seguir será definido de acordo com aquele que melhor se enquadra na proposta do trabalho. As formulações utilizadas para cada método são lembradas na Tabela 43.

Tabela 43- Resumo das formulações utilizadas para o cálculo da capacidade de carga de ponta e lateral de cada método.

Método	Ponta	Fuste
Decourt-Quaresma	$\alpha C N_p A_p$	$\beta \left(\frac{N_1}{3} + 1 \right) UL$
Aoki- Velloso	$\frac{K N_p}{F_1} A_p$	$\frac{U}{F_2} \sum_1^n (\alpha K N_L \Delta_L)$
Teixeira	$\alpha N_p A_p$	$\beta N_L UL$
Laprovitera-Benegas	$A_p \cdot \frac{K \cdot \bar{N}_p}{F_1}$	$\sum U \cdot \Delta L \cdot \frac{\alpha \cdot K \cdot \bar{N}_L}{F_2}$
Lobo	$\beta 0,7 F_d \frac{A_p}{a_p}$	$\alpha \frac{0,2 U}{a_l} \sum F_d \Delta L$
Vorcaro-Velloso*	$XP = AN_{ponta}$	$XF = U \sum N_{fuste} \Delta l$

*Vorcaro-Velloso possui essas formulações inicialmente, mas para a finalização do dimensionamento ainda há outras formulações, como apresentado no item 2.4.6.

Fonte: Adaptado de: CINTRA E AOKI (2010); LAPROVITERA (1988); LOBO (2005); VELLOSO e LOPES (2010)

O método de Vorcaro- Velloso é um método relativamente complexo que foi definido a partir de uma regressão linear múltipla, assim não é o mais adequado para os estudos iniciais propostos aqui.

O método de Lobo apesar de retornar valores interessantes em algumas situações apresenta dois pontos a serem considerados neste trabalho. O primeiro sendo que o método utiliza valores obtidos através dos boletins de sondagens SPT em duas situações, o N_{spt} que todos os métodos utilizam, e também, para o cálculo da força de reação dinâmica do solo.

O ideal para o cálculo da força é ter os valores averiguados durante a execução do ensaio SPT, mas o banco de dados disponível não possui esses valores e assim o dimensionamento segundo Lobo, foi realizado seguindo valores normativos que durante a execução do ensaio podem ter sofrido alterações, que influenciam no resultado final do método. O segundo ponto é que Lobo não apresenta uma ligação direta com o tipo de solo da ponta da estaca, o que pode dificultar sua adaptação utilizando como base as análises apresentadas neste trabalho.

Quanto aos métodos de Laprovitera- Benegas e Aoki-Velloso os dois possuem a mesma proposta, já que, Laprovitera-Benegas é uma adaptação de Aoki-

Velloso. O que não os torna adequados as análises realizadas a seguir, é que ambos os métodos apresentam três coeficientes para o cálculo da capacidade de carga na ponta da estaca, o que exigiria uma análise mais aprofundada.

Já quanto ao método de Teixeira, este é uma união entre os métodos de Decourt-Quaresma e Aoki-Velloso. O problema deste método é que o coeficiente utilizado para o cálculo da capacidade de ponta está relacionado diretamente com o tipo de estaca (uma variável que necessita de um estudo mais aprofundado em trabalhos futuros) e não com o tipo de solo, a qual é a variável em análise neste trabalho.

Assim Decourt-Quaresma foi o método adotado, pois é um método relativamente simples, pelo menos em sua utilização, e possui apenas um coeficiente para a capacidade de carga da ponta da estaca que é tabelado de acordo com o tipo de solo presente nela.

4.4 ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE DECOURT-QUARESMA

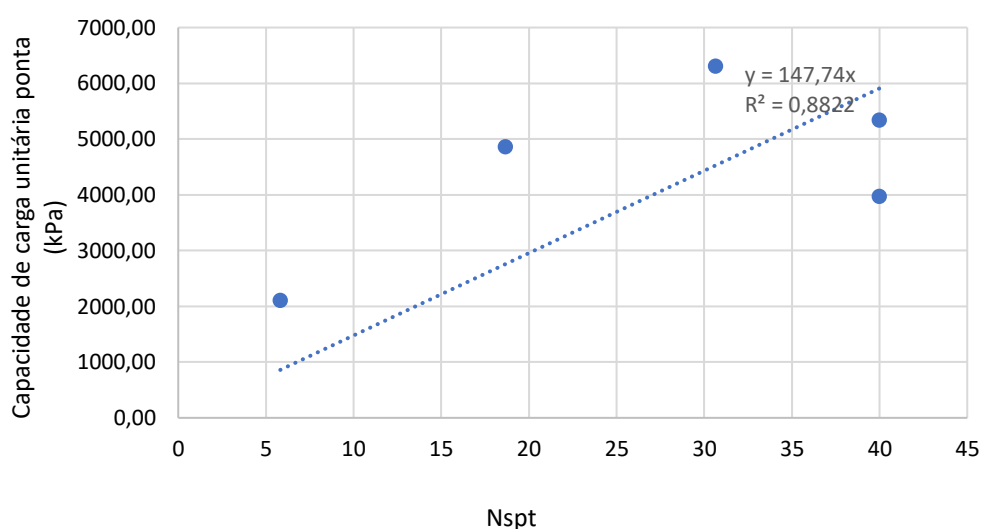
No método proposto por Decourt-Quaresma existem dois coeficientes tabelados. Sendo eles, o β para a resistência lateral, que se refere ao tipo de estaca que está sendo utilizado, e o C, que é utilizado para o cálculo da resistência de ponta e está relacionado ao tipo de solo onde está assente a ponta da estaca. Como neste trabalho as observações foram realizadas a partir do tipo de solo na ponta da estaca, apenas o coeficiente C será alterado, assim as alterações propostas estão relacionadas apenas a capacidade de carga de ponta.

Os dispositivos utilizados para a obtenção dos novos coeficientes são os gráficos de dispersão, que relacionam a capacidade de carga unitária com o N_{SPT} obtido através do boletim de sondagem. O uso dos resultados provenientes do ECD para a calibração de métodos semiempíricos é uma proposta relativamente nova, não tendo sido encontrado proposta de adequações por autores anteriores. Contudo no decorrer deste trabalho foi possível observar que em um gráfico com os resultados dos boletins de sondagem SPT no eixo x e os resultados obtidos para a capacidade de carga da ponta através do método de Decourt -Quaresma no eixo y, é possível obter uma linha de tendência que passa pela origem, com um R^2 superior a 0,9 onde o coeficiente angular é muito semelhante a constante C, proposta por Decourt-

Quaresma, dessa forma essa será a metodologia aplicada para a obtenção das constantes para a calibração.

A Figura 43 apresenta a reta obtida ao considerar apenas estacas com pontas em areia argilosa. No eixo y do gráfico está indicado os valores para a capacidade de carga unitária de ponta obtidos através do ECD, neste momento é utilizado a capacidade de carga unitária buscando minimizar a influência da seção da estaca em sua resistência.

Figura 43- Gráfico Areia Argilosa relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.

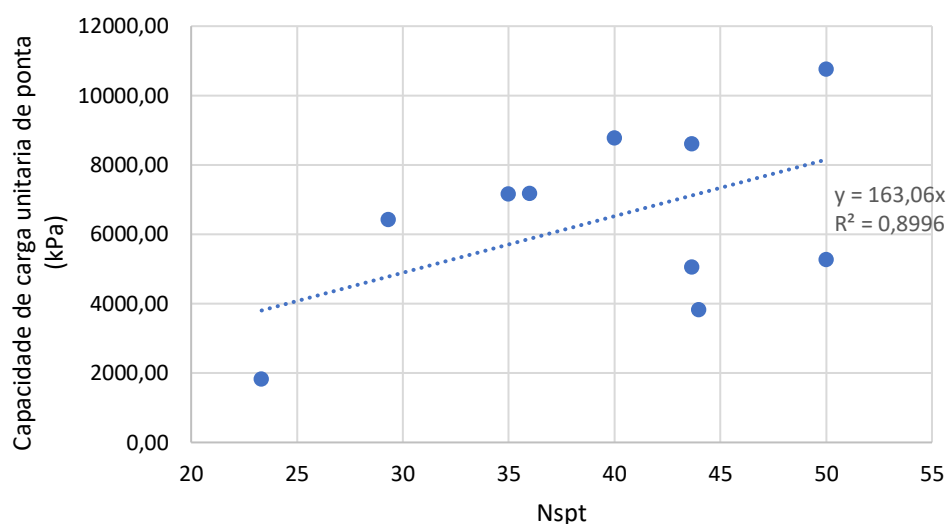


Fonte: A Autora; 2022.

Dentre as 7 (sete) estacas que tem sua ponta em areia argilosa, as estacas P2 T16 e P12A T5 foram retiradas da análise executada na Figura 43, por possuírem valores muito divergentes em relação ao apresentado pelas demais. Visto que algumas das suas diferenças em relação as demais são: o fato de que as camadas de solo em seu fuste são diferentes; a ponta das estacas está acima do nível da água; e o Nspt da ponta é um dos mais baixos do grupo, apesar destas estacas apresentarem alguns dos maiores valores para resistência de ponta.

Já na Figura 44 é apresentado o gráfico para a obtenção do coeficiente angular para o solo tipo argila pura.

Figura 44- Gráfico Argila pura relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.

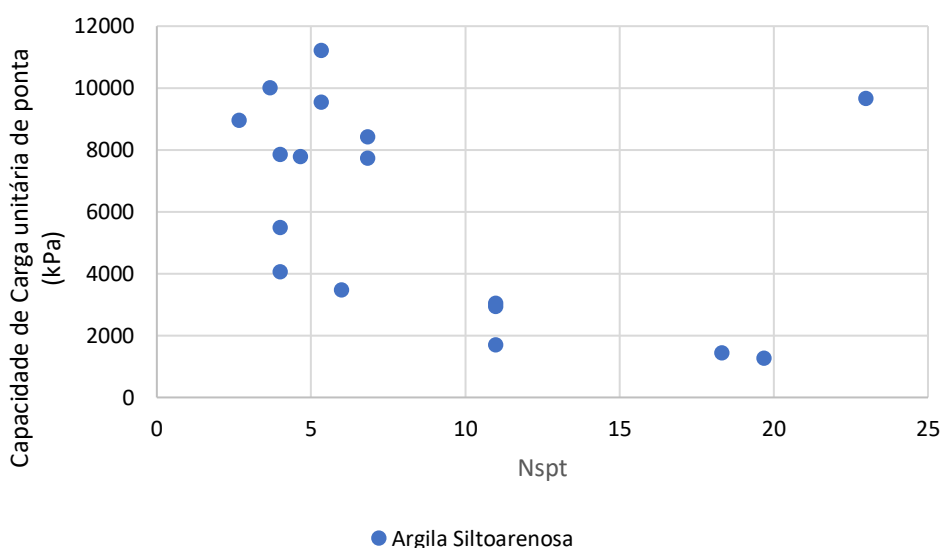


Fonte: A Autora, 2022.

Para o gráfico da Figura 44 as estacas P10A, P13A, P1B, P53C, P57A, P63A, P64C e P65B foram retiradas da análise, para um melhor controle da amostra, pois elas apresentam baixos valores de Nspt e altos valores de resistência ou altos Nspt e baixas resistências. Contudo, essas estacas não possuem uma característica executiva clara sobre o porquê dessa situação. Dado que todas as estacas que compõem esse grupo têm um perfil de solo composto apenas por argila.

Na Figura 45 é apresentado o gráfico para o solo tipo argila siltoarenosa.

Figura 45- Gráfico Argila Siltoarenosa relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.

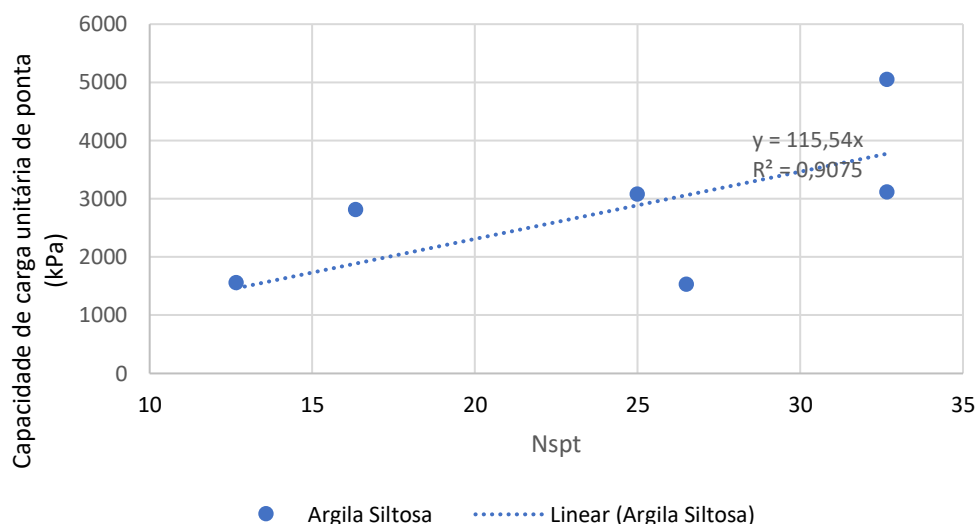


Fonte: A Autora; 2022.

O gráfico para argila siltoarenosa (Figura 45) não possui uma linha de tendência, pois quase todos os valores estão concentrados em uma faixa de até 10 Nspt. Apesar de apresentar valores de resistência muito elevados, esses quando agrupados são contrários a teoria de uma relação crescente entre o Nspt e a capacidade de carga. Dessa forma, a relação apresentada por este solo exige uma análise mais profunda a ser abordada em trabalhos futuros.

A Figura 46 apresenta o gráfico para a obtenção do coeficiente angular para o solo tipo Argila Siltosa.

Figura 46- Gráfico Argila Siltosa relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.



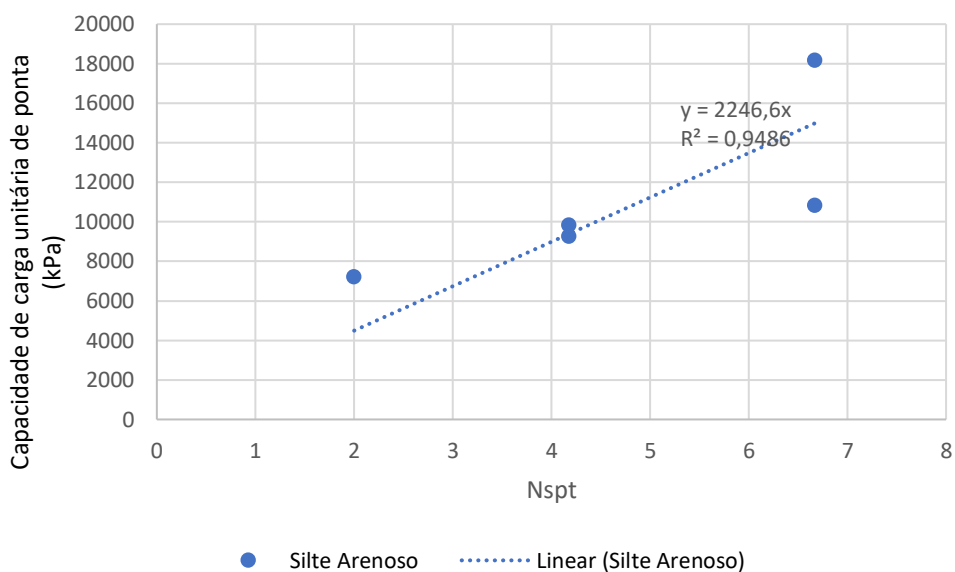
Fonte: A Autora, 2022.

A amostra de argila siltosa era composta inicialmente por 7 (sete) estacas, contudo para a execução do gráfico à estaca P15 T5b ficou de fora por apresentar um Nspt baixo e uma capacidade de carga unitária alta, quando comparada as demais. Os fatores que podem ter levado a isso não ficam claros, e pedem uma análise mais profunda.

A amostra de silte puro é muito pequena, apenas duas estacas, assim não foi possível gerar o gráfico de dispersão correspondente. Por isso, analisou-se apenas as amostras de silte arenoso, Silte argiloarenoso e Silte argiloso.

A Figura 47 apresenta o gráfico para a obtenção do coeficiente angular para o solo tipo Silte arenoso.

Figura 47- Gráfico Silte Arenoso relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.

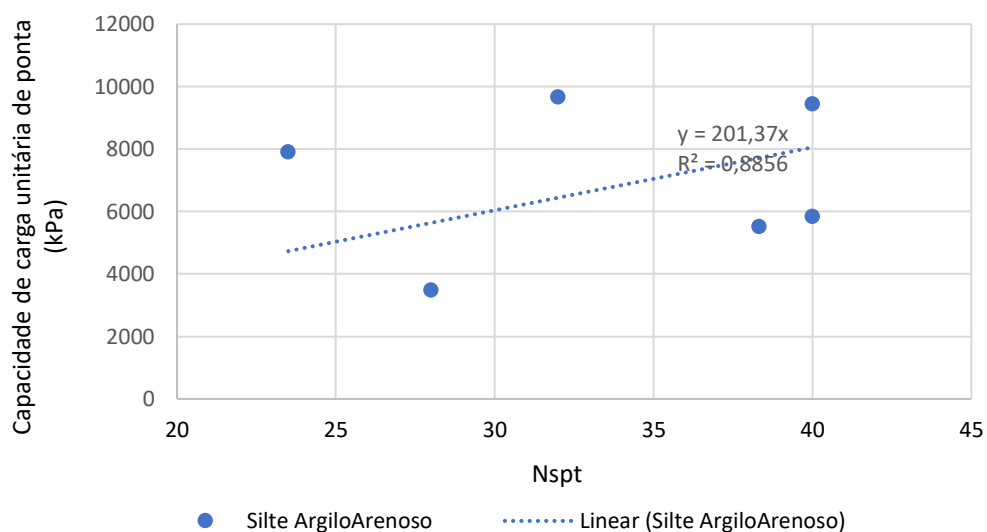


Fonte: A Autora, 2022.

Dentre as 7 amostras iniciais de Silte arenoso (Figura 47), duas precisaram ser retiradas, as estacas P16B T1 e P31B T4, por também como nas situações anteriores apresentarem uma relação de Nspt com capacidade de carga unitária contrária a reta. Todavia, todas as estacas deste grupo possuem a mesma seção transversal e em média a mesma profundidade, assim as causas dessas divergências precisam ser analisadas mais a fundo em estudos futuros.

A Figura 48 apresenta a reta obtida para o solo tipo Silte argiloarenoso.

Figura 48- Gráfico Silte Argiloarenoso relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.

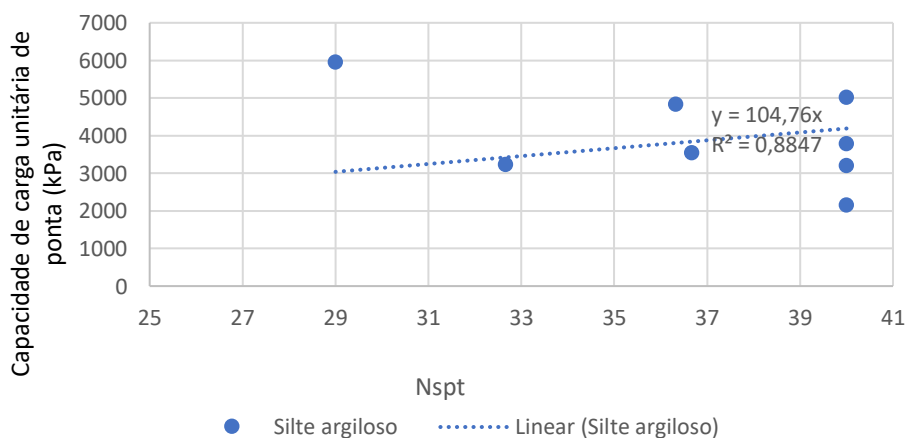


Fonte: A Autora, 2022.

Para o solo da Figura 48 a amostra inicial continha 10 estacas contudo 4 precisaram ser retiradas (P11 T13, P16B T4, P31A T3 e P5 T15). Novamente pela relação Nspt X capacidade de carga unitária estarem em desacordo com as demais, mas sem nenhuma característica clara que aponte essa divergência.

Por fim a Figura 49 apresenta o gráfico para a obtenção do coeficiente angular para o solo tipo Silte argiloso.

Figura 49- Gráfico Silte Argiloso relacionando o Nspt com a capacidade de carga unitária da ponta.



Fonte: A Autora; 2022.

Dentre as 11 amostras iniciais para o silte argiloso (Figura 49) foram retiradas as estacas P16B T3, P39A T3 e P9 T25, também por não apresentarem uma relação entre N_{spt} e capacidade de carga unitária similar ao apresentado pelas demais estacas e novamente sem uma causa clara.

Dessa forma a tabela de coeficientes C para o método de Decourt- Quaresma atualizada com os valores propostos entre a Figura 43 e a Figura 49 estão apresentados na Tabela 44.

Tabela 44- Valores originais e valores propostos para o coeficiente C do método de Decourt-Quaresma

Tipo de Solo	$C_{original}$ (kPa)	$C_{proposto}$ (kPa)
Argila	120	135 ⁽¹⁾
Silte Argiloso *	200	150 ⁽²⁾
Silte Arenoso *	250	2247
Areia	400	147

⁽¹⁾ Média dos coeficientes angulares para argila pura e argila siltosa

⁽²⁾ Média dos coeficientes angulares para silte argiloso e silte argiloarenoso

Fonte: A Autora, 2022.

Os coeficientes propostos na Tabela 44 foram organizados de acordo com a divisão de solos propostas inicialmente por Decourt-Quaresma. A argila teve seu coeficiente proposto segundo apenas a média entre dois solos, argila pura e argila siltosa, porque não foi possível gerar um gráfico de dispersão para argila siltoarenosa.

4.5 VERIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES PROPOSTOS PARA DECOURT-QUARESMA

Nessa etapa é realizado novamente a análise dos valores obtidos através do ECD e por Decourt-Quaresma, como foi feito no item 4.1 e 4.2, no entanto, agora considerando apenas o método de Decourt-Quaresma. São comparados os valores obtidos com o coeficiente original de Decourt-Quaresma e os propostos neste trabalho juntamente com os obtidos pelo ECD.

4.5.1 Quanto ao tipo de solo na ponta da estaca

Os resultados obtidos para a análise dos efeitos do coeficiente proposto, quando os dados são agrupados segundo o tipo de solo na ponta da estaca, estão apresentados na Tabela 45 e na Figura 50.

Para a Areia argilosa, segundo a Tabela 45 os valores para o desvio padrão e a média caíram, com a média ficando mais próxima de 100%, contudo as mesmas estacas que mereciam atenção no item 4.2.1 continuam merecendo aqui. É interessante observar nesta situação que o método proposto por Decourt-Quaresma utiliza apenas um coeficiente para areia, assim seria importante estudar qual o comportamento observado quando se tem areia pura ou diferentes porcentagens de silte e argila, apesar da amostra disponível não conter areia com silte ou areia pura.

Neste trabalho é feita a distinção entre três tipos de argila, todavia, Decourt-Quaresma utiliza apenas argila pura, por isso aqui esses três tipos de argila serão analisados juntos. O coeficiente proposto gera nas três um aumento da média para a capacidade de carga na ponta, e também, gera um aumento do desvio padrão. Isso demonstra que a metodologia utilizada aqui para obter o coeficiente proposto não se mostra adequada, sendo necessário estudar mais a fundo as variáveis que influenciam no cálculo da capacidade de carga da ponta.

O método de Decourt-Quaresma faz distinção entre o silte argiloso e o silte arenoso. Neste trabalho o coeficiente para o silte argiloso não sofreu uma grande alteração, contudo, para o silte arenoso esse valor se mostrou muito elevado, o que é evidenciado pelos valores apresentados na Tabela 45.

Para o silte arenoso (Figura 50f) e o silte puro (Figura 50e), ambos foram dimensionados considerando o coeficiente de silte arenoso, houve um aumento considerável tanto da média quanto do desvio padrão, sendo que a amostra de silte puro é muito pequena. Já a amostra de silte arenoso apresenta um alto desvio padrão que é em decorrência das mesmas estacas citadas já com o coeficiente original.

Já para o silte argiloso (Figuras 50g e 50h) houve uma diminuição tanto da média quanto do desvio padrão, tornando os valores mais próximos do que é observado pelo ECD.

Entretanto, um dos pontos observados através dessas análises separando o tipo de solo, é que a composição de um solo é de extrema importância. O comportamento de uma argila com areia vai ser diferente de uma argila com silte,

contudo isso já entra em um ponto que pode ser a causa de muitas divergências deste trabalho. Sendo esse o fato de os métodos em sua maioria se basearem na classificação do solo executado no ensaio SPT, que é uma classificação tátil-visual, baseada na experiência do executor, que precisa ser tratada com extremo cuidado, para assim evitar erros durante a classificação e sua posterior utilização.

Ao analisar diretamente a Figura 50, fica claro que a adaptação aqui proposta não foi satisfatória. Pois apenas aproximou-se numericamente do valor obtido por Decourt-Quaresma ao observado *in loco* pelo ECD. Sendo que essa adaptação numérica não é suficiente, é preciso continuar os estudos para definir quais variáveis atuam na capacidade de carga da ponta.

Tabela 45- Coeficientes estatísticos obtidos utilizando o coeficiente C original e o proposto para o método de Decourt-Quaresma, análise aplicada apenas a capacidade de carga da ponta das estacas quanto ao tipo de solo na ponta da estaca.

(continua)

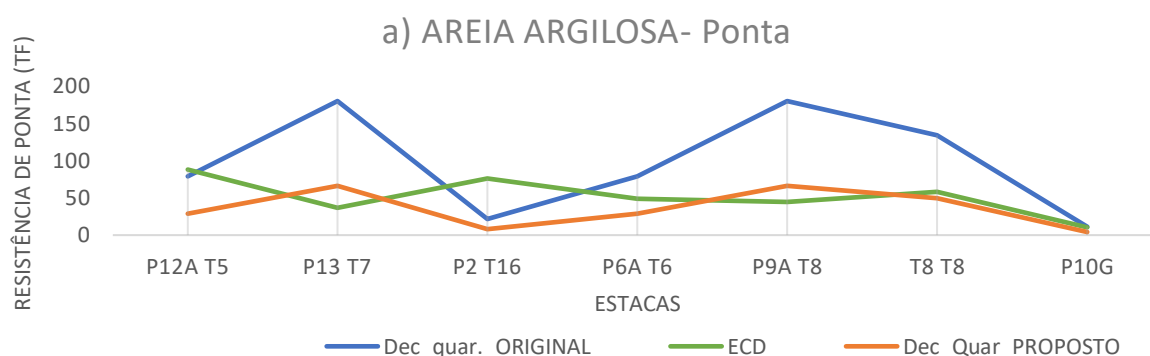
DECOURT-QUARESMA_ AREIA ARGILOSA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
P _r >ECD	5	71%	2	29%
P _r <ECD	2	29%	5	71%
Média Q _{rdc} /Q _{ECD} (%)	217,0%		79,8%	
Desvio Padrão (%)	159,8%		58,7%	
CV (%)	73,6%		73,6%	
MAE (tf)	64±53		30±22	
DECOURT-QUARESMA_ ARGILA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
P _r >ECD	7	39%	7	39%
P _r <ECD	11	61%	11	61%
Média Q _{rdc} /Q _{ECD} (%)	100,9%		113,9%	
Desvio Padrão (%)	85,8%		94,8%	
CV (%)	85,0%		83,3%	
MAE (tf)	24±17		23±13	
DECOURT-QUARESMA_ ARGILA SILTOARENOSA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
P _r >ECD	2	11%	2	11%
P _r <ECD	16	89%	16	89%
Média Q _{rdc} /Q _{ECD} (%)	37,7%		42,4%	
Desvio Padrão (%)	50,1%		56,4%	
CV (%)	133,0%		133,0%	
MAE (tf)	44±32		44±31	
DECOURT-QUARESMA_ ARGILA SILTOSA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
P _r >ECD	3	43%	4	57%
P _r <ECD	4	57%	3	43%
Média Q _{rdc} /Q _{ECD} (%)	109,4%		123,1%	
Desvio Padrão (%)	63,5%		71,4%	
CV (%)	58,0%		58,0%	
MAE (tf)	10±9		11±10	

conclusão

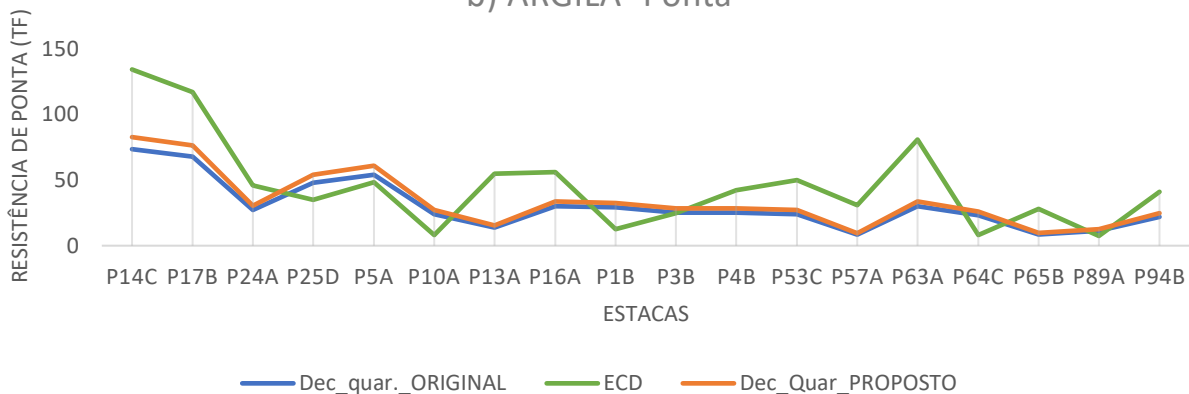
DECOURT-QUARESMA_SILTE				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
$P_r > ECD$	0	0%	2	100%
$P_r < ECD$	2	100%	0	0%
Média Qrdc/QECD (%)	13,7%		123,2%	
Desvio Padrão (%)	2,1%		19,0%	
CV (%)	15,4%		15,4%	
MAE (tf)	85±15		20±15	
DECOURT-QUARESMA_SILTE ARENOSO				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
$P_r > ECD$	0	0%	2	29%
$P_r < ECD$	7	100%	5	71%
Média Qrdc/QECD (%)	18,4%		165,2%	
Desvio Padrão (%)	22,7%		203,8%	
CV (%)	123,4%		123,4%	
MAE (tf)	88±46		62±74	
DECOURT-QUARESMA_SILTE ARGILOARENOSO				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
$P_r > ECD$	5	50%	4	40%
$P_r < ECD$	5	50%	6	60%
Média Qrdc/QECD (%)	118,1%		88,6%	
Desvio Padrão (%)	78,4%		58,8%	
CV (%)	66,4%		66,4%	
MAE (tf)	34±23		35±27	
DECOURT-QUARESMA_SILTE ARGILOSO				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
$P_r > ECD$	9	82%	8	73%
$P_r < ECD$	2	18%	3	27%
Média Qrdc/QECD (%)	219,6%		164,7%	
Desvio Padrão (%)	118,5%		88,8%	
CV (%)	53,9%		53,9%	
MAE (tf)	37±19		28±18	

Fonte: A autora,2022.

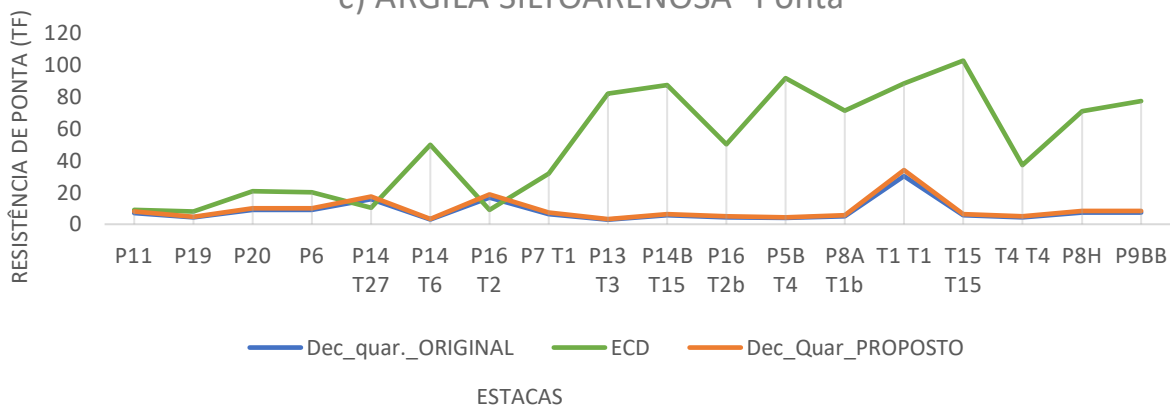
Figura 50: Gráficos para comparação visual entre valores obtidos para capacidade de carga utilizando coeficiente C proposto e o original do método de Decourt- Quaresma e também os obtidos através do ECD. Dados agrupados segundo o tipo de solo na ponta da estaca



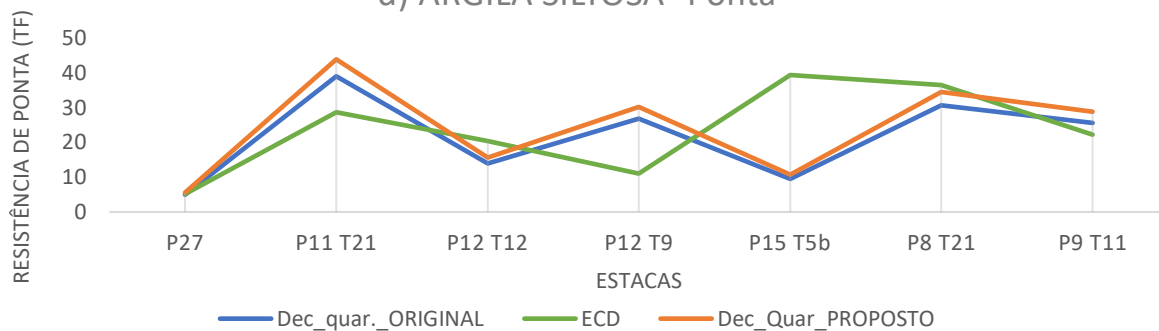
b) ARGILA- Ponta

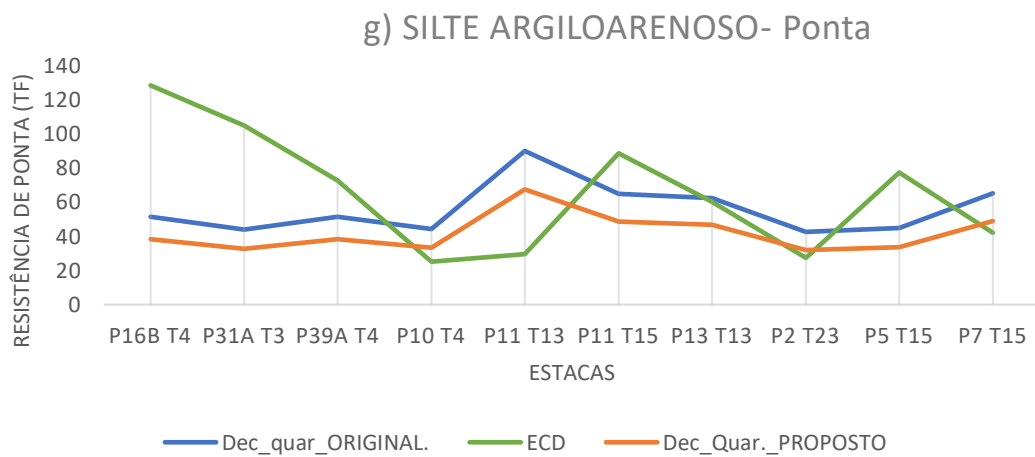
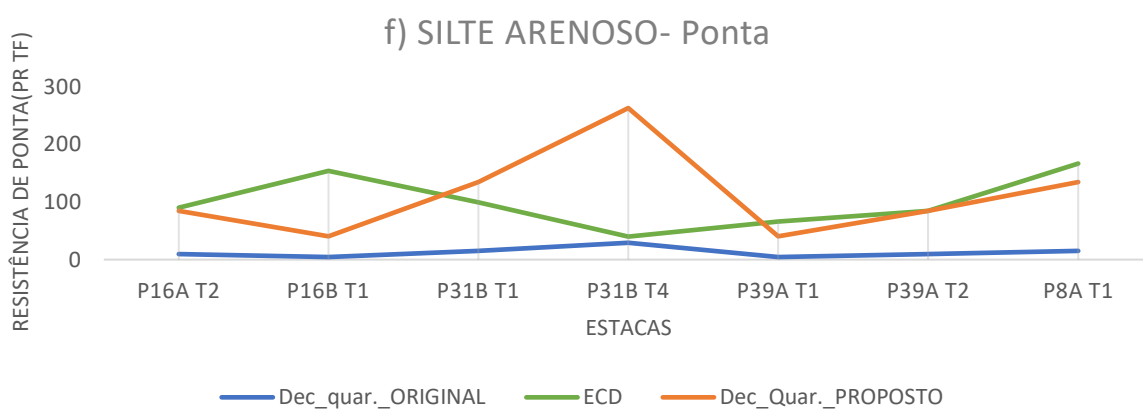
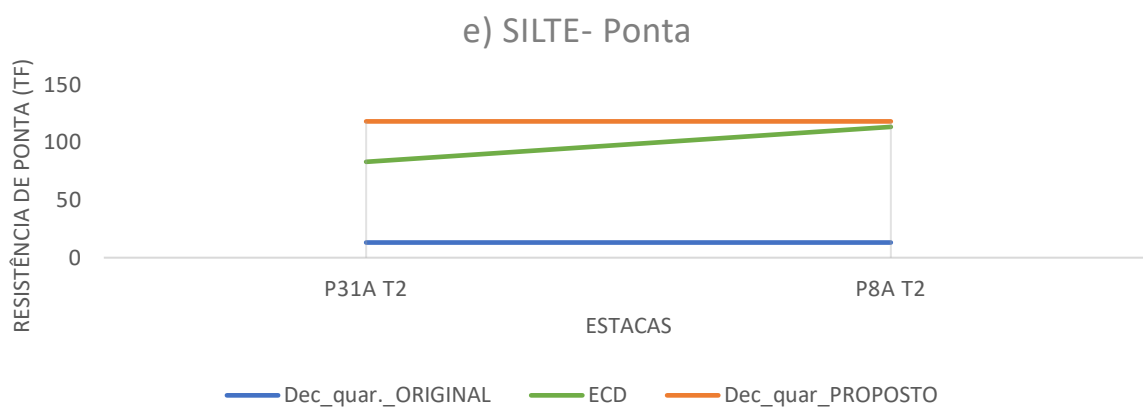


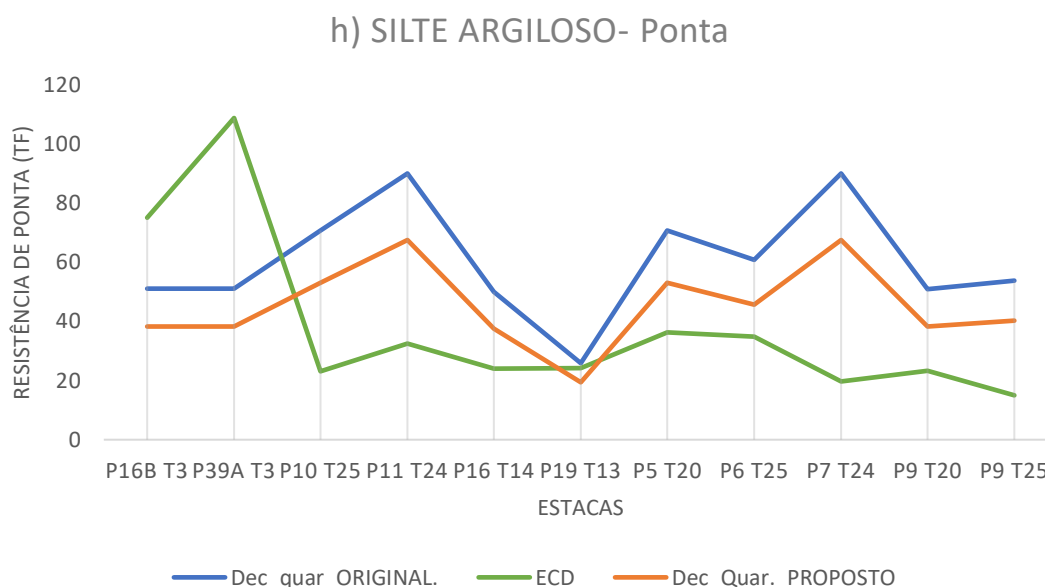
c) ARGILA SILTOARENOSA- Ponta



d) ARGILA SILTOSA- Ponta







Fonte: A Autora, 2022.

4.5.2 Quanto a obra a qual pertencem

A análise realizada aqui busca ilustrar o que acontece dentro de cada obra, tendo um ambiente ainda mais controlado que o anterior.

Os resultados obtidos com o coeficiente proposto agrupando segundo a obra a qual pertencem é apresentado na Tabela 46 e na Figura 51.

Os dados aqui apresentados, confirmam o que já foi verificado na análise anterior, que apenas um ajuste numérico não é suficiente. Uma vez que, os valores apresentados na Tabela 46, sofrem influência do fato de que em algumas obras há presença de mais de um tipo de solo na ponta da estaca, e ainda, através da Figura 51 é possível confirmar o que foi observado quando são analisados o tipo de solo separadamente, o coeficiente proposto retorna valores mais próximos do ECD. Contudo, como é apenas um ajuste numérico, nas duas situações o método de Decourt-Quaresma possui o mesmo comportamento que muitas vezes não é similar ao apresentado pelo ECD.

Tabela 46- Coeficientes estatísticos obtidos utilizando o coeficiente C original e o proposto para o método de Decourt-Quaresma, análise aplicada apenas a capacidade de carga da ponta das estacas quanto a obra a qual pertencem.

(continua)

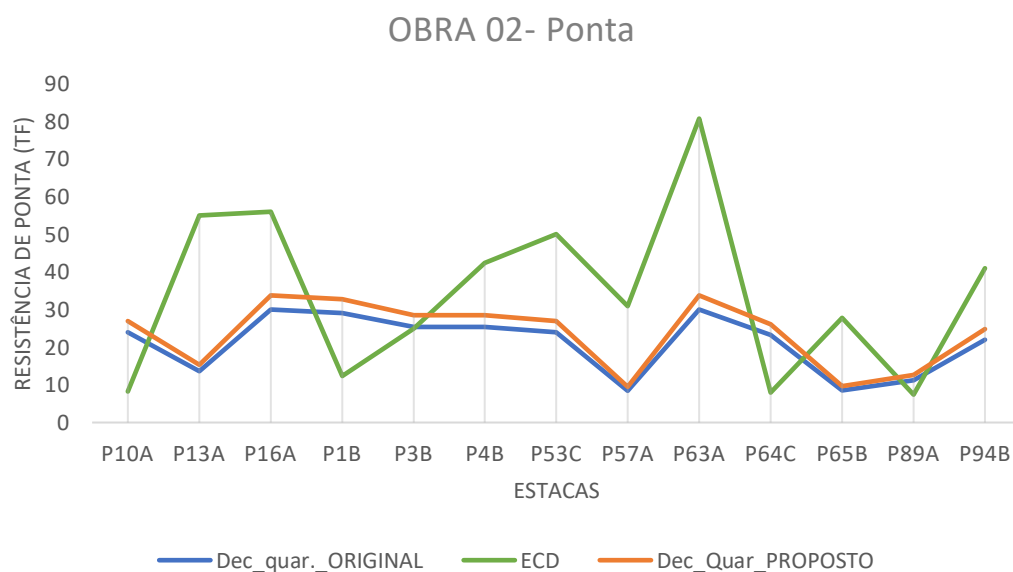
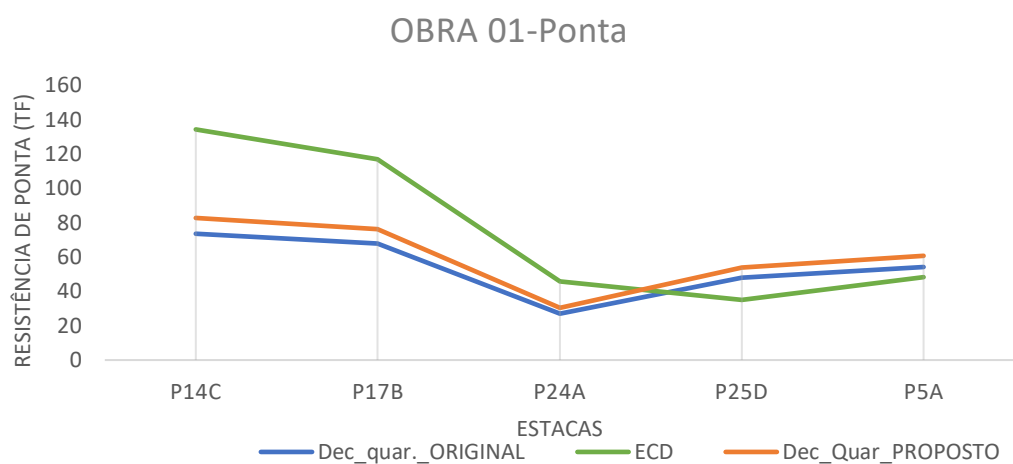
OBRA 01- PONTA- DECOURT-QUARESMA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
P _r >ECD	2	40%	2	40%
P _r <ECD	3	60%	3	60%
Média Qrdc/QECD (%)	84,1%		94,6%	
Desvio Padrão (%)	33,8%		38,0%	
CV (%)	40,2%		40,2%	
MAE (tf)	29±22		28±15	
OBRA 02- PONTA- DECOURT-QUARESMA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
P _r >ECD	5	38%	5	38%
P _r <ECD	8	62%	8	62%
Média Qrdc/QECD (%)	107,4%		121,3%	
Desvio Padrão (%)	98,0%		108,2%	
CV (%)	91,3%		89,1%	
MAE (tf)	23±14		21±11	
OBRA 03- PONTA- DECOURT-QUARESMA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
P _r >ECD	0	0%	1	20%
P _r <ECD	5	100%	4	80%
Média Qrdc/QECD (%)	62,7%		70,4%	
Desvio Padrão (%)	20,6%		23,2%	
CV (%)	32,8%		33,0%	
MAE (tf)	6±5		5±4	
OBRA 04- PONTA- DECOURT-QUARESMA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
P _r >ECD	0	0%	4	29%
P _r <ECD	14	100%	10	71%
Média Qrdc/QECD (%)	30,2%		114,5%	
Desvio Padrão (%)	24,9%		155,4%	
CV (%)	82,5%		135,7%	
MAE (tf)	73±40		56±56	
OBRA 05- PONTA- DECOURT-QUARESMA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
P _r >ECD	19	73%	17	65%
P _r <ECD	7	27%	9	35%
Média Qrdc/QECD (%)	167,6%		140,6%	
Desvio Padrão (%)	107,3%		82,6%	
CV (%)	64,0%		58,8%	
MAE (tf)	26±19		20±14	
OBRA 06- PONTA- DECOURT-QUARESMA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
P _r >ECD	4	29%	2	14%
P _r <ECD	10	71%	12	86%
Média Qrdc/QECD (%)	106,6%		43,6%	
Desvio Padrão (%)	155,6%		55,1%	
CV (%)	146,0%		126,3%	
MAE (tf)	71±37		53±27	

(conclusão)

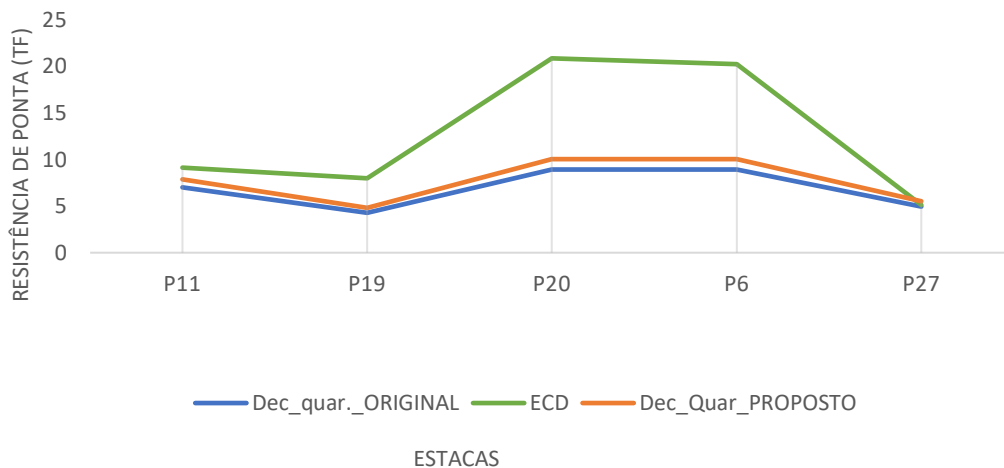
OBRA 07- PONTA- DECOURT-QUARESMA				
	ORIGINAL		PROPOSTO	
$P_r > ECD$	1	33%	0	0%
$P_r < ECD$	2	67%	3	100%
Média Qrdc/QECD (%)	42,8%		20,8%	
Desvio Padrão (%)	46,3%		13,5%	
CV (%)	108,3%		64,8%	
MAE (tf)	45±31		46±28	

Fonte: A Autora, 2022.

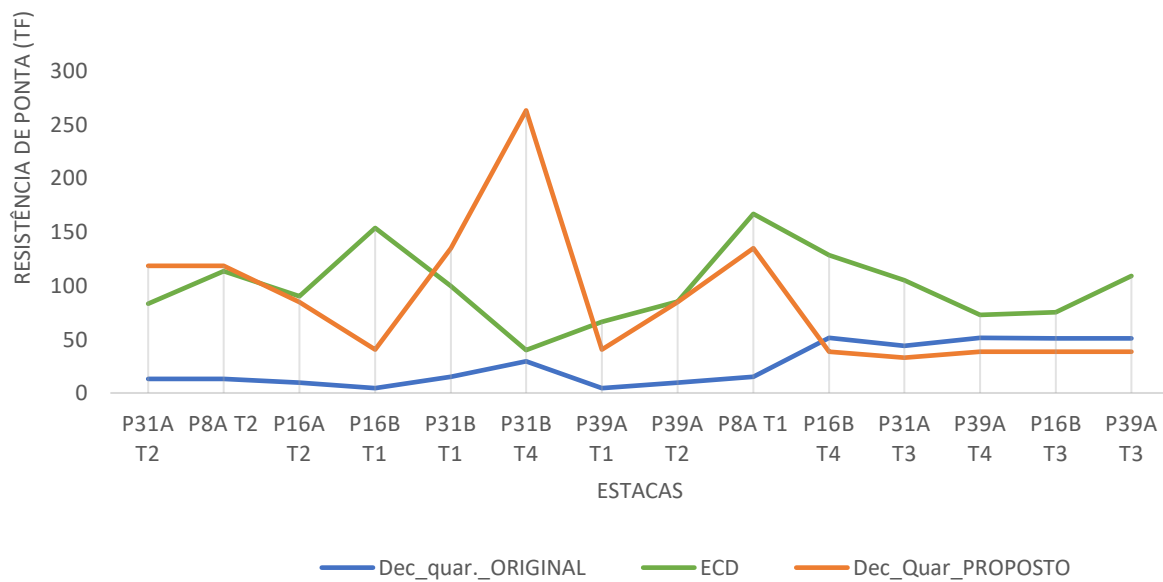
Figura 51: Gráficos para comparação visual entre valores obtidos para capacidade de carga utilizando coeficiente C proposto e o original do método de Decourt- Quaresma e também os obtidos através do ECD. Dados agrupados segundo a obra a qual pertencem.



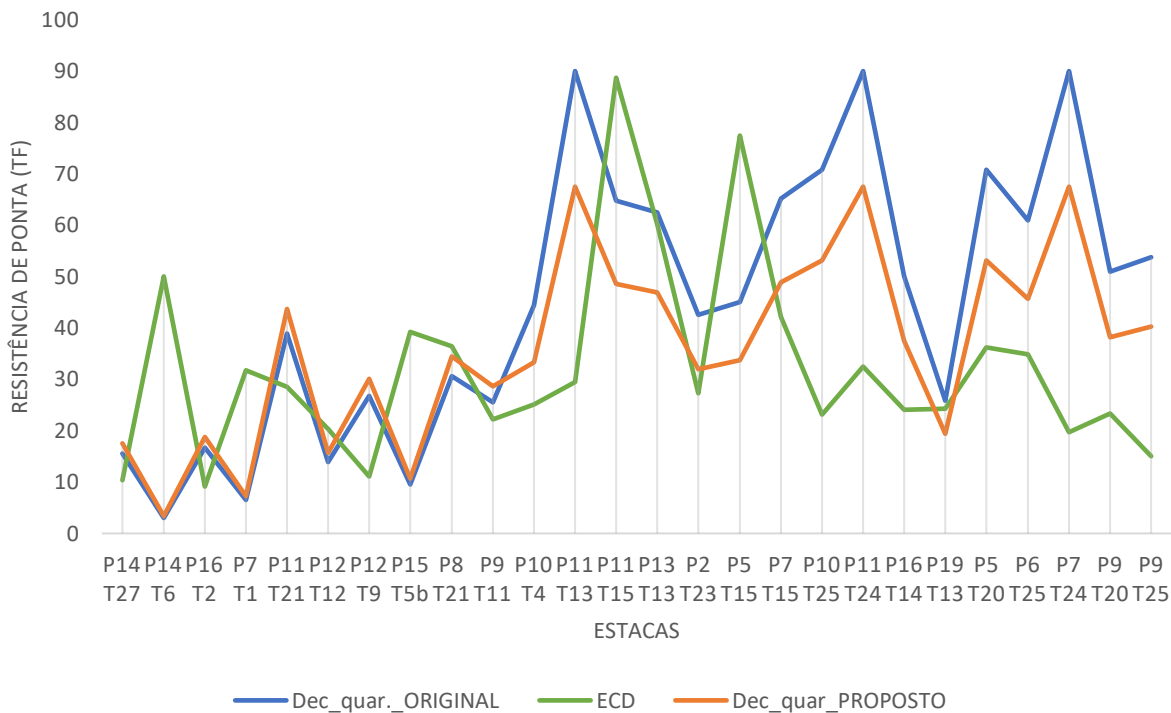
OBRA 03- Ponta



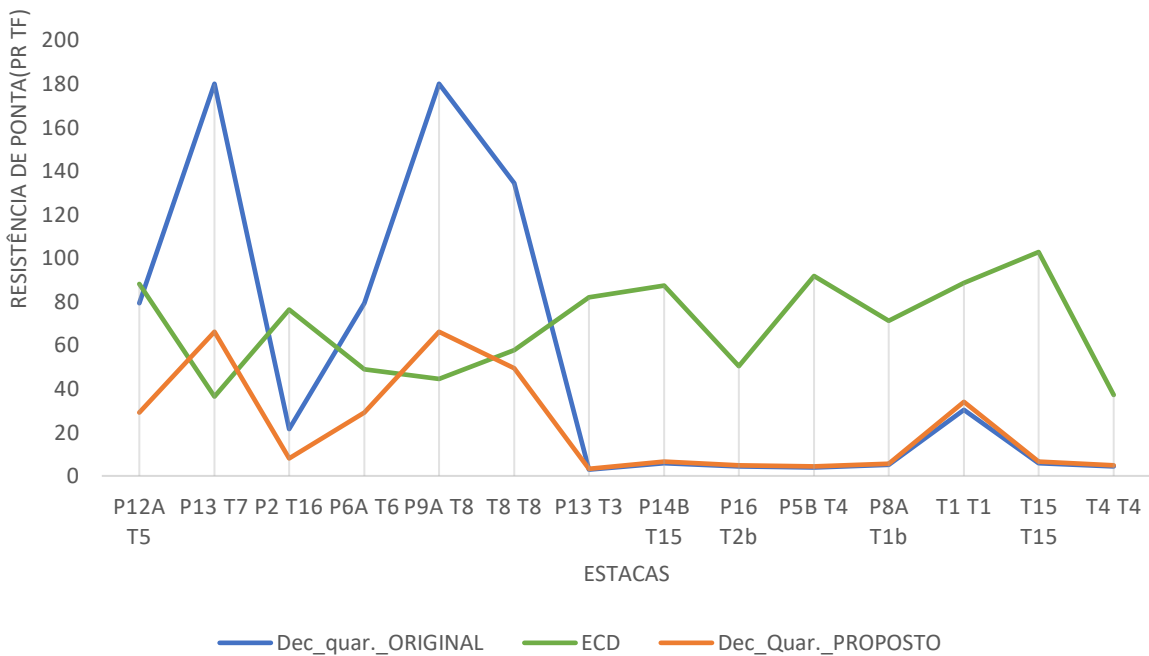
OBRA 04- Ponta

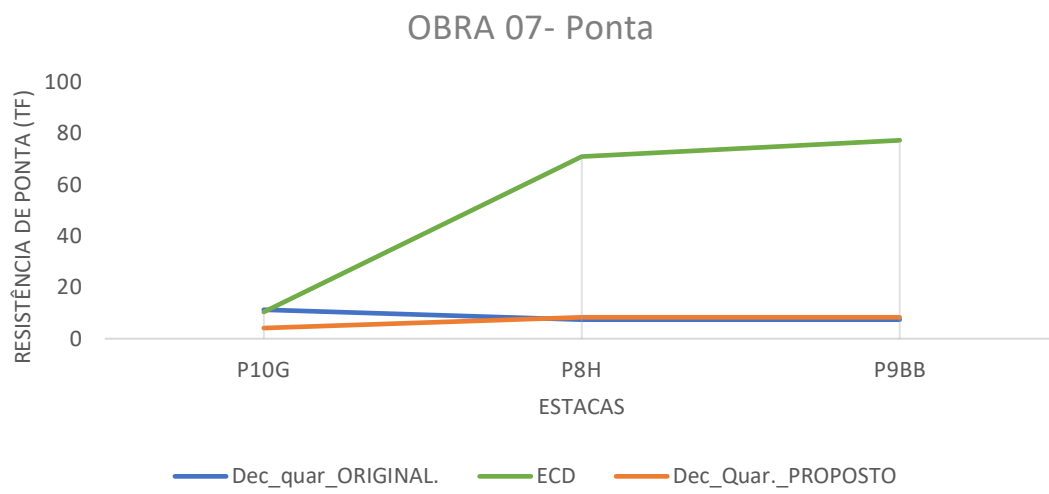


OBRA 05- Ponta



OBRA 06- Ponta





Fonte: A Autora, 2022.

5 CONCLUSÃO

Na primeira parte do trabalho, onde foram comparados os diferentes métodos de dimensionamento semiempíricos aos resultados obtidos pelo ECD, foi possível concluir que os métodos tendem a ser muito conservadores com a resistência lateral dentro da região em estudo. Foi possível observar também, que para a areia argilosa os métodos minoram a resistência lateral, enquanto majoram a ponta. Já para as argilas, a argila pura tem uma boa representação, mas a argila siltoarenosa e argila siltosa ficam mais distante, sobretudo com um grande conservadorismo para resistência lateral.

Em relação aos siltes percebemos dimensionamentos muito conservadores, tanto na ponta quanto no fuste para o silte puro e silte arenoso, e apenas o fuste mais conservador para silte argiloarenoso e arenoso.

Observou-se também, que as estacas com ponta em silte tendem a retornar os valores mais conservadores, enquanto solos com alguma parcela de argila tendem a ser melhor representados pelos métodos semiempíricos. As areias possuem uma amostra reduzida demais para uma clara observação. Ao fim o método semiempírico escolhido para buscar propor uma adaptação de seus coeficientes de ponta foi o de Decourt-Quaresma, por se adequar melhor a proposta do trabalho de uma análise inicial.

Foi realizado apenas as modificações dos coeficientes C do método de Decourt-Quaresma, ou seja, foi possível observar apenas as relações dos coeficientes modificados com a resistência de ponta das estacas.

Durante a obtenção dos coeficientes angulares, as estacas com ponta em argila siltoarenosa não tiveram sua linha de tendência estudada, pois, esse solo apresentou quase todos seus resultados de ECD em N_{spt} inferiores a 10. Apesar da capacidade de carga unitária ter tido uma grande variação, demonstrando a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre as causas desse fato, e como isso pode vir a ser previsto no futuro. Quanto as estacas assentes nos demais solos as linhas de tendência retornaram valores de R^2 superiores a 0,88.

Os coeficientes propostos retornaram valores mais próximos dos observados pelo ECD, contudo, esses novos coeficientes ainda não conseguem representar o

comportamento observado pelo ECD, apenas geram uma adequação numérica imediata.

Ao final do trabalho é possível verificar que a metodologia aplicada para a adequação dos métodos a região de Ponta Grossa, não é a mais adequada, dado que esta não consegue representar o comportamento apresentado pelo ECD. Porém, como se vê pela parte inicial do trabalho é de extrema importância a adequação destes, para que eles passem a representar a realidade da região.

No decorrer do trabalho são levantadas algumas hipóteses sobre o porquê dos valores apresentados pelos métodos e os observados pelo ECD apresentam comportamentos diferentes. Contudo, com a amostra atual não foi possível definir qual a causa dessas divergências, sendo que em algumas situações não foi possível levantar hipóteses sobre suas causas.

Para possibilitar a observação com mais precisão do comportamento das estacas na região de Ponta Grossa, é importante que haja uma expansão do banco de dados em análise, sobretudo com a adição não apenas de resultados de ECD, mas também com a adição de resultados de prova de carga estática ao banco de dados iniciado.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho é apenas a parte inicial, para o desenvolvimento de um método para o dimensionamento da capacidade de carga de estacas para a região de Ponta Grossa/PR, deixando ainda muitas perguntas a serem respondidas que levam a algumas sugestões para trabalhos futuros, que estão apresentadas a seguir:

- Expansão do banco de dados para uma melhor apreciação dos fatores que contribuem para a capacidade de carga das estacas;
- Definição de uma metodologia para o ajuste dos coeficientes para capacidade de carga na ponta das estacas;
- Definição de um método de ajuste em relação a capacidade de carga lateral;
- Estudo da causa da relação N_{spt} X capacidade de carga unitária apresentada para estacas com ponta assentes em argila siltoarenosa;
- Análise dos diferentes métodos semiempíricos em relação a capacidade de carga obtida através de ensaios de prova de carga;
- Validação de coeficientes obtidos através de expansão do banco de dados e também de execução de estacas teste a partir dos coeficientes modificados, buscando sempre o aprimoramento das variáveis e coeficientes considerados.

ANEXO 1

Acesso as planilhas referentes aos cálculos realizados:



REFERÊNCIAS

ALVES, A. M. D. L.; LOPES, F. D. R.; DANZIGER, B. R. MÉTODOS DINÂMICOS PARA PREVISÃO E CONTROLE DO COMPORTAMENTO DE ESTACAS CRAVADAS. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Abril 2004. 12-21.

AMANN, K. A. P. **METODOLOGIA SEMIEMPIRICA UNIFICADA PARA A ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS**. (Tese de Doutorado). USP. São Paulo. 2010.

AOKI, N. **DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA ÚLTIMA DE ESTACA CRAVADA EM ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO DE ENERGIA CRESCENTE**. (Tese de doutorado). USP-Campos de São Carlos. São Carlos. 1997.

ARCIERI, M. Canteiro de Engenharia. **Execução de ensaio de sondagem a percussão (SPT)**, 2020. Disponível em: <<https://canteirodeengenharia.com.br/2020/12/02/ensaio-de-sondagem-a-percussao/>>. Acesso em: 03 Fevereiro 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484. SOLO- Sondagem de Simples reconhecimento com SPT- Método de ensaio**. Rio de Janeiro. ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122. PROJETO E EXECUÇÃO DE FUNDAÇÕES**. Rio de Janeiro. ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13208. ESTACAS- Ensaio de Carregamento Dinâmico**. Rio de Janeiro. ABNT. 2007.

CARBONI, L. A. **COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA PARA CÁLCULO DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS- Estudo de caso em Jurerê/ Florianópolis- SC**. (Trabalho de conclusão de curso). Instituto Federal de Educação, ciência e tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis. 2021.

CINTRA, J. C. A. et al. **FUNDAÇÕES: Ensaio estáticos e dinâmicos**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **FUNDAÇÕES POR ESTACAS: projeto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

HACHICH, W. et al. (Eds.). **FUNDAÇÕES: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

JJ LIMA Reforços. **ESTACA TUBULAR METÁLICA**. Disponível em: <<https://www.jjlimaempreiteira.com.br/estaca-tubular-metalica>>. Acesso em: 26 set. 2021.

LAPROVITERA, H. **REAVLIAÇÃO DE MÉTODO SEMIEMPIRICO DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS A PARTIR DE BANCO DE DADOS (Brasil)**. (Tese de Mestrado). COPPE/ EFRJ. Rio de Janeiro. 1988.

LOBO, B. D. O. **MÉTODO DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS: Aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT.** (Dissertação de Mestrado). UFRGS. Porto Alegre. 2005.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. **PATOLOGIAS DAS FUNDAÇÕES.** 2. ed. rev. ampl..São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MOREIRA, M. W. A. **ESTACAS PRÉ-FABRICADAS EXECUTADAS EM PONTA GROSSA (PR): análise de dimensionamento através de ensaios de carregamento dinâmico.** 2021. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil)- Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 2021.

PEDROZO, R. Fastenge Fundações. **CRAVAÇÃO DE ESTACAS- O que é e sua funcionalidade,** 2020. Disponível em: <<https://fastenge.com.br/cravacao-de-estacas-o-que-e-e-sua-funcionalidade/>>. Acesso em: 26 set. 2021.

RJ, C. Tipos de Fundações de Edifícios. **Construfacil RJ: Portal da Construção Civil,** 2014. Disponível em: <<http://construfacilrj.com.br/tipos-de-fundacoes-de-edificios/>>. Acesso em: 18 out. 2021.

SAKATA, L. M. N. **AVALIAÇÃO DE MÉTODOS SEMI-EMPIRICOS PARA ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE FUNDAÇÕES POR ESTACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO.** Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil). UTFPR. Campo Mourão. 2019.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **ENSAIOS DE CAMPO e suas aplicações á Engenharia de Fundações.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SERKI Fundações Especiais. **ESTACAS CRAVADAS.** Disponível em: <<http://serki.com.br/servicos/estavas-cravadas/>>. Acesso em: 26 set. 2021.

SILVA, J. L. D. C. E.; FERNADES, M. W.; ALMEIDA., R. L. F. D. **Estatística e Probabilidade.** 3. ed. Fortaleza: UECE, 2015.

TEKNIER engenharia e tecnologia. Disponível em: <<https://teknier.com.br/portfolio-items/ensaios-de-carregamentos-dinamicos-pda-em-itaguai-rj/>>. Acesso em: 29 setembro 2021.

TRADE- IN PDA. **CARMIX do Brasil.** Disponível em: <<https://www.carmix.com.br/novidades/trade-in-pda/>>. Acesso em: 29 setembro 2021.

VELLOSO, D. D. A.; LOPES, F. D. R. **FUNDAÇÕES:** critérios de projetos, investigações do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.