



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

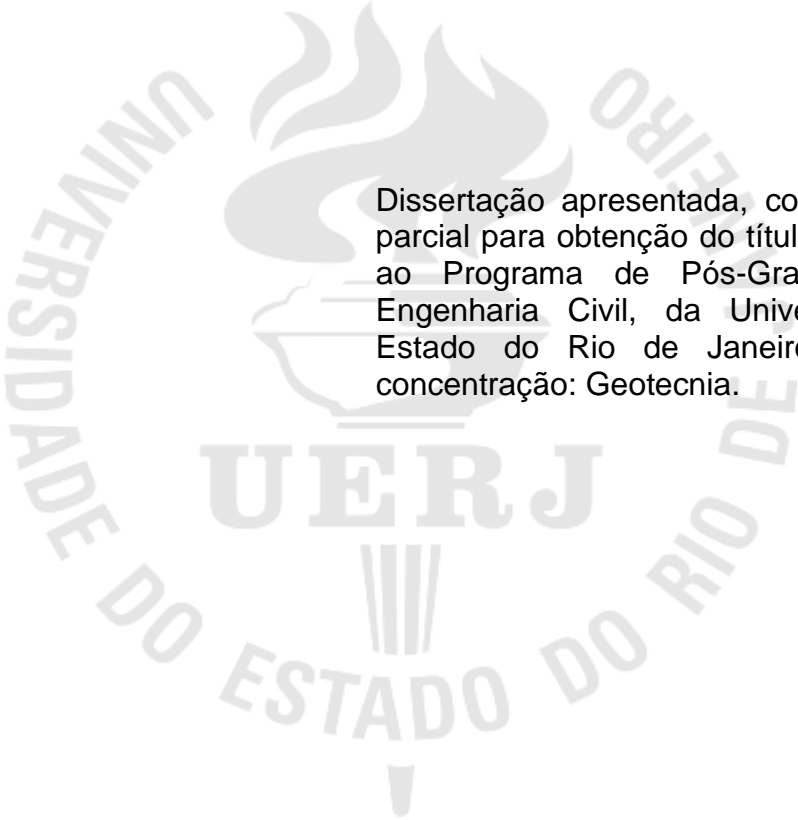
Carlos Augusto Paiva da Silva

Análise R/S de sondagens cone penetrométricas CPTu em alguns depósitos argilosos do estado do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
2023

Carlos Augusto Paiva da Silva

Análise R/S de sondagens cone penetrométricas CPTu em alguns depósitos argilosos do estado do Rio de Janeiro



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

Orientadores: Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho
Prof. Dr. Bruno Teixeira Lima

Rio de Janeiro

2023

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

S586 Silva, Carlos Augusto Paiva da.
Análise R/S de sondagens cone penetrométricas CPTu em alguns depósitos argilosos do Estado do Rio de Janeiro / Carlos Augusto Paiva da Silva. – 2023.
124 f.

Orientadores: Armando Prestes de Menezes Filho, Bruno Teixeira Lima.

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

1. Engenharia civil - Teses. 2. Perfuração direcional - Teses. 3. Mecânica do solo - Teses. 4. Solos argilosos - Teses. 5. Solos - Testes - Teses. I. Menezes Filho, Armando Prestes de. II. Lima, Bruno Teixeira. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.131.22

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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

Carlos Augusto Paiva da Silva

Assinatura

22/02/2024

Data

Carlos Augusto Paiva da Silva

**Análise R/S de sondagens cone penetrométricas CPTu em alguns depósitos
argilosos do estado do Rio de Janeiro**

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

Aprovado em: 17 de novembro de 2023.

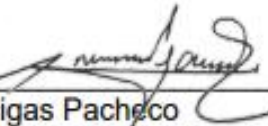
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Bruno Teixeira Lima (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Marcus Peigas Pacheco
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Antônio Claudio Soares
Universidade Federal Fluminense - UFF

Rio de Janeiro

2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus em nome de Yehoshua Hamashia, a minha família e aos professores que em mim acreditaram e incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus em nome de Yehoshua Hamashia, por me permitir ter saúde e perseverança para ultrapassar todos os obstáculos nesta trajetória acadêmica.

Aos meus pais Neil Corrêa da Silva e Marinalda Nascimento Paiva da Silva, por me proporcionarem educação e incentivo nos estudos, principalmente ao meu pai Neil que por uma coincidência divina, estava próximo ao local do acidente que quase levou minha vida aos meus 11 anos, e prestou os primeiros socorros necessários para mim hoje está aqui passando por mais uma de muitas etapas da vida que pude vivenciar.

A todos professores deste o jardim de infância, que muito me instruíram e contribuíram até aqui na minha formação, inclusive na acadêmica, principalmente ao professor Dr. Armando Prestes de Menezes Filho por me instruir e orientar humanamente nesta etapa como se fosse um pai, ao professor Dr. Bruno Teixeira Lima por fornecer os ensaios de CPTu utilizados nesta dissertação e por me orientar e a todo corpo docente da PGECIV pelo esforço empenhado em meio ao curso.

Aos meus familiares, parentes e amigos que me apoiaram e incentivaram neste propósito acadêmico.

A UERJ e o PGECIV por proporcionar o ambiente acolhedor e um excelente corpo docentes.

RESUMO

SILVA, Carlos Augusto Paiva da. *Análise R/S de sondagens cone penetrométricas CPTu em alguns depósitos argilosos do estado do Rio de Janeiro. 2023. 124 f.* Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Esta pesquisa teve por objetivo estudar a variabilidade vertical de diversos registros de ensaios de cravação de cone com medida de poro-pressão CPTu em 3 (três) depósitos argilosos moles saturados, localizados em 2 (dois) municípios, Sarapuí em Duque de Caxias, Santa Cruz e Recreio dos Bandeirantes na cidade do Rio de Janeiro. Mais especificamente, o trabalho procurou responder à questão de uma eventual aleatoriedade presente nos sinais destes ensaios, monitorando a variação das resistências de ponta e atrito lateral, bem como da poro-pressão, com a profundidade dos depósitos sedimentares. Para tanto, utilizou-se a análise R/S, um dos instrumentos matemáticos típicos da investigação de sinais fractais temporais auto-semelhantes, presentes em diversos fenômenos (dados hidrológicos, mercado de ações, dados sísmicos, dados de emissão acústica durante o carregamento de diferentes materiais, eletroencefalogramas, eletrocardiogramas etc.). Os resultados mostraram, definitivamente, que a variação dos sinais com a profundidade dos depósitos não é aleatória (expoentes de Hurst fortemente diferentes de 0,5), situação em que a memória destes sinais seria de curto alcance, fazendo com que a correlação entre eles deixasse de existir, para profundidades paulatinamente crescentes. Neste sentido, é lícito afirmar que todos os dados experimentais analisados neste trabalho estão impregnados de memória de longo alcance, sugerindo que a correlação entre eles mantém-se fortemente, mesmo para pontos espaciais largamente espaçados, em cada ensaio investigado. Os resultados mostraram cabalmente que os expoentes de Hurst de todos os ensaios situaram-se, invariavelmente, no intervalo $0,5 < H \leq 1$, muito próximos da unidade, o que sugere a presença, nos sinais analisados, de persistência, estando os dados positivamente correlacionados, havendo, portanto, uma maior probabilidade de continuar uma tendência de alta ou baixa com a profundidade. No que concerne às intensidades de correlação, das 39 (trinta e nove) análises R/S realizadas, 37 (trinta e sete) análises o que equivale a 94,87% apresentou uma variação dos valores próximos de 100% e 2 (duas) análises o que equivale a 5,13% apresentou uma variação dos valores próximos de 50% , corroborando as tendências sugeridas pelos expoentes de Hurst, ou seja, que os registros experimentais encontram-se fortemente correlacionados, independentemente da posição dos pontos em estudo, quer sejam eles mais superficiais ou profundos, no depósito sedimentar.

Palavras-chave: Depósitos sedimentares naturais; Ensaio de campo CPTu; Análise R/S de séries temporais; Investigações por possíveis correlações; Proposição de um novo parâmetro geotécnico H.

ABSTRACT

SILVA, Carlos Augusto Paiva da. *R/S analysis of CPTu cone penetrometric soundings in some clayey deposits in the state of Rio de Janeiro*. 2023. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

This research aimed to study the vertical variability of several records of cone driving tests with CPTu pore pressure measurement in 3 (three) saturated soft clayey deposits, located in 2 (two) municipalities, Sarapuí in Duque de Caxias, Santa Cruz and Recreio dos Bandeirantes in the city of Rio de Janeiro. More specifically, the work sought to answer the question of possible randomness present in the signals of these tests, monitoring the variation in tip resistance and lateral friction, as well as pore pressure, with the depth of the sedimentary deposits. To this end, R/S analysis was used, one of the typical mathematical instruments for investigating self-similar temporal fractal signals, present in various phenomena (hydrological data, stock market, seismic data, acoustic emission data during the loading of different materials, electroencephalograms, electrocardiograms, etc.). The results definitively showed that the variation of the signals with the depth of the deposits is not random (Hurst exponents strongly different from 0.5), a situation in which the memory of these signals would be short-range, causing the correlation between them ceased to exist, to gradually increasing depths. In this sense, it is fair to state that all experimental data analyzed in this work are imbued with long-range memory, suggesting that the correlation between them remains strong, even for widely spaced spatial points, in each test investigated. The results clearly showed that the Hurst exponents of all tests were invariably in the range $0,5 < H \leq 1$, very close to unity, which suggests the presence, in the analyzed signals, of persistence, with the data being positively correlated, and therefore there is a greater probability of continuing an upward or downward trend with depth. Regarding correlation intensities, of the 39 (thirty-nine) R/S analyzes carried out, 37 (thirty-seven) analyzes which is equivalent to 94.87% presented a variation of values close to 100% and 2 (two) analysis, which is equivalent to 5.13%, presented a variation in values close to 50%, corroborating the trends suggested by Hurst's exponents, that is, that the experimental records are strongly correlated, regardless of the position of the points under study, whether whether they are more superficial or deeper, in the sedimentary deposit.

Keywords: Natural sedimentary deposits; CPTu field test; R/S analysis of time series; Investigations into possible correlations; Proposition of a new geotechnical parameter H.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Triângulo de Sierpinski (Peak e Frame, 1994)	23
Figura 2 - Curva de von Koch (Feder, 1988)	24
Figura 3 - Aspecto de um fractal natural, não determinístico, denominado Brócolis Romanesco (Meakin, 1998)	25
Figura 4 - Espectro de dimensões generalizadas D_q (Menezes Filho, 2003)	27
Figura 5 - Determinação da dimensão fractal D_0 pelo método de contagem de caixas ($D_0 = 1,8338$; coef. correlação = 0,9951) (Oliveira et al, 2016)	29
Figura 6 - Aspecto das bandas de localização de deformação plástica. As isocurvas de deformação mais claras são as mais intensamente deformadas (Oliveira et al, 2016)	30
Figura 7 - Auto-semelhança em um sinal fisiológico cardíaco. Cada figura é obtida da anterior ampliando-se a área retangular assinalada (Bassingthwaighe et al, 1994)	31
Figura 8 - ensaio de CPTu em depósito de argila mole, realizado no bairro de Santa Cruz na cidade do Rio de Janeiro-RJ	32
Figura 9 - Significado das variáveis para a análise R/S (Feder, 1988)	37
Figura 10 - Resultado das análises R/S efetuadas por Hurst et al. (1965)	38
Figura 11 - Aspecto do sinal temporal (incrementos) para diferentes valores do expoente de Hurst e da dimensão fractal (Peitgen e Saupe, 1988)	39
Figura 12 - Perfis elétricos corridos em um poço de petróleo (Beer, 1994)	43
Figura 13 - Principais componentes do equipamento (Schnaid e Odebrecht 2012)	50
Figura 14 - Tipos de ponteiros (respectivamente: 2 cm ² , 10 cm ² , 15 cm ² , 40 cm ²) (Robertson 2006)	52
Figura 15 - Tipos de ponteiros com distintas configurações de montagem de células de cargas (Schnaid e Odebrecht 2012)	53
Figura 16 - Posições do elemento filtrante (Schnaid e Odebrecht 2012)	54
Figura 17 - Tipos de elemento filtrante (Schnaid e Odebrecht 2012)	55
Figura 18 - Tipos mais comuns de redutores de atrito (Schnaid e Odebrecht 2012)	62

Figura 19 - Sistemas de cravação em operação no Brasil (Schnaid e Odebrecht 2012)	63
Figura 20 - Esquema de interação na escolha do equipamento (Schnaid e Odebrecht 2012)	64
Figura 21 - Correções imposta as medidas de ensaio de piezocone (Schnaid e Odebrecht 2012)	67
Figura 22 - Resultado do ensaio de piezocone na BR 101, em Santa Catarina (Schnaid e Odebrecht 2012)	69
Figura 23 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu-11), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro	71
Figura 24 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 21), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro	72
Figura 25 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 23), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro	72
Figura 26 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 31), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro	73
Figura 27 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 42), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro	73
Figura 28 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 52), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro	74
Figura 29 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 1), no bairro do Recreio dos Bandeirantes, cidade do Rio de Janeiro	74
Figura 30 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 1), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias	75
Figura 31 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 2), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias	75
Figura 32 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 3), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias	76
Figura 33 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 4), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias	76
Figura 34 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 5), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias	77

Figura 35 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 6), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias.....	77
Figura 36 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-11 da (Figura 23)	78
Figura 37 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-11 da (Figura 23) ...	78
Figura 38 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-11 da (Figura 23)	79
Figura 39 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-21 da (Figura 24)	80
Figura 40 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-21 da (Figura 24)	81
Figura 41 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-21 da (Figura 24)	81
Figura 42 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-23 da (Figura 25)	83
Figura 43 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-23 da (Figura 25)	83
Figura 44 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-23 da (Figura 25)	84
Figura 45 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-31 da (Figura 25)	85
Figura 46 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-31 da (Figura 25)	86
Figura 47- Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-31 da (Figura 25)	86
Figura 48 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-42 da (Figura 27)	88
Figura 49 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-42 da (Figura 27)	88
Figura 50 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-42 da (Figura 27)	89
Figura 51 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-52 da (Figura 28)	90
Figura 52 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-52 da (Figura 28)	91
Figura 53 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação- CPTu-52 da (Figura 28)	91
Figura 54 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-1 da (Figura 29)	94
Figura 55 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-1 da (Figura 29)	95
Figura 56 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-1 da (Figura 29)	95
Figura 57 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-1 da (Figura 30)	98
Figura 58 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-1 da (Figura 30)	99
Figura 59 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-1 da (Figura 30)	99

Figura 60 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-2 da (Figura 31)	101
Figura 61 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-2 da (Figura 31)	101
Figura 62 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-2 da (Figura 31)	102
Figura 63 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-3 da (Figura 32)	103
Figura 64 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-3 da (Figura 32)	104
Figura 65 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-3 da (Figura 32)	104
Figura 66 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-4 da (Figura 33)	106
Figura 67 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-4 da (Figura 33)	106
Figura 68 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação- CPTu-4 da (Figura 33)	107
Figura 69 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-5 da (Figura 34)	108
Figura 70 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-5 da (Figura 34)	109
Figura 71 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-5 da (Figura 34)	109
Figura 72 - Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-6 da (Figura 35)	111
Figura 73 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-6 da (Figura 35)	111
Figura 74 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-6 da (Figura 35)	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões típicas de ponteiros, ilustradas na Figura 3.2 (Schnaid e Odebrecht, 2012)	52
Tabela 2 - Verificação, manutenção e calibração (Schnaid e Odebrecht 2012)	59
Tabela 3 - Expoentes de Hurst fornecidos pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados em Santa Cruz, Rio de Janeiro-RJ.....	93
Tabela 4 - Intensidades de correlação fornecidas pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados em Santa Cruz, Rio de Janeiro-RJ – RJ.....	93
Tabela 5 - Expoentes de Hurst fornecidos pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados no Recreio dos Bandeirantes, RJ.....	97
Tabela 6 - Intensidades de correlação fornecidas pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados no Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro-RJ.....	97
Tabela 7 - Expoentes de Hurst fornecidos pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados no Sarapuí, município de Duque de Caxias, RJ.....	113
Tabela 8 - Intensidades de correlação fornecidas pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados no Sarapuí, município de Duque de Caxias, RJ.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Apud	Designa a origem de uma citação indireta
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standards</i>
BSI	<i>British Standards Institute</i>
CPT	<i>Cone Penetration Test</i>
CPTu	<i>Piezocone Penetration Test</i>
DT	Tempo de trânsito da onda sonora
EN ISO	International Organization for Standardization
EUROCODE	<i>European Committee for Standardization</i>
Exp. Hurst	Expoente de Hurst
GR	Radioatividade natural de raios gama
i.é	isto é
ILD	Corrente elétrica induzida
<i>IRTP</i>	<i>International Reference Testing Procedure</i>
ISSMFE	<i>International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering</i>
M.I.T.	Massachusetts Institute of Technology
NBR	<i>Norma Brasileira</i>
NEN	<i>Koninklijk Nederlands Instituut voor Normalisatie (Nederland)</i>
NF	<i>Norme française</i>
NPHI	Radioatividade com nêutrons e registro do índice de hidrogênio
p/ex.	por exemplo
RHOB	Radioatividade com raios gama

R.J. Rio de Janeiro

R/S *Rescaled Range Analysis*

UERJ Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

q_c	Resistencia de ponta do CPT e CPTu
f_s	Atrito lateral na luva do cone no CPT e CPTu
u	Poropressão gerada no processo de cravação do CPTu
R/S	Rescaled range analysis da teoria de Hurst
H	Expoente de Hurst obtido na análise R/S
D_0	Dimensão Fractal ou monofractal
$N(l)$	Número de hipercubos ou caixas preenchidas
l	Tamanho do lado necessários para recobrir todo o objeto
D_q	Dimensões fractais generalizadas
q	Ordem da dimensão fractal generalizada
p_i	Probabilidade associada ligada a quantidades de pontos contidos na caixa
N	Número total de caixas (número total de pontos a serem recobertos)
N_i	Número de pontos circunscritos à <i>i-ésima</i> caixa
D_1	Dimensão de informação, derivada da expressão de D_q por uma passagem ao limite, exprime o tráfego de informações no interior do objeto fractal.
D_2	Dimensão de correlação, retrata o grau de correlação entre os elementos constituintes do objeto fractal em estudo
$f(x)$	Função matemática
$f(\lambda x)$	Função matemática invariante por escala
μ	Constante multiplicativa da função matemática invariante por escala
λ	Constante multiplicativa da função matemática invariante por escala
$f'(x)$	Derivada da função matemática
$f'(\lambda x)$	Derivada da função matemática invariante por escala
$f(x) \sim x^\alpha$	Função que depende da lei de potência capaz de retratar o fenômeno da invariância por escala

D	Forma simplificada da dimensão fractal da relação com o Expoente de Hurst
ξ	Vazão da teoria de Hurst
$\xi(t)$	Vazão de água captada pelo reservatório da barragem da teoria de Hurst
τ	Denominado (lag), período em anos da teoria de Hurst
t	Determinado ano do período da teoria de Hurst
$\langle \xi \rangle_\tau$	Vazão média no período de τ anos da teoria de Hurst
$X(t, \tau)$	Vazão acumulada da teoria de Hurst
$R(t, \tau)$	<i>Range</i> da teoria de Hurst
$\max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau)$	Máxima vazão acumulada da teoria de Hurst
$\min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau)$	Mínima vazão acumulada da teoria de Hurst
$S(t, \tau)$	Desvio padrão da teoria de Hurst
$\frac{R(t, \tau)}{S(t, \tau)}$	Denominado de forma simplificada como análise R/S
B	Pré fator constante numérico, obtida pela ordenada do intercepto da reta de ajuste no plano cartesiano com escala logarítmica na base 10, da teoria de Hurst
$\rightarrow \infty$	Tende ao infinito
C	Grau ou intensidade de correlação do expoente de Hurst
d_c	Diâmetro da ponteira cônica do CPT e CPTu
d_2	Diâmetro da luva de atrito do CPT e CPTu
L	Comprimento da luva de atrito do CPT e CPTu
u_1	Posição do Elemento filtrante na ponta cônica do CPTu
u_2	Posição do Elemento filtrante entre a ponta cônica e a luva do CPTu
u_3	Posição do Elemento filtrante na luva do CPTu
R_f	Razão de atrito no CPT e CPTu
q_t	Resistencia real mobilizada, correção de q_c eliminando a influência do excesso de poropressão u gerada no processo de cravação no CPTu
a	Constante numérica relativa a ponteira de CPTu, parte da relação de q_t da correção de q_c , obtido pela razão da área de apoio do elemento filtrante na posição u_2 pela área da ponta cônica do CPTu

A_N	Área de apoio do elemento filtrante na posição u_2 do CPTu
A_T	Área da ponta cônica do CPTu
f_t	Atrito lateral corrigido no CPTu
A_{sb}	Área da base da luva de atrito do CPTu
A_{st}	Áreas do topo da luva de atrito do CPTu
A_l	Área lateral da luva de atrito do CPTu
B_q	Complemento de classificação do solo do CPTu
u_0	Pressão hidrostática
σ_{vo}	Tensão vertical in situ
Δu	Variação de poropressões u geradas no processo de cravação do CPTu
R/S_{qc}	Análise R/S de séries de registros de resistências de ponta no CPTu
R/S_{fs}	Análise R/S de séries registros de resistências de atrito lateral no CPTu
R/S_u	Análise R/S de séries registros de resistências de poro-pressão gerada no processo de cravação no CPTu
H_{qc}	Expoente de Hurst obtido da análise R/S dos registros de resistências de ponta no CPTu
H_{fs}	Expoente de Hurst obtido da análise R/S dos registros de atrito lateral no CPTu
H_u	Expoente de Hurst obtido da análise R/S dos registros de resistências de poro-pressão gerada no processo de cravação no CPTu
C_{qc}	Grau ou intensidades de correlações dos registros de resistência ponta, na série de dados analisada do CPTu
C_{fs}	Grau de correlações dos registros de resistência por atrito lateral, na série de dados analisada do CPTu
C_u	Grau ou intensidades de correlações dos registros de resistência de poro-pressão gerada no processo de cravação, na série de dados analisada do CPTu

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
Motivação.....	21
Objetivo.....	21
Estrutura da dissertação.....	22
1. FRACTAIS	23
1.1 Dimensão fractal.....	26
1.2 Fractalidade do perfil cone penetrométrico CPTu.....	32
2. ANÁLISE R/S (RESCALED RANGE ANALYSIS)	34
2.1 Histórico da análise R/S.....	35
2.2 Metodologia da Análise R/S	41
2.3 Intensidade das correlações expressas pelo expoente de Hurst	41
2.4 Aplicação da análise R/S na engenharia de petróleo.....	42
3. ENSAIO CONEPENETROMÉTRICO (CPTu - PIEZOCONE PENETRATION TEST)	44
3.1 Introdução	44
3.2 Descrição geral do ensaio de piezocone (CPTu).....	45
3.2.1 Histórico do ensaio de campo Cone penetrométrico CPTu	46
3.3 Descrição dos equipamentos e procedimentos técnicos	48
3.3.1 Descrição da ponteira cônica	49
3.3.2 Elemento filtrante, posicionamentos e procedimentos de saturação.....	54
3.3.2.1 Tipos de elementos filtrantes.....	55
3.3.2.2 Tipos de fluidos de saturação.....	56
3.3.2.3 Procedimento de saturação dos elementos filtrantes.....	57
3.3.3 Calibração e preservação do equipamento.....	58
3.3.4 Sistema utilizados na transmissão de dados.....	59
3.3.5 Descrição dos equipamentos e acessórios.....	61
3.3.5.1. Hastes	61
3.3.5.2. Redutores de atrito.....	61
3.3.6 Equipamentos utilizados para cravação e sua respectiva escolhas na prática.....	62
3.3.6.1 Sistemas em terra.....	62

3.3.6.2 Características que definem a seleção equipamento.....	64
3.4. Apresentação de resultados de ensaios cone penetrométricos.....	65
4. ANÁLISE R/S E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	70
4.1. Apresentação dos ensaios de campo CPTu realizados no estado do Rio de Janeiro.....	70
4.2. Resultado das análises R/S e interpretação dos resultados.....	78
4.2.1 Análise R/S dos ensaios CPTu, no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio Janeiro.....	78
4.2.1.1. Análise R/S do ensaio CPTu-11.....	78
4.2.1.2. Análise R/S do ensaio CPTu-21.....	80
4.2.1.3. Análise R/S do ensaio CPTu-23.....	82
4.2.1.4. Análise R/S do ensaio CPTu-31.....	85
4.2.1.5. Análise R/S do ensaio CPTu-42.....	87
4.2.1.6. Análise R/S do ensaio CPTu-52.....	90
4.2.1.7. Resumo dos resultados das análises R/S dos ensaios CPTu do bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro.....	92
4.2.2. Análise R/S dos ensaios CPTu, no bairro Recreio dos Bandeirantes, cidade do Rio de Janeiro.....	94
4.2.2.1. Análise R/S do ensaio CPTu-1.....	94
4.2.2.2. Resumo dos resultados das análises R/S dos ensaios CPTu no Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro-RJ.....	96
4.2.3. Análise R/S dos ensaios CPTu, do Sarapuí, município de Duque de Caxias.....	98
4.2.3.1. Análise R/S do ensaio CPTu-1.....	98
4.2.3.2. Análise R/S do ensaio CPTu-2.....	100
4.2.3.3. Análise R/S do ensaio CPTu-3.....	103
4.2.3.4. Análise R/S do ensaio CPTu-4.....	105
4.2.3.5. Análise R/S do ensaio CPTu-5.....	108
4.2.3.6. Análise R/S do ensaio CPTu-6.....	110
4.2.3.7. Resumo dos resultados das análises R/S dos ensaios CPTu no Sarapuí, município de Duque de Caxias, RJ.....	112
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	115
5.1. Conclusões.....	115
5.2. Sugestões para futuras pesquisas.....	117

REFERÊNCIAS.....	118
-------------------------	------------

INTRODUÇÃO

Investimentos em construções de grande envergadura são tarefas de grande responsabilidade, pois os processos construtivos requerem determinadas técnicas, controles e registros que sejam confiáveis a qualquer momento. Isto permite que estas informações possam ser verificadas e analisadas por parte dos órgãos competentes e penalizar as partes envolvidas na eventualidade de erros que resultem em colapso seguido de sinistro ou simples prejuízo material. Por conta destes incidentes que, infelizmente, se tornaram cada vez mais frequentes, bem como suas consequências danosas, muitas pesquisas foram motivadas na Engenharia Civil, principalmente nas áreas Estruturais e Geotécnicas, o foco deste trabalho é voltado para a Geotecnia, que se enraíza nas linhas de pesquisa e desenvolvimento da Mecânica dos Solos e Rochas, e Geologia de Engenharia, de grande proporção e importância na Engenharia Civil. Neste sentido, dados e parâmetros do solo relativos à composição, estrutura, extensão, profundidade, camadas, nível de água, propriedades hidráulicas e mecânicas, bem como diversas técnicas de prospecção e ensaios de campo (métodos diretos de sondagens e análise/interpretação de resultados em campo por correlações e formulações empíricas e semi-empíricas), foram desenvolvidas de modo que este conjunto de informações do subsolo compõem o pré-requisito indispensável para execução de projetos de grande envergadura e consequentes sobrecargas, seguros e viáveis economicamente, servindo de base para previsão dos custos associados ao projeto e suas possíveis soluções.

Uma das grandes dificuldades enfrentadas pela Engenharia Civil, é exatamente a de executar obras em regiões de solos argilosos moles a muito moles, ou seja, de resistência ao cisalhamento extremamente baixa e deformabilidade (compressibilidade) acentuadamente elevada, mais especificamente, a concepção de técnicas inovadoras de melhoramento das propriedades do solo e execução de fundações adquirem especial importância, assim como a variação com a profundidade dos parâmetros de relevância para o problema em questão (p/ex., a variação da resistência ao cisalhamento não-

drenada com a profundidade nestes depósitos sedimentares de grande compressibilidade), sendo notória as incertezas envolvidas nestes procedimentos.

Especialmente no que se refere a estes ambientes sedimentares, caracterizados, via de regra, por sedimentações e deposições efetuadas em vários eventos, de alto grau de aleatoriedade, cabe investigar o grau de correlação, caso exista, entre as propriedades geotécnicas determinadas na superfície e ao longo da profundidade das camadas do depósito sedimentar argiloso, para se aferir da integridade do depósito sedimentar e estabelecer metodologias de análise e pesquisa que levem em conta tais peculiaridades.

Motivação

Depósitos sedimentares naturais de argila mole possuem características que por sua vez inviabilizam economicamente muitos projetos de edificação, estas características geram inúmeras incertezas, inclusive nas representações gráficas do ensaio de CPTu que demonstram diversas variabilidades nos registros de resistências, como os dados que aparentemente se comportam aleatoriamente (sem correlação entre os dados), porém, como é de se esperar, também há incertezas a respeito desta premissa, então faz-se necessário buscar por métodos capazes de investigar se de fato os dados se comportam aleatoriamente ou não.

Objetivo

Esta pesquisa objetiva investigar, a partir de resultados de ensaios cone penetrométricos de campo com medidas de poro-pressão (CPTu), efetuados em diferentes depósitos sedimentares argilosos moles, localizados no estado do Rio de Janeiro, eventuais correlações de propriedades ao longo da profundidade da camada destes depósitos sedimentares argilosos. Mais especificamente, análises estatístico-probabilísticas R/S foram realizadas sobre dados de resistência de ponta (q_c), de atrito lateral (f_s) e de poro-pressão (u)

geradas no processo de cravação, com o intuito de se estudar o caráter aleatório ou não daqueles dados experimentais com a profundidade, lançando-se mão do expoente de Hurst H e do grau de correlação C entre aqueles dados.

Estrutura da dissertação

O Capítulo 1 aborda conceitos básicos relacionados à teoria dos fractais, suas características e procedimentos quantitativos (determinação das dimensões fractais), necessários ao estudo dos perfis dos ensaios CPTu.

A análise R/S de séries temporais de dados sob a ótica da teoria de Hurst é abordada no Capítulo 2, compreendendo seus aspectos históricos, metodologias e resultados oriundos da aplicação desta análise estatístico-probabilística.

O Capítulo 3 apresenta o ensaio CPTu (*Piezocone Penetration Test*), ensaio de campo destinado a investigação da resistência de depósitos argilosos moles saturados. metodologias, equipamentos e procedimentos são apresentados, bem como resultados de resistência da ponta do cone q_c , do atrito lateral f_s e da poro-pressão u gerada no processo de cravação.

O Capítulo 4 apresenta os resultados de ensaios CPTu de 3 (três) depósitos sedimentares, localizados nos bairros de Santa Cruz e Recreio dos Bandeirantes na Cidade do Rio de Janeiro, bem como no bairro do Sarapuí no município de Duque de Caxias, sobre os quais as análises R/S serão efetuadas. Apresentam-se, ainda, os resultados de tais análises, com a determinação dos expoentes de Hurst para cada ensaio realizado, bem como os graus de correlação existentes entre os dados experimentais, permitindo inferir do caráter correlacionado daqueles dados, bem como do efeito de memória que eles apresentam com a profundidade.

Por fim, as conclusões e sugestões para futuras pesquisas são apresentadas no Capítulo 5.

1. FRACTAIS

Fractais são objetos matemáticos que se caracterizam por apresentarem invariância por expansão ou contração. Assim, suas partes constituintes são semelhantes ao seu todo e vice-versa. A Figura 1.1 (Peak e Frame, 1994) mostra o fractal “Triângulo de Sierpinski”, em que se pode observar a mencionada auto-similaridade de escala, em que parte e todo se confundem.

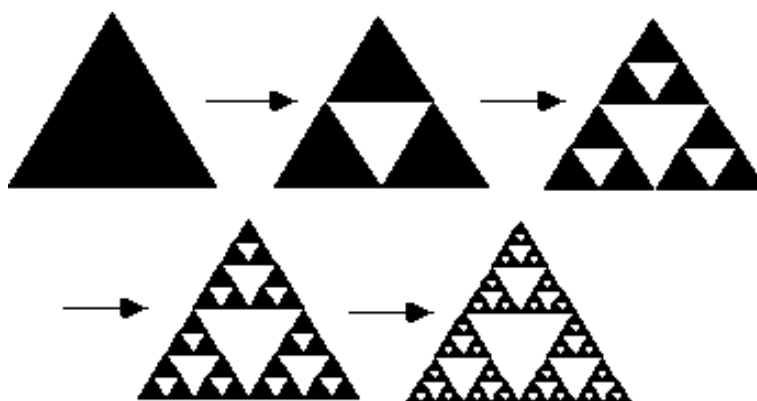


Figura 1 - Triângulo de Sierpinski (Peak e Frame, 1994)

Mais pormenorizadamente, a construção da fractalidade espacial, como mostra a Figura 1, começa com um elemento denominado “iniciador” (o mais superior à esquerda), sobre o qual um processo iterativo segundo determinadas regras pré-estabelecidas é aplicado (no caso, dividir os lados do triângulo pela metade, traçar as linhas de ligação dos pontos médios e retirar a parte triangular central). Neste sentido, o Triângulo de Sierpinski é um exemplo típico de um fractal determinístico, ou seja, construído segundo regras bem definidas.

Logo, é perfeitamente claro na Figura 1 que as suas partes constituintes são cópias exatas de um todo maior, sendo que o processo iterativo assinalado acima pode se desenvolver indefinidamente, em sentido a escalas maiores ou menores.

Um outro exemplo de um fractal determinístico é a curva de von Koch, ilustrada abaixo na Figura 2 (Feder, 1988).

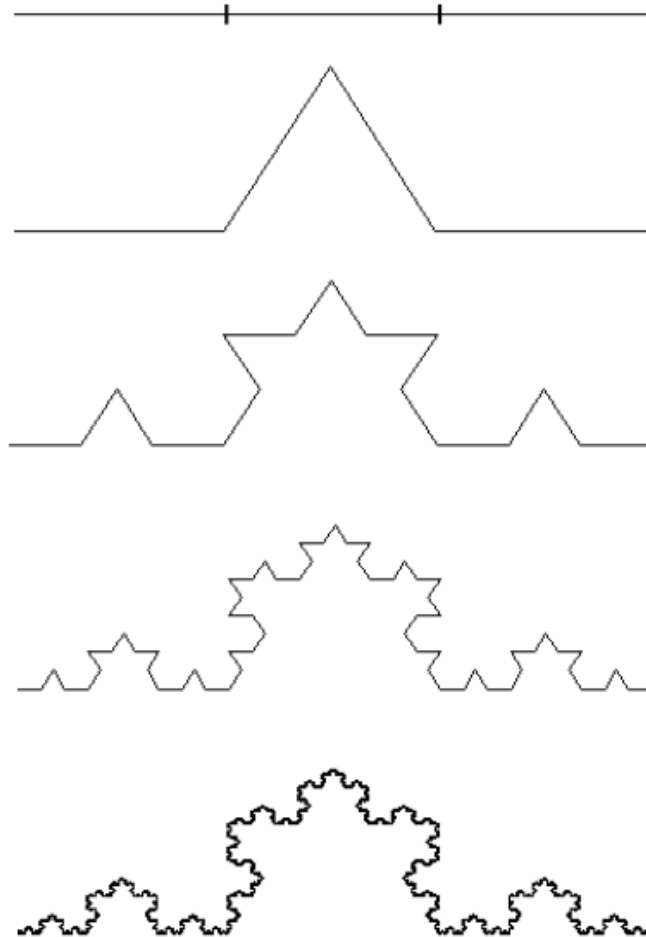


Figura 2 - Curva de von Koch (Feder, 1988)

Nela pode-se notar que, à medida que se observa a curva mais de perto, aumenta o grau de complexidade de sua constituição, diferentemente de uma curva euclidiana, que tende a se tornar mais simples.

Portanto, em uma figura fractal, a parte está no todo, e o todo está na parte, sendo impossível efetuar esta separação de um modo claro.

Por outro lado, existem na natureza os fractais não determinísticos, estatísticos, tal como ilustrado na Figura 3 (Meakin, 1998), um fractal natural conhecido como Brócolis Romanesco.



Figura 3 - Aspecto de um fractal natural, não determinístico, denominado Brócolis Romanesco (Meakin, 1998).

Pode-se observar o aspecto auto-semelhante de suas partes formadoras. No entanto, diferentemente do fractal da Figura 1, há um limite de vigência da fractalidade natural, a partir do qual ele deixa de ser fractal e passa a ser um objeto euclidiano.

Um objeto euclidiano pode ser definido por várias de suas características, dentre as quais a perda da auto-semelhança quando observado em várias escalas. Na verdade, tal objeto, de observação diária e corriqueira, possui uma dimensão característica, tornando-se mais simples de ser descrito, quando observado em escalas maiores ou menores.

A razão de existência de fractais na natureza ainda é motivo de muita especulação, porém a hipótese mais aceita tem a ver com a otimização energética que tais estruturas apresentam (Peitgen *et al*, 1992).

1.1. Dimensão fractal

A quantificação da fractalidade de um objeto pode ser efetuada pela Dimensão Fractal D_0 , definida como:

$$D_0 = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\log N(l)}{\log(1/l)} \quad (1)$$

em que $N(l)$ é o número de hipercubos (cubos, quadrados, referenciados como caixas) de lado l necessários para recobrir todo o objeto analisado.

Entretanto, a dimensão fractal propriamente dita D_0 é insuficiente para descrever toda a complexidade e riqueza dos fractais, especialmente dos denominados fractais heterogêneos, constituídos por dimensões fractais diferentes. Assim, surgiu a necessidade de se introduzir as chamadas “Dimensões fractais generalizadas” (Fiedler-Ferrara e Prado, 1994), expressas por:

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(l)} p_i^q}{\log l} \quad (q \in R, q \neq 1) \quad (2)$$

em que a probabilidade p_i é definida por:

$$p_i = p_i(l) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N} \quad (3)$$

onde N é o número total de caixas (número total de pontos a serem recobertos) e N_i o número de pontos circunscritos à i -ésima caixa.

Portanto, objetos fractais heterogêneos, também chamados de multifractais, são aqueles passíveis de serem descritos por um espectro infinito

de dimensões fractais generalizadas, como mostra a Figura 4 (Menezes Filho, 2003).

Neste sentido, a dimensão fractal propriamente dita D_0 é representada unicamente por um ponto no gráfico das dimensões generalizadas. Cabe observar que, na caracterização matemática de um objeto fractal - ou monofractal -, a dimensão D_0 (ou simplesmente D) basta para a sua caracterização, todas as outras dimensões generalizadas colapsando nesta única dimensão D .

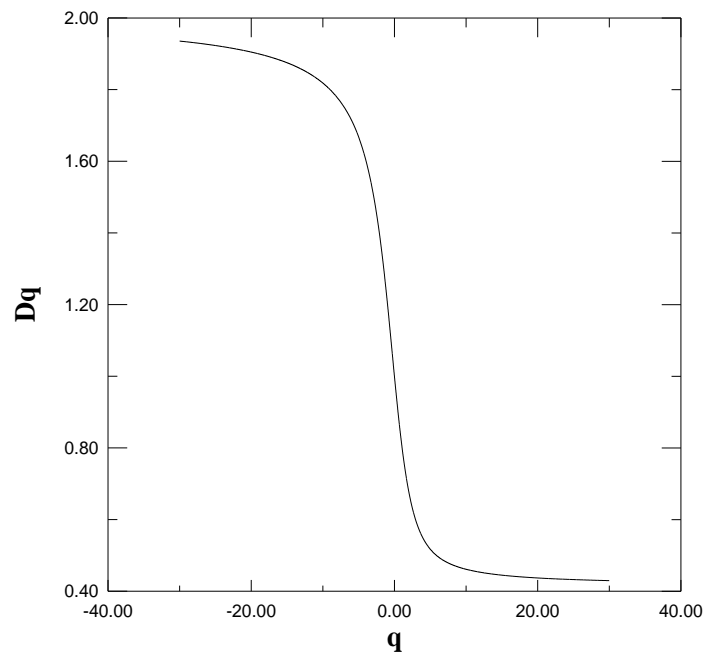


Figura 4 - Espectro de dimensões generalizadas D_q (Menezes Filho, 2003).

Especialmente, além da dimensão D_0 , duas outras dimensões fractais generalizadas são de particular interesse:

$$D_1 = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(l)} p_i \log p_i}{\log \left(\frac{1}{l} \right)} \quad (4)$$

e

$$D_2 = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(l)} p_i^2}{\log l} \quad (5)$$

denominadas, respectivamente, dimensão de informação e dimensão de correlação. A primeira, derivada da expressão de D_q por uma passagem ao limite $q \rightarrow 1$, exprime o tráfego de informações no interior do objeto fractal, e a segunda retrata o grau de correlação entre os elementos constituintes do objeto fractal em estudo.

A invariância de escala, tão característica de objetos fractais, costuma se traduzir matematicamente por relações (funções) em lei de potência. Assim, se uma determinada função $f(x)$ é invariante por escala $f(x) \sim f(\lambda x), \forall x$, então (Menezes Filho, 2003):

$$f(x) = \mu(\lambda) f(\lambda x) \quad (6)$$

onde μ e λ constantes multiplicativas. Derivando ambos os membros da expressão anterior e rearranjando, obtém-se;

$$\mu(\lambda) = \frac{f'(x)}{f'(\lambda x)} \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

no entanto, isolando $\mu(\lambda)$ da expressão (6) fornece;

$$\mu(\lambda) = \frac{f(x)}{f(\lambda x)} \quad (8)$$

e substituindo o 1º membro da expressão (7) pelo 2º membro da expressão (8) e rearranjando, encontra-se;

$$\frac{f'(x)}{f(x)} = \lambda \frac{f'(\lambda x)}{f(\lambda x)} \quad (9)$$

cuja solução da equação diferencial é uma lei de potência.

$$f(x) \sim x^\alpha \quad (10)$$

Portanto, a lei de potência é a única função capaz de retratar o fenômeno da invariância por escala.

Observe-se, p/ex., que a expressão que permite calcular D_0 , a razão entre duas funções logarítmicas, nada mais é do que a inclinação da reta em um gráfico bilogarítmico $1/l$ vs $N(l)$, a dimensão fractal propriamente dita D_0 sendo o expoente da lei de potência. Este procedimento está ilustrado na Figura 5 (Oliveira et al, 2016).

A dimensão de 1,8338 foi obtida aplicando-se o método de contagem de caixas a uma região quadrangular plana, constituída por um material elasto-plástico, em um padrão fractal de concentração de bandas de cisalhamento, que toma quase que por completo a área quadrada disponível (daí a sua proximidade da dimensão euclidiana 2,00).

A Figura 6 (Oliveira et al, 2016) ilustra este padrão fractal de localização de deformações.

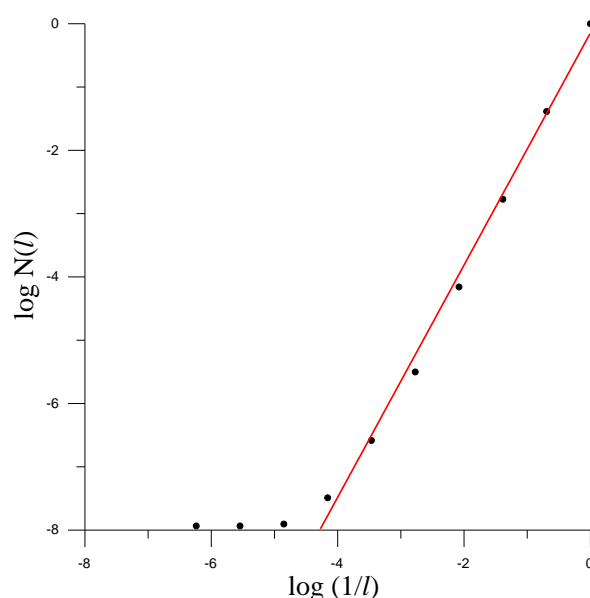


Figura 5 – Determinação da dimensão fractal D_0 pelo método de contagem de caixas ($D_0 = 1,8338$; coef. correlação = 0,9951) (Oliveira et al, 2016).

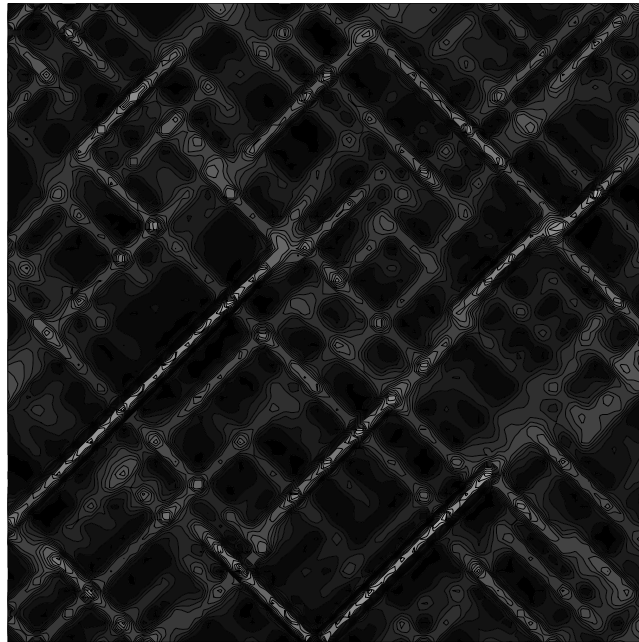


Figura 6 – Aspecto das bandas de localização de deformação plástica. As isocurvas de deformação mais claras são as mais intensamente deformadas (Oliveira et al, 2016).

Portanto, a dimensão fractal serve para caracterizar o grau de irregularidade e lacunaridade de um determinado padrão espacial auto-semelhante.

Como os fenômenos físicos ocorrem no espaço e no tempo, à fractalidade espacial deverá corresponder uma fractalidade temporal. Assim, a invariância por escala poderá ser encontrada analisando-se sinais temporais emitidos por objetos fractais.

A Figura 7 (Bassingthwaighe et al, 1994) mostra o eletrocardiograma de um paciente saudável, em que se pode observar a auto-semelhança do sinal cardíaco ao longo do tempo, em três escalas de observação diferentes. Não se pode, efetivamente, distinguir o sinal-mãe do sinal-filho e do sinal-neto, a nível estatístico, tomados a 300 min, 30 min e 3 min, respectivamente.

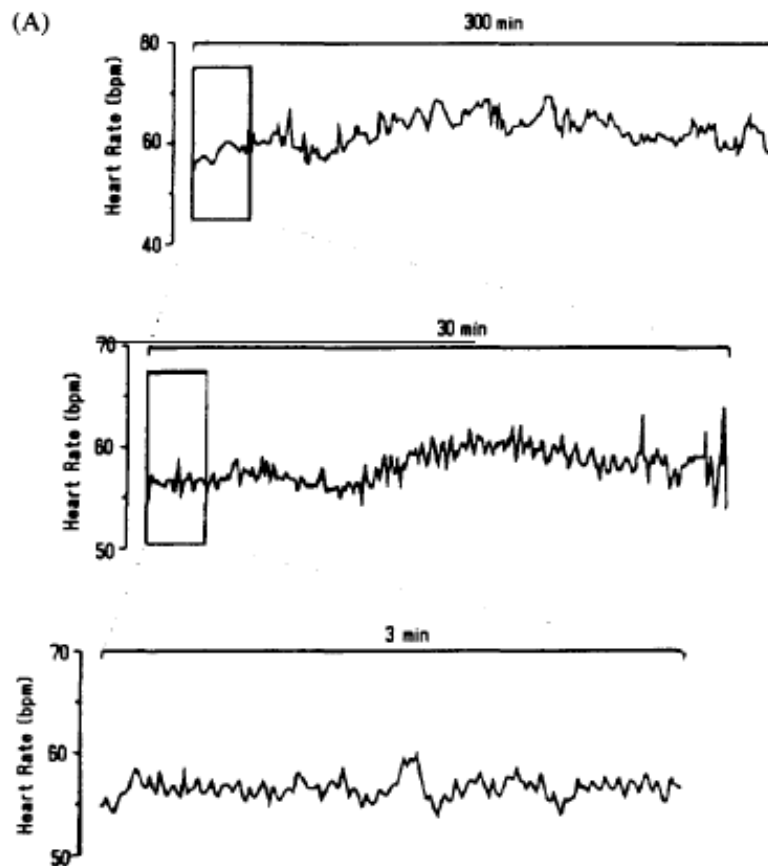


Figura 7 – Auto-semelhança em um sinal fisiológico cardíaco. Cada figura é obtida da anterior ampliando-se a área retangular assinalada (Bassingthwaighte et al, 1994).

Curiosamente, a normalidade fisiológica do sinal cardíaco está estritamente relacionada à ausência de uma escala temporal característica, tal fato podendo ser estendido a outros sinais fisiológicos de importância, monitorados pela medicina moderna – por exemplo, eletroencefalogramas (Bassingwaighte et al, 1994).

Portanto, a fractalidade temporal é também uma fonte importantíssima do comportamento do objeto ou fenômeno fractal, retratando como a energia ou outra variável relevante é liberada ao longo do tempo. Nisto se baseia a análise estatística R/S calçada na teoria de Hurst, utilizada nesta pesquisa para a investigação de correlações de propriedades extraídas de camadas de argila ao longo da sua profundidade, substituindo-se unicamente o tempo pela

profundidade das sondagens nos depósitos sedimentares argilosos naturais, uma vez que a espessura da camada em sua gênese deixou registros impressos no depósito sedimentar

1.2. Fractalidade do perfil cone penetrométrico CPTu

Esta dissertação admite, pois, como hipótese de trabalho, a fractalidade dos valores das resistências de ponta e de atrito lateral, bem como das poropressões geradas na cravação, ao longo da profundidade do depósito argiloso em estudo, fornecidas por ocasião dos ensaios CPTu, cujo resultado típico está apresentado na Figura 8.

Assim, torna possível a sua análise, utilizando-se o ferramental matemático já mencionado e a ser detalhado no capítulo 2, na busca de correlações eventualmente existentes daquelas propriedades ao longo da profundidade do depósito sedimentar natural.

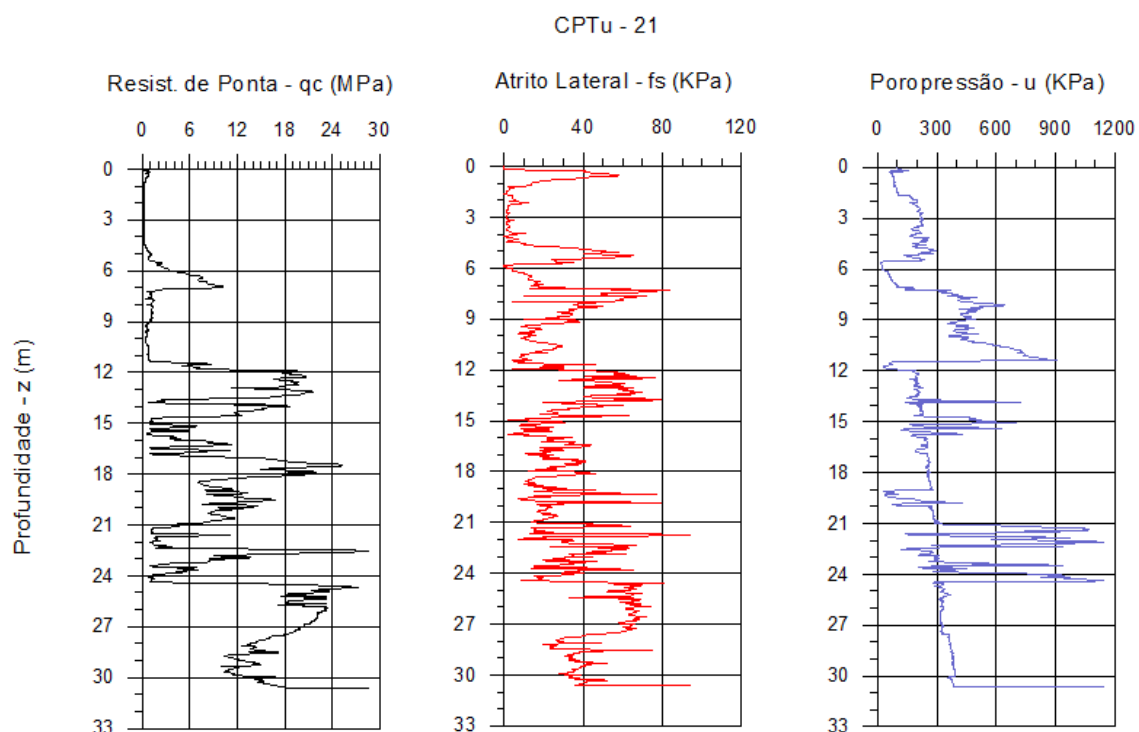


Figura 8 - Ensaio CPTu em depósito de argila mole, realizado no bairro de Santa Cruz da cidade do Rio de Janeiro.

No Capítulo 2 será abordada a análise R/S de séries temporais sob a ótica da teoria de Hurst, ferramenta indispensável no propósito investigativo das variáveis relevantes ao longo do tempo/profundidade, em que a variável temporal é substituída pela profundidade nos registros de resistências dos ensaios cone penetrométricos CPTu de depósitos sedimentares argilosos naturais, a serem apresentados no Capítulo 4.

O expoente de Hurst H , obtido da análise R/S, está diretamente relacionado à dimensão fractal D pela expressão matemática:

$$H = 2 - D \quad (11)$$

onde H é o expoente de Hurst e D é a dimensão fractal (Feder, 1988).

Assim, a relação matemática (11) sugere que, tal como a dimensão fractal D , o expoente de Hurst tem a capacidade de descrever o grau de rugosidade do sinal temporal/espacial, apontando para algumas de suas propriedades peculiares – por exemplo, persistência - tal como se verá adiante.

2. ANÁLISE R/S (*RESCALED RANGE ANALYSIS*)

Conforme mencionado ao final do capítulo anterior, a fractalidade temporal, ou a fractalidade que se mostra em um sinal temporal, constitui-se de um indicativo muito importante com relação a uma eventual auto-semelhança em sinais temporais naturais.

É amplamente aceito, sem maiores questionamentos, que fenômenos e processos aleatórios nas ciências naturais baseiam-se em 2 (duas) suposições (Korvin, 1992):

i) Sistemas naturais (físicos, econômicos etc.) possuem memória de curto alcance, o que vale dizer que os efeitos de perturbações aleatórias a que estes sistemas possam estar submetidos durante um intervalo de tempo limitado, decaem rapidamente, exponencialmente rápido;

ii) Pequenas perturbações aleatórias levam a pequenas e previsíveis alterações no comportamento futuro do sistema.

Portanto, isto posto, pode-se afirmar que não há correlação entre eventos passados e futuros na série temporal.

Tais características podem ser encontradas, por exemplo, no movimento Browniano ordinário ("*Brownian Motion*" – BM), e de muita importância em física, química e biologia, resultante do choque aleatório das moléculas de água sobre partículas em suspensão em um meio líquido, fenômeno este muito estudado por Einstein (Einstein, 1905).

Numa série de artigos seminais, Mandelbrot e seu grupo de pesquisa do IBM *Watson Research Center*, investigaram o chamado "movimento Browniano fractal" ("*fractional Brownian Motion*" – fBM), generalização do movimento Browniano ordinário, em que introduziram a possibilidade de memória temporal de longo alcance. Após estudo sistemático e aprofundado, perceberam que as hipóteses (i) e (ii) acima mencionadas, não se cumpriam para tais sistemas anômalos (Mandelbrot e Van Ness, 1968; Mandelbrot e Wallis, 1969abc).

Este caráter anômalo, presente em muitos sistemas naturais, particularmente nos denominados sistemas “fracamente caóticos” ou “complexos”, decorre da atuação de mecanismos de memória espacial e temporal de longo alcance.

Portanto, sistemas dinâmicos que apresentam memória de longo alcance parecem não comportar procedimentos estatísticos usuais (Tsallis, 2009).

Como se verá mais adiante, a análise R/S, estabelecida pelo físico inglês H. E. Hurst (1951), é uma ferramenta matemática bastante apropriada para se determinar os parâmetros que caracterizam tais sistemas.

2.1. Histórico da análise R/S

Hurst, quando trabalhou na Cidade do Cairo, estudou o Rio Nilo e os problemas relacionados ao armazenamento de água, incluindo o planejamento visando à construção da barragem de Assuã.

Sua concepção do projeto de um reservatório ideal de armazenamento, do ponto de vista operacional, tinha por base os dados de vazão de água requeridos ao longo do tempo, com as seguintes características:

- i. o volume de água fornecido para a usina (vazão de saída) deveria ser constante;
- ii. o nível de água após um determinado período deveria permanecer constante;
- iii. o reservatório não deveria encher demais para não transbordar;
- iv. a capacidade de armazenamento deveria ser a menor possível, de modo a compatibilizar i, ii e iii.

As condições i e ii dizem respeito à quantidade de água liberada a cada ano, devendo ser igual à quantidade média de água que entra no reservatório durante um período de τ anos.

A condição iv sugere que o reservatório ideal também fique quase seco em algum período, para evitar ser superdimensionado.

Chamando a vazão de água captada pelo reservatório da barragem por $\xi(t)$, na expressão 2.1 defina-se a vazão média liberada no período de τ anos como sendo:

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (12)$$

Representando por $X(t, \tau)$ a vazão acumulada obtida pela diferença entre a vazão captada $\xi(t)$ e a vazão média liberada $\langle \xi \rangle_{\tau}$:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \{\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau}\} \quad (13)$$

Pode-se definir a grandeza "*range*" $R(t, \tau)$ pela diferença entre a máxima e mínima vazão acumulada:

$$R(t, \tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (14)$$

cujo valor $R(t, \tau)$ satisfaz às quatro condições acima no tocante ao armazenamento, tal como ilustrado na Figura 9.

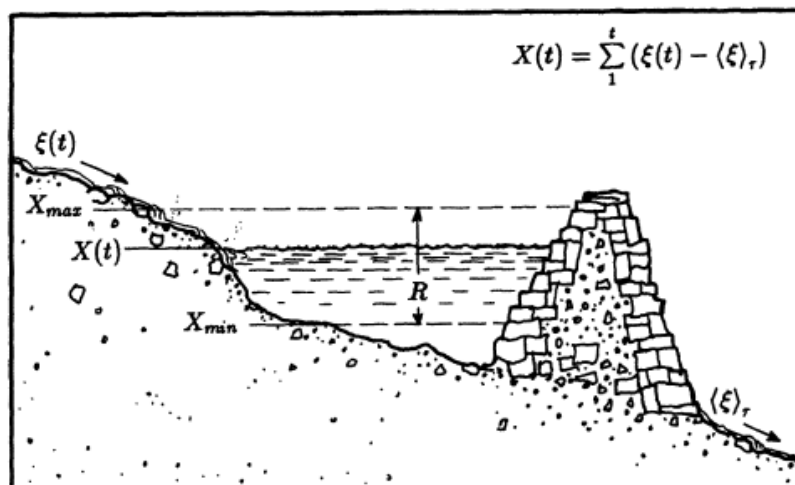


Figura 9 – Significado das variáveis para a análise R/S (Feder, 1988).

Hurst (1951) estudou também vários outros registros geofísicos, como nível de água em lagos, vazões de rios, regimes de chuvas, dentre outros, chegando à conclusão de que, para poder comparar fenômenos com origem e características diversas, era necessário dividir $R(t, \tau)$ pelo desvio padrão $S(t, \tau)$, tornando os resultados independentes deste último fator:

$$S(t, \tau) = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \{ \xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau} \}^2 \right)^{1/2} \quad (15)$$

Verificou, assim, que muitos registros de fenômenos naturais poderiam ser bem retratados pela relação normalizada da função que depende da lei de potência (16):

$$\frac{R(t, \tau)}{S(t, \tau)} = B \cdot \tau^H \quad (16)$$

A Figura 10 ilustra alguns dos resultados encontrados por Hurst.

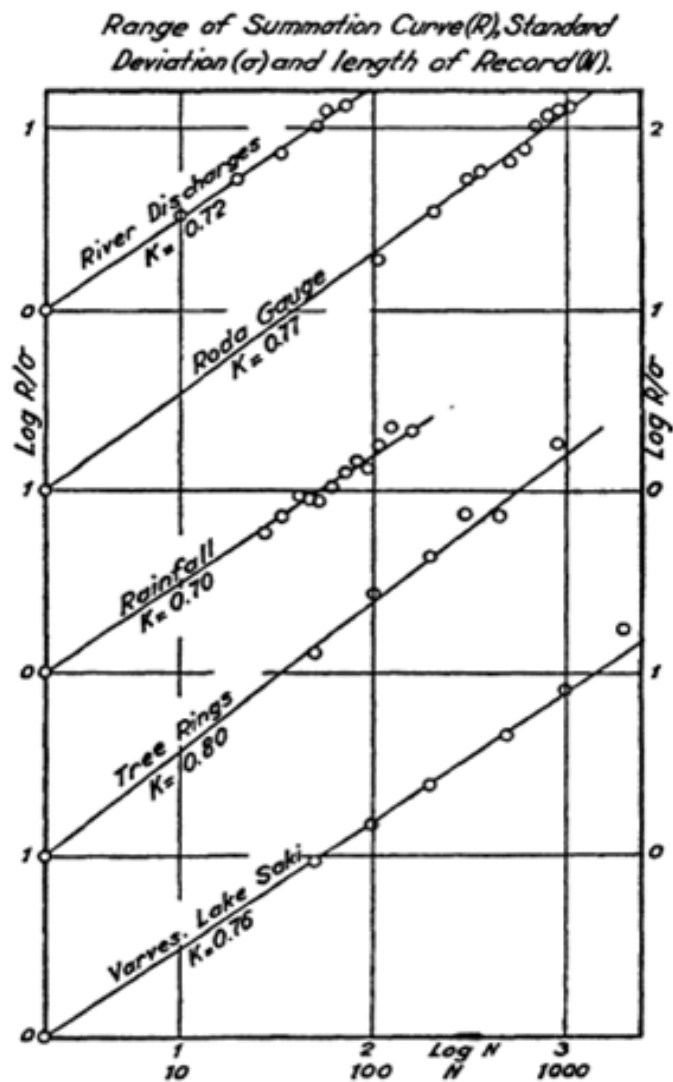


Figura 10 - Resultado das análises R/S efetuadas por Hurst et al. (1965).

Nela pode-se observar o excelente ajuste reta dos dados experimentais no gráfico $\log \tau$ vs $\log R/S$, validando a expressão 16. O intercepto da reta com o eixo das ordenadas fornece o pré-fator B , ao passo que a inclinação da reta com uma projeção do eixo das abscissas fornece o expoente H , referido por Hurst na Figura 10 como K , é, na verdade, o expoente H e o $\log N$ é o $\log \tau$.

Assim, o expoente de Hurst H é capaz de descrever não só irregularidades de séries temporais, como o seu grau de persistência, tal como

ilustrado na Figura 11. Neste sentido, H pode assumir os seguintes valores (Feder, 1988; Peitgen e Saupe, 1988):

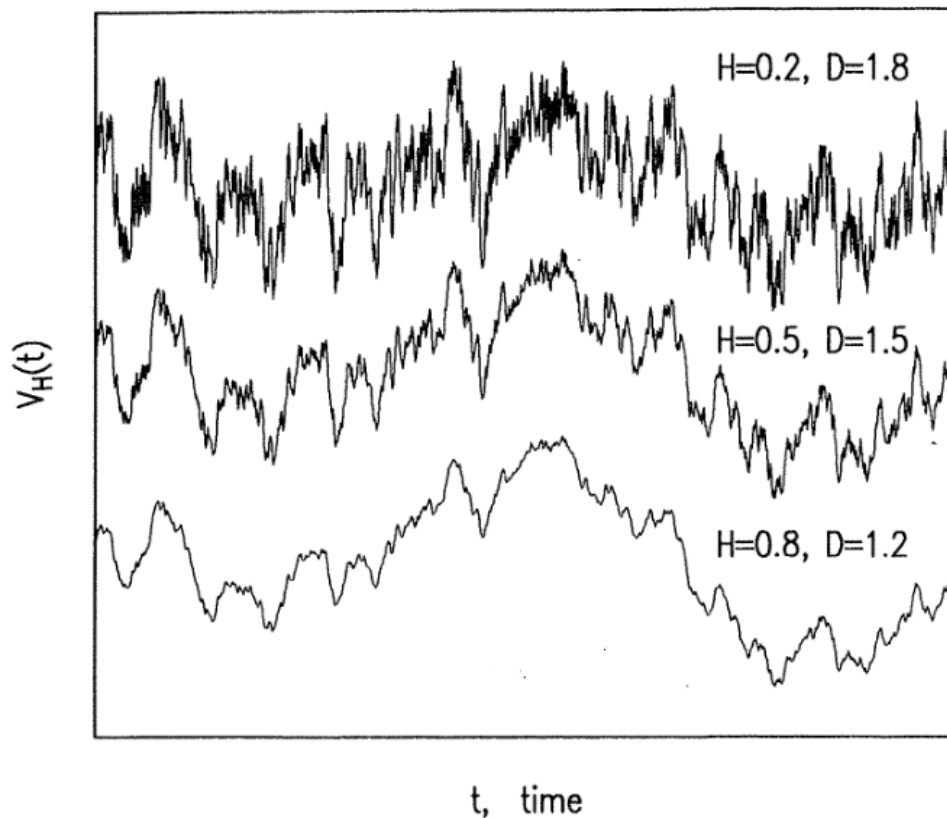


Figura 11 – Aspecto do sinal temporal (incrementos) para diferentes valores do expoente de Hurst e da dimensão fractal (Peitgen e Saupe, 1988).

- i. Se $H = 0,5$, o processo é retratado como aleatório, estando os seus incrementos não correlacionados (p/ex., o movimento browniano clássico), não havendo, portanto, correlação entre os eventos passados e futuros;
- ii. Se $H > 0,5$, o processo é caracterizado como persistente, estando os seus incrementos positivamente correlacionados, ou seja, há uma maior probabilidade de continuar uma tendência de alta ou baixa no futuro;
- iii. Se $H < 0,5$, o processo é identificado como anti-persistente, estando os seus incrementos negativamente correlacionados, i.é, uma tendência de valores

altos no passado serem seguidos por uma de baixa no futuro, ou o contrário, valores baixos serem seguidos por alta no futuro.

Cabe ressaltar que os comportamentos ditados por $H \neq 0,5$ estão em completo desacordo com o habitualmente esperado para registros aleatórios, em que a correlação entre dois eventos deve decrescer à medida que aumenta a distância entre eles, sendo nula a partir de um determinado limite. A razão de ser deste comportamento anômalo deve-se à presença, como já se observou, de memória de longo alcance no fenômeno em estudo, o que faz com que o decaimento da correlação entre eventos se dê mais lentamente (em lei de potência, segundo a expressão 16), para $H \neq 0,5$.

A primeira aplicação prática da análise R/S foi efetuada por Hewett (1986), em estudos de reservatórios de petróleo, utilizando registros de perfis elétricos de poços ao longo da profundidade para se determinar o valor do expoente de Hurst, objetivando a realização de simulações estocásticas (interpolações geoestatísticas) das propriedades das rochas.

A lei de Hurst foi revisada por Boes (1988), estabelecendo algumas possíveis explicações para o decaimento em lei de potência:

- i) a distribuição de $\xi(t)$ pode ser fortemente assimétrica;
- ii) a variável aleatória $\xi(t)$ pode não apresentar estacionariedade;
- iii) o comportamento proporcional a τ^H pode se adequar ao regime transiente, porém, mais cedo ou mais tarde, passar a $\tau^{0,5}$ devido à perda de correlação da série temporal;
- iv) mesmo havendo estacionariedade, a variável aleatória $\xi(t)$ pode apresentar correlações em várias escalas.

Os resultados de Hurst (1951), obtidos originalmente com moedas e cartas de baralho, foram revisitados por Feder (1988), desta feita utilizando-se de simulações por computador, produzindo uma quantidade bem maior de dados, o que lhe permitiu investigar e confirmar a validade da expressão (16) de Hurst num contexto mais abrangente.

2.2. Metodologia da Análise R/S

O parâmetro H pode ser determinado a partir de gráficos em escala bilogarítmica, nas situações em que há uma dependência em lei de potência entre τ e $R(t,\tau)/S(t,\tau)$, tal como ilustrado na Figura 10.

Com já se observou no item anterior, $R(t,\tau)$, dito “*range*”, é calculado com base nos valores máximos e mínimos, para uma dada distância τ dita (“*lag*”) entre pontos experimentais. Em seguida, $R(t,\tau)/S(t,\tau)$ é calculado dividindo-se o “*range*” pelo desvio padrão $S(t,\tau)$ dos dados experimentais naquele intervalo.

Uma janela de comprimento τ é colocada em inúmeras posições ao longo da série de dados temporais, sendo feita, para cada janela τ (“*lag*”), uma média dos valores de R/S de modo a se determinar o valor de R/S para aquele dado τ “*lag*”.

Certas peculiaridades técnicas que devem ser levadas em consideração nesta metodologia foram assinaladas, numa série de artigos, por Mandelbrot e Wallis (1969), objetivando a construção e interpretação dos resultados das análises. O Leitor porventura interessado em maiores esclarecimentos metodológicos e técnicos envolvendo o assunto (p/ex., efeitos de transiente inicial, memória e ciclicidade nos dados temporais, a adoção de janelas observacionais da série temporal, definição da sequência de intervalos τ , efeito da finitude da série temporal, presença de informações redundantes em razão de um número excessivo de pontos, dentre tantos outros) poderá recorrer aos referidos trabalhos de Mandelbrot e seu grupo de pesquisa da IBM, onde tais questões são rigorosa e minuciosamente discutidas.

2.3. Intensidade das correlações expressas pelo expoente de Hurst.

Outra característica importante do expoente H , além da informação capaz de descrever irregularidades e tendências de séries temporais, é a informação do grau de correlação entre os dados da série temporal, determinado

matematicamente pela expressão (17) (Breslin e Belward,1999), utilizada nos casos de análise de chuvas em determinadas regiões:

$$C = 2^{2H-1} - 1 \quad (17)$$

onde C é o grau ou intensidade de correlação da série de dados analisados e H é o expoente de Hurst, os valores admissíveis de correlações situando-se entre $-0,5 \leq C \leq 1$.

Portanto, séries temporais com valores de $H = 0,5$ representam, como já assinalado, dados aleatórios sem nenhuma correlação, i.é, $C = 0$. Por outro lado, valores do expoente de Hurst entre $0 \leq H < 0,5$ assinalam séries de dados anti-persistentes, com correlações negativas entre $-0,5 \leq C < 0$, ao passo que valores entre $0,5 < H \leq 1$ sugerem series de dados persistentes, com correlações positivas entre $0 < C \leq 1$ (Breslin e Belward,1999).

2.4. Aplicação da análise R/S na engenharia de petróleo

Uma das primeiras aplicações da análise R/S em estudos de reservatórios de petróleo foi realizada por Hewett (1986). Mais pormenorizadamente, registros de radioatividade natural de raios gama (GR), corrente elétrica induzida (ILD), tempo de trânsito da onda sonora (DT), radioatividade com raios gama (RHOB) e radioatividade com nêutrons e registro do índice de hidrogênio (NPHI), corridos ao longo da profundidade – a profundidade foi considerada como tempo -, foram utilizados para se determinar o valor do expoente de Hurst, objetivando a realização de simulações estocásticas (interpolações geoestatísticas) das propriedades das rochas.

A Figura 12 apresenta os registros dos perfis elétricos com a profundidade, utilizados na pesquisa de Beer (1994).

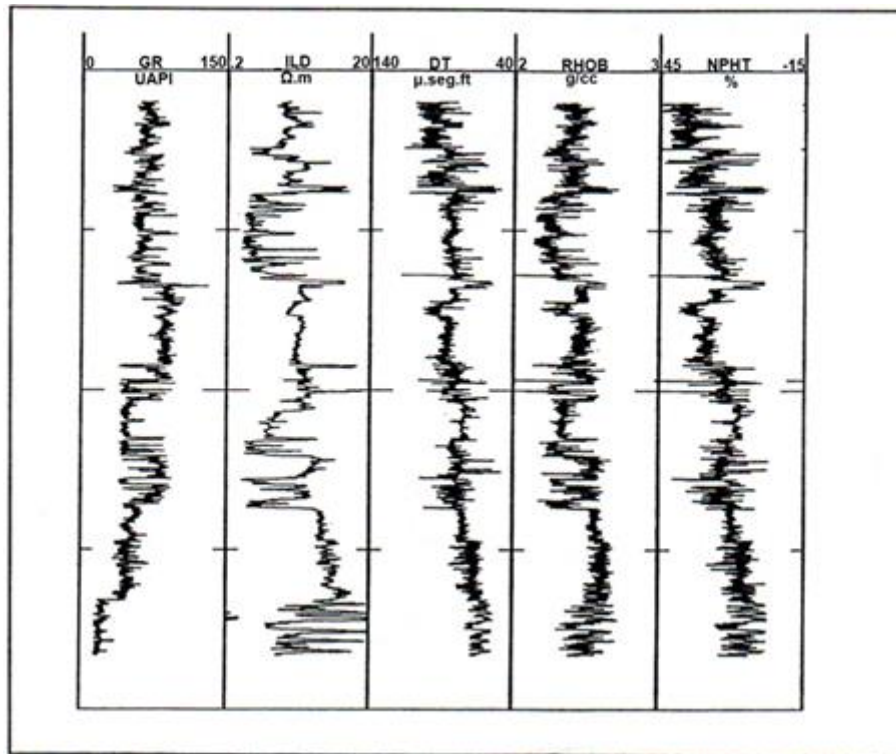


Figura 12 – Perfis elétricos corridos em um poço de petróleo (Beer, 1994).

Os resultados indicaram, à nível de cada perfil, haver correlações entre os mencionados registros com a profundidade, as medições apresentando expoente de Hurst variando entre 0,88 e 0,95 (Beer, 1994).

3. ENSAIO CONEPENETROMÉTRICO COM MEDIDA DE PORO-PRESSÃO (CPTu)

3.1. Introdução

O tema ensaio de campo cone penetrométrico CPTu é vasto em diversas áreas das ciências e tecnologia, alguns tópicos aqui serão brevemente descritos sem aprofundamento, pois o escopo desta dissertação tem foco no CPTu executado em solos moles a muito moles “solos de depósitos sedimentares naturais de altas taxas de compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento” com a finalidade de realizar uma investigação estatístico-probabilístico, a partir dos registros de resistências do ensaio cone penetrométrico CPTu, mais especificamente, os perfis de registro de resistência de ponta q_c , atrito lateral f_s e poro-pressão u gerados no processo de cravação.

Os ensaios de campo para investigações geotécnicas são variados, possuem cunho na investigação da formação geológica dos solos deixadas pela gênese, descrevendo o mapeamento e distribuição da composição do solo e obtenção de parâmetros indispensáveis ao desenvolvimento de projetos estáveis. É de fundamental importância que em cada etapas da sondagem se identifique a constituição dos materiais nos diversos pontos da sondagem, pois quando interligados num plano horizontal, possibilitam a estimativa muito próxima do perfil geotécnico bidimensional descrito pela gênese de formação geológica, onde é possível identificar as camadas e suas topografias aproximadas “estratigrafia do solo local”. Os ensaios cone penetrométricos CPTu tem fundamental importância na obtenção de informações indispensáveis para o projeto, porém seu potencial para identificação da estratigrafia é menos utilizado (Douglas & Olsen, 1981; Amorosi & Marchi, 1999; Scheneider et al., 2001), isto posto na época em questão das pesquisas dos assinalados autores, devido não haver coleta de amostras. Mais precisamente, é um ferramental de grande interesse nos estudos dos solos oriundos de depósitos sedimentares predominantemente compostos por argilas moles de baixíssimas resistências ao cisalhamento e altas taxas de compressibilidade.

O ensaio de campo cone penetrométrico CPTu ganhou popularidade

devido a precisão das informações, evoluindo para automação e interligação a uma interface acompanhando o desenvolvimento tecnológico e informatização. O piezocone é uma ponteira cônica metálica instrumentada com diversos sensores, sendo para a Engenharia Civil os principais, os sensores de resistências de ponta, atrito lateral e poro-pressão gerada no processo de cravação. Mais precisão e rapidez na obtenção dos resultados passaram a ser possíveis devido ao advento da automação, que proporcionou a obtenção de resultados em intervalo de tempo praticamente imperceptíveis nos ensaios de campo.

A análise e interpretação dos resultados dos ensaios cone penetrométricos CPTu estão diretamente ligados aos processos de formação do solo. Quanto a lacuna de classificação dos materiais devido não haver coleta de amostras no ensaio cone penetrométrico CPTu, pesquisas foram desenvolvidas e chegaram à conclusão de que há sensível equivalência entre interpretações dos ensaios cone penetrométrico CPTu e as descrições tácteis, visuais e laboratoriais de amostras (Robertson et al., 1986; Lunne et al, 1997). O reconhecimento das superfícies de transição com base nas distintas técnicas aplicadas, coincide em parte, no entanto há locais no qual os resultados são contrastados devido ao maior detalhamento propiciado pelo ensaio cone penetrométrico CPTu (De Mio, 2005), segundo estas premissas assinaladas pelo autor citado, o ensaio de campo CPTu passou a ter potencial para identificação de estratigrafias mesmo não coletando amostras do solo.

3.2. Descrição geral do ensaio de piezocone (CPTu)

Os ensaios cone penetrométricos, são conhecidos pelas siglas CPT (*cone penetration test*) e CPTu (*piezocone penetration test*), sendo o CPTu a evolução do CPT, onde possui características adicionais que permitem obter registros de poro-pressão geradas no processo de cravação do cone, mais precisamente, são ferramentas internacionalmente considerados como uma das mais essenciais ferramentas de prospecções Geotécnicas.

O ensaio de campo CPTu é executado em solos superficiais saturados ou

submersos, característico pela cravação vertical de uma ponteira cônica instrumentada com sensores variados, conforme interesse da campanha de sondagem, que realizam leituras de registros de resistências e transmitem digitalmente para serem visualizadas em fração de tempo imperceptível, praticamente de forma instantânea e visualizadas na tela de um computador. A realização da cravação necessita de uma estrutura de reação dotada de um sistema de aplicação de cargas, cujo a imobilização pode ser por: ancoragem no solo; um veículo de transporte terrestre onde o peso próprio tem fundamental importância; ou um sistema combinado, além das plataformas marítimas que utilizam sistemas complexos.

A penetração da ponteira cônica está diretamente voltada a capacidade reativa absoluto do conjunto, Há distintos equipamentos com distintos potenciais de aplicação dos esforços estáticos terrestres, os veículos com peso variável relativamente selecionados conforme a mobilidade e as características mecânicas do solo superficial e os equipamentos de pequenos e médios portes que necessitam ser ancorados com trados mecânicos, também relativamente selecionados conforme as características mecânicas do solo superficial, já nas plataformas marítimas como assinalado exige um complexo sistema de ancoragem que garanta a imobilização sobre as águas.

3.2.1. Histórico do ensaio de campo Conepenetrométrico CPTu

Os primeiros registros sobre ensaios penetrométricos estáticos remontam de 1917 na Suécia, realizados na execução da Ferrovia Estatal Sueca, e de 1927 na Dinamarca, realizados na execução das Ferrovias Dinamarquesas (Cestari,1990). Os equipamentos penetrométricos mecanicamente utilizados nestes feitos históricos geotécnicos, possuíam as células de cargas de medição de resistências localizadas na parte superior das hastes e a ponteira não era cônica, por onde era possível obter registros de esforços necessários para a cravação da ponteira. O primeiro registro da evolução do ensaio penetrométrico foi o advento da ponteira cônica metálica, que remonta de 1934 na Holanda, recebendo a denominação de Delft (Lunne et al.,1997), conhecido atualmente

como o primeiro equipamento de ensaio cone penetrométrico, por onde somente se obtinha registros de resistência de ponta. O segundo registro da evolução do ensaio cone penetrométrico foi o advento do registro do atrito lateral por uma luva de metal incrementada a ponteira cônica por Begemann (1953), por onde passou a ser possível obter registros de resistência de ponta e atrito lateral, foi denominado cone mecânico, seguido do incremento da instrumentação eletrônica, denominado cone elétrico, onde os registros de resistências passaram a ser monitoradas numa tela, tornando assim o ensaio cone penetrométrico muito popular no mercado a partir da década de 60, justamente por ser na época em questão o único equipamento capaz de fornecer resultados precisos em pouquíssimo tempo nas sondagens de campo. O advento do registro de poro-pressão só passou a ser possível a partir das sondas piezométricas (Wissa et al., 1975; Torstensson, 1975), e a terceira evolução do ensaio cone penetrométrico ocorreu com o incremento do elemento filtrante, passando a ser denominado de CPTu ou simplesmente piezocone, por onde passou a ser possível os registros simultâneos de resistências de ponta, atrito lateral e poro-pressão gerada no processo de cravação (De Ruiter, 1971). Daí por diante sucessivas evoluções ocorreram com o incremento de diversos sensores ao ensaio de campo piezocone, expandindo o potencial investigativo deste ensaio tanto para a Geotecnia como para o Geoambiental (Campanella et al., 1998).

As versões evolutivas de tecnologias empregadas ao piezocone, tomaram grandes proporções investigativas do subsolo, tornando assim, o CPTu um equipamento de múltiplas aplicações, inclusive em avaliações de regiões propensas a sismos e em regiões de composição arenosa de fina granulometria propensas a liquefação, obtenções simultâneas de análises estratigráficas e modulo de cisalhamento máximo (G_0), passaram a ser possíveis com advento do modulo sísmico (Davies & Campanella, 1995). Investigações em áreas com objetivo de mapeamentos estratigráficos e avaliações de riscos, vem sendo realizadas com sucesso com o ensaio de piezocone (Amorosi & Marchi, 1999; Schneider et al., 2001).

O primeiro registro do ensaio cone penetrométrico CPTu no Brasil, foi no final da década de 1950. As execuções eram restritas a projetos de plataformas

marítimas para prospecção do hidrocarboneto. A partir da década de 90 houve um grande interesse comercial no ensaio de campo CPTu, proporção esta tomada por relevantes pesquisas acerca do piezocone desenvolvidas nas universidades brasileiras. O piezocone atualmente é comercialmente praticado por empresas brasileiras e de diversos países.

Resultados obtidos por diferentes equipamentos divergiam notoriamente, fato este que impulsionou o interesse na padronização dos equipamentos, acessórios e procedimentos dos ensaios cone penetrométricos CPT e CPTu pela IRTP/ISSMFE (1977, 1988a), acompanhado de normas e códigos regionais e nacionais: no Brasil, NBR 12069/1991 (MB-3406) (ABNT, 1991); na Holanda, NEN5140/1996; na Europa, Eurocode/7, Parte 3, 1997; na França, NF P94-113/1989; no Reino Unido, BS1377/1990; nos Estados Unidos, ASTM D5778/1995 (Schnaid & Odebrecht, 2012).

3.3. Descrição dos equipamentos e procedimentos técnicos

Os órgãos normativos ASTM D5778/1995 dos Estados Unidos da América igualmente ao Eurocode/7, Parte 3/1997 da Europa, baseados nos seus diversos comitês de normalizações, exerceram grande influência nas definições técnicas adotadas como padrão nas dimensões de fabricação das ponteiros cônicas, equipamento propulsor, etapas de procedimentos práticos de execuções, além das aferições e medições do CPT e CPTu. Mesmo não estando mais em vigência por ter sido cancelada em 2015 a norma brasileira NBR 12069/1991 (MB-3406) (ABNT, 1991) também influenciou fortemente nas etapas de evolução dos equipamentos e procedimentos técnicos do CPT e CPTu.

Foram utilizados como guias para a busca de trabalhos originais e respectivo desenvolvimento deste capítulo, o livro *Ensaio de Campo* de autoria de Schnaid e Odebrecht, 2012 e o livro *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering* de autoria de P. K. Robertson e K. L. Cabal, 2014, que sem mais questionamentos são guias exemplares dotados de notórias pesquisas de diversos autores que trazem em seus conteúdos descrições de equipamentos e procedimentos técnicos e práticos normalizados internacionalmente de

ensaios cone penetrométricos, apontando pesquisas e casos verídicos de execuções bem sucedidas.

O ensaio cone penetrométrico consiste na cravação do cone com velocidade constante de aproximadamente 20mm/s no solo alvo da investigação, cujo vértice formado pela ponta do cone possui ângulo 60° , normalmente o cone apresenta seção transversal de 10 cm^2 , podendo possuir seções diferentes para mais ou menos dependendo da necessidade, tal como capacidade de carga do equipamento de cravação versus composição granulométrica e resistência do solo superficial, podendo o cone apresentar seções transversais menores que 5 cm^2 ou maiores que 15 cm^2 . Os procedimentos práticos de execução do ensaio cone penetrométrico, como já mencionado anteriormente, são padronizados e normalizados, os equipamentos com distintas tecnologias e com base na cravação do cone em oferta no mercado estão caracterizados a seguir:

cone mecânico, equipamento cujo a técnica aplicada para a obtenção dos registros das resistências necessárias para cravação do cone no solo, são obtidas na superfície, aplicando o esforço mecânico sobre as hastes, os registros de resistências obtidos por este mecanismo são resistências de ponta q_c e atrito lateral f_s ;

cone elétrico, equipamento cujo a técnica aplicada para a obtenção dos registros das resistências necessárias para cravação do cone no solo, são obtidas por instrumentações instaladas no cone e interligadas a uma interface de computador, por onde é possível praticamente de forma instantânea obter os registros de resistências de ponta q_c e atrito lateral f_s em uma interface;

e o **piezocone**, equipamento que incrementa o elemento filtrante no cone elétrico, onde a partir desta evolução passou a ser possível obter registros de poro-pressão u geradas no processo de cravação, além dos registros de resistências de ponta q_c e atrito lateral f_s instantaneamente em uma interface.

3.3.1. Descrição da ponteira cônica

A seguir será possível ver modelos padrões de cones desmontados na

Figura 13 por onde é possível observa o elemento filtrante do piezocone desmontado, os transdutores de pressão, o conjunto de células de cargas da ponteira cônica e da luva de atrito lateral.

A presença do agente de medições tornou-se opcional, pois neste equipamento passou a ser possível com o auxílio de um acionador automático instalado entre a haste de cravação e o pistão hidráulico, que fecha o circuito elétrico no momento do início da cravação proporcionando o início das leituras, não sendo mais necessário a presença contínua do agente durante o processo de execução.

O piezocone tomou proporções mais amplas e caiu no interesse comum do mercado, por sua capacidade de obter registros instantâneos e sucessivos de resistências a cravação, fornecendo assim um melhor detalhamento de estratigrafias do solo, que é uma informação de grande importância na elaboração de projetos seguros e estáveis, além de não ser mais necessária a presença contínua do agente nas medições e registros de q_c , f_s e u , reduzindo erros passíveis que o agente pode cometer nos registros de resistências.



Figura 13 - Principais componentes do equipamento (Schnaid e Odebrecht 2012).

Em oferta no mercado há uma diversidade de equipamentos de ponteira cônica, que se assemelham, porém possuem distintas configurações em suas dimensões externas, distintas configurações de instrumentações, distintas posições de elementos filtrantes, distintas configurações de sistemas de alimentação e transmissão de dados.

O critério para a seleção do equipamento de ponteira cônica para a sondagem do solo é de fundamental importância, uma vez que as vantagens e desvantagens variam bastante de uma ponteira para outra, como será visto a seguir.

As dimensões externas do equipamento estão voltadas para área transversal da ponteira cônica e área transversal da luva de atrito, o equipamento padrão de utilização, como já assinalado é o cone de área transversal com 10 cm², existem cones de área transversal maiores e menores. Os cones com áreas maiores que 10 cm² foram propositalmente fabricados para utilização em projetos sobre solos com maior resistência, que por consequência do diâmetro possuem células de carga mais robustas e resistentes. Os cones com área transversal menores que 10 cm² foram propositalmente fabricados para solos com menor resistências, que por consequência do diâmetro possuem células de carga proporcionais ao diâmetro, ocasião em que não necessitam de um sistema de cravação de maior capacidade, logo são apropriados para execuções em condições complexas, além de possuírem maior sensibilidade para detectar camadas de finas espessuras na estratigrafia do solo.

Padronizou-se o cone de 10 cm² de área nominal pela (IRTP - *International Reference Testing Procedure*). Seções transversais maiores ou menores, bem como suas dimensões, medidas e a tolerâncias devem ser tomadas na proporção do diâmetro (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Na Figura 14 é possível observar cones com diferentes áreas transversais, que aparentemente se assemelham, porém, a aplicabilidade de cada um cone deve ser analisada por um especialista, pois a escolha errada pode comprometer a campanha do ensaio conepenetrométrico.



Figura 14 - Tipos de ponteiros (respectivamente: 2 cm², 10 cm², 15 cm², 40 cm²) (Robertson 2006).

Mais detalhes concernentes ao diâmetro, ângulo de ponteira e a rugosidade da superfície do cone, bem como diâmetro, tolerâncias, comprimento e rugosidade da superfície da luva, bem como as 3 (três) posições e medidas dos elementos filtrantes, deve-se fazer uma busca no trabalho realizado por Schnaid e Odebrecht, 2012 onde os autores expõem medidas extraídas de normas técnicas já assinaladas, ou diretamente nas normas.

Tabela 1 - Dimensões típicas de ponteiros, ilustradas na Figura 3.2 (Schnaid e Odebrecht, 2012)

Ponta cônica	Área da ponta	Área da Luva	Referencias
< 10 cm ²	2 cm ² 5 cm ²	3.004 mm ² 7.510 mm ²	(*) (*)
= 10 cm ²	10 cm ²	15.000 mm ²	NBR ASTM D5778-07 ITRP
> 10 cm ²	15 cm ² 40 cm ²	22.532 mm ² 60.085 mm ²	(ASTM D5778-07) (*)

(*) Cálculo conforme ASTM D5778-07. O comprimento da luva é diretamente proporcional ao diâmetro da seção transversal do cone, tomando como base o cone de 10 cm².

Na Figura 15 é possível ver que existem distintos formatos na geometria interna dos cones, definidas pela configuração de atuação das células de cargas:

ponteiras que as células de carga da ponta cônica e luva de atrito atuam a compressão e independentes;

ponteiras que a célula de carga da ponta cônica atua a compressão, ao passo que a luva de atrito atua a tração;

e ponteiras que as células de cargas citadas atuam interligadas a compressão e interagindo, configuração esta denominada ponteira de subtração, pois recebe informações simultâneas da ponta e luva, que ficam acumuladas e precisam ser subtraídas para a obtenção do atrito lateral f_s , esta subtração pode ser feita eletronicamente por circuitos elétricos ou digitalmente por programas, sendo esta configuração a mais popular.

A parte mais sensível do equipamento são as células de carga, por onde é possível obter registros precisos por meio de distintas configurações de *strain gauges*, existem configurações com pontes de 4 *strain gauges* no formato Witston e pontes de 8 *strain gauges*.



Figura 15 - Tipos de ponteiras com distintas configurações de montagem de células de cargas (Schnaid e Odebrecht 2012).

3.3.2. Elemento filtrante, posicionamentos e procedimentos de saturação

Como já mencionado anteriormente o elemento filtrante é o incremento evolutivo das leituras do CPT que deu origem ao CPTu por onde passou a ser possível obter registros de medição de poro-pressão u geradas no processo de cravação.

Internacionalmente os registros das poro-pressões u geradas no processo de cravação, tornaram-se em informações essenciais ao desenvolvimento de projetos seguros e estáveis.

Existem três configurações que o elemento filtrante pode ser posicionado, como pode ser visto na Figura 16, e até o momento ainda não houve senso comum a cerca deste assunto (Robertson et al., 1992; Schnaid et al., 1997; Lunne; Robertson; Powell, 1997). A determinação de uma das possíveis posições: ponta (u_1), base (u_2) ou luva (u_3) do cone, será relativa à aplicação das medidas de poro-pressão, sendo a posição u_2 a mais utilizada atualmente.

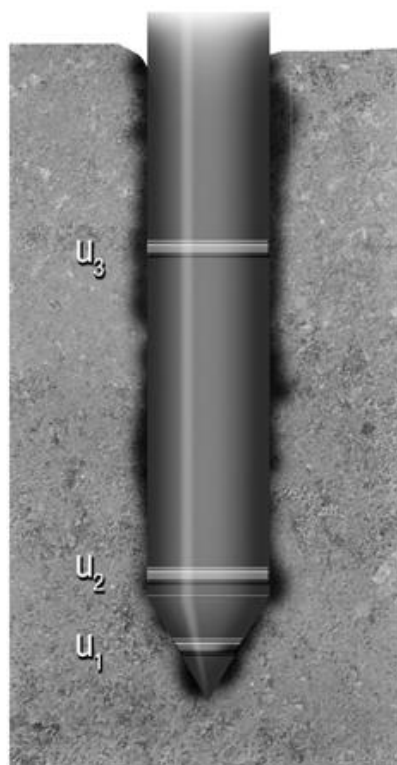


Figura 16 - Posições do elemento filtrante (Schnaid e Odebrecht 2012).

3.3.2.1. Tipos de elementos filtrantes

O elemento filtrante basicamente é um anel, sua composição pode variar de metal sinterizado, cerâmica ou plástico, como apresentado na Figura 17. Existe uma alternativa no mercado de ponteiras cônicas, denominado *slot filter*, que substitui o elemento filtrante por uma ranhura circular de 0,3 mm que realiza a função do elemento filtrante, que basicamente é permitir que o ambiente externo se conecte ao transdutor de pressão (Elmgren, 1995; Larsson, 1995). Todo e qualquer tipo de elemento filtrante antes da execução da cravação devem ser saturados para que as leituras não sejam prejudicadas.

Como já assinalado, os elementos filtrantes podem ser fabricados por distintos materiais: em plástico; cerâmica ou metal sinterizado, que serão apresentados na Figura 17. Os diâmetros dos poros, bem como permeabilidade, podem ser obtidos na norma técnica (EN ISO 22476-1). O critério de escolha do elemento filtrante, no tocante ao material que o compõe, deve considerar o seguinte: distintos metais possuem distintas resistências, e as avarias decorrentes das resistências do solo podem prejudicar a superfície do elemento filtrante por desgaste ou deformações, que conseqüentemente irão diminuir a permeabilidade, prejudicando ao tempo de respostas nos registros de poro-pressão; elementos filtrantes de cerâmica possuem grande resistência a compressão e sofrem pequenas deformações, porém, são suscetíveis a ruptura; e os elementos filtrantes de plástico são pouco resistentes, não é indicado que sejam reutilizados e tão pouco é indicado para posição u₁.



Figura 17 -Tipos de elemento filtrante (Schnaid e Odebrecht 2012).

3.3.2.2. Tipos de fluido de saturação

Os elementos filtrantes devem ser saturados previamente a cravação, os diferentes fluidos utilizados para saturação, podem ser água deairada, óleo de silicone ou óleo de glicerina (Robertson e Campanella, 1989), existem experiencias bem-sucedidas em que foi utilizado óleo mineral como fluido de saturação (Soares, 1997), resultados semelhantes de registros de poro-pressão foram obtidos por fluidos diferentes em depósito sedimentar argiloso na Suécia (Schnaid e Odebrecht, 2012).

O processo de saturação, consistem na exposição ao vácuo por um período compreendido de 5 a 24 horas (Campanella, 2005) do conjunto elemento filtrante e fluido, em uma câmara de calibração/saturação, é indicado exposição mínima de 24 horas quando o fluido de saturação for mais viscoso (Sandven, 2010), pois quanto mais viscoso for o fluido, maior será o tempo necessário para saturação do elemento filtrante. Segundo Campanella (2005) é orientado, em situações que seja necessário o uso de fluidos muito viscosos, que se proceda a saturação em câmaras, que seja possível a exposição a altas taxas de vácuo, em temperaturas entre 40° e 60° e leves vibração ultrassônica, possibilitando assim a eliminação de bolhas de ar dos poros do elemento filtrante.

Observou-se que em elementos filtrantes de diâmetros dos poros menores, quando são saturados com fluidos de maior viscosidade, há uma melhor conservação da saturação no interior dos poros do elemento filtrante quando submetidos a penetração em solos não saturados ou dilatantes, ao passo que uma saturação especifica como esta, necessita de equipamentos e técnicas especificas. Em ocasiões de baixas temperaturas, quando a glicerina é utilizada como fluido, a viscosidade pode ser alterada, neste caso será necessário a mistura de uma dose de água igualmente proporcional a da glicerina para proporcionar uma saturação satisfatória e rápida do elemento filtrante (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Os elementos filtrantes saturados, devem ser mantidos submersos no fluido, em condições de conservação da saturação até a localidade da execução

do ensaio.

A glicerina popularizou-se como opção de fluido para saturação do elemento filtrante, pois suas características físico-químicas são favoráveis para preservação da saturação em camadas do solo acima do nível de água, por possuir estabilidade quando misturado com água, por ter menor compressibilidade que a água, por somente congelar a (-17°) e não ser prejudicial ao meio ambiente.

3.3.2.3. Procedimento de saturação dos elementos filtrantes

Há duas técnicas existentes de saturação do elemento filtrante:

saturar o piezocone montado, levando a ponteira cônica já com o elemento filtrante e o fluido ao vácuo em câmara de calibração/saturação;

ou saturar apenas o elemento filtrante, levando o elemento filtrante e o fluido a uma câmara de vácuo, montado o elemento filtrante já saturado no piezocone no local da execução do ensaio.

A primeira técnica de saturação é feita em laboratório antes da execução do ensaio, onde é necessário que o elemento filtrante permaneça submerso no fluido até o início do ensaio, esta técnica garante que o elemento filtrante esteja perfeitamente saturado, pois é possível aplicar tensão e obter leituras no piezocone ainda no interior da câmara. Logo é indicado que haja uma câmara de saturação na localidade de execução do ensaio, e somente é permitido um ensaio ao dia.

A segunda técnica de saturação, onde somente o elemento filtrante e o fluido são previamente submetidos a câmara de vácuo e posteriormente montados no piezocone na hora do ensaio, tornou-se mais vantajosa esta técnica por permitir a execução de mais de um ensaio ao dia, os dois procedimentos técnicos fornecem leituras excelentes. É fundamental que o projeto da cavidade de instalação do transdutor de pressão, a aferição do transdutor, a técnica de saturação e a correção da saturação na localidade do

ensaio de campo sejam verificados, pois são os pontos cruciais e decisivos na qualidade do ensaio.

3.3.3 - Calibração e preservação do equipamento

Devem fazer parte da prática executiva dos ensaios de campo, os procedimentos de manutenção e calibração dos equipamentos, e devem estar voltadas para todas os componentes do conjunto, inclusive equipamentos acessórios.

É de suma importância a inspeção periódica do sistema de cravação, com verificações de possíveis desgastes ocasionados pelo uso do equipamento, como verificação da velocidade de cravação, alinhamento e centragem do equipamento. O alinhamento das hastes deve ser verificado constantemente para evitar que empenos prejudiquem tanto o equipamento quanto os resultados da sondagem, da mesma forma, as roscas e conexões devem ser verificadas para evitar que erros sejam cometidos. A simples técnica de rolar as hastes num plano qualquer, pode revelar a haste que possua um empeno superior ao tolerado e que pode prejudicar o alinhamento do conjunto de hastes.

A verificação das ponteira cônicas e luvas é de fundamental importância, em busca de possíveis desgastes, avarias e deformações com o propósito de preservar as dimensões e tolerâncias especificadas em normas e referências técnicas já assinaladas.

Os pontos de vedação e conexões devem ser mantidos limpos, garantido a preservação. Previamente ao início de cada do ensaio, deve-se desmontar e realizar a limpeza de todas as vedações. Periodicamente deve-se calibrar a ponteira cônica, proporcionalmente ao uso, ou seja, campanhas curtas exigem menor quantidades de calibrações ao passo que em campanhas extensas necessitam de maior quantidade de calibrações, para este caso de trabalho muito extensos, a calibração poderá ser efetuada em campo com uma célula de carga e um equipamento hidráulico manual, aplicando reação na própria estrutura do sistema de cravação. Na Tabela 2 a seguir, é possível observar com

mais detalhes a representação de uma calibração do equipamento de ensaio cone penetrométrico.

Tabela 2 - Verificação, manutenção e calibração (Schnaid e Odebrecht 2012)

Item	Frequência			
	No início de um programa de sondagem	No início de cada sondagem	Ao final de cada sondagem	Em intervalos trimestrais
Verificação do sistema de cravação		✓		
Inspeção no sistema de cravação	✓			✓
<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de cravação • Vazamentos • Linearidade 	✓ ✓ ✓			✓ ✓ ✓
Linearidade das hastes		✓		✓
Leitura zero		✓	✓	
Desgastes da ponteira				
<ul style="list-style-type: none"> • dimensões • rugosidade 	✓ ✓			✓ ✓
Vedações				
<ul style="list-style-type: none"> • presença de solo • integridade 	✓ ✓	✓ ✓		
Calibração				
<ul style="list-style-type: none"> • células de carga • parâmetro "a" • temperatura 				✓ ✓ ✓

3.3.4. Sistemas utilizados na transmissão de dados

Nos ensaios cone penetrométricos, geralmente são utilizados sistemas de obtenção e processamento de dados automáticos, que a partir de programas computacionais, propiciam o tratamento adequado dos registros de resistências, processamento de dados e armazenamento no local do ensaio de campo pela comunicação entre um conversor analógico/digital (datalogger) e um computador. Tais conversores podem ser especiais (comercializados por

empresas que fabricam as ponteiras cônicas) ou industriais (sistemas convencionais de coleta de dados comercializados por empresas de hardware). No conversor de utilização industrial, o sistema analógico/digital geralmente situasse na superfície, e os dados trafegam por cabos e de maneira analógica. Atualmente, as ponteiras cônicas já têm um conversor analógico/digital situado na parte superior do cone, que possibilita a transmissão dos dados de forma digital.

Por conta da variedade de sistemas é interessante agrupá-los pela tecnologia de transmissão de dados existentes: sistemas cabeados para transmissão dos dados; sistemas sem cabo denominados wireless; sistemas de armazenamento local na memória interna da ponteira cônica, em um cartão de memória, e depois transferidos para um computador (memocon); e sistemas híbridos sem cabo, que permitem a transmissão de dados instantaneamente por um sistema wireless e que também possui armazenamento interno dos dados, num cartão de memória. Este sistema híbrido possui características benéficas, uma vez que, ocorra ausência parcial do sinal ou de interferência de ruídos na transmissão, os dados completos são protegidos no interior do cone e podem ser lidos após à cravação.

A transmissão de dados nos sistemas cabeados podem ser analógicos ou digitais, e os outros dependem impreterivelmente da digitalização dos dados juntamente ao cone. As ponteiras cônicas com tecnologia wireless usam para transmissão do sinal os sistemas ótico ou sonoro. Há críticas em relação à qualidade do sistema de transmissão sonoro em profundidades (abaixo de 30 m) e nos solos característicos que provocam grande atrito das partículas juntamente ao cone e às hastes, que provocam intensidades de ruídos que prejudicam a captação adequada do sinal no ensaio. Em contrapartida existe o sistema com tecnologia de fibra ótica alojada no interior das hastes combinados com amplificadores de sinal que possibilitam a realização de ensaios profundos e não são prejudicados pelos ruídos. O sistema de transmissão dados sem fio conjugado ao armazenamento de dados no cartão de memória interno a ponteira tornou-se o mais popular, pois agiliza a realização dos serviços de campo sem redução de qualidade nos registros de medições, o fornecimento de energia do cone pode ser via fonte que situasse na superfície e cabo de condução ou com

a utilização de baterias e pilhas situadas no interior da cavidade da ponteira no qual se localiza a parte eletrônica.

Os registros de leituras do grupo de dados coletados pelo cone (q_c , f_s e u) segundo a IRTP/ISSMFE (1988a) é a cada 200mm, porém, na prática convencionou-se registros de 20mm a 50mm, por fornecer detalhamento mais amplos (Schnaid e Odebrecht 2012).

3.3.5. Descrição dos equipamentos e acessórios

3.3.5.1. Hastes

Fabricadas com aço de alta resistência, com diâmetro externo de 35,7mm, diâmetro interno de 16mm e comprimento de 1m. A massa de cada haste é aproximadamente de 6,65 kg. O material constituinte tem que possuir propriedades que aceite o tratamento térmico que agregue maior resistência, principalmente nas roscas. Ao passo que cones robustos requerem hastes com maior rigidez e que conseqüentemente possuam seção transversal maior.

Em conformidade com as recomendações da IRTP/ISSMFE, o alinhamento das hastes está limitado em 2 mm de empeno máximo em relação ao eixo. Doravante nas primeiras cinco hastes, este empeno não pode exceder 1 mm. O posicionamento das hastes do conjunto precisa ser mudado para impedir empenos permanentes.

3.3.5.2. Redutores de atrito

Situados na parte superior da ponteira, os redutores de atrito normalmente posicionados a distância acima que 0,5 m, são dispositivos voltados a reduzir o atrito do conjunto de hastes aumentando o diâmetro do furo em 25% para cones de 10 cm² e são considerados desnecessários para cones de 15cm² no tocante a utilização de hastes de 35,7 mm de diâmetro. No mercado estão disponíveis distintos redutores no tocante a geometria (Lunne; Robertson; Powell, 1997), as geometrias mais bem aceitas são as compostas por 4 (quatro) aletas ou a que

tem formato de anel, apresentados ilustrativamente na Figura 18, necessariamente devem ser fabricadas concêntricas ao centro de ponteira, impossibilitando assim excentricidade na execução do ensaio

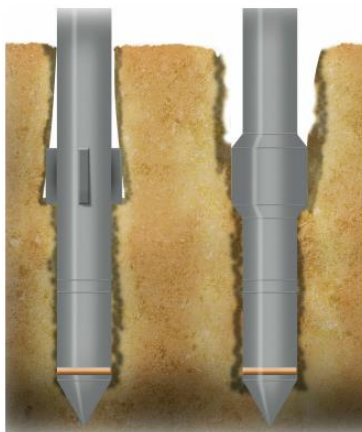


Figura 18 - Tipos mais comuns de redutores de atrito (Schnaid e Odebrecht 2012).

3.3.6. Equipamentos utilizados para cravação e sua respectiva escolhas na prática

Basicamente é uma estrutura de reação, dotada de um sistema auxiliar de aplicação de cargas vertical descendente, normalmente utiliza um sistema hidráulico de esforços por pistão, o sistema hidráulico é constituído de uma bomba hidráulica em conjunto com um motor a combustão ou elétrico. A execução do ensaio consiste na cravação contínua de uma haste de 1m de comprimento, seguida do recuo do pistão hidráulico para o acoplamento de uma nova haste. Estes mecanismos são habilitados para uso em terra (*onshore*) bem como em água (*nearshore* e *offshore*), toda via, como já assinalado pelo autor, não considera pertinente outras abordagens que sejam diferentes as de solos encontrados em depósitos sedimentares naturais predominantemente compostos por argila moles, logo este trabalho limita-se ao sistema em terra.

3.3.6.1. Sistemas em terra

Utiliza-se de distintos meios de imobilização e reação aos esforços para

prospecção do solo: sistemas onde as reações aos esforços dependem do peso próprio, que podem ser veículos pesados com capacidades variáveis entre 5t e 20t onde o sistema de propulsão é acoplado ao veículo, e sistemas com veículos especiais cujo sistema de propulsão provém de outro veículo. Há situações que a prospecção necessita de uma maior capacidade de reação aos esforços e utilizam veículos de 40t para solos com composição de areias densas e pedregulhos (Bratton, 2000 apud Mayne, 2007), em suma os esforços para a cravação depende do peso próprio do equipamento e/ou sistemas que utilizam trados de fixação ao solo de forma mecânica ou manual para a imobilização e reação aos esforços. Na Figura 19 é possível observar alguns exemplares de mecanismos de cravação praticados em terra. A seleção do conjunto mais apropriado para cada situação deve levar em consideração a condição superficial de tráfego no terreno e características do solo alvo do ensaio.

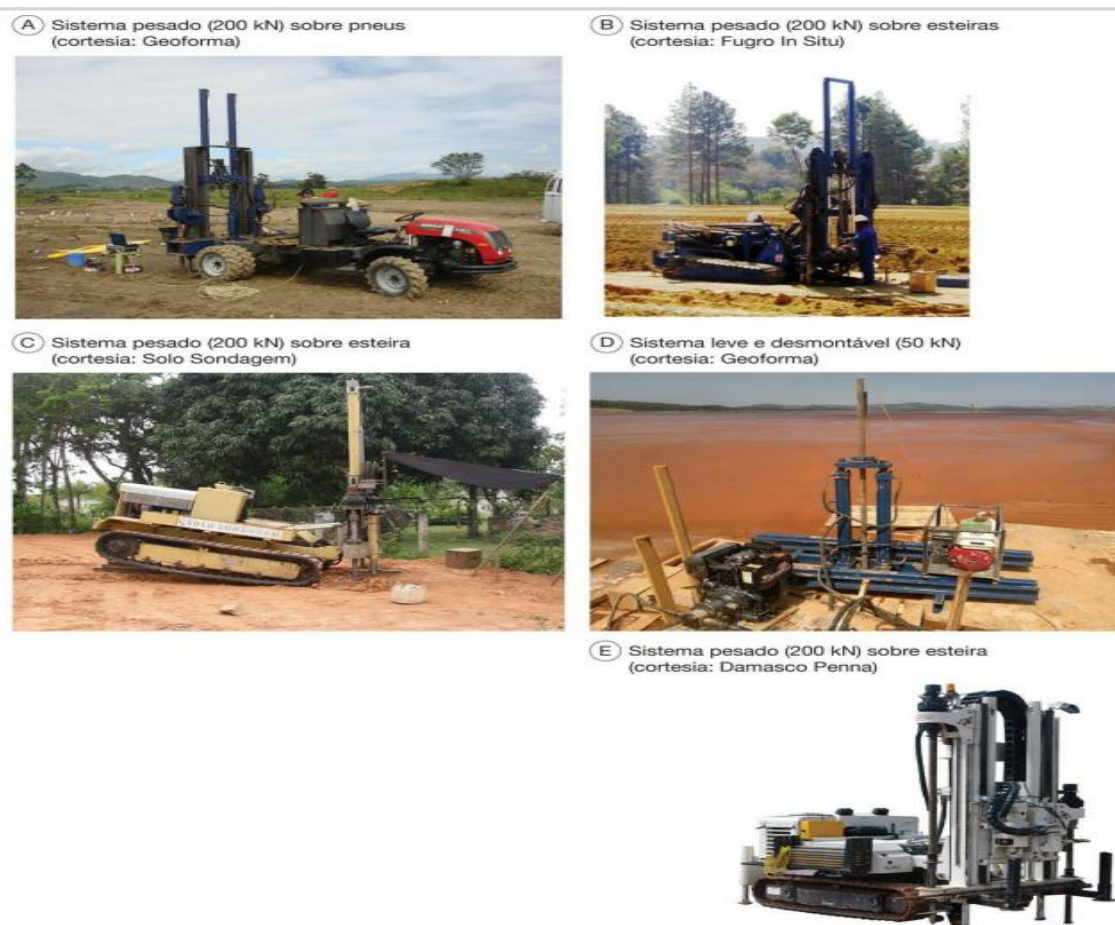


Figura 19 - Sistemas de cravação em operação no Brasil (Schnaid e Odebrecht 2012).

3.3.6.2. Características que definem a seleção do equipamento

Existe uma variedade de sistemas de cravação no mercado, de acordo com suas capacidades como já descrito anteriormente, na respectiva escolha deve-se levar em consideração as características aparentes de suporte de carga da superfície e condições de mobilidade do terreno, pois estas são as variáveis que devem ser confrontadas para definição do sistema apropriado para a determinada campanha de sondagem cone penetrométrica.

No tocante a seleção do conjunto de prospecção devem ser analisadas as condições de trafegabilidade do terreno, como solos muito acidentados, obstáculos e principalmente a resistência superficial do terreno, pois em solos muito moles tanto o peso do conjunto bem como a ancoragem do sistema de prospecção podem gerar inúmeros problemas e até inviabilizar a cravação, em contra partida, casos de sondagens profundas em solos com estratigrafia de distintas resistências pode ocasionar atrito das hastes prejudicando o avanço, exigindo técnicas de pré-furos em camadas resistentes e revestimento com tubos, dentre outras técnicas que sejam necessárias.

Na Figura 20 é possível observar um diagrama de influência interativa das distintas situações que irão definir a escolha do conjunto de prospecção adequado para a peculiaridade de cada umas das campanhas de sondagens cone penetrométricas.



Figura 20 - Esquema de interação na escolha do equipamento (Schnaid e Odebrecht 2012).

- Potencialidade do sistema hidráulico: definida pelas capacidades volumétricas dos cilindros hidráulicos, bem como, pela capacidade de pressão e vazão da bomba hidráulica que impulsiona o fluido hidráulico e que conseqüentemente impulsiona o pistão e pela potência do motor propulsor que realiza o acionamento da bomba do sistema hidráulico.
- Condições de mobilidade no local de ensaio: depende da capacidade de mobilidade do equipamento nas condições que o terreno apresenta, pelo somatório das massas dos componentes que compõe o equipamento de cravação e pelas aparentes propriedades mecânicas apresentada na superfície solo.
- Potencial de reação: determinada pelas características mecânicas que o terreno apresenta, pode ser definida: pelo sistema de fixação que imobiliza o equipamento “ancoragem” integrados ao mecanismo; ou pela massa total do mecanismo de cravação; e/ou pela massa total do equipamento em combinação com a ancoragem.
- Potencial de cravação: determinada pelo aspecto que o solo apresenta, pela presença de solos muito ou poucos resistentes na superfície do terreno, granulometrias muito ou pouco graduadas, matacões, dentre outros elementos observáveis.

É notório que inexistente uma regra padrão para definir e individualizar um sistema suficiente para cada campanha de ensaio de campo. Essa escolha precisa ser realizada por um especialista, capaz de conduzir e integrar os elementos acima descritos, analisar a viabilidade do projeto de investigação e listar as condições de execução com base nos custos associados ao projeto.

3.4. Apresentação dos resultados de ensaios cone penetrométricos

A seguir serão apresentados alguns resultados de ensaios

conepenetrométricos, com o intuito de mostrar o formato habitual em que os resultados se apresentam e as interpretações das informações provenientes do ensaio.

Os registros das medidas de resistência de ponta q_c e o atrito lateral f_s , podem ser obtidos no CPT e em sua evolução CPTu, sendo a razão de atrito obtida da relação matemática $R_f = f_s / q_c$ o primeiro parâmetro derivado do ensaio conepenetrométrico, metodologicamente empregado como forma de classificação dos solos.

O registro de poro-pressão u gerada no processo de cravação ao longo da penetração, é um incremento de medição que impulsionou a evolução do CPT para o CPTu, incremento este que somente passou a ser possível a partir do elemento filtrante, cuja posição deste componente pode variar de acordo com a aplicação pretendida desta poro-pressão em um dado projeto, podendo a posição na ponteira cônica ser na ponta u_1 , base u_2 ou luva u_3 , que já foi apresentado na Figura 16, porem como já assinalado a posição u_2 é a mais usual.

Especificamente em solos de comportamento não drenados, este excesso de poro-pressão provoca significativa alteração nos registros das resistências a cravação, este fenômeno de poro-pressão gerada no instante da cravação causa resistências em áreas distintas do cone como apresentado na Figura 21, onde com conhecimento das poro-pressões atuando na base do cone u_2 é possível estimar q_t resistência real mobilizada utilizando a equação (18), que é a correção de q_c eliminando a influência do excesso de poro-pressão u gerada no processo de cravação (Campanella; Gillespie; Robertson, 1982; Jamiolkowski et al., 1985):

$$q_t = q_c + (1 - a) \cdot u_2 \quad (18)$$

Em que $a = A_N / A_T$, e o coeficiente a pode ser determinado por meio de

calibração, conforme ilustrado na Figura 21.

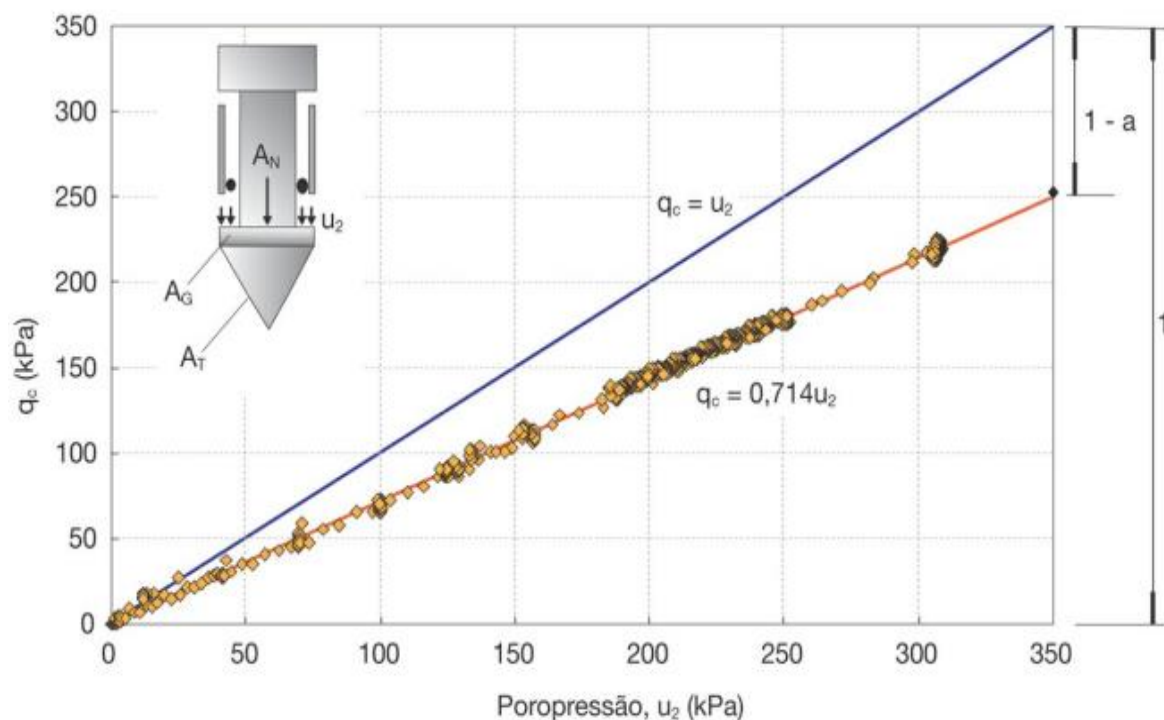


Figura 21 – Correções imposta as medidas de ensaio de piezocone (Schnaid e Odebrecht 2012).

O atrito lateral f_s também pode corrigido, de forma similar a feita em q_c , utilizando a equação (19):

$$f_t = f_s - \frac{u_2 A_{sb}}{A_l} + \frac{u_3 A_{st}}{A_l} \quad (19)$$

sendo f_t o atrito lateral corrigido, também pela eliminação do excesso de poropressão gerada na cravação, onde A_{sb} é área da base, A_{st} é área e topo da luva de atrito e A_l é a área lateral da luva de atrito.

Correções de resistência de ponta nos ensaios de CPTu, tem fundamental importância, pois excesso de poro-pressão gerado pela cravação do piezocone interferem na sensibilidade de obtenção da resistência de ponta,

especificamente para a definição de propriedades em argilas moles.

Correção do atrito lateral nos ensaios de CPTu, não é usual na execução de projetos pela Engenharia Civil, em razão de u_3 ser infreqüentemente medido (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Com o advento de ensaio coneptrométrico CPTu, a partir do incremento das medições de poro-pressão geradas na cravação, mais um parâmetro de classificação do solo B_q passou a ser possível:

$$B_q = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_{v_0})} \quad (20)$$

no qual u_0 são as pressões hidrostáticas; e σ_{v_0} é a tensão vertical in situ.

O contínuo registro de resistências durante da penetração, confrontadas com as sensibilidades visualizadas no monitoramento das poro-pressões, propiciam o reconhecimento detalhado de camadas de solos de comportamento drenado com pequenas espessuras.

Um exemplar padrão de um perfil de piezocone pode ser observado na Figura 22, onde as medições contínuas de q_t , R_f , u_0 , u e B_q são plotadas durante a cravação. Nota-se, com nitidez, que existe, uma camada de argila mole de quase 15 m de espessura, identificada por baixos valores de q_t e leituras significativas de excesso de poro-pressões ($u \sim q_t$ e $B_q \sim 1$). A identificação de uma lente de areia de pequena espessura à profundidade de 5,5 m é constatada pelo aumento momentâneo de q_t e $\Delta u = 0$ (Schnaid e Odebrecht, 2012).

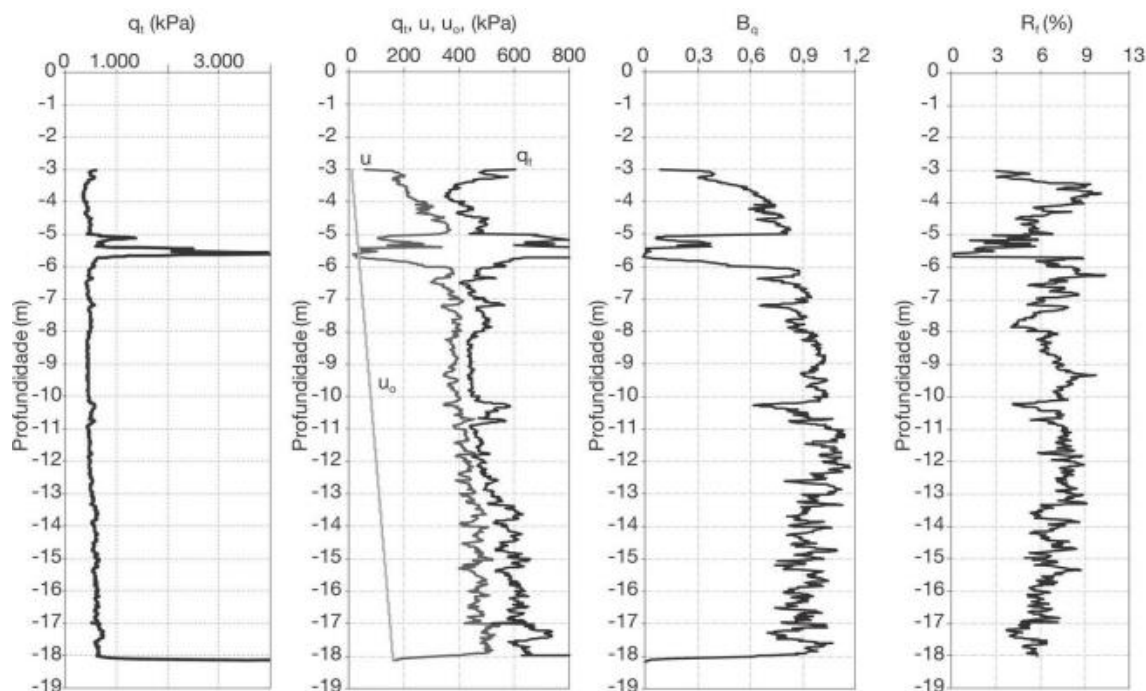


Figura 22 - Resultado do ensaio de piezocone na BR 101, em Santa Catarina (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Diversos autores deixaram significativas contribuições em torno das classificações dos solos por comportamentos e correlações semi-empíricas, porém o autor desta investigação considera não ser relevante no escopo deste trabalho, detalhar outros tipos de solos, uma vez que esta investigação tem como foco os depósitos sedimentares predominantemente compostos por argilas moles, cujas principais características são as elevadas taxas de compressibilidade e baixas resistências ao cisalhamento.

Igualmente irrelevante nesta investigação seria detalhar a obtenção de outros parâmetros, além dos já até aqui apresentados.

Em suma, o ensaio CPTu foi escolhido por sua potencial aplicabilidade nas análises R/S, em que os perfis de resistências de ponta q_c , atrito lateral f_s e poro-pressões u , gerados no processo de cravação, permitem investigar, à luz do expoente de Hurst, a possibilidade de correlações destas propriedades com a profundidade nas investigação dos depósitos sedimentares, o que será objeto de análise e apresentado no Capítulo 4 a seguir.

4. ANÁLISE R/S E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo é dedicado à investigação de alguns depósitos sedimentares do estado do Rio de Janeiro, predominantemente compostos por argilas moles. Mais especificamente, tem por finalidade investigar a presença de correlações das propriedades de resistência de ponta, atrito lateral e poro-pressão em função da profundidade do depósito sedimentar. Principalmente, trata-se de responder à indagação de se os registros destas propriedades apresentam aleatoriedade pura e simplesmente ou, por outro lado, se sugerem a presença de correlações entre seus sinais, tomados ao longo da profundidade.

A investigação de eventuais correlações de propriedades de resistência não drenada e deformabilidade com a profundidade em depósitos argilosos moles saturados constitui vasta literatura técnica. O Leitor, interessado neste importante tópico de pesquisa, deverá consultar, para maiores detalhes concernentes a depósitos argilosos nacionais, Baroni (2016), Macedo (2004) e Coutinho et al (2014), dentre outros.

Ensaio CPTu de sondagens realizadas no estado do Rio de Janeiro, mais precisamente nos bairros de Santa Cruz e Recreio dos Bandeirantes na cidade do Rio de Janeiro e no bairro do Sarapuí no município de Duque de Caxias serão apresentados no item 4.1.

O item 4.2 mostra os resultados das análises R/S realizadas nos ensaios CPTu dos locais já assinalados, bem como suas interpretações.

4.1. Apresentação dos ensaios de campo CPTu realizados no estado do Rio de Janeiro.

As Figuras 23 a 35 apresentam os resultados das sondagens cone penetrométricas com medição de poro-pressão das 3 (três) regiões já aludidas do estado do Rio de Janeiro: bairro de Santa Cruz e Recreio dos Bandeirantes na cidade do Rio de Janeiro e bairro do Sarapuí no município de Duque de Caxias.

Assim, as Figuras 23 a 28 apresentam os resultados relativos ao bairro de Santa Cruz na cidade do Rio de Janeiro; a Figura 29 mostra os resultados do bairro do Recreio dos Bandeirantes na cidade do Rio de Janeiro; e finalmente, as Figuras 30 a 35 apresentam os resultados relativos ao bairro do Sarapuí no município de Duque de Caxias.

Infelizmente, não houve como ter acesso aos dados de caracterização e resistência não-drenada/deformabilidade de tais argilas com a profundidade dos depósitos, muito embora inúmeras pesquisas, tanto de mestrado, quanto de doutorado, tenham sido realizadas exatamente nestes materiais argilosos (p/ex., Coutinho, 1986).

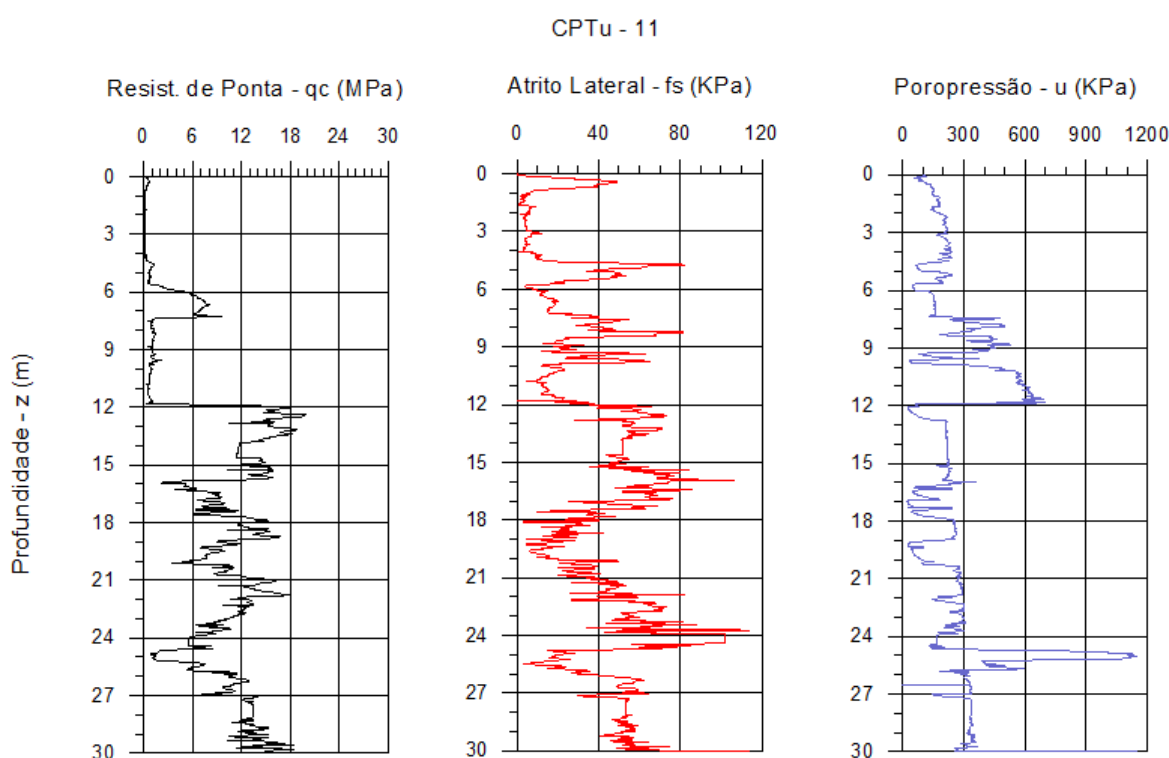


Figura 23 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu-11), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro.

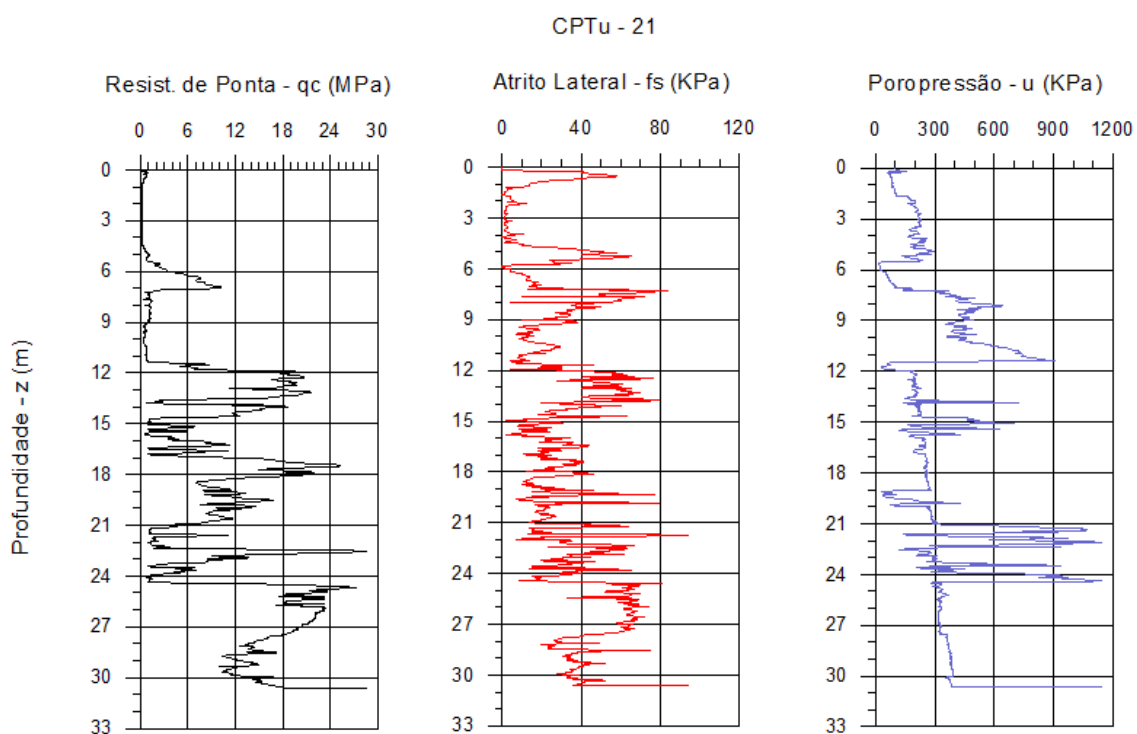


Figura 24 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 21), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro.

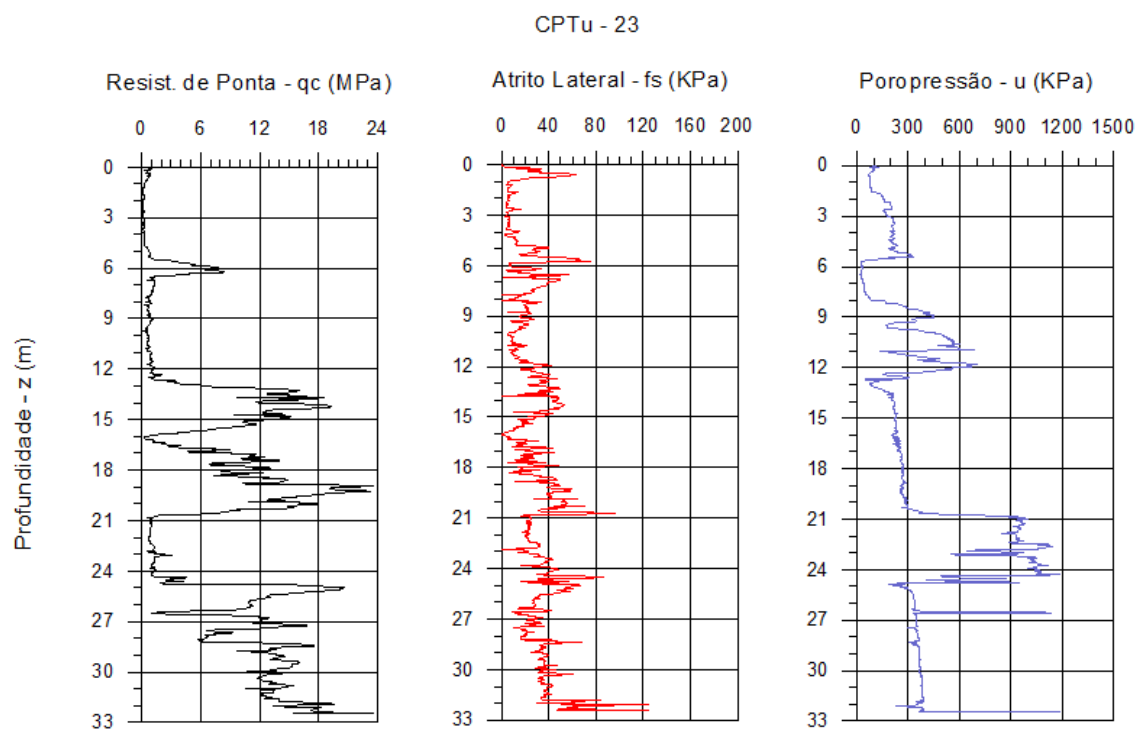


Figura 25 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 23), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro.

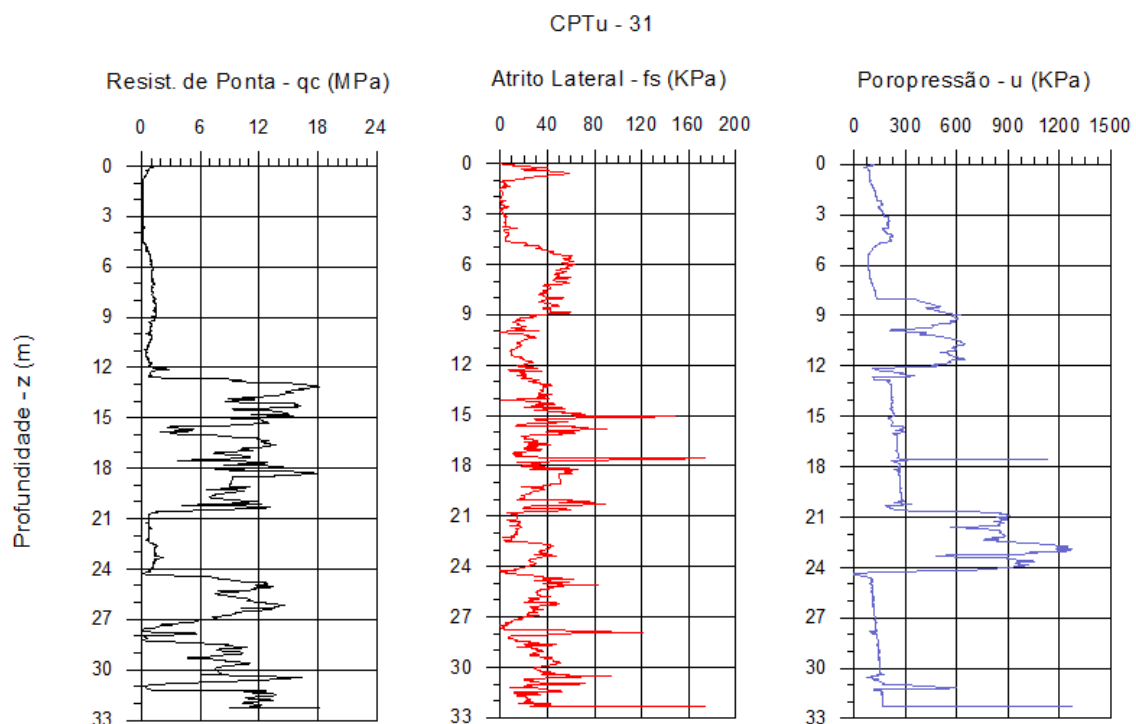


Figura 26 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 31), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro.

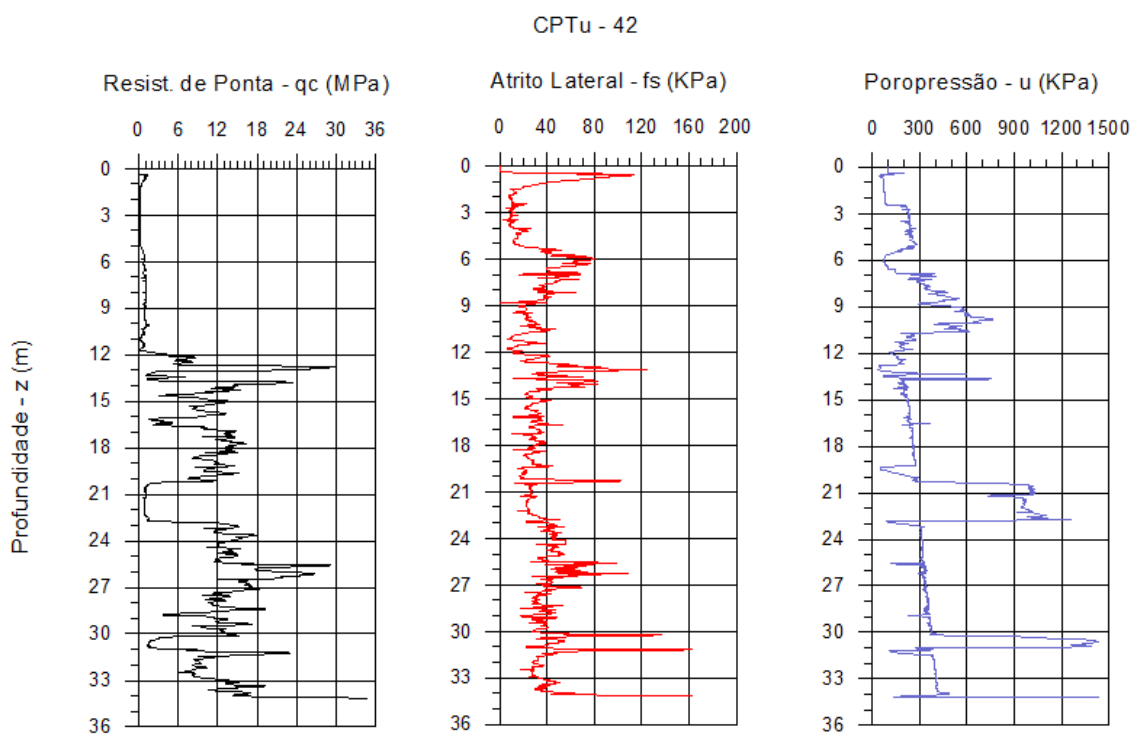


Figura 27 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 42), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro.

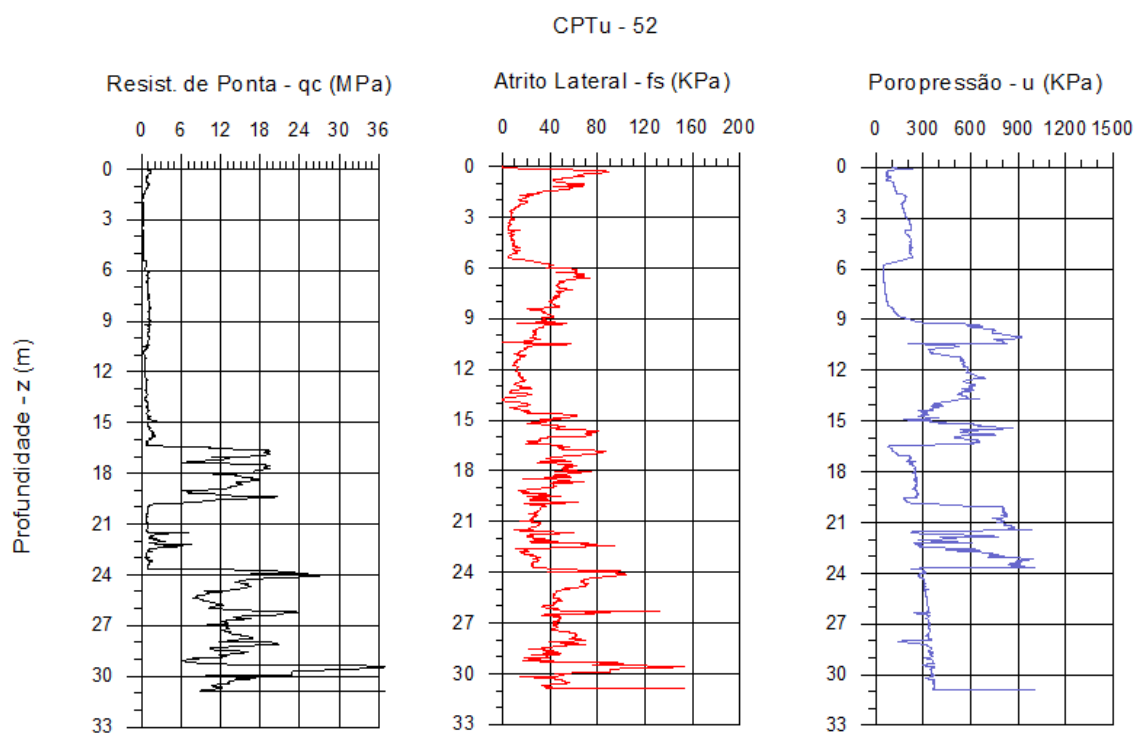


Figura 28 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 52), no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro.

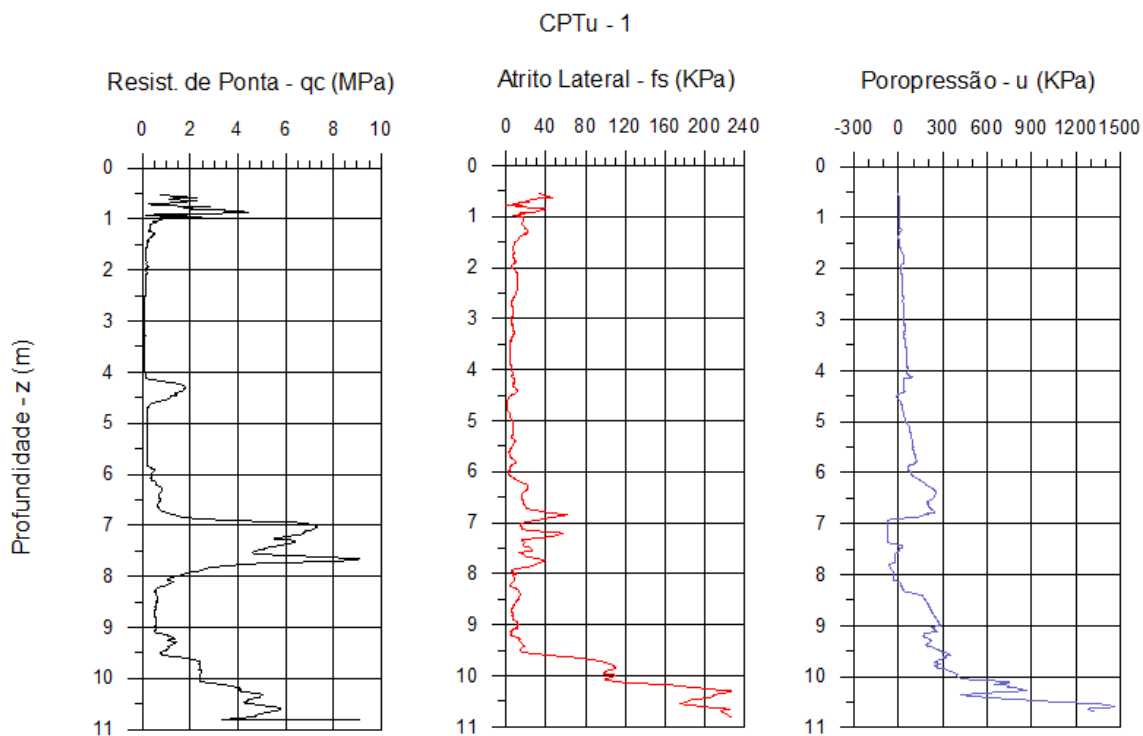


Figura 29 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 1), no bairro do Recreio dos Bandeirantes, cidade do Rio de Janeiro.

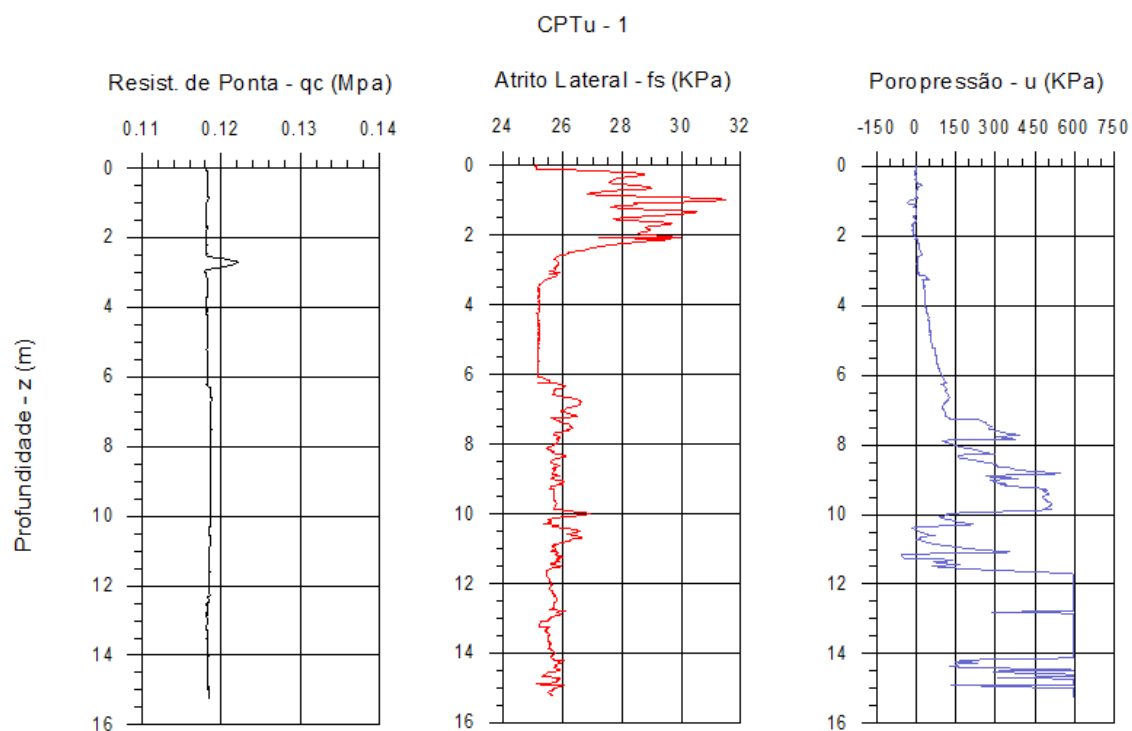


Figura 30 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 1), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias.

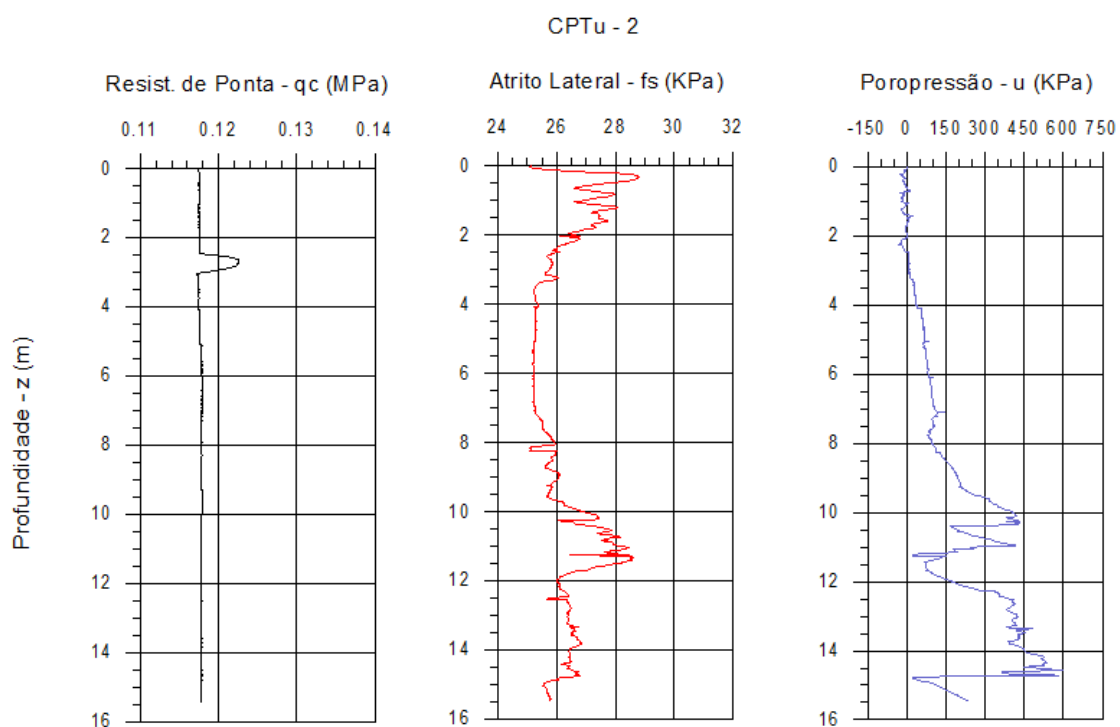


Figura 31 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 2), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias.

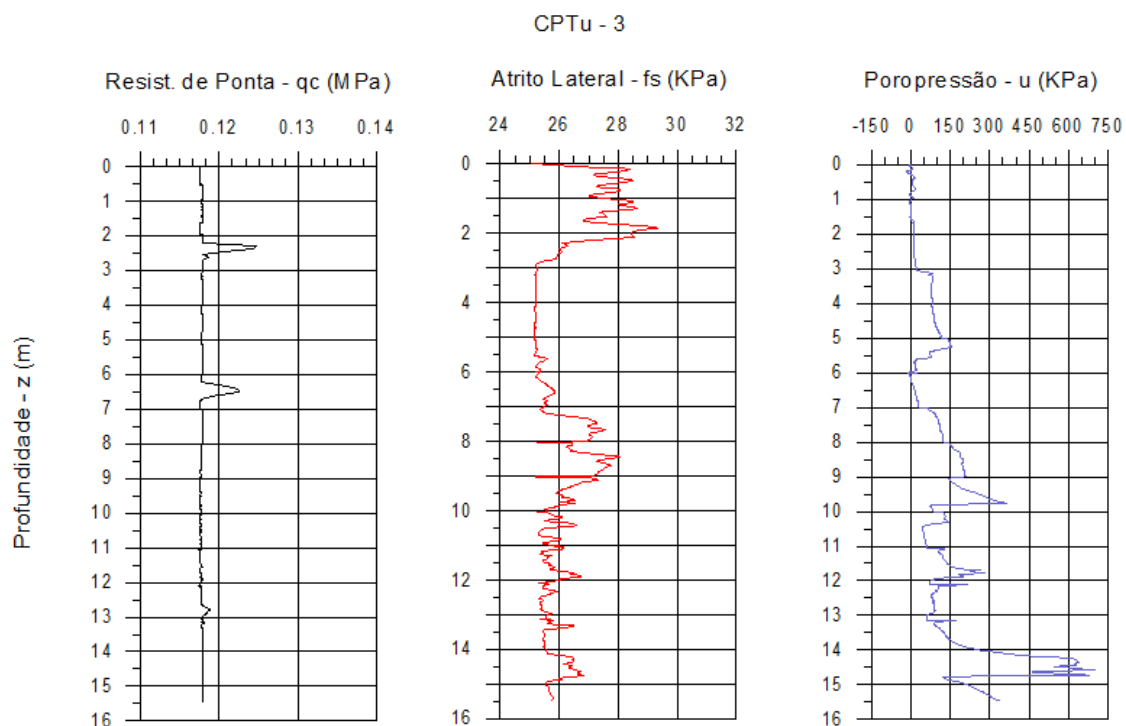


Figura 32 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 3), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias.

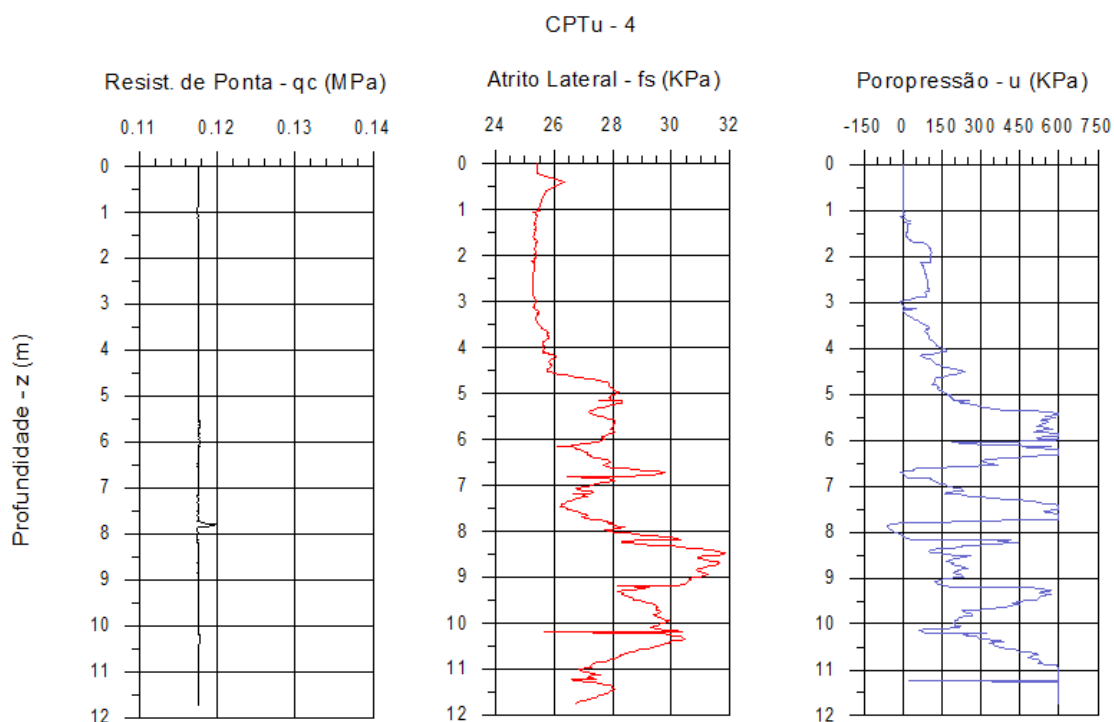


Figura 33 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 4), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias.

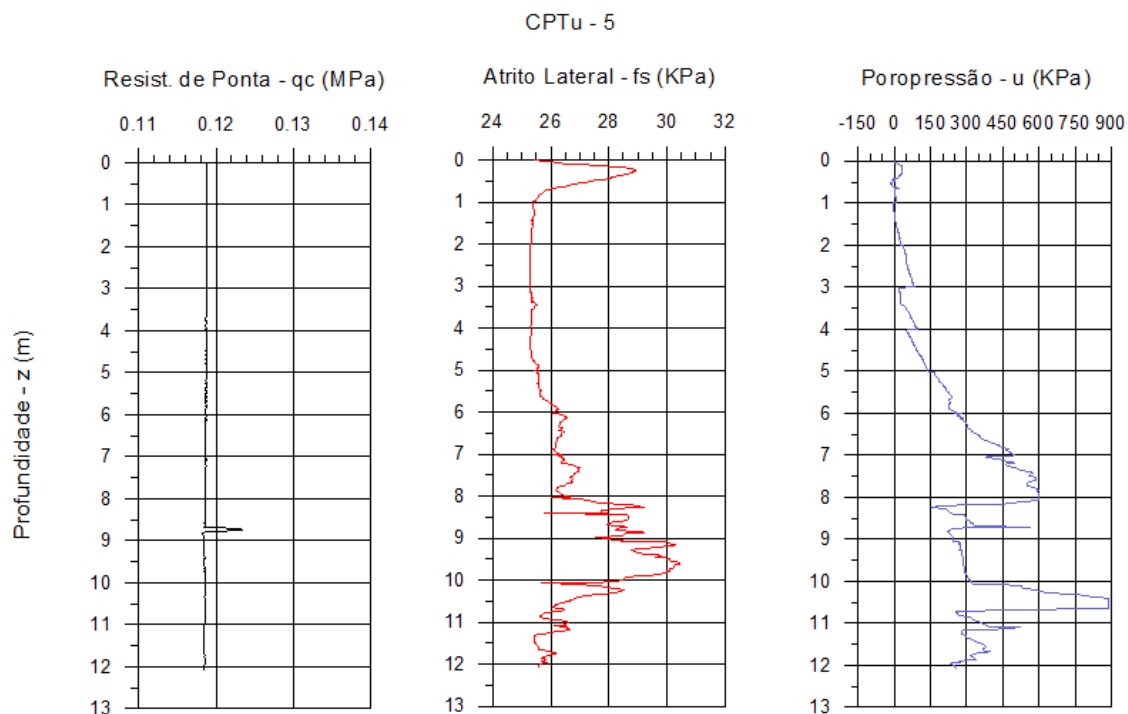


Figura 34 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 5), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias.

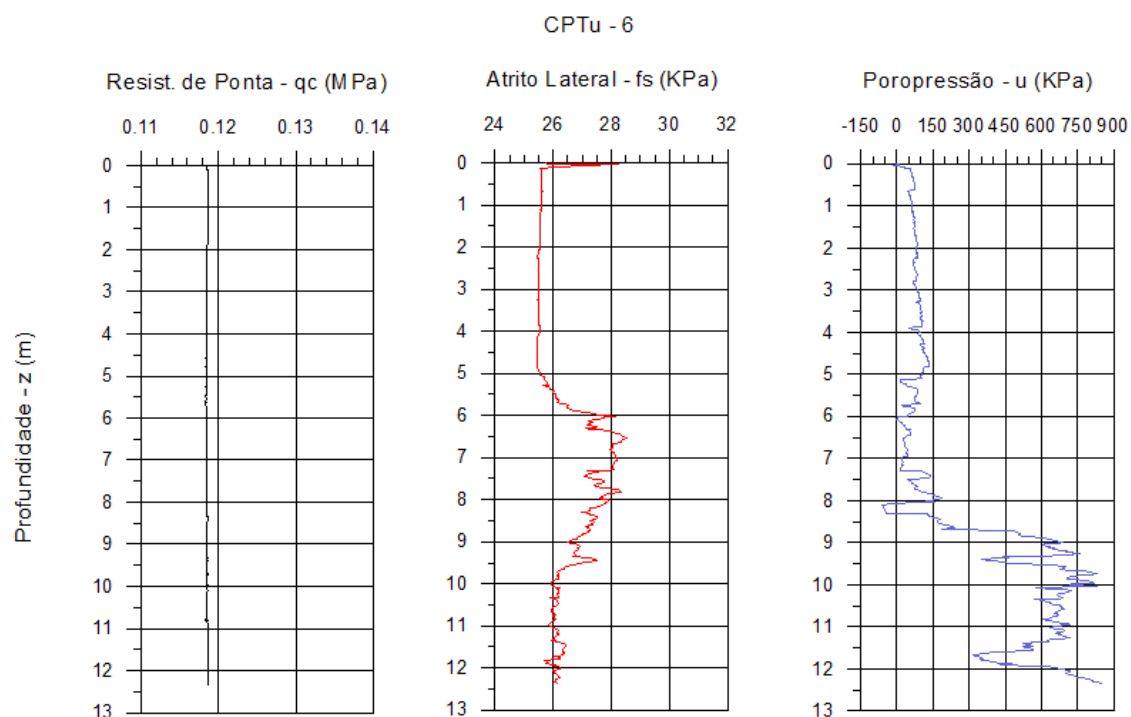


Figura 35 – Ensaio CPTu em depósito de argila mole (CPTu - 6), no bairro do Sarapuí, município de Duque de Caxias.

4.2. Resultado das análises R/S e interpretação dos resultados

4.2.1 Análise R/S dos ensaios CPTu, no bairro de Santa Cruz, cidade do Rio Janeiro.

4.2.1.1. Análise R/S do ensaio CPTu-11.

As Figuras 36, 37 e 38 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerada no processo de cravação, respectivamente.

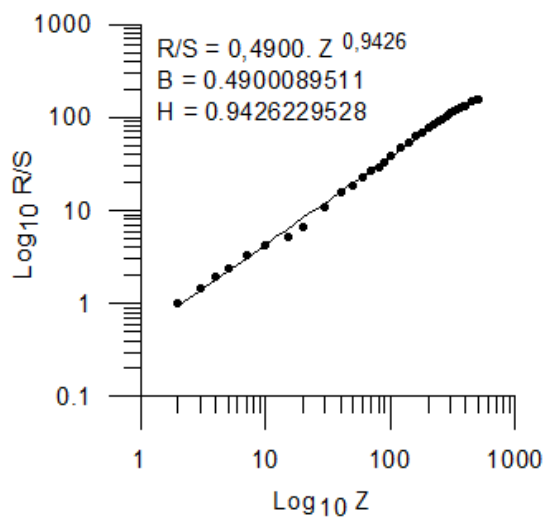


Figura 36 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-11 da (Figura 23).

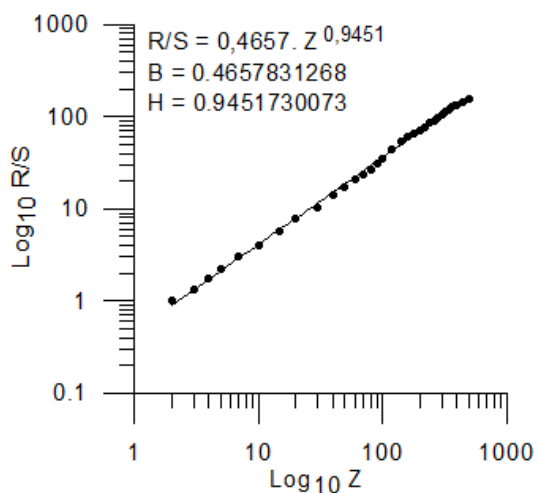


Figura 37- Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-11 da (Figura 23).

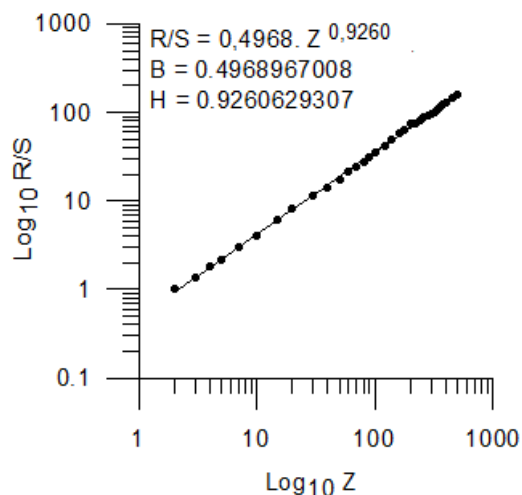


Figura 38 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-11 da (Figura 23).

Nota-se o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, desta feita em escala bilogarítmica, dado pelos valores dos coeficientes de ajuste de 0,9988; 0,9996 e 0,9997, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada no processo de cravação, respectivamente.

Assim, a expressão 16, aplicada a estes dados experimentais, forneceu os seguintes resultados para q_c , f_s e u (doravante, as resistências de ponta, de atrito lateral e poro-pressão serão assinaladas junto aos resultados das análises pelas respectivas subscrições q_c , f_s e u):

$$R/S_{q_c} = 0,4900 \cdot z^{0,9426} \quad (21)$$

$$R/S_{f_s} = 0,4657 \cdot z^{0,9451} \quad (22)$$

$$R/S_u = 0,4968 \cdot z^{0,9260} \quad (23)$$

como se pode observar, os expoentes de Hurst aqui obtidos $H_{q_c} = 0,9426$, $H_{f_s} = 0,9451$ e $H_u = 0,9260$, estão compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, os dados experimentais apresentando, por conseguinte, comportamentos persistentes e positivamente correlacionados.

Assim como, a expressão 17, aplicada aos expoentes H obtidos, fornece os graus de correlação dados pelas expressões (24), (25) e (26):

$$C_{q_c} = 2^{2 \cdot 0,9426 - 1} - 1 = 0,8470 \text{ ou } 84,70\% \quad (24)$$

$$C_{f_s} = 2^{2 \cdot 0,9451 - 1} - 1 = 0,8534 \text{ ou } 85,34\% \quad (25)$$

$$C_u = 2^{2 \cdot 0,9260 - 1} - 1 = 0,8050 \text{ ou } 80,50\% \quad (26)$$

todos próximos de 100%, o que configura uma forte correlação com a profundidade, corroborando as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.1.2. Análise R/S do ensaio CPTu-21.

As Figuras 39, 40 e 41 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerada no processo de cravação, respectivamente.

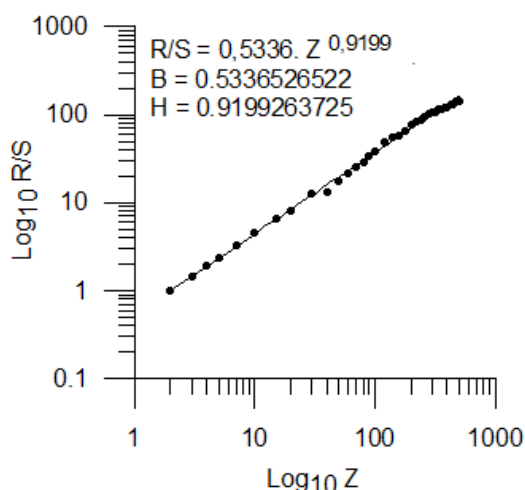


Figura 39 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-21 da (Figura 24).

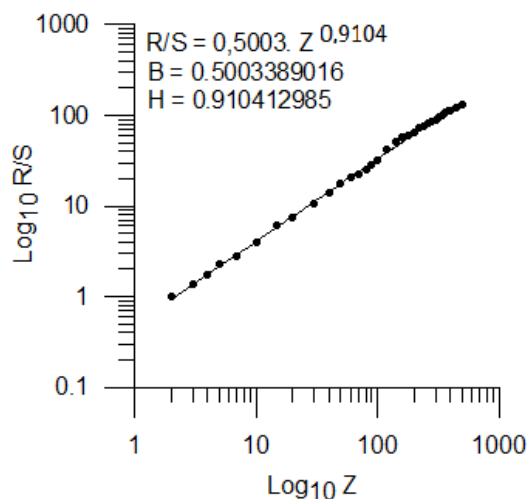


Figura 40 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-21 da (Figura 24).

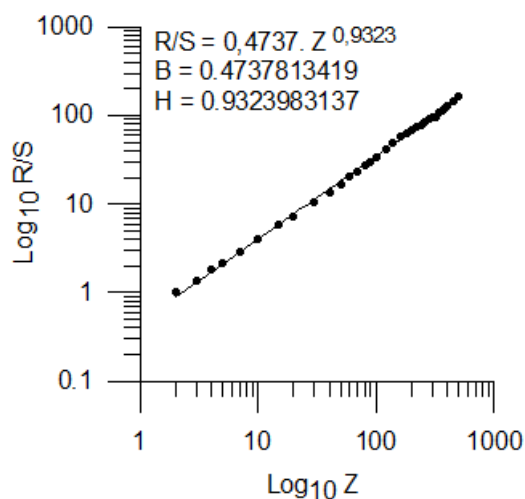


Figura 41 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-21 da (Figura 24).

Nota-se o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, desta feita em escala bilogarítmica, dado pelos valores dos coeficientes de ajuste de 0.9989; 0.9932 e 0.9994, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada no processo de cravação, respectivamente.

Assim, a expressão 16, aplicada a estes dados experimentais, forneceu os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{qc} = 0,5336 \cdot z^{0,9199} \quad (27)$$

$$R/S_{fs} = 0,5003 \cdot z^{0,9104} \quad (28)$$

$$R/S_u = 0,4737 \cdot z^{0,9323} \quad (29)$$

como se pode observar, os expoentes de Hurst aqui obtidos $H_{qc} = 0.9199$, $H_{fs} = 0.9104$ e $H_u = 0,9323$, estão compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, os dados experimentais apresentando, por conseguinte, comportamentos persistentes e positivamente correlacionados.

Os graus ou intensidades de correlação fornecidos pela expressão (17) são dados pelas expressões (30), (31) e (32):

$$C_{qc} = 2^{2 \cdot 0,9199 - 1} - 1 = 0,7898 \text{ ou } 78,98\% \quad (30)$$

$$C_{fs} = 2^{2 \cdot 0,9104 - 1} - 1 = 0,7663 \text{ ou } 76,63\% \quad (31)$$

$$C_u = 2^{2 \cdot 0,9323 - 1} - 1 = 0,8208 \text{ ou } 82,08\% \quad (32)$$

todos, novamente, próximos de 100%, o que sugere uma forte correlação com a profundidade, confirmando, mais uma vez, as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.1.3. Análise R/S do ensaio CPTu-23.

As Figuras 42, 43 e 44 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerados no processo de cravação, respectivamente.

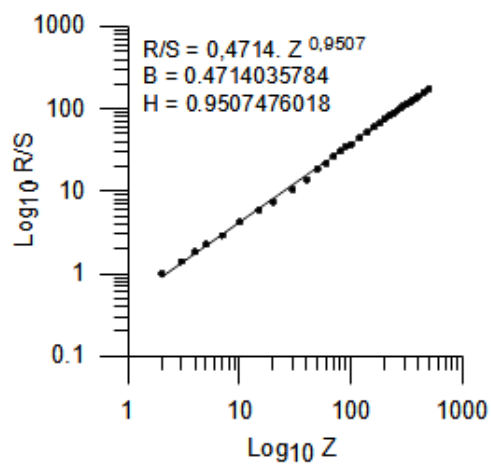


Figura 42 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-23 da (Figura 25).

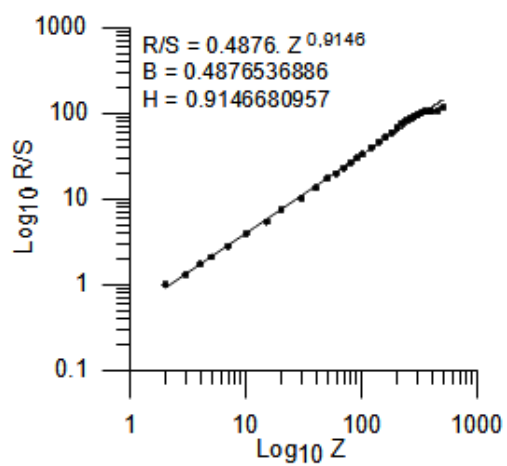


Figura 43 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-23 da (Figura 25).

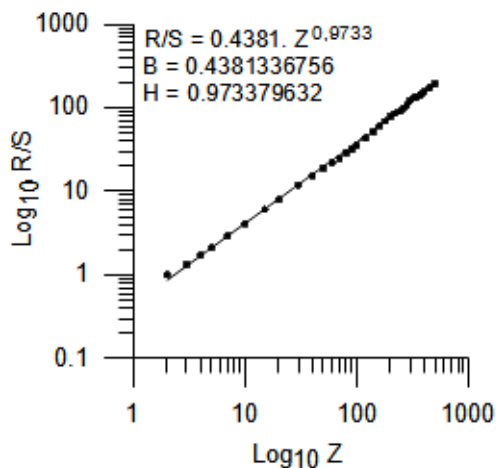


Figura 44 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-23 da (Figura 25)

Observa-se, novamente, o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogarítmica, dado pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9995; 0.9986 e 0.9993, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada no processo de cravação, respectivamente.

Assim, a expressão 16, aplicada a estes dados experimentais, forneceu os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{q_c} = 0,4714 \cdot z^{0,9507} \quad (33)$$

$$R/S_{f_s} = 0,4876 \cdot z^{0,9146} \quad (34)$$

$$R/S_u = 0,4381 \cdot z^{0,9733} \quad (35)$$

todos os valores dos expoentes de Hurst obtidos $H_{q_c} = 0.9507$, $H_{f_s} = 0.9146$ e $H_u = 0,9733$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, denotando comportamentos persistentes e positivamente correlacionados.

As intensidades de correlação segundo a expressão (17) são dadas pelas expressões (36), (37) e (38):

$$C_{q_c} = 2^{2*0,9507-1} - 1 = 0,8678 \text{ ou } 86,78\% \quad (36)$$

$$C_{f_s} = 2^{2*0,9146-1} - 1 = 0,7766 \text{ ou } 77,66\% \quad (37)$$

$$C_u = 2^{2*0,9733-1} - 1 = 0,9273 \text{ ou } 92,73\% \quad (38)$$

novamente, próximas de 100%, o que sugere uma forte correlação com a profundidade, confirmando, mais uma vez, as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.1.4. Análise R/S do ensaio CPTu-31.

As Figuras 45, 46 e 47 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerados no processo de cravação, respectivamente.

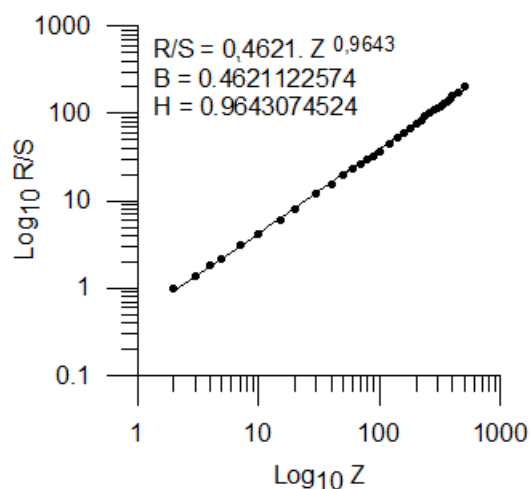


Figura 45 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-31 da (Figura 26).

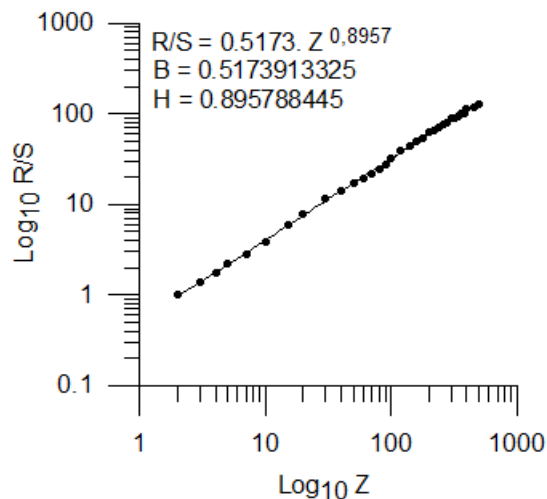


Figura 46 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-31 da (Figura 26).

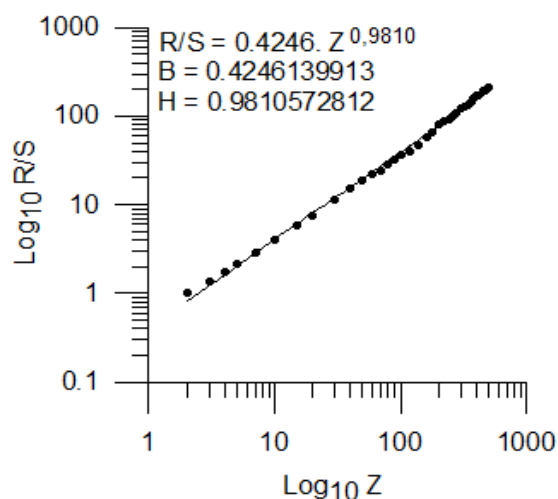


Figura 47 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-31 da (Figura 26).

Observa-se, novamente, o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogarítmica, dado pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9995; 0.9964 e 0.9996, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada no processo de cravação, respectivamente.

A aplicação da expressão 16 aos dados experimentais forneceu os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{qc} = 0,4621 \cdot z^{0,9643} \quad (39)$$

$$R/S_{fs} = 0,5173 \cdot z^{0,8957} \quad (40)$$

$$R/S_u = 0,4246 \cdot z^{0,9810} \quad (41)$$

todos os valores dos expoentes de Hurst obtidos $H_{qc} = 0.9643$, $H_{fs} = 0.8957$ e $H_u = 0,9810$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, sugerindo comportamentos persistentes e positivamente correlacionados dos dados experimentais.

A expressão (17) aplicada, fornece os graus de correlação dados pelas expressões (42), (43) e (44):

$$C_{qc} = 2^{2 \cdot 0,9643 - 1} - 1 = 0,9034 \text{ ou } 90,34\% \quad (42)$$

$$C_{fs} = 2^{2 \cdot 0,8957 - 1} - 1 = 0,7307 \text{ ou } 73,07\% \quad (43)$$

$$C_u = 2^{2 \cdot 0,9810 - 1} - 1 = 0,9480 \text{ ou } 94,80\% \quad (44)$$

próximos de 100%, o que sugere uma forte correlação com a profundidade, confirmando, mais uma vez, as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.1.5. Análise R/S do ensaio CPTu-42.

As Figuras 48, 49 e 50 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerados no processo de cravação, respectivamente.

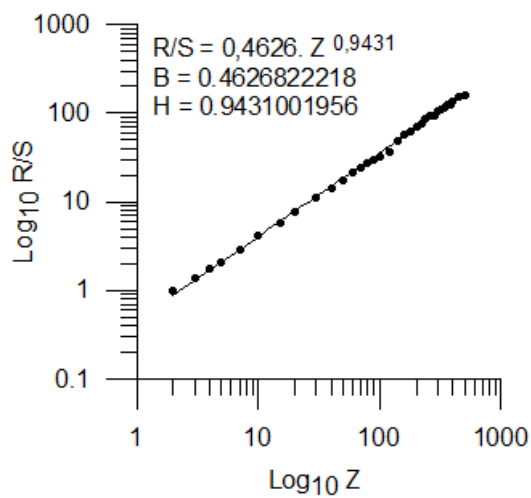


Figura 48 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-42 da (Figura 27).

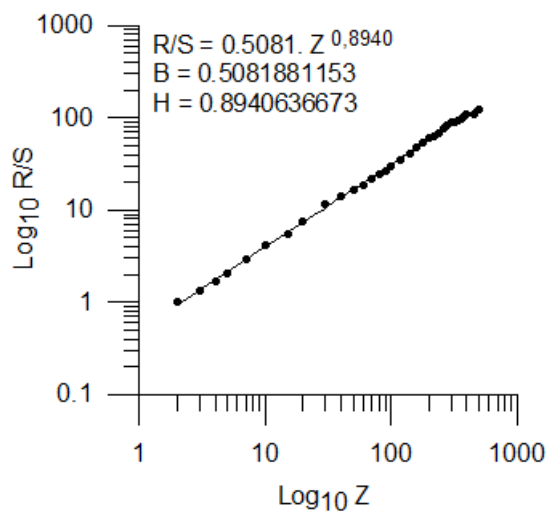


Figura 49 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-42 da (Figura 27).

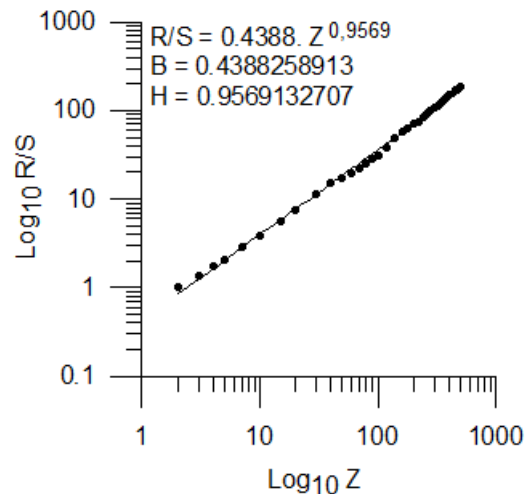


Figura 50 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-42 da (Figura 27).

Pode-se observar, novamente, o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogarítmica, dado pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9994; 0.9995 e 0.9998, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada no processo de cravação, respectivamente.

A aplicação da expressão 16 aos dados experimentais fornece os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{q_c} = 0,4626 \cdot z^{0,9431} \quad (45)$$

$$R/S_{f_s} = 0,5081 \cdot z^{0,8940} \quad (46)$$

$$R/S_u = 0,4388 \cdot z^{0,9569} \quad (47)$$

estando os valores dos expoentes de Hurst $H_{q_c} = 0.9431$, $H_{f_s} = 0.8940$ e $H_u = 0,9569$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, sugerindo

comportamentos persistentes e positivamente correlacionados dos dados experimentais.

Os graus de correlação segundo a expressão (17) são dados pelas expressões (48), (49) e (50):

$$C_{q_c} = 2^{2 \cdot 0,9431 - 1} - 1 = 0,8483 \text{ ou } 84,83\% \quad (48)$$

$$C_{f_s} = 2^{2 \cdot 0,8940 - 1} - 1 = 0,7266 \text{ ou } 72,66\% \quad (49)$$

$$C_u = 2^{2 \cdot 0,9569 - 1} - 1 = 0,8840 \text{ ou } 88,40\% \quad (50)$$

próximos de 100%, o que sugere uma forte correlação com a profundidade, confirmando as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.1.6. Análise R/S do ensaio CPTu-52.

As Figuras 51, 52 e 53 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerados no processo de cravação, respectivamente.

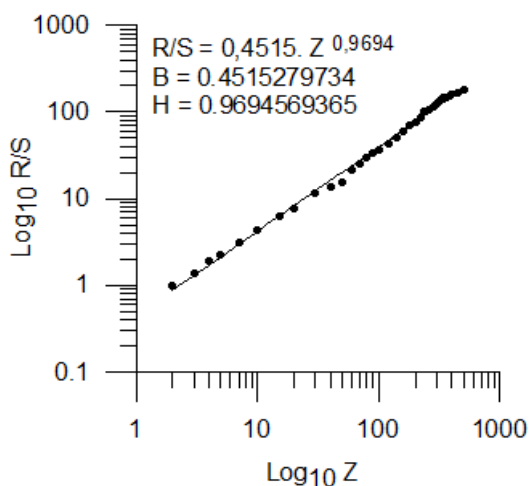


Figura 51 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-52 da (Figura 28).

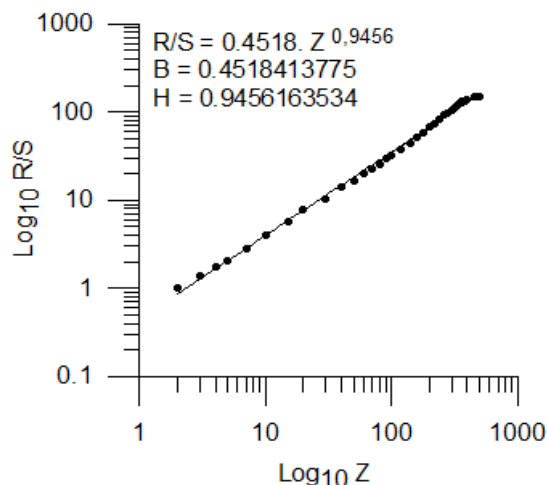


Figura 52- Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-52 da (Figura 28).

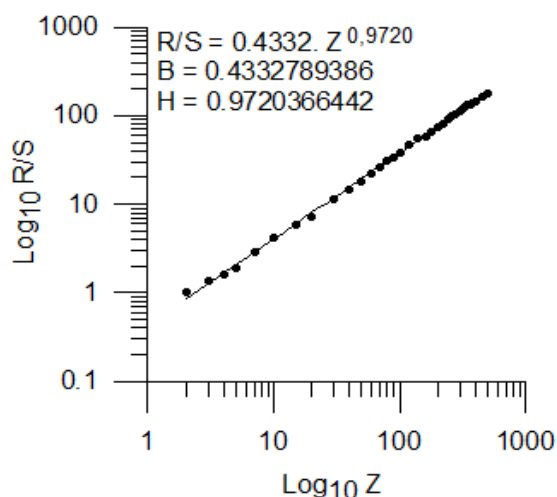


Figura 53 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação- CPTu-52 da (Figura 28).

Como das vezes anteriores, pode-se observar o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogarítmica, dado pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9984; 0.9988 e 0.9995, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada no processo de cravação, respectivamente.

A expressão 16, aplicada aos dados experimentais, fornece os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{qc} = 0,4515 \cdot z^{0,9694} \quad (51)$$

$$R/S_{fs} = 0,4518 \cdot z^{0,9456} \quad (52)$$

$$R/S_u = 0,4332 \cdot z^{0,9720} \quad (53)$$

estando os valores dos expoentes de Hurst $H_{qc} = 0.9694$, $H_{fs} = 0.9456$ e $H_u = 0,9720$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, o que sugere comportamentos persistentes e positivamente correlacionados dos dados experimentais.

Os graus de correlação em conformidade com a expressão (17) são dados pelas expressões (54), (55) e (56):

$$C_{qc} = 2^{2 \cdot 0,9694 - 1} - 1 = 0,9169 \text{ ou } 91,69\% \quad (54)$$

$$C_{fs} = 2^{2 \cdot 0,9456 - 1} - 1 = 0,8547 \text{ ou } 85,47\% \quad (55)$$

$$C_u = 2^{2 \cdot 0,9720 - 1} - 1 = 0,9238 \text{ ou } 92,38\% \quad (56)$$

próximos de 100%, o que sugere uma forte correlação com a profundidade, confirmando as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.1.7. Resumo dos resultados das análises R/S dos ensaios CPTu do bairro de Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro.

As Tabelas 3 e 4 apresentam um resumo dos resultados das análises R/S em função dos expoentes de Hurst e dos graus de correlação, respectivamente, para as resistências de ponta, de atrito lateral e poro-pressões gerada na cravação.

Tabela 3 – Expoentes de Hurst fornecidos pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados em Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro.

Expoentes de Hurst dos ensaios CPTu – em Santa Cruz, Rio de Janeiro-RJ.						
Exp. Hurst	CPTu 11	CPTu 21	CPTu 23	CPTu 31	CPTu 42	CPTu 52
H _q	0,9426	0,9199	0,9507	0,9643	0,9431	0,9694
H _f	0,9451	0,9104	0,9146	0,8957	0,8940	0,9456
H _u	0,9260	0,9323	0,9733	0,9810	0,9569	0,9720

Tabela 4 – Intensidades de correlação fornecidas pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados em Santa Cruz, cidade do Rio de Janeiro.

Intensidades de correlação dos ensaios CPTu – em Santa Cruz, Rio de Janeiro-RJ.						
Correlação	CPTu 11	CPTu 21	CPTu 23	CPTu 31	CPTu 42	CPTu 52
C _q	84,70%	78,98%	86,78%	90,34%	84,83%	91,69%
C _f	85,30%	76,63%	77,66%	73,07%	72,66%	85,47%
C _u	80,50%	82,08%	92,73%	94,80%	88,40%	92,38%

Observa-se que todos os expoentes de Hurst apresentam $H > 0,5$ e muito próximos de 1, o que indica fortemente que os registros dos ensaios possuem correlação persistente e em grande escala, invalidando, por completo, uma eventual hipótese de aleatoriedade nos dados destes ensaios.

Por outro lado, os graus de correlação corroboram os comportamentos assinalados pelos expoentes de Hurst, sugerindo a presença, nos dados experimentais de ensaio, de correlações de longo alcance, a nível de depósito sedimentar.

4.2.2. Análise R/S dos ensaios CPTu, no bairro Recreio dos Bandeirantes, cidade do Rio de Janeiro.

4.2.2.1. Análise R/S do ensaio CPTu-1.

As Figuras 54, 55 e 56 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerada no processo de cravação, respectivamente, do único ensaio CPTu-1.

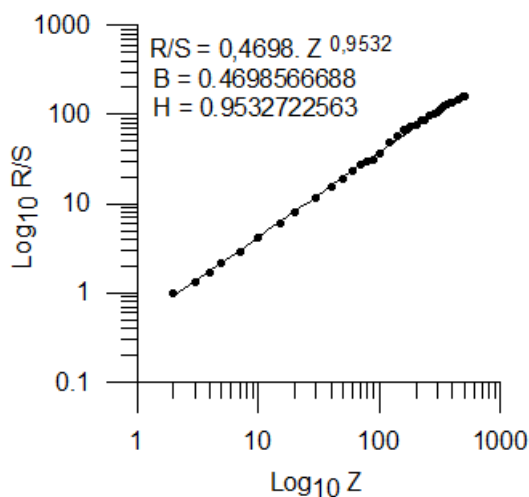


Figura 54 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-1 da (Figura 29).

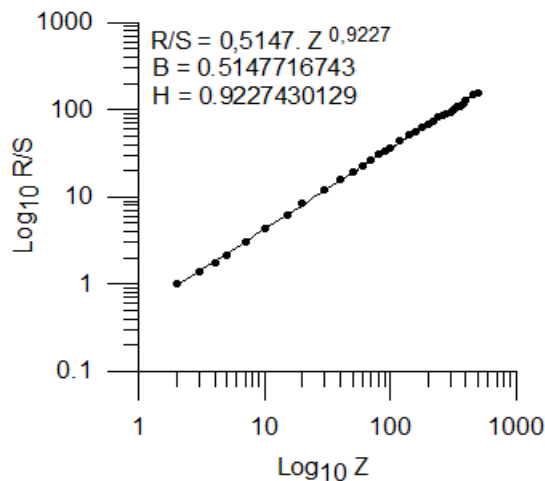


Figura 55 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-1 da (Figura 29).

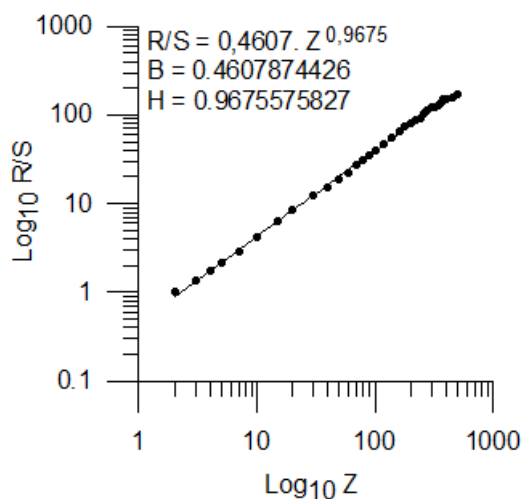


Figura 56 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-1 da (Figura 29).

Nota-se o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogarítmica, sugerido pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9993; 0.9997 e 0.9996, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada na cravação, respectivamente.

A expressão 16, aplicada aos dados experimentais, fornece os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{q_c} = 0,4698 \cdot z^{0,9532} \quad (57)$$

$$R/S_{f_s} = 0,5147 \cdot z^{0,9227} \quad (58)$$

$$R/S_u = 0,4607 \cdot z^{0,9675} \quad (59)$$

estando os valores dos expoentes de Hurst $H_{q_c} = 0.9532$, $H_{f_s} = 0.9227$ e $H_u = 0,9675$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, o que sugere comportamentos persistentes e positivamente correlacionados dos dados experimentais.

Os graus de correlação obtidos pela expressão (17) são dados pelas expressões (60), (61) e (62):

$$C_{q_c} = 2^{2 \cdot 0,9532 - 1} - 1 = 0,8743 \text{ ou } 87,43\% \quad (60)$$

$$C_{f_s} = 2^{2 \cdot 0,9227 - 1} - 1 = 0,7967 \text{ ou } 79,67\% \quad (61)$$

$$C_u = 2^{2 \cdot 0,9675 - 1} - 1 = 0,9118 \text{ ou } 91,18\% \quad (62)$$

todos próximos de 100%, indicando uma forte correlação com a profundidade, confirmando as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.2.2. Resumo dos resultados das análises R/S dos ensaios CPTu no Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro-RJ.

As Tabelas 5 e 6 apresentam um resumo dos resultados das análises R/S em função dos expoentes de Hurst e dos graus de correlação,

respectivamente, para as resistências de ponta, de atrito lateral e poro-pressões gerada na cravação.

Tabela 5 – Expoentes de Hurst fornecidos pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados no Recreio dos Bandeirantes, cidade do Rio de Janeiro.

Expoentes de Hurst dos ensaios CPTu – Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro.	
Expoentes de Hurst	CPTu 1
H _{qc}	0,9532
H _{fs}	0,9227
H _u	0,9675

Tabela 6 – Intensidades de correlação fornecidas pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados no Recreio dos Bandeirantes, cidade do Rio de Janeiro.

Graus de correlação dos ensaios CPTu – Recreio dos bandeirantes, Rio de Janeiro.	
Correlação	CPTu 1
C _{qc}	87,43%
C _{fs}	79,67%
C _u	91,18%

De forma semelhante ao que ocorreu nos ensaios realizados nos depósitos argilosos do bairro de Santa Cruz, pode-se observar que todos os expoentes de Hurst apresentam $H > 0,5$ e muito próximos de 1. Isto sugere fortemente que os registros dos ensaios possuem correlação persistente e em grande escala, o que invalida uma eventual hipótese de aleatoriedade nos dados destes ensaios.

Por outro lado, os elevados graus de correlação corroboram os comportamentos assinalados pelos expoentes de Hurst, sugerindo a presença, nos dados experimentais de ensaio, de correlações de longo alcance.

4.2.3. Análise R/S dos ensaios CPTu, do Sarapuí, município de Duque de Caxias.

4.2.3.1. Análise R/S do ensaio CPTu-1.

As Figuras 57, 58 e 59 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerada no processo de cravação, respectivamente.

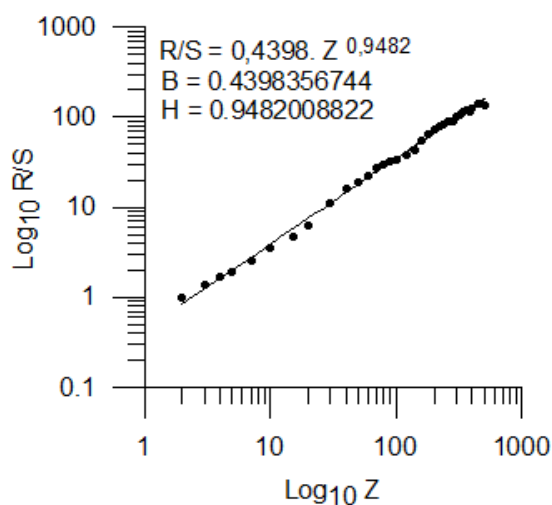


Figura 57 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-1 da (Figura 30).

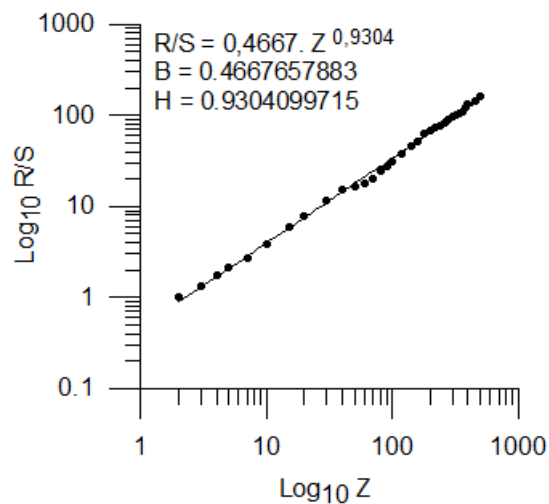


Figura 58 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-1 da (Figura 30).

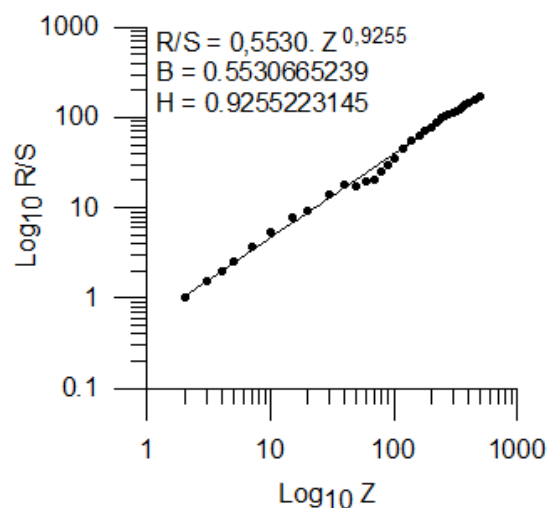


Figura 59 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-1 da (Figura 30).

Nota-se o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogarítmica, sugerido pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9986; 0.9989 e 0.9971, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada na cravação, respectivamente.

A expressão 16, aplicada aos dados experimentais, fornece os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{q_c} = 0,4398 \cdot z^{0,9482} \quad (63)$$

$$R/S_{f_s} = 0,4667 \cdot z^{0,9304} \quad (64)$$

$$R/S_u = 0,5530 \cdot z^{0,9255} \quad (65)$$

estando os valores dos expoentes de Hurst $H_{q_c} = 0.9482$, $H_{f_s} = 0.9304$ e $H_u = 0,9255$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, o que sugere comportamentos persistentes e positivamente correlacionados dos dados experimentais.

Os graus de correlação conforme a expressão (17) são dados pelas expressões (66). (67) e (68):

$$C_{q_c} = 2^{2 \cdot 0,9482 - 1} - 1 = 0,8614 \text{ ou } 86,14\% \quad (66)$$

$$C_{f_s} = 2^{2 \cdot 0,9304 - 1} - 1 = 0,8160 \text{ ou } 81,60\% \quad (67)$$

$$C_u = 2^{2 \cdot 0,9255 - 1} - 1 = 0,8037 \text{ ou } 80,37\% \quad (68)$$

todos próximos de 100%, indicando uma forte correlação com a profundidade, confirmando as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.3.2. Análise R/S do ensaio CPTu-2.

As Figuras 60, 61 e 62 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerada no processo de cravação, respectivamente.

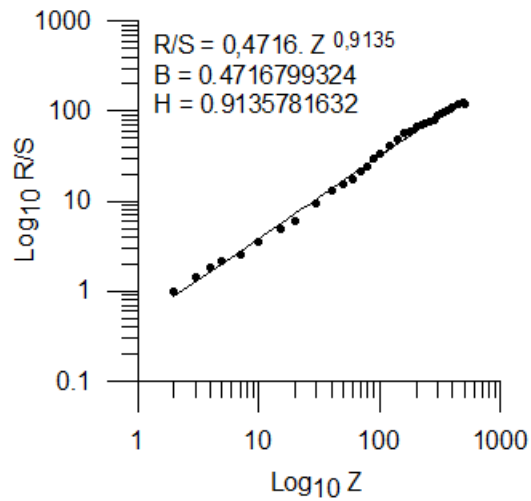


Figura 60 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-2 da (Figura 31).

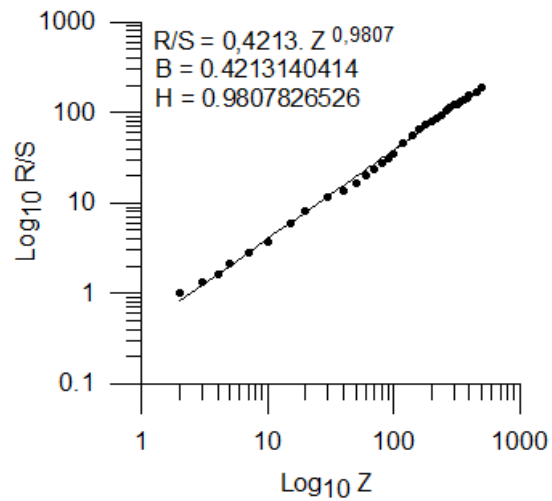


Figura 61- Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-2 da (Figura 31).

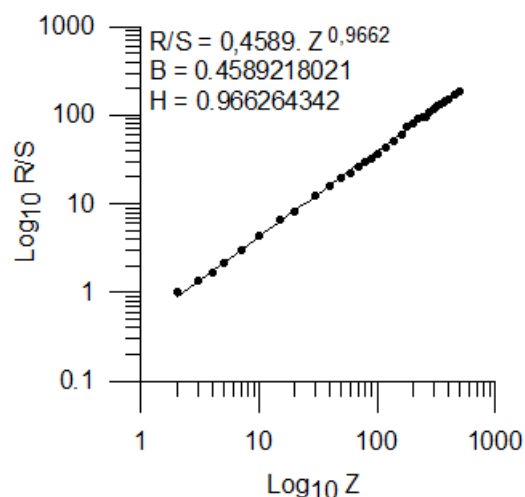


Figura 62 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-2 da (Figura 31).

Nota-se o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogarítmica, sugerido pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9981; 0.9988 e 0.9995, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada na cravação, respectivamente.

A expressão 16, aplicada aos dados experimentais, fornece os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{q_c} = 0,4716 \cdot z^{0,9135} \quad (69)$$

$$R/S_{f_s} = 0,4213 \cdot z^{0,9807} \quad (70)$$

$$R/S_u = 0,4589 \cdot z^{0,9662} \quad (71)$$

estando os valores dos expoentes de Hurst $H_{q_c} = 0.9135$, $H_{f_s} = 0.9807$ e $H_u = 0,9662$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, o que sugere comportamentos persistentes e positivamente correlacionados dos dados experimentais.

Os graus de correlação segundo a expressão (17) são dados pelas expressões (72), (73) e (74):

$$C_{qc} = 2^{2*0,9135-1} - 1 = 0,7739 \text{ ou } 77,39\% \quad (72)$$

$$C_{fs} = 2^{2*0,9807-1} - 1 = 0,9471 \text{ ou } 94,71\% \quad (73)$$

$$C_u = 2^{2*0,9662-1} - 1 = 0,9084 \text{ ou } 90,84\% \quad (74)$$

todos próximos de 100%, indicando uma forte correlação com a profundidade, confirmando as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.3.3. Análise R/S do ensaio CPTu-3.

As Figuras 63, 64 e 65 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerada no processo de cravação, respectivamente.

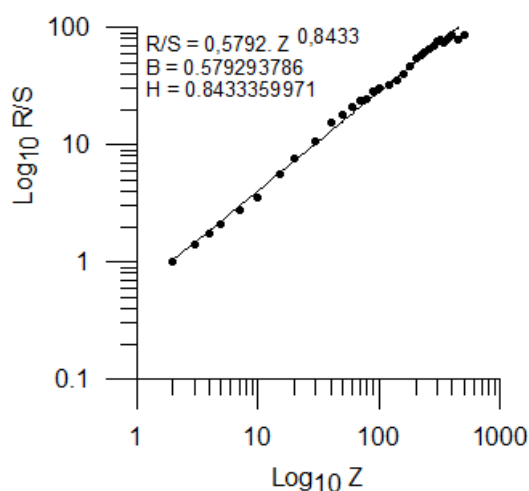


Figura 63 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-3 da (Figura 32).

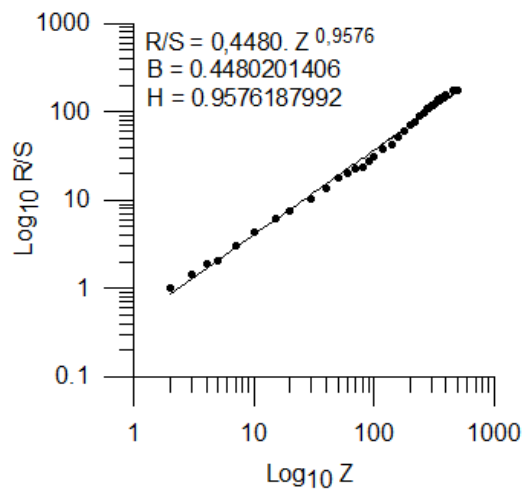


Figura 64 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-3 da (Figura 32).

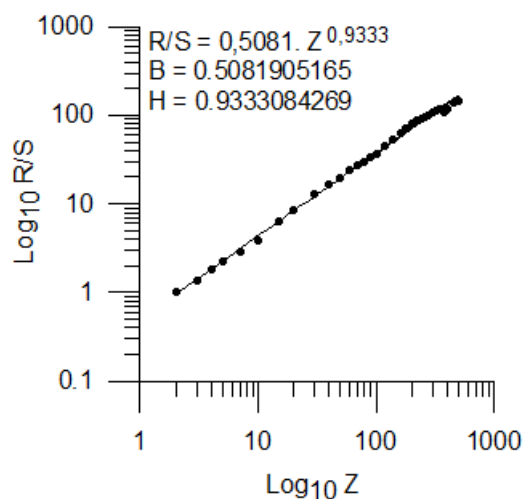


Figura 65 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-3 da (Figura 32).

Observa-se o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogarítmica, sugerido pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9975; 0.9971 e 0.9997, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada na cravação, respectivamente.

A expressão 16, aplicada aos dados experimentais, fornece os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{q_c} = 0,5792 \cdot z^{0,8433} \quad (75)$$

$$R/S_{f_s} = 0,4480 \cdot z^{0,9576} \quad (76)$$

$$R/S_u = 0,5081 \cdot z^{0,9333} \quad (77)$$

estando os valores dos expoentes de Hurst $H_{q_c} = 0.8433$, $H_{f_s} = 0.9576$ e $H_u = 0,9333$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, o que sugere comportamentos persistentes e positivamente correlacionados dos dados experimentais.

Os graus de correlação obtidos da expressão (17) são dados pelas expressões (78). (79) e (80):

$$C_{q_c} = 2^{2 \cdot 0,8433 - 1} - 1 = 0,6094 \text{ ou } 60,94\% \quad (78)$$

$$C_{f_s} = 2^{2 \cdot 0,9576 - 1} - 1 = 0,8858 \text{ ou } 88,58\% \quad (79)$$

$$C_u = 2^{2 \cdot 0,9333 - 1} - 1 = 0,8233 \text{ ou } 82,33\% \quad (80)$$

apresentando graus de correlação de atrito lateral e poro-pressão gerada na cravação próximos de 100%, indicando uma forte correlação com a profundidade, e grau de correlação da resistência de ponta próximo de 50%, indicando uma mediana correlação com a profundidade, confirmando as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.3.4. Análise R/S do ensaio CPTu-4.

As Figuras 66, 67 e 68 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerada no processo de cravação, respectivamente.

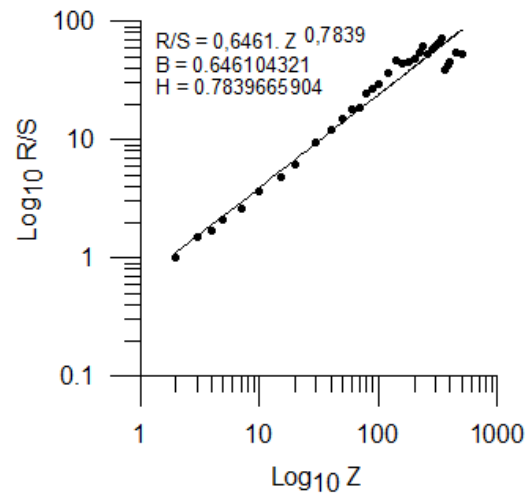


Figura 66 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-4 da (Figura 33).

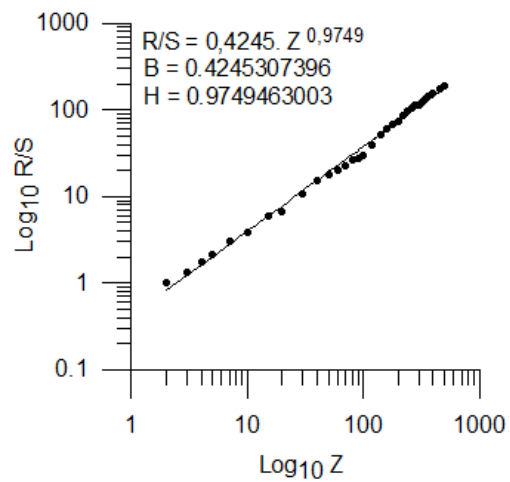


Figura 67 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-4 da (Figura 33).

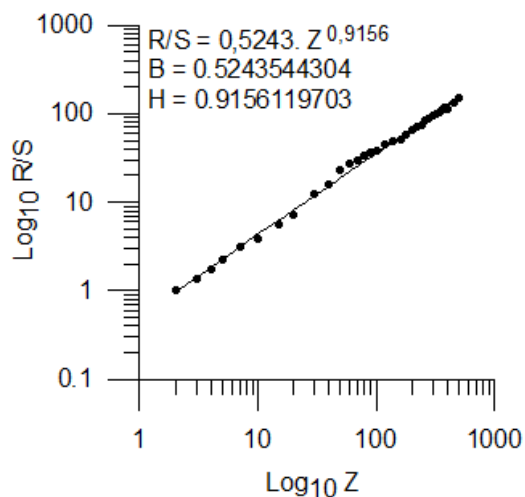


Figura 68 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação- CPTu-4 da (Figura 33).

Observa-se o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogárítmica, sugerido pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9833; 0.9979 e 0.9984, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada na cravação, respectivamente.

A expressão 16, aplicada aos dados experimentais, fornece os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{q_c} = 0,6461 \cdot z^{0,7839} \quad (81)$$

$$R/S_{f_s} = 0,4245 \cdot z^{0,9749} \quad (82)$$

$$R/S_u = 0,5243 \cdot z^{0,9156} \quad (83)$$

estando os valores dos expoentes de Hurst $H_{q_c} = 0.7839$, $H_{f_s} = 0.9749$ e $H_u = 0,9156$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, o que sugere comportamentos persistentes e positivamente correlacionados dos dados experimentais.

Os graus de correlação segundo a expressão (17) são dados pelas expressões (84). (85) e (86):

$$C_{qc} = 2^{2*0,7839-1} - 1 = 0,4822 \text{ ou } 48,22\% \quad (84)$$

$$C_{fs} = 2^{2*0,9749-1} - 1 = 0,9316 \text{ ou } 93,16\% \quad (85)$$

$$C_u = 2^{2*0,9156-1} - 1 = 0,7791 \text{ ou } 77,91\% \quad (86)$$

apresentando graus de correlação de atrito lateral e poro-pressão gerada na cravação próximos de 100%, indicando uma forte correlação com a profundidade, e grau de correlação da resistência de ponta próximo de 50%, indicando uma mediana correlação com a profundidade, confirmando as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.3.5. Análise R/S do ensaio CPTu-5.

As Figuras 69, 70 e 71 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerada no processo de cravação, respectivamente.

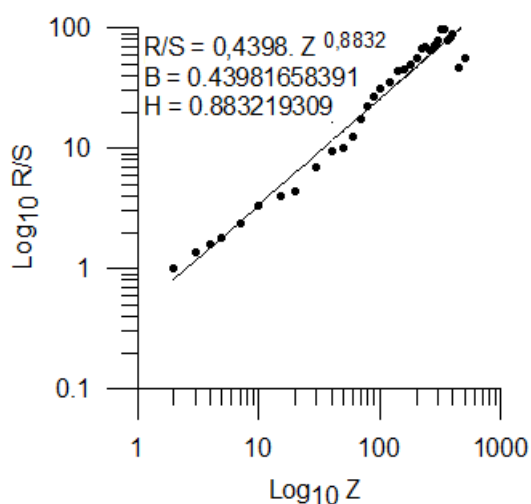


Figura 69 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-5 da (Figura 34).

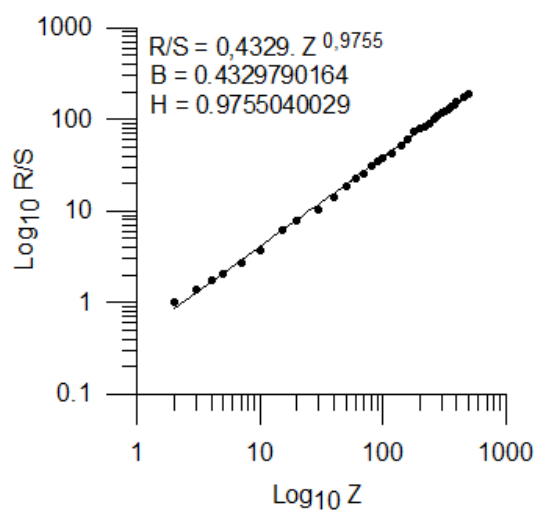


Figura 70 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-5 da (Figura 34).

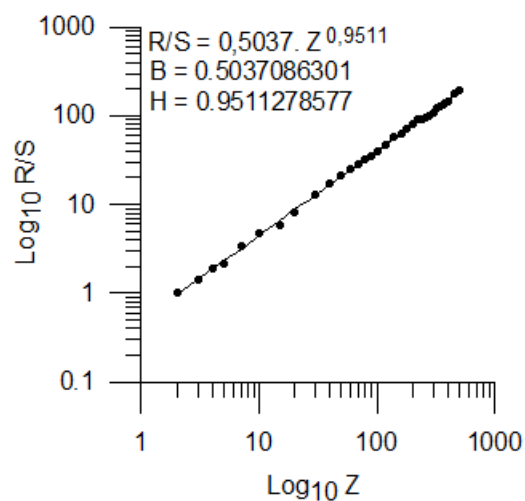


Figura 71 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-5 da (Figura 34).

Nota-se, mais uma vez, o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogarítmica, sugerido pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9849; 0.9992 e 0.9996, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada na cravação, respectivamente.

A expressão 16, aplicada aos dados experimentais, fornece os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{q_c} = 0,4398 \cdot z^{0,8832} \quad (87)$$

$$R/S_{f_s} = 0,4329 \cdot z^{0,9755} \quad (88)$$

$$R/S_u = 0,5037 \cdot z^{0,9511} \quad (89)$$

estando os valores dos expoentes de Hurst $H_{q_c} = 0.8832$, $H_{f_s} = 0.9755$ e $H_u = 0,9511$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, o que sugere comportamentos persistentes e positivamente correlacionados dos dados experimentais.

Os graus de correlação conforme a expressão (17) são dados pelas expressões (90). (91) e (92):

$$C_{q_c} = 2^{2 \cdot 0,8832 - 1} - 1 = 0,7010 \text{ ou } 70,10\% \quad (90)$$

$$C_{f_s} = 2^{2 \cdot 0,9755 - 1} - 1 = 0,9332 \text{ ou } 93,32\% \quad (91)$$

$$C_u = 2^{2 \cdot 0,9511 - 1} - 1 = 0,8689 \text{ ou } 86,89\% \quad (92)$$

todos próximos de 100%, indicando uma forte correlação com a profundidade, confirmando as informações fornecidas pelos expoentes de Hurst.

4.2.3.6. Análise R/S do ensaio CPTu-6.

As Figuras 72, 73 e 74 mostram os resultados das análises R/S realizadas sobre os registros de resistência de ponta q_c , resistência de atrito lateral f_s e poro-pressão u gerada no processo de cravação, respectivamente.

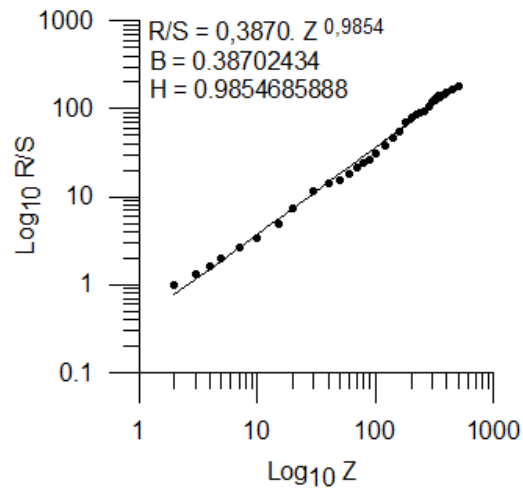


Figura 72 – Análise R/S - resistência de ponta q_c - CPTu-6 da (Figura 35).

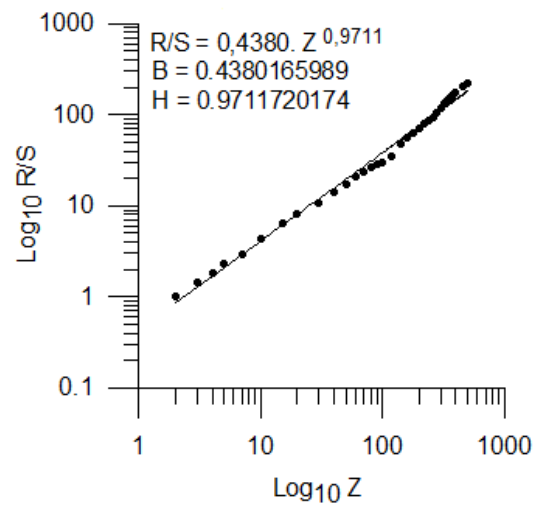


Figura 73 - Análise R/S - resistência de atrito lateral f_s - CPTu-6 da (Figura 35).

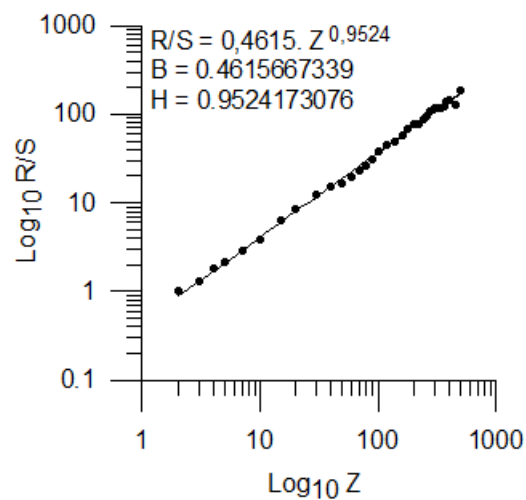


Figura 74 - Análise R/S – poro-pressão u gerada na cravação - CPTu-6 da (Figura 35).

Nota-se, mais uma vez, o excelente ajuste aos dados experimentais, promovido pela expressão 16, em escala bilogarítmica, sugerido pelos valores dos coeficientes de correlação de 0.9972; 0.9966 e 0.9986, relativos à resistência de ponta, resistência de atrito lateral e poro-pressão gerada na cravação, respectivamente.

A expressão 16, aplicada aos dados experimentais, fornece os seguintes resultados para q_c , f_s e u :

$$R/S_{q_c} = 0,3870 \cdot z^{0,9854} \quad (93)$$

$$R/S_{f_s} = 0,4380 \cdot z^{0,9711} \quad (94)$$

$$R/S_u = 0,4615 \cdot z^{0,9524} \quad (95)$$

estando os valores dos expoentes de Hurst $H_{q_c} = 0.9854$, $H_{f_s} = 0.9711$ e $H_u = 0,9524$ compreendidos no intervalo numérico $0,5 < H \leq 1$, o que sugere comportamentos persistentes e positivamente correlacionados.

A expressão (17), aplicada fornece as correlações dadas pelas expressões (96). (97) e (98):

$$C_{q_c} = 2^{2 \cdot 0,9854 - 1} - 1 = 0,9599 \text{ ou } 95,99\% \quad (96)$$

$$C_{f_s} = 2^{2 \cdot 0,9711 - 1} - 1 = 0,9214 \text{ ou } 92,14\% \quad (97)$$

$$C_u = 2^{2 \cdot 0,9524 - 1} - 1 = 0,8722 \text{ ou } 87,22\% \quad (98)$$

todos próximos de 100%, indicando uma forte correlação com a profundidade, confirmando as informações dos expoentes de Hurst.

4.2.3.7. Resumo dos resultados das análises R/S dos ensaios CPTu no Sarapuí, município de Duque de Caxias, RJ.

As Tabelas 7 e 8 apresentam um resumo dos resultados das análises R/S em função dos expoentes de Hurst e dos graus de correlações, respectivamente, para as resistências de ponta, de atrito lateral e poro-pressões gerada na cravação.

Tabela 7 – Expoentes de Hurst fornecidos pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados no Sarapuí, município de Duque de Caxias, RJ.

Expoentes de Hurst dos ensaios CPTu – Sarapuí, município de Duque de Caxias.						
Exp. Hurst	CPTu 1	CPTu 2	CPTu 3	CPTu 4	CPTu 5	CPTu 6
H _q	0,9482	0,9135	0,8433	0,7839	0,8832	0,9854
H _f	0,9304	0,9807	0,9576	0,9749	0,9755	0,9711
H _u	0,9255	0,9662	0,9333	0,9156	0,9511	0,9524

Tabela 8 – Intensidades de correlação fornecidas pelas análises R/S dos ensaios CPTu realizados no Sarapuí, município de Duque de Caxias, RJ.

Intensidades de correlação dos ensaios CPTu – Sarapuí, Duque de Caxias-RJ						
Correlação	CPTu 1	CPTu 2	CPTu 3	CPTu 4	CPTu 5	CPTu 6
C _q	86,14%	77,39%	60,94%	48,22%	70,10%	95,99%
C _f	81,60%	94,71%	88,58%	93,16%	93,32%	92,14%
C _u	80,37%	90,84%	82,33%	77,91%	86,89%	87,22%

Semelhantemente ao que ocorreu nos ensaios realizados nos depósitos argilosos de Santa Cruz e Recreio dos Bandeirantes na cidade do Rio de Janeiro, pode-se observar que todos os expoentes de Hurst encontrados no Sarapuí, município de Duque de Caxias apresentam $H > 0,5$, situando-se muito próximos de 1. Isto sugere fortemente que os registros dos ensaios possuem correlação persistente e em grande escala, o que, a princípio, invalida uma eventual hipótese de aleatoriedade nos sinais experimentais com a profundidade.

Por outro lado, os elevados graus de correlação corroboram os comportamentos assinalados pelos expoentes de Hurst, sugerindo a presença, nos dados experimentais de ensaio, de correlações de longo alcance, ao mesmo nível dos outros depósitos sedimentar analisados.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1. Conclusões

Esta pesquisa teve por objetivo estudar a variabilidade vertical de diversos registros de ensaios de cravação de cone com medida de poro-pressão CPTu em 3 (três) depósitos argilosos moles saturados, localizados nos bairros de Santa Cruz e Recreio dos Bandeirantes na cidade do Rio de Janeiro, além do bairro do Sarapuí no município de Duque de Caxias. Mais especificamente, o trabalho procurou responder à questão de uma eventual aleatoriedade presente nos sinais destes ensaios, monitorando a variação das resistências de ponta e atrito lateral, bem como da poro-pressão gerada na cravação, com a profundidade dos depósitos sedimentares.

Para tanto, utilizou-se a análise R/S, um dos instrumentos matemáticos típicos da investigação de sinais fractais temporais, presentes em diversos fenômenos (dados hidrológicos, do mercado de ações, dados sísmicos, dados de emissão acústica durante o carregamento de diferentes materiais, eletroencefalogramas, eletrocardiogramas etc.).

Os resultados mostraram, definitivamente, que a variação dos sinais com a profundidade dos depósitos não é aleatória (expoentes de Hurst fortemente diferentes de 0,5), situação em que a memória destes sinais seria de curto alcance, fazendo com que a correlação entre eles deixasse de existir, para profundidades paulatinamente crescentes.

Neste sentido, é lícito afirmar que todos os dados experimentais analisados neste trabalho estão impregnados de memória de longo alcance, sugerindo que a correlação entre eles mantém-se fortemente, mesmo para pontos espaciais largamente espaçados, em cada ensaio investigado.

Os resultados mostraram cabalmente que os expoentes de Hurst de todos os ensaios situaram-se, invariavelmente, no intervalo $0,5 < H \leq 1$, muito próximos da unidade, o que sugere a presença, nos sinais analisados, de persistência, estando os dados positivamente correlacionados, havendo, portanto, uma maior probabilidade de continuar uma tendência de alta ou baixa com a profundidade.

Assim, no que concerne às intensidades de correlação, das 39 (trinta e nove) análises R/S realizadas, 37 (trinta e sete) análises o que equivale a 94,87% apresentou uma variação dos valores próximos de 100% e 2 (duas) análises o que equivale a 5,13% apresentou uma variação dos valores próximos de 50% , corroborando as tendências sugeridas pelos expoentes de Hurst, ou seja, que os registros experimentais encontram-se fortemente correlacionados, independentemente da posição dos pontos em estudo, quer sejam eles mais superficiais ou profundos, no depósito sedimentar.

É interessante assinalar que, uma característica marcante dos sistemas deposicionais, reside na forte ou fraca aleatoriedade em que se processam as sedimentações, muito em função da energia de deposição maior ou menor disponível no sistema geológico. Portanto, os ensaios cone penetrométricos foram capazes de retratar, nas limitações a que estão submetidos, tais peculiaridades genéticas dos depósitos sedimentares (oscilações, turbulências etc.), corporificadas nos marcos das análises R/S.

Aqui cabe inferir do processo de gênese daqueles 3 (três) depósitos sedimentares, em função dos valores dos expoentes de Hurst e dos graus de correlação, possivelmente revelando algo sobre a história da gênese de sua formação geológica - se proveniente de um único ou mais eventos formadores.

Deste modo, com base nas análises realizadas, pode-se sugerir da homogeneidade dos depósitos sedimentares investigados, tendo origem em um único evento formador. Por outro lado, as situações em que $H = 0,5$ e $C = 0\%$

corresponderiam, eventualmente, a formações sedimentares bastante heterogêneas, com origem em mais de um evento deposicional formador.

5.2. Sugestões para futuras pesquisas

1. Assim como foi feito com a profundidade, sugere-se investigar a presença ou não de correlações espaciais horizontais, na região entre ensaios, utilizando-se, por exemplo, de interpolações geoestatísticas (krigagens) baseadas nos expoentes de Hurst para cada ensaio, com o intuito de monitorar a evolução das propriedades a nível de depósito sedimentar;

2. Sugere-se que as análises de séries temporais R/S efetuadas nesta pesquisa, possam ser estendidas a outros tipos de ensaios de campo e a solos de distintas composições, a fim de se verificar a robustez das conclusões deste trabalho, quando aplicadas a outras situações geotécnicas;

3. Aspecto interessante relacionado às intensidades das correlações aqui encontradas, que possam ser observadas e generalizadas para outras propriedades/parâmetros que não os aqui utilizados.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10905 (MB 3122): Solo - Ensaio de palheta in situ - Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12069 (MB-3406): Solo - Ensaio de penetração de cone in situ (CPT) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

AMOROSI A.; MARCHI N. High-resolution sequence stratigraphy from piezocone tests: An example from the Late Quaternary deposits of the southeastern Po Plain. *Sed Geol* 128, 67 – 81p., 1999.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. STP 1014: Vane shear strength testing in soils - Field and laboratory studies. USA: ASTM, 1988.

ASTM D5778. Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. 1995 (2000).

BARONI, M. Comportamento geotécnico de argilas extremamente moles da baixada de Jacarepaguá. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

BASSINGTHWAIGHTE, J. B.; LIEBOVITCH, L. S.; WEST, B. J. *Fractal Physiology*, American Physiological Society. Oxford University Press. Oxford, 364p., 1994.

BEER, R. Extensão da análise R/S para caracterização geoestatística local regional de reservatórios de hidrocarbonetos. 149f. Dissertação (Mestrado em Geoengenharia de Reservatórios) – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/UNICAMP, Campinas São Paulo, 1994.

BEGEMANN, H. K. S. Improved method of determining resistance to adhesion by sounding through a loose sleeve placed behind the cone, Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 1. Zurich, 213 - 217p., 1953.

BJERRUM, L. Problems of Soil Mechanics and Construction of Natural Clays. in: ICSMFE 8 v. 3. Moscow, 111 – 158p., 1973.

BOES, D. C. Scheme Exhibiting Hurst Behavior. In: Probability and Statistics – Essays in Honor of F.A.Graybill, Elsevier, 21- 42P., 1988.

BRESLIN, M. C.; BELWARD, J. A. Fractal dimensions for rainfall time series. Mathematics and Computers in Simulation, Amsterdam, v. 48, 437 – 446p., 1999.

BS 1377. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. British Standards Institute, BSI, 1990.

CAMPANELLA, R. G. A manual on interpretation of seismic piezocone test data for geotechnical design. Geotech. Research Group, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, 2005.

CAMPANELLA, R. G.; DAVIES, M. P.; KRISTIANSEN, H.; DANIEL, C. Site characterization of soil deposits using recent advances in piezocone technology. In: INT. CONF. ON SITE CHARACTERIZATION, No. 1., Atlanta. Proceedings... Rotterdam: Balkema Publ., 995 - 1000p.1998.

CAMPANELLA, R. G.; GILLESPIE, D.; ROBERTSON, P. K. Pore-pressure during cone penetration testing. In: EUROPEAN SYMP. ON PENETRATION TESTING, ESOPT, 2., Amsterdam. Proceedings... Rotterdam: Balkema Publ., v. 1, 507 – 512p., 1982.

CESTARI, F. Prove Geotecniche in sito. Ed Geo-Graph. Segrate, Italy, 401 p., 1990.

COUTINHO, R. Q. Aterros experimental instrumentado levado à ruptura sobre solos orgânicos-argilas moles da barragem de Juturnaíba. 634f. Tese de Doutorado (D.Sc.) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1986.

COUTINHO, R. Q.; BELLO, M. I. M. C. V. Geotechnical characterization of Suape soft clays Brazil. *Soils and Rocks*, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 257-276, Sept.-Dec. 2014.

DAVIES M. P.; CAMPANELLA R. G. Piezocone Technology: Downhole Geophysics for the Geoenvironmental Characterization of soil. *Proceedings. SAGEEP 95 Orlando, FL, USA*, 11p., 1995.

DE MIO, G. Condicionantes geológicos na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental. Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DE RUITER. Electric Penetrometer for Site Investigations. *Journal Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE*, SM 2 - 97, 457 - 472p., 1971.

DOUGLAS, B. J.; OLSEN, R. S. Soil classification using electric cone penetrometer. *Cone Penetration Testing and Experience. ASCE National Convention. St. Louis*, 209 – 227p., 1981.

EINSTEIN, A. (1905) Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Annalen der Physik*, 322, 8 (Sobre o Movimento de Pequenas Partículas em Suspensão Dentro de Líquidos em Repouso, tal como Exigido pela Teoria Cinético-Molecular do Calor, *in O Ano Miraculoso de Einstein – Cinco Artigos que Mudaram a Face da Física*, (J. Stachel, ed.), Editora UFRJ, 2001, 222p).

ELMGREN, K. Slot-type pore pressure CPTu filters. *Swedish Geotechnical Society Report 3:95. Proceedings of the CPT'95 Int. Symp. on Cone Penetration Testing, October 4-5, Linköping, Sweden*, v. 2, 9 - 12p., 1995.

EN ISO 22476-1. Geotechnical investigation and testing. Field testing Electrical cone and piezocone penetration test, 2012 (2023)

EUROCODE 7. European Committee for Standardization: Geotechnical Design. Part 1: Geotechnical Design General Rules; Part 3: Design assisted by field testing; Section 9: Flat dilatometer test (DMT), 1997.

FEDER, J. Fractals, Plenum Press. New York and London, 283p., 1988.

FIEDLER-FERRARA. N.; PRADO, C. P. C. Caos – Uma Introdução. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 402p., 1994.

HEWET. T. Fractal Distribution of Reservoir Heterogeneity and their Influence on Fluid Transport. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 67- 82p., 1989.

HURST, H. E.; BLACK, R. P.; SIMAIKA, Y. M. Long-Term Storage. An Experimental Study, Constable. London, 1965.

HUST, H. E. Long-Term Storage Capacity of Reservoirs. Transactions of the American Society of Civil Engineers, v. 116, 770 – 808p., 1951.

IRTP/ISSMFE. International reference testing procedure for cone penetration tests (CPT). Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils: TC-16, with reference to Test Procedures. Information 7. Linköping: Swedish Geotech. Inst., 6 - 16p., 1988a.

IRTP/ISSMFE. Subcommittee on Standardization for Europe, report on the penetration test use in Europe. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Tokyo, v. 3, 95 – 152p., 1977.

JAMIOLKOWSKI, M.; LADD, C. C.; GERMAINE, J. T.; LANCELLOTTA, R. New developments in field and laboratory testing of soils. Proceedings of the 11th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., San Francisco, v. 1, 57 - 153p., 1985.

JAMIOLKOWSKI, M.; LADD, C.C.; GERMAINE, J.T; LANCELLOTTA, R. New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils. in: ICSMFE 10. San Francisco, v.1, 57 – 153p., 1985.

KORVIN, G. Fractal Models in the Earth Sciences. Elsevier Science Publishers, 396p., 1992.

LARSSON, R. The use of a thin slot as filter in piezocone tests. Int. Symp. on Cone Penetration Testing, CPT'95, Sweden, v. 2, 35 – 40p., 1995.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic & Professional, 1997.

MACEDO, E. O. Investigação da resistência não drenada in situ através de ensaios de penetração de cilindro. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MANDELBROT, B. B.; WALLIS, J. B. Robustness of the Rescaled Range R/S in the Measurements of Noncyclic Long Run Statistical Dependence. Water Resources Research, v. 5, No. 2, 967- 988p., 1969e.

MANDELBROT, B. B.; WALLIS, J. B. Some Long-Run Properties of Geophysical Reports. Water Resources Research, v. 5, No. 2, 321-340p., 1969d.

MANDELBROT, B. B.; WALLIS, J. R. Computer Experiments with Fractional Gaussian Noises, Parts 1, 2, 3. Water Resources Research, v. 5, No. 1, 228 - 241p, 242 - 259p, 260 - 267p., 1969a,b,c.

MANDELBROT, B.; VAN NESS, J.W. (1968) – Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications, SIAM Review, vol.10, No. 4.

MAYNE, P. W. NCHRP synthesis 368: cone penetration testing. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2007.

MEAKIN, P. Fractals, Scaling and Growth far from Equilibrium. Cambridge University Press. Condado de Cambridgeshire, 674p., 1998.

MENEZES FILHO, A. P. Não-Extensividade Termodinâmica, Invariância Discreta de Escala e Elasto-Plasticidade: Estudo Numérico de um Modelo Geomecânico Auto-Organizado Criticamente. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - PUC-Rio. Rio de Janeiro, 189p.,2003.

NEN 5140. Geotechnics - Determination of the cone resistance and the sleeve friction of soil - Electric penetration test, 1996.

NF P94-113. Sols: reconnaissance et essais - Essai de pénétration statique, octobre, 1989 (1996).

OLIVEIRA, M. P.; BURGOS, R. B.; MENEZES FILHO A. P. Estruturas Fractais em Bandas de Cisalhamento e Propriedades Anômalas de Transporte, Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Belo Horizonte, 2016.

PEAK, D.; FRAME, M. Chaos under Control –The Art and Science of Complexity. W. H. Freeman and Company. New York, 408p., 1994.

PEITGEN, H-O., JÜRGENS, H., SAUPE, D. – Chaos and Fractals, New Frontiers of Science, Springer-Verlag, 984p., 1992.

ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. Guide to cone penetration testing. 2. ed. Signal Hill: Gregg Drilling & Testing, 2007.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G. Design manual for use of CPT and CPTU. Vancouver: University of British Columbia, 1989.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G.; GILLESPIE, D. G.; GREIG, J. Use of piezocone data. ASCE Spec. Conf. In Situ 86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Eng., Blacksburg, 1263 - 1280p., 1986.

ROBERTSON, P. K.; SULLY, J. P.; WOELLER, D. J.; LUNNE, T.; POWELL, J. J. M.; GILLESPIE, D. G. Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests. Canadian Geotech. Journal, v. 29, No. 4, 539 – 550p., Aug. 1992.

ROCHA FILHO, P.; SCHNAID, F. Cone penetration testing in Brazil. In: SWEDISH GEOTECHNICAL SOCIETY (Org.). Cone penetration testing. 1. ed. Stockholm: Swedish Geotechnical Society, v. 1, p. 29 – 42p., 1997.

SANDVEN, R. Influence of test equipment and procedures on obtained accuracy in CPTU. Proceedings of the 2nd Int. Symp. on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, California, 2010.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações. 2ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SCHNAID, F.; ROCHA FILHO, P. Cone penetration testing in Brazil. National Report. In: INT. SYMP. ON CONE PENETRATION TESTING, CPT'95. Proceedings... Linköping: Swedish Geotechnical Society, v. 1, 29 - 42p., 1995.

SCHNEIDER, J. A.; LEHANE, B. M.; SCHNAID, F. Evaluation of piezocone pore pressure response in normally consolidated and overconsolidated clay. Int. J. of Physical Modeling in Geotech, 2008.

SKEMPTON, A. W. The Colloidal "Activity" of Clays. Selected Papers On Soil Mechanics, [s.l.], 60 – 64p., jan. 1984. Thomas Telford Publishing. <<http://dx.doi.org/10.1680/sposm.02050.0009>>.

SKEMPTON, A. W. The planning and design of the new Hong Kong airport. Discussion. Proc Inst Civil Eng, v. 7, p. 305-7, 1957.

SOARES, J. M. D. Caracterização do depósito de argilas moles da região metropolitana de Porto Alegre. 330f. Tese de Doutorado (Ph.D.) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1997.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. New York: John Wiley & Sons, 1996.

TORSTENSSON, B. A. Pore-Pressure sounding instrument. Proc. ASCE Spec. Conf. In Situ Measurement of Soil Properties, v. 2, 48 - 54p., 1975.

TSALLIS, C. Introduction to Nonextensive Statistical Mechanics. Springer, 382p., 2009.

WISSA, A. E. Z.; MARTINS, R.T.; GARLANGER, J. E. The piezometer probe. Proc. ASCE Spec. Conf. In Situ Measurement of Soil Properties, v. 1, 563 - 345p. 1975.