



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Emanuel Erivan Silva da Cunha**

**CORRELAÇÕES ENTRE RESULTADOS DE ENSAIOS SPT E CPT  
PARA SOLO ARENOSO SEDIMENTAR**

**Natal**

**2016**

**Emanuel Erivan Silva da Cunha**

**CORRELAÇÕES ENTRE RESULTADOS DE ENSAIOS SPT E CPT  
PARA SOLO ARENOSO SEDIMENTAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa

Natal

2016

Catálogo da Publicação na Fonte  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas  
Biblioteca Central Zila Mamede / Setor de Informação e Referência

Cunha, Emanuel Erivan Silva da.

Correlações entre resultados de ensaios SPT e CPT para solo arenoso sedimentar / Emanuel Erivan Silva da Cunha. - 2016.

128 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa.

1. Engenharia civil – Dissertação. 2. Mecânica do solo - Dissertação. 3. Standard Penetration Test (SPT) - Dissertação. 4. Cone Penetration Test (CPT) - Dissertação. I. Costa, Yuri Daniel Jatobá. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.13

EMANUEL ERIVAN SILVA DA CUNHA

**CORRELAÇÕES ENTRE RESULTADOS DE ENSAIOS SPT E CPT  
PARA SOLO ARENOSO SEDIMENTAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa – Orientador

---

Prof. Dr. Carina Maia Lins Costa – Examinador interno (UFRN)

---

Prof. Dr. John Eloi Bezerra – Examinador Externo (UFERSA)

---

Prof. Dr. Nelson Aoki – Examinador Externo (EESC/USP)

**Mai de 2016.**

# CORRELAÇÕES ENTRE RESULTADOS DE ENSAIOS SPT E CPT PARA SOLO ARENOSO SEDIMENTAR

Emanuel Erivan Silva da Cunha

Orientador: Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa

## RESUMO

O ensaio SPT é a ferramenta mais utilizada no Brasil para a obtenção de parâmetros geotécnicos para elaboração de projetos de fundação. Em contrapartida o CPTu ainda é pouco usual, fato explicado pelo pequeno número de empresas que o executam e pelo custo elevado. Logo, é justificada a busca por correlações para estimativa de parâmetros do ensaio CPTu através de dados do ensaio SPT. No entanto a grande maioria dos estudos realizados concentram-se no sul e sudeste do país, reforçando a necessidade da determinação de correlações em outras regiões, considerando as características dos solos locais. O objetivo desse trabalho é determinar correlações entre a resistência a penetração do ensaio SPT ( $N_{SPT}$ ) com a resistência de ponta ( $q_c$ ) e a resistência lateral ( $f_s$ ) do ensaio CPTu. Utilizando-se ajustes lineares e uma abordagem geoestatística simplificada, obtiveram-se correlações entre 88 sondagens SPT e oito ensaios CPTu para profundidades máximas de 22 m, em um depósito de areia siltosa na Cidade de Natal, no nordeste do Brasil. Os valores de  $N_{SPT}$  utilizados nas correlações foram corrigidos para energia padrão internacional de 60%. A seleção dos dados utilizou critérios geoestatísticos, através do alcance do variograma para demarcação da zona de influência das sondagens, bem como aplicação de métodos como IDW e Krigagem ordinária.

**Palavras-chave:** Ensaio SPT, Ensaio CPT, Correlação, Variograma, Krigagem.

# CORRELATIONS BETWEEN SPT AND CPT TEST RESULTS FOR A SEDIMENTARY SANDY SOIL

Emanuel Erivan Silva da Cunha

Advisor: Prof. Yuri Daniel Jatobá Costa, D.Sc.

## ABSTRACT

The standard penetration test (SPT) is the most commonly used in situ test for obtaining the required geotechnical parameters for foundation analysis and design in Brazil. Since in most situations only SPT data is available, the search for new SPT-CPT correlations is necessary. However, most of the available SPT-CPT correlations in Brazil have been established for soils of southern regions of the country. New local correlations for other soil types are therefore necessary. This study aims at determining correlations between the SPT resistance number ( $N_{SPT}$ ), and the CPT tip resistance ( $q_c$ ) and sleeve friction resistance ( $f_s$ ) for a silty sand deposit at the city of Natal, at the Northeast coast of Brazil. Using linear fittings and a simplified geostatistic approach, correlations were obtained for 88 SPT boreholes and eight CPT boreholes. The  $N_{SPT}$  blowcount values were corrected for the energy of 60%. SPT-CPT correlations were devised using the following approaches: variogram analysis, inverse distance weighting (IDW) and ordinary kriging.

**Key-words:** SPT test, CPT test, Correlation, Variogram, Kriging.

Dedico este trabalho a minha esposa, amiga e porto seguro, **Gilda Cunha.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo simples fato de me conceder a graça da vida e a oportunidade de evoluir como ser humano através da sabedoria e do entendimento, ambos dons gratuitos da sua infinita bondade de pai.

Aos meus pais, José Erivan da Cunha e a Maria de Fátima Silva da Cunha e meus irmãos José Cândido da Cunha Neto e Maria Erivânia Silva da Cunha pelo apoio, incentivo e amor incondicional.

A 50% de mim mesmo, **GILDA ARAÚJO AZEVÊDO CUNHA**, minha esposa, amiga e razão da minha busca por aperfeiçoamento, pela compreensão, paciência e amor.

Ao meu orientador, Professor. Yuri Daniel Jatobá Costa, exemplo de profissionalismo e dedicação a docência.

Ao meu co-orientador Jonh Eloi pela ajuda fundamental na geoestatística e planilhas.

À CAPES pela concessão de bolsa, sem ela não poderia ter me dedicado integralmente ao desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos que adquiri no decorrer do curso: Charles, Thiago, Filipe, Duílio, Victor, Tahyara, Ana Raquel, Sarah.

Aos Professores Fagner França e Carina Maia, pelos exemplos de Caráter, seriedade e competência, pela disponibilidade e pelo empenho em ajudar seus alunos.

À banca examinadora deste trabalho, por aceitar o convite disponibilizando do seu tempo, em especial ao professor Nelson Aoki que aceitou o convite e nos enriqueceu com seu vasto conhecimento e experiência.

À Secretaria responsável pelas obras da copa, pela autorização de acesso aos resultados dos ensaios (Secopa).

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>15</b>
<b>Introdução</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1. OBJETIVOS DA PESQUISA</b> .....	<b>16</b>
1.1.1. Objetivo geral .....	16
1.1.2. Objetivos específicos .....	16
<b>1.2. Organização do Texto</b> .....	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>18</b>
<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 STANDARD PENETRATION TEST (SPT)</b> .....	<b>18</b>
2.1.1 Fatores que Afetam o $N_{SPT}$ .....	18
2.1.2. Correção de $N_{SPT}$ para Eficiência .....	20
2.1.3. Prova de Carga no Amostrador Padrão para Medição de Eficiência do Ensaio .....	22
<b>2.2. CONE PENETRATION TEST (CPT)</b> .....	<b>24</b>
2.2.1. Cone Mecânico .....	25
2.2.2. Cone Elétrico .....	26
2.2.3. Piezocone .....	27
2.2.4. Ensaio Adicionais .....	31
<b>2.3. CORRELAÇÕES ENTRE SPT E CPT</b> .....	<b>32</b>
<b>2.4. GEOESTATÍSTICA</b> .....	<b>40</b>
2.4.1. Generalidades .....	40
2.4.2. Variáveis Regionalizadas .....	40
2.4.3. Variograma (Semivariograma) e Modelos Variográficos .....	42
2.4.4. Ajuste do Semivariograma .....	44
2.4.5. INVERSO PONDERADO DA DISTÂNCIA (IDW) .....	47
2.4.6. KRIGAGEM .....	47
2.4.7. APLICAÇÕES .....	50
<b>CAPITULO 3</b> .....	<b>522</b>
<b>3.1. Local de Realização da Investigação do Subsolo</b> .....	<b>52</b>
<b>3.2. Características Geológicas do Local</b> .....	<b>53</b>
<b>3.3. Investigação do Subsolo</b> .....	<b>54</b>

3.5. Análise Variográfica.....	59
3.5.1. Estatísticas Descritivas das Regiões .....	64
3.6. Interpolação de Perfis SPT .....	65
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>69</b>
4.1. Média aritmética .....	69
4.2. Correlações entre $q_c$ e $N_{SPT}$ - Resultados por Área de Influência .	70
4.3. Correlações entre $q_c$ , $f_s$ e $N_{SPT}$ - Resultados por Área de Influência	76
4.4. Correlações entre $q_c$ e $N_{SPT}$ - Resultados por IDW .....	81
4.5. Correlações entre $q_c$ e $N_{SPT}$ - Resultados por Krigagem Ordinária	86
<b>CAPITULO 5.....</b>	<b>91</b>
5.1. Conclusões .....	91
5.2. Sugestões para pesquisas futuras .....	91
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Processo de embuchamento do solo no amostrador (Noreña, 2011).
- Figura 2.2 – Gráfico do acréscimo de energia potencial em função do  $N_{SPT}$ . (Cintra *et al.*, 2013).
- Figura 2.3 -Ponteiras de cone mecânico desenvolvidas por Begemann. (Lunne *et al.*, 1997)
- Figura 2.4 –Esquema dos componentes do cone Elétrico. (Lunne *et al.*, 1997)
- Figura 2.5 –componentes do Piezocone. (Lunne *et al.*, 1997).
- Figura 2.6 –Apresentação dos resultados do ensaio CPT. Schnaid e Odebrecht (2012).
- Figura 2.7 – Cartas de classificação do tipo solo de acordo com o ensaio CPTu (Robertson *et al.*, 1986 apud Schnaid, 2000).
- Figura 2.8 - Relação  $q_c/N_{SPT}$  com o aumento do  $D_{50}$ . Robertson e Campanella (1983).
- Figura 2.9 – Correlações com  $D_{50}$  obtidas no trabalho de Elkateb e Ali (2010).
- Figura 2.10 – Correlações com  $I_c$  obtidas no trabalho de Elkateb e Ali (2010).
- Figura 2.11 - Relação entre os valores de  $N$  e resistência de ponta (Velloso, 1959 *apud*. Politano, 1999).
- Figura 2.12- correlação para solo aluvionar de planície de inundação (Naime e Fiori, 2002).
- Figura 2.13- Correlação considerando todas as faixas de compacidade relativa das areias (Souza, 2009)
- Figura 2.14 – Variável regionalizada (Andriotti, 2003).
- Figura 2.15 – Semivariograma
- Figura 2.16– Modelos de ajuste com patamar do semivariograma (Landim, 2011)
- Figura 2.17– Modelos de ajuste sem patamar do semivariograma (Landim, 2011)
- Figura 3.1 - Localização da obra onde foram feitas as sondagens. Fonte: Google (2015).
- Figura 3.2 – Seção típica do subsolo da Cidade do Natal (Gusmão Filho, 1982).
- Figura 3.3. Localização das sondagens CPT.
- Figura 3.4. Perfil do local estudado e resultados CPT.
- Figura 3.5. Variação do  $N_{SPT}$  com a profundidade.
- Figura 3.6 - Cartas de classificação dos solos, do ensaio CPT (modificado de Schnaid, 2000).
- Figura 3.7 - Variograma para a profundidade  $z = 1$  m.
- Figura 3.8 - Variograma para a profundidade  $Z=5$ m.
- Figura 3.9 - Variograma para a profundidade  $Z=10$ m.
- Figura 3.10 - Variograma para a profundidade  $Z=15$ m.
- Figura 3.11- Distribuição de frequência dos valores de  $N_{SPT}$  para região do CPT- 1
- Figura 3.12- Planilha do Excel utilizada para interpolação de perfis SPT através de IDW.
- Figura 3.13 - Perfil interpolado através de IDW para região do CPT-1

Figura 3.14 - Perfil interpolado através de KO para região do CPT-1

Figura 4.1- Dispersão dos valores  $q_c$  x  $N_{SPT}$

Figura 4.2 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-1.

Figura 4.3 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-2.

Figura 4.4 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-3.

Figura 4.5 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-5.

Figura 4.6 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-6.

Figura 4.7 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-7.

Figura 4.8 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-8.

Figura 4.9 – Correlações entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para todas as regiões.

Figura 4.10 – Correlação única entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para todas as regiões.

Figura 4.11 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-1.

Figura 4.12 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-2.

Figura 4.13 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-3.

Figura 4.14 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-5.

Figura 4.15 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-6.

Figura 4.16 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-7.

Figura 4.17 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-8.

Figura 4.18– Correlações entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para todas as regiões.

Figura 4.19 – Correlação única entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para todas as regiões.

Figura 4.20 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-1 usando IDW.

Figura 4.21 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-2 usando IDW.

Figura 4.22 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-3 usando IDW.

Figura 4.23 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-5 usando IDW.

Figura 4.24 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-6 usando IDW.

Figura 4.25 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-7 usando IDW.

Figura 4.26 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-8 usando IDW.

Figura 4.27 – Correlação única entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para as regiões usando IDW.

Figura 4.28– Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-1 usando KO.

Figura 4.29– Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-2 usando KO.

Figura 4.30– Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-3 usando KO.

Figura 4.31– Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-5 usando KO.

Figura 4.32– Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-6 usando KO.

Figura 4.33– Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-7 usando KO.

Figura 4.34– Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-8 usando KO.

Figura 4.35– Correlação única entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para todas as regiões usando KO.

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CPT- Cone Penetration Testing

SPT- Standard Penetration Test

D<sub>50</sub> – Diâmetro dos grãos correspondentes a 50% dos que passam na #200

$\gamma$  – Semivariograma

IDW - Inverse Distance Weight

KO - krigagem ordinária

ISBT – Índice “Soil Behavior Type”

f<sub>s</sub>- Resistência devido ao atrito lateral

N<sub>SPT</sub>- Número do índice de resistência a penetração

k- correlação entre os ensaio SPT e CPT

Sgems- Stanford Geostatistical Modeling Software

q<sub>c</sub> -Resistência de ponta

R<sub>f</sub>- Razão de atrito

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Fatores que afetam o ensaio SPT (Carvalho, 2012).

Tabela 2.2- Correlações para solos brasileiros (Velloso, 1959, *apud.* Politano, 1999).

Tabela 2.3- valores de correlações para solos brasileiros

Tabela 3.1- Matriz de correlação

Tabela 3.2 – Alcance dos semivariogramas para todas profundidades

Tabela 3.3 - Distribuição dos ensaios SPT por área de influência em torno dos ensaios CPT.

Tabela 3.4 – Estatísticas básicas da região do CPT- 1

Tabela 4.1- Valores de k para zonas de influência.

Tabela 4.2- valores de  $f_s/[N_{60}/(q_c/Pa)]$

## CAPÍTULO 1

# Introdução

No âmbito da Engenharia Civil, sobretudo na área de Engenharia de Fundações, tanto por aperfeiçoamento das normas técnicas, quanto pela exigência dos diversos segmentos reguladores da tendência racionalista (meio ambiente, responsabilidade social, exigências de mercado) no que diz respeito ao dimensionamento de estruturas mais seguras e econômicas, torna-se imprescindível o desenvolvimento e disseminação de ferramentas que possibilitem a aproximação dessas estruturas dos modelos admitidos como ideais.

Para tanto o emprego de técnicas de investigação do subsolo, mais que uma sugestão apresentada pelas normas, cada vez mais apresenta-se como pré-requisito para a elaboração de projetos de fundações seguros e econômicos.

Tendo em vista as dificuldades de realização de ensaios de piezocone (CPTu) em investigação geotécnica no Brasil e mais especificamente na região nordeste do País, a determinação de correlações entre os ensaios SPT e CPT, mais que uma informação de caráter estritamente acadêmica, pode representar um avanço no dimensionamento de fundações por estacas para essa região.

As correlações entre ensaios presentes na literatura incorporam os parâmetros do solo das localidades onde foram efetuados os respectivos estudos, dessa forma podem não traduzir adequadamente as características e solos de outras regiões. Dessa maneira a partir de resultados de ensaios realizados nos solos locais torna-se possível a obtenção de correlações entre o índice de resistência a penetração ( $N_{SPT}$ ) e os resultados do ensaio do cone (resistência de ponta  $q_c$  e atrito lateral  $f_s$ ) que expressem mais fielmente o comportamento dos solos dessa região.

## **1.1. OBJETIVOS DA PESQUISA**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

O trabalho tem como objetivo geral a determinação de correlações entre o índice de resistência a penetração ( $N_{SPT}$ ), obtidos em sondagens de simples reconhecimento e os resultados do ensaio do cone (resistência de ponta  $q_c$  e atrito lateral  $f_s$ ), realizados em uma mesma área, através de abordagem geoestatística simplificada para um solo arenoso sedimentar.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

Para a consecução do objetivo geral, tornou-se necessária a coleta de dados, nesse caso, boletins de sondagem SPT e resultados de ensaios CPT, ambos executados como parte da investigação do subsolo para o estádio de futebol “Arena das Dunas” em Natal-RN. Dessa forma, como objetivos específicos podem ser citados:

- Determinação das correlações considerando o efeito da correção da energia de cravação do SPT ( $N_{60}$ );
- Análise da variabilidade espacial através de análise variográfica, através da obtenção do semivariograma (variograma);
- Aplicação de método determinístico do Inverso ponderado da distância (IDW) na interpolação de perfis do subsolo.
- Aplicação da geoestatística através dos métodos de semivariograma e Krigagem Ordinária.
- Comparar os resultados com valores de correlações existentes na literatura.

## **1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação é dividida em outros quatro capítulos.

No capítulo 2 foi feita uma revisão bibliográfica sobre os ensaios SPT e CPT, descrevendo seus procedimentos e características. Posteriormente, foram apresentadas correlações entre os ensaios, tanto para solos brasileiros quanto para estudos realizados em outros países. Por fim, de maneira sucinta, foram descritos alguns conceitos de geoestatística como variáveis regionalizadas, estudo do semivariograma e o método determinístico do IDW, bem como a krigagem ordinária.

O capítulo 3 descreve as características geológico-geotécnicas do local da pesquisa. Além disso, são apresentados os materiais e os métodos utilizados nas análises dos resultados dos ensaios.

No capítulo 4, apresenta-se a análise dos resultados obtidos. Foram apresentadas as correlações entre  $q_c$ ,  $N_{SPT}$  e  $f_s$  utilizando abordagem geoestatística simplificada para obtenção de correlações dentro de uma área de influência cujo grau de correlação entre os resultados dos ensaios não seja nulo. Para isso realizou-se uma análise variográfica simplificada, bem como foram aplicadas técnicas como IDW e Krigagem Ordinária.

No capítulo 5, são descritas as principais conclusões obtidas na pesquisa e apresentadas sugestões para pesquisas futuras.

# REVISÃO DA LITERATURA

## 2.1 STANDARD PENETRATION TEST (SPT)

O ensaio SPT é uma das ferramentas de investigação geotécnica mais utilizadas, senão a mais utilizada, para a obtenção de parâmetros geotécnicos na elaboração de projetos de fundação no Brasil, pois além de caracterizar um procedimento rápido e mais econômico em comparação com outros ensaios de campo, também fornece uma classificação tátil-visual do solo e parâmetros de resistência, como o  $N_{SPT}$ .

Nos próximos tópicos serão expostas informações acerca dos fatores intervenientes do ensaio das medidas de correções no que diz respeito a energia de cravação e inovações surgidas nos últimos anos. Como é um ensaio de conhecimento amplo, sua descrição é omitida nesta revisão bibliográfica e pode ser consultada em textos como Schnaid e Odebretch (2012), dentre outros.

### 2.1.1 Fatores que Afetam o $N_{SPT}$

O ensaio SPT até a década de 1970 passava por uma fase de desconfiança devido, principalmente à falta de ciência da influência dos inúmeros fatores que, em teoria, alteravam os resultados do ensaio. Conforme Odebretch (2003), esses fatores, de maneira geral, podem ser classificados, segundo sua natureza, em três classes:

- Humana;
- De equipamento;
- De procedimento.

Outros autores, como Belicanta e Cintra (1998) ainda citam as condições do solo como fatores intervenientes nos resultados do ensaio SPT.

De maneira geral, Carvalho (2012) lista em seu trabalho vários fatores que influenciam o índice de resistência à penetração do solo  $N_{SPT}$ , bem como o ensaio, de maneira a aumentar ou diminuir seu valor. Tais fatores são elencados a seguir e apresentados na Tabela 2.1

Tabela 2.1- Fatores que afetam o ensaio SPT (Carvalho, 2012)

<b>Fatores</b>	<b>Efeito no NSPT</b>
Sistema de martelo	Aumenta/Diminui
Variação de altura de exata (76 cm)	Aumenta/Diminui
Uso de cabo de aço em vez de corda	Diminui
Falta de lubrificante da roldana	Aumenta
Atitude dos operadores	Aumenta/Diminui
Peso incorreto do martelo	Aumenta/Diminui
Excentricidade da cabeça do martelo	Aumenta
Não utilização da haste guia	Aumenta
Leitura imprecisa do número de golpes	Aumenta/Diminui
Limpeza mal feita do furo	Diminui
Falta de cuidado com o nível da lama/ água no furo	Diminui
Diâmetro do furo acima do recomendado (65 a 150 mm)	Diminui
Dimensionamento da bomba	Aumenta/Diminui
Estabilização apenas com lama ao invés de revestimento ( em areias)	Aumenta
Comprimento da haste	Aumenta
Peso da haste	Aumenta/Diminui
Amostrador deformado	Aumenta
Peso da cabeça de bater	Aumenta
Pedregulhos “engasgando “o amostrador	Aumenta
Frequência dos golpes 30-40 Golpes/Min. Se $N_1 < 20$ . 10-20 Se $N_1 > 20$ . 10-20	Não influi Aumenta Diminui

Tabela 2.1 (Continuação) - Fatores que afetam o ensaio SPT (Carvalho, 2012)

Fatores	Efeito no NSPT
Coxim: Sem usar	Não altera
Novo	Aumenta
Velho	Diminui
Intervalo de penetração 0-30 cm ao invés de	
15-45	Diminui
30-60 cm	Aumenta
Diâmetro do amostrador	Aumenta
Não utilização do "liner" no amostrador	Diminui

### 2.1.2. Correção de $N_{SPT}$ para Eficiência

Vários trabalhos recentes apresentam a preocupação da correção da energia no ensaio SPT, como tentativa de uma melhor padronização dos resultados do referido ensaio (Belicanta e Ferraz, 2000; Odebretch, 2003; El-Sherbiny e Salem, 2013).

De acordo com Odebretch (2003), a energia potencial adquirida pelo martelo quando este encontra-se no ponto mais alto da torre, na iminência da queda, converte-se em energia cinética durante a queda livre. Entretanto, essa conversão de energia potencial para cinética não ocorre totalmente devido às diversas perdas inerentes ao atrito das cordas e roldanas.

No instante do impacto do martelo com a extremidade da haste a energia cinética do martelo é transferida em forma de energia cinética e elástica percorrendo as hastes através de uma onda de compressão longitudinal, e parcela dessa energia é dissipada no impacto na forma de energia térmica e sonora.

Conforme Belicanta e Ferraz (2000), a relação entre as energias cinética incidente nas hastes e a energia-padrão de cada golpe corresponde a eficiência, sendo que energia-padrão pode ser entendida como a energia correspondente a queda de um martelo de 63,5 kg de uma altura de 750mm, ou seja 475 Joules. Dessa forma a eficiência pode ser expressa por:

$$\eta = \frac{100 E_i}{E_p} \quad [2.1]$$

Em que :

$\eta$  é a eficiência;

$E_i$  é a energia medida nas hastes;

$E_p$  é a energia padrão (475 Joules).

Existem descritas na literatura duas maneiras de se determinar a energia potencial (energia padrão) uma delas é possível utilizando as alturas de queda do martelo medidas em campo, a outra utiliza a altura teórica prescrita em norma, como mostra Odebretch (2003). Da mesma maneira, segundo o referido autor, existem duas maneiras de se determinar a energia cinética das hastes, uma baseada na velocidade de queda do martelo no momento do impacto com a parte superior da haste e a outra forma é determinando a velocidade a partir da força medida no instante do impacto.

Para efeito prático, normalmente sugere-se normalizar o número de golpes para o padrão americano, ou seja, partindo do pressuposto que a energia transferida pelas hastes ao amostrador, durante a cravação é diferente da energia teórica transmitida pelo martelo em queda livre considera-se que a energia realmente liberada seja 60% da energia teórica.

Portanto o valor da penetração, normalizado com base no padrão americano ( $N_{60}$ ), pode ser obtido através da relação:

$$N_{60} = \frac{N_{SPT} * \text{Energia aplicada}}{0,60} \quad [2.2]$$

Recentemente foi observado por Cavalcante (2002), que a eficiência da transmissão da energia ao topo das hastes não está diretamente relacionada com o comprimento das hastes nem com a resistência do solo em contato com o aparato. Para isso foram analisados mais de 1000 golpes, em campanhas de sondagens realizadas no Rio de Janeiro e na Paraíba.

### **2.1.3. Prova de Carga no Amostrador Padrão para Medição de Eficiência do Ensaio**

Como demonstrado por Aoki et al (2007), a eficiência no ensaio SPT também pode ser estimada através de uma prova de carga estática no amostrador.

Conforme Costa *et al.* (2012), a intenção de se realizar uma prova de carga no amostrador do ensaio do SPT parte do pressuposto que mesmo se a desconsiderando a variabilidade intrínseca do perfil geotécnico, equipes distintas, no mesmo local, executando a sondagem, chegariam a valores de índices de resistência a penetração  $N_{SPT}$  diferentes, fato esse que pode ser explicado devido às influências citadas na Tabela 2.1. De maneira geral as divergências no valor do  $N_{SPT}$  acontecem pela variação da energia transmitida ao sistema amostrador-solo.

No trabalho de Neves (2004), foram realizados ensaios de prova de carga estática em amostradores SPT, com o intuito de se obter a curva carga-recalque. Primeiramente procedeu-se com o ensaio SPT convencional até certa profundidade, a partir de então iniciou-se a cravação estática do amostrador, em estágios crescentes de carga. Fruto disso, obteve-se a eficiência do ensaio.

A eficiência do ensaio SPT pode ser estimada desconsiderando-se o deslocamento do amostrador resultante da parcela elástica da deformação, já que de maneira geral esta é muito pequena para a maioria dos solos (Aoki *et al.*, 2007).

Dessa maneira, com o intuito de corrigir a tendência de redução da eficiência com o aumento do comprimento das hastes Aoki et al. (2007) apresentaram como proposta a determinação da eficiência do ensaio SPT baseado na energia transferida ao amostrador.

### **2.1.4. Resistência Lateral e de Ponta**

No que diz respeito ao contato com o solo, a vizinhança em torno do amostrador sofre o processo do embuchamento, de maneira similar às estacas cravadas de ponta aberta. Logo, se o solo embuchar no interior do amostrador,

a resistência a penetração deverá levar em conta não só a resistência de ponta, mas também a influência do atrito interno e externo desenvolvidos ao longo de toda a seção, como mostra a Figura 2.1.

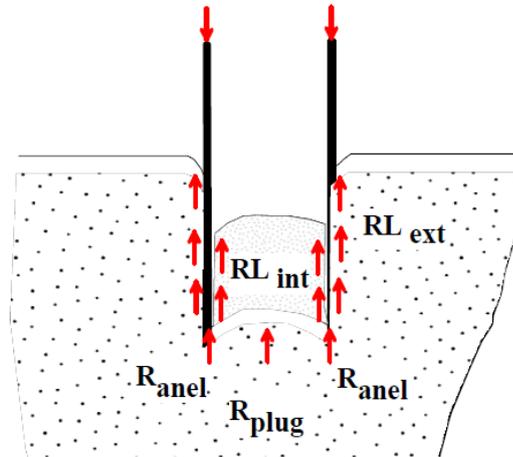


Figura 2.1– Processo de embuchamento do solo no amostrador.(Noreña, 2011).

Outro fator bastante relevante no resultado do SPT é o efeito do confinamento, sobretudo nas areias. As variações do valor de N-SPT com a profundidade, muitas vezes podem ser explicadas mais pelas perdas de energia ocorridas em todo o comprimento das hastes, do que mesmo pelo confinamento do solo, sobretudo em se tratando de solos com porcentagens de silte.

Aspectos relevantes a estimativa da eficiência foram destacados por Cintra *et al.* (2013), utilizando-se como fundamentações física e matemática o princípio da conservação de energia de Hamilton, aplicada entre dois instantes de um fenômeno dinâmico e a teoria da equação da onda aplicada ao ensaio SPT.

Dentre os resultados obtidos pelo referido autor, pode-se destacar que ao final do evento dinâmico o valor real da altura de queda do martelo, a despeito de  $H=750$  mm, valor normatizado, pode ser estimado como  $H+\Delta H$ , sendo:

$$\Delta H = 30 \text{ cm}/N_{SPT} \quad [2.3]$$

Dessa forma, como apresentado na Figura 2.2, pode-se construir o gráfico apresentando a relação entre a altura de queda e o referencial absoluto do ensaio.

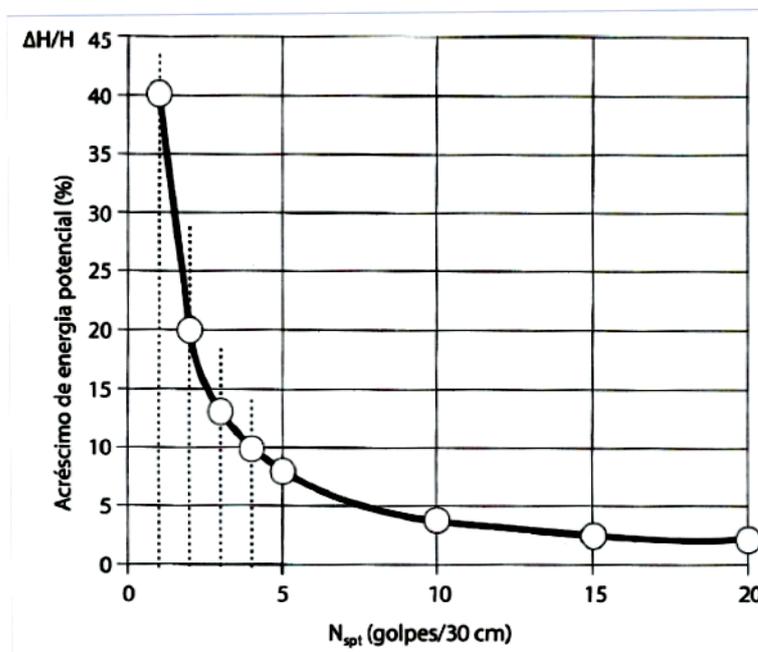


Figura 2.2 – Gráfico do acréscimo de energia potencial em função do N<sub>SPT</sub>. (Cintra *et al.*, 2013).

## 2.2. CONE PENETRATION TEST (CPT)

Uma opção cada vez mais difundida nos projetos geotécnicos no mundo, sobretudo em países Europeus como Holanda, França, Bélgica, entre outros, é o ensaio de penetração do Cone (CPT). Trata-se de um ensaio de campo especialmente adequado para deltas dos rios e solos moles.

Diferentemente do SPT, o ensaio CPT não está sujeito às variações devido ao operador, além de apresentar um registro contínuo da resistência à penetração e uma descrição da estratigrafia do subsolo em prospecção.

Outra vantagem apresentada por Aoki e Brito (1970) reside na possibilidade de ultrapassar camadas muito resistentes de solo, não havendo a necessidade de lavagem e/ou recirculação de água, bem como a ausência da necessidade de revestimento no furo de sondagem.

No desenvolvimento deste capítulo serão apresentados conceitos acerca da evolução cronológica, definições, procedimentos e resultados do ensaio de campo, bem como as diversas inovações e ensaios adicionais que tem como base a utilização do ensaio do cone.

### **2.2.1. Cone Mecânico**

Segundo Lunne *et al.* (1997), o primeiro ensaio de penetração do cone, chamado por muito tempo de *cone holandês*, foi realizado por Barentsen, um engenheiro do departamento de serviços públicos da cidade de Rijkwaterstaat, na Holanda no ano de 1932.

O ensaio consistia na cravação manual de um tubo de gás de 19 mm em cujo interior, uma haste de 15 mm movimentava-se livremente para cima e para baixo e era fixada em sua extremidade uma ponteira cônica de 10cm<sup>2</sup> de área, com um ângulo de 60° de ápice. A medida de resistência do cone era corrigida a partir da subtração do peso das hastes internas, essa leitura era realizada através de manômetros, no entanto as penetrações máximas não ultrapassavam 10 a 12 metros profundidade.

Ainda segundo o autor, a partir de então muitas foram as evoluções alcançadas, tanto pelos equipamentos, quanto ao que diz respeito ao estudo e compreensão das características dos solos. Já em 1935, foi desenvolvido o primeiro equipamento do ensaio do cone com capacidade de 10 toneladas.

Muitos foram os aprimoramentos no ensaio no passar dos anos, no entanto nenhum tão significativo quanto a adição da *luva de atrito*, onde tornou-se possível a determinação de valores de atrito lateral, além de fornecer medidas em menores intervalos de profundidades (0,2 metros).

Outra evolução proposta por Begemann foi a utilização da razão de atrito (Atrito lateral/ resistência de ponta) na classificação das camadas de solo, considerando o comportamento tipo de solo. Na Figura 2.3 podem ser vistas algumas das ponteiras com luva de atrito.

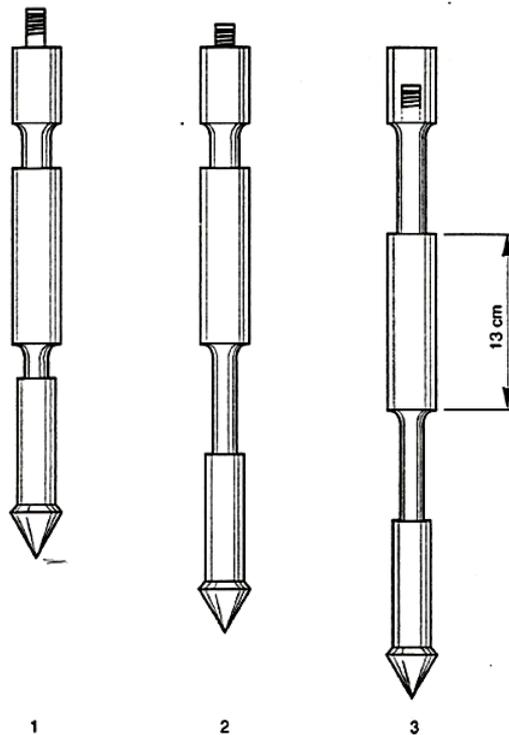


Figura 2.3 -Ponteiras de cone mecânico desenvolvidas por Begemann. (Lunne *et al.*, 1997)

### 2.2.2. Cone Elétrico

Conforme Politano (1999), o primeiro trabalho em que foi possível encontrar detalhes a respeito do projeto do cone elétrico foi no início da década de 1970, onde afirmava que o cone elétrico mais antigo foi o alemão “Maihak” que possuía um sistema de corda vibrante, desenvolvido em Berlim durante a segunda guerra mundial.

Como os sinais eram transmitidos através de cabos no interior das hastes, alguns dos problemas apresentados pelo cone mecânico foram solucionados, Lunne *et al.* (1997) os apresenta:

- Eliminação da possibilidade de erro de interpretação dos resultados dos ensaios devido ao atrito entre as hastes internas e os tubos externos;
- Proporcionar um ensaio contínuo, isto é, com uma taxa de penetração contínua no solo;

- A simplicidade e confiabilidade das medidas elétricas de resistência de ponta, com a possibilidade de leituras contínuas e facilidade de gravação dos resultados.

Um dos primeiros esquemas de cone elétrico pode ser visualizado na Figura 2.4.

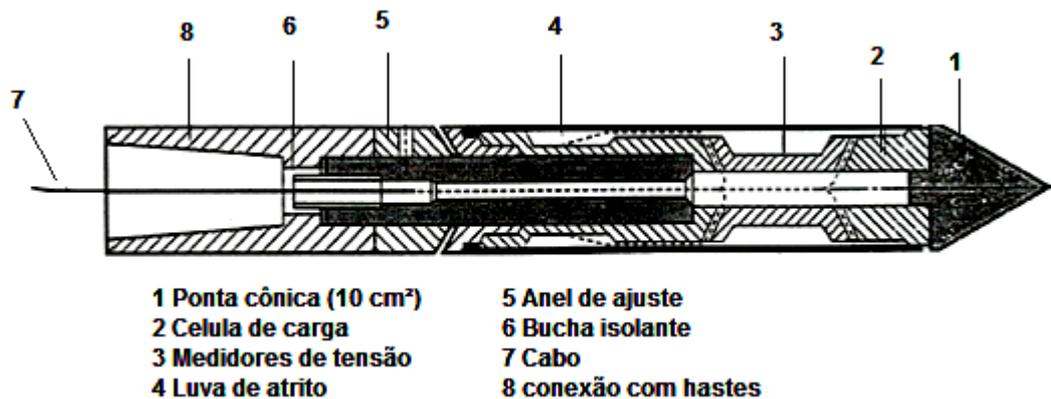


Figura 2.4 –Esquema dos componentes do cone Elétrico. (Lunne *et al.*, 1997)

Um dos principais problemas do cone elétrico, era a possibilidade de desvio da vertical, que poderiam ocorrer devido aos desvios das composições das hastes mais próximas das ponteiras, bem como às obstruções por pedras e a sucessão de camadas de solos moles e duros, portanto para ensaios cujas profundidades fossem superiores aos 25 metros o autor sugeriu a introdução de um inclinômetro no interior do cone.

### 2.2.3. Piezocone

Um dos maiores avanços da primeira conferência europeia de ensaios de penetração (ESOPT-1), que ocorreu na Dinamarca em 1974, foi a apresentação de vários exemplos de medidas de poro-pressão durante a penetração do cone, segundo Lunne *et al.* (1997).

Wissa *et al* (1975) (*apud* Politano, 1999), desenvolveu uma sonda, com o objetivo de obter pressões em condições de equilíbrio, onde tornou-se possível obter padrões de percolação através de barragens, bem como os excessos de poro-pressões gerados durante um pré-carregamento.

Esse equipamento consistia em uma sonda com uma ponta cônica de 20° de inclinação do eixo em relação a sua geratriz, onde na sua extremidade se localizava um elemento poroso cilíndrico conectado hidraulicamente a um transdutor elétrico de pressão. Essa sonda era cravada a uma velocidade constante de 0,5 cm/s, sendo a cravação interrompida nas cotas onde se desejava medir a poro-pressão.

Só em 1980 os piezocones assumiram a forma como conhecidos hoje, a partir da adição de um elemento poroso para a aferição da pressão neutra, nos cones elétricos convencionais, sendo conhecido pela sigla CPTu. A Figura 2.5 mostra a ponteira de um piezocone.

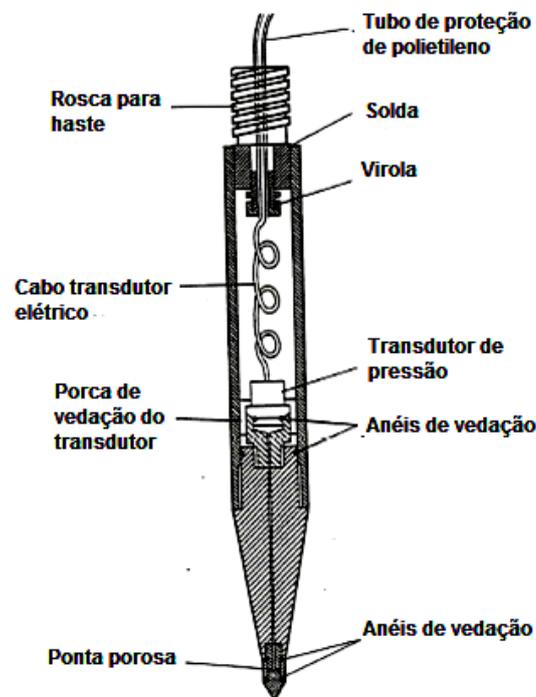


Figura 2.5 –componentes do Piezocone. (Lunne *et al.*, 1997).

A maneira tradicional da apresentação dos resultados do ensaio do cone (CPT e/ou CPTu), é a plotagem dos valores de resistência de ponta  $q_c$ , Atrito lateral, poro-pressão e demais parâmetros do solo, em função da profundidade de sondagem.

O primeiro parâmetro que se pode intuir a partir desses resultados é a chamada razão de atrito, ou seja a relação entre o Atrito lateral  $f_s$  e a resistência de ponta  $q_c$ , representada simplesmente por  $R_f$ .

Dessa forma em um ensaio realizado com um cone elétrico é possível obter dados relacionados a resistência do cone (ponta) e Atrito lateral, demais grandezas poderão ser derivadas destas. A Figura 2.6 apresenta uma típica apresentação de resultados para um solo que apresenta certa estratificação.

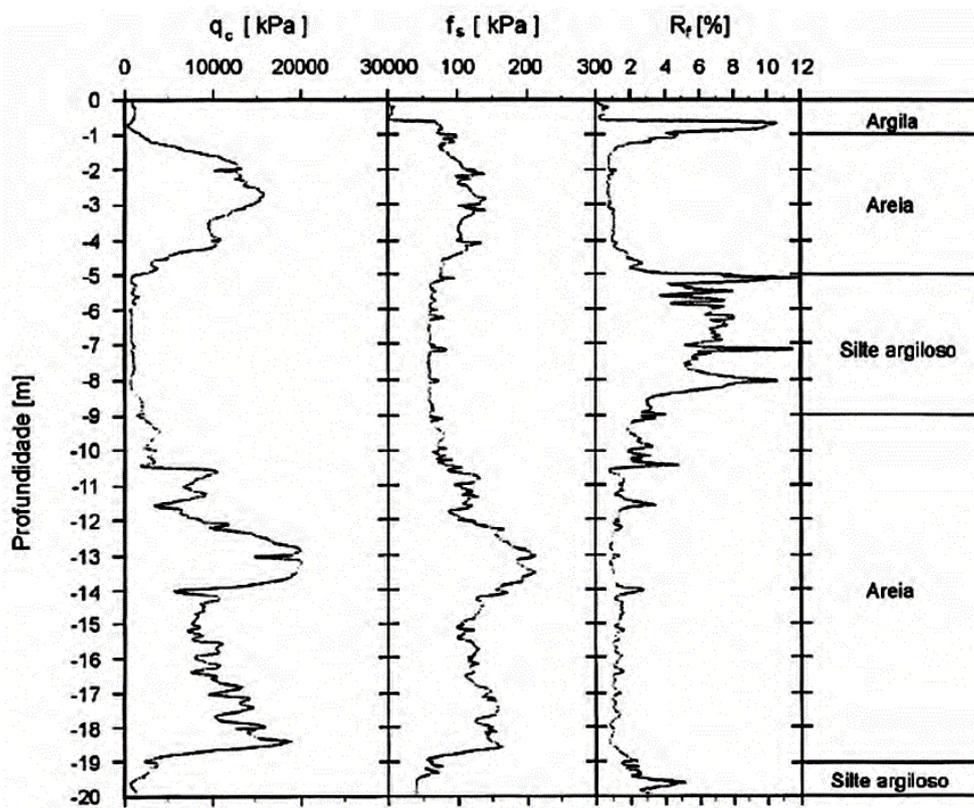


Figura 2.6 –Apresentação dos resultados do ensaio CPT. Schnaid e Odebrecht (2012).

Em se tratando da possibilidade de aferição da poro-pressão, nesse caso no ensaio classificado como CPTu, como apresentado anteriormente, os parâmetros apresentados no ensaio CPT convencional poderão ser complementados com as medidas de poro-pressão decorrentes do próprio processo de cravação, tornando-se possível a classificação do tipo do solo através do parâmetro  $B_q$ , expresso por:

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}} \quad [2.4]$$

Onde,

$B_q$  é o parâmetro de classificação do solo;

$u_2$  é a medida de poro-pressão realizada na base do cone;

$u_0$  é a pressão hidrostática;

$q_t$  é a resistência real mobilizada no ensaio;

$\sigma_{vo}$  tensão vertical *in situ*.

Com a adoção dessa medida, além da classificação dos solos no que diz respeito a como eles se comportam, proporcionou-se uma ampliação da sensibilidade a mudança de materiais e dessa forma a estratificação dos perfis, sendo possível a percepção de camadas mais finas.

Dessa forma Robertson (2010), define como parâmetro para a classificação do tipo de comportamento do solo, o índice  $I_c$  ou  $I_{SBT}$  - Soil Behavior Type Index- em função da resistência de ponta  $q_c$  ou resistência de ponta corrigida  $q_t$  e da razão de atrito  $R_f$ , segundo a equação 2.5.

$$I_{SBT} = \left[ \left( 3,47 - \log \left( \frac{q_c}{p_a} \right) \right)^2 + \left( \log(R_f + 1,22) \right)^2 \right]^{0,5} \quad [2.5]$$

As cartas de classificação de solos a partir da medição dos parâmetros resistência de ponta, atrito lateral e poro-pressão, propostas por Robertson et al. (1986) (*apud* Schnaid, 2000) utilizam uma metodologia que relaciona  $q_t$ ,  $F_r$  e  $B_q$ , ou seja, parâmetros normalizados para o efeito da tensão efetiva vertical. A

Figura 2.7 apresenta as cartas de classificação do tipo de solo de acordo com o ensaio CPTu.

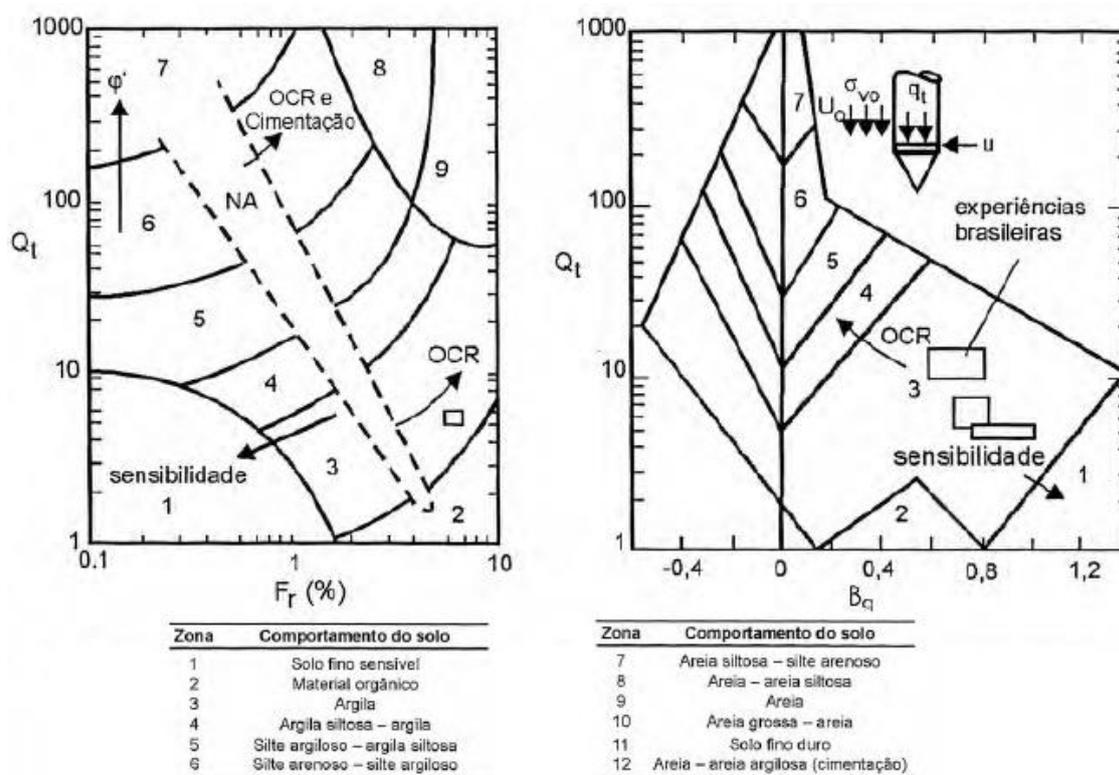


Figura 2.7 – Cartas de classificação do tipo solo de acordo com o ensaio CPTu (Robertson et al., 1986 apud Schnaid, 2000).

## 2.2.4. Ensaios Adicionais

Com o desenvolvimento de novas tecnologias e a possibilidade de implementação destas para a obtenção de parâmetros, outrora considerado irrelevantes ou mesmo desconsiderados devido á imprecisão dos equipamentos, torna-se cada vez mais uma prática adotada a adição de novos aparelhos (sensores, softwares, ferramentas) em ensaios classicamente fundamentados e empregados em investigações geotécnicas, como é o caso do CPTU.

Outros aprimoramentos no ensaio do cone que podem ser citados são: Sísmico, o Pressiométrico, o Resistivo e mais recentemente equipamentos que utilizam fluorescência induzida por ultravioleta e radiação gama. Mais

informações sobre os equipamentos e processos componentes desses ensaios podem ser vistas em Schnaid e Odebrecht (2012) e Cintra *et al.* (2013).

### **2.3. CORRELAÇÕES ENTRE SPT E CPT**

Muitos engenheiros geotécnicos têm desenvolvido uma considerável experiência em projetos de fundações fundamentados em correlações locais entre os ensaios SPT e CPT, fato esse reforçado pela disseminação da utilização do ensaio SPT no Brasil, visto que mais de 90% dos projetos de fundações se baseiam nesse tipo de sondagem.

Dessa forma esse item tem a finalidade de elencar alguns tipos de correlações SPT-CPT difundidas na literatura, entre elas algumas assimiladas pelos métodos de dimensionamento de fundações por estacas.

Estudos com a finalidade de criar correlações que possam estimar o valor de  $q_c$ , determinado em ensaio de campo, por uma aproximação estatística utilizando dados do SPT já vêm sendo realizados em vários países, para vários tipos de solos, onde se pode citar Schmertmann e Palácios (1979); Robertson e Campanella (1983); Kasim *et al.* (1986); Chan *et al.* (1988); Danziger e Velloso (1995); Politano (1999); Akca (2003); Kara e Gunduz (2010); Shahri e Juhlin (2014), entre outros.

No entanto, poucos são os trabalhos que explicitam informações referentes aos processos estatísticos utilizados no desenvolvimento das correlações entre esses ensaios. Em alguns desses trabalhos é possível que os valores calculados tenham sido alcançados a partir das médias da relação índice de resistência a penetração e resistência de ponta, simplesmente. Outra preocupação diz respeito a escassez de informação sobre a correção de  $N_{SPT}$  para a energia padrão de 60% ( $N_{60}$ ).

Segundo Alonso (1980) correlações estatísticas baseadas em equações lineares passando pela origem, tem sido muito empregada por pesquisadores, sobretudo quando se tratam de solos granulares, como as areias.

As correlações mais comumente utilizadas entre os ensaios SPT e CPT são aquelas fundamentadas nas médias aritméticas, e desenvolvidas a partir de

funções lineares. As formas mais utilizadas de correlações são apresentadas na equação 2.6 e 2.7.

$$q_c = kN_{SPT} \quad [2.6]$$

$$q_c = a + kN_{SPT} \quad [2.7]$$

em que a e k são constantes.

O início do desenvolvimento de correlações que envolvam outras variáveis como o tamanho dos grãos é atribuído a Robertson e Campanella (1983), que a partir de uma coleta de várias correlações, sugeriram compará-las com valores do diâmetro médio das partículas ( $D_{50}$ ), observando-se o crescimento da relação  $q_c/N_{SPT}$  com o aumento do  $D_{50}$ , bem como o crescimento da dispersão com o aumento de  $D_{50}$ , como mostra a Figura 2.8.

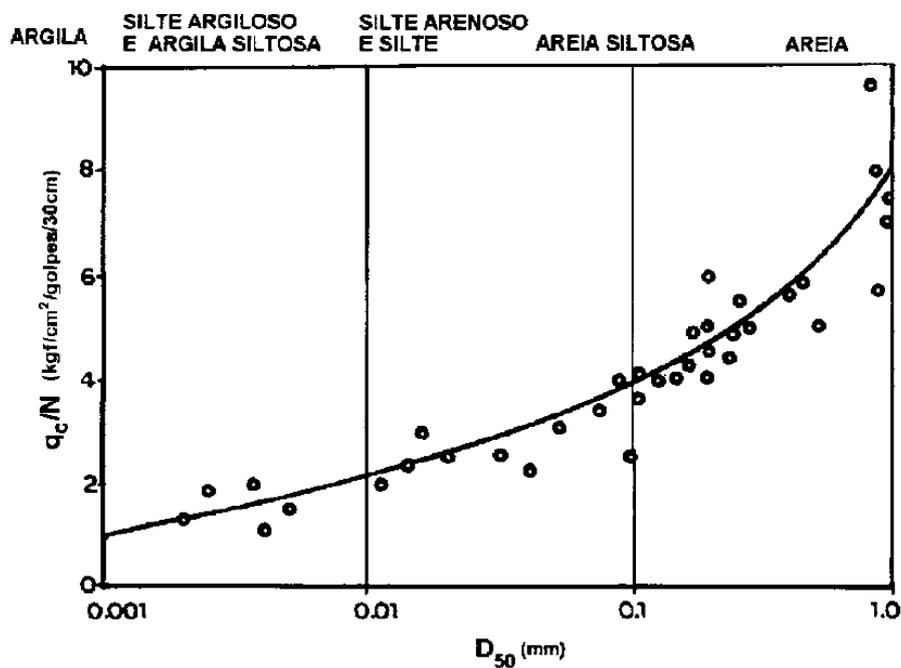


Figura 2.8 - Relação  $q_c/N_{SPT}$  com o aumento do  $D_{50}$ . Robertson e Campanella (1983).

Outro aspecto importante relacionado a granulometria dos solos, no estabelecimento de correlações entre os ensaios foi abordado por Chan et al. (1988), ao observar a influência da porcentagem de finos no comportamento da razão entre resistência de ponta  $q_c$  e  $N_{SPT}$ . O autor concluiu que a razão  $q_c/N_{SPT}$  é muito menor para areias com grandes porcentagens de finos em comparação com as areias limpas.

Acka (2003) desenvolveu um trabalho nos Emirados Árabes Unidos, utilizando como banco de dados 65 boletins de sondagens SPT e 101 furos de sondagem CPT. Nesse trabalho o autor separou os dados em dois grandes grupos de acordo com a proximidade, utilizando médias simples para o grupo de sondagens próximas e métodos geoestatísticos deterministas para as sondagens SPT que se distanciassem das sondagens CPT (Método IDW).

Kara e Gunduz (2010) realizaram análises com resultados de 65 sondagens SPT e 47 sondagens CPT, totalizando 611 pares de dados para correlação. Correlações lineares entre  $N_{SPT}$  e  $q_c$  foram calculadas a partir da média aritmética simples com todos os dados, fornecendo valores de  $k$  iguais a 0,42, 0,35 e 0,19 MPa para areia, silte e argila, respectivamente. Os autores também propuseram correlações não lineares do tipo exponencial, obtidas por exclusão dos dados que estavam fora da faixa compreendida entre  $\pm 2\sigma$ , sendo  $\sigma$  o desvio padrão.

Estudos semelhantes também foram realizados no Irã, por Salehzadeh et al. (2011), obtendo correlações entre resistência de ponta  $q_c$  e  $N_{SPT}$ , considerando a influência de parâmetros geotécnicos como ângulo de atrito interno dos grãos, poro-pressão, porcentagem de finos e diâmetros médios das partículas. Nesse estudo o autor utilizou na estimativa das correlações uma regressão polinomial evolucionária (Evolutionary polynomial Regression) que combina uma série de fatores comuns a regressões polinomiais ordinárias com um algoritmo genético (Genetic Algorithm).

Elkateb e Ali (2010), apresentam o desenvolvimento de correlações para areias calcárias da região do Golfo Pérsico, em que além de expor a relação da resistência de ponta e do índice de resistência a penetração corrigido quanto a energia de 60% ( $N_{60}$ ), também os apresenta em função da quantidade de finos presentes nos solos e do diâmetro médio da partícula ( $D_{50}$ ), como pode ser visto na Figura 2.9:

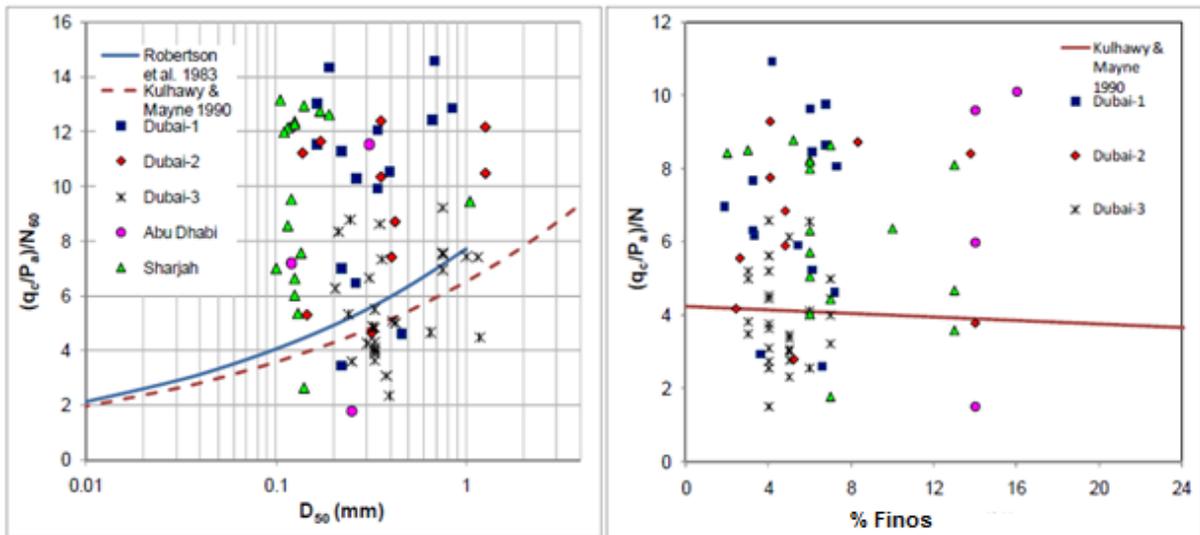


Figura 2.9 – Correlações com  $D_{50}$  obtidas no trabalho de Elkateb e Ali (2010).

Outra contribuição significativa é a apresentação da possibilidade de relacionamento dos parâmetros já citados com o Índice do tipo de comportamento do solo  $I_c$ , utilizado na classificação dos solos no ensaio do cone, como se apresenta na Figura 2.10. Pode-se notar o comportamento decrescente dos valores das correlações com o aumento do  $I_c$ , o que evidencia a relação que há de ganho de resistência para solos de  $I_c$  mais elevado, como as areias (Elkateb e Ali, 2010). Nesse estudo o autor encontrou correlações  $q_c/N_{SPT}$  para a areia siltosa com valores de  $k$  entre 0,41 e 0,65 MPa, utilizando funções lineares passando pela origem.

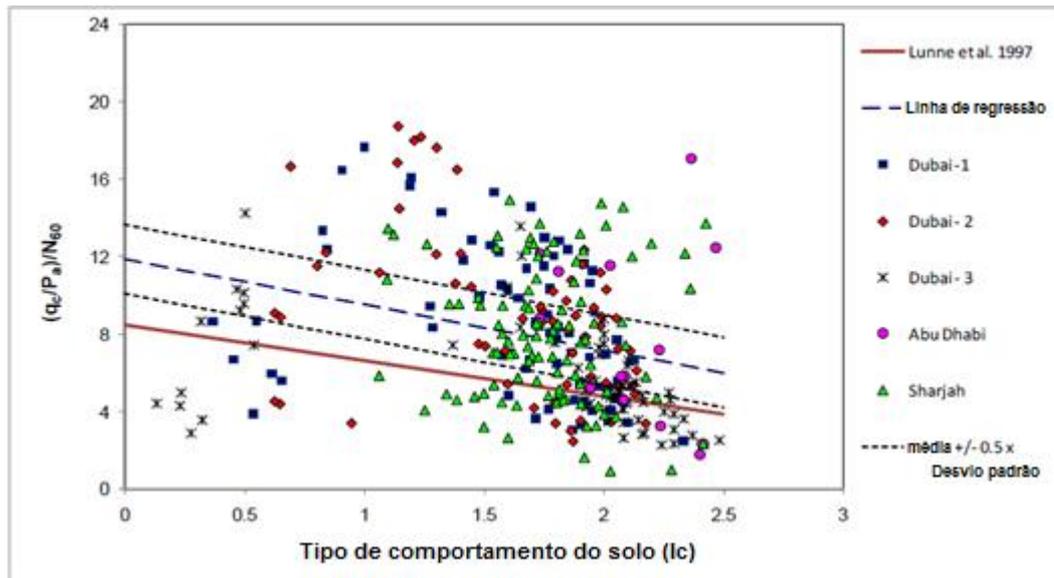


Figura 2.10 – Correlações com  $I_c$  obtidas no trabalho de Elkateb e Ali (2010).

Mais recentemente Sharih e Juhlin (2014), utilizou software simples em plataforma de linguagem C#, para correlacionar resultados de ensaio do cone e SPT, situados em depósitos de argila marinha do vale do rio Gota, na Suécia. Para esse estudo todos os valores de resistência de ponta foram normalizados, a partir de então determinou-se o índice de comportamento do solo  $I_c$  (Soil Behavior Type) e procedeu-se com a classificação e definiram-se correlações separadamente para cada tipo de solo encontrado na região.

Conforme o autor, primeiramente foram determinadas correlações para os dados brutos, utilizando ajuste lineares e aproximações utilizando funções exponenciais. Da mesma maneira se procedeu utilizando os dados depois de normalizados e, em uma análise final, as correlações foram estabelecidas após a aplicação de um filtro estatístico, resultando em valores de  $k$  para a areia siltosa em um intervalo de 0,44 a 0,46 MPa.

Em se tratando de estudos realizados em solos brasileiros, Velloso foi precursor nos estudos de correlações entre ensaios SPT e CPT no fim da década de 1950, tendo desenvolvido um trabalho que expunha valores de correlações obtidos através de um estudo estatístico realizado pela Estacas Franki Ltda (Politano, 1999). Os valores de  $k$ , bem como os números de pares de dados relacionados e os tipos de solos são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Correlações para solos brasileiros (Velloso, 1959, *apud*. Politano, 1999).

Solo	Nº de pares	K (MPa)
Argila, Argila siltosa, Silte argiloso	202	0,35
Argila arenosa e Silto-arenosa	120	0,20
Silte arenoso	131	0,35
Areia argilosa	104	0,60
Areia	122	1,00

Percebe-se a partir dos dados apresentados que para correlações lineares os valores de resistência de ponta do CPT tendem a ser subestimados quando relacionados com índices de resistência a penetração  $N_{spt}$  reduzidos. De maneira inversa,  $q_c$  tende a ser superestimados para valores elevados de  $N_{spt}$ , como pode ser visto na Figura 2.11.

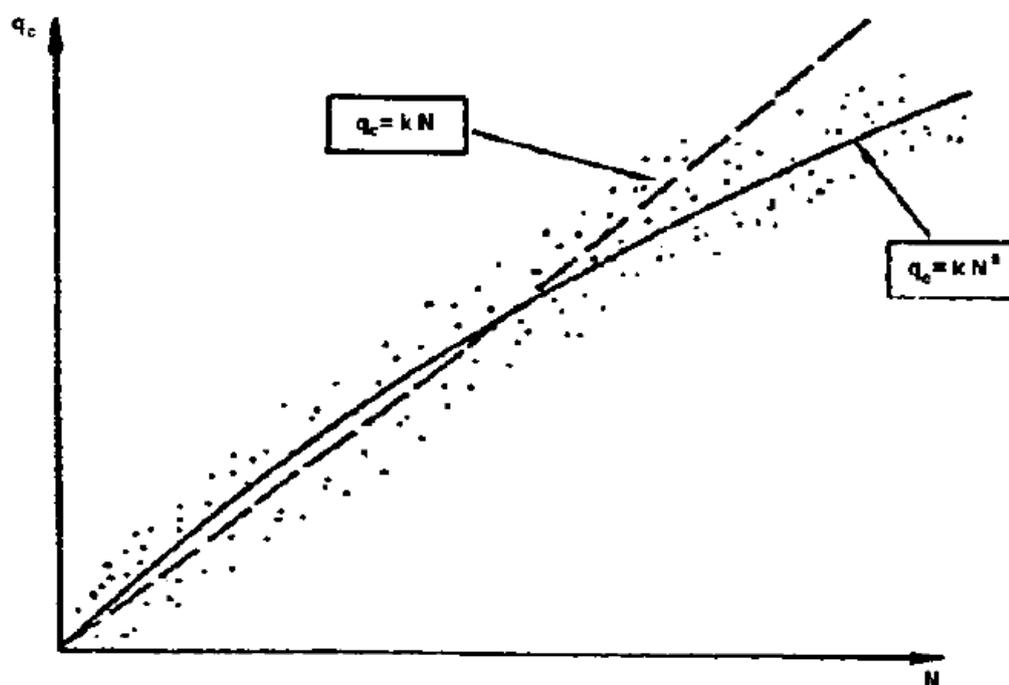


Figura 2.11 - Relação entre os valores de N e resistência de ponta (Velloso, 1959 *apud*. Politano, 1999).

A Tabela 2.3 apresenta uma compilação de valores de  $k = q_c/N_{SPT}$  propostos para solos brasileiros. Ressalta-se que algumas correlações foram propostas para valores não corrigidos de  $N_{SPT}$ .

Tabela 2.3- valores de correlações para solos brasileiros

Referência	Solo	k (MPa)
Aoki e Velloso (1975)*	Areia	1,00
	Areia Siltosa	0,80
	Areia Argilosa	0,60
	Silte	0,40
	Silte Arenoso	0,55
	Argila Arenosa	0,35
	Silte Argiloso	0,23
	Argila	0,20
Barata et al. (1978)*	Argila Silto-Arenosa	0,15 – 0,25
	Areia Silto-Argilosa	0,20 – 0,35
Danziger e Velloso (1986*, 1995)	Silte, Silte arenoso, Argila arenosa	0,48
	Silte Areno-argiloso, Silte Argilo-arenoso, Argila silto-arenosa, argila	
Danziger et al. (1998)	areno-siltosa	0,38
	Silte argiloso	0,30
	Argila, Argila Siltosa	0,25
	Areia	0,57
	Areia siltosa, Argila Siltosa	0,50 – 0,64
	Silte argiloso	0,31
	Argila Arenosa	0,18 – 0,35
Argila	0,45	

\* $N_{SPT}$  Não corrigido para eficiência de 60%

Em um estudo mais recente, Naime e Fiori (2002), observaram a influência dos fatores geológicos na relação entre a resistência de ponta  $q_c$  com o índice de resistência a penetração  $N_{SPT}$ , bem como a variação dessa relação com a profundidade, para solos residuais na região sul do Brasil. Nesse estudo foi observado como o estágio de maturidade, as condições geomorfológicas e a influência de uma zona de falha onde esses materiais se encontravam, afetam os resultados obtidos nos ensaios SPT e CPT e dessa forma, as correlações posteriormente determinadas entre estes ensaios. A Figura 2.12 apresenta aplicação de função linear com coeficiente linear diferente de zero para estimativa de correlações para solos aluvionares de planícies de inundação. O

que se percebe é uma boa aproximação da função, evidenciado pelo coeficiente de determinação razoavelmente elevado.

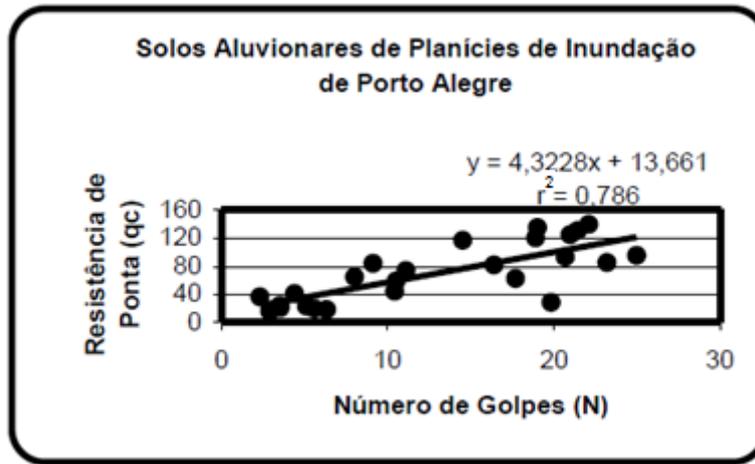


Figura 2.12- correlação para solo aluvionar de planície de inundação (Naime e Fiori, 2002).

Souza (2009) estabeleceu correlações entre os ensaios SPT e CPT para areias para diferentes compacidades. A Figura 2.13 apresenta uma função exponencial entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  ajustada aos dados globais, ou seja, para todas as faixas de compacidade estudadas.

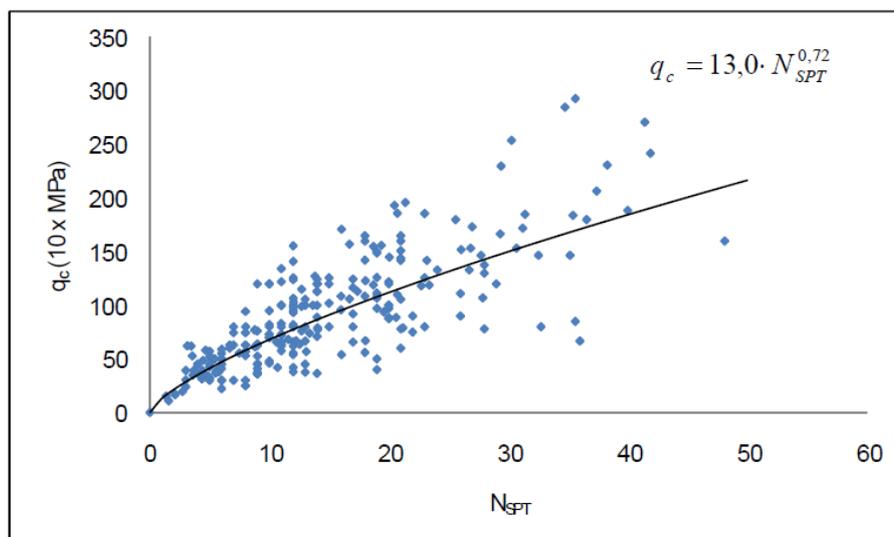


Figura 2.13- Correlação considerando todas as faixas de compacidade relativa das areias (Souza, 2009)

## **2.4. GEOESTATÍSTICA**

Este item abordará, de maneira sucinta ideias essenciais ao desenvolvimento desse trabalho, no que concerne a origem, conceituação e aplicação da geoestatística como ferramenta de análise da variabilidade espacial das características do solo, especificamente.

### **2.4.1. Generalidades**

A geoestatística, da maneira como é conhecida hoje, nasceu em meados da década de 1950, na África do Sul devido a necessidade de estimativas do comportamento de jazidas de ouro. Este estudo iniciou-se com a publicação dos resultados do trabalho do sul-africano Daniel Krige.

No entanto, o termo Geoestatística, bem como o emprego do variograma, foi primeiramente utilizado pelo engenheiro francês Georges Matheron, que considerava essa área do conhecimento como uma implementação dos conceitos das funções aleatórias, visando o reconhecimento e estimativa de eventos naturais (Andriotti, 2003).

Para Soares (2006) a geoestatística é a ferramenta que tem por objetivo a caracterização da dispersão espacial e espaço-temporal das grandezas que definem a quantidade e qualidade de recursos naturais. O problema básico a ser resolvido com essa ferramenta é o da caracterização da distribuição espacial daquelas grandezas e o da avaliação das medidas de incerteza, considerando a maior ou menor variabilidade do fenômeno espacial, a qualidade das amostras e o quanto se conhece do fenômeno estudado.

Já de acordo com Hengl (2009), o sucesso da geoestatística como ferramenta de análise de variação espacial pode ser explicado pela gama de problemas que podem ser estudados utilizando de seus fundamentos, tais como: meteorologia, mapeamento do solo, ecologia, oceanografia, geoquímica, epidemiologia, geografia humana, geomorfologia e etc.

## 2.4.2. Variáveis Regionalizadas

Para tornar possível o entendimento prático da geoestatística, se faz necessária a compreensão do conceito de variáveis regionalizadas, que segundo Andriotti (2003), Matheron foi quem primeiro o descreveu, com o propósito de evidenciar a contradição inerente ao próprio termo e que se estende aos fenômenos estudados. Dessa forma, ao mesmo tempo que os valores das medições podem variar consideravelmente entre si (“variáveis”), ainda assim sua distribuição apresenta certa estrutura que obedece determinada lei no espaço (“regionalizada”).

Na Figura 2.14 percebe-se que próximo ao valor reduzido, é mais provável que se meça outro valor reduzido do que um valor elevado. O contrário é verdadeiro, o que fortalece o pressuposto da importância das coordenadas espaciais na expectativa dos valores das amostras.

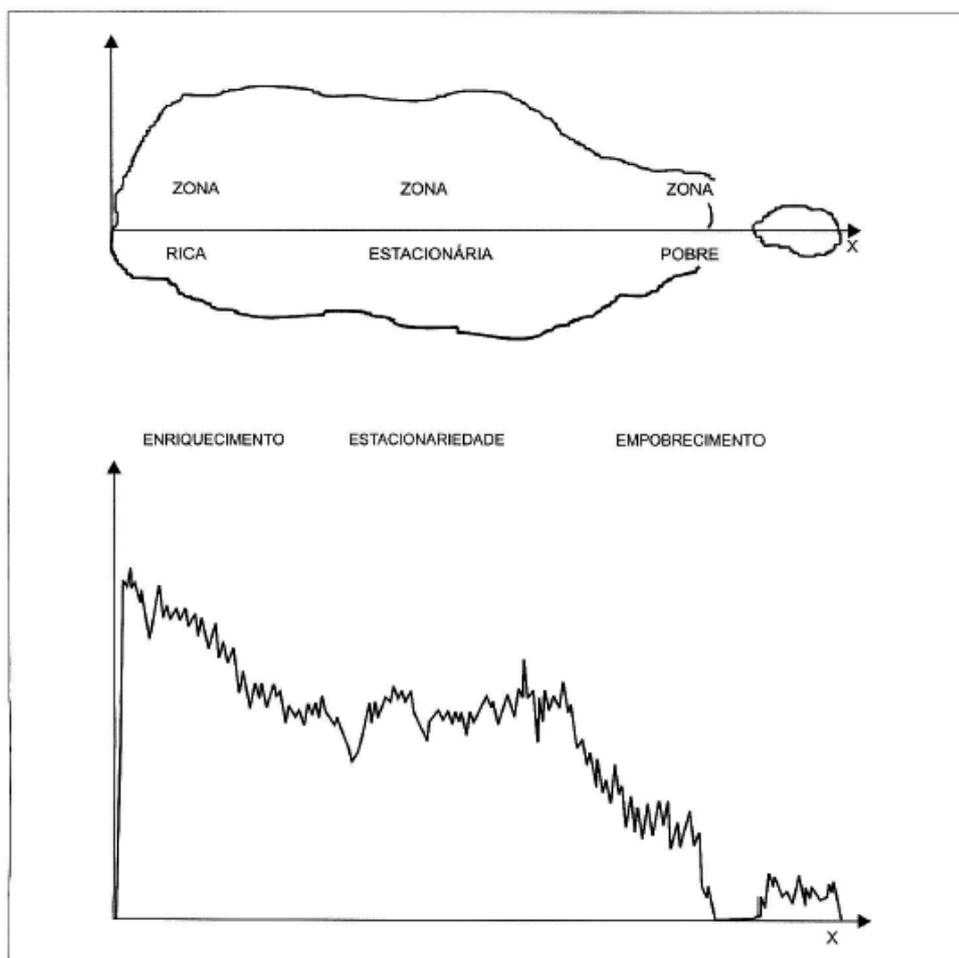


Figura 2.14 – Variável regionalizada (Andriotti, 2003).

De acordo com Fonteles (2003), a diferença básica entre as variáveis regionalizadas e as variáveis aleatórias encontra-se nos condicionantes espaciais que caracterizam o fenômeno natural estudado. Tais condicionantes podem ser qualitativos ou características que expressem uma medida da componente espacial. Podem-se citar como condicionantes espaciais a *localização*, a *continuidade* e a *anisotropia*, que serão definidas na sequência.

- *Localização*: diz respeito ao posicionamento espacial e a possibilidade da observação de tendências dentro de um campo geométrico, definido entre outras características pela homogeneidade aceitável.
- *Continuidade*: essa característica pode ser observada através de ocorrências (ou não) de flutuações nas observações da vizinhança, refletindo a dependência ou independência espacial dos valores.
- *Anisotropia*: característica relacionada à direção, em que os valores podem variar consideravelmente com a direção.

### **2.4.3. Variograma (Semivariograma) e Modelos Variográficos**

De acordo com Landim (2011), duas são as principais ferramentas no estudo de variáveis regionalizadas segundo o método geoestatístico: o semivariograma e a krigagem. Este item apresentará informações fundamentais ao entendimento da primeira delas.

Seja  $x(i)$  uma variável regionalizada obtida em diversos pontos  $i$ , distribuídos regularmente. É coerente assumir que há relações entre os valores de pontos separados por determinada distância, sendo também aceitável supor que a influência entre os valores é tão menor quanto maior for a distância que separe estes pontos.

Logo, existindo duas variáveis  $X = Z(x)$  e  $Y = Z(x+h)$ , neste caso ambas referindo-se ao mesmo atributo ( $N_{spt}$ ), observadas em posições diferentes tendo suas coordenadas bidimensionais  $(x_i, y_i)$  representadas por  $x$  e tendo  $h$  como

vetor distância que separa os pontos de coleta, torna-se possível estabelecer uma relação entre o quadrado da diferença dos valores das amostras para cada passo (distância), especificamente, com a finalidade de monitorar a variância (ou semivariância) entre os valores.

Dessa forma o semivariograma torna-se importante, pois evidencia parâmetros que descrevem a variabilidade espacial, bem como a continuidade da variável regionalizada em estudo e sua variância. Para isso, se faz necessário entender as principais características e parâmetros observados na referida função, apresentada na Figura 2.15 e discutida a seguir.

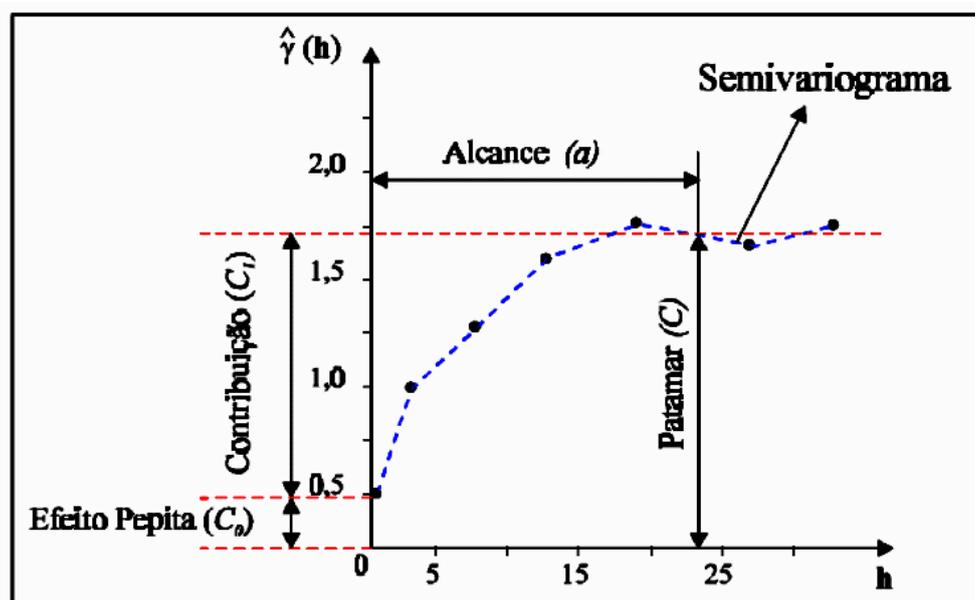


Figura 2.15 – Semivariograma

No gráfico de semivariograma apresentado na Figura 2.15 podem-se destacar as seguintes variáveis:

-Alcance (a): é a distância máxima para a qual as variáveis regionalizadas ainda apresentam correlação.

-Patamar (C): é a coordenada y correspondente ao alcance, ou seja, o valor do semivariograma. A partir desse valor, considera-se que a dependência espacial entre as amostras é desprezível, dado o fato que a variância da diferença entre pares de amostras torna-se mínima com a distância.

-Efeito pepita (C0): é o valor que evidencia descontinuidades no semivariograma quando se observa distâncias menores que a menor distância entre as amostras.

-Contribuição (C1): é a diferença entre o patamar e o efeito pepita.

A expressão matemática que representa a função semivariograma é descrita na equação 2.8.

$$\gamma(h) = (1/2N(h)) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad [2.8]$$

em que:

h = vetor de distância entre os pares observados;

n = número de pares de Z (x + h) e Z (X);

Z (x + h) e Z (x) = variáveis aleatórias em posições x e x + H, respectivamente.

#### **2.4.4. Ajuste do Semivariograma**

Segundo Landim (2011), para o melhor entendimento da variação espacial das amostras, deve-se proceder com o ajuste da curva do semivariograma. Para tanto são encontrados diversos modelos de ajuste, classicamente divididos em modelos com soleira (com patamar) e modelos sem soleira (sem patamar).

##### **2.4.4.1. Modelos com Soleira**

De acordo com Landim (2011), nos modelos com soleira a função variograma cresce com a distância até atingir um patamar (sill) e a partir daí tende a se estabilizar. Os principais modelos encontrados na literatura são o esférico, o exponencial e o gaussiano, como podem ser vistos na Figura 2.16.

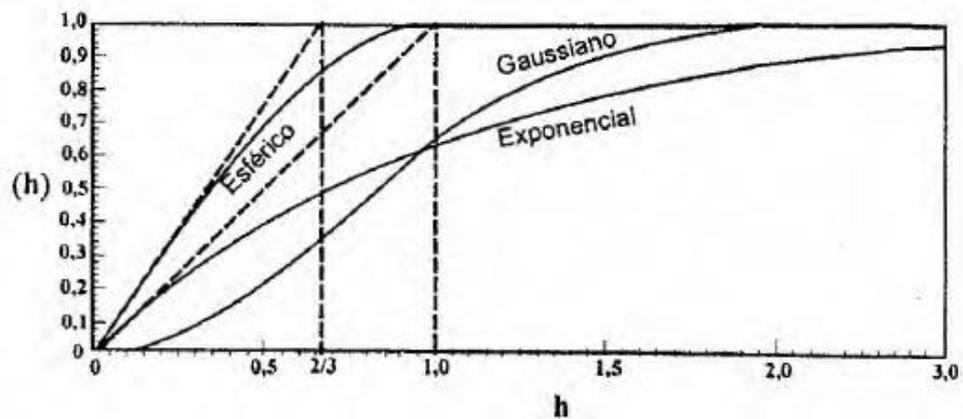


Figura 2.16– Modelos de ajuste com patamar do semivariograma (Landim, 2011)

- Modelo Esférico

No modelo esférico, a função variograma  $\gamma(h)$  é dada por:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a \quad [2.9]$$

$$\gamma(h) = C_0 + C, \text{ para } h \geq a \quad [2.10]$$

em que  $C$  é o patamar e  $a$  é o alcance do variograma.

Este é o modelo mais comum, sendo a inclinação da tangente na origem representada por  $3C/2a$ .

- Modelo Exponencial

Neste modelo, a função variograma  $\gamma(h)$  é dada por:

$$\gamma(h) = C \left[ 1 - e^{-3h/a} \right] \quad [2.11]$$

Neste modelo a inclinação da tangente junto a origem é dada por  $C/a$ .

- Modelo Gaussiano

A função variograma  $\gamma(h)$  é obtida através da equação 2.12 no modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = C \left[ 1 - e^{(-3h/a)^2} \right] \quad [2.12]$$

Nesse modelo, junto a origem a curva apresenta comportamento parabólico, sendo a tangente nesse ponto horizontal, o que indica que para distâncias reduzidas há pequena variabilidade.

#### 2.4.4.2. Modelos sem soleira

Como modelo de semivariograma sem soleira pode-se mencionar o modelo potencial, cuja equação é a seguinte:

$$\gamma(h) = Ch^\alpha \quad [2.13]$$

Em que a potencia  $\alpha$  assume valores entre 0 e 2;

Quando  $\alpha=1$ , o modelo torna-se linear, como pode ser visto na Figura 2.17.

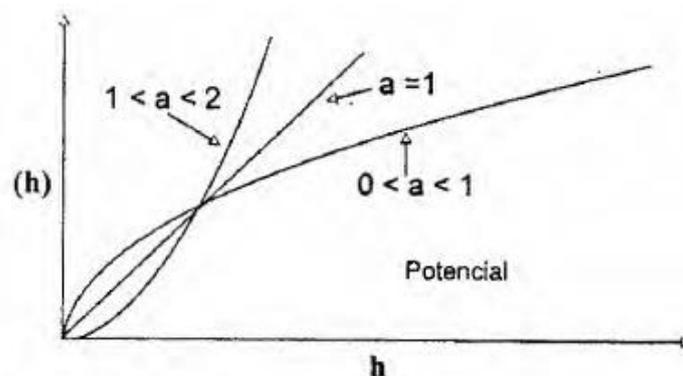


Figura 2.17– Modelos de ajuste sem patamar do semivariograma (Landim, 2011)

### 2.4.5. Inverso Ponderado da distância (IDW)

Os métodos baseados no inverso ponderado da distância (IDW) consistem na atribuição de diferentes pesos às amostras de tal maneira que a influência de determinada amostra em relação a outra diminui com o aumento da distância entre elas. Logo, as amostras localizadas próximo ao ponto a ser estimado recebem peso maior que os pontos mais distantes.

Como principais vantagens dessa ferramenta, Landim (2011) cita:

- É matematicamente simples;
- encontra-se disponível em diversos softwares;
- é indicada para avaliar variações de pequenas amplitudes;
- utiliza pouco tempo de computação;
- tem algoritmo bem conhecido.

A expressão que descreve o método é a seguinte:

$$Z' = \sum_{i=1}^n \frac{z_n}{d_n} \frac{1}{d_n} \quad [2.14]$$

em que  $z'$  é o valor a ser estimado,  $z_n$  são os valores amostrais e  $d_n$  são as distâncias que as amostras  $z_n$  estão do ponto a ser estimado.

É importante ressaltar que existem outras formulações que utilizam no denominador índices de graus diferentes da unidade, como o quadrado e o cubo.

### 2.4.6. Krigagem

Este método geoestatístico tem esse nome devido ao Engenheiro de minas sul-africano Daniel Krige, responsável por difundir a ideia de dependência geoespacial em fenômenos que envolvam os solos e rochas. As principais formas de krigagem são a krigagem simples, a krigagem ordinária e a krigagem universal. Outras técnicas como krigagem são a gaussiana, a indicatriz e a co-krigagem.

Segundo Fontelles (2003) a Krigagem ordinária é a utilização de uma combinação linear de pesos e amostras especificamente nos casos em que os dados estudados se enquadrarem a uma distribuição normal com média e variância conhecidas. Dessa forma esse método tem sido muito difundido, sobretudo na estimativa de recursos minerais.

Na krigagem ordinária a maneira como são empregados os pesos às amostras é semelhante à interpolação por média móvel ponderada. Entretanto, nesse caso os pesos são determinados através de análise espacial baseada no semivariograma experimental. Para este método geoestatístico a estimativa do valor não amostrado é realizada através da combinação linear descrita na Equação 2.15:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad [2.15]$$

em que  $Z^*(x_i)$  representa os  $n$  valores amostrados e  $\lambda_i$ , o peso associado a cada um dos valores  $Z(x_i)$ .

Considerando  $Z^*(x_0)$ , combinação linear de  $Z(x_i)$  para  $i = 1, 2, \dots, n$ , como uma estimativa aleatória, a sua distribuição de probabilidade conjunta dependerá apenas da distância entre as amostras e não de seus valores.

O erro das estimativas é expresso como:

$$R(x_0) = Z^*(x_0) - Z(x_0) \quad [2.16]$$

em que:  $Z(x_0)$  é o valor verdadeiro na posição  $x_0$ .

Quanto à inexistência de tendência, essa condição é atendida a equação [2.16] resultar em zero, indicando que a esperança matemática  $\varepsilon(x_0) = R(x_0)$  não deve ser nula.

Sendo o erro de estimação  $R(x_0)$ , torna-se possível a dedução para uma função aleatória estacionária:

$$E\{R(x_0)\} = E\{Z\} \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \quad [2.17]$$

Com efeito, para o não enviesamento do estimador, necessariamente o somatório dos pesos deverá ser igual a 1.

Já a variância dos erros poderá ser escrita em forma de covariância como:

$$\text{var}\{R(x_0)\} = \text{var}\{Z^*(x_0)\} - \text{var}\{Z(x_0)\} \quad [2.18]$$

∴

$$\text{var}\{R(x_0)\} = \text{covar}\{Z^*(x_0) * Z^*(x_0)\} - \text{covar}\{Z^*(x_0) * Z(x_0)\} + \text{covar}\{Z(x_0) * Z(x_0)\} \quad [2.19]$$

Reescrevendo a Equação 2.19 em termos indiciais e de variância do erro, tem-se:

$$\sigma_r^2 = \sigma^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{io} \quad [2.20]$$

em que  $C_{ij}$  representa a covariância entre as amostras  $i$  e  $j$ .

De acordo com Landim (2011), para a obtenção dos pesos ótimos a variância dos erros da estimativa deverá ser minimizada. Para isso utilizou-se a técnica dos multiplicadores de Lagrange, introduzindo-se mais uma parcela, como mostrado na Equação 2.21.

$$\sigma_r^2 = \sigma^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{io} - 2\mu \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \quad [2.21]$$

em que  $\mu$  é o multiplicador de Lagrange.

A minimização da equação 2.21 é conseguida através de:

$$\frac{\partial \sigma_r^2}{\partial \lambda_i} = 0 \text{ para } i = 1, \dots, n \quad [2.22]$$

$$\frac{\partial \sigma_r^2}{\partial \mu} = 0 \quad [2.23]$$

Isso resulta em um sistema de equações, o qual pode ser expresso de forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & \dots & C_{nn} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ \vdots \\ C_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad [2.24]$$

De acordo com Folle (2009), a matriz 2.24 possibilita a determinação dos pesos  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  pelo métodos de eliminação de Gauss.

Na literatura existem diversos trabalhos que explicam a krigagem com mais profundidade, bem como suas deduções, podendo-se citar: Peres (1998), Fontelles (2003), Folle (2009), Landim (2011), Bezerra (2014), entre outros.

Atualmente existem diversos softwares que possuem pacotes voltados a geoestatística que contém métodos de krigagem, tanto ordinária como universal, co-krigagem entre outros, Alguns softwares são livres e possuem uma interface intuitiva e prática como é o caso do S-gems, utilizado na presente pesquisa.

### 2.4.7. Aplicações

Como já discutido anteriormente, o desenvolvimento da geoestatística como ferramenta de análise de variação espacial vem sendo utilizada desde a década de 1950, entretanto, especificamente no âmbito da engenharia civil, seus conceitos e técnicas apenas começaram a ser aplicados em meados de 1990.

O trabalho de Sturaro (1994), apresentou algumas estimativas de resistência do solo, utilizando técnicas de krigagem ordinária em um banco de dados de sondagens de simples reconhecimento no Rio de Janeiro. Aplicando a co-krigagem, o autor também estimou a cota do impenetrável e a profundidade do nível d'água.

Nos trabalhos de Sturaro e Landim (1996), a partir de mais de 700 boletins de sondagens SPT, foram obtidos mapas de valores médios de  $N_{SPT}$ , através da aplicação da Krigagem ordinária, para uma região situada na cidade de Bauru- SP. Na mesma região, Peres (1998) justificou a verificação de uma acentuada componente aleatória também chamada de efeito pepita, através da análise variográfica, apontando como provável causa as falhas relacionadas à execução e não padronização dos ensaios.

Da mesma forma, no Ceará, Fontelles (2003) caracterizou uma parte da cidade de Fortaleza através de dados de sondagens SPT, sendo possível a elaboração de um banco de dados, a estimativa do nível do lençol freático e o mapeamento do impenetrável, utilizando a krigagem ordinária.

Mendes e Lorandi (2002), analisaram as variações espaciais do SPT em solos colapsíveis do estado de São Paulo, considerando a variação sazonal do nível freático, aplicando a krigagem. Para isso foram analisados 204 furos de sondagens de simples reconhecimento separados de acordo com as datas das medidas de precipitações mensais e anuais.

Folle (2009) apresentou mapas das tipologias do solo utilizando a krigagem universal, para dados da área urbana de Passo Fundo- SC, bem como, utilizando um banco de dados da cidade de Roma (Itália), tornou-se possível a obtenção de um mapa de risco geotécnico, podendo ser usado no planejamento urbano.

Altun et al. (2013), utilizando um banco de dados de 388 furos de sondagens de simples reconhecimento na Turquia, aplicou a krigagem ordinária para diferentes profundidades, corrigindo os valores do SPT para energia de cravação, profundidade, diâmetro do furo, entre outras. Nesse estudo foi feita uma análise variográfica que possibilitou a estimativa mais segura da capacidade de carga de fundações.

Bezerra (2014) apresentou uma implementação de ferramentas de análise variográfica e geoestatística através da utilização de plataformas de simples utilização e fácil acesso, como planilhas do programa *Excel* e rotinas no programa *Matlab*, de maneira a racionalizar o planejamento e dimensionamento de sistemas de fundações por estacas. O autor utilizou krigagem ordinária, universal e indicativa. O referido estudo possibilitou a estimativa da capacidade de carga a partir de bancos de dados de sondagens de simples reconhecimento.

## CAPITULO 3

# Materiais e Métodos

### 3.1. Local de Realização da Investigação do Subsolo

Todos os dados utilizados neste estudo são de ensaios realizados na cidade de Natal-RN, no bairro de Lagoa Nova, especificamente na investigação geotécnica da obra do estádio de futebol Arena das Dunas (Figura 3.1).

Os boletins de sondagem foram cedidos para esta pesquisa mediante autorização da secretária de obras da Copa do Mundo de Futebol (Secopa), órgão do estado do Rio grande do Norte responsável pela gestão da obra.



Figura 3.1 - Localização da obra onde foram feitas as sondagens. Fonte: Google (2015).

### 3.2. Características Geológicas do Local

De acordo com Gusmão Filho (1982), a cidade de Natal – RN, assim como a grande maioria das capitais nordestinas, tem como solos predominantes na sua superfície, as areias finas e fofas, frequentemente siltosas.

No que diz respeito às características geológicas do subsolo da região, Silva *et al.* (2002) e Angelim *et al.* (2006), caracterizam-no como uma área formada por depósitos colúvio-eluviais: sedimentos areno-argilosos, arenosos e conglomeráticos, inconsolidados, em caráter mais específico, predominam materiais formados por sedimentos de origem eólica. De acordo com Jesus (2002), a geologia da cidade de Natal é essencialmente constituída por materiais de origem sedimentar, sendo fundamentalmente inserido no grupo Barreiras, ou seja, no grupo que compreende os sedimentos cenozoicos que afloram ao longo do litoral oriental brasileiro. A Figura 3.2 ilustra a geologia de Natal. Pode-se observar o grupo geológico Barreiras, bem como a ocorrência de areias de dunas como solo superficial.

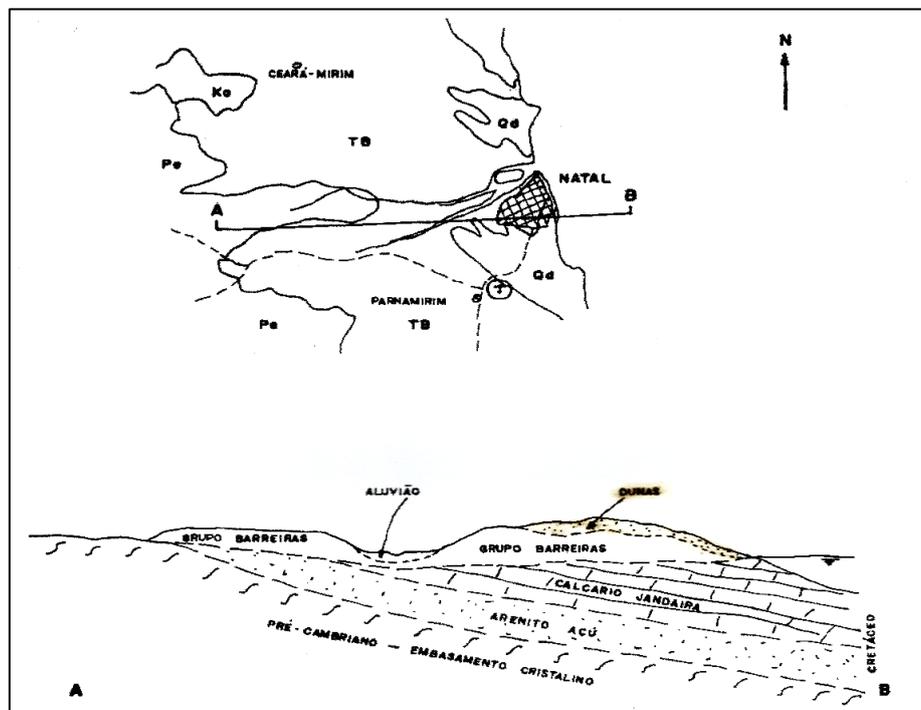


Figura 3.2 – Seção típica do subsolo da Cidade do Natal (Gusmão Filho, 1982).

### **3.3. Investigação do Subsolo**

Oitenta e oito perfurações SPT e oito furos de CPT foram levadas a cabo numa zona de 45100 m<sup>2</sup>, onde o estádio foi construído. A Figura 3.3 mostra a distribuição dos furos CPT no local, dentro dos limites do estádio. As sondagens SPT também foram distribuídas dentro dos limites do estádio. A localização das sondagens SPT dentro da projeção do estádio é apresentada no Anexo 1.

Os furos SPT atingiram profundidades máximas que variam de 15 m a 26 m. O número de golpes foi coletado dentro de cada metro abaixo da superfície do solo e corresponde à cravação dos últimos 300 mm de um amostrador de 450 mm de comprimento. Os testes SPT foram executados de acordo com a norma brasileira NBR 6484. Número de golpes SPT foram corrigidos para 60% de eficiência ( $N_{60}$ ).

Os furos CPT atingiram profundidades máximas de 22 m. A fim de permitir que comparações com os resultados SPT, a resistência de ponta de cone média ( $q_c$ ) e a resistência de atrito Lateral ( $f_s$ ) foram calculadas a partir dos perfis de CPT, no mesmo intervalo de profundidade de determinação do número  $N_{SPT}$  dentro do solo. Os testes CPT foram realizados seguindo a Norma Brasileira NBR 12069.

### **3.4. Características do Subsolo**

A Figura 3.4 mostra um perfil simplificado do local estudado, bem como os resultados de oito testes de CPT. As medições da resistência de ponta cone,  $q_c$ , e atrito lateral,  $f_s$ , obtidos com os testes CPT, são plotados com a profundidade. O subsolo é composto por uma camada superficial de areia pura com uma espessura de cerca de 3 m. Este é um meio classificado como areia mal graduada (SP) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos. Debaixo da camada de areia encontra-se um depósito de areia siltosa (SM), com finos não plásticos, com  $D_{50} = 0,15$  mm. Baseadas no tipo de comportamento do solo (SBT) cartas do CPT foram usados para classificar o

solo (Robertson, 2010). As camadas de solo no perfil foram classificadas como zona SBT 6 (areia limpa a areia siltosa).

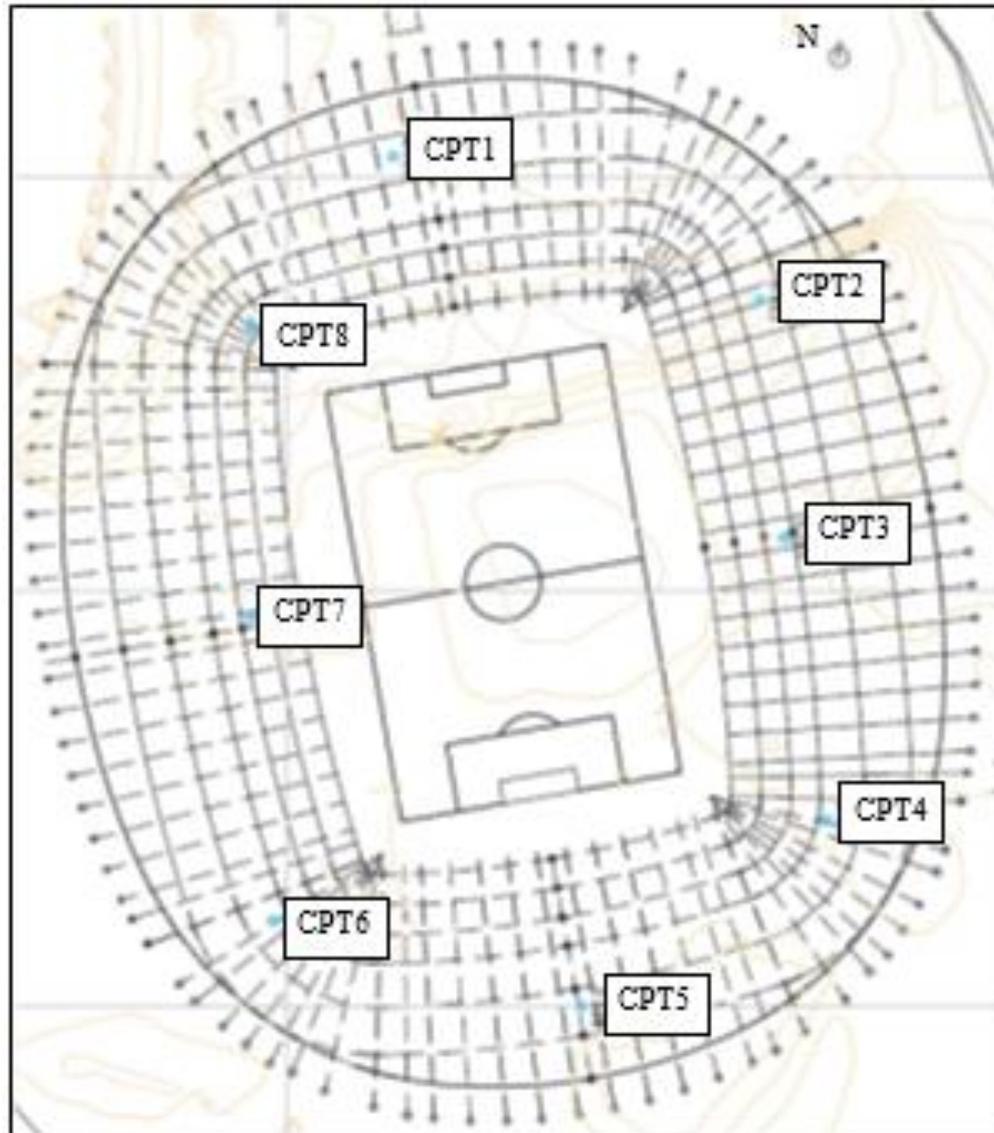


Figura 3.3. Localização das sondagens CPT.

A Figura 3.5 mostra gráficos de  $N_{SPT}$  com profundidade para todos os 88 furos. A média  $N_{SPT}$  e o intervalo de desvio de  $N_{SPT}$  a partir da média são também mostrados na Figura 3.5 (linha grossa e as linhas tracejadas, respectivamente). A Figura 3.5 é uma boa indicação da grande variabilidade espacial do subsolo investigada. A ampla dispersão dos dados também indica a necessidade de divisão subsolo em zonas de influência para os testes SPT, a fim de obter

correlações consistentes com os resultados de CPT, em vez de utilizar apenas os testes superficiais.

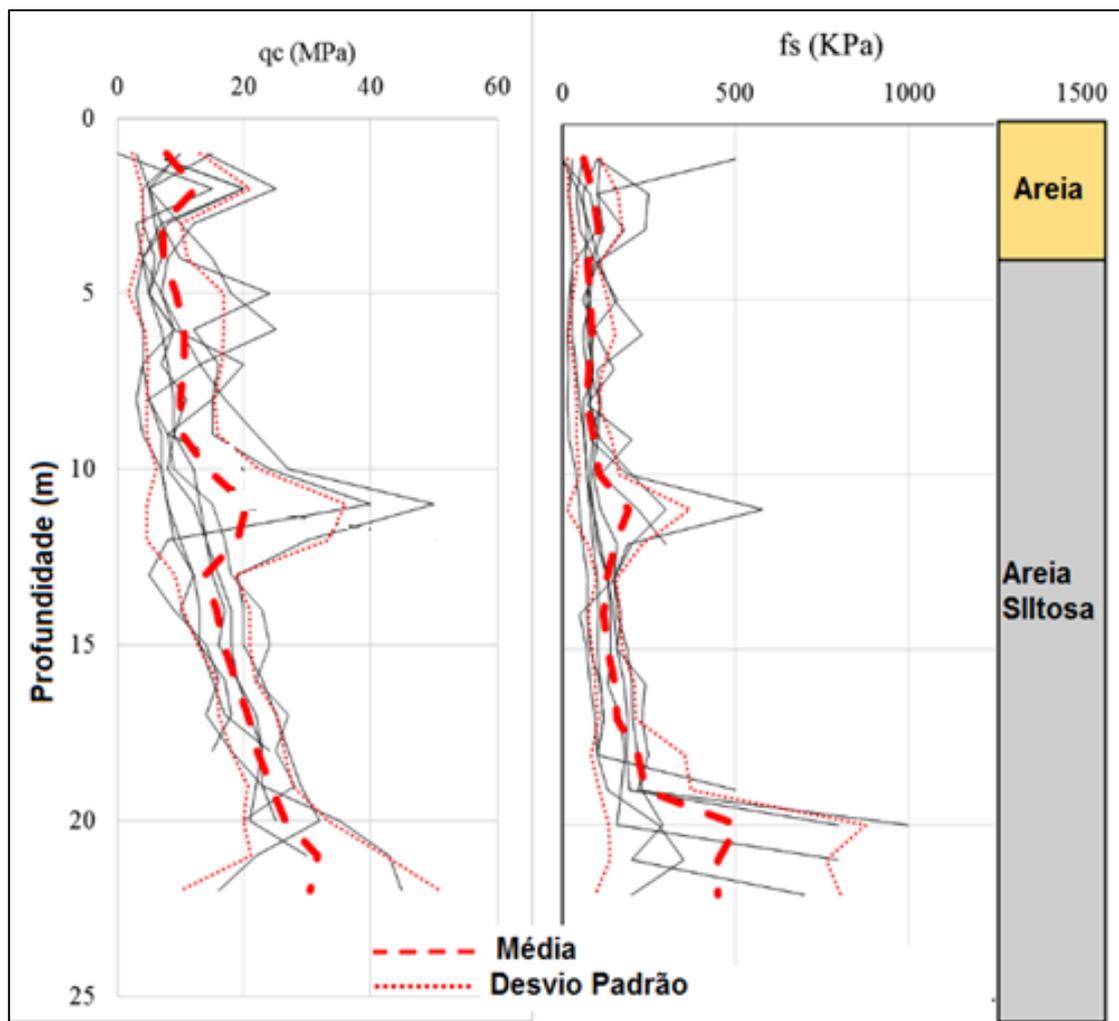


Figura 3.4. Perfil do local estudado e resultados CPT.

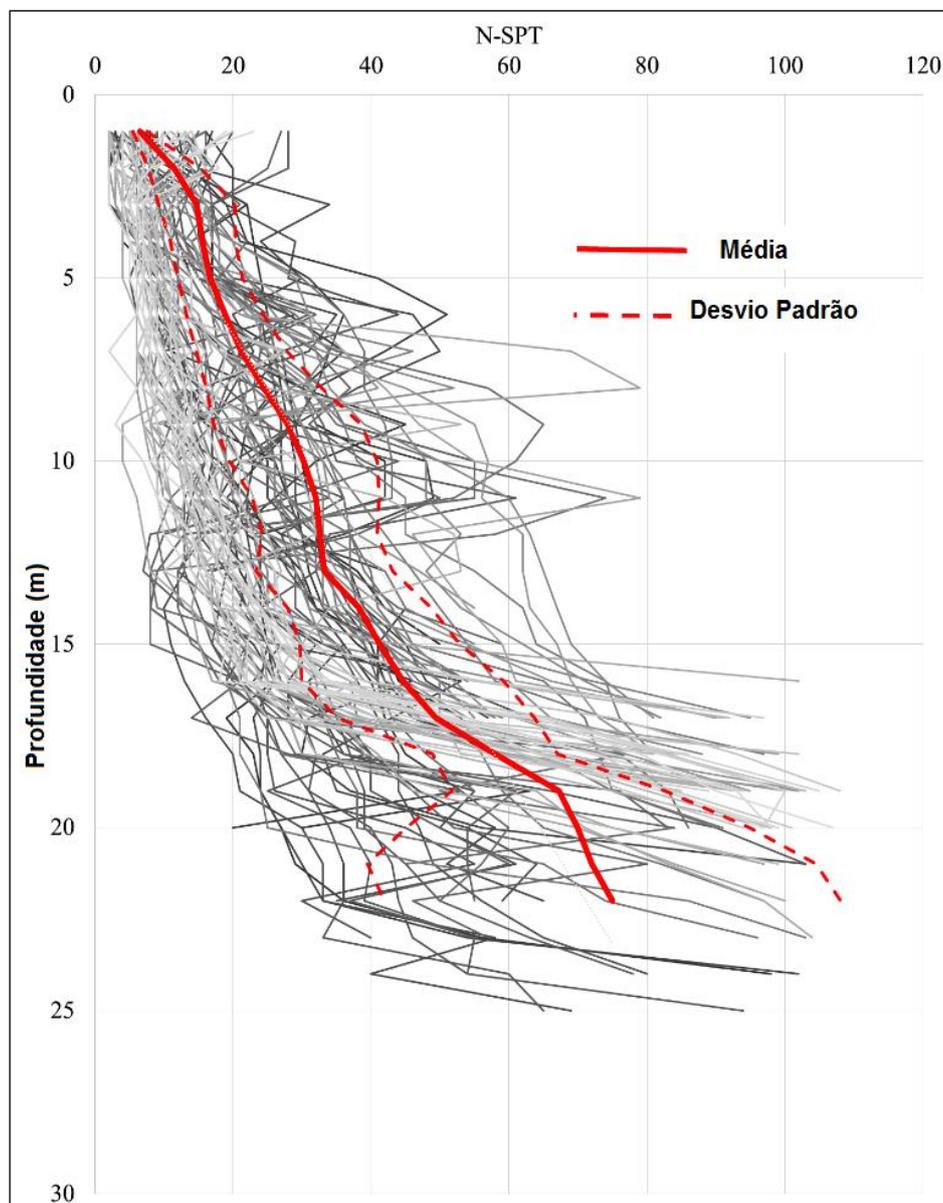


Figura 3.5. Variação do  $N_{SPT}$  com a profundidade.

A resistência de ponta do cone foi relacionada com o  $N_{60}$ , obtido através da correção de energia do ensaio SPT para uma energia corrigida padrão de 60%.

Foram utilizadas eficiências de 74% e 84% para o cálculo do  $N_{60}$  de acordo com Costa *et al.* (2012). Os autores mediram a eficiência das equipes das duas empresas que executaram os ensaios SPT através de provas de carga estática no amostrador SPT (PCESPT).

A princípio, como era necessário o agrupamento de amostras para a determinação de correlações apenas entre os resultados dos CPT e SPT que

apresentassem coincidência para o mesmo tipo de solo, tornou-se necessária a classificação dessas amostras. No caso dos ensaios SPT, os boletins de sondagem ofereciam a classificação tátil-visual. Já para a classificação das amostras do ensaio CPT, a literatura apresenta algumas propostas de classificação

Além das classificações baseadas na granulometria e tátil-visual, bastante consolidadas e utilizadas no meio da engenharia, as classificações baseadas no tipo de comportamento dos solos (SBT), determinadas no ensaio CPT, cada vez mais apresentam-se como opção rápida e eficiente (Robertson, 2010).

Utilizando parâmetros determinados no ensaio como Resistência de ponta, atrito lateral e medidas de poro-pressão, bem como e grandezas posteriormente calculadas tais como razão de atrito, resistência normalizada e parâmetro de poro-pressão, torna-se possível estimar a região que representa o tipo de comportamento do solo, nesse caso a região 6 correspondente a areia siltosa, como mostrado na Figura 3.6.

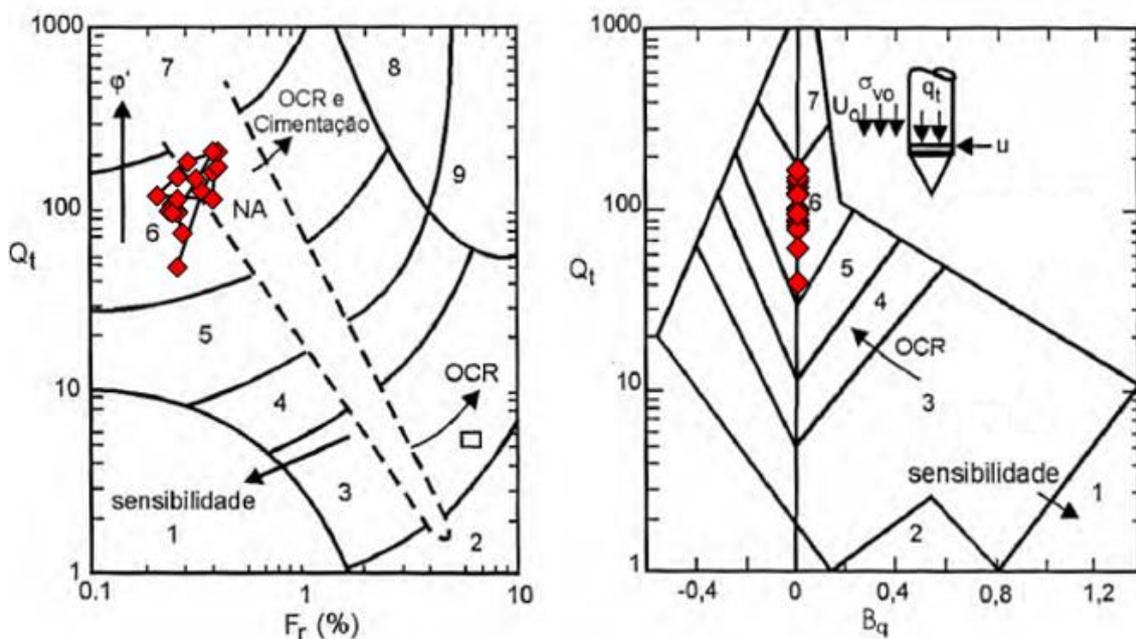


Figura 3.6 - Cartas de classificação dos solos, do ensaio CPT (modificado de Schnaid, 2000).

### 3.5. Análise Variográfica

Devido à grande variação dos valores do SPT, percebeu-se a necessidade de se conhecer o comportamento do solo, sob o ponto de vista da variabilidade espacial, dessa forma optou-se por visualizar parte desse comportamento através da matriz de correlação entre as variáveis estudadas e as coordenadas cartesianas.

A matriz de correlação apresentada na Tabela 3.1 evidencia o grau de relacionamento das variáveis estudadas, neste caso as coordenadas x, y, z e o  $N_{SPT}$ , de forma que ao cruzarem-se (linha e coluna) apresenta-se o coeficiente de correlação. Na diagonal principal, os valores unitários exprimem a correlação perfeita, pois a variável correlaciona-se consigo mesma, nas demais posições, quanto mais o valor se aproxima da unidade, maior o grau de correlação entre as variáveis.

Tabela 3.1- Matriz de correlação

	X	Y	Z	$N_{SPT}$
X	1	0,095908	-0,1158473	0,159497
Y	0,095908	1	-0,1891218	-0,06819
Z	-0,11585	-0,18912	1	-0,6786
$N_{SPT}$	0,159497	-0,06819	-0,6786044	1

O que se tornou nítido foi a completa falta de relação entre as variáveis, exceto no caso do  $N_{SPT}$  com a profundidade (elevação), que apresentou certo grau de correlação negativa, ou seja, a medida que a profundidade aumenta (reduz-se a elevação) também eleva-se o  $N_{SPT}$ .

Com efeito, percebida a ausência de correlação entre a variável estudada e as coordenadas espaciais, apresentou-se como alternativa a esse problema a implementação de uma distância limite onde as variáveis apresentem relação e a variância entre elas seja reduzida. Logo adotou-se o alcance do semivariograma como diretriz para essa delimitação.

A partir de então, a determinação das zonas de influência dos valores amostrados (zonas com correlações não nulas) baseou-se no critério do alcance

do “variograma”, ou seja o menor valor correspondente ao início dos patamares dos valores dos semivariogramas.

Os semivariogramas das amostras foram calculados utilizando a Equação 2.8, para os dados de campo coletados no solo nas seguintes profundidades (z) selecionadas: 1 m, 5 m, 10 m e 15 m.

O semivariograma empírico foi ajustado por um modelo de semivariograma teórico esférico. Nas Figuras 3.7 a 3.10 são apresentados os semivariogramas experimentais (pontos interligados por linha cheia), bem como os ajustes pelos modelos teóricos (linha tracejada) obtido para os dados recolhidos nas profundidades  $z = 1$  m, 5 m, 10 m e 15 m, respectivamente. A distância limite, para além da qual os dados SPT deixam de apresentar correlação, foi obtida a partir das curvas ajustadas segundo modelo esférico, de acordo com as Equações 2.9 e 2.10.

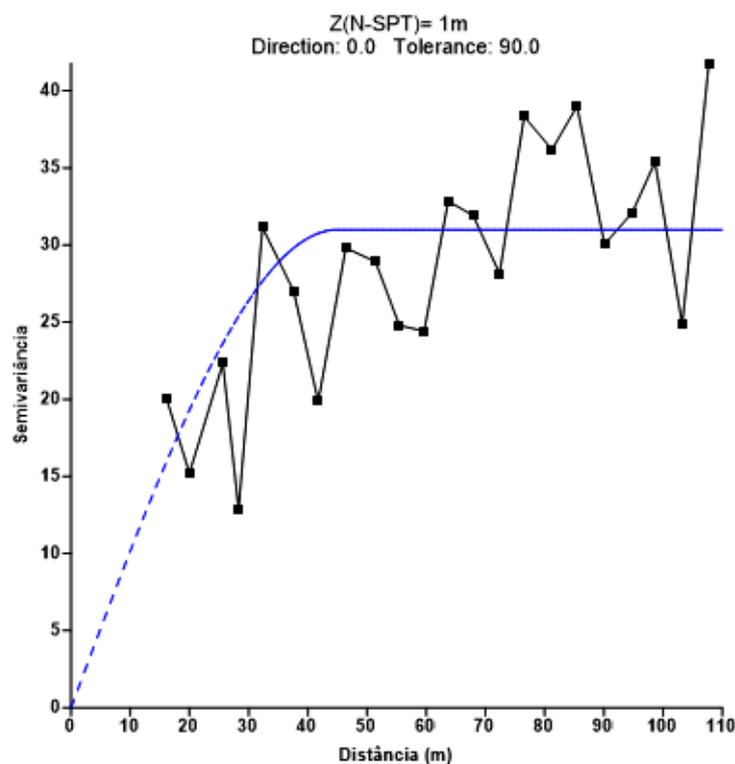


Figura 3.7 - Variograma para a profundidade  $z = 1$  m.

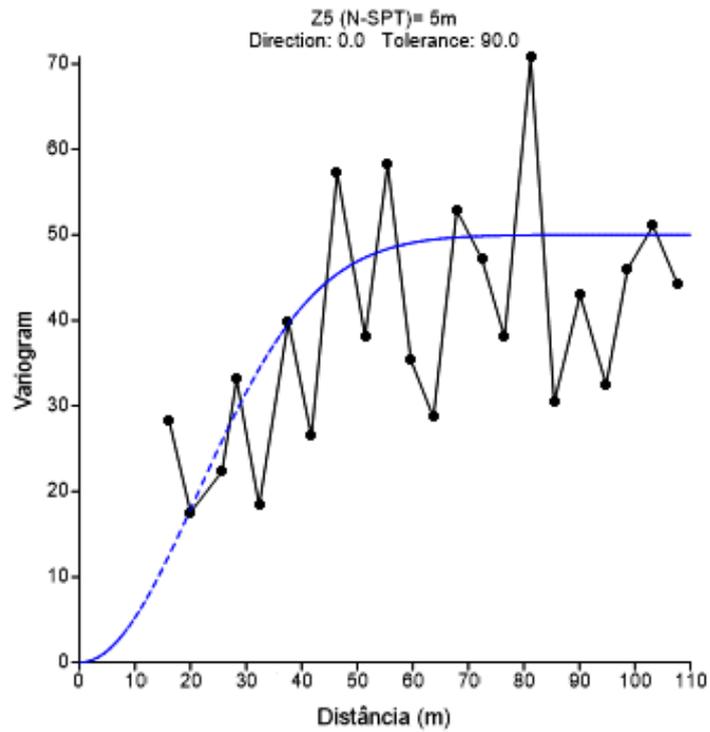


Figura 3.8 - Variograma para a profundidade  $z = 5$  m.

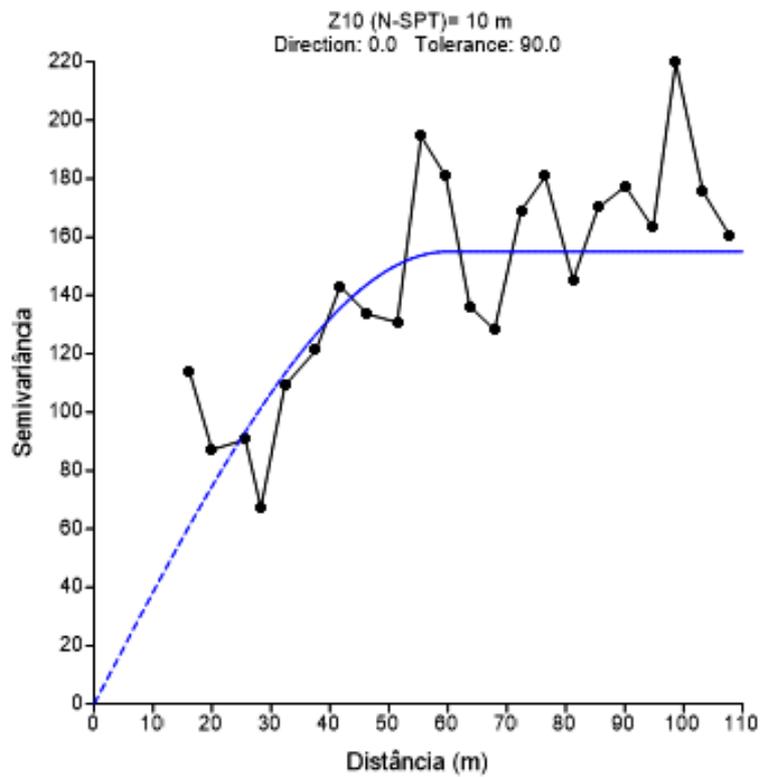


Figura 3.9 - Variograma para a profundidade  $z = 10$  m.

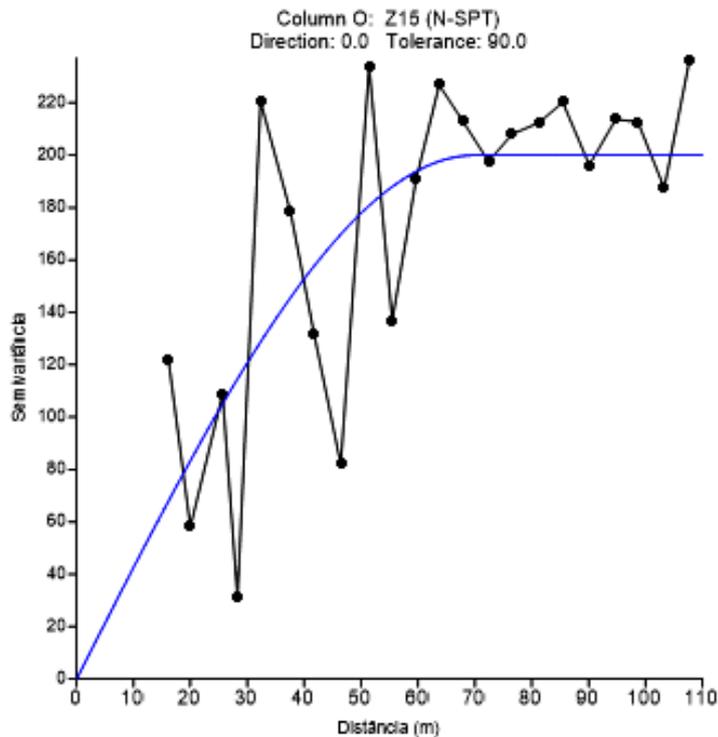


Figura 3.10 - Variograma para a profundidade  $z = 15$  m.

Determinados os semivariogramas experimentais ajustados pelo modelo esférico, observou-se que para  $z = 1$  m de profundidade obteve-se o menor alcance, ou seja, o menor valor de distância para qual os resultados dos ensaios SPT deixavam de apresentar correlação. Logo, adotou-se esta distância para delimitar a área de influência ao redor das coordenadas dos furos dos ensaios CPT. Os alcances encontrados em cada profundidade  $z$  para os semivariogramas ajustados são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Alcance dos semivariogramas para todas profundidades

Profundidade $z$ (m)	Alcance (m)
1	35
5	54
10	63
15	72

Dessa forma, como critério de escolha dos ensaios SPT, traçou-se uma circunferência de raio 35 m (alcance do semivariograma) com centro nas coordenadas dos CPT's e relacionaram-se os ensaios SPT contidos na referida região com o ensaio CPT central, gerando oito regiões. Na Tabela 3.3 apresentam-se as sondagens SPT contidas em cada uma das regiões.

Tabela 3.3 - Distribuição dos ensaios SPT por área de influência em torno dos ensaios CPT.

<b>CPT- 1 (Prof. total 21,88 m)</b>	SPT-1, SPT-2, SPT-5, SPT-6, SPT-8, SPT-14, SPT-15, SPT-16, SPT-18
<b>CPT- 2 (Prof. total 22,61 m)</b>	SPT-19, SPT-20, SPT-21, SPT-35, SPT-36, SPT-37, SPT-38, SPT-42, SPT-43, SPT-44.
<b>CPT- 3 (Prof. total 19,44 m)</b>	, SPT-49, SPT-50, SPT-51, SPT-55, SPT-56, SPT-61, SPT-62, SPT-63, SPT-68, SPT-69, SPT-70.
<b>CPT- 4 (Prof. total 11,32 m)</b>	SPT-75, SPT-76, SPT-77, SPT-85, SPT-86, SPT-106, SPT-107, SPT-108.
<b>CPT- 5 (Prof. total 17,29 m)</b>	SPT-82, SPT-83, SPT-84, SPT-101, SPT-102, SPT-103, SPT-104, SPT-105, SPT-111, SPT-112, SPT-113, SPT-114, SPT-117, SPT-118.
<b>CPT- 6 (Prof. total 16,09 m)</b>	SPT-65, SPT-66, SPT-67, SPT-71, SPT-72, SPT-73, SPT-74, SPT-79, SPT-80, SPT-81, SPT-88, SPT-89, SPT-100.
<b>CPT- 7 (Prof. total 21,78 m)</b>	SPT-39, SPT-40, SPT-41, SPT-46, SPT-47, SPT-48, SPT-53, SPT-54, SPT-56, SPT-58, SPT-59, SPT-60.
<b>CPT- 8 (Prof. total 20,42 m)</b>	SPT-3, SPT-11, SPT-12, SPT-22, SPT-23, SPT-24, SPT-31, SPT-32, SPT-34, SPT-39, SPT-40, SPT-41.

### 3.5.1. Estatísticas Descritivas das Regiões

O espaço amostral foi dividido em oito regiões distintas, delimitadas pelos oito ensaios CPT e suas zonas de influência. Tendo em vista uma melhor compreensão acerca do comportamento da dispersão dos valores dos ensaios a serem estudados, procedeu-se uma análise básica fundamentada na estatística descritiva dos ensaios divididos em suas respectivas regiões.

De modo a exemplificar, na Tabela 3.4 são apresentadas as estatísticas descritivas básicas e a dispersão dos valores SPT da Região 1, evidenciada pelo histograma de frequência apresentado na Figura 3.11. Os dados das demais regiões são apresentados no Anexo 2.

Tabela 3.4 – Estatísticas básicas da região do CPT- 1

<b>Estatísticas</b>	<b>Valores</b>
n Válidos	173
Média	26,21387283
Confiança - 95,000%	23,99213523
Confiança +95,000%	28,43561044
Mediana	25
Moda	30
Frequência Moda	10
Mínimo	2
Máximo	69
Variância	219,1807367
Desvio Padrão	14,80475385
Erro Padrão	1,125584592
Assimetria	0,668074426
Curtose	-0,023706227

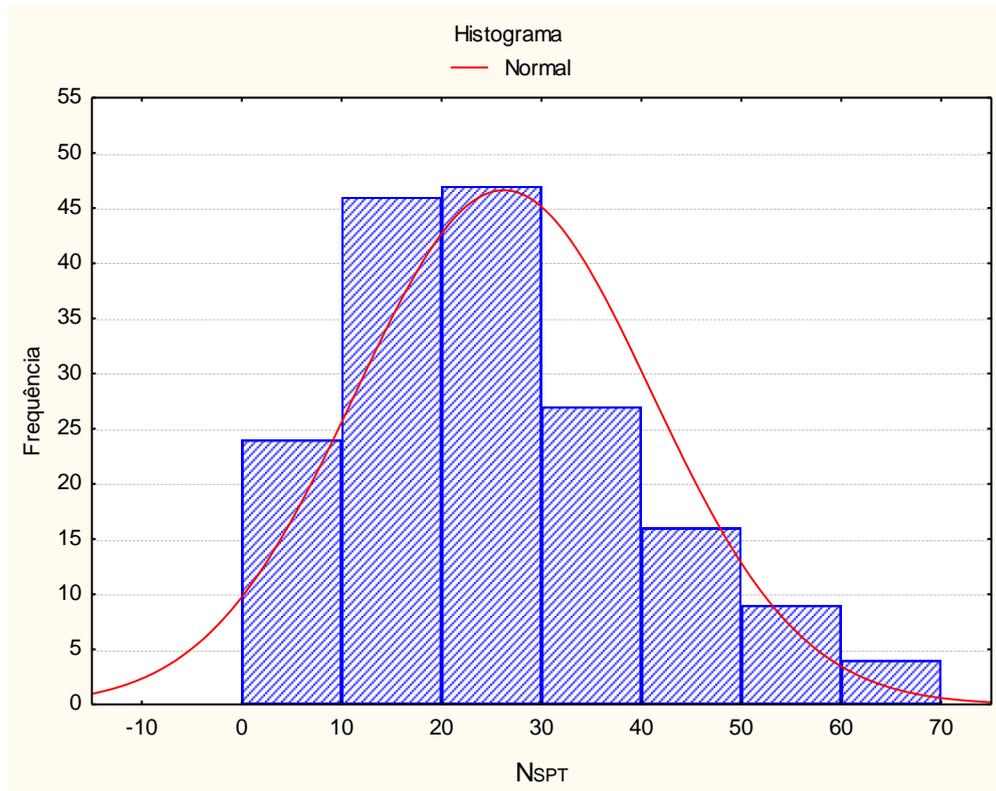


Figura 3.11- Distribuição de frequência dos valores de  $N_{sPT}$  para região do CPT- 1

### 3.6. Interpolação de Perfis SPT

Na tentativa de se obterem correlações mais próximas da realidade, optou-se por relacionar a resistência de ponta do cone de cada região estudada com o valor  $N_{60}$  de um perfil interpolado para cada região, levando-se em consideração todas as sondagens executadas na referida região através do método IDW, implementado em planilha do *Microsoft Excel* (Figura 3.12).

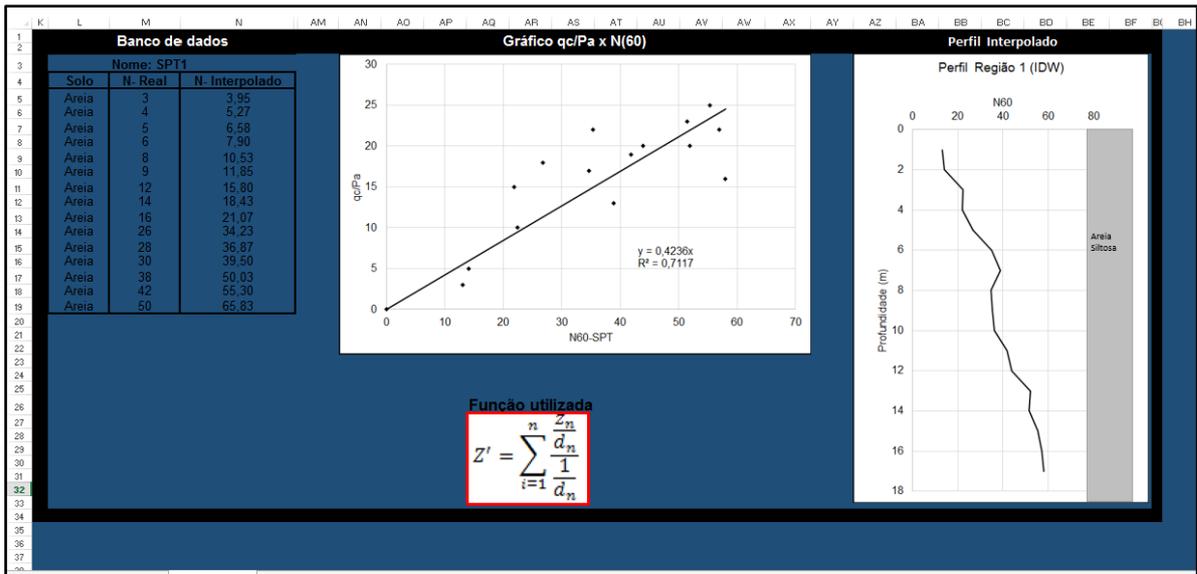


Figura 3.12- Planilha do Excel utilizada para interpolação de perfis SPT através de IDW.

A Figura 3.13 apresenta o perfil SPT interpolado para a região do ensaio CPT-1. Os perfis correspondentes às regiões de influência dos ensaios CPT-2 a CPT-8 podem ser encontrados no Anexo 3.

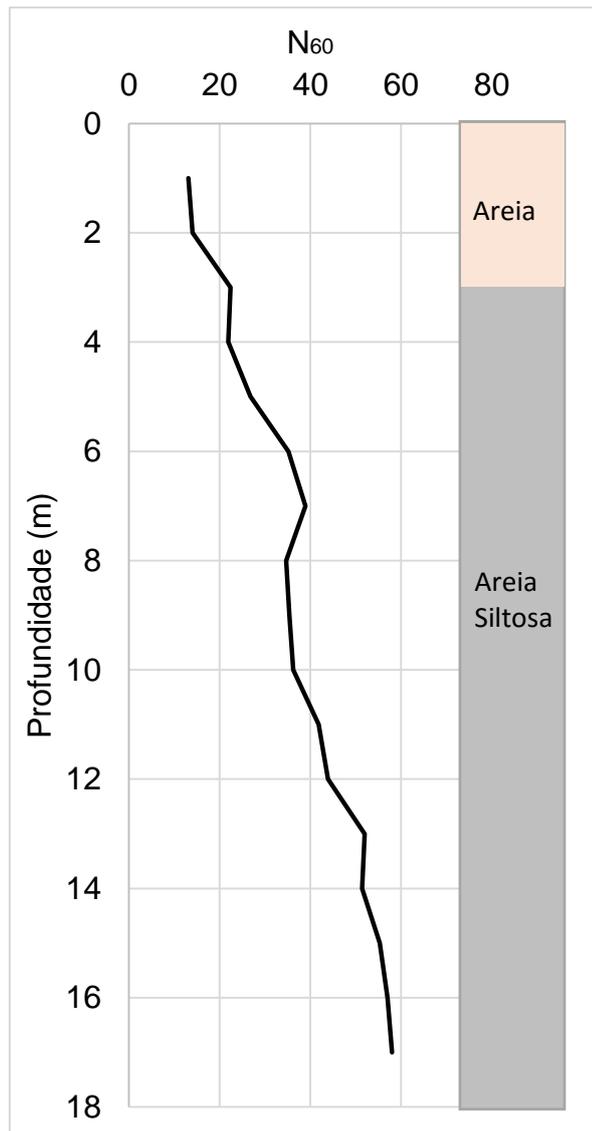


Figura 3.13 - Perfil interpolado através de IDW para região do CPT-1

Outro método geoestatístico denominado krigagem ordinária (KO) também foi utilizado para aproximar um perfil fictício cujas coordenadas coincidisse com os respectivos CPTs. Para uma descrição do método da krigagem ordinária, ver item 2.4.6. Fez-se uso do software de modelagem geoestatística livre chamado Sgems, cujos dados de entrada consistiram nas coordenadas x, y, z e  $N_{SPT}$ , para cada região delimitada. Dessa forma foi estimado para cada região um perfil interpolado como o apresentado na Figura 3.14 para a região do CPT-1. Os demais perfis, correspondentes às regiões dos CPT-2 ao CPT-8 podem ser encontrados no Anexo 3.

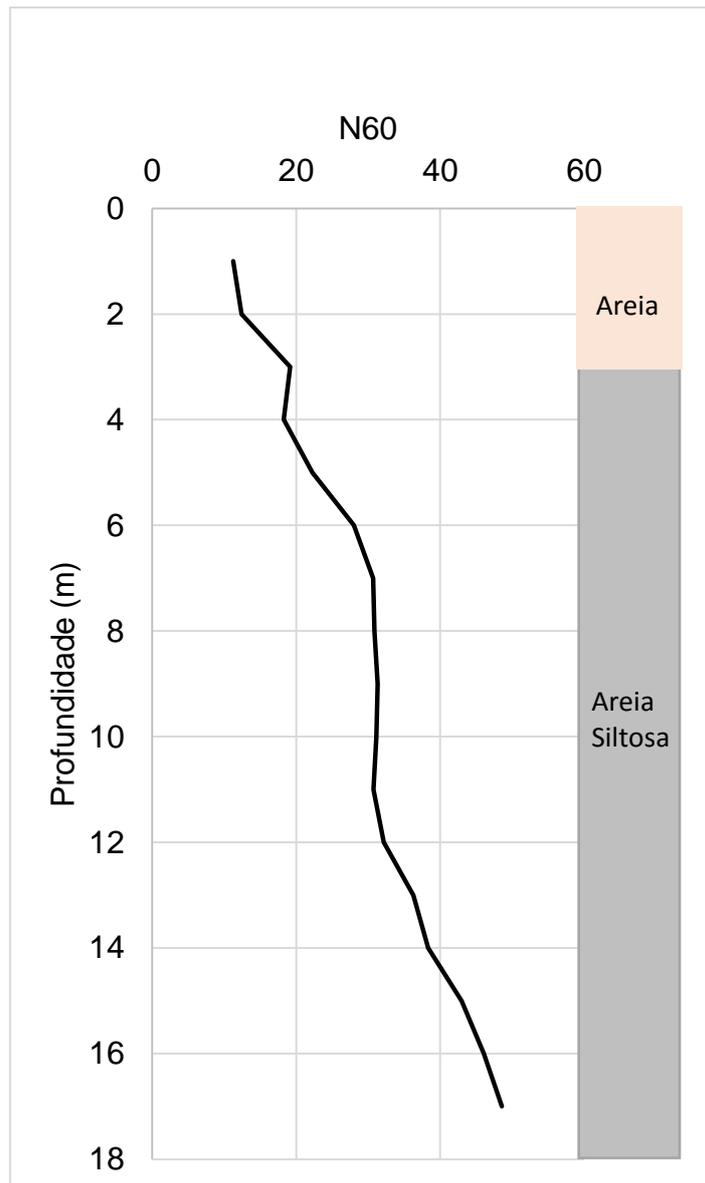


Figura 3.14 - Perfil interpolado através de KO para região do CPT-1

## Resultados e discussão

Nesse capítulo serão apresentados os resultados das correlações entre  $q_c$ , NSPT e  $f_s$ , tanto para as regiões delimitadas pelo alcance do semivariograma, bem como para os perfis interpolados através de ferramentas geoestatísticas como o IDW e a Krigagem Ordinária (KO).

### 4.1. Média aritmética

Em um primeiro momento a estimativa de correlações deu-se através do método mais simples, ou seja, através de uma média aritmética. Todos os dados foram combinados para calcular o valor  $k = q_c/N_{60}$  verificando-se se há coincidência para o mesmo tipo de solo, independente da distância foram combinados para o mesmo tipo de solo. Dessa forma foram relacionados 402 pares de valores  $q_c$  e  $N_{60}$  para areia siltosa, dos quais foi possível estimar uma razão  $k$  média de 0,6 MPa, apresentando um desvio padrão de 0,4 MPa, o que corresponde a um coeficiente de variação de 66,66%. Na Figura 4.1 foram plotados todos os pares  $q_c$  e NSPT, sem nenhum tratamento estatístico ou geoestatístico, evidenciando a grande dispersão dos valores.

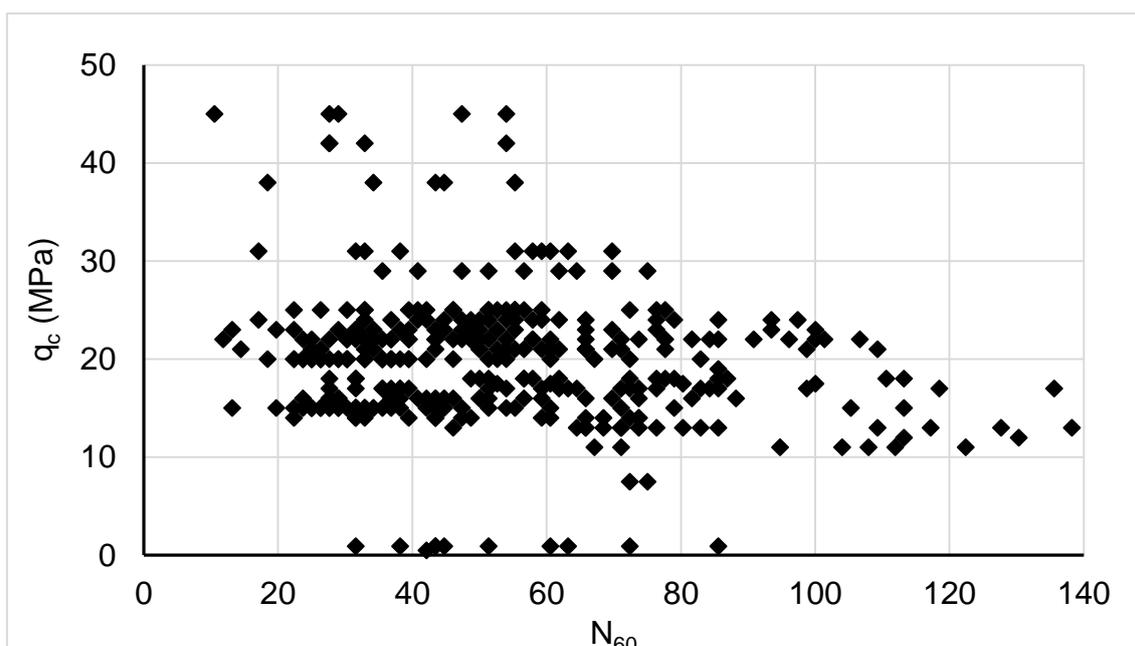


Figura 4.1- Dispersão dos valores  $q_c$  x NSPT

O valor médio encontrado, de elevado coeficiente de variação situa-se abaixo da referência comumente utilizada nos projetos de fundações por estacas, apresentado por Aoki e veloso (1975) como 0,80 MPa para o solo citado.

#### **4.2. Correlações entre $q_c$ e $N_{SPT}$ - Resultados por Área de Influência**

Como citado anteriormente, com o propósito de uniformizar a dispersão dos valores de  $N_{SPT}$  adotaram-se regiões em torno dos ensaios CPT para relacionar valores contidos em um raio de cerca de 35 metros (alcance do semivariograma para  $z = 1$  m). Logo, procedeu-se a determinação de correlações para cada região separadamente. Entretanto, para a região correspondente ao CPT-4 não houve correspondência do tipo de solo descrito no perfil CPT com a classificação tátil-visual dos boletins de sondagem SPT inseridos na respectiva zona de influência, logo não foram estimadas correlações para essa região.

As Figuras 4.2 a 4.8 mostram a relação entre  $q_c$  e  $N_{60}$  para as Zonas 1 a 8, exceto a zona 4, como esclarecido anteriormente. Os pontos de dados experimentais de cada zona de influência foram ajustados usando uma aproximação linear que passa através da origem.

A representatividade da tendência das funções aproximadas foi melhorada, também devido a utilização do critério estatístico de retirada dos pontos que distassem mais que duas vezes o desvio padrão a partir da média da dispersão dos pontos, conforme Kara e Gunduz (2013).

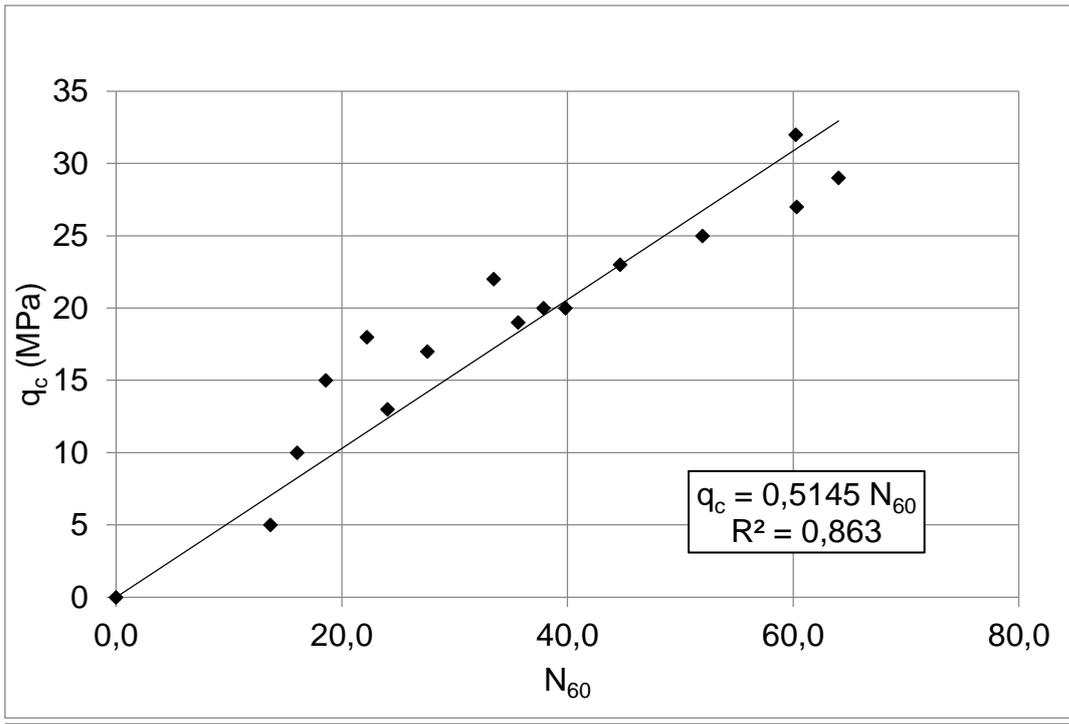


Figura 4.2 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-1.

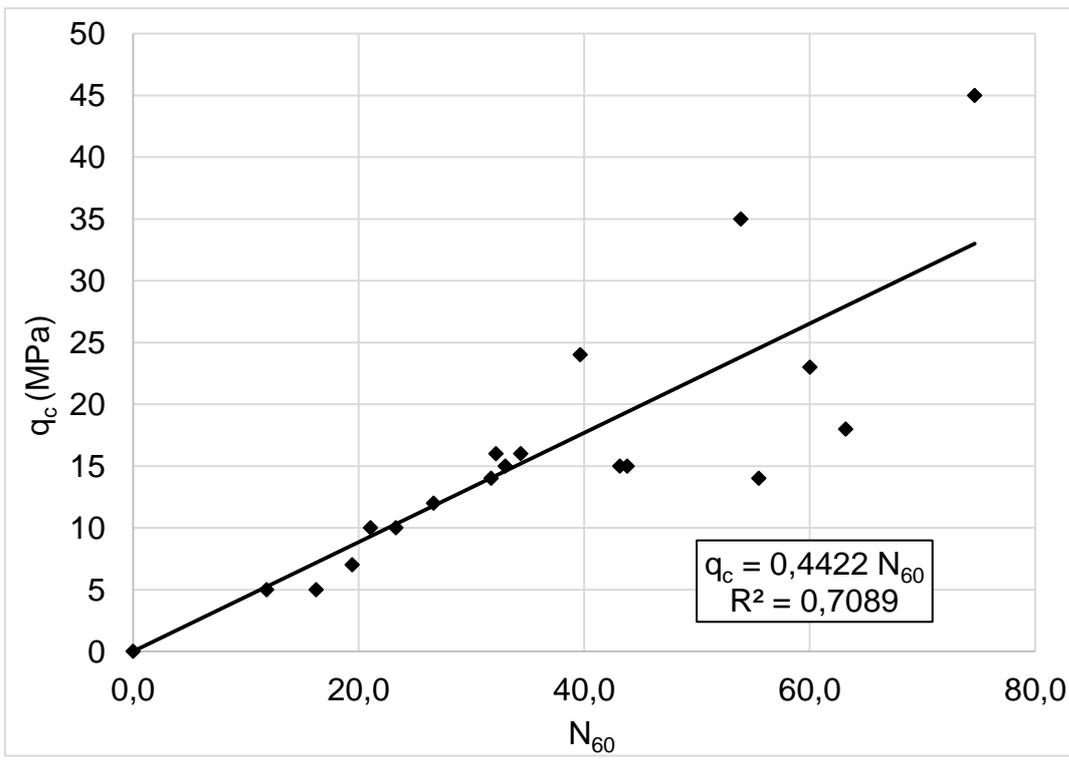


Figura 4.3 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-2.

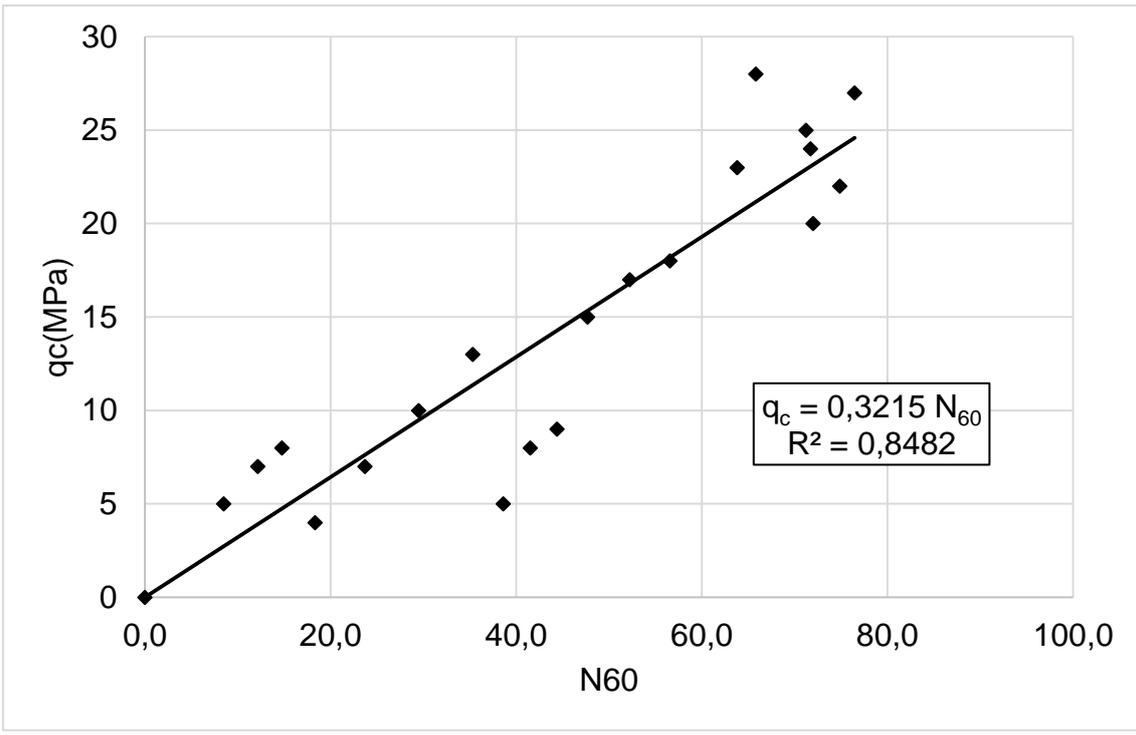


Figura 4.4 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-3.

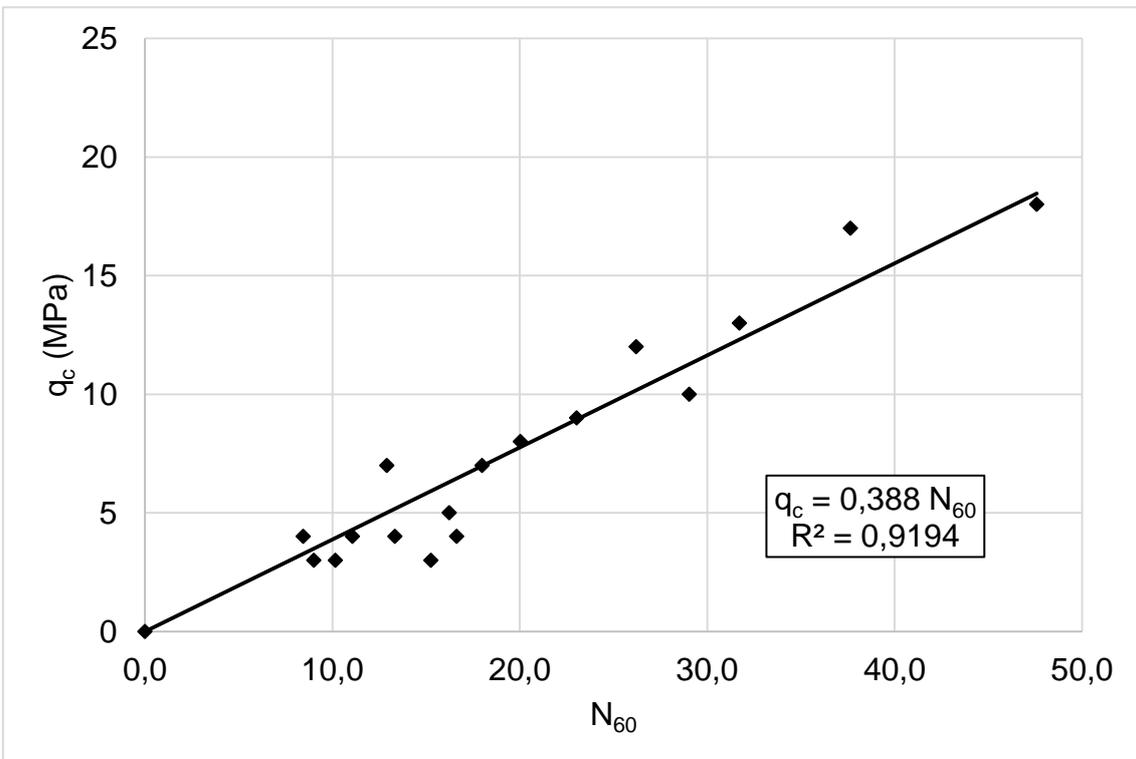


Figura 4.5 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-5.

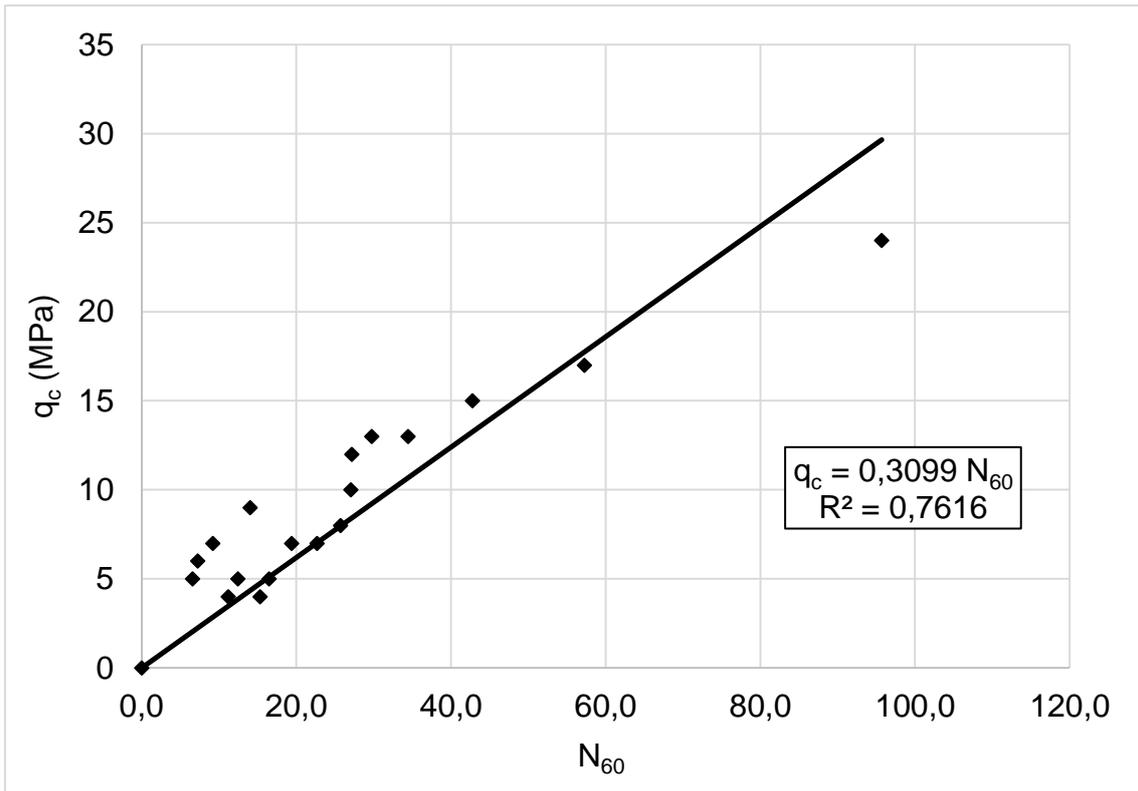


Figura 4.6 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-6.

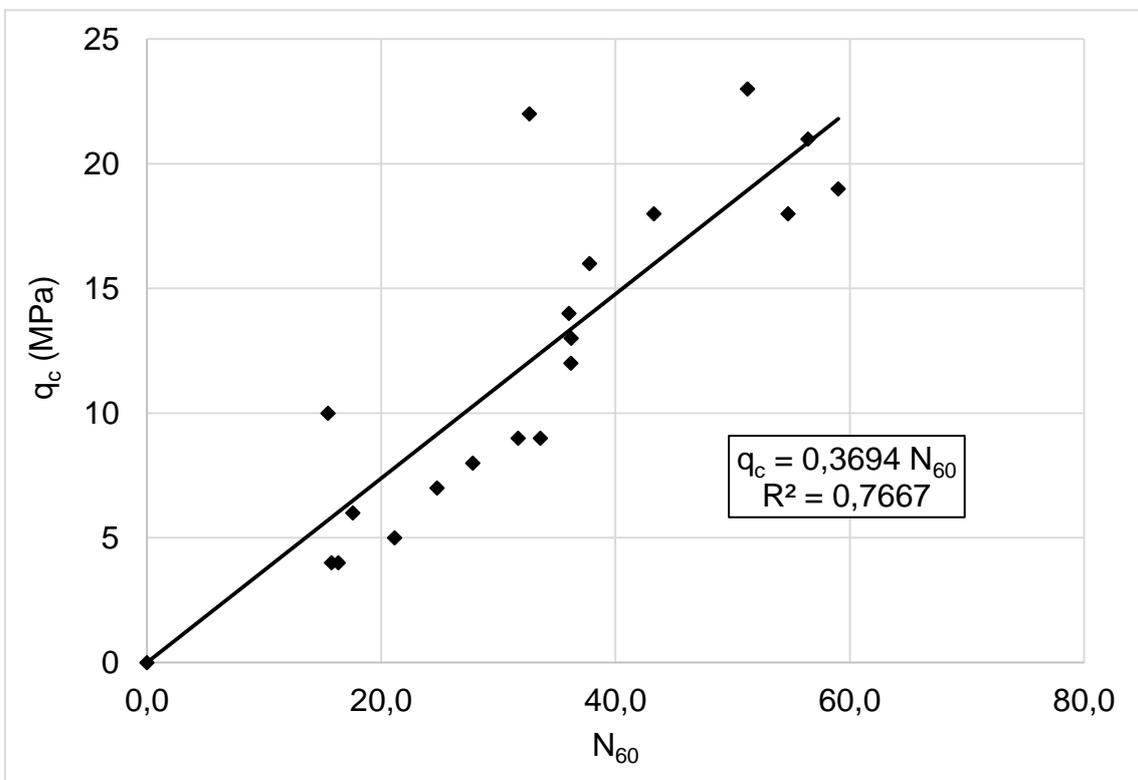


Figura 4.7 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-7.

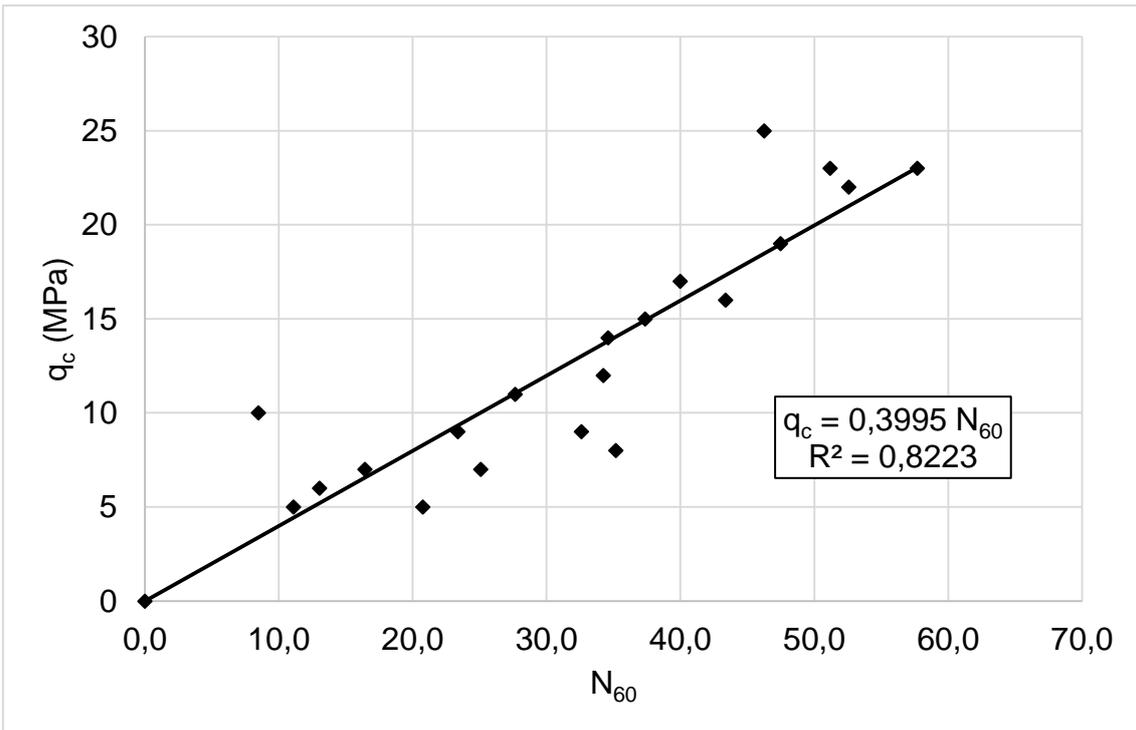


Figura 4.8 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-8.

A Figura 4.9 apresenta de forma simultânea todas as correlações obtidas.

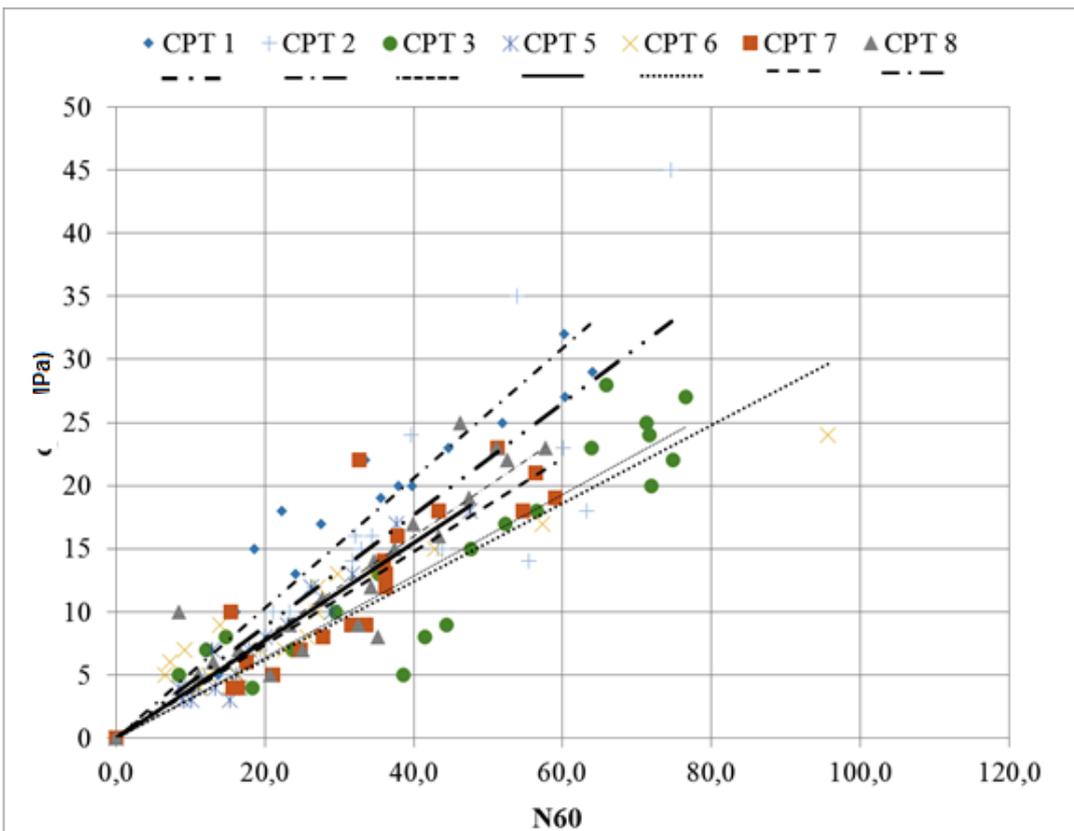


Figura 4.9 – Correlações entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para todas as regiões.

A Tabela 4.1 apresenta a razão  $k = q_c/N_{60}$  encontrada a partir dos ajustes lineares para as zonas determinadas. Os resultados do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) demonstram a boa aproximação alcançada entre as variáveis correlacionadas.

Tabela 4.1- Valores de k para zonas de influência.

Zona CPT	k (MPa)	R <sup>2</sup>
1	0,51	0,863
2	0,44	0,701
3	0,32	0,848
5	0,39	0,919
6	0,31	0,761
7	0,37	0,766
8	0,40	0,822

A Figura 4.10 mostra a correlação de  $N_{60}$  e  $q_c$  obtida utilizando os dados de todas as zonas. Uma razão k de 0,38 MPa, foi obtida para o solo de acordo com esta análise. Este valor é inferior ao intervalo descrito por Danziger et al. (1998) para depósitos de areia siltosas residuais no Brasil, que está na faixa de 0,5 a 0,64 MPa.

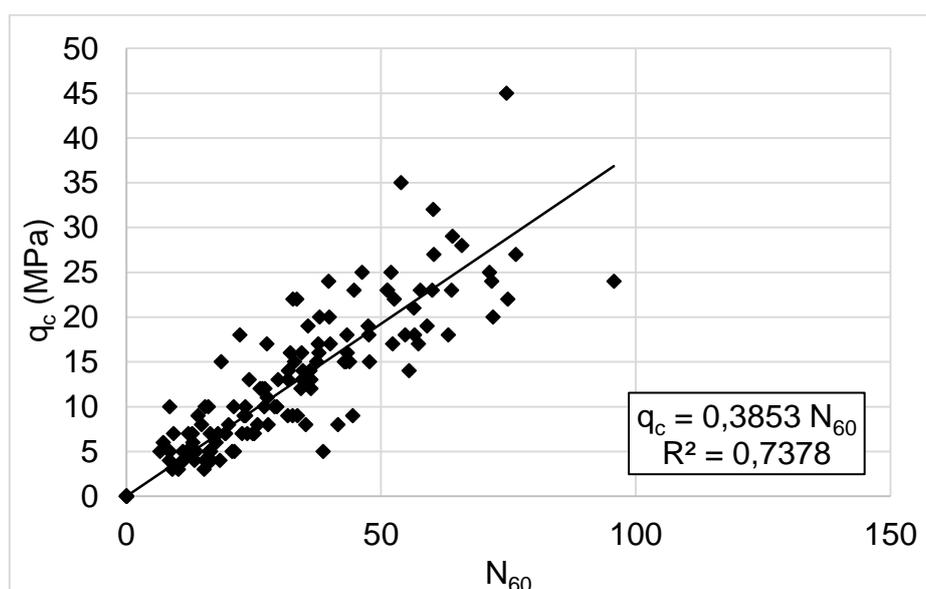


Figura 4.10 – Correlação única entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para todas as regiões.

### 4.3. Correlações entre $q_c$ , $f_s$ e $N_{SPT}$ - Resultados por Área de Influência

As Figuras 4.11 a 4.17 mostram o atrito lateral  $f_s$  como uma função de  $(q_c/Pa)/N_{60}$  para as zonas de influência, em que  $Pa$  é a pressão atmosférica ( $Pa = 100$  kPa). Uma regressão linear que passa através da origem foi ajustada aos pontos experimentais.

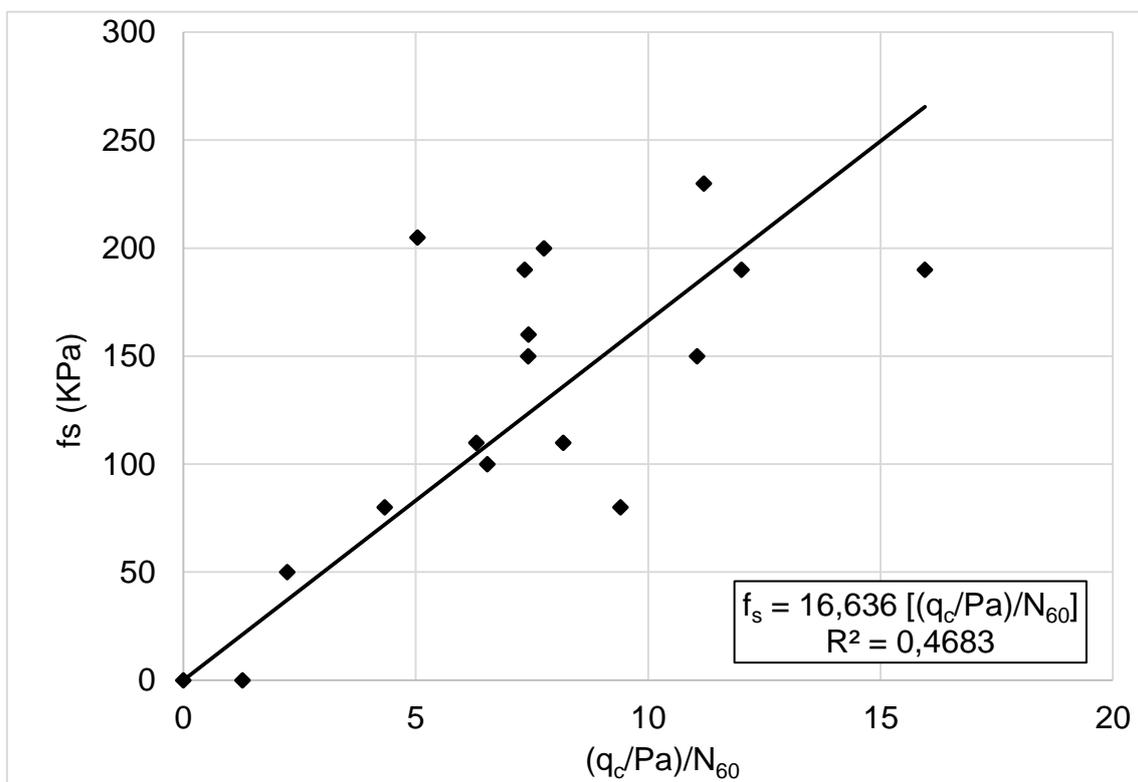


Figura 4.11 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-1.

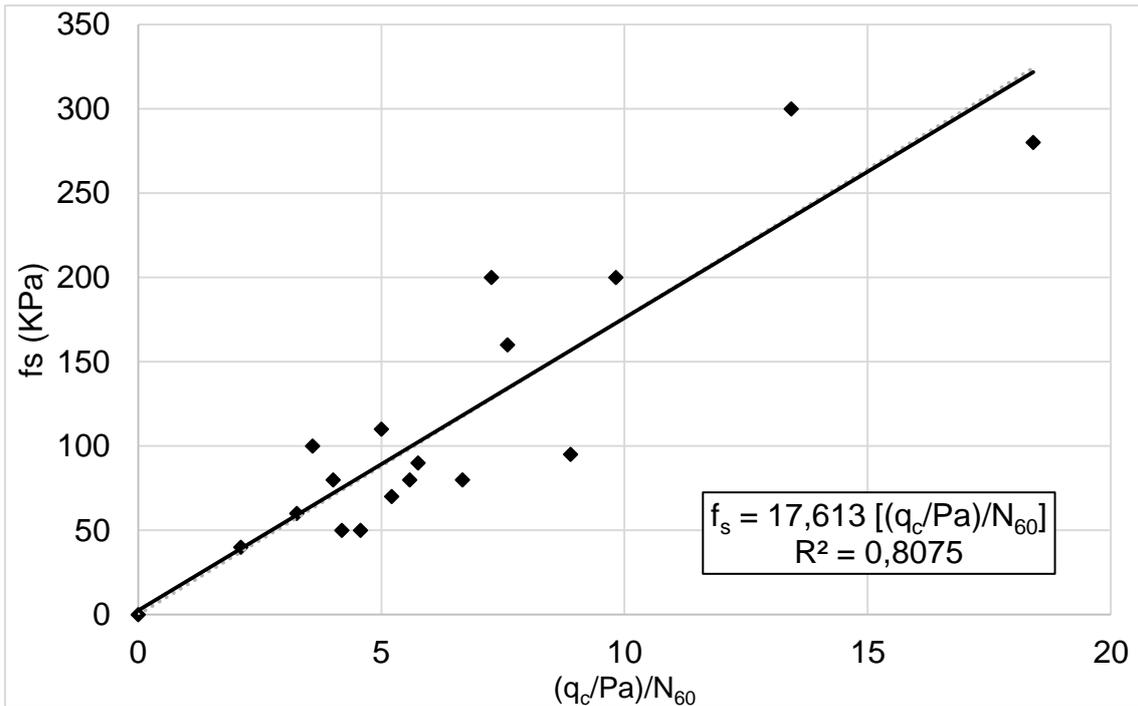


Figura 4.12 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-2.

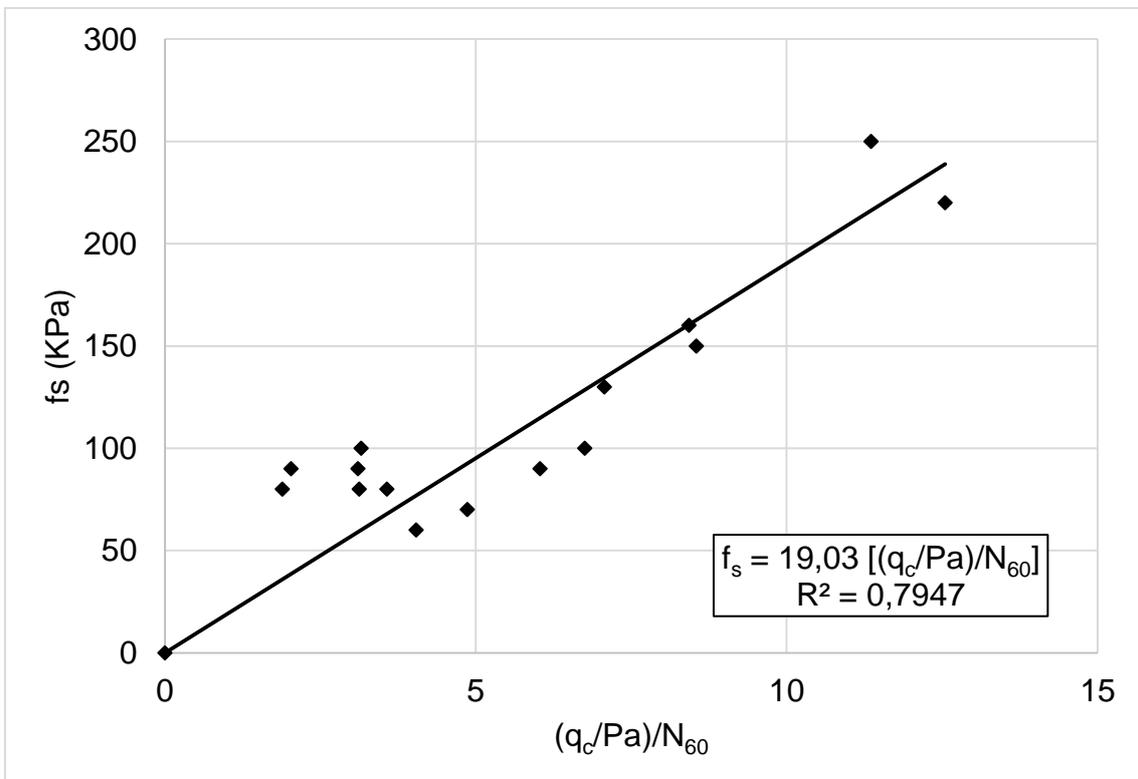


Figura 4.13 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-3.

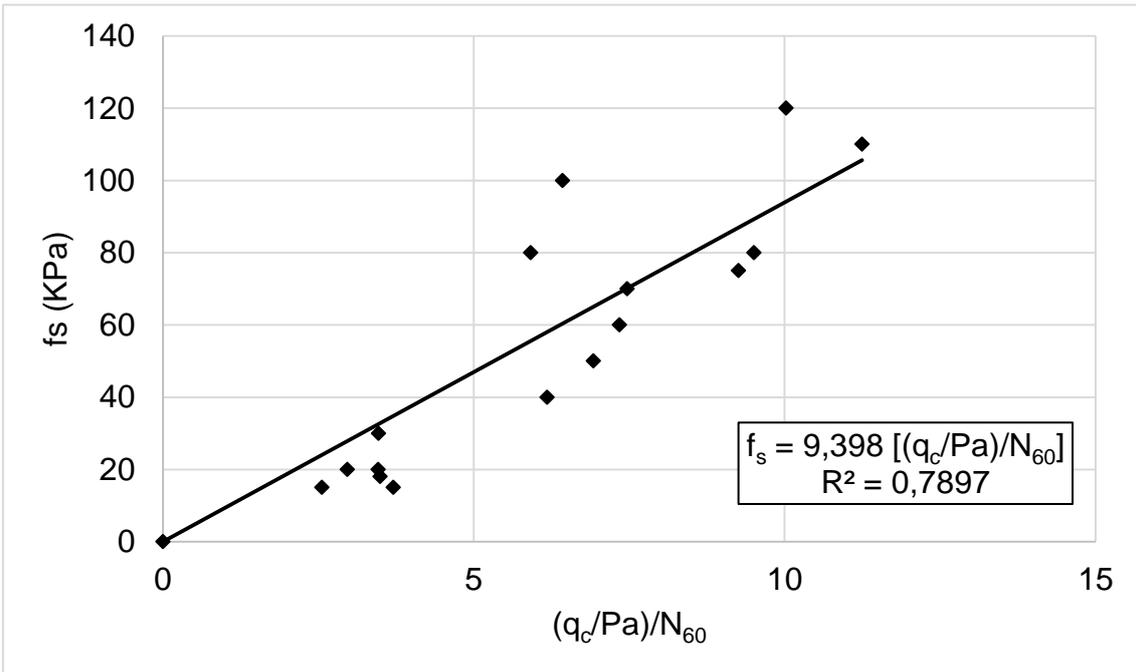


Figura 4.14 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-5.

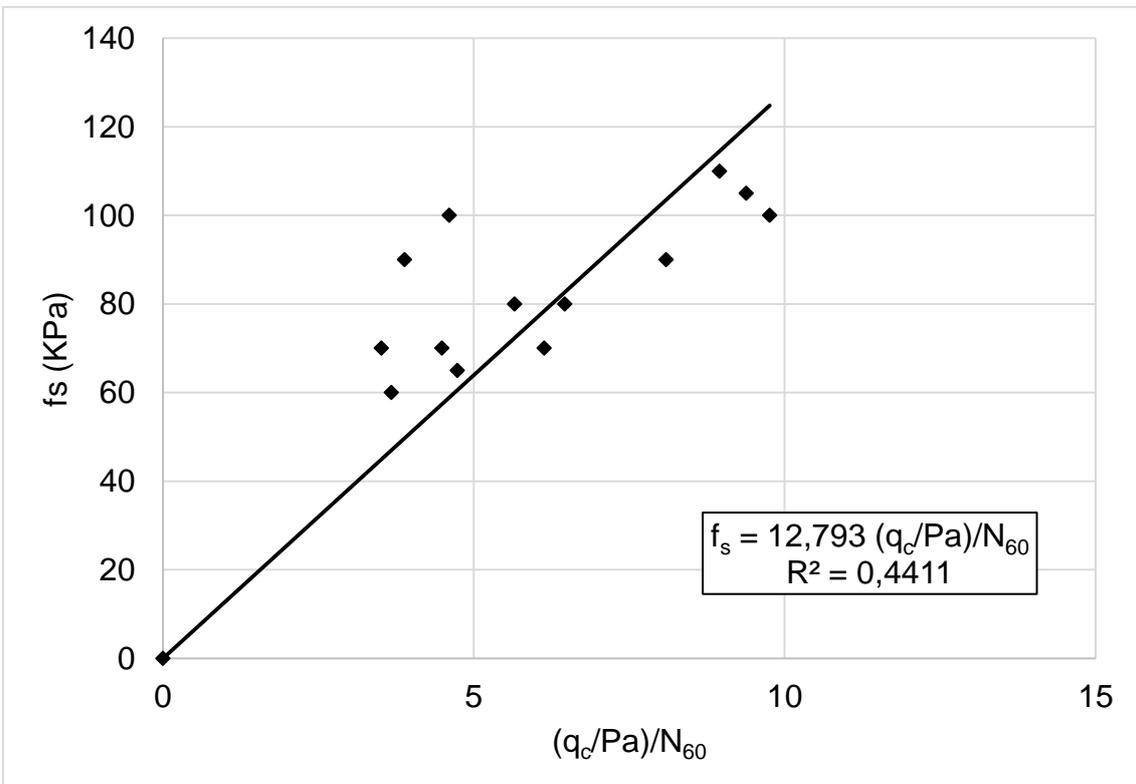


Figura 4.15 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para região do CPT-6.

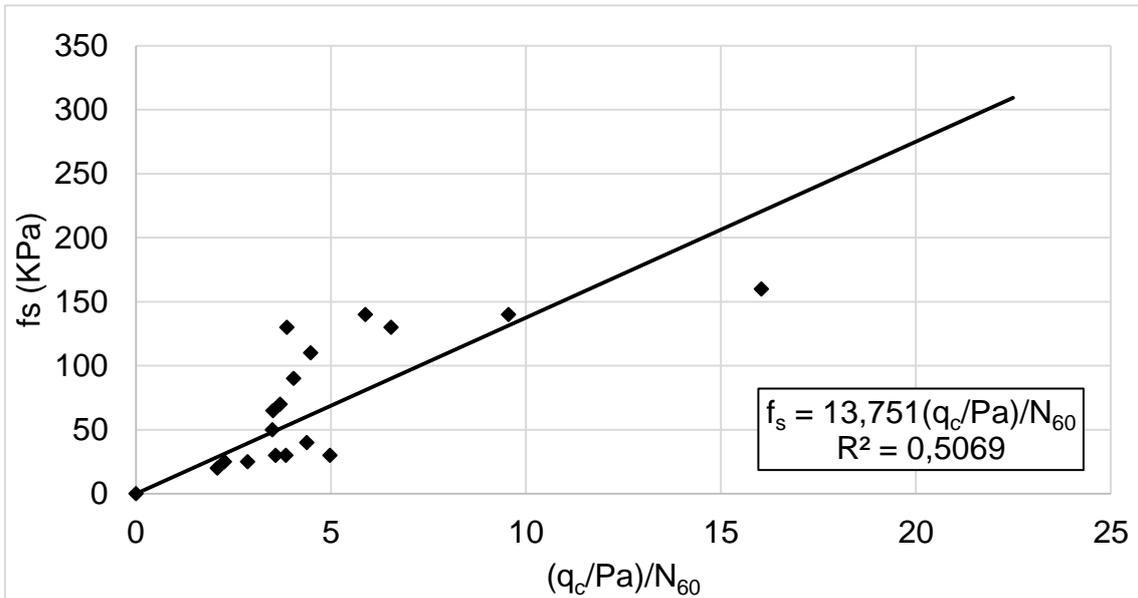


Figura 4.16 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{sPT}$  para região do CPT-7.

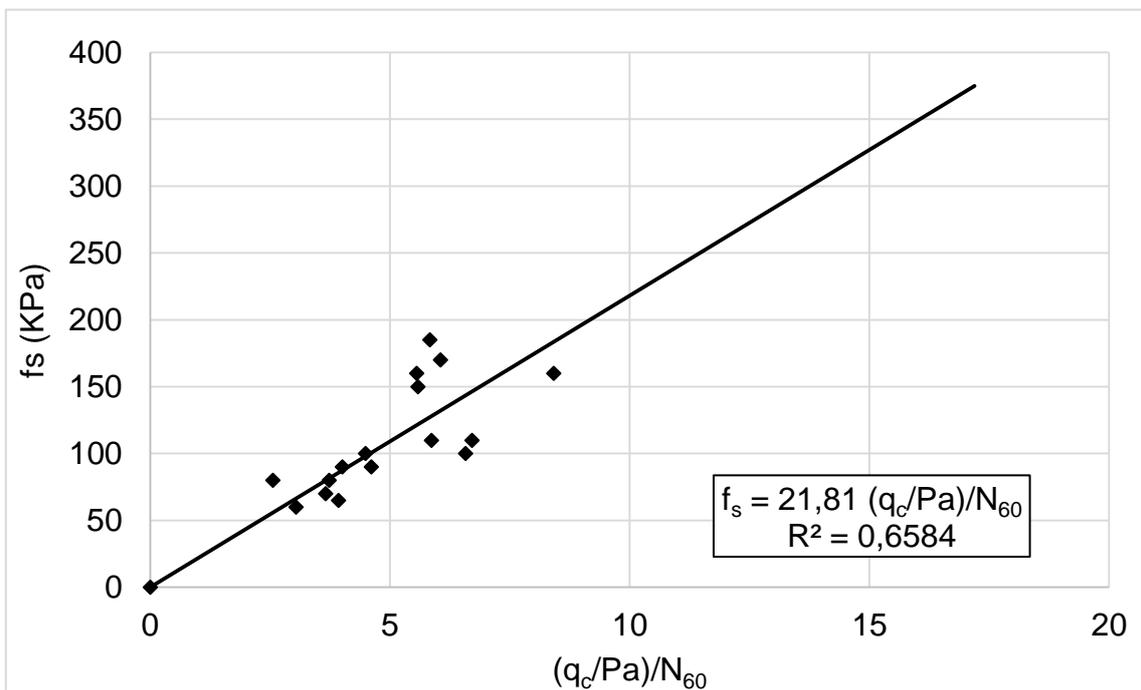


Figura 4.17 – Correlação entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{sPT}$  para região do CPT-8.

A Figura 4.18 apresenta todas as correlações obtidas de maneira simultânea.

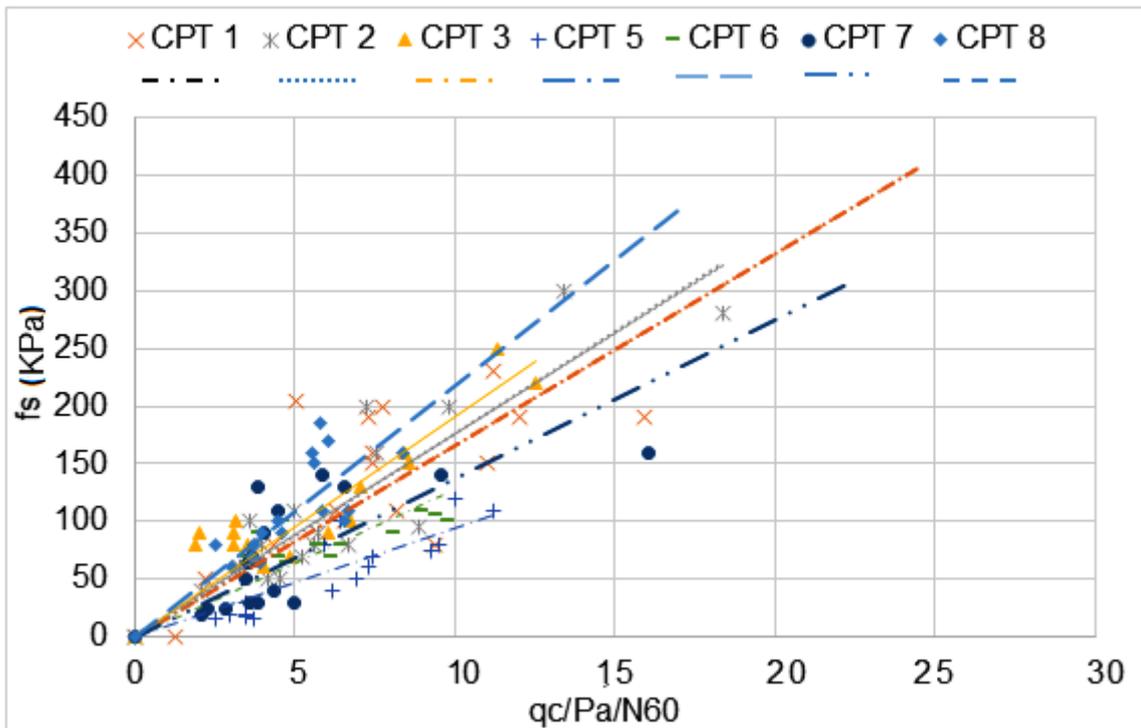


Figura 4.18 – Correlações entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{sPT}$  para todas as regiões.

A Tabela 4.2 apresenta a relação  $f_s/[N_{60}/(q_c/pa)]$  encontrada através de ajustes lineares, para as zonas 1 a 8. Excetuando-se as zonas 1 e 6 os coeficientes de determinação para o ajuste linear foram consideravelmente elevados.

Tabela 4.2- valores de  $f_s/[N_{60}/(q_c/Pa)]$

Zona CPT	$f_s \cdot N_{60}/(q_c/p_a)$	$R^2$
1	16,63	0,468
2	17,61	0,807
3	19,30	0,794
5	9,39	0,789
6	12,79	0,441
7	13,75	0,506
8	21,81	0,658

A Figura 4.19 mostra a correlação entre  $f_s$  e  $(q_c / Pa)/N_{60}$  obtida utilizando os dados de todas as sete zonas, selecionados de acordo com a abordagem baseada no alcance do semivariograma, descrita no Capítulo 3. Um valor de 16,0 foi encontrado para a relação  $f_s/[N_{60}/(q_c/Pa)]$  para o solo investigado.

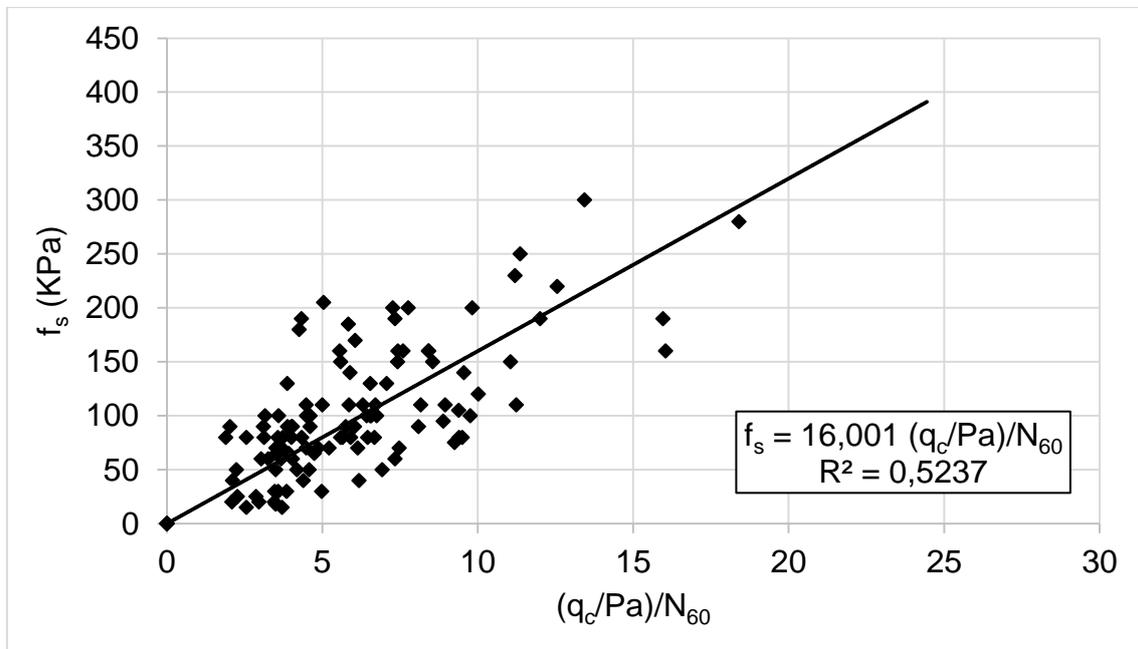


Figura 4.19 – Correlação única entre  $f_s$ ,  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para todas as regiões.

#### 4.4. Correlações entre $q_c$ e $N_{SPT}$ - Resultados por IDW

Na tentativa de representar mais adequadamente o perfil dado pelos boletins de sondagem SPT, utilizou-se o método geoestatístico determinístico IDW para interpolação de um perfil a partir dos boletins contidos na zona de influência anteriormente delimitada. A partir da planta de locação dos furos de sondagem SPT foram obtidas as distancias entre sondagens que, juntamente com os valores dos boletins, serviram como dados de entrada na equação 2.14.

As Figuras 4.20 a 4.26 apresentam as correlações obtidas a partir do método determinístico IDW para boletins contidos na zona de influência delimitada por um raio de 35 m, distância máxima onde os resultados dos ensaios ainda apresentam correlações entre si.

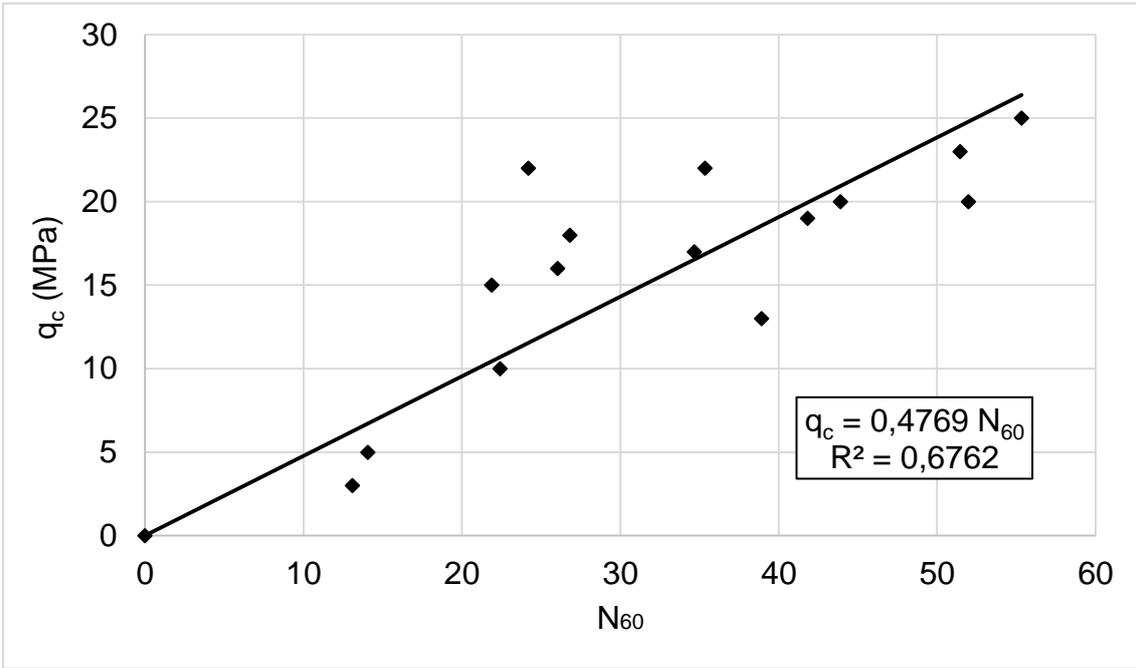


Figura 4.20 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-1 usando IDW.

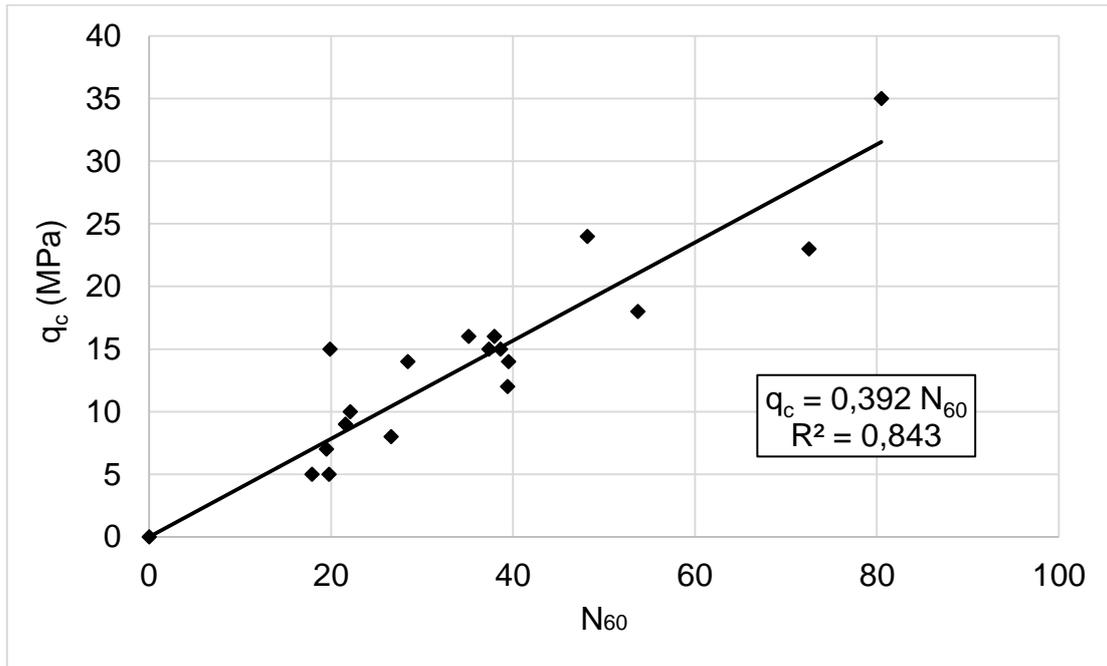


Figura 4.21 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-2 usando IDW.

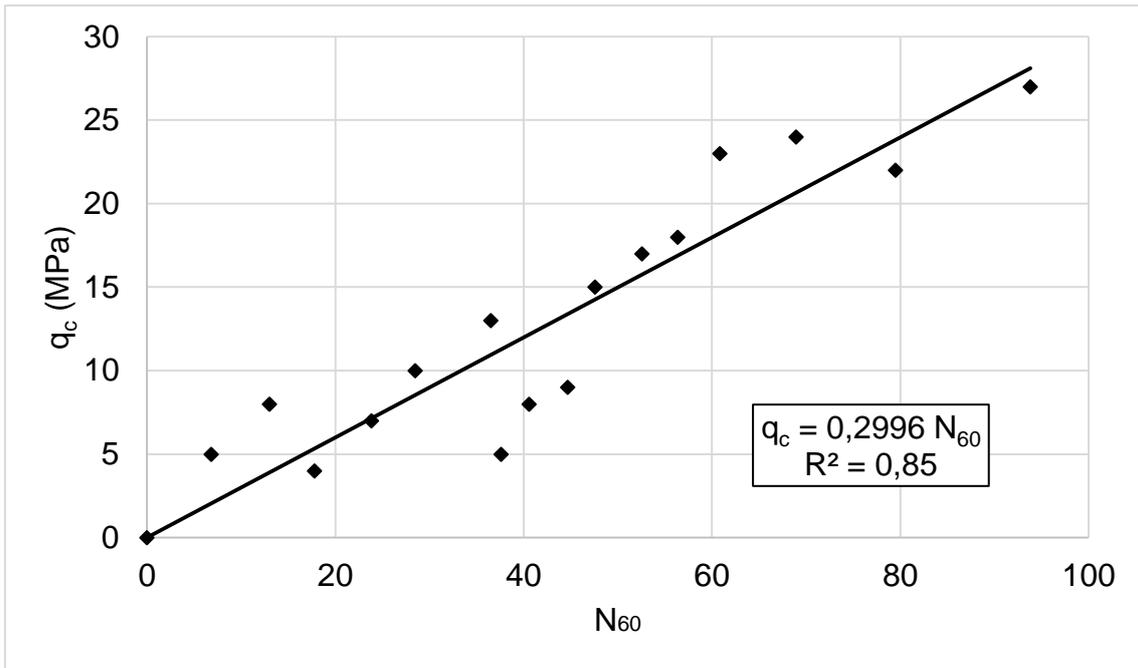


Figura 4.22 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-3 usando IDW.

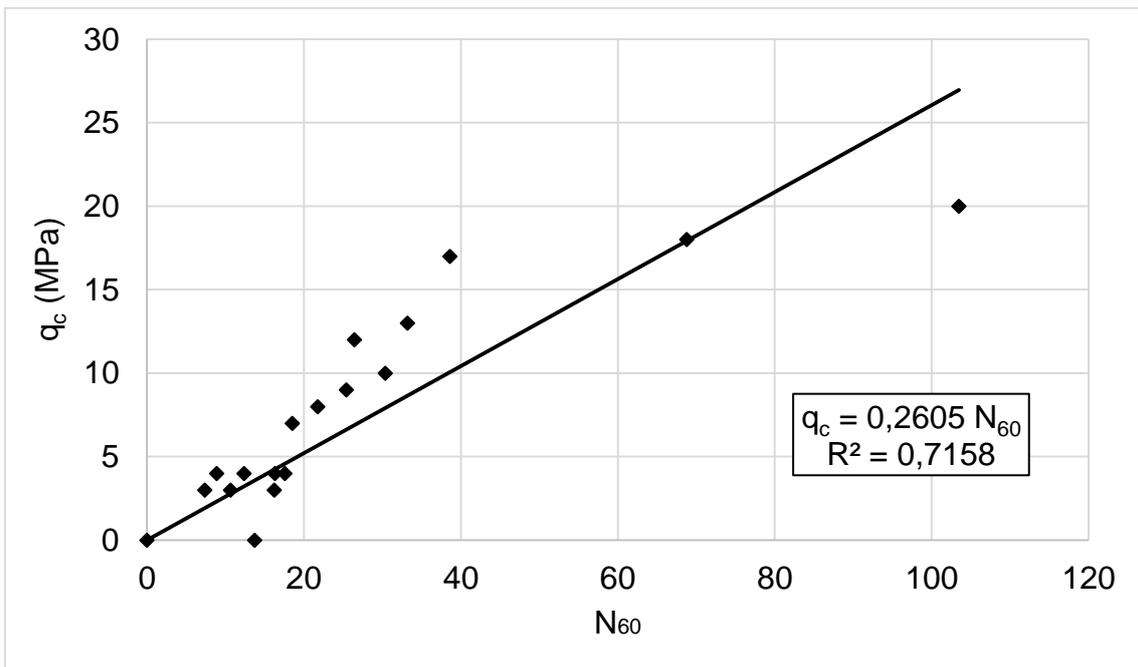


Figura 4.23 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-5 usando IDW.

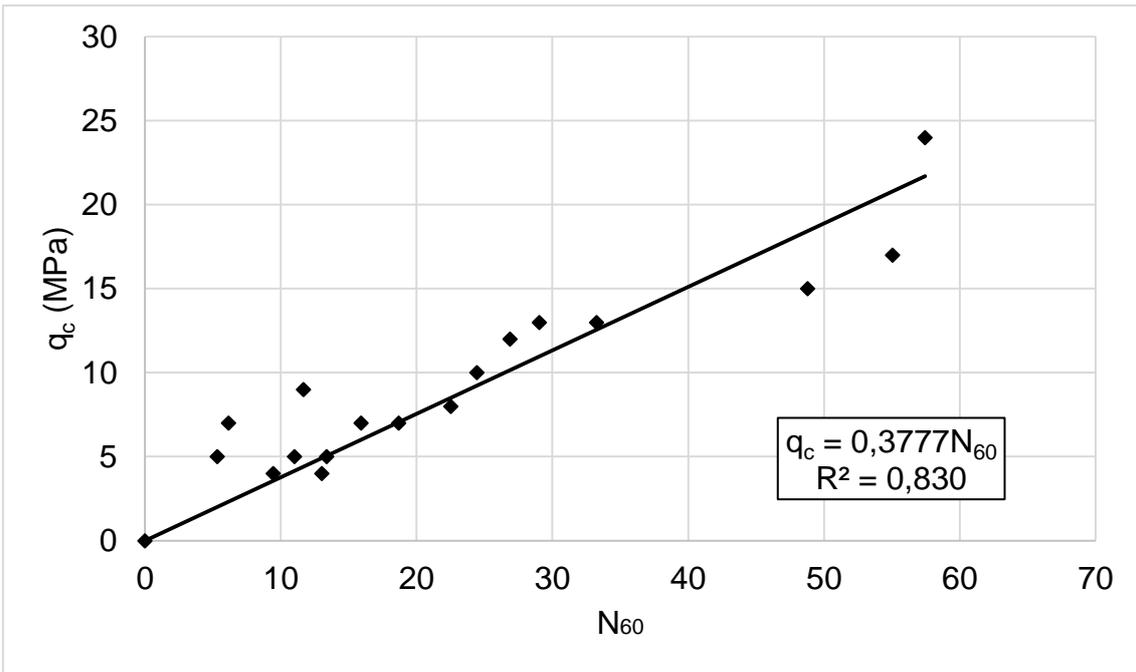


Figura 4.24 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-6 usando IDW.

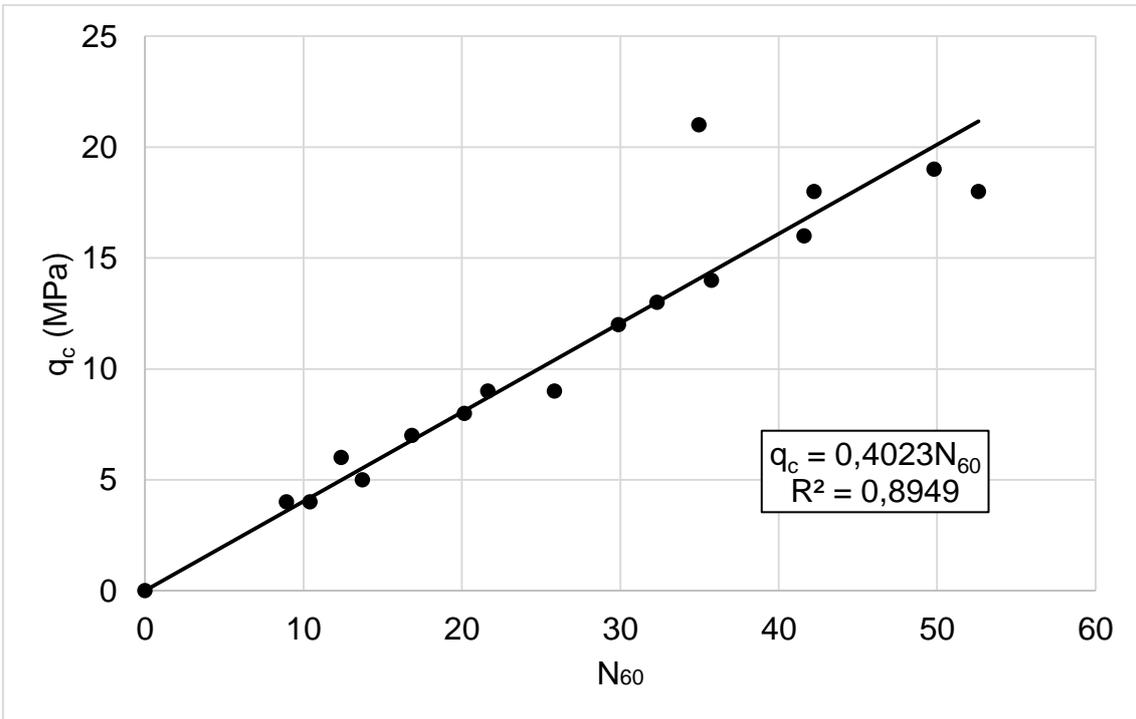


Figura 4.25 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-7 usando IDW.

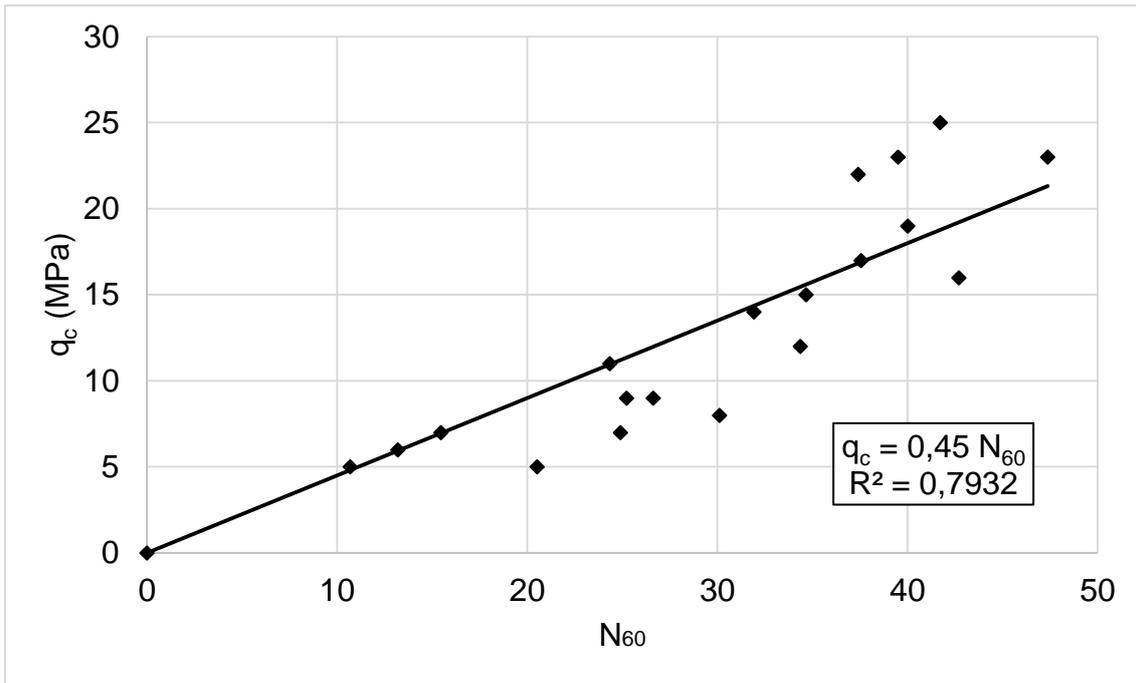


Figura 4.26– Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-8 usando IDW.

Na Figura 4.27 se apresenta a correlação para todos os dados de todas as zonas de influência, cujo valor de correlação obtido é  $k = 0,37$  MPa.

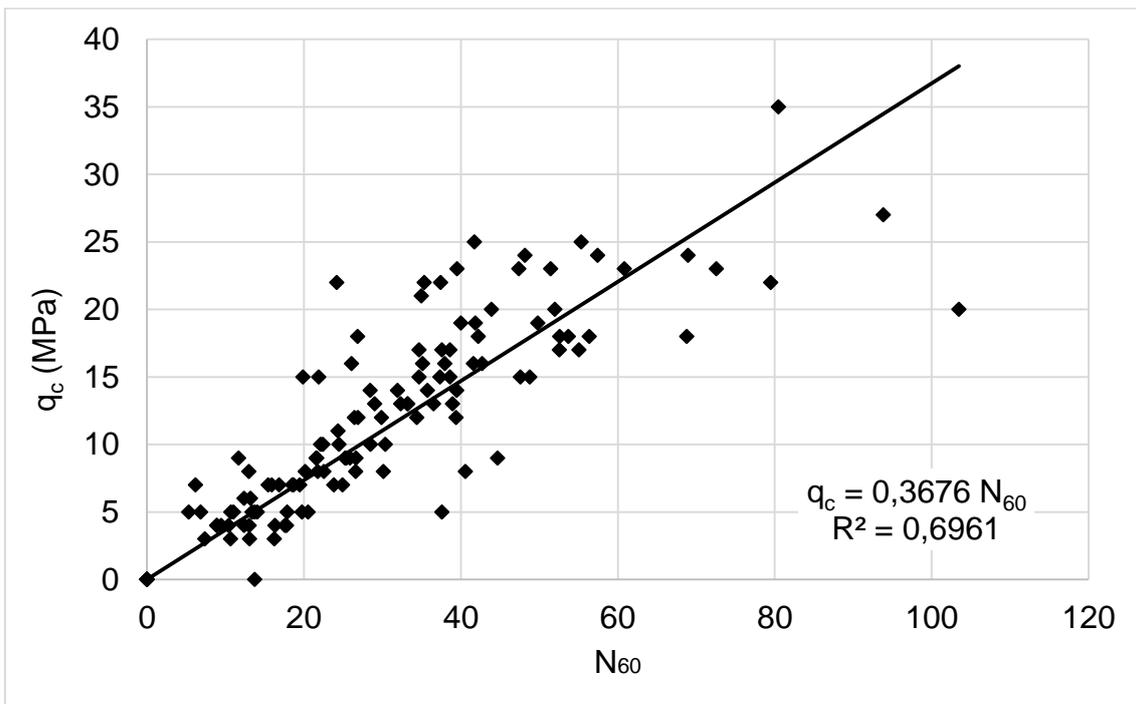


Figura 4.27 – Correlação única entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para todas as regiões usando IDW.

#### 4.5. Correlações entre $q_c$ e $N_{SPT}$ - Resultados por Krigagem Ordinária

Utilizou-se o método geostatístico de Krigagem Ordinária para interpolação de um perfil a partir dos boletins contidos na zona de influência dos CPT's com o intuito de melhor representar o perfil dado pelos boletins de sondagem SPT, o que possibilitou a determinação de correlações entre  $q_c$ , resistência de ponta dos respectivos ensaios de cone de cada região e  $N_{SPT}$ , retirado do perfil interpolado, cujas coordenadas coincidem com a localização do ensaio do cone.

As Figuras 4.28 a 4.34 apresentam as correlações entre  $q_c$  e  $N_{60}$  obtidas para todas as zonas de influência entre o ensaio CPT coincidente com o centro da circunferência que delimita esta zona, e um perfil SPT interpolado utilizando todos os boletins de sondagem SPT inseridos na zona em questão, a partir do método da Krigagem ordinária via software S-gems.

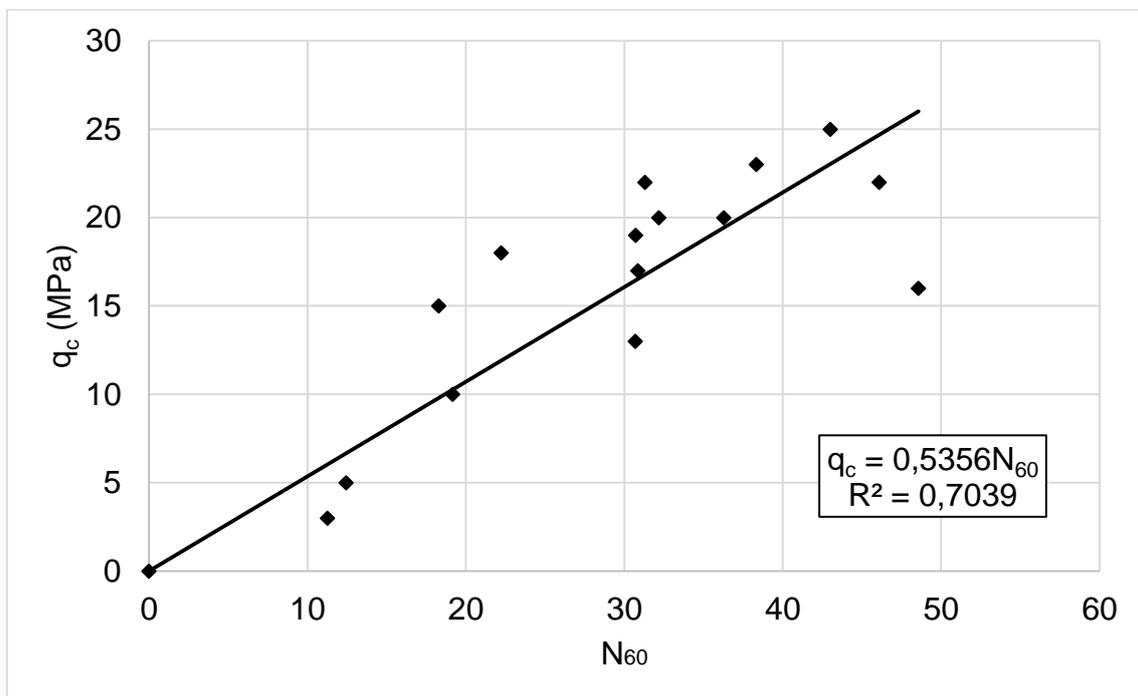


Figura 4.28– Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-1 usando KO.

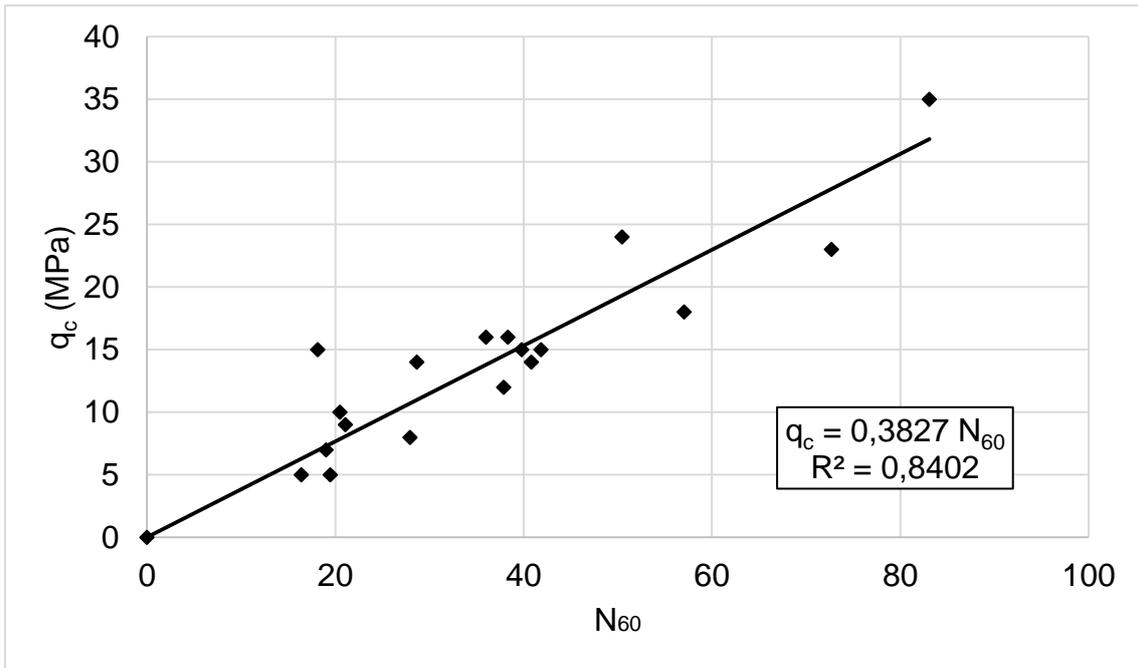


Figura 4.29 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-2 usando KO.

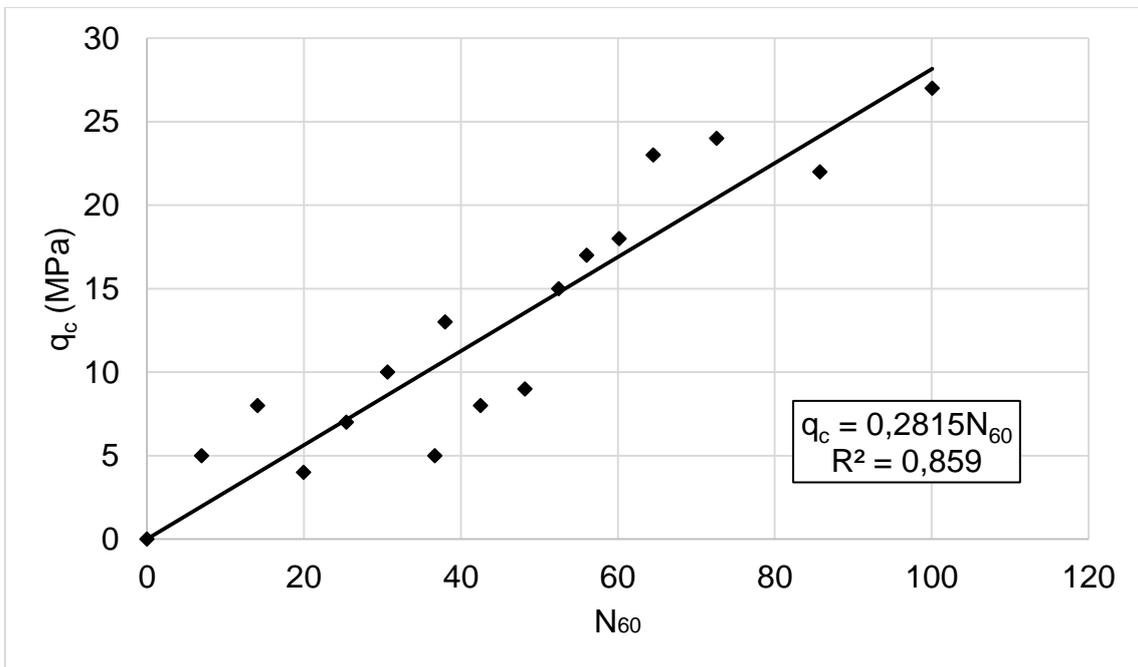


Figura 4.30 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-3 usando KO.

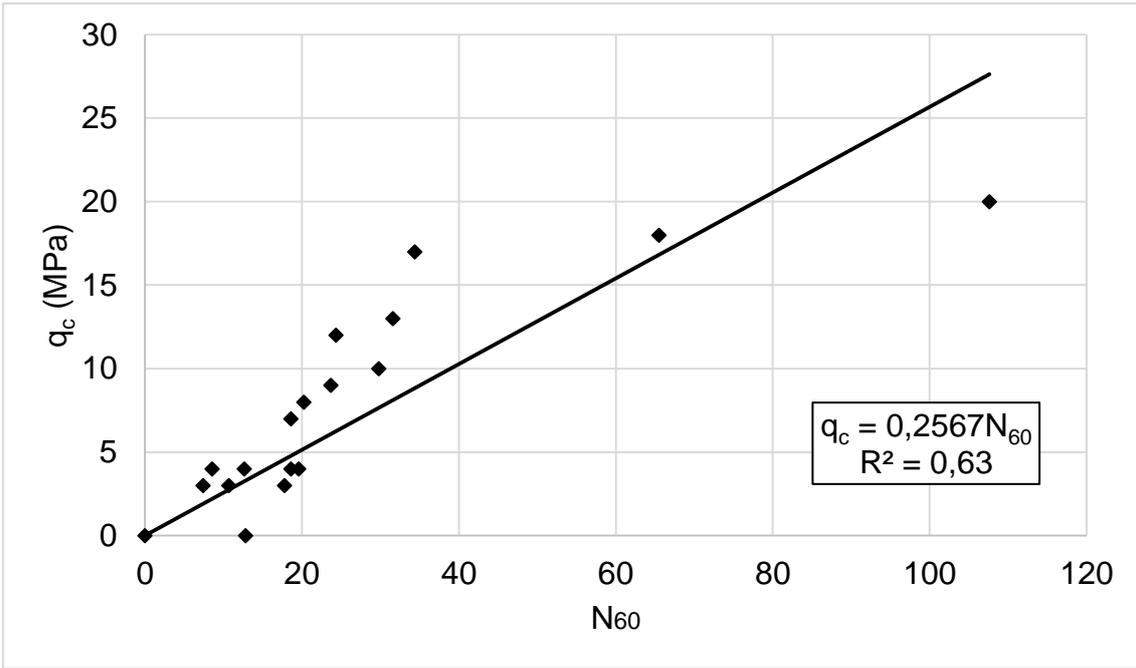


Figura 4.31 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-5 usando KO.

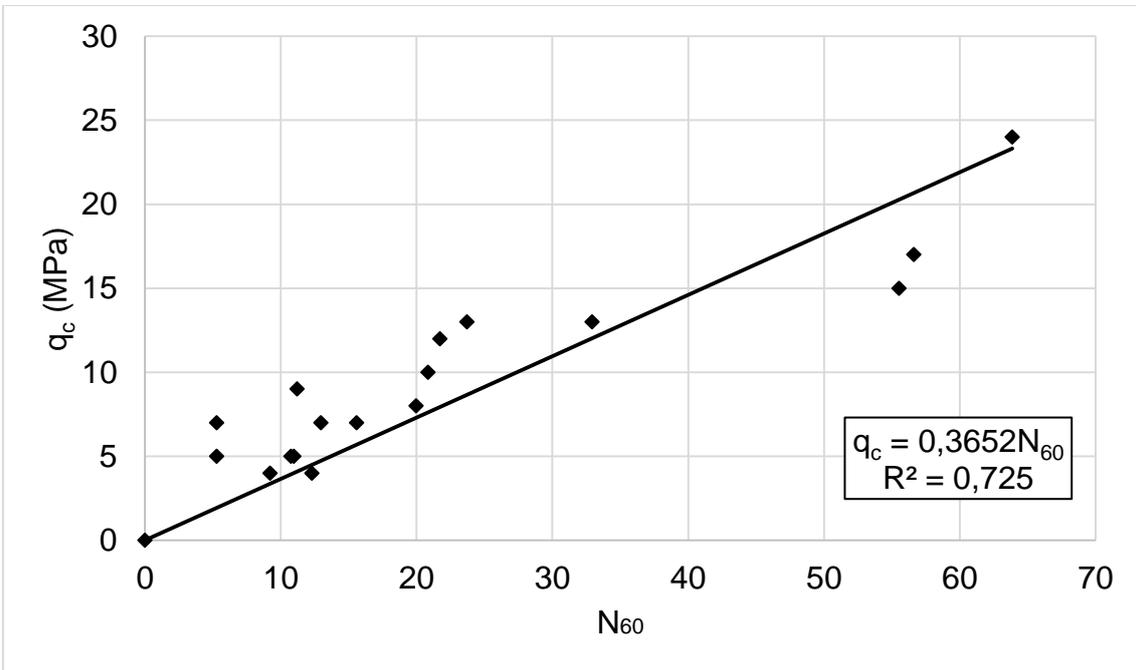


Figura 4.32 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-6 usando KO.

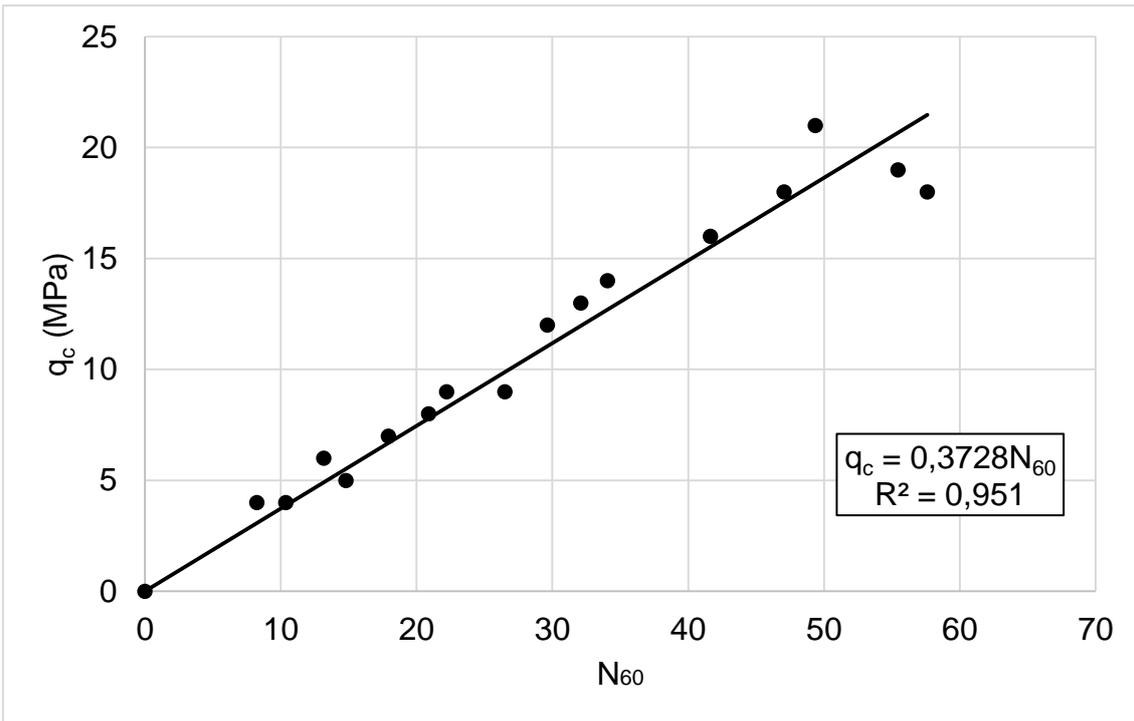


Figura 4.33 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-7 usando KO.

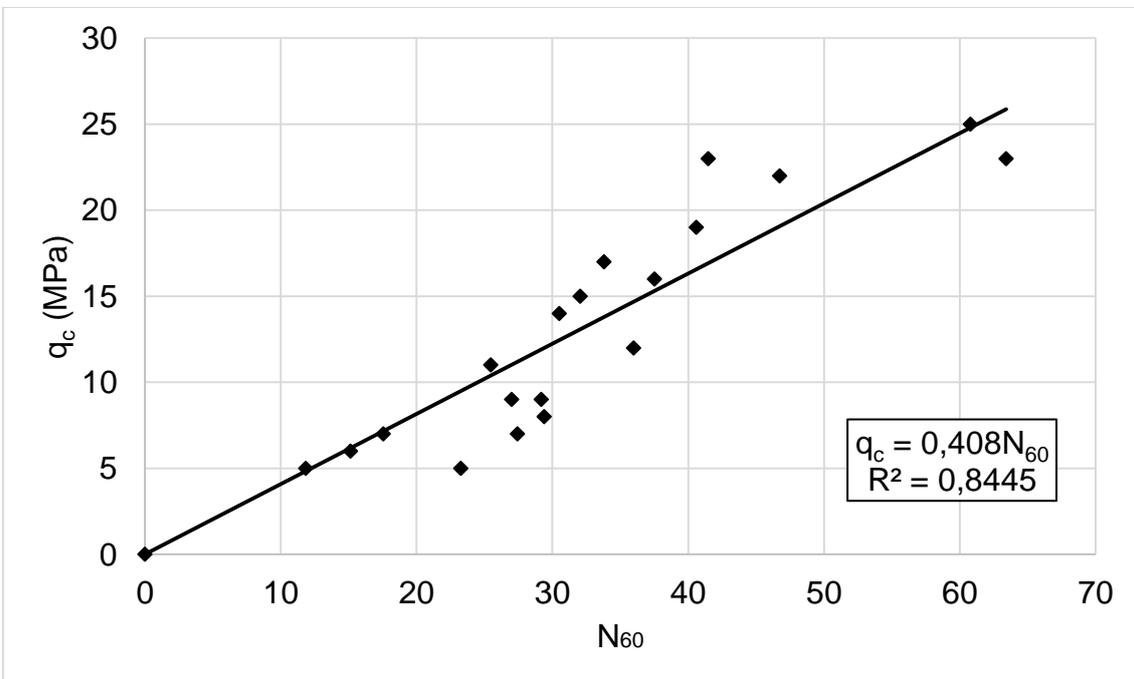


Figura 4.34 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para CPT-8 usando KO.

A Figura 4.35 apresenta a correlação para os dados de todas as regiões delimitadas, onde pode-se observar uma razão  $k = 0,35$  MPa.

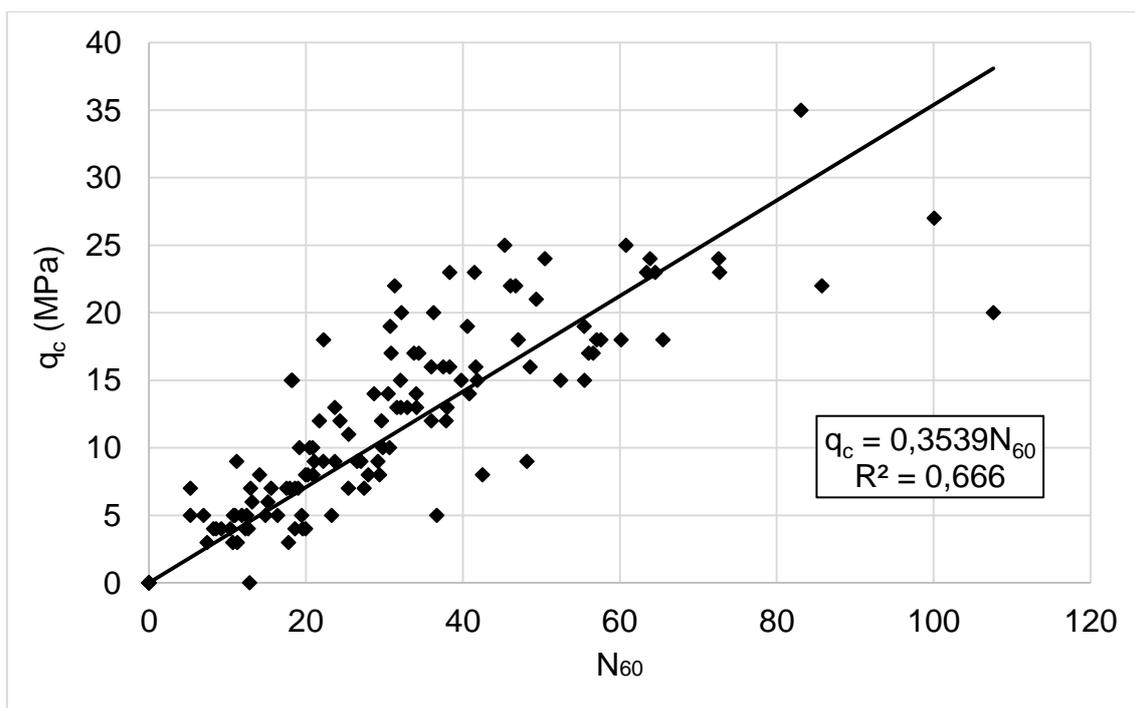


Figura 4.35– Correlação única entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  para todas as regiões usando KO.

Optou-se pela utilização de ajustes de curvas baseados em funções lineares para todas as áreas de influência, bem como para IDW e KO tanto pela praticidade e simplicidade, pela aceitação corroborada pela ampla utilização destes ajustes na literatura, bem como pela própria tendência apresentada pelas dispersões e justificadas pelos altos valores de coeficiente de determinação atrelado a cada ajuste.

De maneira geral, observa-se que os resultados obtidos para  $k$  através das três abordagens são muito próximos entre si, denotando a equivalência das mesmas para os dados disponíveis no presente estudo.

Comparando-se com os dados de Aoki e Velloso (1975) e Danziger e Velloso (1986, 1995), observa-se que os resultados obtidos de  $k$  situaram-se abaixo da faixa de valores sugeridas para outros solos brasileiros equivalentes (areia siltosa), ficando mais próximos de alguns resultados propostos na literatura internacional (Robertson e Campanella, 1983; Kara e Gunduz, 2010; Sharih e Juhlin, 2014).

# Conclusões e Sugestões para Pesquisas Futuras

### 5.1. Conclusões

No presente trabalho, desenvolveram-se correlações lineares entre os resultados de 88 sondagens de simples reconhecimento com SPT e oito ensaios de penetração do piezocone (CPTu), em solos arenosos da cidade de Natal – RN. A resistência à penetração do ensaio SPT corrigida para eficiência de 60% ( $N_{60}$ ) foi correlacionada com a resistência de ponta  $q_c$  e a resistência lateral  $f_s$  do ensaio de piezocone, utilizando-se três abordagens geoestatísticas distintas: o alcance do variograma, o IDW e a krigagem ordinária.

A análise variográfica evidenciou a grande dispersão entre os valores dos ensaios SPT. Posteriormente, a matriz de correlação forneceu o grau de correlação entre as coordenadas x, y e z, e a variável  $N_{60}$ , elucidando a total falta de correlação da variável estudada com as coordenadas espaciais, exceto o incremento dos valores de  $N_{SPT}$  com a coordenada z (profundidade). Dessa forma, foram estabelecidas zonas de influência em torno de cada ensaio CPT, com o propósito de correlacionar somente os ensaios inseridos nesta. O critério utilizado para demarcação do limite das zonas de influência foi o alcance do semivariograma. Foram plotados quatro semivariogramas para as profundidades de 1, 5, 10 e 15 m, como o intuito melhor caracterizar o solo, pois o perfil encontrado consistia em uma camada bastante espessa de areia siltosa. Os modelos teóricos empregados, do tipo com patamar e esférico, ajustaram-se razoavelmente bem aos pontos dos semivariograma experimentais.

A menor distância em que as amostras perderam completamente correlação foi 35 m, correspondente ao alcance do semivariograma para a profundidade de 1 m. Logo, essa distancia foi utilizada como raio da circunferência delimitante das zonas de influência.

Para esta abordagem, foram obtidas correlações lineares entre  $q_c$  e  $N_{60}$  com valores de  $k = q_c/N_{60}$  para areia siltosa entre 0,31 e 0,51 MPa. Os

coeficientes de determinação encontrados, entre 0,70 e 0,92, demonstram a alta qualidade dessas correlações.

Foram também obtidas correlações lineares, através de análise variográfica, entre a resistência lateral do cone ( $f_s$ ) e a razão  $(q_c/Pa)/N_{60}$ , sendo  $P_a$  a pressão atmosférica. Os resultados forneceram valores de  $f_s/[(q_c/Pa)/N_{60}]$  entre 9,4 e 21,8. Os coeficientes de determinação obtidos, entre 0,44 e 0,81, demonstraram uma dispersão maior dos dados para essas correlações, em comparação com aquelas usadas para obtenção de  $k$ .

Os valores das correlações lineares obtidas pela interpolação perfil SPT através do método IDW para a areia siltosa situaram-se entre  $k = 0,26$  e  $0,48$  MPa e os coeficientes de determinação, entre 0,67 e 0,89. No que diz respeito às correlações estabelecidas por krigagem ordinária, estas situaram-se em uma faixa de valores semelhante à obtida pelo IDW, com valor mínimo de  $0,26$  MPa e máximo de  $0,54$  MPa. Os coeficientes de determinação situaram-se entre 0,63 e 0,86.

As correlações lineares obtidas utilizando todos os pontos disponíveis forneceram  $k = 0,38$  MPa,  $0,37$  MPa e  $0,36$  MPa para os métodos do alcance do variograma, IDW e krigagem ordinária, respectivamente. Os coeficientes de determinação obtidos foram iguais a 0,73, 0,70 e 0,67, respectivamente.

Os resultados obtidos para o parâmetro  $k$  através das três abordagens foram muito próximos entre si, podendo-se concluir que, para os dados disponíveis no presente estudo, as mesmas foram equivalentes. Os resultados obtidos para  $k$  situaram-se abaixo da faixa de valores proposta na literatura para outros solos brasileiros equivalentes (areia siltosa), ficando mais próximos de algumas faixas propostas na literatura internacional.

## **5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras**

Sugere-se, para pesquisas futuras, empregar técnicas geoestatísticas para obtenção de correlações em outros tipos de solos brasileiros, principalmente os da Região Nordeste, dada a carência de dados na literatura para esta região. A criação de um banco de dados de boletins de sondagens

facilitaria a utilização dos resultados do local em estudo de maneira organizada e sistematizada.

Sugere-se a avaliação de outros métodos de análise geoestatística, além dos empregados no presente estudo, que venham, de forma fidedigna, contribuir com o desenvolvimento de projetos de fundações mais racionais e adequados aos solos da região. Como outras abordagens possíveis de emprego citam-se a regressão linear múltipla, a krigagem universal e a krigagem indicativa. Eventualmente, poderão ser testadas correlações não lineares entre as variáveis em estudo.

## REFERÊNCIAS

- ABNT (1991). *NBR12069 – Solo – Ensaio de penetração de cone *in situ* CPT*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2001). *NBR6484 – Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- AKCA, N. (2003). Correlation of SPT-CPT data from the United Arab Emirates. *Engineering Geology*.V.67, 219-231.
- ALONSO, U. R. Correlações entre resultados de ensaios de penetração estática e dinâmica para a cidade de São Paulo. *Revista solos e rochas*. Vol, 3. Nº 3, p. 19-25, 1980.
- ALTUN, S.; GOKTEP, A.; SEZER, A. (2013). Geostatistical interpolation for modelling SPT data in northern Izmir. *Sadhana*.V.38, 1451-1468.
- ANDRIOTTI, J. L. S. 2003, Fundamentos de estatística e geoestatística. Editora Unisinos. 166 p., 2003.
- ANGELIM, L. A. A.; NESI, J. R.; TORRES, h. H. F.; MEDEIROS, V. C.; SANTOS, C. A.; JUNIOR, J. P. V.; MENDES, V. A. (2006). *Geologia e recursos minerais do estado do rio grande do norte*. Cprm. Recife.
- AOKI, N.; BRITO, C. A. S. (1970). O penetrômetro holandês de 17,5 tf.. IN: IV congresso Brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações. Rio de Janeiro. Anais do. Rio de Janeiro: ABMS. V. I. p. I-113-I-121.
- AOKI, N.; ESQUIVEL, E.R.; NEVES, L.F.S; CINTRA, J.C.A. (2007). The impact efficiency obtained from static load test performed on the SPT sampler. *Soils and*
- AOKI, N.; VELLOSO, D.A. 1975. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: Panamerican Conf. Soil Mech. Found. Eng., 5, Buenos Aires, 1975. Proc., Buenos Aires, Huella Estudio Grafico, 1975, V.1, pp. 367-376.

BARATA E., et al. 1978. Ensaio de tração em estacas escavadas e sapatas em solo residual. In: VI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Proc., Rio de Janeiro. v. 3. pp. 1-37.

BELINCANTA, A.; CINTRA, J.C.A. Fatores intervenientes em variantes do método ABNT para Execução do SPT. Revista Solos e Rochas. ABMS, vol. 21, n.3. 1998.

BELINCANTA, A.; FERRAZ, R, L. Fundamentos e métodos de medidas de energia dinâmica no SPT. Revista Solos e Rochas. ABMS, vol. 22, n.3. 2000.

BEZERRA, J. E. 2014, Aplicação de técnicas geoestatísticas no processo de otimização de projetos de fundações estaqueadas. 266 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília. Brasília- DF, 2014.

CARVALHO, I. S. Proposta para certificação das empresas de sondagens a percussão – tipo SPT. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Mato grosso. Cuiabá-MT, 2012.

CAVALCANTE, E. H. Investigação teórico-experimental sobre o SPT. 2002. 445 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro-RJ ,2002.

CHAN, C.T; DUAN, S.W; KAO, T.C. SPT-CPT correlations for granular soils. In: 1st International Symposium on Penetration Testing, 1988, Orlando, Flórida. Proceedings. Vol. 1, pp. 335-339, USA, 1988.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; TSUHA, C. H. C.; GIACHETI, H. L. Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos. São Paulo-SP: Oficina de Textos. 144 p. 2013.

COSTA, Y. D. J; COSTA, J. P. S.; SILVA Jr, A. L. Medidas da Eficiência do Ensaio SPT em Areia Através de Provas de Carga Estática no Amostrador Padrão (PCESPT), COBRAMSEG, Porto de Galinhas-PE. 2012.

DANZIGER, B. R.; VELLOSO, D. A. Correlations between the CPT and SPT for some Brazilian soils In: 1st International Symposium on Cone Penetration Test, 1995, Linköping, Suécia. Proceedings. 1995.

DANZIGER, B.R.; VELLOSO, D.A. 1986. Correlações entre SPT e os resultados dos ensaios de penetração contínua. In: VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Proc., Porto Alegre. v. 6. pp. 103-113.

DANZIGER, F. A. B.; POLITANO, C. F. & DANZIGER, B. R. 1998. CPT - SPT correlations for some Brazilian residual soils. In: Geotechnical Site Characterization. Proc. 1st Int. Conf. on Site Characterization, ISC'98, Atlanta, USA, Balkema, vol. 2, pp. 907-912.

ELKATEB, T. M; ALI, H. L. CPT-SPT correlations for calcareous sand in the Persian Gulf area In: 2nd International Symposium on Cone Penetration Test, 2010, Huntington Beach, Califórnia. Proceedings. California, 2010.

EL-SHERBINY, R. M; SALEM, M. A. Evaluation of SPT energy for Donut and Safety hammers using CPT measurements in Egypt. In: Ain Shams Engineering Journal, 2013, Egypt, Vol. 4, pp. 701- 708.

FOLLE, D. 2009. Análise e aplicação de geoestatística no contexto geológico-geotécnico urbanol. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 232 p.

FONTELES, H.R.N. 2003, Caracterização Geotécnica do subsolo da porção nordeste do município de Fortaleza (CE) com base em geoestatística. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo (EESC/USP), São Carlos, 2006, 135 p.

GUSMÃO FILHO, J. A. (1982). Prática de fundações nas capitais nordestinas. IN: VII congresso Brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações. Olinda. Anais do. Recife: ABMS. V. I. p. I-189-I-206.

HENGL, A. 2009, Practical guide to geostatistical mapping. Office for official publications of the european communities. 293 p. 2009.

JESUS A. P. (2002). Caracterização Geológica, Geomorfológica e Geotécnica de um Corpo de Dunas na Cidade de Natal/RN. Dissertação (Mestrado).

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal/RN, 214p.

KARA, O.; GÜNDÜZ, Z. Correlation between CPT and SPT in Adapazari, Turkey. In: 2nd International Symposium on Cone Penetration Test, 2010, Huntington Beach, Califórnia. Proceedings. California, 2010.

KASIM, A. G.; CHU, M.; JENSEN, C. N. 1986, Field correlation of cone and standard penetration tests, jornal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 112, pp. 368- 372.

LANDIM, P. M.B. 2011, Análise estatística de dados geológicos multivariados. São Paulo: Oficina de textos. 211 p. 2011.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. Cone Penetration Testing in geotechnical Practice. Blackie Academic and Professional, an Chapman & Hall. 305 p., 1997.

MENDES, R. M; LORANDI, R. 2002, Engineering Geology Mapping off the urban Center Area of São José do Rio Preto (Brazil) as na Aid Urban Planning. In:, Engineering Geology for developing Countriues – Proceddings of the 9th international association for Engineering Geology and the environment. Durban, South Africa. CD\_ROM.

NAIME, H. R; FIORI, A. P. 2002, Variáveis Geológicas no Comportamento das Razões qc/N em Porto Alegre, RS – Brasil, Pesquisas em Geociências, Vol. 29(2). pp 53-63, 2002.

NEVES, S.L.F. Metodologia para determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

New York: ASCE, 1986.

NOREÑA, P.C.T. Estimativa da eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

ODEBRECHT, E. Medidas de energia no ensaio.2003. 210 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio grande do Sul. Porto Alegre-RS,2003.

of piezometer cone data", in: Specialy Conf. Use In-situ Tesis Geotech. Engng.

PERES, J. P. 1998, Geostatística aplicada ao mapeamento do índice de resistência a penetração do ensaio padronizado (SPT). Dissertação de mestrado. UNESP, Rio Claro- SP. 184p.

POLITANO, C. F. Correlações entre os resultados de CPT e SPT em solos residuais.1999. 210 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE. Rio de Janeiro-RJ,1999.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R.G.; GILLESPIE, D. & GREIG, J. "Use

ROBERTSON, P.K. Soil behaviour type from the CPT: an update. In: 2nd International Symposium on Cone Penetration Test, 2010, Huntington Beach, Califórnia. Proceedings. California, 2010.

ROBERTSON, P.K.; CAMPANELLA, R.G.; WIGHTMAN, A. 1983, "SPT- CPT Correlations", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 109, Nº 111, pp. 1449- 1459.

SALEHZADEH H, HOZOURI A, GOLESTANI A. Correlation between cone and standard penetration tests. In: 5th Symposium on advances in science and technology (SASTech 2011), Khavaran Higher-education Institute, Mashhad, Iran. May 12–14; 2011.

SCHMERTMANN, J.H.; PALACIOS, A. (1979). *Energy Dynamics of SPT*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE, v.105, nGT8, p.909-926.

SCHNAID, F. Ensaio de campo e suas aplicações a engenharia de fundações. 1ª ed. Oficina de Textos. 189 p., 2000.

SCHNAID, F.; ODEBRETCH, E. Ensaio de campo e suas aplicações a engenharia de fundações. 2ª ed. Oficina de Textos. 189 p., 2012.

SHAHRI, A. A; JUHLIN, C. 2014, A reliable correlation of SPT-CPT data for southwest of Sweden, Electronic Journal Geotechnical Engineering, Vol. 19, pp. 1013- 1032.

SILVA, E.A.J.; SANTOS JR., O.F.; JESUS, A.P.; AMARAL, R.F. (2002) Caracterização Geológica, Geomorfológica e Geotécnica de Sedimentos do Setor Sul de Natal/RN, com Base em Análises de Perfis de Sondagens de

Simple Reconhecimento. 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Ouro Preto.

SOARES, A. 2006, Geoestatística para ciências da terra e do ambiente. Portugal: IST Press. 234 p. 2006.

SOUZA, B. P. A influência da compacidade das areias nas correlações entre os ensaios do cone e o SPT. 2009. 249 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro-RJ, 2009.

STURARO, J. R. 1994, Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, 183 p. 2013.

STURARO, J. R. e LANDIN, P. M. B. 1996, Mapeamento geoestatístico de ensaios de penetração padronizada (SPT). Solos e Rochas, v. 19, n. 1, p. CD-ROM.

VELLOSO, D. A. 1959. O ensaio de *diepsondeering* e a determinação da capacidade de carga do solo. Rodovia, 29.

**Anexo 1- Localização dos ensaios SPT e CPT dentro da  
Projeção do Estádio**

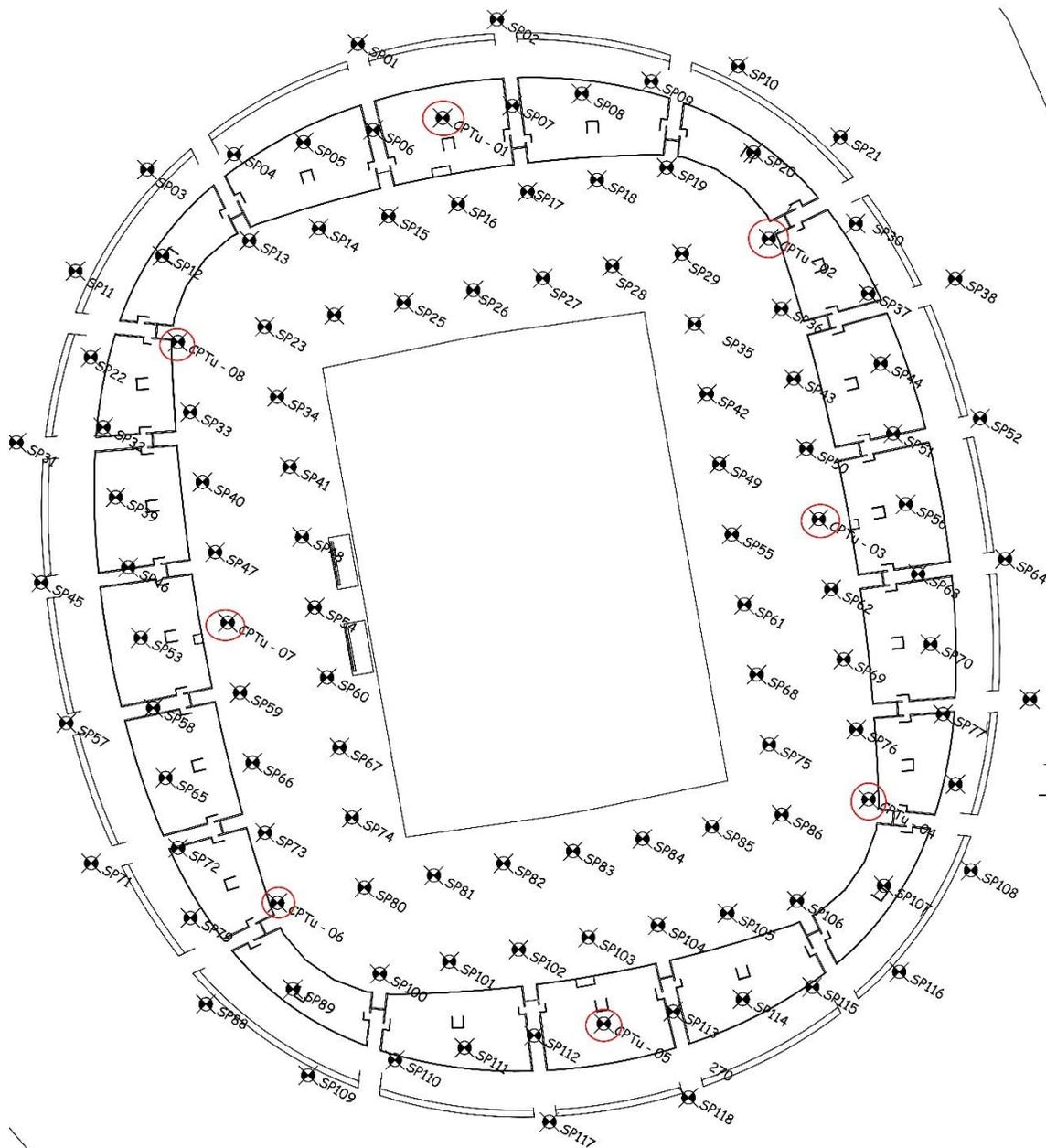


Figura A1.1 – Localização dos ensaios SPT e CPT dentro da projeção do estádio (sem escala)

**ANEXO 2 – Estatísticas descritivas das regiões dos ensaios  
CPT**

- **REGIÃO 2**

Ensaio relacionados:

**CPT- 2**

SPT-19, SPT-20, SPT-21, SPT-35, SPT-36, SPT-37, SPT-38, SPT-42, SPT-43, SPT-44

Estatísticas básicas:

Tabela A2.1 – Estatísticas básicas da região 2

n Válidos	197
Média	30,85787
Confiança - 95,000%	28,12307
Confiança +95,000%	33,59267
Mediana	26,00000
Moda	Multiple
Frequencia Moda	8
Minimo	4,000000
Maximo	86,00000
Variancia	378,8266
Desvio Padrão	19,46347
Erro Padrão	1,386715
Assimetria	0,932017
Curtose	0,215799

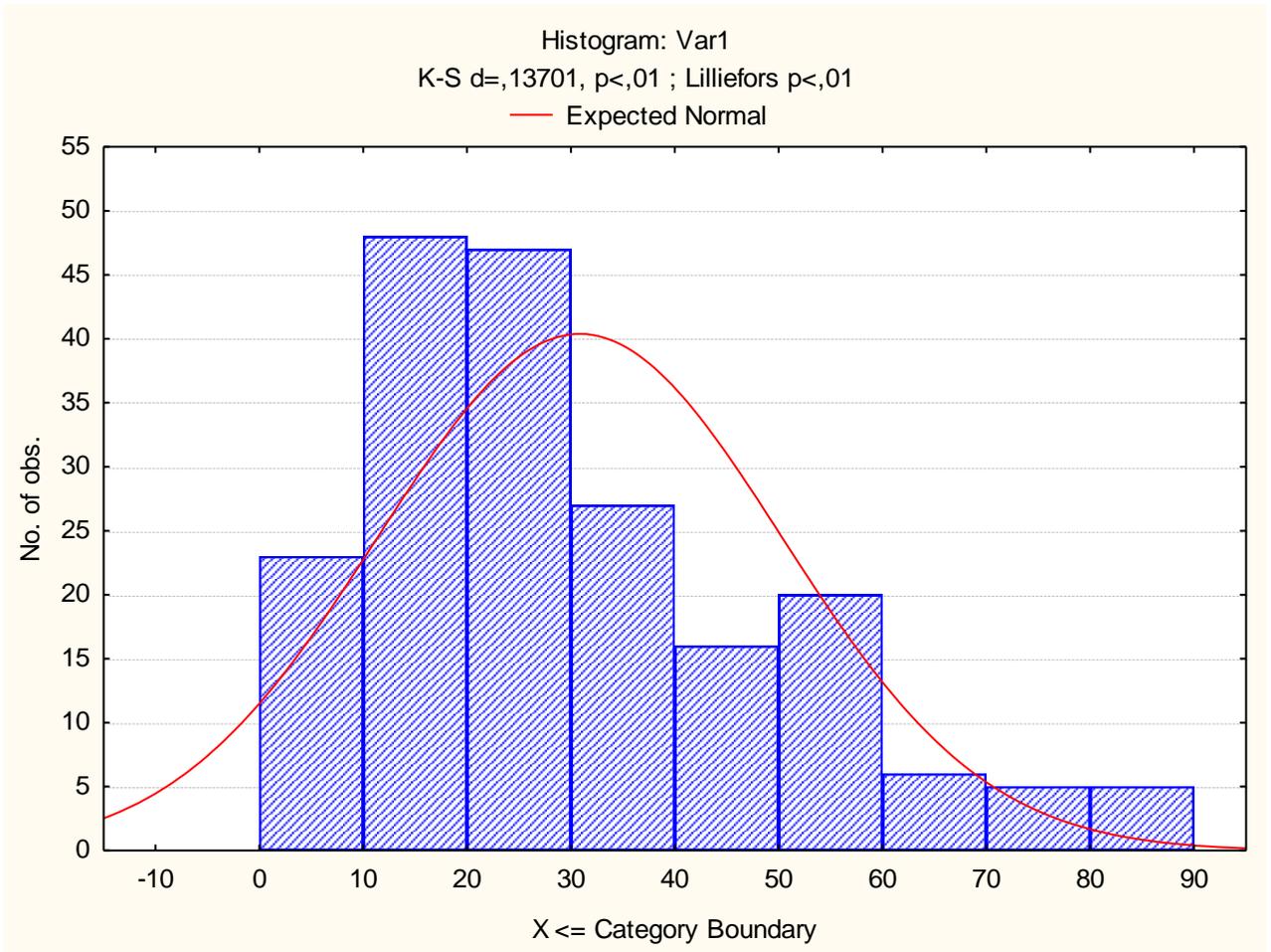


Figura A2.1- Distribuição de frequência dos valores de  $N_{SPT}$  para região do CPT- 2

- **REGIÃO 3**

Ensaio relacionados:

**CPT- 3**

SPT-49, SPT-50, SPT-51, SPT-55, SPT-56, SPT-61, SPT-62, SPT-63, SPT-68, SPT-69, SPT-70

Estatísticas básicas:

Tabela A2.2 – Estatísticas básicas da região 3

n Válidos	206
Média	35,55340
Confiança - 95,000%	32,21722
Confiança +95,000%	38,88957
Mediana	30,50000
Moda	5,000000
Frequencia Moda	8
Minimo	2,000000
Maximo	97,00000
Variancia	589,8288
Desvio Padrão	24,28639
Erro Padrão	1,692113
Assimetria	0,669853
Curtose	-0,441147

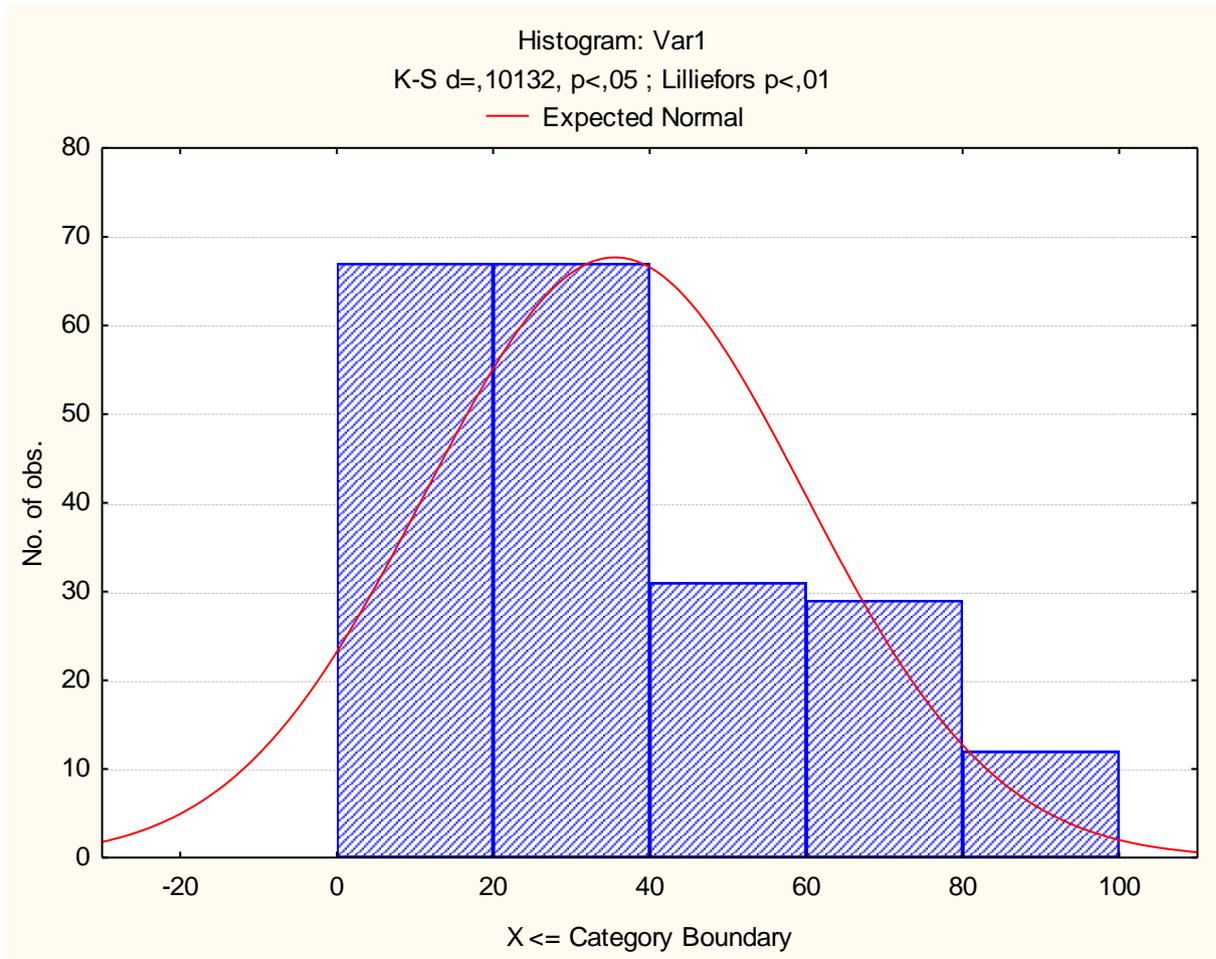


Figura A2.2- Distribuição de frequência dos valores de  $N_{SPT}$  para região do CPT- 3

- **REGIÃO 4**

Ensaio relacionados:

**CPT- 4**

SPT-75, SPT-76, SPT-77, SPT-85, SPT-86, SPT-106, SPT-107, SPT-108

Estatísticas básicas:

Tabela A2.3 – Estatísticas básicas da região 4

n Válidos	140
Média	28,64286
Confiança - 95,000%	24,41385
Confiança +95,000%	32,87186
Mediana	18,00000
Moda	8,000000
Frequencia Moda	10
Minimo	2,000000
Maximo	101,0000
Variancia	640,4902
Desvio Padrão	25,30791
Erro Padrão	2,138909
Assimetria	1,341508
Curtose	0,806392

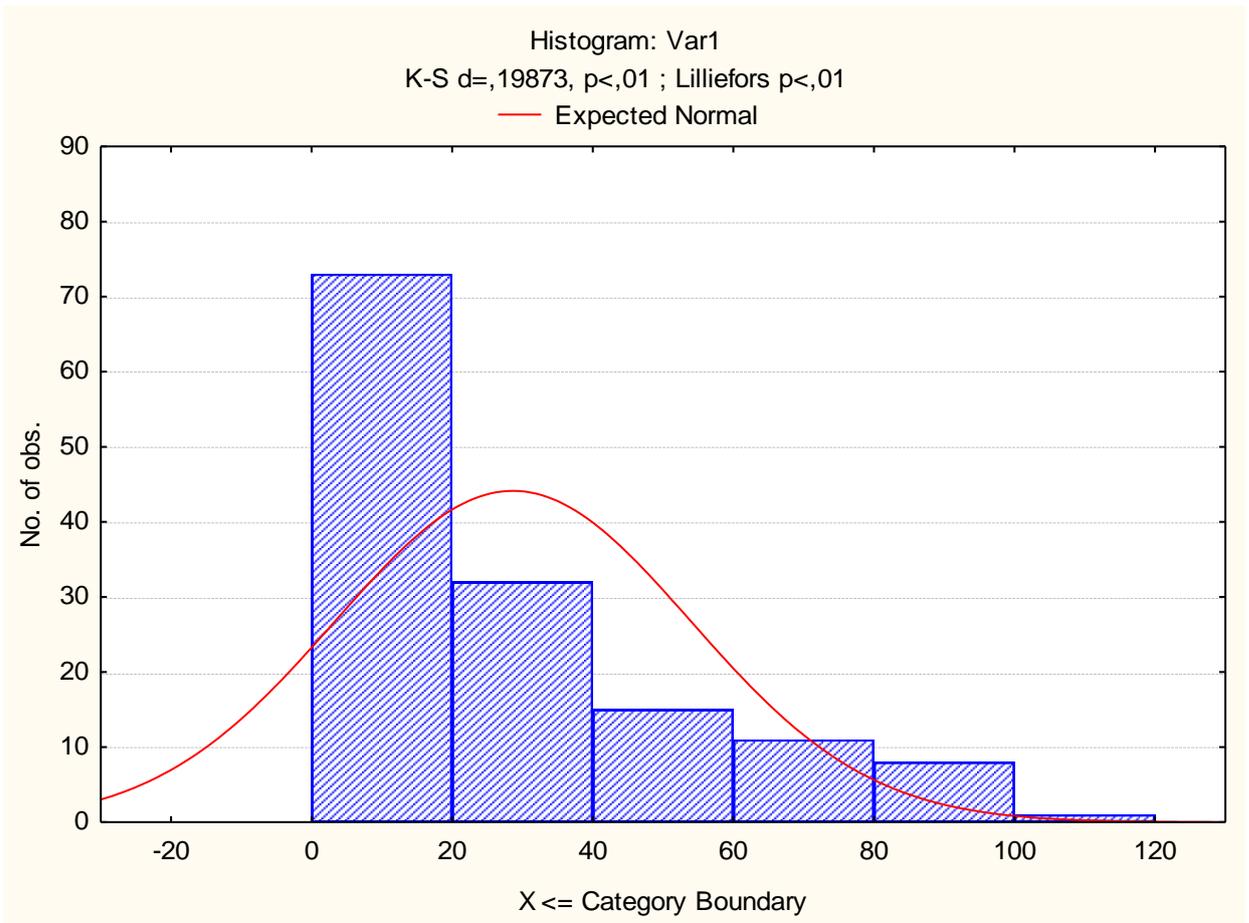


Figura A2.3- Distribuição de frequência dos valores de  $N_{SPT}$  para região do CPT- 4

- **REGIÃO 5**

Ensaio relacionados:

**CPT- 5**

SPT-82, SPT-83, SPT-84, SPT-101, SPT-102, SPT-103, SPT-104, SPT-105, SPT-111, SPT-112, SPT-113, SPT-114, SPT-117, SPT-118.

Estatísticas básicas:

Tabela A2.4 – Estatísticas básicas da região 5

n Válidos	309
Média	25,16505
Confiança - 95,000%	22,26174
Confiança +95,000%	28,06835
Mediana	15,00000
Moda	7,000000
Frequencia Moda	23
Minimo	2,000000
Maximo	108,0000
Variância	672,7097
Desvio Padrão	25,93665
Erro Padrão	1,475484
Assimetria	1,830735
Curtose	2,288175

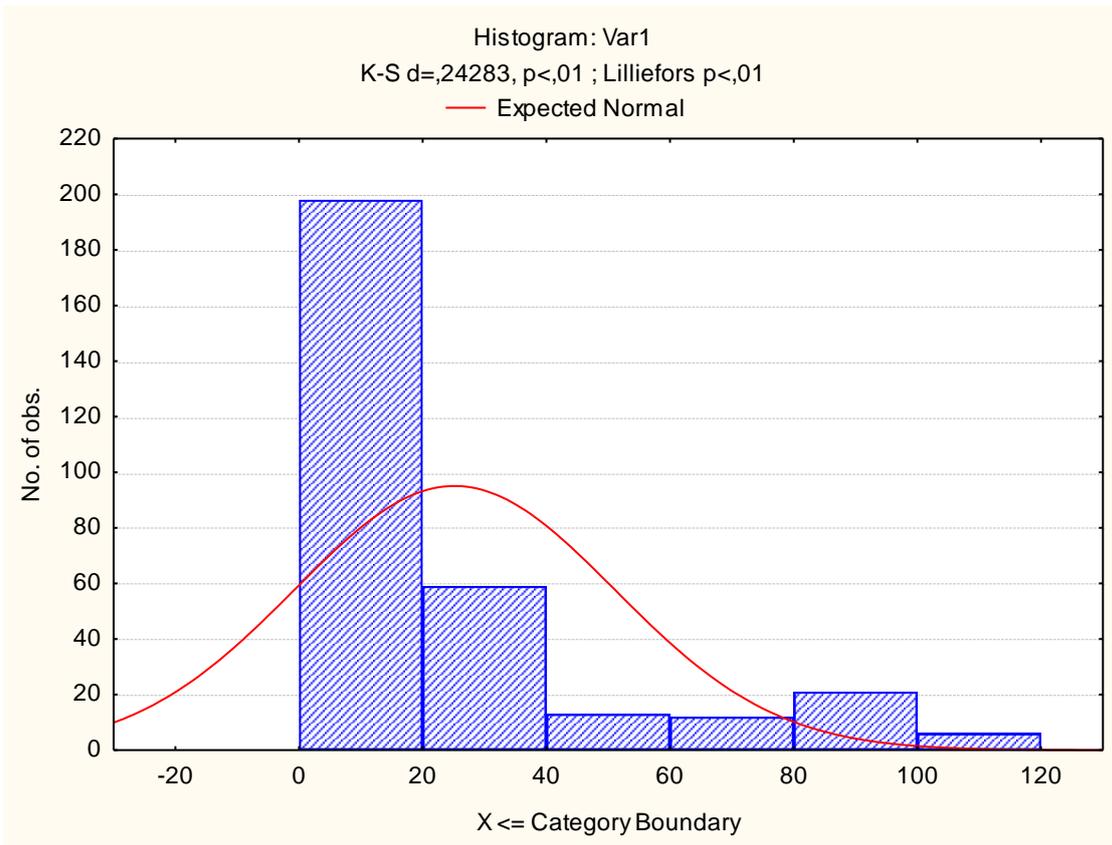


Figura A2.4- Distribuição de frequência dos valores de  $N_{sPT}$  para região do CPT- 5

- **REGIÃO 6**

Ensaio relacionados:

**CPT- 6**

SPT-65, SPT-66, SPT-67, SPT-71, SPT-72, SPT-73, SPT-74, SPT-79, SPT-80, SPT-81, SPT-88, SPT-89, SPT-100

.Estatísticas básicas:

Tabela A2.5– Estatísticas básicas da região 6

n Válidos	231
Média	20,33333
Confiança - 95,000%	17,54926
Confiança +95,000%	23,11741
Mediana	13,00000
Moda	4,000000
Frequencia Moda	20
Minimo	2,000000
Maximo	103,0000
Variancia	461,2058
Desvio Padrão	21,47570
Erro Padrão	1,412997
Assimetria	2,250038
Curtose	5,008572

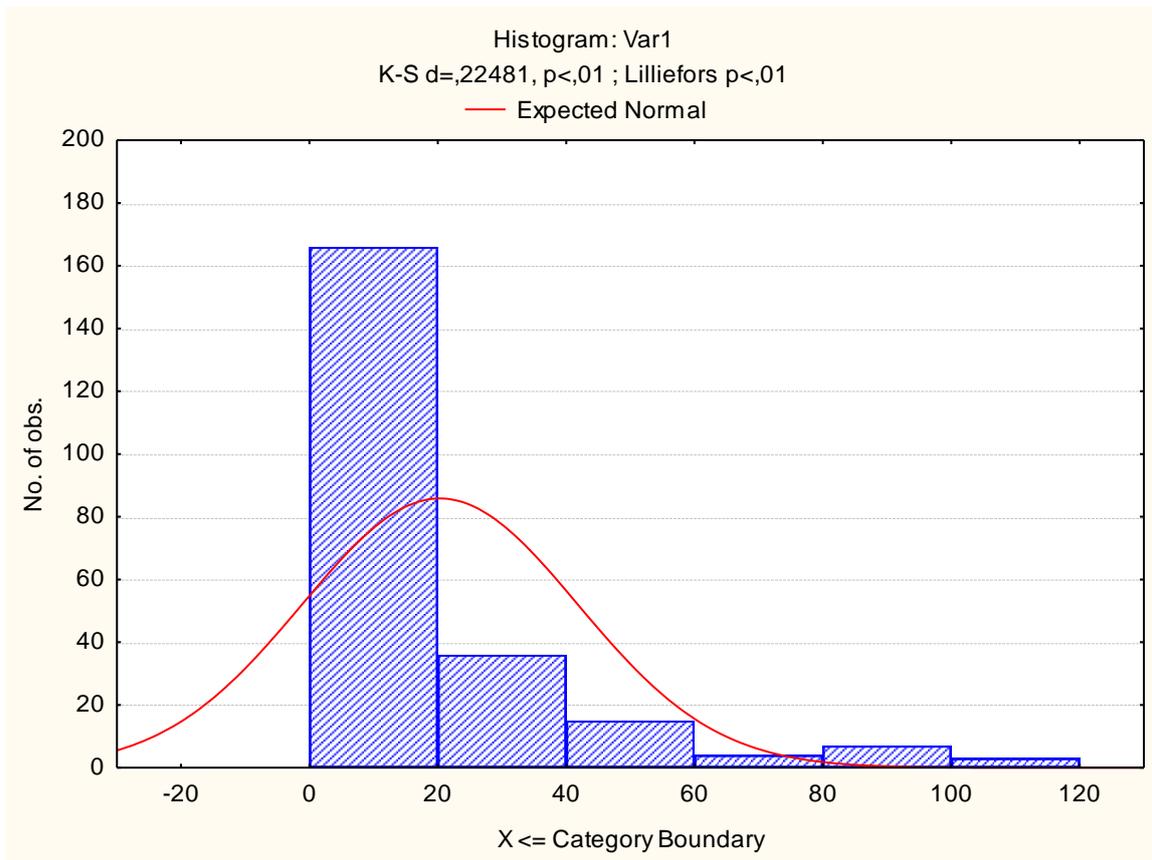


Figura A2.5- Distribuição de frequência dos valores de  $N_{SPT}$  para região do CPT- 6

- **REGIÃO 7**

Ensaio relacionados:

**CPT- 7**

SPT-39, SPT-40, SPT-41, SPT-46, SPT-47, SPT-48, SPT-53, SPT-54, SPT-56, SPT-58, SPT-59, SPT-60.

Estatísticas básicas:

Tabela A2.6 – Estatísticas básicas da região 7

n Válidos	257
Média	24,62646
Confiança - 95,000%	22,45550
Confiança +95,000%	26,79741
Mediana	20,00000
Moda	10,00000
Frequencia Moda	15
Minimo	2,000000
Maximo	103,0000
Variancia	312,3365
Desvio Padrão	17,67304
Erro Padrão	1,102414
Assimetria	1,214159
Curtose	1,656605

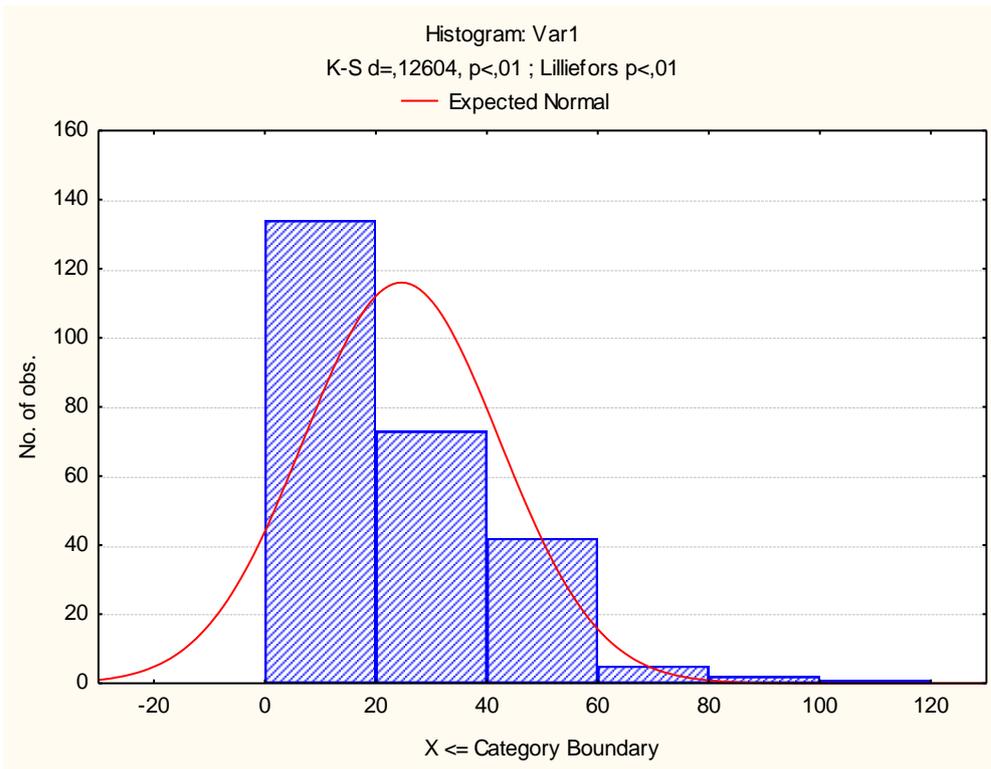


Figura A2.6- Distribuição de frequência dos valores de  $N_{SPT}$  para região do CPT-7

- **REGIÃO 8**

Ensaio relacionados:

**CPT- 8**

SPT-3, SPT-11, SPT-12, SPT-22, SPT-23, SPT-24, SPT-31, SPT-32, SPT-34, SPT-39, SPT-40, SPT-41.

Estatísticas básicas

Tabela A2.7– Estatísticas básicas da região 8

n Válidos	197
Média	25,52284
Confiança - 95,000%	22,90400
Confiança +95,000%	28,14169
Mediana	24,00000
Moda	24,00000
Frequencia Moda	11
Minimo	2,000000
Maximo	103,0000
Variancia	347,3834
Desvio Padrão	18,63822
Erro Padrão	1,327918
Assimetria	1,774092
Curtose	4,570830

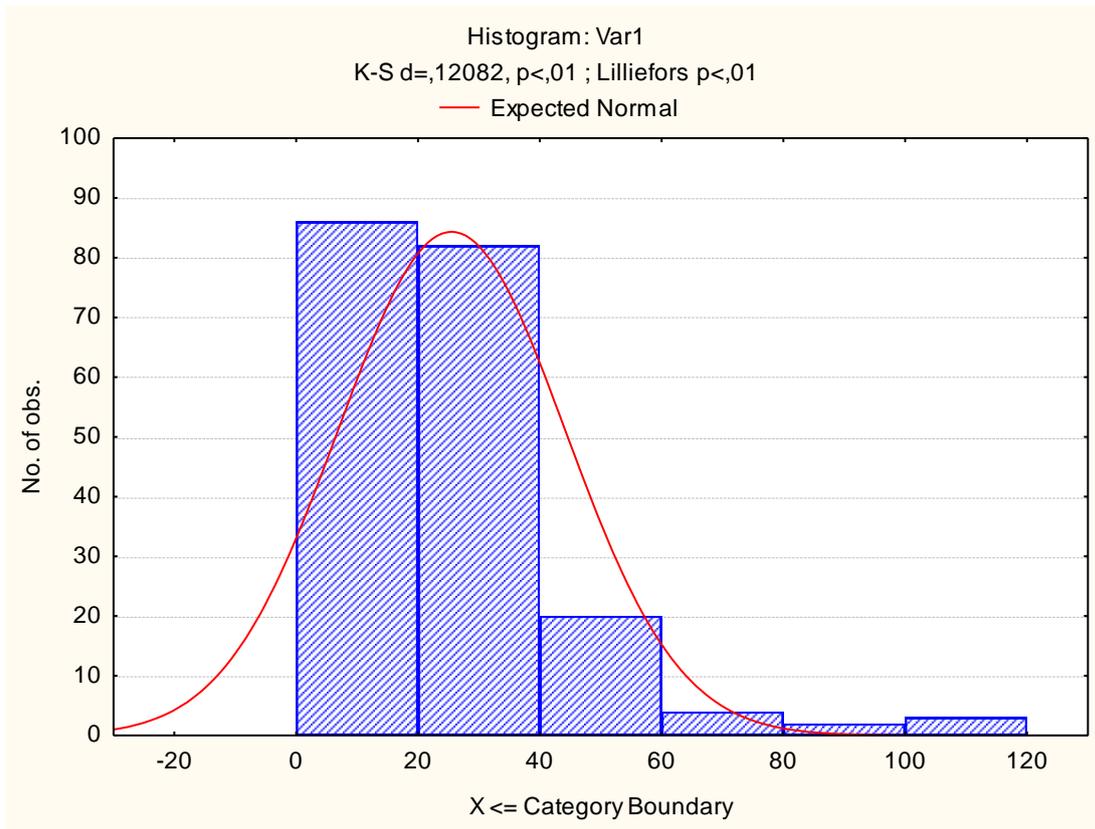


Figura A2.7- Distribuição de frequência dos valores de  $N_{SPT}$  para região do CPT-8

## **Anexo 3- Perfis interpolados IDW e KO**

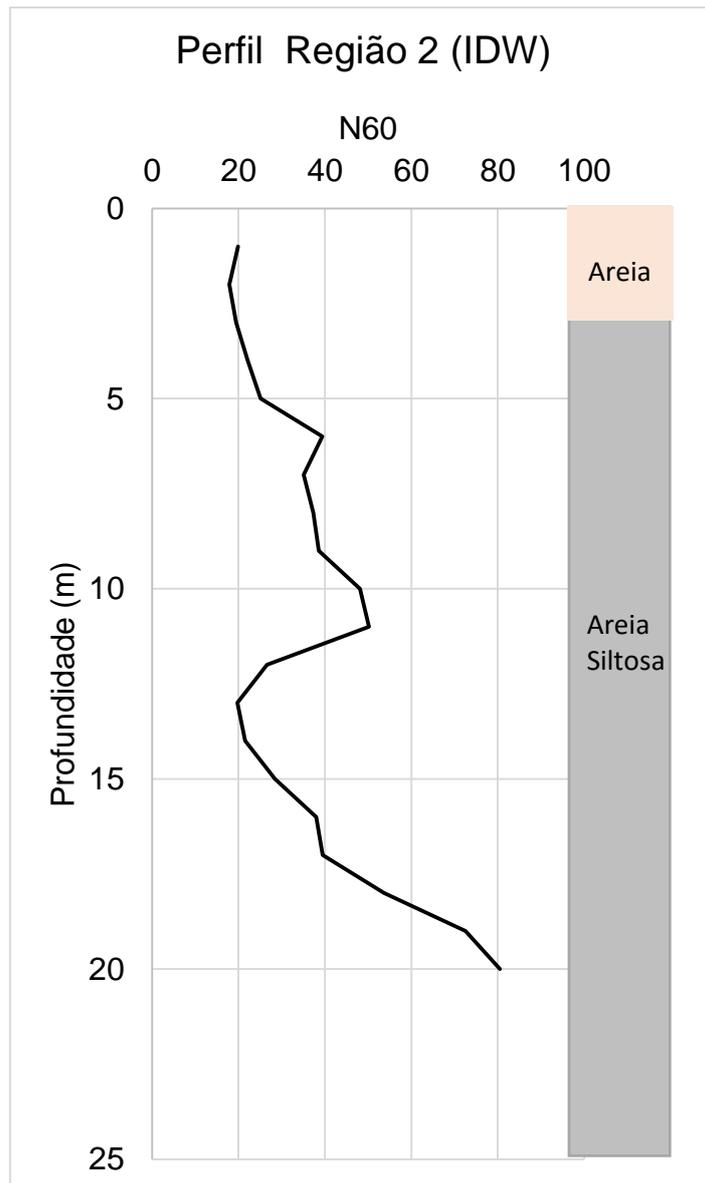


Figura A3.1 – Perfil Região 2 (IDW)

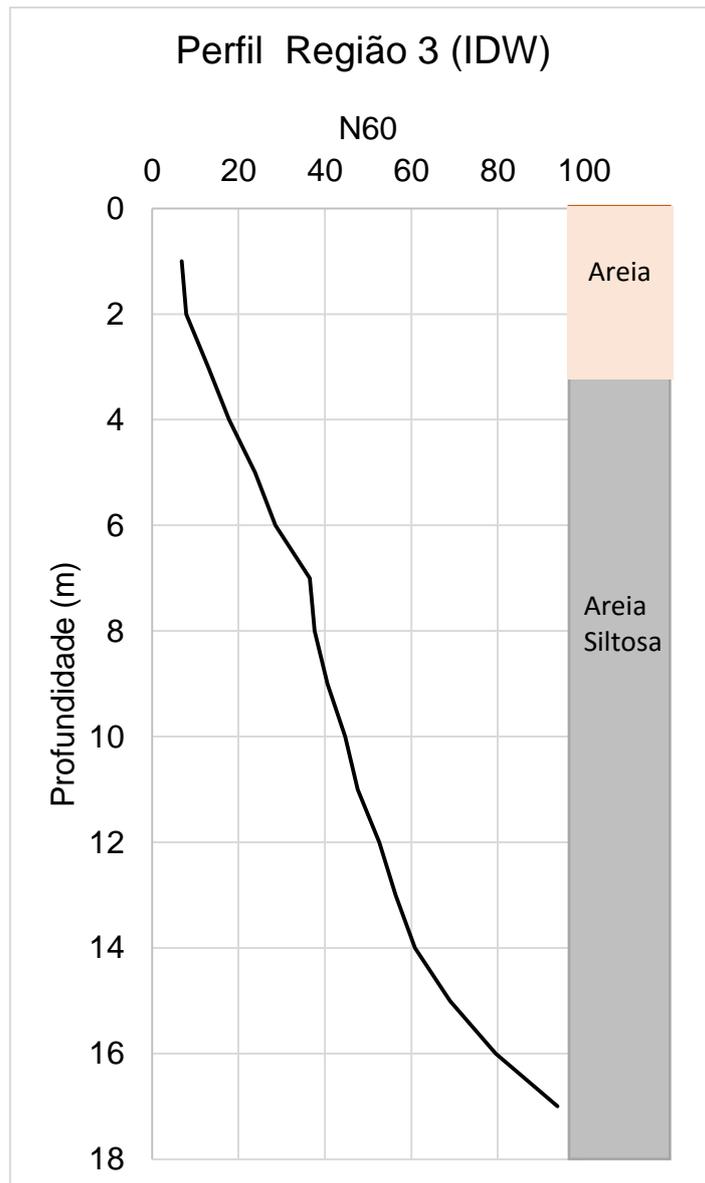


Figura A3.2 – Perfil Região 3 (IDW)

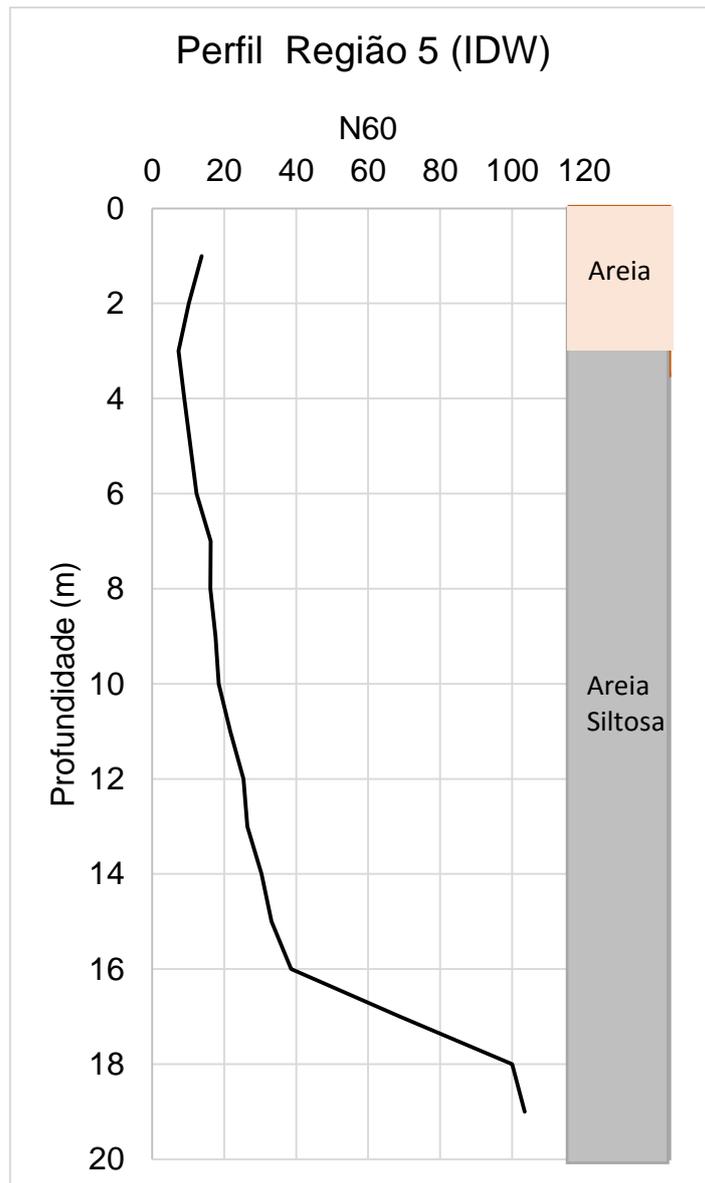


Figura A3.3 – Perfil Região 5 (IDW)

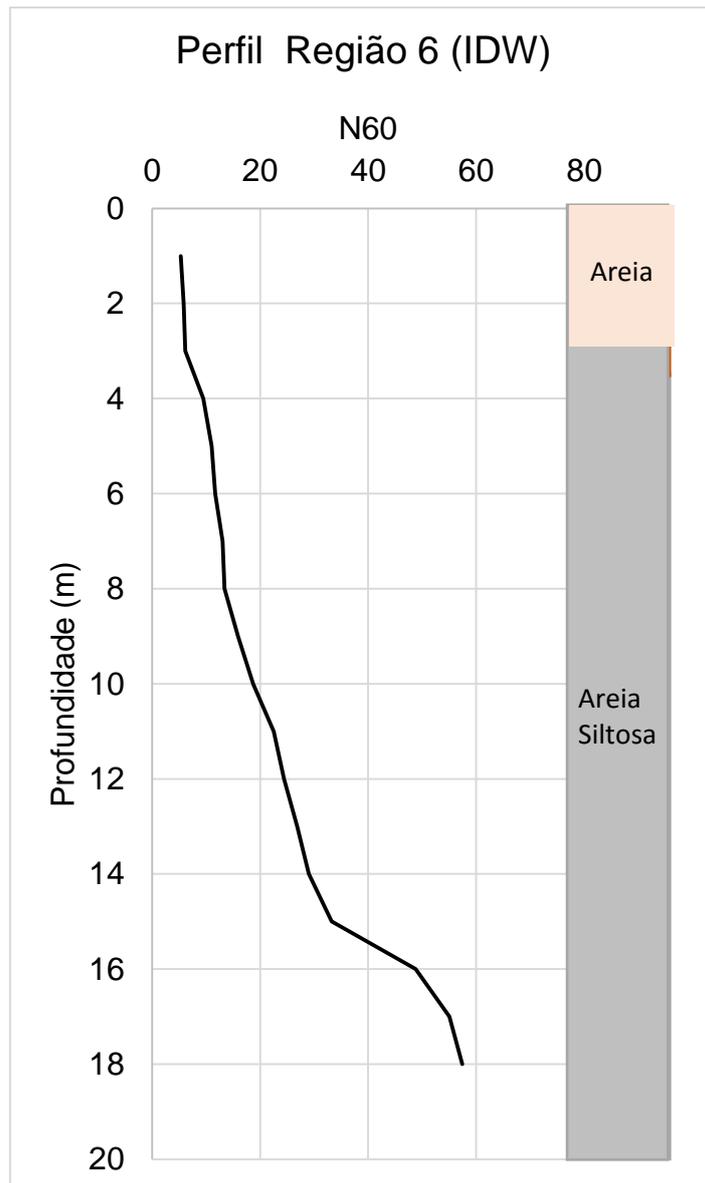


Figura A3.4 – Perfil Região 6 (IDW)

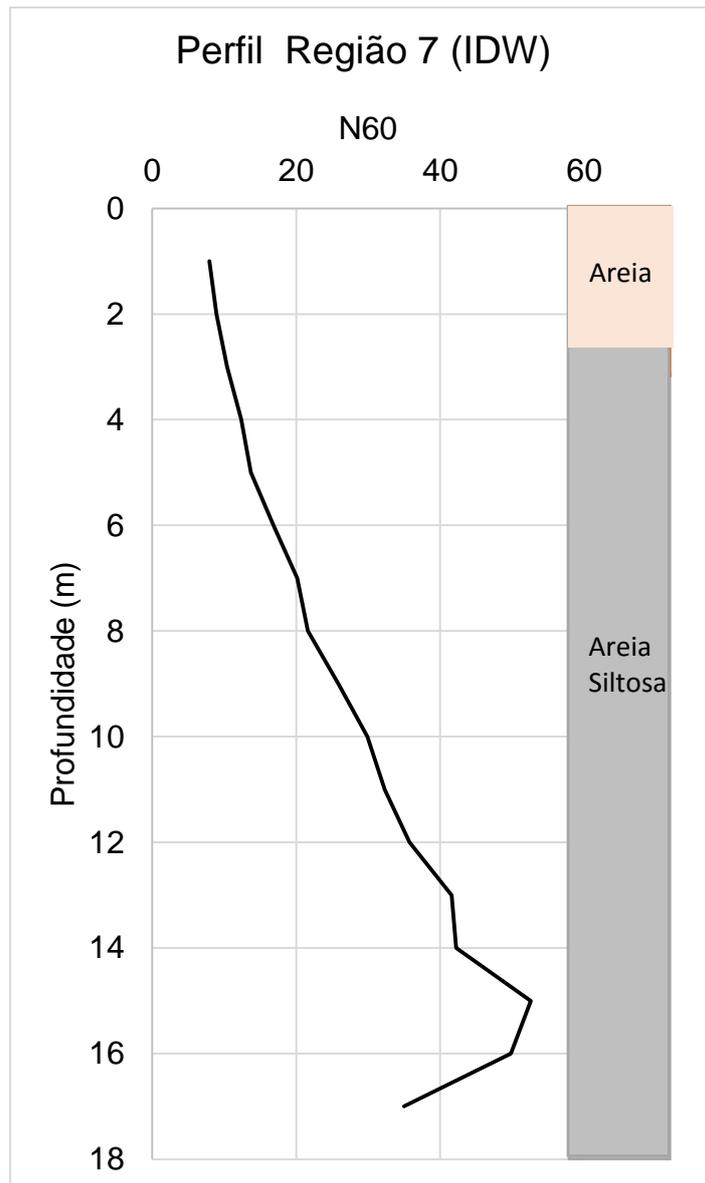


Figura A3.5 – Perfil Região 7 (IDW)

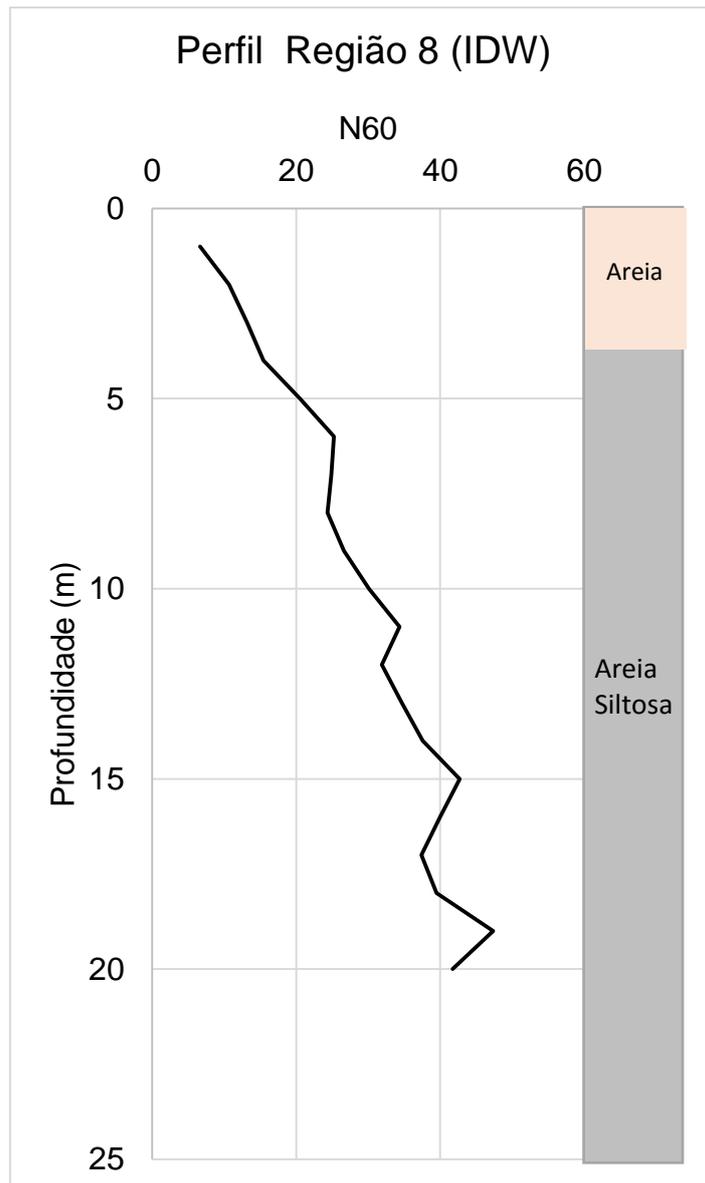


Figura A3.6 – Perfil Região 8 (IDW)

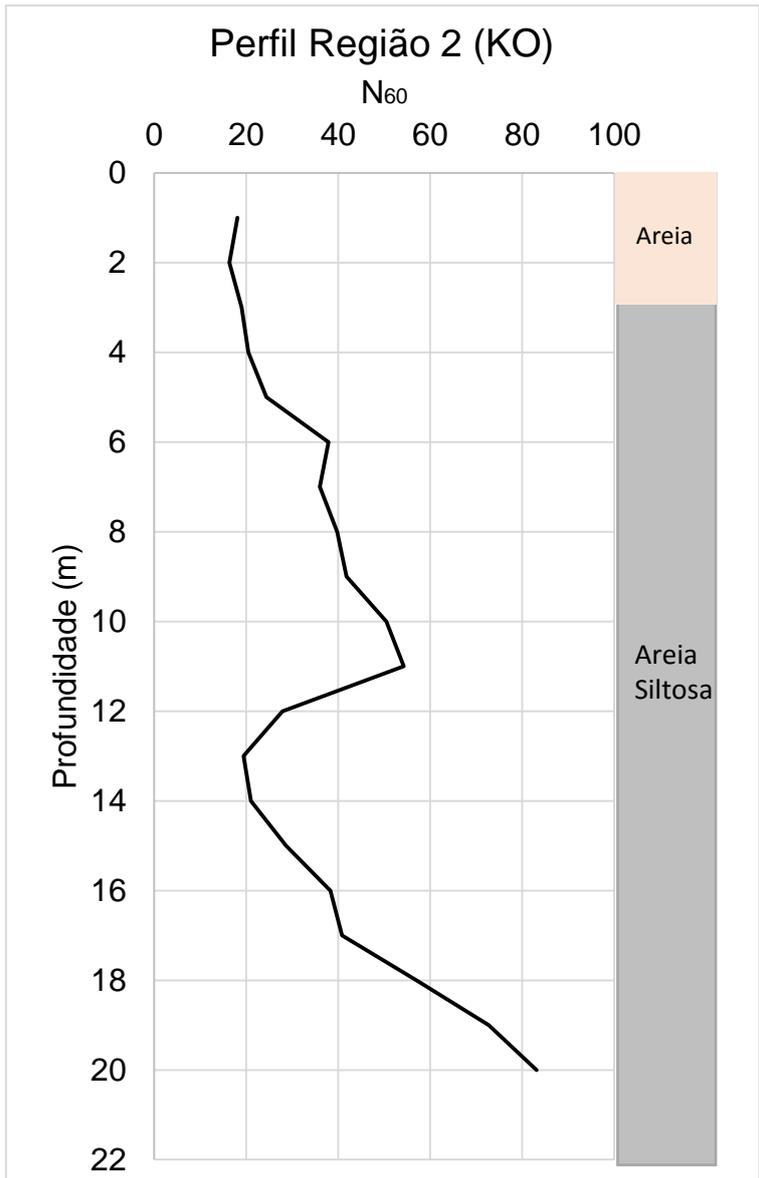


Figura A3.7 – Perfil Região 2 (KO)

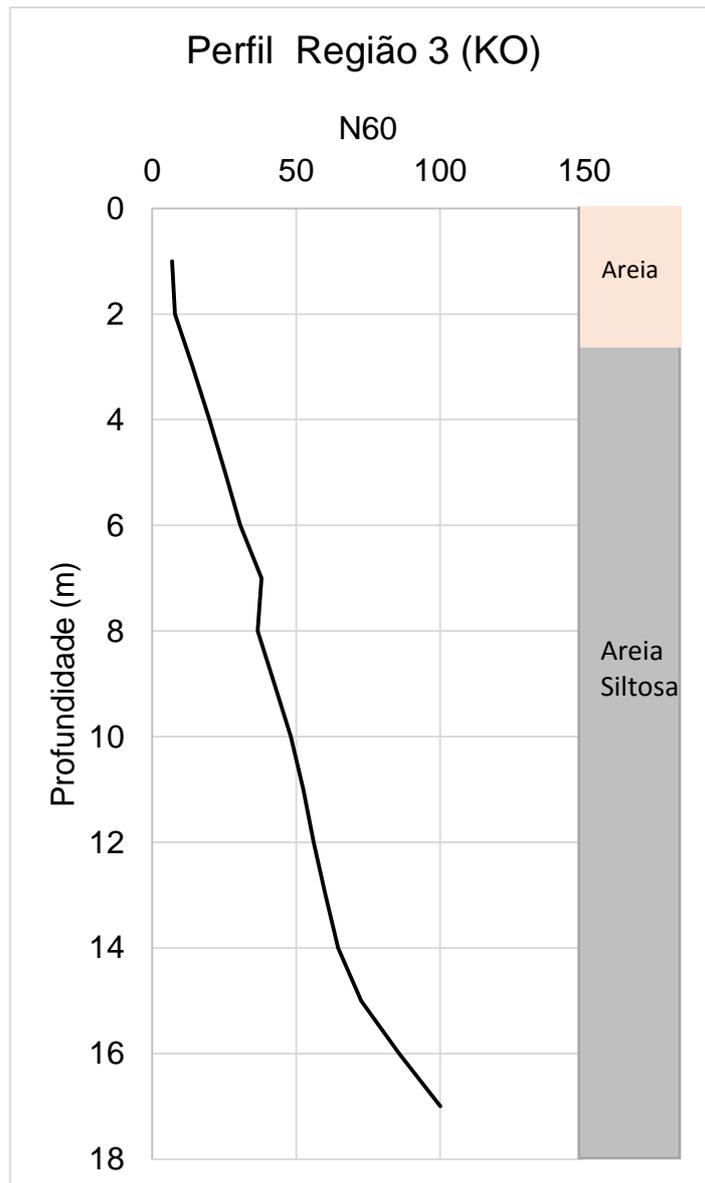


Figura A3.8 – Perfil Região 3 (KO)

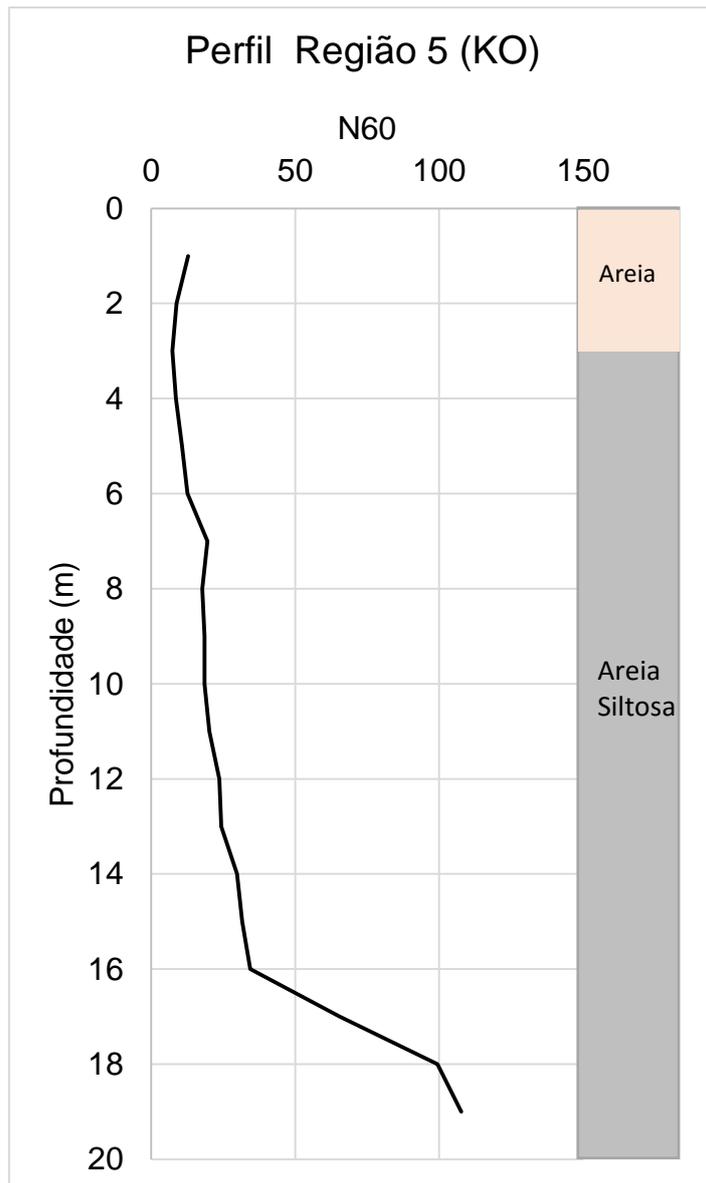


Figura A3.9 – Perfil Região 5 (KO)

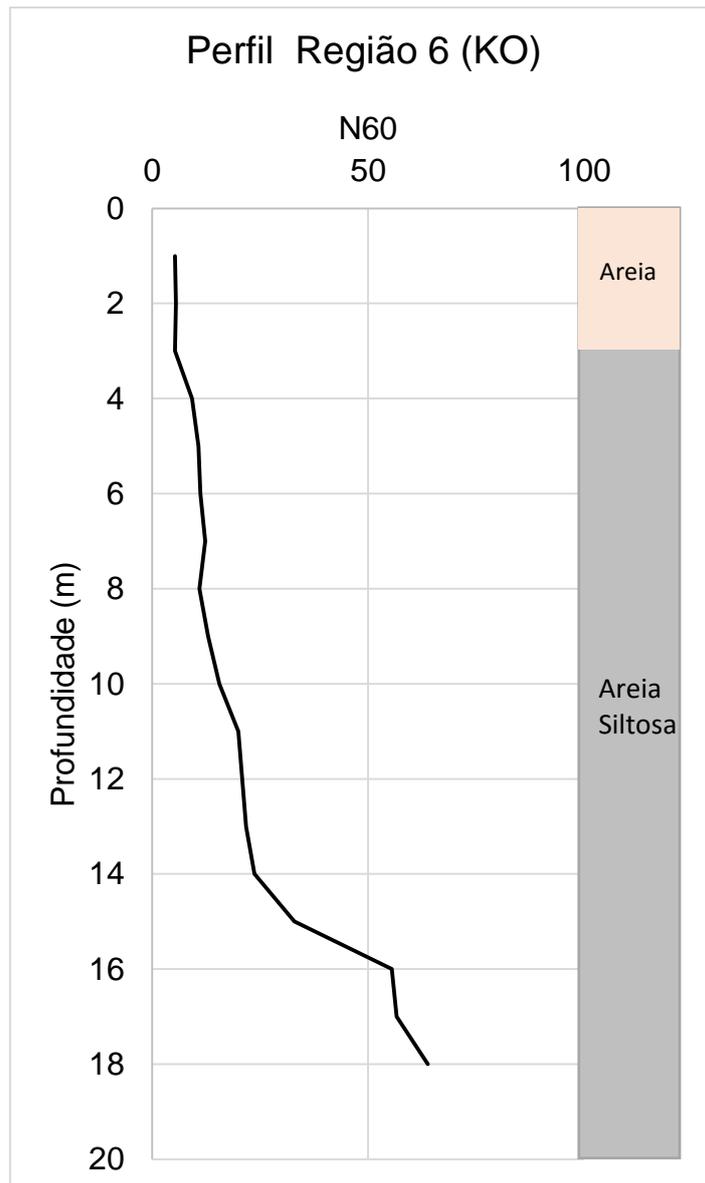


Figura A3.10 – Perfil Região 6 (KO)

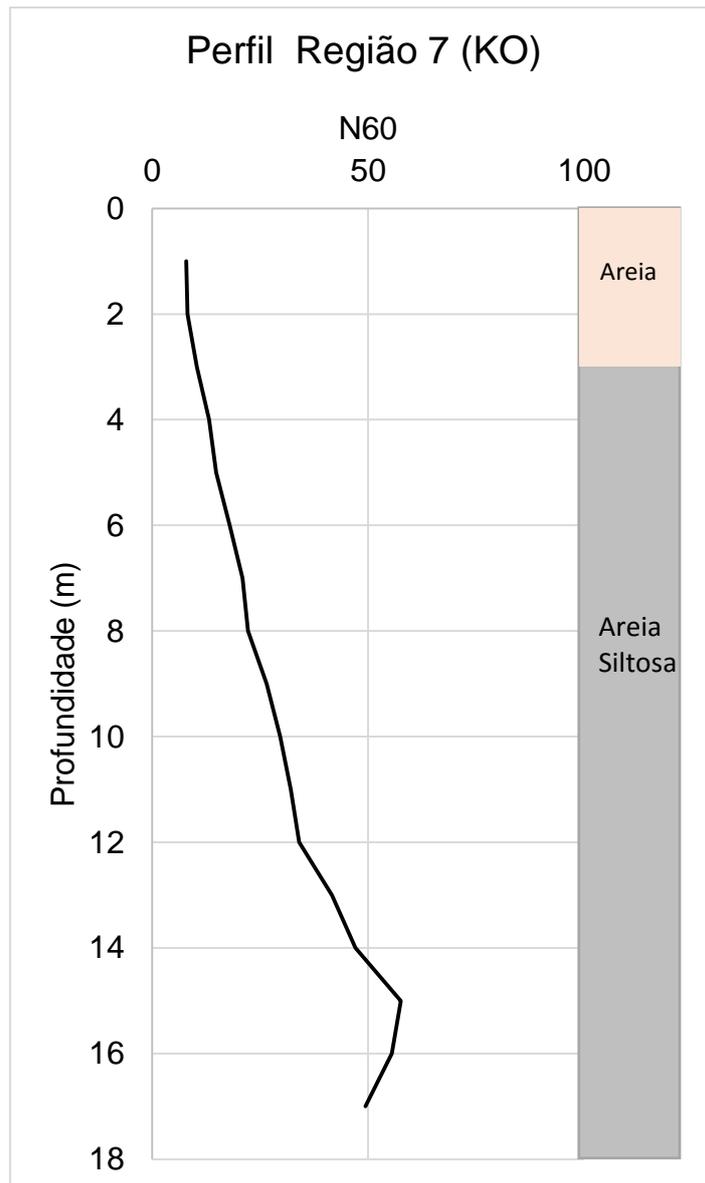


Figura A3.11 – Perfil Região 7 (KO)

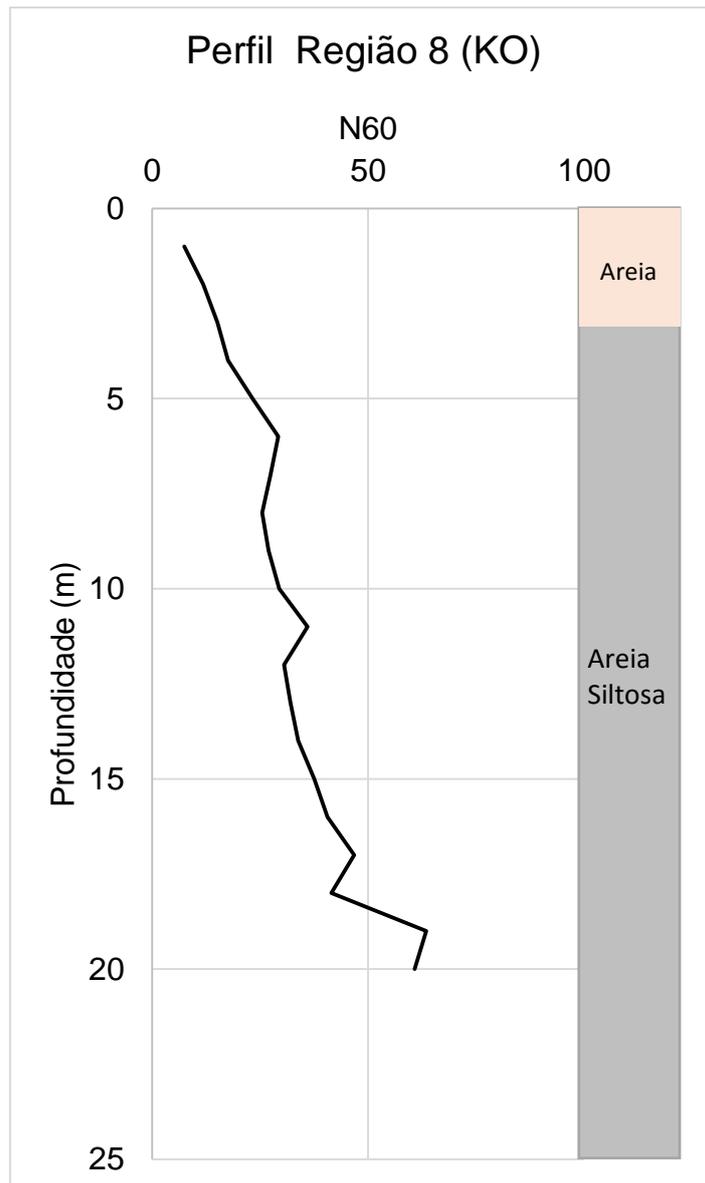


Figura A3.12 – Perfil Região 8 (KO)