

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

ANÁLISE INTEGRADA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS COM
AUXÍLIO DO SPT, SCPT_u E MASW: ESTUDO DE CASO NAS ÁREAS
DE BARRAGENS DE RESÍDUOS DE BAUXITA NO MARANHÃO

ALLAN KEWEN CÂMARA DE OLIVEIRA

CAMPINA GRANDE - PB

FEVEREIRO DE 2024.

ALLAN KEWEN CÂMARA DE OLIVEIRA

**Análise integrada de parâmetros geotécnicos com auxílio do SPT,
SCPTu e MASW: Estudo de caso nas áreas de barragens de resíduos de
bauxita no Maranhão**

Trabalho de Dissertação de Mestrado
apresentado ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental da Universidade Federal de
Campina Grande (UFCG).

Orientador: Prof. Dr. Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena.

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2024.

O48a

Oliveira, Allan Kewen Câmara de.

Análise integrada de parâmetros geotécnicos com auxílio do SPT, SCPTu e MASW: Estudo de caso nas áreas de barragens de resíduos de bauxita no Maranhão / Allan Kewen Câmara de Oliveira – Campina Grande, 2024.

474 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena."

Referências.

1. Geotecnia. 2. Barragens de Rejeito. 3. MASW. 4. SCPTu. 5. Mineração. 6. Velocidade de Ondacisalhante. I. Lucena, Adriano Elisio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 624.13(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): ALLAN KEWEN CÂMARA DE OLIVEIRA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. ADRIANO ELÍSIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR.ª CARINA SILVANI - PPGECA/UFMG – EXAMINADORA INTERNA, DR. RAIMUNDO LEIDIMAR BEZERRA – UEPB – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 08/2024). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “ANÁLISE INTEGRADA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS COM AUXÍLIO DO SPT, SCPTU E MASW: ESTUDO DE CASO NAS ÁREAS DE BARRAGENS DE RESÍDUOS DE BAUXITA NO MARANHÃO” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 15:30 HORAS / DE FORMA PRESENCIAL, NA SALA DE CONFERÊNCIA DO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFG, EM CAMPINA GRANDE.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA DE FORMA PRESENCIAL, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA” PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 29 DE FEVEREIRO 2024**



Documento assinado eletronicamente por **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/03/2024, às 08:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Allan Kewen Câmara de Oliveira, Usuário Externo**, em 01/03/2024, às 08:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 01/03/2024, às 08:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 01/03/2024, às 10:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raimundo Leidimar Bezerra, Usuário Externo**, em 01/03/2024, às 13:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4174518** e o código CRC **50C3B898**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, é Ele o autor de meu destino, o meu guia, dedico também a minha mãe Jocileia Câmara e aos meus avós Judi Câmara (*in memorian*) e José Moreira (*in memorian*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde, pela fé, pela determinação que tive durante minha vida, por todas as metas e sonhos alcançados e pela sua infinita bondade e misericórdia;

A minha mãe Jocileia, que é uma guerreira e sempre esteve ao meu lado, me entendeu quando ninguém mais entendeu, me apoiou e sempre me acolheu nos momentos mais difíceis da vida;

Ao meu irmão Thayan pelo apoio incondicional, por todas as vezes que me aconselhou e me ajudou durante toda a minha jornada;

Aos meus avós maternos Judi Câmara e José Moreira (*in memoriam*), por sempre me aconselharem, me acolherem, por todo apoio financeiro e por tudo aquilo que me ensinaram durante todo esse tempo que convivemos;

A minha namorada, Amanda, por todo o amor, força e suporte que me deu durante esta etapa da minha vida. Obrigado por estar sempre ao meu lado e por entender as minhas ausências.

Aos meus amigos do Maribond (Igor Tejo, Marcus Thúlio, Victor Gabriel, Victor Marques, Victor Hugo, Júlio Barbosa, Joseilton Adalberto e Mariana Alves) e ao PDF (Jullyo Rithiery, Marcus Thulio e Victor Marques), por todos os aprendizados adquiridos durante a graduação, pela paciência, o empenho de cada um, pelos conselhos e pelo apoio em todos os momentos.

Aos meus amigos Igor Tejo e Marcus Thulio, por ser sempre incríveis e dedicados amigos, por me ajudarem em tantos momentos difíceis que enfrentei durante esse período, obrigado por tudo.

Aos meus amigos do mestrado, Milena, Lara, Gilson, Ana Letícia e Leonardo, por todo apoio, companheirismo e ajuda nos momentos difíceis.

A todos os amigos do IFPB e da UFCG que me ajudaram durante a graduação e o mestrado.

Ao professor Dr. Adriano Lucena pela orientação necessária e por toda ajuda oferecida à realização deste trabalho, pela dedicação, ensinamentos, paciência e os bons conselhos.

A todo o corpo docente do curso de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFCG pela competência e preocupação em transmitir conhecimento com qualidade a todos os estudantes.

A todos os docentes que passaram pela minha vida, em todas as instituições que estudei: Pingo de Gente; E.M.E.F. Dom Manuel Palmeira da Rocha, PREMEN, IFPB – Campus Campina Grande e UFCG – Campus Campina Grande.

A empresa Alumar, pelo apoio técnico e financeiro durante o mestrado, pela disponibilidade de dados para a realização da pesquisa e por todos os conhecimentos transmitidos ao longo dos 24 meses de estágio.

Aos gestores da empresa que me auxiliaram no desenvolvimento técnico, profissional e pessoal ao longo da caminhada, em especial a Elessandro Pereira, Diogo Brandani e Rafael Siqueira.

A todos os terceirizados da instituição, por permitirem que o ambiente universitário fosse mantido em ótimas condições de uso.

À instituição UFCG, que me proporcionou a chance de expandir os meus horizontes e me tornar mestre em Engenharia Civil.

“Por isso não tema, pois estou com você; não tenha medo, pois sou o seu Deus. Eu o fortalecerei e o ajudarei; eu o segurarei com a minha mão direita vitoriosa.”

Isaias 41, 10

RESUMO

OLIVEIRA, Allan Kewen Câmara de. **Análise integrada de parâmetros geotécnicos com auxílio do SPT, SCPTu e MASW: Estudo de caso nas áreas de barragens de resíduos de bauxita no Maranhão.** 2024. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil de Ambiental-PPGECA, UFCG, Campina Grande.

A mineração e a indústria de beneficiamento de bauxita desempenham um papel relevante no desenvolvimento econômico da região de São Luís–MA, com as barragens de rejeitos sendo um componente importante dessa atividade. A segurança e a estabilidade dessas barragens são de suma importância, exigindo uma investigação geotécnica detalhada para compreender as características do solo e da subsuperfície. Nesse contexto, a obtenção de dados, como a velocidade das ondas cisalhantes (V_s) e as resistências do solo, é crucial para o projeto, construção e monitoramento dessas estruturas. A comparação entre os métodos SCPTu (Ensaio de piezocone sísmico) e MASW (Análise multicanal de ondas de superfície, em inglês, *Multichannel Analysis of Surface Waves*) para determinar a V_s oferece informações valiosas sobre a consistência e confiabilidade das medições geotécnicas. A análise desses métodos em áreas de barragens de resíduos de bauxita permite avaliar os riscos associados à sismicidade na região, destacando a importância da acurácia dos dados obtidos. Além disso, a utilização de ensaios como o SCPTu e o SPT (Ensaio de penetração padrão, em inglês, Standard Penetration Test) auxilia na obtenção de dados geotécnicos que asseguram uma maior confiabilidade na utilização desses dados. A estimativa de dados geotécnicos, como V_s , módulo de cisalhamento (G_o), resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s), a partir de dados provenientes de outros ensaios, pode garantir uma agilidade na tomada de decisões. Foram analisados os resultados de 18 ensaios MASW, 28 SCPTu's e 19 SPT's, realizados em diferentes ARB'S (áreas de resíduos de bauxita) da Alumar. Foram realizadas análises comparativas entre as V_s 's e G_o 's obtidas nos ensaios MASW e SCPTu, além da obtenção de relações entre os parâmetros de resistência dos ensaios SCPTu e SPT. Foram obtidas equações que possibilitam a estimativa de V_s com o N_{SPT} , G_o com o q_c , além das correlações existentes entre q_c e f_s e o N_{SPT} . A análise comparativa dos valores de velocidade das ondas cisalhantes obtidas através dos métodos MASW e SCPTu revelou uma consistência entre os resultados. Nesse contexto, torna-se evidente o potencial significativo do método SCPTu na determinação dos valores de V_s , dispensando, portanto, a realização do ensaio MASW quando já se dispõe de dados provenientes do SCPTu. Essa constatação não apenas simplifica o processo de obtenção de dados geotécnicos, mas também otimiza os recursos, eliminando a necessidade de conduzir ensaios adicionais quando há disponibilidade de informações suficientes provenientes do SCPTu. Na ausência de dados sísmicos obtidos com o SCPTu ou MASW, a estimativa de V_s a partir dos ensaios SPT pode emergir como uma alternativa viável no levantamento geotécnico, na ausência de ensaios sísmicos, ressaltando que nenhum resultado estimado substitui os dados obtidos com os ensaios específicos. Essa abordagem, embora não seja tão precisa quanto a obtenção direta por métodos sísmicos, pode oferecer uma solução mitigadora, especialmente em situações em que recursos limitados ou restrições operacionais inviabilizam a realização de ensaios mais elaborados. As equações para estimativa desses parâmetros a partir de valores obtidos em outros ensaios revelaram uma concordância significativa em algumas relações, indicando uma consistência confiável nas medições. No entanto, variações mais expressivas em outras relações ressaltam a necessidade de investigações detalhadas para entender as diferenças observadas.

Palavras-chave: MASW, SCPTu, SPT, Barragens de Rejeitos, Mineração, Velocidade de onda cisalhante.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Allan Kewen Câmara de. **Integrated Analysis of Geotechnical Parameters with the Aid of SPT, SCPTu, and MASW: A Case Study in Bauxite Residue Dam Areas in Maranhão.** 2024. Master's thesis (Master's in Civil and Environmental Engineering). Graduate Program in Civil and Environmental Engineering (PPGECA), UFCG, Campina Grande.

Mining and bauxite beneficiation industry play a significant role in the economic development of the São Luís–MA region, with tailings dams being an important component of this activity. The safety and stability of these dams are of paramount importance, requiring detailed geotechnical investigation to understand the characteristics of the soil and subsurface. In this context, obtaining data such as shear wave velocity (V_S) and soil resistances is crucial for the design, construction, and monitoring of these structures. The comparison between SCPTu (Seismic Cone Penetration Test) and MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) methods to determine V_S provides valuable information on the consistency and reliability of geotechnical measurements. Analyzing these methods in bauxite residue dam areas allows assessing the risks associated with seismicity in the region, highlighting the importance of data accuracy. Additionally, using tests such as SCPTu and SPT (Standard Penetration Test) assists in obtaining geotechnical data that ensure greater reliability in their use. Estimating geotechnical data such as V_S , shear modulus (G_o), tip resistance (q_c), and side friction (f_s) from data from other tests can ensure agility in decision-making. The results of 18 MASW tests, 28 SCPTu tests, and 19 SPT tests conducted in different Bauxite Residue Areas (ARB's) of Alumar were analyzed. Comparative analyses were conducted between the V_S and G_o obtained in MASW and SCPTu tests, as well as obtaining relationships between the resistance parameters of SCPTu and SPT tests. Equations were derived to estimate V_S with N_{SPT} , G_o with q_c , as well as correlations between q_c and f_s and N_{SPT} . Comparative analysis of shear wave velocity values obtained through MASW and SCPTu methods revealed consistency in the results. In this context, the significant potential of the SCPTu method in determining V_S values becomes evident, thus obviating the need for MASW testing when data from SCPTu are already available. This finding not only simplifies the process of obtaining geotechnical data but also optimizes resources by eliminating the need for additional tests when sufficient information from SCPTu is available. In the absence of seismic data obtained with SCPTu or MASW, estimating V_S from SPT tests can emerge as a viable alternative in geotechnical surveys, emphasizing that no estimated result replaces data obtained from specific tests. Although not as precise as direct seismic methods, this approach can offer a mitigating solution, especially in situations where limited resources or operational constraints make conducting more elaborate tests unfeasible. Equations for estimating these parameters from values obtained in other tests revealed significant agreement in some relationships, indicating reliable consistency in measurements. However, more pronounced variations in other relationships highlight the need for detailed investigations to understand the observed differences.

Palavras-chave: MASW, SCPTu, SPT, Tailings Dams, Mining, Shear Wave Velocity.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	32
2. OBJETIVOS.....	35
2.1. Objetivo geral.....	35
2.2. Objetivos específicos	35
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	36
3.1. Rejeitos de mineração	36
3.2. Barragens de rejeitos.....	37
3.2.1. Método de alteamento à montante.....	38
3.2.2. Método de alteamento à jusante	43
3.2.3. Método de alteamento pela linha de centro.....	44
3.2.4. Considerações sobre os métodos	45
3.3. Investigações geotécnicas	49
3.3.1. Ensaios de laboratório	50
3.3.2. Ensaios <i>in situ</i>	51
SPT - Standard Penetration Test	51
CPT– Cone Penetration Test.....	57
Dilatômetro – DMT.....	63
Palheta – Vane Test.....	65
Pressiômetro.....	68
3.4. Prospecção sísmica	70
3.4.1. Ondas.....	70
3.4.2. Tipos de ondas.....	71
Ondas internas.....	71
Ondas de superfície	74

3.4.3.	Fenômenos de propagação de ondas	76
3.4.4.	Ruídos sísmicos	78
3.4.5.	Sistema de aquisição de dados	80
3.4.6.	Métodos geofísicos aplicados à geotecnia.....	82
	Levantamento sísmico de reflexão.....	83
	Levantamento sísmico de refração.....	85
	Levantamento sísmico com ondas de superfície.....	86
3.5.	Ensaio MASW	90
3.6.	Ensaio SCPTu	92
	3.6.1. Ensaio sísmico down-hole.....	96
	3.6.2. Interpretação de ensaios com piezocone (CPTU)	97
	3.6.3. Interpretação de resultados de SCPTu.....	98
3.7.	Correlações entre métodos geofísicos e métodos convencionais.....	99
	3.7.1. Correlações entre V_S e N_{SPT}	99
	3.7.2. Correlações entre G_o e V_S	101
	3.7.3. Correlações entre S_u e V_S	102
	3.7.4. Correlações entre ν e V_S	102
	3.7.5. Correlações entre E e V_S	103
	3.7.6. Correlações entre q_c , f_s , q_t e V_S	103
	3.7.7. Correlações entre G_o e q_c	104
3.8.	Aplicações na engenharia geotécnica de ensaios SCPTu e MASW	104
3.9.	Considerações finais	110
4.	METODOLOGIA	112
	4.1. Área de estudo.....	112
	4.2. Geologia da Ilha do Maranhão.....	113
	4.2.1. Geologia regional	113

4.2.2.	Geologia local.....	116
4.2.3.	Solo.....	117
4.2.4.	Geomorfologia.....	118
4.3.	Localização dos ensaios.....	119
4.3.1.	Localização do MASW	119
4.3.2.	Localização dos SCPTu.....	120
4.3.3.	Localização dos ensaios SCPTu e SPT da ARB10	123
4.4.	MASW	124
4.4.1.	Aquisição.....	124
4.4.2.	Processamento	126
4.4.3.	Inversão de velocidade e cálculo do módulo G.....	128
4.5.	SCPTu	129
4.5.1.	Equipamentos utilizados.....	129
	Sistema de cravação	129
	Ponteira de piezocone	129
	Posição do elemento poroso e medida de poro-pressões	129
4.5.2.	Sistema para execução dos ensaios sísmicos Down-Hole.....	130
4.5.3.	Realização e interpretação dos ensaios.....	131
4.5.4.	Execução dos ensaios piezocone e sísmicos	134
4.6.	SPT.....	137
4.7.	Correspondência entre os ensaios MASW e SCPTu	138
4.8.	Correspondência entre os ensaios SCPTu e SPT da ARB10.....	141
4.9.	Correspondência entre os ensaios MASW, SCPTu e SPT da ARB10.....	141
4.10.	Análises realizadas	142
4.10.1.	Determinação das velocidades de ondas cisalhantes V_s	142
4.10.2.	Determinação dos módulos de cisalhamento do solo G_o	145

4.10.3.	Análise de correlação entre as variáveis q_c , f_s , N_{SPT} , IC e Z	146
	Teste de normalidade	146
	Análise de Correlação	147
4.10.4.	Correlação entre q_c , f_s e V_s dos ensaios SCPTu da ARB10.....	149
4.10.5.	Correlação entre q_c , f_s e N_{SPT} dos ensaios SCPTu e SPT da ARB10	149
4.11.	Fluxograma metodológico.....	150
5.	RESULTADOS	151
5.1.	Resultado das V_{S30} obtidas no MASW	151
5.2.	Resultado dos V_s pontual e G_o pontual.....	151
5.2.1.	Exemplo de cálculo pontual da R1 - Relação 1.....	152
5.3.	Resumo dos dados de todas as relações (R1 a R19) de V_s e G_o	153
5.4.	Análise dos resultados de V_s e G_o	154
5.4.1.	Análise de $MV_{S4} - V_{S30}$ do MASW.....	154
5.4.2.	Gráficos de $MV_{S2} \times MV_{S3}$	155
5.4.3.	Comparativo entre as MV_s 's	163
	Comparativo entre MV_{S2} e MV_{S3}	163
	Comparativo entre MV_{S3} e MV_{S4}	167
5.4.4.	Considerações sobre os comparativos das MV_s 's.....	170
5.4.5.	Comparativo entre os G_o 's.....	173
	Comparativo entre G_{o2} e G_{o5} (MPa).....	173
	Comparativo entre G_{o4} e G_{o5} (MPa).....	175
	Comparativo entre G_{o3} e G_{o5} (MPa).....	177
	Comparativo entre G_{o5} e G_{o6} (MPa).....	179
5.4.6.	Considerações sobre os comparativos dos G_o 's	181
5.5.	Comparativo entre V_s MASW, V_s SCPTu e N_{SPT}	185

N _{SPT}	5.6. Comparativo dos valores V _S MASW e V _S SCPTu com os V _S obtidos com os	187
com o q _c	5.7. Comparativo dos valores G _o obtidos com MASW, SCPTu com os obtidos	190
	5.8. Resultado das correlações entre as variáveis q _c , f _s , N _{SPT} , IC e Z.....	192
	5.9. Análise dos resultados das correlações entre as variáveis q _c , f _s , N _{SPT} , IC e Z	193
	5.9.1. Análise da correlação q _c com N _{SPT}	193
	5.9.2. Análise da correlação f _s com N _{SPT}	194
	5.9.3. Análise da correlação entre q _c e f _s	194
	5.10. Resultado das correlações entre q _c , f _s , V _S e N _{SPT}	194
	5.10.1. Correlação entre q _c , f _s e V _S dos ensaios SCPTu da ARB10.....	194
	Correlação entre V _S e q _c	194
	Correlação entre V _S e f _s	195
	5.10.2. Correlação entre q _c , f _s e N _{SPT} dos ensaios SCPTu e SPT da ARB10	196
	Correlação entre q _c e f _s	196
	Correlação entre q _c e N _{SPT}	198
	Correlação entre f _s e N _{SPT}	200
	5.10.3. Correlação entre q _c e f _s com (q _c /Pa)/N _{SPT}	203
	Correlação entre q _c e (q _c /Pa)/N _{SPT}	203
	Correlação entre f _s e (q _c /Pa)/N _{SPT}	204
	5.11. Análise dos resultados das correlações.....	205
	5.12. Considerações sobre os resultados	206
	6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	209
	6.1. Conclusões	209
	6.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	212
	7. REFERÊNCIAS	213

APÊNDICE A	227
APÊNDICE B	232
APÊNDICE C	287
APÊNDICE D	298
APÊNDICE E.....	365
APÊNDICE F.....	384
APÊNDICE G	426
APÊNDICE H.....	448
APÊNDICE I.....	459
APÊNDICE J	470

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Método de disposição à montante. Nierwinski (2019) adaptado de Vick (1983).....	39
Figura 2: Método de alteamento à jusante. Nierwinski (2019) adaptado de Vick (1983).	43
Figura 3: Método de alteamento pela linha de centro. Nierwinski (2019) adaptado de Vick (1983).	45
Figura 4: Esquema de execução do ensaio SPT (Schnaid e Odebrecht, 2012).....	52
Figura 5: Equipamento de cravação. Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).	59
Figura 6: Desenho esquemático de uma ponteira de piezocone (Davies & Campanella, 1995).	60
Figura 7: Lâmina utilizada no ensaio dilatômetro de Marchetti. Marchetti e Monaco, (2001).	63
Figura 8: Configuração do ensaio dilatométrico. Marchetti e Monaco (2001)	64
Figura 9: Dimensões usuais da palheta. Gauer (2015) adaptado de Chandler (1998).	66
Figura 10: Equipamento para execução de ensaio de palheta in situ. Ortigão e Collet (1987).	67
Figura 11: Curva Torque (N.m) x Rotação (graus). Bello (2011).....	68
Figura 12: Ensaio com Pressiômetro Pré-Furo (Modificada de Briaud, 1992).....	69
Figura 13: Diferentes formas de curvas pressiométricas em função da qualidade do furo. (adaptada ASTM D4719 -2000).....	70
Figura 14: Deformação e movimentação de partículas submetidas à passagem de ondas de corpo: (a) Ondas P e (b) Ondas S. Meira, (2022) modificado de Bolt (1982).	71
Figura 15: Deformação e movimentação de partículas submetidas à passagem de ondas de superfície: a) Ondas Rayleigh e (b) Ondas Love (modificado de Bolt, 1982).....	76
Figura 16: Identificação das ondas de corpo e superficiais em um registro sísmico de terremoto (modificado de Rocha, 2020)	76
Figura 17: Propagação das ondas sísmicas por: a) reflexão e b) refração (Milsom e Eriksen, 2011).....	77

Figura 18: Variação da amplitude do ruído sísmico ao longo do tempo para o subúrbio de Sapporo, no Japão (Okada, 2003).	80
Figura 19: Esquema da disposição de geofones em um ensaio sísmico de reflexão. AFC Geofísica (2023).....	84
Figura 20: Exemplo de seção sísmica obtida a partir do método de sísmica de reflexão (Boas, 2014).....	84
Figura 21: Processo de aquisição e processamento de dados da sísmica de refração (modificado de Guireli Netto <i>et al.</i> , 2020).....	85
Figura 22: Exemplo de produto sísmico gerado a partir da sísmica de refração (Santos et al., 2017).....	86
Figura 23: Processo de aquisição e processamento de dados sísmicos oriundos do método de ondas superficiais (Abreu et al., 2016).....	87
Figura 24: Processo de aquisição e processamento de dados da metodologia SASW (Nazarian, 1984).....	88
Figura 25: Processo de aquisição de dados sísmicos por meio da metodologia MASW (MASW, 2021).....	89
Figura 26: Produtos finais obtidos a partir da aquisição de dados pela metodologia MASW: (a) unidimensional e (b) bidimensional (Souza e Gandolfo, 2012).....	89
Figura 27: Etapas de um ensaio MASW (modificado de Strobbia, 2003).....	92
Figura 28: Variação da rigidez do solo em função da deformação. Rocha (2018) adaptado de Butcher e Powell (1996).....	93
Figura 29: Métodos sísmicos para determinação do módulo de cisalhamento do solo (Matthews <i>et al.</i> , 1996).....	94
Figura 30: Layout de um ensaio SCPTu. Rocha (2018) adaptado de Campanella e Stewart (1992).	96
Figura 31: Representação esquemática de um ensaio sísmico <i>down-hole</i> (Vitali, 2011).	97
Figura 32: Critérios de classificação dos solos para interpretação da estratigrafia, sistema de classificação de Robertson et. al. (2010).....	98
Figura 33: Exemplo de resultado de análise sísmica de um ensaio SCPTu. Fugro (2023).....	99

Figura 34: Perfis de V_s determinados por meio dos ensaios com a ponteita sísmica e SDMT realizados no campo experimental da Unesp de Bauru. Rocha (2018).....	110
Figura 35: Localização da Alumar no município de São Luís. (Google Earth, 2023).....	112
Figura 36: Localização da área das ARB's e identificação da área de estudo. (Google Earth, 2023).....	113
Figura 37: Mapa geológico-estrutural da Bacia Intracratônica de São Luís, onde está inserida a Ilha do Maranhão a ARB10 (Sousa, 2021). Em vermelho, a localização da refinaria da ALUMAR.....	114
Figura 38: Mapa Geológico da Ilha do Maranhão (Sousa, 2021). Em vermelho, a localização da refinaria da ALUMAR.....	115
Figura 39: Perfil de laterita podendo ter até 3 linhas de seixos (<i>stone lines</i>). Rodrigues et al. (1994a).	116
Figura 40: Distribuição esquemática dos distintos ambientes deposicionais quaternários e suas formações superficiais correlatas. Ramos et al. (2020).....	116
Figura 41: - Mapa Geológico para a região da refinaria da ALUMAR (CPRM, 2020).	117
Figura 42: Mapa Pedológico para a região da refinaria da ALUMAR (CPRM, 2020).	118
Figura 43: Mapa de Relevo para a região da refinaria da ALUMAR (CPRM, 2020).	119
Figura 44: Croqui de posicionamento dos levantamentos MASW. Fugro (2023).	120
Figura 45: Localização dos ensaios SCPTu utilizados na ARB 4. Alumar (2023).....	121
Figura 46: Localização dos ensaios SCPTu utilizados na ARB 5. Alumar (2023).....	121
Figura 47: Localização dos ensaios SCPTu utilizados na ARB 6. Alumar (2023).....	122
Figura 48: Localização dos ensaios SCPTu utilizados na ARB 9. Alumar (2023).....	122
Figura 49: Localização dos ensaios SCPTu utilizados na ARB 10. Alumar (2023).....	123
Figura 50: Localização dos ensaios SPT e SCPTu da ARB10. Alumar (2023).....	124
Figura 51: Disposição de arranjo e equipamento utilizado para armazenamento de dados em campo - MASW. Fugro (2023).	125
Figura 52: Fluxograma do passo a passo do processamento. Fugro (2023).	127
Figura 53: Etapas do processamento de dados do MASW.	128

Figura 54: Ponteira utilizada, onde se observa a posição dos três geofones, numa versão atualizada daquela proposta por Vitali (2011).	130
Figura 55: A fonte sísmica composta de barra de aço (a esquerda) e martelo (a direita) posicionada a frente do equipamento de cravação. Solo (2022).	131
Figura 56: Resultado típico de ensaio sísmico com ponteira com três geofones (adaptado de Vitali et al. (2012)).	132
Figura 57: Determinação do intervalo de tempo através do método do <i>cross-correlation</i> no domínio do tempo (adaptado de Campanella e Stewart, 1992).	133
Figura 58: Seleção de uma revolução da onda S para determinação de V_s (Vitali, 2011). ...	134
Figura 59: Execução do ensaio SCPTu 15 da ARB10. Solo (2022).	135
Figura 60: Resultado típico de um ensaio sísmico realizado com golpe em uma direção. Solo (2022).	136
Figura 61: Resultado típico de um ensaio sísmico realizado com golpe em duas direções. Solo (2022).	136
Figura 62: Execução de um ensaio SPT na ARB10.	138
Figura 63: Determinação das V_s pontuais no MASW.	143
Figura 64: Localização do resultado V_{s30} do MASW.	144
Figura 65: Teste de normalidade da correlação C1, entre o SCPTu 01 e o SPT 02.	147
Figura 66: Correlograma da correlação C1, entre o SCPTu 01 e o SPT 02.	148

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1: Fluxograma metodológico da pesquisa.....	150
--	-----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparativo de dispersão das 19 relações entre MV_{S2} e MV_{S3}	165
Gráfico 2: Comparativo de dispersão das relações com variação menor que 10 e 20% entre MV_{S2} e MV_{S3}	167
Gráfico 3: Comparativo de dispersão das 19 relações entre MV_{S4} e MV_{S3}	169
Gráfico 4: Comparativo de dispersão das relações com variação menor que 10 e 20% entre MV_{S4} e MV_{S3}	170
Gráfico 5: Plotagem da dispersão dos valores de G_{05} e G_{02}	175
Gráfico 6: Plotagem da dispersão dos valores de G_{05} e G_{04}	177
Gráfico 7: Plotagem da dispersão dos valores de G_{05} e G_{03}	179
Gráfico 8: Plotagem da dispersão dos valores de G_{06} e G_{05}	181
Gráfico 9: Comparativo entre valores de V_S MASW e V_S SCPTu com o N_{SPT}	186
Gráfico 10: Comparativo entre valores de V_S MASW, V_S SCPTu e V_S calculados com o N_{SPT}	189
Gráfico 11: Comparativo entre valores de G_o MASW, G_o SCPTu e G_o calculados com o q_c	191
Gráfico 12: Comparativo refinado entre valores de G_o MASW, G_o SCPTu e G_o calculados com o q_c	191
Gráfico 13: Correlação entre V_S e q_c dos SPCTu's da ARB10.	195
Gráfico 14: Correlação entre V_S e f_s dos SPCTu's da ARB10.	196
Gráfico 15: Correlação de f_s em função de q_c	197
Gráfico 16: Correlação de q_c em função de f_s	197
Gráfico 17: Correlação entre q_c e N_{SPT} dos SPCTu's e SPT's da ARB10.	199
Gráfico 18: Correlação reanalisada entre q_c e N_{SPT} dos SPCTu's e SPT's da ARB10.	200
Gráfico 19: Correlação entre f_s e N_{SPT} dos SPCTu's e SPT's da ARB10	201
Gráfico 20: Correlação reanalisada entre f_s e N_{SPT} dos SPCTu's e SPT's da ARB10.	202

Gráfico 21: Correlação entre q_c e $(q_c/Pa)/N_{SPT}$	204
Gráfico 22: Correlação entre f_s e $(q_c/Pa)/N_{SPT}$	205

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo comparativo dos principais métodos construtivos de barragens de rejeito. Cardozo, Pimenta e Zingano (2016).....	49
Tabela 2: Classificação dos solos. Adaptado da NBR 6484 (ABNT, 2020).....	53
Tabela 3: Principais equações disponíveis para estimar V_S a partir do SPT. Álvarez et al. (2022).	57
Tabela 4: Principais equações disponíveis parra estimar V_S a partir do CPT. Álvarez et al. (2022).	62
Tabela 5: Variação da velocidade de propagação das ondas P e S para diferentes tipos de meio. Modificado de Mari, (2019).	73
Tabela 6: Valores esperados da razão de Poisson, densidade e velocidades sísmica para solos e rochas. Foti <i>et al.</i> , (2017).	73
Tabela 7: Variação da frequência de ruídos para distintas fontes ambientais (Bonney-Claudet et al., 2006).	79
Tabela 8: Tipos de fontes sísmicas (modificado de Reynolds, 2011).	81
Tabela 9: Critérios de classificação dos solos para interpretação da estratigrafia, sistema de classificação de Robertson et. al. (2010).	98
Tabela 10: Correlações propostas entre N_{SPT} e V_S . Hanumantharao e Ramana (2008); Fatehnia et al (2015); Fernández (2017); Poulos, (2022).	100
Tabela 11: fatores que afetam o módulo de cisalhamento em solos arenosos e coesivos. Hardin e Drnevich, (1972).	101
Tabela 12: Propriedades comuns de solos argilosos. Hunt (1984).	102
Tabela 13: Tipos de solos e sua correlação com o Módulo de Poisson. Teixeira e Godoy (1996).	103
Tabela 14: Valores para o módulo de deformabilidade em argilas saturadas. Marangon (2018).	103
Tabela 15: Confrontação dos resultados do SCPT e MASW (V_S). Braz (2022)	109
Tabela 16: Correspondência entre todos os ensaios MASW e SCPTu das ARB's.	138

Tabela 17: Relação dos pontos MASW e SCPTu em estudo.....	140
Tabela 18: Correlação dos pontos SPT e SCPTu em estudo.....	141
Tabela 19: Correlação dos pontos MASW, SCPTu e SPT em estudo da ARB10.	142
Tabela 20: Método para determinação de MV_{S1} e MV_{S2}	142
Tabela 21: Método para determinação de MV_{S3}	144
Tabela 22: Método para determinação de G_{02} , G_{03} , G_{04} e G_{06}	145
Tabela 23: Método para determinação de G_{05}	145
Tabela 24: Resultado das V_{S30} obtidas no MASW.....	151
Tabela 25: Resultados compilados do SCPTu 02 da ARB4.	152
Tabela 26: Resultado das V_S pontuais do P25 do MASW.	152
Tabela 27: Resultado dos G_0 's pontuais do P25 do MASW.....	153
Tabela 28: Resumo de dados de V_S e G_0 obtidos e calculados para todas as relações.	153
Tabela 29: Comparativo entre MV_{S2} e MV_{S3} (m/s)	164
Tabela 30: Valores críticos para o controle de correlação (R^2), para níveis de significância ($1-\alpha$) e N observações. (Chasse e Brown, 1992).....	166
Tabela 31: Comparativo entre MV_{S3} e MV_{S4} (m/s).	168
Tabela 32: Resultados dos R^2 das análises de V_S	172
Tabela 33: Comparativo entre G_{02} e G_{05} (MPa).	173
Tabela 34: Comparativo entre G_{04} e G_{05} (MPa).	176
Tabela 35: Comparativo entre G_{03} e G_{05} (MPa).	178
Tabela 36: Comparativo entre G_{05} e G_{06} (MPa).	180
Tabela 37: Resultados dos R^2 das análises de G_0	184
Tabela 38: Dados das 6 relações entre V_S MASW, V_S SCPTU e N_{SPT}	185
Tabela 39: Valores de V_S calculados a partir do N_{SPT} utilizando equações proposta por outros autores.	188
Tabela 40: Índice de correlação entre os parâmetros q_c , f_s e N_{SPT}	193
Tabela 41: Resumo das equações propostas.....	207

Tabela 42: Quantitativo da campanha MASW. Fugro (2023).	228
Tabela 43: Resultados compilados do SCPTu 02 da ARB4.	385
Tabela 44: Resultado das V_s pontuais do P25 do MASW.	385
Tabela 45: Resultado dos G_o 's pontuais do P25 do MASW.	385
Tabela 46: Resultados compilados do SCPTu 03 da ARB4.	387
Tabela 47: Resultado das V_s pontuais do P26 do MASW.	387
Tabela 48: Resultado dos G_o 's pontuais do P26 do MASW.	387
Tabela 49: Resultados compilados do SCPTu 04 da ARB4.	389
Tabela 50: Resultado das V_s pontuais do P27 do MASW.	389
Tabela 51: Resultado dos G_o 's pontuais do P27 do MASW.	389
Tabela 52: Resultados compilados do SCPTu 14 da ARB5.	391
Tabela 53: Resultado das V_s pontuais do P18 do MASW.	391
Tabela 54: Resultado dos G_o 's pontuais do P18 do MASW.	391
Tabela 55: Resultados compilados do SCPTu 10 da ARB5.	393
Tabela 56: Resultado das V_s pontuais do P20 do MASW.	393
Tabela 57: Resultado dos G_o 's pontuais do P20 do MASW.	393
Tabela 58: Resultados compilados do SCPTu 06 da ARB5.	395
Tabela 59: Resultado das V_s pontuais do P22 do MASW.	395
Tabela 60: Resultado dos G_o 's pontuais do P22 do MASW.	395
Tabela 61: Resultados compilados do SCPTu 05 da ARB5.	397
Tabela 62: Resultado das V_s pontuais do P23 do MASW.	397
Tabela 63: Resultado dos G_o 's pontuais do P23 do MASW.	397
Tabela 64: Resultados compilados do SCPTu 03 da ARB5.	399
Tabela 65: Resultado das V_s pontuais do P24 do MASW.	399
Tabela 66: Resultado dos G_o 's pontuais do P24 do MASW.	399
Tabela 67: Resultados compilados do SCPTu 05 da ARB6.	401

Tabela 68: Resultado das V_s pontuais do P13 do MASW.....	401
Tabela 69: Resultado dos G_o 's pontuais do P13 do MASW.....	401
Tabela 70: Resultados compilados do SCPTu 02 da ARB6.....	403
Tabela 71: Resultado das V_s pontuais do P15 do MASW.....	403
Tabela 72: Resultado dos G_o 's pontuais do P15 do MASW.....	403
Tabela 73: Resultados compilados do SCPTu 07 da ARB6.....	405
Tabela 74: Resultado das V_s pontuais do P43 do MASW.....	405
Tabela 75: Resultado dos G_o 's pontuais do P43 do MASW.....	405
Tabela 76: Resultados compilados do SCPTu 01 da ARB9.....	407
Tabela 77: Resultado das V_s pontuais do P4 do MASW.....	407
Tabela 78: Resultado dos G_o 's pontuais do P4 do MASW.....	408
Tabela 79: Resultados compilados do SCPTu 05 da ARB9.....	410
Tabela 80: Resultado das V_s pontuais do P8 do MASW.....	410
Tabela 81: Resultado dos G_o 's pontuais do P8 do MASW.....	411
Tabela 82: Resultados compilados do SCPTu 07 da ARB9.....	413
Tabela 83: Resultado das V_s pontuais do P47 do MASW.....	413
Tabela 84: Resultado dos G_o 's pontuais do P47 do MASW.....	414
Tabela 85: Resultados compilados do SCPTu 08 da ARB9.....	416
Tabela 86: Resultado dos G_o 's pontuais do P47 do MASW.....	416
Tabela 87: Resultados compilados do SCPTu 10 da ARB10.....	418
Tabela 88: Resultado das V_s pontuais do P1 do MASW.....	418
Tabela 89: Resultado dos G_o 's pontuais do P1 do MASW.....	418
Tabela 90: Resultados compilados do SCPTu 13 da ARB10.....	420
Tabela 91: Resultado das V_s pontuais do P2 do MASW.....	420
Tabela 92: Resultado dos G_o 's pontuais do P2 do MASW.....	420
Tabela 93: Resultados compilados do SCPTu 15 da ARB10.....	422

Tabela 94: Resultado das V_s pontuais do P3 do MASW.	422
Tabela 95: Resultado dos G_o 's pontuais do P3 do MASW.	423
Tabela 96: Resultados compilados do SCPTu 02 da ARB10.	424
Tabela 97: Resultado das V_s pontuais do P49 do MASW.	424
Tabela 98: Resultado dos G_o 's pontuais do P49 do MASW.	424

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARB	Área de resíduo de bauxita
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
E	Módulo de elasticidade
f_s	Atrito lateral do cone
G	Módulo de cisalhamento
G_o	Módulo de cisalhamento inicial/ máximo
G_{o1}	Valor pontual de módulo de cisalhamento
G_{o2}	Média G_o pela média V_s
G_{o3}	Média G total pontual
G_{o4}	Média G_o em Z
G_{o5}	Média geral pelo SCPTu
G_{o6}	Média geral G_o pelo MASW
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
I_c	índice de conformidade do material (cone)
IP	Índice de plasticidade
IPEA	Instituto de Pesquisa Aplicada
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MASW	Análise multicanal de ondas superficiais
MV_{s1}	Média MASW para a mesma profundidade
MV_{s2}	Média total pontual com os dados MASW
MV_{s3}	Média SCPTu's
MV_{s4}	Média geral MASW (V_{s30})
N_{60}	Resistência relativa à penetração com eficiência de 60%
NBR	
N_{SPT}	Resistência relativa à penetração
pa	Pressão atmosférica, 100 kPa

PIB	Produto interno bruto
q_c	Resistencia de ponta do cone
R_f	Razão de atrito do cone
SCPTu	Ensaio de cone sísmico com leituras de poropressão
S_u	Resistência não drenada
u	Poropressão
V_s	Velocidade de onda cisalhante
V_{s30}	Velocidade média de onda cisalhante para 30 m de profundidade
ρ	Massa específica

1. INTRODUÇÃO

A atividade mineradora assume uma posição de destaque tanto no contexto global quanto no cenário nacional, desempenhando um papel significativo no desenvolvimento econômico dos países. Ao longo dos anos, esse setor tem buscado incessantemente a adoção de novas tecnologias, viabilizando a implementação de instalações de exploração mais extensas e, por conseguinte, o aumento na produção mineral. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2018), a produção mineral no Brasil alcançou a expressiva cifra de US\$ 32 bilhões em 2017, representando aproximadamente 16,8% do Produto Interno Bruto (PIB) industrial do país.

Entretanto, à medida que o avanço tecnológico possibilita um incremento na produção e conquistas mais rápidas, ele também acarreta um aumento na geração de resíduos. Conforme constatado por um estudo conduzido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA (2012), a produção anual de resíduos de mineração no Brasil cresceu de 202 milhões de toneladas em 1996 para 290 milhões de toneladas em 2005. Este mesmo estudo indica uma projeção de geração de resíduos da ordem de 348 milhões de toneladas em 2010, atingindo a marca alarmante de 684 milhões de toneladas em 2030.

Uma das principais preocupações diante desse cenário relaciona-se ao método de disposição dos resíduos de mineração. No Brasil, a prática comumente adotada durante o desenvolvimento dessa atividade mineral consiste no armazenamento por meio de reservatórios delimitados por diques ou barragens, muitas vezes elevadas à montante. Após o processo de beneficiamento, os resíduos resultantes são conduzidos hidraulicamente até os depósitos.

O elevado volume de resíduos gerado, implica na ocupação de áreas extensas para o armazenamento, podendo desencadear sérios impactos ambientais na região em que são implantados. Adicionalmente, a segurança das estruturas de contenção desses depósitos deve ser assegurada, pois rupturas eventuais podem ter repercussões em áreas significativas, comprometendo o meio ambiente e acarretando riscos para a vida humana.

Durante as fases de projeto, construção e monitoramento de barragens de resíduos, a utilização de diversos ensaios geotécnicos é imprescindível para a caracterização e acompanhamento do comportamento da estrutura, tanto durante a operação quanto na fase pós-operação (descaracterização). Diversos ensaios de campo e laboratório são realizados para caracterizar o solo natural nas áreas onde as estruturas serão construídas, visando conceber um projeto que assegure segurança e viabilidade econômica. Ensaios como o SPT (Standard

Penetration Test), Ensaio de palheta (Vane Test) e CPTu (Cone Penetration Test) são *in situ*, desempenhando um papel importante na obtenção de dados e caracterização.

Os ensaios de laboratório e de campo desempenham papéis complementares essenciais na caracterização geotécnica do solo, fornecendo dados cruciais para o projeto e monitoramento de estruturas geotécnicas, como barragens de resíduos. A integração dessas duas fontes de informação possibilita uma análise mais abrangente e completa das propriedades do solo, fundamental para o desenvolvimento de projetos robustos e seguros. No contexto específico das barragens de terra, onde a estabilidade e o comportamento do solo são de suma importância, a utilização de ensaios sísmicos, como o MASW e o SCPTu, oferece uma oportunidade adicional de otimização do projeto e monitoramento. Esses ensaios fornecem dados de velocidade das ondas cisalhantes, que podem ser utilizados na determinação de parâmetros geotécnicos importantes, como o módulo de cisalhamento do solo, contribuindo para uma análise mais eficiente das estruturas geotécnicas.

Nesse contexto, é notável a existência de uma ampla gama de equações que possibilitam estimar valores-chave, tais como resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s), velocidade de onda cisalhante (V_s), módulo de cisalhamento (G_o), índice N_{SPT} , entre outros parâmetros geotécnicos relevantes. Essas equações são desenvolvidas com base em correlações estatísticas e empíricas entre diferentes tipos de ensaios geotécnicos, oferecendo uma ferramenta valiosa para os engenheiros e projetistas geotécnicos na interpretação e utilização eficaz dos dados disponíveis.

As velocidades de onda cisalhantes, essenciais para a caracterização geotécnica dos solos, podem ser obtidas por meio de diversos ensaios, sendo os mais utilizados a refração sísmica, por meio da técnica de Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW), e o Cone de Penetração com Sísmica (SCPTu). No entanto, é importante ressaltar que ensaios realizados na mesma área podem gerar resultados diferentes, o que evidencia a necessidade de compreender as variações existentes em cada ensaio.

O Cone de Penetração (CPTu) é amplamente empregado na caracterização de solos de fundação para barragens, devido à sua praticidade e eficácia. A introdução da sísmica nesse ensaio, alterando para SCPTu, com a adição de geofones no equipamento, emerge como uma alternativa promissora, oferecendo potencial para proporcionar resultados comparáveis aos obtidos pelo ensaio MASW, porém com um melhor custo-benefício.

Diante desse cenário, torna-se imperativo avaliar os valores encontrados nos dois ensaios, bem como explorar outras possibilidades de obtenção da velocidade de onda cisalhante (V_s) por meio de parâmetros já conhecidos de outros ensaios, como a resistência de ponta, o atrito lateral ou o índice N_{SPT} . Essa abordagem multidisciplinar e integrada permite uma análise mais abrangente e confiável das características geotécnicas do solo, contribuindo para uma tomada de decisão fundamentada e eficiente no projeto e construção de barragens e outras estruturas geotécnicas.

A combinação e comparação de resultados de diferentes ensaios, como o MASW, SCPTU e SPT, são de extrema importância para a caracterização e o entendimento do comportamento dos solos estudados. A inferência de informações por meio de equações estatísticas representativas tende a aprimorar a eficiência das estruturas e do processo de planejamento e projeto de uma barragem de resíduos. Esses estudos contribuem para a consolidação dessas alternativas, oferecendo uma base sólida para uma abordagem mais segura e sustentável no desenvolvimento de projetos geotécnicos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Análise comparativa da aplicação dos ensaios de Penetração Padrão (SPT), Cone de Penetração Sísmica (SCPTu) e Análise Multicanal de Ondas Sísmicas (MASW) como ferramentas para auxílio da caracterização de solos em áreas de barragens de resíduos de bauxita no estado do Maranhão.

2.2. Objetivos específicos

- Comparar e analisar os resultados de velocidade de ondas sísmicas (V_s) obtidos pelo SCPTu e pelo MASW, identificando eventuais discrepâncias ou concordâncias nos dados em diferentes seções das áreas de solos e barragem da Alumar;
- Analisar as variações nos módulos de cisalhamento (G) em diferentes estratos de solo e barragem;
- Estudar a correlação entre dados de velocidade de ondas sísmicas com o N_{SPT} ;
- Comparar os valores obtidos de velocidades de onda cisalhante no SCPTu e MASW com os calculados a partir do N_{SPT} ;
- Comparar os valores obtidos de módulo de cisalhamento no SCPTu e MASW com os calculados a partir do q_c ;
- Avaliar a correlação entre resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s) com a velocidade de ondas sísmicas (V_s) obtidas por SCPTu e MASW;
- Avaliar a correlação entre resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s) com o índice N_{SPT} .

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.Rejeitos de mineração

O processo de extração mineral gera uma considerável quantidade de materiais que carecem de valor econômico e demandam uma destinação apropriada. Esses materiais são gerados em ambiente industrial, conferindo-lhes características de comportamento distintas em relação aos solos naturais, decorrente da adição de produtos químicos e britagem nos processos como é o caso da utilização da soda cáustica no beneficiamento da bauxita. Nas seções a seguir, são fornecidas definições para os resíduos sólidos originados na atividade de lavra de minérios, além de abordar as metodologias de disposição e as principais características geotécnicas desses materiais.

O desenvolvimento de atividades produtivas inevitavelmente resulta na geração de resíduos, uma característica inerente a esse processo. Na indústria mineradora, os resíduos gerados apresentam distinções em relação a outros setores, devido à presença de resíduos sólidos oriundos da extração (conhecidos como estéril) e do material proveniente do processo de beneficiamento (rejeito) (Nierwinski, 2019).

Conforme preconiza a Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos representam elementos resultantes das atividades humanas na sociedade, cujas propriedades inviabilizam o descarte na rede pública de esgoto ou corpos d'água. A legislação determina que a destinação apropriada desses resíduos deve contemplar opções como reutilização, compostagem, reciclagem, recuperação, aproveitamento energético, ou outra forma de destinação autorizada pelos órgãos competentes.

No contexto definido pela Lei 12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os rejeitos, segundo sua conceituação, são resíduos sólidos cujas opções de tratamento e recuperação por meios tecnológicos e economicamente viáveis foram exauridas. A legislação enfatiza que os rejeitos constituem elementos cujo destino final é exclusivamente a disposição ambientalmente adequada, inexistindo possibilidades de reciclagem ou reutilização.

De maneira abrangente, na indústria mineradora, é imperativo realizar a extração, trituração, pulverização e processamento de uma extensa quantidade de rochas para obter o produto final com valor comercial. Desse processo resultam resíduos sólidos, como pilhas de minérios de baixo teor, rochas, sedimentos, solos, entre outros, que compõem o material

denominado estéril. Adicionalmente, durante o processo de beneficiamento, uma significativa quantidade de finas partículas de rocha, variando em granulometria de areia fina a argila, é gerada. Essas partículas finas e ultrafinas, desprovidas de valor comercial, são denominados rejeitos de mineração (EPA, 1994; IBRAM, 2016).

Conforme apontado pelo IBRAM (2016), a geração de estéreis e rejeitos de mineração não é uniforme e depende da tipologia dos minérios extraídos. A extração de minérios não metálicos é uma fonte significativa de estéreis, enquanto a extração de minérios metálicos demanda um processo de transformação mineral, ou seja, um processo de beneficiamento que se torna um potencial produtor de rejeitos de mineração.

3.2. Barragens de rejeitos

A estratégia adotada para a disposição dos resíduos gerados pela atividade mineradora varia de acordo com o tipo específico de resíduo em consideração. Os estéreis, geralmente em estado sólido ou semissólido, costumam ser dispostos em pilhas. Desde a implementação das novas normas ambientais em 2010 (Lei 12.305), essas operações têm incorporado critérios geotécnicos para assegurar a segurança desses depósitos. Conforme indicado pelo IBRAM (2016), uma prática comum para reduzir os estéreis é a sua aplicação na recuperação de áreas afetadas por voçorocas e no preenchimento de cavas de minas desativadas.

Entretanto, a maior preocupação no processo de disposição concentra-se nos materiais provenientes do processo de beneficiamento (rejeitos), que não são mais passíveis de reaproveitamento. De acordo com Vick (1983), esses rejeitos são frequentemente descartados na forma de polpa (uma mistura de água e sólidos), facilitando o transporte por meio de fluxo gravitacional através de dutos até o local de disposição final.

Como alternativas à disposição dos rejeitos, o IBRAM (2016) menciona a possibilidade de utilização de minas subterrâneas, cavas desativadas de minas, pilhas, empilhamento a seco, disposição em pasta ou construção de barragens de contenção de rejeitos. A escolha entre essas opções, conforme Duarte (2008), depende de fatores como a natureza do processo de mineração, as condições geológicas e topográficas da região, as propriedades mecânicas dos materiais e o impacto ambiental dos contaminantes presentes nos rejeitos.

A disposição de rejeitos por meio de barragens de contenção é a abordagem mais comum na atualidade. Essas barragens podem ser construídas utilizando solos, estéreis e até mesmo o próprio rejeito, sendo a disseminação desse método atribuída à sua facilidade e economia na execução. Vick (1983) destaca que o método de alteamento de barragens torna-se

atrativo, pois os custos de construção são diluídos ao longo da vida útil do depósito, permitindo a execução de alteamentos conforme a demanda de armazenamento.

Embora a disposição de rejeitos por meio de barragens de contenção seja economicamente atraente, a metodologia construtiva e as características dos rejeitos tornam esses reservatórios suscetíveis a riscos ambientais. Uma investigação aprofundada das características do rejeito e um controle geotécnico rigoroso durante as fases de execução são de vital importância para garantir a estabilidade dessas estruturas. Davies e Martin (2000) destacam que o alteamento das barragens pode ser realizado com o uso dos próprios rejeitos, contanto que algumas premissas sejam respeitadas, incluindo a separação granulométrica entre as frações mais finas e grosseiras dos rejeitos, a implementação de sistemas eficientes de drenagem, e o controle cuidadoso na compactação e proteção superficial da barragem.

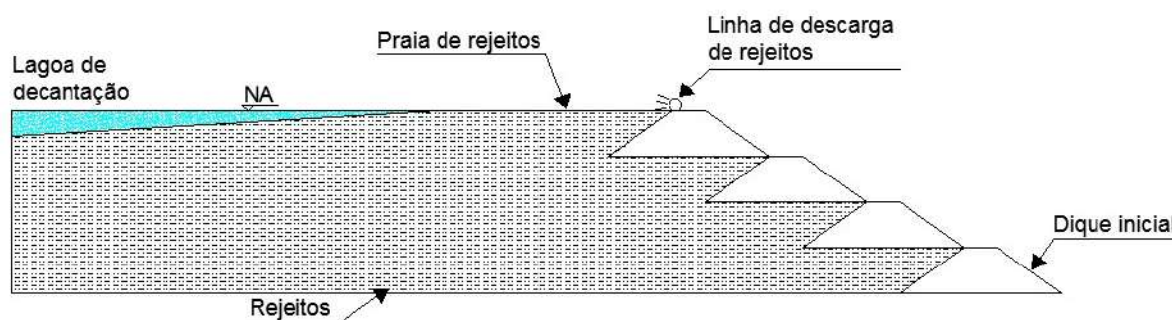
As barragens de contenção podem ser alteadas de três maneiras distintas: à montante, à jusante ou pela linha de centro. A escolha da metodologia adotada envolve vantagens e desvantagens, além de características que podem impactar na estabilidade da estrutura, conforme detalhado nos tópicos a seguir.

3.2.1. Método de alteamento à montante

O método de alteamento denominado à montante, é implementado a partir de um dique inicial, geralmente constituído por camadas compactadas de argila ou enrocamento. A partir da crista desse dique, os rejeitos são lançados em direção à montante da linha de eixo do dique de partida. Conforme observado por Martin e McRoberts (2002), na maioria dos casos, a fração grosseira, previamente separada hidráulica, é utilizada para construir as chamadas praias de rejeito, localizadas próximas à barragem, enquanto a fração mais fina compõe as lagoas de rejeitos, conforme esquematizado na Figura 1.

Ao atingir a cota da crista do dique de partida, inicia-se o processo de alteamento. Um novo dique, geralmente construído com os próprios rejeitos, é erguido sobre a praia da etapa anterior. Esse processo é repetido até alcançar a cota final de projeto. Vick (1983) enfatiza que um dos requisitos para a implementação desse modelo de barragem é que a praia de rejeitos deve proporcionar uma base competente para o próximo dique, e os materiais depositados nessa área não devem conter menos de 40 a 60% de partículas do tamanho de areias.

Figura 1: Método de disposição à montante. Nierwinski (2019) adaptado de Vick (1983).



Este método de disposição é o mais antigo e tem seu uso amplamente difundido em função de sua simples execução e economia. Entretanto, também é o método construtivo associado ao maior número de rupturas em barragens de rejeito em todo o mundo (Davies e Martin, 2000; Martin e Mcroberts, 2002). Devido à sua dinâmica de alteamento, o método à montante é frequentemente associado a uma maior complexidade e, em muitos casos, é apontado como uma possível causa de rupturas, como evidenciado nos recentes eventos envolvendo a falha de barragens no Brasil. É crucial ressaltar, no entanto, que são raras as barragens que, ao longo de sua execução, adotam exclusivamente um único método de alteamento (Cardozo, 2019).

No Brasil, há cerca de 80 barragens deste tipo em todo o País. Segundo Jornal O Sul (2019), desde o ano 2000 existem casos de rompimento de barragens. Alguns foram mais marcantes que outros, sendo eles:

- Nova Lima - MG, em 22 de junho de 2001 rompeu a Barragem dos Macacos de rejeito de minérios, pertencente à mineradora Rio Verde, deixando cinco mortos e 79 hectares de Mata Atlântica devastados. Cerca de 600 mil m³ de rejeitos atingiram o córrego Taquaras e 30 hectares de uma área de proteção ambiental na região no distrito de São Sebastião das Águas Claras;
- Cataguases - MG, em 29 de março de 2003 a barragem de rejeitos industriais rompeu e contaminou o Rio Paraíba do Sul, causando mortes de animais e carência de energia para mais de 600 mil pessoas;
- Miraf - MG, em 10 de janeiro de 2007, mais de 4 mil pessoas ficaram desabrigadas pois diques cederam e despejaram rejeitos de minério nas águas no Rio Muriaé, da mineradora Rio Pomba/Cataguases;

- Itabirito - MG, em 10 de setembro de 2014 barragem de minério da mineradora Herculano, matou três pessoas;
- Mariana - MG, em 5 de novembro de 2015 a maior tragédia ambiental da história brasileira. O rompimento da barragem da Samarco deixou 19 mortos e milhares de desabrigados, afetando todo o ecossistema da bacia do Rio Doce;
- Brumadinho - MG, em 25 de janeiro de 2019 ocorreu o rompimento da Barragem B1 da Mineradora Vale S.A com aproximadamente 13 milhões de toneladas de rejeito. Foi o maior acidente de trabalho do Brasil e o segundo maior desastre industrial do século, deixando 270 mortos

As tragédias de Brumadinho e Mariana marcam de forma sombria a história das barragens de rejeitos, evidenciando falhas críticas na gestão e segurança dessas estruturas. Em Mariana, o desastre de 2015 resultou na ruptura da Barragem de Fundão, desencadeando um dos maiores desastres ambientais do Brasil. A onda de lama tóxica liberada causou devastação em comunidades, destruição de ecossistemas e a morte de 19 pessoas, chamando a atenção global para os riscos associados às barragens de rejeitos (Armada, 2021).

O colapso da Barragem de Fundão, localizada no complexo de mineração de Germano em Mariana, sob administração da Samarco Mineração S/A (joint venture entre Vale S/A e BHP Billiton), impactou significativamente a bacia do rio Gualaxo do Norte, afluentes do rio do Carmo e, conseqüentemente, do rio Doce (De Souza, 2018). Segundo Souza *et al.* (2022) a ruptura da barragem de rejeitos de Fundão se deu por deslizamento fluido provocado por liquefação e foi consequência de uma cadeia de eventos e condições, pois, ao ocorrer tremores no subsolo, foi gerada uma carga adicional, acelerando o início do processo de liquefação, permitindo assim a ocorrência do deslizamento.

A falha estrutural liberou cerca de 40 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração, predominantemente compostos por minério de ferro e sílica. A onda resultante causou danos à barragem de Santarém e percorreu uma rota destrutiva, lembrando uma avalanche em escala e força (Leão; Santiago, 2022). O subdistrito de Bento Rodrigues foi soterrado, resultando na morte de 19 pessoas e no deslocamento de famílias. A trajetória dos rejeitos provocou destruição ambiental severa ao longo do rio Gualaxo do Norte, atingindo o rio do Carmo e, finalmente, o rio Doce, impactando diversas cidades (Leão; Santiago, 2022).

O desastre de Brumadinho, em 2019, na Mina Córrego do Feijão, apresentou colapso repentino na barragem, resultando em mais de 250 mortes e impacto ambiental catastrófico.

Análises pós-desastres revelaram falhas em avaliação de riscos, implementação de sistemas de alerta, manutenção e fiscalização inadequadas das barragens. Esses eventos levantaram questões cruciais sobre a regulamentação de barragens, a eficácia do monitoramento, e responsabilidade corporativa e ética na indústria de mineração (Castro; Ruchkys; Manini, 2019).

Dentre as causas identificadas, destacam-se a liquefação estática nos rejeitos e aspectos de risco inerentes ao projeto da barragem, como a construção a montante e a formação de um talude íngreme. Além disso, problemas como a deficiência na drenagem interna, que resultou em um alto nível de água, e a natureza frágil dos rejeitos, exacerbados por condições climáticas adversas, foram fatores cruciais. A análise revelou que a combinação desses elementos criou as condições perfeitas para o colapso da barragem (CPI BRUMADINHO, 2019).

Brumadinho e Mariana tornaram-se símbolos dos riscos associados às barragens de rejeitos, impulsionando a necessidade de reformulações abrangentes em segurança, legislação e gestão ambiental dessas estruturas. A reflexão sobre essas tragédias é crucial para evitar repetições e garantir a aplicação efetiva das lições aprendidas, assegurando a segurança e sustentabilidade nas práticas de mineração (Armada, 2021).

Dentre as principais causas de rupturas em barragens, particularmente aquelas construídas pelo método de alteamento à montante, podem-se destacar as seguintes (Lottermoser, 2010):

- **Liquefação:** Barragens alteadas à montante são suscetíveis à liquefação, especialmente quando os rejeitos depositados apresentam baixa densidade e altos níveis de saturação. Esse fenômeno pode ser desencadeado por terremotos, detonações em minas próximas ou movimentação de equipamentos pesados nas proximidades. Recomenda-se evitar o uso desse método em regiões de alta sismicidade.
- **Altas taxas de alteamento:** Taxas de alteamento muito rápidas podem gerar poropressões elevadas nos rejeitos, reduzindo a estabilidade da barragem e potencialmente causando rupturas. Recomenda-se uma taxa segura de alteamento entre 4,5 a 9 metros por ano, alertando para os perigos associados a taxas mais elevadas, como 15 metros por ano.
- **Ruptura da fundação:** Se a base da barragem não apresentar capacidade de suporte adequada, podem ocorrer movimentos ao longo de planos de ruptura.

Barragens alteadas à montante são construídas sobre materiais previamente depositados e não consolidados, o que nem sempre oferece uma boa capacidade de suporte.

- **Níveis de água excessivos:** A ruptura pode ocorrer se a superfície freática atingir níveis críticos, especialmente quando a praia de rejeitos entre a lagoa e a crista da barragem se torna muito pequena. Barragens à montante enfrentam desafios na implementação de um eficiente sistema interno de drenagem para controlar a superfície freática, tornando-se suscetíveis a inundações, alta pluviosidade, derretimento rápido de neve e gestão inadequada.
- **Altas taxas de infiltração:** A infiltração excessiva no interior ou abaixo da barragem pode provocar erosão ao longo dos canais de fluxo, podendo levar à ruptura. Uma alternativa para reduzir os riscos envolve a instalação de zonas de drenagem horizontal durante a construção do dique de partida, mantendo baixas poropressões no interior do reservatório, desde que garantida a desobstrução dos drenos durante os processos de alteamento (Vick, 1983; EPA, 1994).

Lottermoser (2010) destaca que a prevenção de rupturas em barragens de rejeito demanda uma caracterização geotécnica eficaz dos rejeitos e uma compreensão detalhada dos riscos naturais locais. O projeto dessas barragens deve ser elaborado considerando condições geológicas e climáticas extremas. Na realidade brasileira, é comum observar a utilização de combinações de técnicas de alteamento em barragens em operação. Nos casos mais recentes de grande relevância, como Mariana e Brumadinho, os perfis das barragens indicam o uso inicial do método de alteamento por Linha de Centro (Silva, 2010), evidenciando a preferência por estratégias variadas na prática construtiva dessas estruturas.

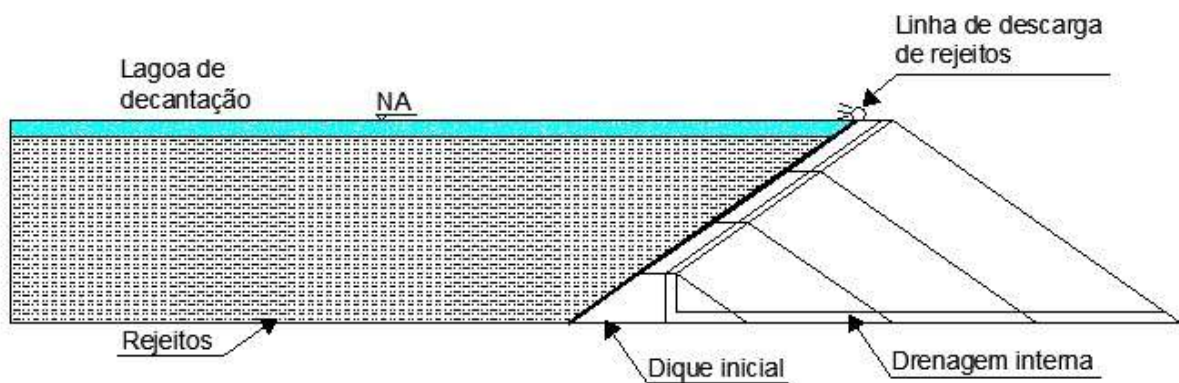
A Lei nº 14.066/2020 alterou a Lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), acrescentando importantes determinações específicas para barragens a montante. O Art. 2º-A. Fica proibida a construção ou o alteamento de barragem de mineração pelo método a montante. E em seu § 2º determina que o empreendedor deve concluir a descaracterização da barragem construída ou alteada pelo método a montante até 25 de fevereiro de 2022, considerada a solução técnica exigida pela entidade que regula e fiscaliza a atividade minerária e pela autoridade licenciadora do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama).

3.2.2. Método de alteamento à jusante

O método de alteamento à jusante foi concebido para mitigar os riscos associados ao método de alteamento à montante. Seus requisitos de projeto assemelham-se aos necessários para a construção de barragens convencionais de armazenamento de água. A metodologia executiva inicia-se com a construção de um dique de partida composto por material de empréstimo compactado. Conforme destaca a EPA (1994), esse dique pode ser constituído por areias e pedregulhos permeáveis, ou pode incluir um núcleo predominantemente formado por siltes e argilas, com o intuito de minimizar a infiltração. Caso materiais de baixa permeabilidade sejam empregados, um sistema de drenagem interno deve ser incorporado ao projeto, visando a eficiência na contenção de grandes volumes de água em contato com o talude de montante, sem comprometer a estabilidade da estrutura.

Após a construção do dique inicial, os rejeitos são lançados à montante até que a borda livre seja atingida. O processo de alteamento ocorre pela construção de novos diques sobre a face inclinada, à jusante do dique de partida. A linha central do topo da barragem se desloca à jusante durante os estágios de alteamento, como ilustrado na Figura 2 (Vick, 1983).

Figura 2: Método de alteamento à jusante. Nierwinski (2019) adaptado de Vick (1983).



Os diques de alteamento podem ser compostos por material de empréstimo ou pelo próprio rejeito, desde que haja quantidade suficiente e seja realizada a separação granulométrica adequada. Uma das principais vantagens desse método, destacada por Vick (1983) e Klohn (1981), é o controle total sobre o lançamento e a compactação do material, sem depender de suporte em rejeitos soltos, como no método de alteamento à montante. Além disso, durante todo o processo construtivo, é possível instalar um sistema de drenagem para controle das superfícies freáticas, estendendo-o à medida que a barragem ganha altura.

Nierwinski (2019) destaque que embora o método de alteamento à jusante apresente vantagens significativas em relação à estabilidade, algumas desvantagens incluem a necessidade de grandes quantidades de material para a construção dos diques de alteamento e a exigência de extensas áreas de base para esses diques.

Embora a exigência de extensas áreas de base pode ser considerada uma desvantagem econômica, dada a quantidade adicional de terra necessária para a construção, em termos de segurança, essa exigência pode ser interpretada como uma medida preventiva. A utilização de extensas áreas de base pode proporcionar uma distribuição mais uniforme de cargas e reduzir os riscos de instabilidade, contribuindo assim para a segurança da barragem. Portanto, enquanto há implicações econômicas a considerar, a exigência de extensas áreas de base pode ser vista como um aspecto que contribui positivamente para a segurança da estrutura.

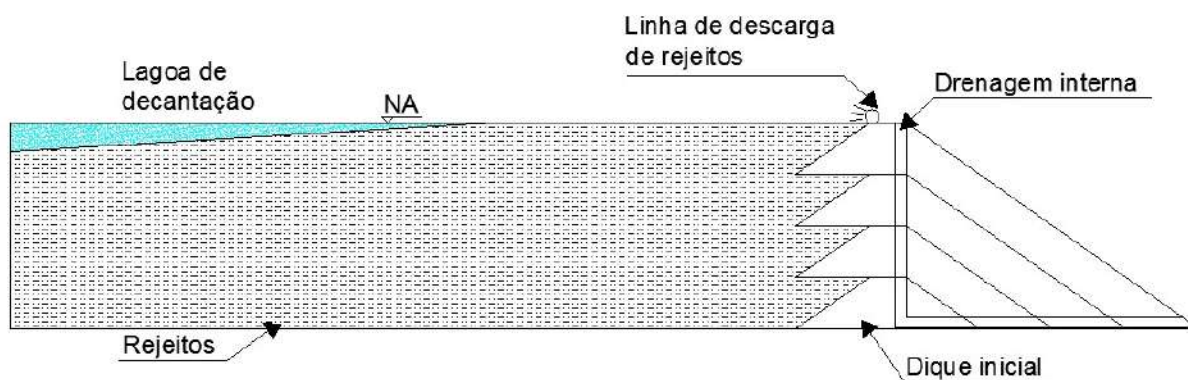
A existência de restrições de extensões de área para a construção de barragens em algumas regiões, devido a limitações ambientais como a proximidade de nascentes, elevado nível de água dos lençóis freáticos ou reservas de proteção ambiental, representa um desafio substancial na adoção do método de alteamento à jusante. Essas restrições ambientais não apenas destacam a complexidade na implementação dessa técnica, mas também ressaltam a necessidade premente de equilibrar o desenvolvimento de infraestrutura com a preservação de ecossistemas sensíveis e a gestão responsável dos recursos.

3.2.3. Método de alteamento pela linha de centro

Conforme apresentado por Vick (1983), o método de elevação por linha central surge como uma opção intermediária entre os métodos de elevação à montante e à jusante, com o propósito de atenuar as desvantagens inerentes a ambos.

A abordagem executiva desse método inclui a construção de um dique inicial, onde o rejeito é disposto à montante a partir da crista do dique, assemelhando-se ao método de elevação à montante. O processo de elevação ocorre com a construção de um novo dique acima do dique inicial, mantendo a mesma linha de centro. O dique de elevação apoia-se à montante sobre a praia de rejeitos e à jusante sobre o dique da etapa anterior, conforme ilustrado na Figura 3. Durante as fases construtivas, é possível incorporar zonas de drenagem para gerenciar a superfície freática e dissipar as poropressões (Vick, 1983; EPA, 1994).

Figura 3: Método de alteamento pela linha de centro. Nierwinski (2019) adaptado de Vick (1983).



Este método de elevação não demanda uma extensa praia de rejeitos e possibilita a utilização de materiais com quantidades relativamente baixas de partículas do tamanho de areias. Com isso, os processos de elevação podem ser conduzidos de maneira mais expedita em comparação aos métodos à montante e à jusante. A utilização de materiais granulares torna-se necessária quando se busca uma drenagem rápida para sustentar a construção de equipamentos (EPA, 1994).

As barragens elevadas por linha central exibem boa resistência sísmica, desde que os diques sejam devidamente compactados e o sistema de drenagem seja instalado corretamente. Observando essas condições, mesmo em situações em que os rejeitos à montante da barragem passem por liquefação, os diques permanecerão estáveis em função da adequada compactação e às características de drenagem (Nierwinski, 2019).

No tocante às desvantagens desse método, Troncoso (1997) destaca a possibilidade de perda de confinamento na porção superior do talude quando as inclinações à montante são excessivamente elevadas. Esse cenário pode resultar em fissuras, erosão e aumento das poropressões. Adicionalmente, desafios durante a execução e a quantidade substancial de material necessária para os processos de elevação podem impactar negativamente nos custos associados a essa alternativa.

3.2.4. Considerações sobre os métodos

Apesar da crescente oposição à adoção da técnica de alteamento à montante, evidenciada por proibições já implementadas em países como Canadá, Chile e Brasil, é crucial salientar alguns pontos relevantes. Do ponto de vista da engenharia, o Método de Montante proporciona uma economia significativa de recursos e uma menor área impactada durante a construção, desde que a estabilidade seja assegurada.

Segundo Cardozo (2019), o Método de Montante é indicado para barragens de pequeno porte, com alteamentos de até 10 metros por ano. Especificamente aos menores impactos pode-se citar: (i) menor área ocupada pelo barramento (em comparação com os outros métodos de alteamento), (ii) menor área ocupada pelo rejeito (em comparação com a opção de disposição sem barramento), (iii) menores custos e consumo de energia (em comparação com as opções de deposição a seco do rejeito, que incluem secagem/filtragem), entre outras.

De acordo com Barrera, Valenzuela e Campaña (2011), no Chile, o método a montante foi proibido em 1970, após eventos de rupturas de barragens decorrentes de sismos significativos. Este decreto estabeleceu rigorosos controles, incluindo a distância do lago de rejeitos (linha de praia) em relação à barragem, monitoramento piezométrico e adoção de um fator de segurança mínimo de 1,2 para análise pseudo-estática.

Em relação aos impactos sísmicos, Silva (2010) explana que tais eventos provocam tensões cisalhantes nos barramentos, denominadas tensões cisalhantes sísmicas, as quais estão diretamente relacionadas à aceleração máxima imposta pelo sismo. Essas tensões devem ser somadas às tensões cisalhantes estáticas durante a análise de liquefação, considerada um "gatilho" para a ruptura do barramento.

Cardozo (2019) faz uma crítica que apesar de ter havido ampla divulgação na mídia sobre uma possível correlação entre as rupturas recentes de barragens no Brasil e a prática comum de desmonte de rochas utilizando explosivos na mineração, é importante ponderar que, de acordo com profissionais da área e boas práticas no desmonte de rochas, é improvável que haja efeitos prejudiciais de sismos induzidos por desmontes. Profissionais consideram que isso se deve às atenuações decorrentes das distâncias entre as detonações e os barramentos, bem como às mudanças nos meios (como maciço rochoso, fraturas do maciço e solo). Barros (2008) é referência nesse contexto, apresentando equacionamentos relacionados ao desmonte de rochas e suas atenuações, abrangendo relações entre velocidades de partículas, aceleração, frequência, carga de explosivos, distância da detonação, tipo de meio, entre outros.

Estudos com modelos analíticos e numéricos (Cardozo, Peña e Zingano, 2018; e Cardozo e Ruver, 2019) apontam que o Método de Montante é adequado e estável (em termos de projeto) desde que respeitada geometria adequada (conservadora) dos alteamentos e principalmente garantida a eficiência do sistema de filtro/dreno, impedindo acúmulos excessivos de poropressão e gradiente hidráulico.

De acordo com Cardozo (2019) uma abordagem adicional que se revela eficaz no controle do fluxo hídrico interno das barragens é o distanciamento da praia de rejeito, que representa a transição entre a fase sólida e líquida do material descartado, ou a lâmina d'água do barramento. Ao afastar essa transição, ocorre um aumento no percurso que a fase líquida deve percorrer no rejeito e barramento antes de emergir, resultando na redução do gradiente hidráulico. Essa redução, por sua vez, contribui para a diminuição do risco de ocorrência de fenômenos como liquefação e *piping*. Além disso, essa medida auxilia na redução da vazão de percolação pela barragem. Massad (2010) enfatiza que a diminuição do gradiente hidráulico e da vazão na saída, ou a jusante, do barramento, representa uma estratégia para mitigar o risco desses eventos.

No caso da liquefação, é necessário destacar não apenas a possibilidade de sua ocorrência devido a excessos no gradiente hidráulico, mas também em decorrência de sismos e sobrecargas estáticas. Ambos os cenários são reconhecidos como "gatilhos" para a ruptura de barramentos, especialmente em áreas geotectônicas propensas a abalos sísmicos significativos, e quando ocorre liquefação "estática" devido a carregamentos rápidos que impedem a dissipação de poropressões (condição não drenada).

A fim de avaliar a integridade de uma barragem durante as fases de projeto, construção e operação, são conduzidos ensaios para determinar a velocidade de ondas cisalhantes (V_s) do solo. Esses ensaios possibilitam uma análise da rigidez das estruturas, permitindo uma avaliação do comportamento em resposta à aceleração das partículas e a subsequente análise do comportamento da estrutura após eventos sísmicos.

De acordo com Silva (2010), o adensamento ao longo do tempo torna barragens mais antigas menos suscetíveis à liquefação. Portanto, compreende-se que a taxa de deposição de rejeitos, permitindo um adensamento adequado, é uma medida importante a ser adotada. Dessa forma, a atenção voltada para a taxa de disposição e para os processos de alteamento é justificada como uma medida preventiva importante.

Em resumo, a

Tabela 1 oferece uma visão comparativa dos principais métodos construtivos de barragens de rejeito, destacando algumas de suas características distintivas.

Tabela 1: Resumo comparativo dos principais métodos construtivos de barragens de rejeito. Cardozo, Pimenta e Zingano (2016).

	Montante	Jusante	Linha de centro
Tipo de rejeito	Baixa densidade para que ocorra segregação	Qualquer tipo	Areias de lamas de baixa plasticidade
Descarga de rejeitos	Periférica	Independente	Periférica
Armazenamento de água	Não recomendável para grandes volumes	Bom	Aceitável
Resistência a abalos sísmicos	Baixa	Boa	Aceitável
Alteamentos	Ideal menos 10 m/ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição
Vantagens	Menor custo, utilizado onde há restrição de área	Maior segurança	Flexibilidade construtiva
Desvantagens	Baixa segurança, suscetibilidade à liquefação e <i>piping</i>	Grande quantidade de material requerido, proteção do talude a jusante apenas na configuração final	Necessidade de eficiente sistema de drenagem

3.3. Investigações geotécnicas

As investigações geotécnicas de solos desempenham um papel vital na engenharia civil, fornecendo informações essenciais sobre as características e comportamentos dos solos que suportam a infraestrutura construída. Estas investigações, realizadas por meio de ensaios de campo e laboratório, visam avaliar propriedades geotécnicas fundamentais, incluindo resistência, permeabilidade, compressibilidade e estrutura do solo.

No âmbito da engenharia geotécnica, compreender as condições do solo é necessário para o planejamento, design e construção de estruturas sólidas e duradouras. Desde a fundação de edifícios até a construção de barragens e pontes, as investigações geotécnicas proporcionam uma visão aprofundada do substrato terrestre, permitindo que os engenheiros tomem decisões embasadas para garantir a estabilidade e segurança das obras.

Este processo envolve técnicas avançadas, como sondagens, ensaios de penetração, amostragem de solo e análises laboratoriais. A interpretação desses resultados não apenas fornece dados cruciais para a concepção de projetos, mas também ajuda a antecipar desafios geotécnicos que possam surgir durante e após a construção.

3.3.1. Ensaios de laboratório

Na engenharia geotécnica, a análise do comportamento do solo é de suma importância, e a caracterização do solo por meio de ensaios de laboratório desempenha um papel fundamental nesse contexto. Tais ensaios oferecem dados essenciais para embasar decisões técnicas em projetos geotécnicos, abordando uma ampla gama de propriedades, desde a distribuição granulométrica até os limites de consistência, bem como a resistência ao cisalhamento e a deformação sob carga constante. Essas informações são determinantes para assegurar a eficácia e a segurança na concepção e execução de estruturas de engenharia duráveis.

A análise granulométrica revela a distribuição dimensional das partículas no solo, impactando diretamente a compactação, permeabilidade e resistência do material. Paralelamente, os limites de Atterberg definem os estados dos solos em - sólido, plástico e líquido - fornecendo dados essenciais sobre compactação e liquefação. Parâmetros resultantes de ensaios, como densidade máxima e umidade ótima obtidos por meio de ensaios de compactação, são necessários para o estudo da estabilidade de estruturas geotécnicas. Da mesma forma, o ensaio de cisalhamento direto oferece informações sobre a resistência ao deslizamento, enquanto o ensaio triaxial proporciona uma avaliação abrangente da resistência em condições variáveis de confinamento. O ensaio de adensamento, por sua vez, fornece dados relativos às deformações sob cargas permanentes, contribuindo de forma significativa para garantir a estabilidade ao longo do tempo.

Apesar de serem instrumentais na obtenção de diversos parâmetros do solo, como permeabilidade, densidade, ângulo de atrito, resistência ao cisalhamento, entre outros, os ensaios de laboratório apresentam limitações, sobretudo na capacidade de reproduzir fielmente as condições às quais o solo está submetido em campo. A amostragem emerge como uma das principais fontes de imprecisões durante a condução desses ensaios, tornando essencial a realização de ensaios *in situ* para assegurar parâmetros e condições que permitam uma análise mais acurada das características do solo.

3.3.2. Ensaio *in situ*

Os ensaios *in situ*, ou ensaios realizados no local (em campo), desempenham um papel importante na caracterização e compreensão das propriedades do solo no ambiente natural em que ele se encontra. Diferentemente dos ensaios de laboratório, que podem apresentar limitações na reprodução fiel das condições reais do solo, os ensaios *in situ* oferecem informações diretamente relacionadas ao comportamento do solo em seu contexto original.

A maioria dos ensaios *in situ* proporciona dados que, por meio de equações, correlacionam-se com outros parâmetros de resistência, proporcionando uma compreensão mais aprofundada do comportamento do solo. Essa abordagem integrada é essencial para uma avaliação completa e precisa das propriedades geotécnicas do solo.

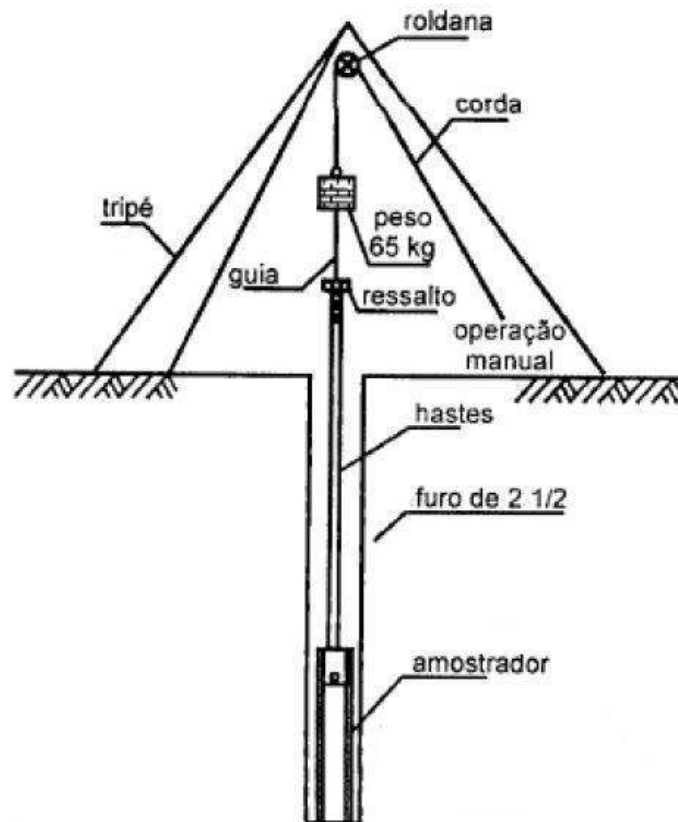
SPT - Standard Penetration Test

A sondagem de simples reconhecimento, ou SPT (*Standard Penetration Test*), é um dos ensaios de investigação do subsolo mais utilizados no Brasil e em grande parte do mundo. Isto devido à sua fácil aplicação e facilidade de manejo, não necessitando de mão de obra especializada para sua execução, conseqüentemente, reduzindo os custos de operação. Além de possibilitar a amostragem do solo para caracterização, o ensaio fornece ainda o índice de resistência à penetração (N_{SPT}). Este índice é muito utilizado na previsão do comportamento do solo sob ação de carregamentos (Belicanta e Ferraz, 2000).

A realização da sondagem à percussão SPT é considerada um método de investigação direta do subsolo que permite identificar as camadas estratigráficas que o compõem, assim como suas profundidades e espessuras, permitindo detectar o nível do lençol freático, fornece uma classificação tátil-visual do solo e obter a medida de resistência inferida, N_{SPT} .

O Ensaio SPT objetiva a medida de resistência dinâmica N_{SPT} oferecida pelo solo à cravação do amostrador, aliada a uma sondagem de simples reconhecimento. O furo de sondagem é executado por tradagem e circulação de água utilizando um trépano de lavagem como ferramenta de escavação (Lobo, 2009). As amostras representativas do solo são coletadas a cada metro de profundidade por meio de um amostrador padrão. A Figura 4 ilustra o esquema de execução do ensaio SPT. No Brasil, o ensaio SPT é normatizado pela ABNT NBR 6484/2020, em termos de equipamentos e procedimentos.

Figura 4: Esquema de execução do ensaio SPT (Schnaid e Odebrecht, 2012).



De acordo com a ABNT NBR 6484/2020, o princípio do SPT consiste na perfuração e cravação dinâmica do amostrador-padrão, a cada metro, resultando na determinação do tipo de solo e de um índice de resistência, bem como na observação do nível da água dentro do furo de sondagem.

A norma ainda diz que para a definição desses resultados, ela incorpora dois sistemas de ensaio: o Sistema Manual e o Sistema Mecanizado. Os dois sistemas não necessariamente fornecerão os mesmos resultados do índice de resistência, abrindo espaço para variações de resultados. Diferentemente da norma anterior de 2001, a atualização da norma de sondagem trouxe, além do sistema de sondagem manual, a normatização do processo de sondagem mecanizada.

A atualização trouxe algumas especificações não previstas anteriormente, destaca-se:

- A especificação do peso do martelo foi normatizada com 65 kg de massa, independente da forma;
- O apoio da torre, antes podia ser feito na forma de tripé, atualmente deve ter 4 apoios, o que garante maior estabilidade da estrutura;
- Com a atualização da norma ocorreu a especificação do trépano;

- Passou a definir o comprimento mínimo de 500mm para a recuperação do corpo do amostrador padrão;
- A cabeça de bater para o processo de SPT mecanizado é mais pesado que no SPT manual, podendo aumentar assim a discrepância entre os tipos de ensaios.

Além disso, esta norma possui finalidade de identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento de solos. A Tabela 2 apresenta a classificação dos solos com base no seu estado de compactidade e consistência.

Tabela 2: Classificação dos solos. Adaptado da NBR 6484 (ABNT, 2020)

Solo	Índice de resistência à penetração	Designação
Areias e siltes arenosos	$N_{SPT} \leq 4$	Fofa (o)
	$5 < N_{SPT} < 8$	Pouco compacta (o)
	$9 < N_{SPT} < 18$	Medianamente compacta (o)
	$19 < N_{SPT} < 40$	Compacta (o)
	$N_{SPT} > 40$	Muito compacta (o)
Argilas e siltes argilosos	$N_{SPT} \leq 2$	Muito mole
	$3 < N_{SPT} < 5$	Mole
	$6 < N_{SPT} < 10$	Média (o)
	$11 < N_{SPT} < 19$	Rija (o)
	$20 < N_{SPT} < 30$	Muito rija (o)
	$N_{SPT} > 30$	Dura (o)

O SPT é um ensaio que reconhecidamente apresenta consideráveis variações em sua execução, muito em decorrência do próprio procedimento, podendo resultar em dados distintos apenas com a alteração da região ou da empresa. Essas variações de valores, grandezas, levaram a estudos experimentais que chegaram à conclusão que para comparar N_{SPT} é mandatório estabelecer considerações ao nível de energia que é atribuída a cada golpe do martelo. Com isso, verificou-se a necessidade de padronizar os resultados obtidos no ensaio, evitando a utilização de valores inapropriados. Atualmente, a comunidade técnica internacional propõe a normalização do número de golpes de acordo com o padrão estadunidense, através da adoção

do N_{60} , que recebe essa nomenclatura devido ao fato da energia de cravação transferida pelo impacto do martelo ser de 60% do valor teórico (Schnaid e Odebrecht, 2012). A padronização é realizada através de uma formulação simples de regressão linear, como mostra a Equação 1.

$$N_{60} = N_{SPT} \cdot \frac{E_R}{0,60} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

N_{60} = número de golpes corrigidos para 60% de eficiência;

N_{SPT} = número de golpes SPT;

E_R = eficiência de referência do SPT utilizado.

De acordo com Cavalcante (2002) e Odebrecht (2003) a eficiência do SPT manual brasileiro é de 80%. Assim, o valor de N_{SPT} do sistema manual brasileiro pode ser corrigido para o valor de N_{60} , normatizado pela ABNT NBR 16796 de 10/2020, onde o valor é encontrado pela multiplicação do valor N_{SPT} padrão pela razão entre as eficiências dos sistemas, como pode ser visualizado na Equação 2.

$$N_{60} = N_{SPT} \frac{0,80}{0,60} \quad \text{Equação 2}$$

Em seu estudo, Cunha (2016) teve como objetivo determinar correlações entre a resistência à penetração do ensaio SPT (N_{SPT}) e a resistência de ponta (q_c) e resistência lateral (f_s) do ensaio CPTu. Foram utilizados ajustes lineares e uma abordagem geoestatística simplificada, resultando em correlações a partir de 88 sondagens SPT e oito ensaios CPTu realizados em um depósito de areia siltosa na cidade de Natal, no nordeste do Brasil, até profundidades de 22 m. Os valores de N_{SPT} foram corrigidos para a energia padrão internacional de 60%. A seleção de dados utilizou critérios geoestatísticos, como o alcance do variograma para demarcar a zona de influência das sondagens, além da aplicação de métodos como IDW (inverso do quadrado da distância) e Krigagem ordinária.

A análise variográfica revelou grande dispersão nos valores dos ensaios SPT, com pouca correlação espacial, exceto para o aumento dos valores de N_{SPT} com a profundidade. Zonas de influência foram estabelecidas ao redor de cada ensaio CPT, demarcadas pelo alcance do semivariograma. Foram obtidas correlações lineares entre q_c e N_{60} , com coeficientes de determinação entre 0,70 e 0,92, demonstrando alta qualidade.

Correlações lineares também foram obtidas para a resistência lateral do cone (f_s) em relação à razão $(q_c/Pa)/N_{60}$, sendo P_a a pressão atmosférica, com coeficientes de determinação

entre 0,44 e 0,81. As correlações obtidas pela interpolação perfil SPT via IDW situaram-se entre $k = 0,26$ e $0,48$ MPa, com coeficientes de determinação entre 0,67 e 0,89. A krigagem ordinária apresentou resultados semelhantes, com valores entre 0,26 MPa e 0,54 MPa e coeficientes de determinação entre 0,63 e 0,86.

As correlações lineares utilizando todos os pontos disponíveis forneceram valores de $k = 0,38$ MPa, $0,37$ MPa e $0,36$ MPa para os métodos do alcance do variograma, IDW e krigagem ordinária, respectivamente, com coeficientes de determinação de 0,73, 0,70 e 0,67. Os resultados para o parâmetro k foram consistentes entre as abordagens e ficaram abaixo da faixa de valores proposta na literatura para solos brasileiros equivalentes, aproximando-se de algumas faixas propostas internacionalmente.

Fagundes (2023) investigou a correlação entre os ensaios DPSH (Dynamic Penetration Super-Heavy) e SPT (Standard Penetration Test), com foco na eficiência energética. Ambos os ensaios foram conduzidos em seis pontos diferentes, seguindo as diretrizes do Eurocódigo EC 7, Parte 3. A instrumentação utilizada incluiu o equipamento SPT Analyser da PDI, com acelerômetros e extensômetros para medir a energia transmitida aos ensaios. A correlação global dos ensaios revelou maior eficiência energética para o DPSH, surpreendendo ao mostrar que o número de golpes normalizados (N_{60}) pode ser convertido através da equação $N_{SPT60} = 1,0784 \cdot N_{DPSH60}$, contrastando com as expectativas convencionais.

Na conclusão, observou-se que, apesar de a energia transmitida no SPT ter sido inicialmente superior, a análise de %ETR e número de golpes indicou uma transmissão energética mais eficiente para o DPSH em pares de furos subsequentes. A conversão de $N_{DPSH,30}$ em $N_{SPT,30}$ foi estabelecida pela equação $N_{SPT,30} = 1,0894 \cdot N_{DPSH,30}$, apresentando uma forte correlação. Após a normalização, a transmissão energética do DPSH foi mantida, sendo convertida pela equação $N_{SPT,60} = 1,0784 \cdot N_{DPSH,60}$, também com uma correlação forte. A conclusão destaca a viabilidade da conversão de DPSH em SPT, permitindo a utilização de dados paramétricos do SPT em análises mais amplas.

De acordo com Álvarez et al. (2022) uma grande área de Guayaquil (Equador, América do Sul) repousa sobre depósitos deltaicos estuarinos, compostos por argilas fracas e altamente compressíveis com diatomáceas. A natureza desses depósitos de grãos finos pode dificultar uma estimativa precisa das propriedades do solo. O seu estudo fornece uma caracterização geotécnica e geofísica detalhada dessas argilas moles, realizada no complexo estuarino da cidade equatoriana.

Foram realizados registros de sondagens, ensaios de penetração padrão (SPT), ensaios de piezocone (CPTu), um ensaio de dilatômetro sísmico (SDMT), um levantamento geofísico não invasivo e ensaios laboratoriais, que foram posteriormente comparados para analisar os parâmetros geotécnicos estáticos e dinâmicos desses depósitos. A interpretação dos resultados destacou a maior confiabilidade do CPTu e SDMT em comparação com o SPT e os ensaios laboratoriais de caracterização, para estimar a resistência ao cisalhamento, compressibilidade e histórico de tensões dessas argilas, ressaltando também uma certa sensibilidade à presença das diatomáceas.

A comparação entre os valores de V_s previstos e medidos sugeriu que a previsão do SDMT é mais confiável do que as previsões do CPT e SPT, com maior variabilidade nas previsões de CPT e SPT. Os parâmetros de resistência, compressibilidade e histórico de tensões forneceram valores confiáveis nas argilas de Guayaquil, sendo tanto CPT quanto DMT mais eficazes do que o SPT em solos moles.

A estimativa da velocidade de onda cisalhante (V_s) é fundamental no projeto de engenharia geotécnica, não apenas para classificação do local e interação solo-estrutura, mas também para análise sísmica e resposta do local ao sismo. Vários autores desenvolveram e recomendaram correlações para SPT, expressas como função de $N_{SPT, N60}$, profundidade (Z), tipo de solo e idade geológica (Tabela 3).

Algumas outras correlações foram apresentadas no item 3.7.1, com novas perspectivas e a presença de alguns estudos nacionais. As correlações, assim como na Tabela 3, indicam correlações entre o índice N_{SPT} e os valores de V_s .

Tabela 3: Principais equações disponíveis para estimar V_S a partir do SPT. Álvarez et al. (2022).

Autor	Tipo de solo	Correlação V_S	Descrição geológica
Wair et al. (2012)	Todos os solos	$V_S = 26 \cdot N_{60}^{0,215} \cdot \sigma'_{v0}{}^{0,275}$	Holoceno
	Todos os solos	$V_S = 34 \cdot N_{60}^{0,215} \cdot \sigma'_{v0}{}^{0,275}$	Pleistoceno
	Argilosos e siltosos	$V_S = 23 \cdot N_{60}^{0,17} \cdot \sigma'_{v0}{}^{0,32}$	Holoceno
	Argilosos e siltosos	$V_S = 29 \cdot N_{60}^{0,17} \cdot \sigma'_{v0}{}^{0,32}$	Pleistoceno
	Arenosos	$V_S = 27 \cdot N_{60}^{0,23} \cdot \sigma'_{v0}{}^{0,23}$	Holoceno
	Arenosos	$V_S = 35 \cdot N_{60}^{0,23} \cdot \sigma'_{v0}{}^{0,25}$	Pleistoceno
Imai & Yoshimura (1970)	Todos os solos	$V_S = 76 \cdot N_{SPT}^{0,33}$	-
Kalteziotis et al. (1992)	Todos os solos	$V_S = 76,2 \cdot N_{SPT}^{0,24}$	-
	Arenosos e siltosos	$V_S = 49,1 \cdot N_{SPT}^{0,502}$	-
	Argilosos	$V_S = 76,55 \cdot N_{SPT}^{0,445}$	-
Ohsaki & Iwasaki (1973)	Todos os solos	$V_S = 81,4 \cdot N_{SPT}^{0,39}$	-
	Arenosos	$V_S = 59,4 \cdot N_{SPT}^{0,47}$	-
Iyisan (1996)	Todos os solos	$V_S = 51,5 \cdot N_{SPT}^{0,516}$	Depósitos aluviais profundos
Jinan (1987)	Todos os solos	$V_S = 116,1 \cdot (N_{SPT} + 0,32)^{0,202}$	Depósitos Holocênicos moles
Dikmen (2009)	Todos os solos	$V_S = 58 \cdot N_{SPT}^{0,39}$	Aluvião Quaternária
	Arenosos	$V_S = 73 \cdot N_{SPT}^{0,33}$	Aluvião Quaternária
	Argilosos	$V_S = 44 \cdot N_{SPT}^{0,48}$	Aluvião Quaternária
	Siltosos	$V_S = 60 \cdot N_{SPT}^{0,36}$	Aluvião Quaternário

CPT– Cone Penetration Test

O Ensaio de penetração de cone (Cone Penetration Test -CPT), é normatizado através da ASTM D 5778/2020, pela International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – ISMFE, Internatioal Reference Test Procedure – IRTP/ISSMFE (1977, 1988). No Brasil o ensaio é normalizado pela NBR 12069/1991. O ensaio consiste na cravação no solo

de uma ponteira cônica a uma velocidade constante de 2 cm/s. As informações obtidas através da execução deste ensaio é a resistência de ponta (q_c) o atrito lateral (f_s)

O CPT (Cone Penetration Test) e o CPTu (Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement) são variantes do ensaio de penetração de cone. O CPT mede resistência à ponta e atrito lateral, enquanto o CPTu adiciona a medição da poropressão. Ambos fornecem informações sobre as propriedades geotécnicas do solo, sendo o CPTu mais abrangente ao incluir dados sobre a pressão intersticial. Por sua vez, o SCPTu, ou Seismic Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement, incorporam uma análise sísmica à medição da poropressão. Essa abordagem utiliza ondas sísmicas para avaliar as propriedades do solo, conferindo uma compreensão adicional sobre a estrutura e o comportamento dinâmico do solo. O ensaio SCPTu será aprofundado no tópico 3.6.

Schnaid e Odebrecht (2012) esclarecem que o procedimento do ensaio de penetração de cone é padronizado, mas diverge em três categorias conforme os equipamentos empregados. O cone mecânico é caracterizado pela medição na superfície por meio da transferência mecânica das hastes, que resulta nos esforços necessários para cravar a ponta cônica e o atrito lateral (q_c e f_s). Para o cone elétrico, a medição é realizada diretamente na ponteira por meio de células de carga elétricas. Por fim, o piezocone apresenta durante o processo de cravação os resultados das poropressões (u), além das medições de q_c e f_s . Nesse contexto, são empregadas diferentes configurações de ponteiros, variando de acordo com a dimensão (área de ponta), tipos de células de carga, posicionamento do elemento poroso e o sistema de transmissão de dados à superfície, permitindo o gerenciamento do processo de aquisição e armazenamento das medidas.

Esses ensaios são conduzidos por meio de um equipamento de cravação (Figura 5), que é composto por uma estrutura de reação com um sistema de aplicação de cargas. Em sistemas hidráulicos, um pistão é acionado por meio de uma bomba hidráulica acoplada a um motor. A cravação ocorre com controle de velocidade, e a penetração é realizada por hastes com comprimentos de um metro.

Figura 5: Equipamento de cravação. Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).



No decorrer desse ensaio, uma ponteira cônica (Figura 6), conectada à extremidade de um conjunto de hastes, é inserida no solo a uma velocidade constante de 2 cm/seg, equivalente a aproximadamente 1 m/min. A ponta do cone possui um ângulo de 60° e um diâmetro de 35,8 mm, correspondendo a uma área de 10 cm². O diâmetro das hastes é igual ou menor que o diâmetro do cone. Ao longo do ensaio, a resistência à penetração da ponta do cone é praticamente constantemente medida. Simultaneamente, a resistência à penetração de uma luva de atrito, posicionada imediatamente atrás do cone, também é registrada.

Os piezocones elétricos estão equipados com células de carga que registram a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s). A poropressão (u) é determinada por meio de um transdutor de pressão, podendo estar localizado na ponta do cone (u_1), atrás da ponta (u_2) ou atrás da luva de atrito (u_3).

Em ensaios de piezocone conduzidos em meios saturados, especialmente em argilas moles, observou-se um erro na medida da resistência de ponta devido à ação da água sobre as ranhuras do cone. Assim, a resistência de ponta (q_c) deve ser corrigida em relação à poropressão medida na base do cone (u_2) por meio da Equação 3:

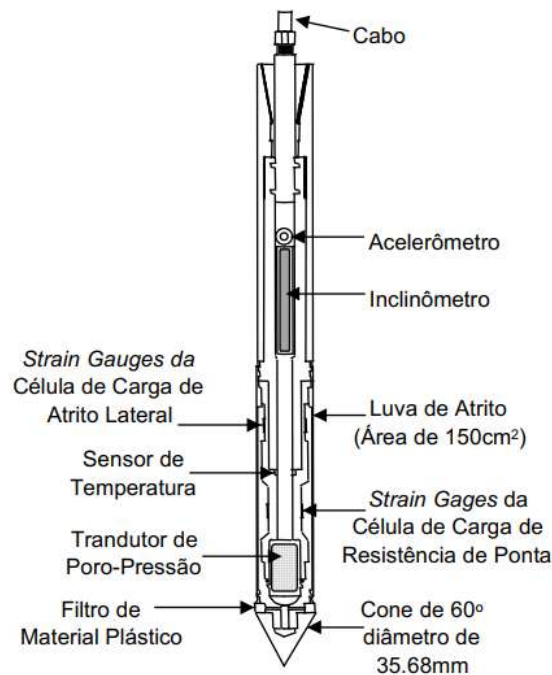
$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

q_t = é a resistência de ponta corrigida, e

$a = a$ é a relação de áreas desiguais, dependendo da geometria do cone.

Figura 6: Desenho esquemático de uma ponteira de piezocone (Davies & Campanella, 1995).



Duan et. al. (2021) abordaram a investigação geotécnica realizada no projeto da Ponte Hong Kong-Zhuhai-Macao (HZMB) no delta do Rio das Pérolas (PRD) e destaca a coleta de amostras de solo não perturbadas, ensaios laboratoriais e extensivos testes de cone de piezocone (CPTu). Os resultados indicam que o CPTu é eficaz na caracterização detalhada da estratigrafia do solo e propriedades in situ. Correlações específicas da região entre a resistência à penetração do cone e as propriedades do solo foram estabelecidas. Conclui-se que o CPTu é promissor para avaliar propriedades complexas do solo e perfis estratigráficos no projeto HZMB.

Além disso, revela correlações entre a resistência do cone e parâmetros físicos básicos do solo, como índice de liquidez e razão de vazios. A correlação entre resistência do cone normalizada e OCR (*Overconsolidation Ratio*, em inglês, ou tensão de pré-adensamento) estimado mostra um bom desempenho na previsão da resistência ao cisalhamento não drenado. Uma nova correlação entre a resistência do cone e o índice de compressão foi proposta (Duan et. al. (2021)). A metodologia adotada mostra aplicabilidade em outros locais, destacando a necessidade de correlações específicas da região para maior confiabilidade.

Duan et. al. (2021) obtiveram os valores de Índice de plasticidade (IP), resultante da diferença entre os limites de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) provenientes de 240 grupos de resultados de ensaios laboratoriais e os dados correspondentes do CPTu, e

analisaram, obtendo uma relação entre q_t e IP, que é apresentada na Equação 4. Intuitivamente, espera-se que o IP diminua com o aumento de q_t . O IL da argila apresenta uma correlação razoavelmente boa com q_t , com um coeficiente de determinação elevado ($R^2 = 0,86$), e a fórmula pode ser expressa como:

$$IP = LL - LP = 0,79 - 0,49_{\log_{10}}(q_t) \quad \text{Equação 4}$$

$$R^2 = 0,86$$

O índice de vazios, e , é uma propriedade física do solo submarino que determina o potencial de subsidência do solo e descreve a relação entre os componentes não sólidos e sólidos das camadas de solo. O índice de vazios da argila é um parâmetro importante para calcular o assentamento do solo. No estudo, fica evidente a variação de q_t com e . O índice de vazios e diminui com o aumento de q_t , e essa tendência decrescente torna-se moderada quando q_t é superior a 3,5 MPa. A correlação entre esses dois parâmetros é forte, como esperado, e essa correlação é melhor descrita por uma função de potência ($R^2 = 0,87$) (Duan et. al, 2021). A correlação resultante é a Equação 5:

$$e = 1,3q_t^{-0,26} \quad \text{Equação 5}$$

O OCR apresentou uma boa correlação linear, fato que a medida que o OCR aumenta, a razão $\left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}\right)$ também aumentava. A boa correlação é indicada com o parâmetro R^2 próximo de 1, onde o $R^2 = 0,89$.

$$OCR = 0,174 \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}\right) \quad \text{Equação 6}$$

Onde, σ_{v0} e σ'_{v0} são as tensões totais verticais e tensões verticais efetivas, respectivamente.

A relação mostrada na equação 7, mostra que as tendências estatísticas entre os fatores S_u e $(q_t - \sigma_{v0})$ são significativas, e o coeficiente de correlação é relativamente alto (0,93) (Duan et. al. 2021). A expressão é dada por:

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{14,2} \quad \text{Equação 7}$$

Onde, S_u é a resistência não drenada.

O índice de compressão, C_c , que representa a mudança no índice de vazios com o aumento da pressão de consolidação, foi avaliado em relação à resistência líquida do cone $q_t - \sigma_{v0}$. Com base em 62 grupos de testes de laboratório e dados correspondentes do CPTU, foi

observada uma boa correlação. A fórmula resultante está mostrada na equação 8, com um R² de 0,60. Isso permite uma avaliação aproximada entre os parâmetros, destacando a utilidade dessa relação para compreender as características de deformação do solo coesivo (Duan et. al. 2021).

$$C_c = -0,14(q_t - \sigma_{v0}) + 0,68 \quad \text{Equação 8}$$

O Índice de Consistência (IC) é uma medida derivada dos dados do ensaio CPTu. Ele é utilizado para avaliar a consistência do solo, ou seja, a resistência do solo à deformação. O Índice de Consistência fornece informações sobre a coesão do solo e pode ser usado para ajudar na interpretação das condições do subsolo em uma determinada área. O IC é calculado com base na relação entre a resistência à penetração do cone (q_c) e a poropressão (u₂). Essa relação é expressa na equação 9:

$$IC = \frac{q_c}{u_2} \quad \text{Equação 9}$$

Alvarez et al. (2022) indicaram que, para o ensaio CPT, existem várias correlações disponíveis para prever a velocidade de onda (V_s), as quais estão associadas a numerosos parâmetros, como resistência à ponta do cone (q_c) ou resistência à ponta do cone corrigida (q_t), atrito lateral (f_s), tensão confinante, profundidade (Z), tipo de solo e idade geológica (conforme apresentado na Tabela 4).

Tabela 4: Principais equações disponíveis para estimar V_s a partir do CPT. Álvarez et al. (2022).

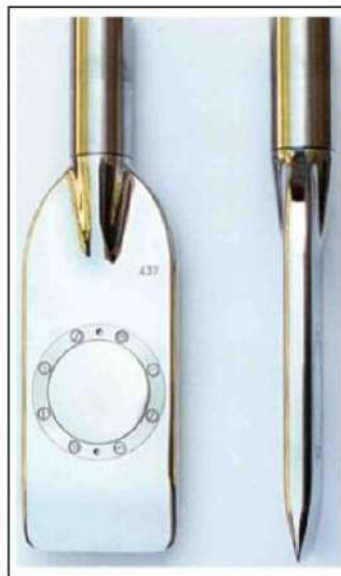
Autor	Correlação com V_s ou G_o	Descrição geológica
Robertson (2012)	$V_s = \alpha_{vs} (q_t - \sigma'_{v0}) 0,5 / \text{Pa}$ $\alpha_{vs} = 10^{0,55 IC + 1,68}$	Holoceno e solos do Pleistoceno, principalmente não cimentados
Hegazy & Mayne (1995)	$V_s = [10,1 \cdot \log(q_t) - 11,4]^{1,67} f_s / q_t \cdot 100$	Todos os tipos de solos
Simonini & Cola (2000)	$G_o = 49,2 \cdot q_c^{0,51}$	Areia, silte e argila siltosa da Lagoa de Venezia
Andrus et al. (2007)	$V_s = 2,27 \cdot q_t^{0,412} \cdot I_c^{0,989} \cdot Z^{0,033} \cdot \text{ASF}$ ASF=1,00	Solos holocênicos
	$V_s = 2,62 \cdot q_t^{0,395} \cdot I_c^{0,912} \cdot Z^{0,124} \cdot \text{SF}$ SF=1,12	Solos pleistocênicos
Madiari & Simoni (2004)	$V_s = 140 \cdot q_c^{0,30} \cdot f_s^{-0,13}$	Solos coesivos do Holoceno
	$V_s = 268 \cdot q_c^{0,21} \cdot f_s^{0,02}$	Solos incoerentes do Holoceno
	$V_s = 182 \cdot q_c^{0,33} \cdot f_s^{-0,02}$	Solos coesivos do Pleistoceno
	$V_s = 172 \cdot q_c^{0,35} \cdot f_s^{-0,05}$	Solos incoerentes do Pleistoceno
Bouckovalas et al. (1989)	$G_o = 28,0 \cdot q_c^{1,40}$	Argilas muito moles
Vera-Grunauer (2014)	$V_s = (\eta \cdot q_c \cdot e^\alpha)^{-0,5}$ $A = [(3 \cdot N_{kc} - 4) / 4] - [1 / (2 \cdot \beta)]$ $\eta = 3g / [2 \cdot N_{kc} \cdot \gamma_s \cdot (1 + \nu)]$	Argilas com diatomáceas

Dilatômetro – DMT

O Dilatômetro (DMT) foi desenvolvido na Itália pelo professor Silvano Marchetti na década de 1970. No Brasil, não há uma normatização específica para o DMT, sendo adotadas as diretrizes apresentadas por normas internacionais, tais como ISSMGE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) TC16 (2001), ASTM D 6635 (2001) e EUROCODE 7 (Geotechnical design – Part 3: Design assisting by field-testing).

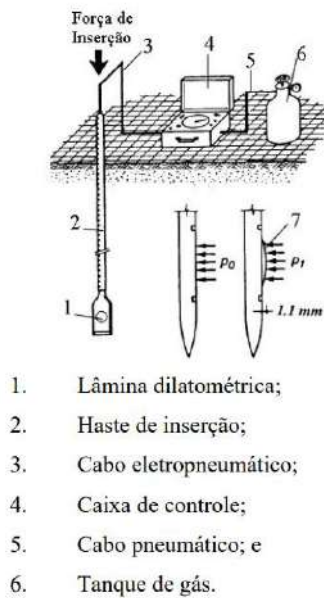
O DMT possui uma lâmina fina (Figura 7) contendo uma membrana circular situada em uma das suas faces. A lâmina dilatométrica é conectada a uma unidade de controle que é alimentada via pressão de gás e corrente elétrica, através do cabo eletropneumático que passa através das hastes metálicas. Ocorre então a expansão e contração da membrana da lâmina por meio do gás que é liberado ou interrompido dentro da lâmina.

Figura 7: Lâmina utilizada no ensaio dilatômetro de Marchetti. Marchetti e Monaco, (2001).



O teste consiste na cravação de ponteira metálica, com interrupções desta cravação a cada 20 cm. Nestas interrupções, introduz-se gás nitrogênio que expande a membrana metálica da ponteira contra o terreno. Dessa expansão, registram-se em manômetro de precisão duas leituras: a primeira quando a dilatação da membrana “vence” o esforço de compressão do terreno, e a segunda quando esta deforma o solo de 1,1 mm. A Figura 8 mostra a esquematização do ensaio.

Figura 8: Configuração do ensaio dilatométrico. Marchetti e Monaco (2001)



O equipamento e o princípio do ensaio são simples, e os dados obtidos são empiricamente correlacionados com características do solo, como resistência não drenada (S_u), ângulo de atrito interno de areias (ϕ'), razão de sobre adensamento (OCR), coeficiente de empuxo no repouso (K_0) e módulo de elasticidade (E). Essas correlações foram desenvolvidas por Marchetti (1980) principalmente para solos de origem sedimentar, abrangendo tanto areias quanto argilas.

O ensaio de DMT fornece três medidas de pressão A, B e C que devem ser corrigidas em função das calibrações ΔA e ΔB , originando as pressões corrigidas P_0 , P_1 e P_2 respectivamente, de acordo com as equações 10, 11 e 12.

$$P_0 = 1,05(A - Z_m - \Delta A) - 0,05(B - Z_m - \Delta B) \quad \text{Equação 10}$$

$$P_1 = B - Z_m - \Delta B \quad \text{Equação 11}$$

$$P_2 = C - Z_m - \Delta A \quad \text{Equação 12}$$

Onde, Z_m é o desvio de zero do manômetro.

Com base nas pressões P_0 , P_1 e P_2 , Marchetti (1980) definiu três parâmetros empíricos adotados na interpretação do ensaio: índice de material (I_D), índice de tensão horizontal (K_D) e

módulo dilatométrico (E_D). Os índices I_D e K_D são considerados os parâmetros chave do ensaio DMT, sendo ambos normalizados e adimensionais.

O parâmetro I_D é definido como a razão entre $(P_1 - P_0)$ e a tensão horizontal efetiva $(P_0 - u_0)$, sendo utilizado, predominantemente como indicador do tipo de solo e é definido pela equação 13:

$$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - u_0} \quad \text{Equação 13}$$

Já o índice de tensão horizontal K_D é definido pela equação 14. Schnaid e Odebrecht (2012) comenta que resultados experimentais em argilas normalmente adensadas e não cimentadas apresentaram valores de K_D de aproximadamente 2, e o perfil de K_D é similar em forma ao perfil de OCR derivado do ensaio de piezocone, dando uma indicação da história de tensões do solo com a profundidade.

$$K_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad \text{Equação 14}$$

O módulo dilatométrico E_D é obtido conforme equação 15, sendo drenado em areias, não drenado em argilas e parcialmente drenado em solos com permeabilidades intermediária.

$$E_D = 34,7(P_1 - P_0) \quad \text{Equação 15}$$

Embora o índice E_D seja inerentemente um módulo operacional de Young “ E ” (ambos são calculados usando a teoria da elasticidade), é reconhecido que a expansão da membrana de P_0 e P_1 reflete as perturbações das propriedades do solo ao redor da lâmina produzidas pela penetração do dilatômetro (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Palheta – Vane Test

O ensaio de palheta, internacionalmente conhecido como *Vane Shear Test*, destaca-se como um dos métodos mais empregados para determinar a resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u) em depósitos de argilas moles. Sua popularidade decorre da simplicidade, rapidez de execução e baixo custo associados a esse método. Além disso, o ensaio de palheta somente é aplicável a solos de granulometria fina, como siltes, resíduos de mineração e outros geomateriais nos quais é necessário estimar a resistência não-drenada.

O procedimento envolve a inserção de uma palheta em uma camada de solo, seguida pela aplicação de torque para induzir o cisalhamento. A resistência ao cisalhamento não-drenada é então determinada com base na relação entre o torque aplicado e a deformação resultante.

Conforme estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 10905/1989), a palheta padrão de campo para o ensaio de cisalhamento Vane Shear Test possui as seguintes características:

- Formato retangular.
- Diâmetro de aproximadamente 65 mm.
- Relação H/D igual a 2, com altura de 130 mm.
- Espessura de 1,95 mm.

As dimensões da palheta bem como o equipamento para a realização do ensaio podem ser vistos na Figura 9 e Figura 10, respectivamente.

Figura 9: Dimensões usuais da palheta. Gauer (2015) adaptado de Chandler (1998).

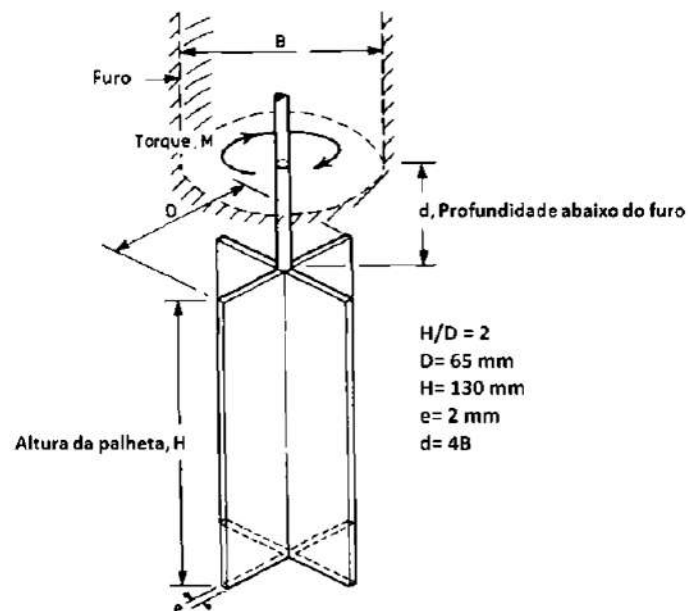
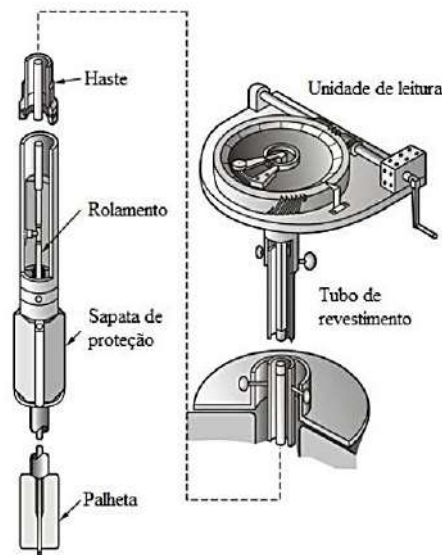


Figura 10: Equipamento para execução de ensaio de palheta in situ. Ortigão e Collet (1987).



Além disso, a norma sugere que a velocidade de carregamento geralmente seja de 6°/min durante o ensaio. Para garantir a precisão dos resultados, Roy e Leblanc (1988) recomendam que o tempo decorrido entre a inserção da palheta e o início do ensaio não deve ultrapassar 1 minuto, para evitar possíveis influências sobre a resistência não-drenada. Essas especificações, com pequenas variações, são comuns em padrões de ensaios de palheta de campo em várias normas internacionais, incluindo a europeia Eurocode 7, a americana ASTM D 2573/2008 e a brasileira ABNT NBR 10905/1989.

A resistência não-drenada é obtida a partir do ensaio de palheta admitindo que não ocorra drenagem durante o cisalhamento, que as tensões são uniformemente distribuídas ao longo da superfície de ruptura e que o solo que circunda a palheta seja homogêneo e isotrópico (Schnaid e Odebrecht, 2012).

A NBR 10905/1989 define a resistência não-drenada (S_u) medida no ensaio de palheta (em kPa), através da Equação 16.

$$S_u = \frac{6T_{m\acute{a}x}}{7\pi D^3} \quad \text{Equação 16}$$

Onde $T_{m\acute{a}x}$ é o torque máximo medido durante o ensaio (em kN·m) e D é o diâmetro da palheta (em m).

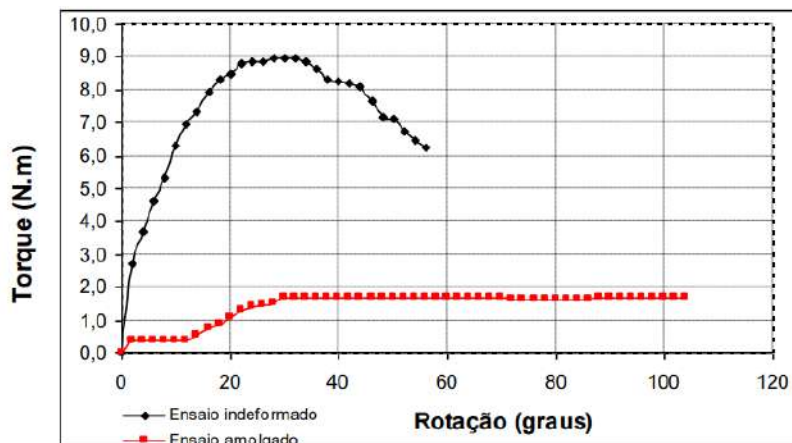
As especificações da norma americana ASTM D 2573/2008 definem que a resistência não-drenada determinada em ensaios de palheta de laboratório seja calculada pela Equação 17.

$$S_u = \frac{T_{m\acute{a}x}}{\frac{\pi D^2 H}{2} \left[1 + \frac{D}{3H} \right]} \quad \text{Equação 17}$$

Onde $T_{\text{máx}}$ é o torque máximo medido durante o ensaio (em kN·m) e D é o diâmetro da palheta (em m) e H é a altura da palheta (em m). Ao utilizar-se uma relação entre diâmetro e altura (H/D) igual a 2 na Equação 17, obtém-se a Equação 16.

O registro contínuo de torque ao longo do tempo permite curvas torque-tempo ou torque rotação, similares as curvas tensão-deformação, por exemplo dos ensaios triaxiais. A Figura 11 apresenta um exemplo típico dessa curva.

Figura 11: Curva Torque (N.m) x Rotação (graus). Bello (2011).



Pressiômetro

Os pressiômetros são dispositivos cilíndricos concebidos originalmente por Louis Ménard em 1955. Esses instrumentos foram desenvolvidos com o propósito de aplicar pressões uniformes nas paredes de um furo de diâmetro D, utilizando uma membrana flexível, cilíndrica e de comprimento L. Os ensaios conduzidos com esse tipo de equipamento são denominados ensaios pressiométricos, e a interpretação dos dados obtidos baseia-se na teoria de expansão de um cilindro de solo de espessura infinita, conforme descrito por Das (2007).

O ensaio pressiométrico é um método *in situ* que visa determinar as propriedades geotécnicas do solo, como sua compressibilidade e resistência ao cisalhamento. O procedimento envolve a utilização de uma sonda cilíndrica, que é inserida em um furo previamente perfurado no solo.

O ensaio ocorre em três fases principais:

- Introdução da Sonda: A sonda pressiométrica é inserida no solo, geralmente a uma profundidade que corresponde à zona de interesse do projeto.

- Aplicação de Pressão: A sonda é pressurizada, gerando uma expansão do cilindro no solo. Durante esse processo, a pressão interna da sonda é aumentada de maneira controlada.
- Registro de Dados: Durante a aplicação da pressão, são registradas as variações de volume do solo. Isso resulta na construção de uma curva pressiométrica, que relaciona a pressão aplicada à expansão volumétrica do solo.

Com esse ensaio, é possível obter a pressão horizontal p no solo, a tensão radial σ_{rr} , e o acréscimo relativo no raio da cavidade. Em suma, o ensaio pressiométrico fornece uma curva tensão-deformação in situ do solo. O ensaio pressiométrico geralmente é repetido a diferentes profundidades para se obter os parâmetros dos diferentes perfis do solo. (Das, 2007). A Figura 12 e a Figura 13 ilustram o funcionamento e o resultado do ensaio

Figura 12: Ensaio com Pressiômetro Pré-Furo (Modificada de Briaud, 1992).

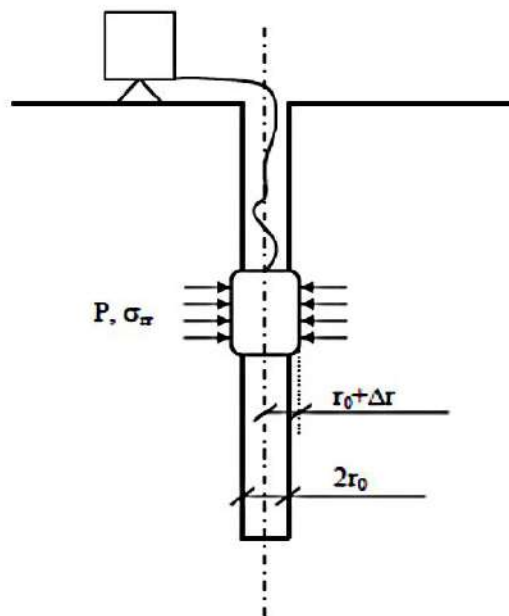
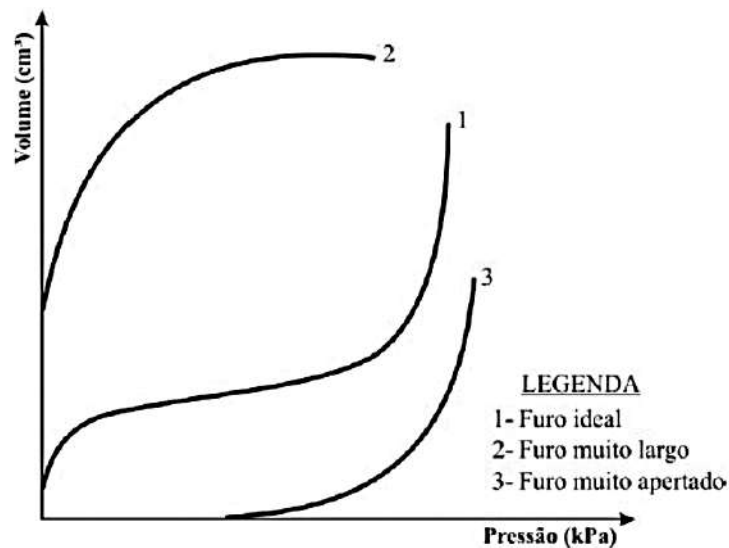


Figura 13: Diferentes formas de curvas pressiométricas em função da qualidade do furo. (adaptada ASTM D4719 -2000)



3.4. Prospecção sísmica

A Prospecção Sísmica opera com base nos mesmos princípios e leis físicas da Sismologia, com a distinção de que a fonte de energia é uma perturbação artificial induzida pelo ser humano, propagando-se pelo subsolo de acordo com as propriedades elásticas do meio. A análise e interpretação dos dados coletados possibilitam a identificação da configuração das estruturas geológicas e suas profundidades. Os dispositivos de registro são, em sua essência, semelhantes, mas com ajustes sutis para adaptação ao uso *in situ*.

3.4.1. Ondas

Kearey et al. (2009) descrevem ondas sísmicas como conjuntos de energia de deformação elástica que se movem radialmente a partir de uma fonte sísmica, seja ela resultado de ações naturais ou humanas. Milsom e Eriksen (2011) observam que, devido às suas propriedades elásticas, esse tipo de onda não ocasiona mudanças na massa dos materiais durante sua propagação. No entanto, os autores ressaltam que, se o meio estiver próximo à localização da fonte, ele pode ser sujeito a alterações como distorção, deformações permanentes ou quebras.

A forma como uma onda sísmica se propaga é influenciada pelas propriedades inerentes ao tipo de material presente no meio, como densidade e módulo de elasticidade. Em geral, as ondas sísmicas podem ser classificadas em ondas internas ou de corpo, em que a forma de propagação é desenvolvida no interior do material, e ondas de superfície, na qual a propagação ocorre em superfícies livres (Reynolds, 2011).

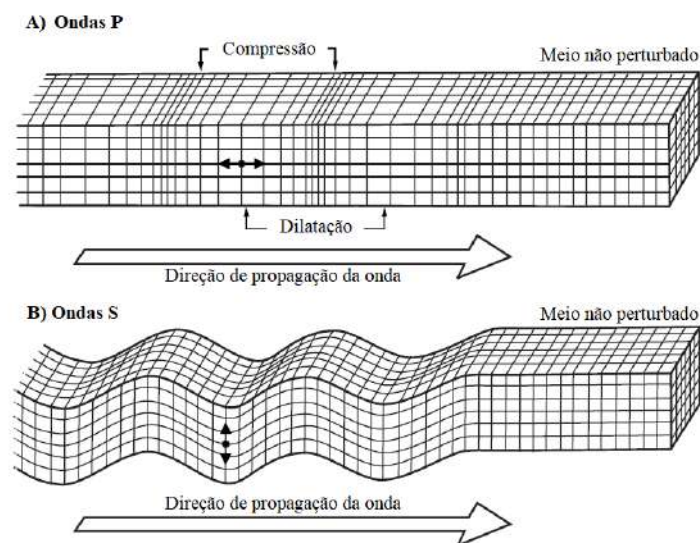
3.4.2. Tipos de ondas

Ondas internas

As ondas de corpo são identificadas pela sua propagação pelo interior de um material sólido, exibindo comportamentos de compressão ou cisalhamento dependendo da direção em que se propagam em relação às partículas do meio afetado. As ondas primárias, ou ondas P, são reconhecidas por provocarem o movimento das partículas do meio na mesma direção de propagação da onda (Figura 14a). Esse comportamento desencadeia um processo de deformação elástica unidimensional, envolvendo compressão e dilatação ao longo do período da onda. Mesmo diante dessa variação, as partículas experimentam apenas oscilações temporárias na densidade, pois o processo deformacional resulta em variações momentâneas no volume do material, sem afetar a sua massa (Kearey et al., 2009).

Já as ondas secundárias, ou ondas S, fazem as partículas do meio se moverem perpendicularmente à direção de propagação da onda. Esse comportamento submete o material a movimentos cisalhantes e rotacionais, gerando oscilações ao redor de um plano fixo (Figura 14b). Nesse cenário, as partículas passam por alterações em sua forma geométrica, entretanto, sem causar variação volumétrica (Reynolds, 2011).

Figura 14: Deformação e movimentação de partículas submetidas à passagem de ondas de corpo: (a) Ondas P e (b) Ondas S. Meira, (2022) modificado de Bolt (1982).



Para calcular a velocidade de propagação de uma onda interna, é essencial examinar as características físicas do meio sujeito a esse tipo de influência. Price (2009) destaca que a velocidade é expressa por meio da relação entre o módulo elástico e a densidade do material

submetido a passagem da onda sísmica. O autor complementa que a determinação do módulo dependerá de como as tensões e as deformações se comportam em uma partícula submetida ao estado de propagação. Para as ondas P e S a velocidade pode ser definida pelas equações 18 e 19, respectivamente. Vale ressaltar que essa definição considera o meio homogêneo e isotrópico.

$$V_P = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 18}$$

$$V_S = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 19}$$

Em que:

V_P : velocidade de propagação da onda P

V_S : velocidade de propagação da onda S

E: módulo axial do material;

G: módulo de rigidez cisalhante; e,

ρ : densidade do material

Apesar de possuírem a mesma origem, as ondas de corpo possuem um limite, em termos materiais, quanto ao aspecto de propagação. Enquanto as ondas P podem percorrer meios sólidos, líquidos e gasosos, as ondas S se propagam apenas em meios sólidos, tendo em vista que os demais não possuem módulo cisalhante. Outra heterogeneidade se refere a velocidade de propagação. Ao avaliar um mesmo meio, nota-se que as ondas P apresentam uma velocidade superior as ondas S, sendo essa diferença variável conforme o tipo de material submetido a ação dessas duas ondas (Mari, 2019). Na Tabela 5 pode-se observar a distinção de velocidades existentes entre as ondas P e S para diferentes meios de propagação

Tabela 5: Variação da velocidade de propagação das ondas P e S para diferentes tipos de meio. Modificado de Mari, (2019).

Tipo de rocha ou meio	Velocidade da onda P V_P (m/s)	Velocidade da onda S V_S (m/s)
Rochas resistidas	300 - 700	100 - 300
Areia seca	400 - 1200	100 - 500
Áreia úmida	1500 - 4000	400 - 1200
Argila	1100 - 2500	200 - 800
Marga/xisto	2000 - 3000	750 - 1500
Arenito	3000 - 4500	1200 - 2800
Calcário	3500 - 6000	2000 - 3300
Giz	2300 - 2600	1100 - 1300
Sal	4500 - 5500	2500 - 3100
Anidrita	4000 - 5500	2200 - 3100
Dolomito	3500 - 6500	1900 - 3600
Granito	4500 - 6000	2500 - 3300
Basalto	5000 - 6000	2800 - 3400
Carvão	2200 - 2700	1000 - 1400
Água	1450 - 1500	
Gelo	3400 - 3800	1700 - 1900
Óleo	1200 - 1250	

Foti *et al.*, (2017) trouxeram valores para diferentes materiais, com uma classificação um pouco diferente de Mari (2019). A Tabela 6 traz valores esperados do coeficiente de Poisson e velocidades sísmicas de alguns materiais geológicos.

Tabela 6: Valores esperados da razão de Poisson, densidade e velocidades sísmica para solos e rochas. Foti *et al.*, (2017).

Material geológico	Coefficiente de Poisson (ν)	Velocidade da onda P V_P (m/s)	Velocidade da onda S V_S (m/s)
Solo não saturado	0,15-0,35	-	-
Solo saturado	0,47-0,49	-	-
Argila mole	-	130-1400	80-200
Argila dura	-	320-4300	200-600
Areia pouco compacta	-	130-1800	80-250
Areia compacta	-	320-3500	200-500
Rocha alterada	0,2-0,25	980-1800	600-1000
Rocha competente	0,2-0,25	2000-4500	1200-2500

A velocidade de propagação das ondas P em meio saturado tende sempre a valores maiores ou iguais ao da velocidade de propagação na água, que é de 1450 m/s (Eikmeier, 2018).

Eikmeier (2018) destaca que é possível correlacionar as velocidades de propagação das ondas sísmicas com o comportamento elástico do meio submetido a essa condição. Deste modo pode-se obter, de forma indireta, parâmetros como o coeficiente de Poisson (ν) e os módulos elásticos dinâmicos de cisalhamento (G_{din}) e de Young (E_{din}). As Equações 20, 21 e 22 descrevem, respectivamente, as correlações adotadas para a obtenção desses parâmetros.

$$\nu = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1} \right] \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

ν : Coeficiente de Poisson

V_P : Velocidade da onda P (m/s);

V_S : Velocidade da onda S (m/s).

$$G_{din} = \rho \cdot V_S^2 \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

G_{din} : Módulo cisalhante dinâmico;

ρ : Massa específica natural do meio (kg/m³);

V_S : Velocidade da onda S (m/s).

$$E_{din} = \rho \cdot V_S^2 \cdot \left(\frac{3V_P^2 - 2V_S^2}{V_P^2 - \frac{1}{3}V_S^2} \right) \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

ρ : Massa específica natural do meio (kg/m³);

V_P : Velocidade da onda P (m/s);

V_S : Velocidade da onda S (m/s).

Ondas de superfície

Ondas superficiais, conhecidas como *Ground Roll* na exploração sísmica, são primariamente compostas por ondas Rayleigh. Esse termo refere-se às ondas sísmicas que se

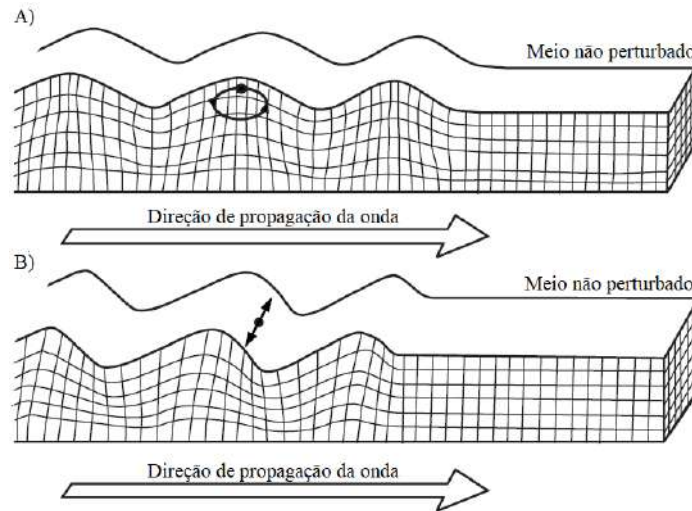
movem ao longo da interface que delimita dois meios, propagando-se ao longo de uma superfície livre ou ao longo da interface entre dois meios sólidos distintos.

Devido a seu comportamento específico, as ondas de superfície enfrentam limitações na penetração a grandes profundidades. Quanto mais distantes da superfície, menor é a influência dessas ondas nas partículas do meio. No entanto, em termos de alcance, elas têm a capacidade de percorrer longas distâncias com uma taxa de depreciação energética significativamente inferior às ondas de corpo. Essencialmente, existem dois tipos principais de ondas de superfície conhecidas como ondas Rayleigh e Love, diferenciando-se principalmente pelo tipo de movimento que induzem nas partículas do meio (Ferreira, 2018).

As ondas Rayleigh, representam um modo de propagação que envolve a combinação de movimentos em ambas as direções, transversal e longitudinal. Esse fenômeno conduz as partículas a realizar movimentos elípticos retrógrados em um plano perpendicular à superfície, enquanto mantêm a mesma direção de propagação da onda (Figura 15a). Essa categoria de onda surge da combinação das ondas P e SV (ondas S com polarização na vertical) e é observada exclusivamente em meios sólidos (Lowrie, 2007).

As ondas Love, podem ser descritas como ondas cisalhantes que apresentam um movimento das partículas paralelo à superfície do meio e perpendicular à direção de propagação da onda (Figura 15b). Esse comportamento é resultante da interferência das ondas SH (ondas S com polarização na horizontal) no meio, originando-se em superfícies estratificadas onde a velocidade da onda em uma camada é menor do que nas camadas sobrepostas. Assim como as ondas Rayleigh, as ondas Love são limitadas à propagação em meios sólidos (Telford et al., 1990; Lowrie, 2007).

Figura 15: Deformação e movimentação de partículas submetidas à passagem de ondas de superfície:
a) Ondas Rayleigh e (b) Ondas Love (modificado de Bolt, 1982)



Ao comparar as ondas de corpo, observa-se que as ondas de superfície exibem uma velocidade de propagação mais baixa. Novotny (1999) destaca que em eventos sísmicos, como terremotos, os registros desse fenômeno começam com a detecção das ondas P, seguidas pelas ondas S e culminam na identificação das ondas de superfície (Figura 16). O autor acrescenta que, entre as ondas de superfície, a Love possui uma velocidade de propagação superior em comparação com as ondas Rayleigh.

Figura 16: Identificação das ondas de corpo e superficiais em um registro sísmico de terremoto (modificado de Rocha, 2020)



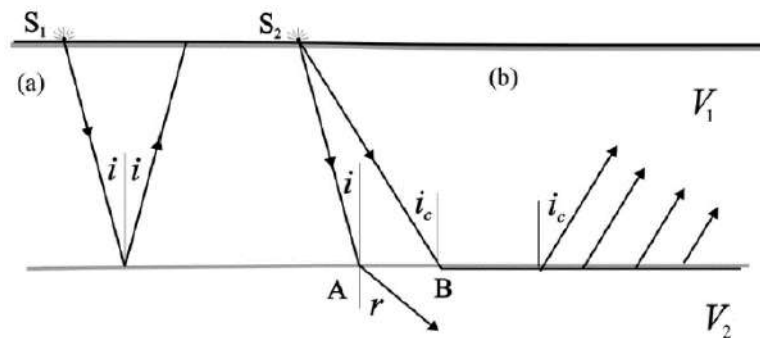
3.4.3. Fenômenos de propagação de ondas

O processo de propagação de ondas, seja de natureza mecânica, eletromagnética, entre outras, pode ser compreendido por meio do conceito de raio. Esse termo é extensivamente desenvolvido na óptica global, a qual se fundamenta nos princípios de Snell, Huygens e Fermat.

Essa abordagem é aplicada na análise das trajetórias das ondas, exemplificada na sismica de refração. Nesse contexto, a difusão e interação das ondas com meios de propriedades variáveis, como solo e rocha, são simplificadas ao rastrear os raios que experimentam os efeitos de reflexão e refração em diversas discontinuidades (Ticona, 2019). Quando o meio no qual as ondas sísmicas se propagam não é uniforme, surgem características como difração, dispersão e reflexão (Flores, 2023).

Ao propagar em um meio físico, as ondas sísmicas sofrem constantes variações de energia ao transitarem entre materiais com propriedades elásticas distintas. Essas alterações energéticas são oriundas de processos denominados de reflexão e refração. No estado de reflexão, parte da energia da onda sísmica, ao entrar em contato com a interface entre dois materiais, é refletida, conservando o mesmo valor de seu ângulo de incidência (Figura 17a). Vale ressaltar que quanto maior for o contraste entre as camadas investigadas, ou seja, quanto maior for a heterogeneidade entre as camadas submetidas à passagem das ondas sísmicas, maior será a energia conservada durante a ocorrência desse fenômeno (Reynolds, 2011).

Figura 17: Propagação das ondas sísmicas por: a) reflexão e b) refração (Milsom e Eriksen, 2011).



A porção de energia sísmica que não experimentou reflexão mantém a trajetória original da onda, adentrando a camada subjacente do meio, porém com um novo ângulo de percurso que difere do ângulo de incidência inicial da onda (ver Figura 17b). Essa alteração no ângulo do percurso da onda sísmica, ao penetrar em um meio com características específicas da região de origem, é conhecida como refração. Conforme descrito por Milsom e Eriksen (2011), essas características são governadas pela Lei de Snell, cuja formulação pode ser vista na equação 23:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Equação 23}$$

Em que:

i: ângulo de incidência;

r: ângulo de refração;

V_1 : velocidade da onda no meio 1

V_2 : velocidade da onda no meio 2

Conforme observado por Milsom e Eriksen (2011), se a velocidade representada pelo parâmetro V_2 for menor do que a representada por V_1 , o movimento da onda refratada tenderá a ocorrer perpendicularmente à interface (Figura 17b). Por outro lado, se V_2 for maior que V_1 , o raio refratado apresentará uma tendência a ser paralelo à interface. Para diferenças de velocidade muito elevadas, o raio transitará simultaneamente à interface do meio, e uma porção de sua energia retornará à superfície com um ângulo de incidência conhecido como crítico. Os autores também destacam que, para ângulos de incidência superiores ao crítico, a ocorrência de ondas refratadas é praticamente inexistente, resultando na reflexão total de toda a energia.

3.4.4. Ruídos sísmicos

A superfície terrestre está sujeita a influências provenientes de processos que têm origens tanto em atividades humanas quanto em fenômenos naturais. Essas características expõem o ambiente a demandas contínuas que podem ser explicadas por meio de movimentações vibracionais, historicamente associadas a fenômenos como os ruídos sísmicos. Devido à sua alta imprevisibilidade em termos de origem, distribuição espacial e ocorrência temporal, o ruído sísmico é complexo em sua definição, sendo frequentemente vinculado a fontes contínuas de eventos sísmicos com comportamento praticamente aleatório (Fichtner et al., 2019).

Ferreira (2018) destaca que qualquer ação que resulte na geração de ondas mecânicas em um meio físico pode ser considerada uma fonte de ruído sísmico. Devido ao seu comportamento aleatório, não é possível determinar com precisão o local e o momento exato de ocorrência dessa fonte. No entanto, sabe-se que ela está associada a vibrações superficiais originadas de diversas atividades, como áreas urbanas (McNamara e Buland, 2004), corpos d'água (McNamara et al., 2011), construções (Mucciarelli, 2010), e condições meteorológicas, como chuvas (Ebeling, 2012) e ventos (Lerope et al., 2016).

Bonnefoy-Claudet et al. (2006) ressaltam que quando a origem do ruído está relacionada a eventos naturais, ele é denominado ruído ambiental, enquanto, quando associado a fatores humanos, recebe a designação de ruído cultural. Independentemente da classificação, características como amplitude e frequência de um ruído variam tanto pelo tipo de atividade que o desencadeia quanto pelas características geoespaciais do local de avaliação.

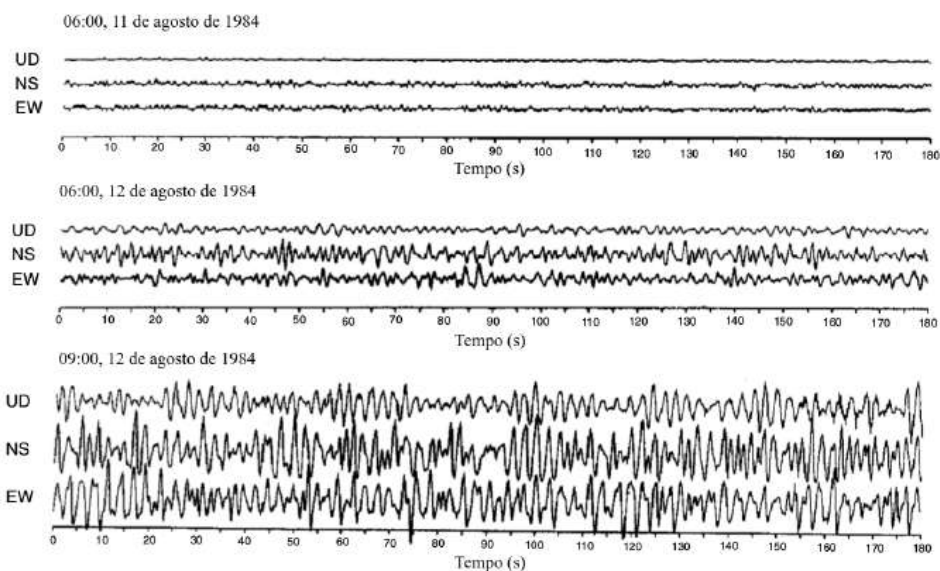
Na Tabela 7, é possível observar a variação da frequência do ruído sísmico em relação a algumas atividades de natureza tanto natural quanto cultural. Com base nesse quadro, Bonnefoy-Claudet et al. (2006) ressaltam que, para baixas frequências (abaixo de 1 Hz), as fontes são exclusivamente naturais, incluindo ondas oceânicas, monções e perturbações meteorológicas. Para frequências médias (1 a 10 Hz), as fontes têm origens tanto naturais quanto culturais, abrangendo ambientes urbanos e condições meteorológicas locais. Já para frequências elevadas (> 10 Hz), as fontes predominantemente têm natureza cultural.

Tabela 7: Variação da frequência de ruídos para distintas fontes ambientais (Bonnefoy-Claudet et al., 2006).

Fonte	Guttenberg (1958)	Asten (1978, 1984)
Ondas oceânicas golpeando a extensão da costa	0.05 – 0.1Hz	0.5 – 1.2 Hz
Monsões/Perturbações meteorológicas de larga escala	0.1 – 0.25 Hz	0.16 – 0.5 Hz
Ciclones sobre o oceano	0.3 – 1 Hz	0.5 – 3 Hz
Condições meteorológicas de escala local	1.4 – 5 Hz	–
Tremores vulcânicos 2-10 Hz	2 – 10 Hz	–
Zona urbana	1 – 100 Hz	1.4 – 30 Hz

Os ruídos sísmicos manifestam um comportamento descontínuo em relação a aspectos como amplitude e frequência, à medida que são expostos a variações espaciais e temporais impostas por um determinado meio. Okada (2003) destaca que, devido a essa descontinuidade de informações, a identificação e o registro desses ruídos tornam-se complexos, exigindo uma avaliação prévia da variação temporal e espacial na região de investigação. A Figura 18 ilustra a variação do ruído sísmico ao longo do tempo no subúrbio de Sapporo, no Japão, conforme apresentado por Okada (2003). Neste estudo, a variação do ruído foi monitorada em diferentes horários ao longo de dois dias. O autor observou uma significativa mudança de amplitude durante o período monitorado, enfatizando que a presença de uma continuidade nessa característica só foi detectada em períodos curtos do estudo. Os períodos analisados evidenciados na Figura 18, ocorreram em diferentes dias e horários, sendo analisado 180s por monitoramento.

Figura 18: Variação da amplitude do ruído sísmico ao longo do tempo para o subúrbio de Sapporo, no Japão (Okada, 2003).



Fichtner et al. (2019) ressalta que, embora o ruído sísmico demonstre um comportamento essencialmente randômico, é possível identificar padrões comportamentais que conferem uma estrutura coerente para análise. Os autores destacam que, fundamentalmente, o ruído é um campo de ondas sísmicas que se deslocam entre dois pontos a uma velocidade controlada pelas propriedades elásticas do interior de um meio. Esse comportamento apresenta similaridades com a base teórica de outros tipos de campos de ondas, o que viabiliza seu uso em estudos sísmicos de exploração.

Okada (2003) enfatiza que devido à capacidade de permitir correlações físicas e à presença de fontes contínuas consideradas onipresentes, o uso de ruídos tem ganhado destaque em monitoramentos geofísicos, sendo amplamente empregado em métodos microssísmicos (MSM) e interferometria passiva. A utilização de metodologias baseadas no ruído sísmico oferece um amplo campo de aplicação, sendo empregado em estudos como estabilidade de taludes (Mainsant et al., 2012; Hussain et al., 2018; Meira, 2022), monitoramento de barragens de terra (Planès et al., 2016; Wit e Oliver, 2018) e exploração de minas (Mendecki et al., 2010; Flores, 2023).

3.4.5. Sistema de aquisição de dados

O propósito principal de conduzir um levantamento sísmico é avaliar a variação da distribuição espacial e em profundidade da velocidade de uma onda sísmica dentro de um material, com a finalidade de identificar, por meio de correlações, as características elásticas desse meio. Para alcançar esse objetivo, é imperativo adotar um conjunto de metodologias e

instrumentações que facilitem tanto o processo de modelagem quanto o imageamento do local em análise. Ao realizar um levantamento sísmico, é altamente recomendável o uso de instrumentos que garantam a viabilidade operacional do procedimento. Nesse contexto, destaca-se a importância da adoção de uma fonte para a geração do pulso sísmico, a utilização de um transdutor para detectar as ondas sísmicas geradas pela fonte e o emprego de um sismógrafo para registrar e apresentar as formas das ondas sísmicas detectadas (Souza e Gandolfo, 2018).

De acordo com Meira (2022) uma fonte sísmica pode ser definida como uma região, a nível local ou pontual, em que há uma liberação instantânea de energia, produzindo ao meio circundante, uma tensão solicitante momentânea. As fontes sísmicas de impacto são caracterizadas por emitirem um sinal sísmico a partir da colisão entre a queda de um objeto sobre a superfície de um meio. De acordo com Reynolds (2011), as fontes sísmicas podem ser classificadas como fontes de impacto, impulsiva e vibracional (Tabela 8)

Tabela 8: Tipos de fontes sísmicas (modificado de Reynolds, 2011).

Tipos de fonte	Exemplos
Impacto	Marreta
	Percussores de queda livre
	Percussores de queda livre acelerada
Impulsiva	Dinamite
	Cordão de detonação
	Pistola de ar
	Espingarda
Vibracional	Fagulhador de poço (borehole sparker)
	Vibroseis
	Placa de vibração
	Gerador de ondas Rayleigh

Ao ser submetido a passagem de uma onda sísmica, o meio está sujeito a ação de movimentos oscilatórios tridimensionais, que por sua vez variam conforme o intervalo de frequência e amplitude da onda. Com base nesse comportamento é possível mensurar componentes do movimento como a amplitude do deslocamento, velocidade e/ou aceleração.

Independentemente do tipo de componente mensurado tem-se avaliado, principalmente, a velocidade de forma unidimensional (vertical), tendo em vista a maior facilidade de medição em relação as demais componentes (Reynolds, 2011). Neste contexto, os dispositivos utilizados para mensurar o comportamento das ondas sísmicas no solo são nomeados como geofones, que por sua vez são sensores que tem por função detectar a energia sísmica presente em um meio e convertê-la em sinais elétricos de forma a permitir, com o uso de um sismógrafo, o armazenamento destes sinais (Sousa e Gandolfo, 2021).

Kearey et al. (2013) salientam que a fase de registro dos dados sísmicos é crucial durante um procedimento de investigação, demandando cautela por parte do operador responsável pela aquisição. Os autores enfatizam três aspectos fundamentais a serem considerados durante o processo de registro, incluindo o tempo de registro em relação à fonte sísmica, a capacidade de armazenamento e a determinação da velocidade e direção de propagação da onda sísmica.

3.4.6. Métodos geofísicos aplicados à geotecnia

Os métodos geofísicos têm desempenhado um papel significativo na engenharia, especialmente para fins de prospecção de recursos minerais e estudos ambientais. Souza e Gandolfo (2012) destacam que a aplicação da geofísica pode oferecer diversas vantagens em projetos relacionados à área geotécnica, uma vez que esses métodos são considerados não invasivos, caracterizados pela relativa rapidez na execução dos procedimentos de campo e pela capacidade de abranger uma considerável extensão de área durante levantamentos.

O método geofísico a ser escolhido em uma investigação dependerá do tipo de propriedade que se deseja avaliar em um meio. Em geral, esses métodos podem ser categorizados como geoeletricos, perfilagem de poços, potenciais e sísmicos. Na engenharia, os métodos sísmicos têm se destacado devido à possibilidade de obter, de maneira indireta, informações sobre as propriedades elásticas e de densidade dos solos. Esses métodos, em geral, baseiam-se na utilização de ondas de corpo ou superficiais para conduzir a investigação, avaliando a variação da velocidade de propagação dessas ondas ao longo da profundidade do meio (Souza e Gandolfo, 2021).

Da mesma forma que acontece com qualquer método de investigação de campo, os métodos sísmicos apresentam limitações em termos de seu uso operacional. Souza e Gandolfo (2021) ressaltam que uma das principais dificuldades enfrentadas por essas técnicas é a propensão a resultados ambíguos, especialmente quando aplicadas a materiais diferentes que

compartilham características físicas semelhantes. Por esse motivo, é comum utilizar esse método em conjunto com uma abordagem complementar, como sondagens SPT e rotativas. Dentre os principais métodos aplicados na geotecnia, destacam-se a sísmica de reflexão, refração e de ondas superficiais. A seguir, são apresentados os conceitos operacionais associados a cada um desses métodos, juntamente com uma breve descrição de seus procedimentos executivos de campo.

Levantamento sísmico de reflexão

O levantamento sísmico de reflexão baseia-se na medição do tempo de propagação das ondas sísmicas de corpo (ondas P e S) que sofrem reflexão ao longo das interfaces de um meio estratificado. Este método é caracterizado por possibilitar a investigação de materiais localizados em elevadas profundidades, sendo mais comumente empregado na indústria do petróleo. A qualidade do sinal sísmico, obtida durante o processo de aquisição, varia conforme o grau de contraste existente entre as camadas investigadas. Assim, quanto maior for o contraste, maior será a energia obtida no sistema (Ayres Neto, 2000).

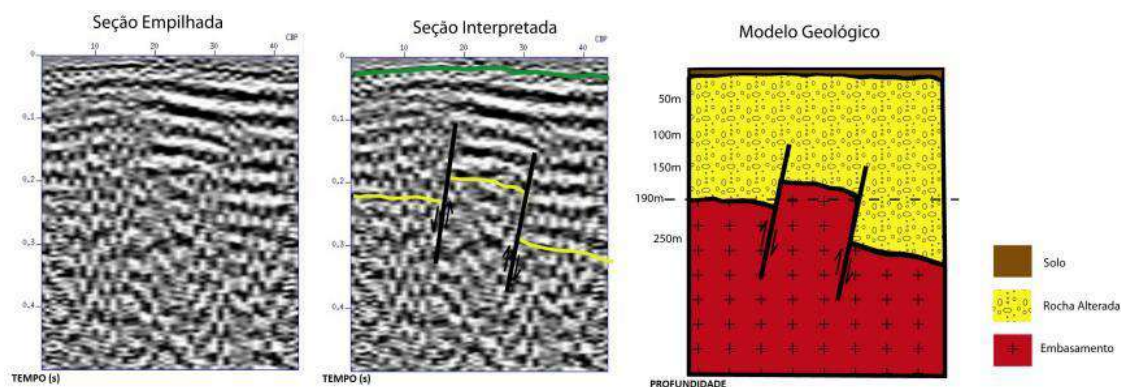
No processo de aquisição em campo da sísmica de reflexão, basicamente, utiliza-se uma linha composta por geofones instalados na superfície do perfil a ser investigado, como pode ser visualizado na Figura 19. Esses geofones formam um arranjo capaz de detectar as ondas refletidas no meio. Essa linha é então conectada a um sistema de aquisição de dados que consiste em sismogramas. Para gerar a energia sísmica necessária para a execução do levantamento, são empregadas fontes sísmicas, as quais variam de acordo com as necessidades da investigação (Ayres Neto, 2000).

Como resultado final do procedimento de sísmica de reflexão, são geradas seções bidimensionais (Figura 20), as quais proporcionam a obtenção de parâmetros essenciais para a compreensão geológica do meio, tais como a espessura das camadas, o mergulho (diminuição brusca de um tipo de solo) e falhas. Em linhas gerais, essas seções apresentam uma resolução satisfatória, tanto na direção horizontal quanto vertical, sendo sua principal aplicação voltada para a análise de sequências sedimentares e o mapeamento da geometria dos embasamentos subjacentes (Souza e Gandolfo, 2018).

Figura 19: Esquema da disposição de geofones em um ensaio sísmico de reflexão. AFC Geofísica (2023).



Figura 20: Exemplo de seção sísmica obtida a partir do método de sísmica de reflexão (Boas, 2014).



Nos ensaios sísmicos, a seção empilhada denota um conjunto de traços sísmicos individuais que foram cumulativamente somados com o intuito de otimizar a relação sinal-ruído, destacando, assim, as características geológicas mais distintas. A seção interpretada é, por conseguinte, o desdobramento da análise dessas seções empilhadas, no qual intérpretes identificam e mapeiam características geológicas com base nas variações nas amplitudes e tempos de chegada das ondas sísmicas (Boas, 2014).

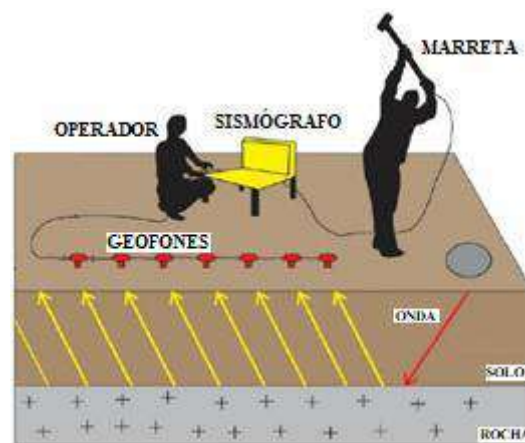
A partir da seção interpretada, é possível instaurar um modelo geológico, representando a subsuperfície da região sob investigação e delineando a distribuição de diversas camadas geológicas, tais como rochas e sedimentos. A interpretação sísmica proporciona dados valiosos acerca da estrutura geológica, apresentando relevância crucial em pesquisas de

exploração de recursos naturais, projetos de engenharia civil e administração de recursos hídricos, entre outras aplicações de destaque.

Levantamento sísmico de refração

O levantamento sísmico de refração é um método de investigação subsuperficial que se baseia na medição do tempo de propagação das ondas sísmicas que sofrem refração ao longo de um meio estratificado. Esse método utiliza a energia proveniente de fontes sísmicas, concentrando-se principalmente nas ondas P. A Figura 21 ilustra esquematicamente o arranjo do sistema de aquisição de dados utilizado na execução de um levantamento sísmico de refração.

Figura 21: Processo de aquisição e processamento de dados da sísmica de refração (modificado de Guireli Netto *et al.*, 2020)

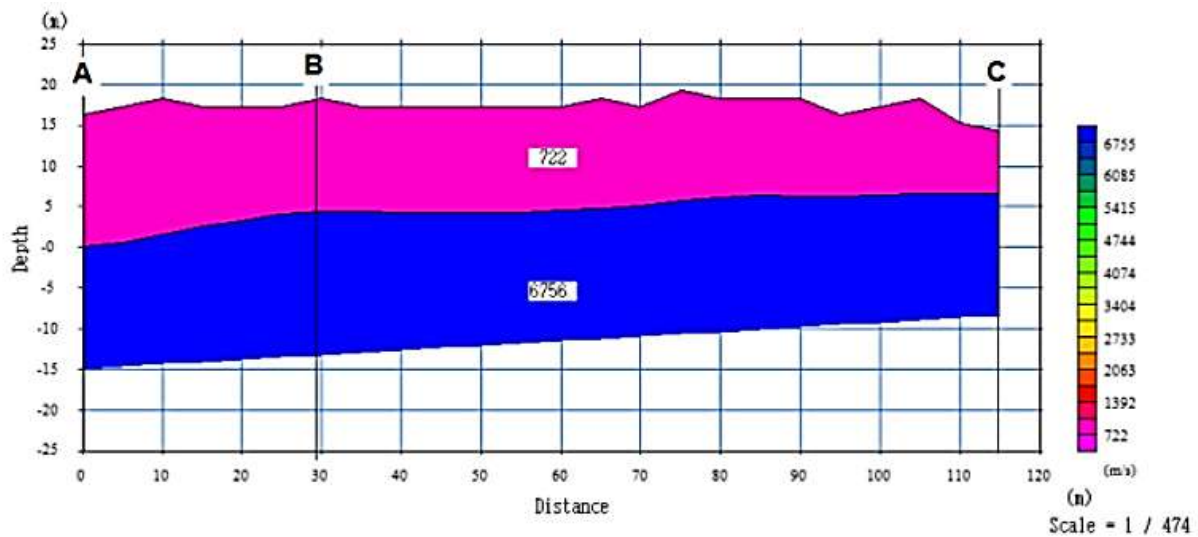


Este sistema é similar ao utilizado na sísmica de reflexão, compreendendo uma linha sísmica constituída por um conjunto de geofones dispostos de maneira longitudinal na superfície do meio a ser investigado. Essa linha está conectada a um sismograma para o armazenamento dos dados de aquisição. Essa disposição tem a função de captar as ondas sísmicas de corpo que retornam à superfície por meio da refração crítica ao encontrar camadas com contrastes de propriedades. Para gerar a energia sísmica necessária para realizar o levantamento, são utilizadas fontes sísmicas, predominantemente impulsivas ou explosivas, variando conforme o alcance espacial desejado e a resolução pretendida no levantamento. Em investigações de pouca profundidade, a fonte frequentemente empregada é a de impacto, com destaque para o uso de uma marreta (Nogueira, 2014).

A sísmica de refração apresenta uma ampla gama de aplicações na engenharia e pode ser empregada para avaliar propriedades de materiais, como o coeficiente de Poisson e o módulo de rigidez. A partir dos dados adquiridos na sísmica de refração, é possível obter seções

sísmicas bidimensionais (Figura 22), as quais podem ser apresentadas em forma de modelo de camadas e/ou tomografia sísmica. Ambos os produtos proporcionam a representação de estratos contendo informações sobre a velocidade de propagação, espessura e profundidade das camadas identificadas durante o levantamento (Souza e Gandolfo, 2018).

Figura 22: Exemplo de produto sísmico gerado a partir da sísmica de refração (Santos et al., 2017).



A Figura 22 apresenta uma clara distinção entre duas seções geológicas, evidenciando variações nas velocidades sísmicas. Essas variações refletem contrastes significativos nas propriedades físicas das camadas subsuperficiais. Em uma seção, destacada em azul, observa-se uma velocidade sísmica relativamente alta (6756 m/s), indicativa de materiais mais compactos e consolidados.

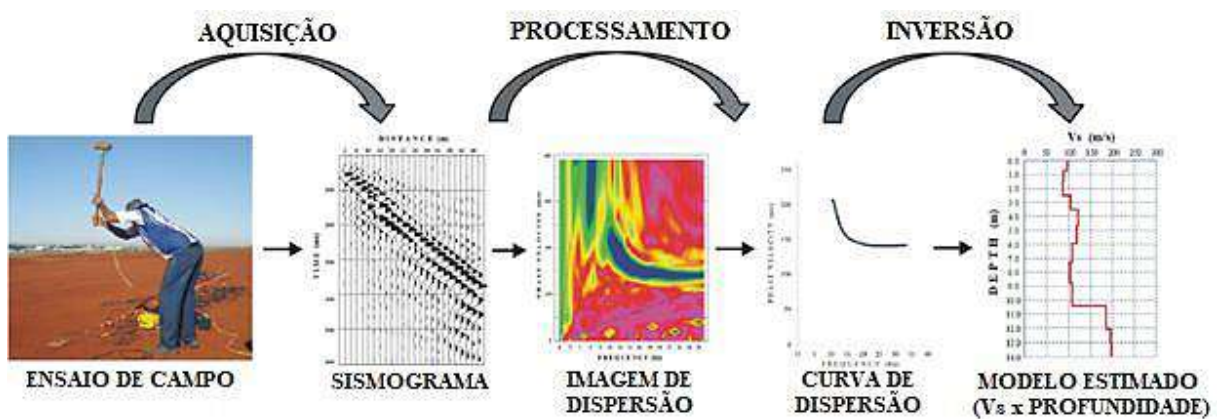
Na outra seção, destacada em rosa, a velocidade sísmica é notavelmente menor (722 m/s), sugerindo a presença de materiais menos consolidados, como sedimentos ou solos inconsolidados. Essa diferença de velocidade entre as duas seções destaca-se como uma característica distintiva na estrutura geológica da área investigada.

Levantamento sísmico com ondas de superfície

Os métodos sísmicos que se utilizam de ondas superficiais são fundamentados no emprego de ondas Rayleigh ou Love para investigar meios que apresentem características físicas heterogêneas. Nesse contexto, a preferência recai sobre a adoção de ondas Rayleigh para a execução do levantamento, pois este processo é considerado mais simples e prático em sua gênese. Devido à sua considerável concentração de energia, esse tipo de método pode ser aplicado em ambientes sujeitos à presença de ruídos, sejam eles de origem cultural ou natural (Guireli Netto et al., 2020).

Eikmeier (2018) ressalta que a operação fundamental desse método envolve a aquisição de dados provenientes das ondas de superfície, que são posteriormente processados para obter uma curva de dispersão. A partir dessa curva, um perfil de velocidade de propagação ao longo da profundidade do local investigado é gerado por meio de relações matemáticas. Esse perfil permite a avaliação indireta de características do material, como densidade e rigidez. As etapas gerais de funcionamento dessa metodologia são apresentadas na Figura 23.

Figura 23: Processo de aquisição e processamento de dados sísmicos oriundos do método de ondas superficiais (Abreu et al., 2016)

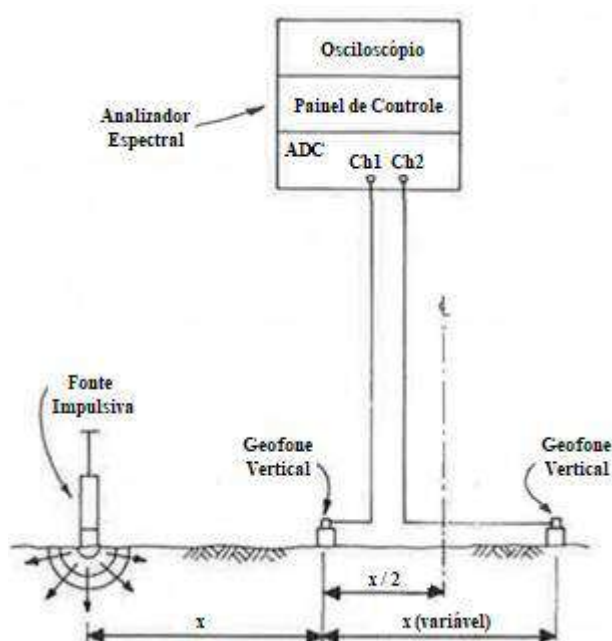


Neste tipo específico de levantamento sísmico, há a possibilidade de adotar diferentes abordagens operacionais para conduzir o processo de aquisição de dados. Entre as variações disponíveis, os métodos SASW (Análise Espectral de Ondas de Superfície) e MASW (Análise de Ondas de Superfície Multicanal) destacam-se como as mais frequentemente empregadas ao longo da história.

No cenário geotécnico brasileiro, a execução dos ensaios MASW e SASW não é especificamente abordada por normas regulamentadoras dedicadas. As diretrizes existentes, conforme delineado na NBR 15935:2011 "Investigações ambientais — Aplicação de métodos geofísicos", e a DNIT ME 045/95, intitulada "Prospecção geofísica pelo método da sísmica de refração", oferecem diretrizes para a aplicação de métodos geofísicos, mas não abordam diretamente os procedimentos específicos desses ensaios.

A metodologia SASW é caracterizada por um procedimento não destrutivo que emprega dois geofones e um sismógrafo para registrar as ondas sísmicas geradas por uma fonte de impacto, como uma marreta, por exemplo (Souza e Gandolfo, 2018). A disposição de cada componente nesse método é esquematizada na Figura 24.

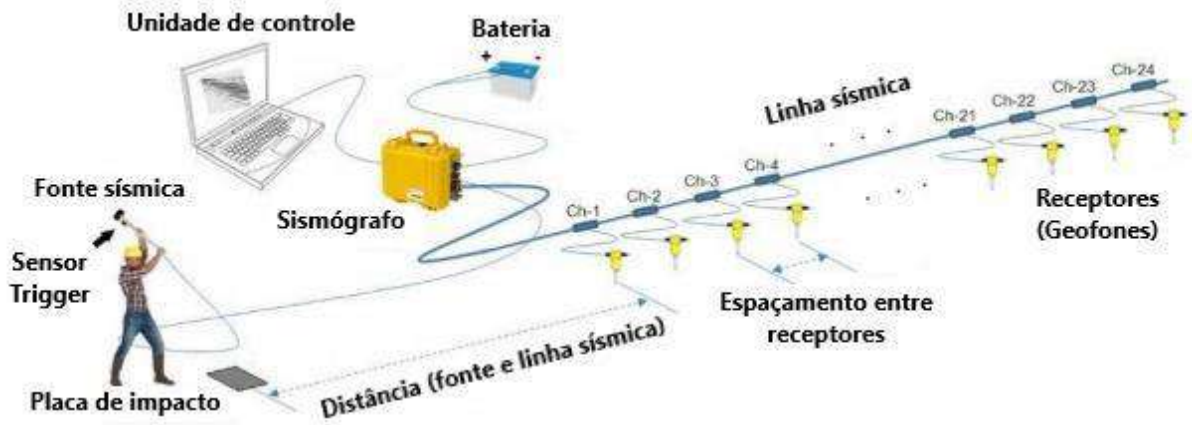
Figura 24: Processo de aquisição e processamento de dados da metodologia SASW (Nazarian, 1984)



A principal limitação associada a este método está relacionada ao tempo necessário para conduzir a pesquisa sísmica. Devido ao emprego de apenas dois geofones para a captação de ondas, é essencial realizar alterações frequentes na configuração do levantamento, a fim de abranger uma escala espacial mais ampla. Essa necessidade de ajustes constantes estende significativamente a duração total do levantamento sísmico. Em virtude dessa questão, observa-se uma diminuição do uso desse método ao longo do tempo, sendo substituído por abordagens mais eficientes, como o MASW (Park et al., 1999).

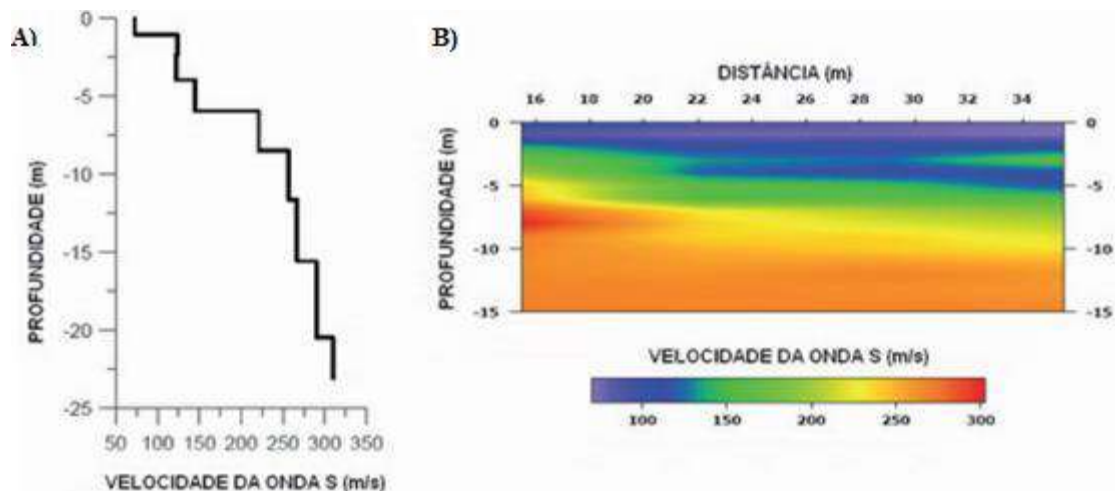
A abordagem MASW compartilha um conceito de aquisição semelhante ao SASW, mas difere na quantidade de receptores sísmicos empregados durante o processo de investigação. Neste método, utiliza-se um maior número de geofones dispostos em uma linha, seja ela longitudinal ou transversal, de modo a estarem equidistantes entre si e conectados a um sismógrafo (Abreu et al., 2016). Devido à configuração de campo semelhante àquela usada em levantamentos com ondas de corpo, o método MASW também pode ser adotado como uma abordagem complementar a esse tipo de estudo, permitindo uma utilização mais eficaz da energia sísmica gerada pela fonte (Park et al., 1999). O esquema da disposição de cada componente do método pode ser observado na Figura 25.

Figura 25: Processo de aquisição de dados sísmicos por meio da metodologia MASW (MASW, 2021).



Como resultado desse método, a cada experimento realizado, obtém-se um perfil unidimensional da variação da velocidade de propagação da onda sísmica no meio (Figura 26a). Contudo, é viável integrar vários ensaios ao longo de uma mesma linha sísmica, permitindo a criação de uma seção bidimensional da distribuição espacial da velocidade no meio (Figura 26b). Essas informações são de suma importância para estudos geotécnicos que envolvem a investigação de subsuperfícies, podendo ser um procedimento complementar aos ensaios geotécnicos convencionais, como o SPT (*Standard Penetration Test*), CPT (*Cone Penetration Test*) e a abertura de trincheira de monitoramento, que fornecem informações pontuais sobre um material específico (Souza e Gandolfo, 2012).

Figura 26: Produtos finais obtidos a partir da aquisição de dados pela metodologia MASW: (a) unidimensional e (b) bidimensional (Souza e Gandolfo, 2012).



3.5. Ensaio MASW

O método *Multichannel Analysis of Surface Waves* – MASW, também conhecido como Análise Multicanal de Ondas Superficiais, constitui uma abordagem sísmica que possibilita a determinação indireta da estratigrafia do subsolo em um local específico. Sua base está na observação das alterações nas propriedades dinâmicas dos materiais que compõem o subsolo. Esse método implica a análise das ondas superficiais, como as Ondas Rayleigh ou Ondas Love, captadas por um dispositivo de múltiplos canais. Essas ondas são geradas por uma fonte de energia impulsiva na superfície, a uma distância previamente estabelecida da linha de estudo. O resultado consiste na obtenção do perfil de velocidades da onda de cisalhamento (V_s) para o ponto central dessa linha (López, 2016).

Na década de 80, Nazarian (1984) e Nazarian e Stokoe (1984) introduziram o método conhecido como Análise Espectral de Ondas de Superfície, abreviado como SASW (Spectral Analysis of Surface Waves). Esse método envolve o uso de fontes superficiais e dois sensores para o registro de dados. Diversos disparos, com diferentes espaçamentos entre os sensores, são realizados para registrar diferentes comprimentos de onda. Contudo, foi com o avanço do método de Análise Multicanal de Ondas de Superfície, ou MASW, desenvolvido pelo Serviço Geológico do Kansas (Kansas Geological Survey) (Park et al., 1996, 1998, 1999), que a análise de ondas de superfície ganhou mais destaque na geofísica rasa. Essa abordagem inovadora trouxe melhorias significativas no processamento e interpretação de dados, tornando o método mais prático e de execução mais rápida.

Originalmente, o método MASW estava centrado na análise das ondas Rayleigh originadas por fontes ativas, como impactos verticais e vibroseis, sendo registradas por um conjunto linear de sensores de componente vertical. Posteriormente, foram introduzidas abordagens de aquisição com fontes passivas, como o uso de ruído ambiental. Essa abordagem demandava um arranjo bidimensional de sensores e despertou interesse por fornecer informações de profundidades mais substanciais por meio do registro de frequências mais baixas (Park et al., 2004).

Simultaneamente, a prática de combinar curvas de dispersão derivadas de testes com fontes ativas e passivas em uma única curva também foi adotada. Nessa composição, são integradas características distintas e essenciais das duas aquisições: a abordagem ativa para frequências mais elevadas, permitindo a caracterização dos primeiros metros na subsuperfície; e a abordagem passiva para frequências mais baixas, proporcionando uma caracterização mais

profunda (Park et al., 2005, 2007). A análise das ondas Love tem recebido maior atenção nos últimos anos (XIA et al., 2012), embora haja uma escassez relativa de publicações sobre o assunto. Isso se deve, provavelmente, à sua execução mais desafiadora, pois requer sensores com componente horizontal, que tendem a ser mais dispendiosos, e fontes capazes de gerar movimento cisalhante transversal (FOTI et al., 2017).

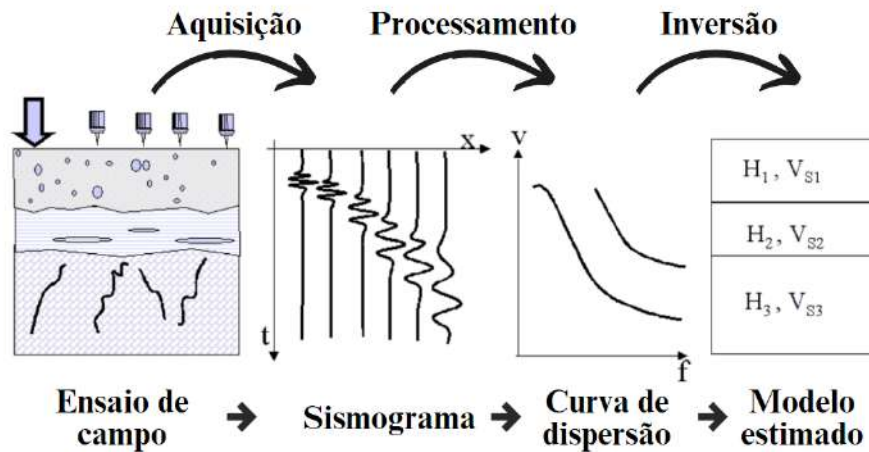
Dessa forma, por meio do método MASW, torna-se possível realizar a análise do comportamento dispersivo tanto das ondas Rayleigh quanto das ondas Love. As ondas Rayleigh são capturadas tanto pela componente vertical (o mais comum) quanto pela componente radial dos sensores, enquanto as ondas Love são registradas exclusivamente pela componente transversal. Para aquisições com fontes ativas, é necessário apenas um arranjo linear de sensores, ao passo que, para fontes passivas, requer-se um arranjo bidimensional, exceto no caso do *Roadside Passive MASW*.

O objetivo primordial desse método é elucidar a distribuição em profundidade da velocidade de propagação das ondas S. As ondas superficiais comumente adquiridas são as ondas de Rayleigh, notáveis por estarem presentes exclusivamente na componente vertical do registro sísmico, correspondendo a aproximadamente dois terços da energia gerada por uma fonte pontual (Richart et al., 1970). Diversas metodologias são conhecidas, variando, por exemplo, o número e o tipo de geofones utilizados, a geometria do arranjo, e o processo para obter a curva de dispersão e/ou o algoritmo de inversão (Nazarian e Stokoe, 1984; Stokoe et al., 1994; Park et al., 1998-b, 1999; Xia et al., 1999, 2012). Após o processamento, são gerados modelos de velocidade das ondas S em 1D. De acordo com Xia et al. (2012), é possível determinar, por meio de uma geometria específica em *array*, o modelo de velocidades das ondas S em 1,5D, levando em consideração diversos modelos de velocidades 1D.

O processo de um ensaio MASW pode ser dividido em três etapas distintas: aquisição, processamento e inversão (conforme representado na Figura 27). Na abordagem inicial de aquisição, realiza-se um ensaio semelhante a um simples teste de refração sísmica. Esse procedimento inclui a geração de ondas sísmicas, registradas por um arranjo de sensores, como geofones, resultando na obtenção de um sismograma ao término do processo. Na etapa de processamento, interpretam-se as curvas de dispersão, mencionadas no plural devido às diferentes curvas de modos apresentadas por várias ondas. Na fase de inversão, cada curva de dispersão, ou todas em conjunto, é invertida para derivar perfis de velocidade. Esses perfis, representados por gráficos de profundidade em relação à velocidade, caracterizam a subsuperfície da área de estudo com base na velocidade de propagação das ondas P e/ou S. É

relevante observar que o perfil das ondas P está consideravelmente relacionado ao perfil das ondas S, o que, em muitos casos, favorece à preferência pela análise exclusiva do perfil das ondas S.

Figura 27: Etapas de um ensaio MASW (modificado de Strobbia, 2003).



As aplicações mais comuns do MASW incluem:

- Identificação de morfologias e espessuras das camadas do subsolo.
- Avaliação dos estados de compactidade e fragilidade dos materiais.
- Determinação dos valores dos módulos elásticos de deformação.
- Cálculo de parâmetros relevantes para engenharia e geotecnia.
- Análise da microzonificação sísmica e classificação de solos.

3.6. Ensaio SCPTu

O conceito atual do piezocone sísmico, conforme empregado, foi concebido inicialmente por Campanella et al. (1986) como uma extensão da tecnologia do Piezocone. Embora os sistemas possam apresentar variações locais, como a incorporação de geofones, acelerômetros, diversas fontes de aplicação de energia, entre outros, eles permanecem fundamentados nos princípios básicos, conforme destacado por Butcher e Powell (1996).

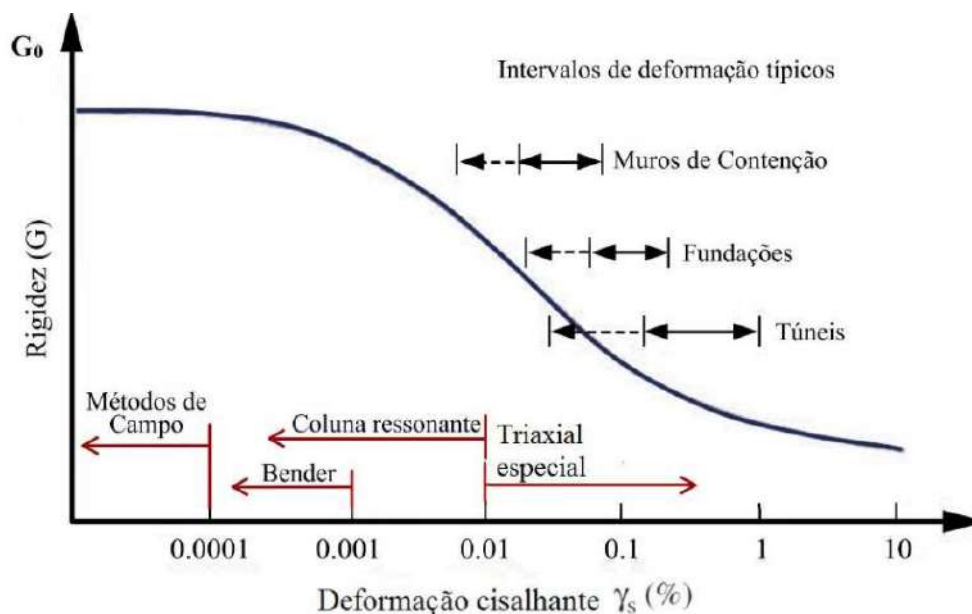
O ensaio de SCPTu é uma variação do ensaio padrão de cone, acrescido da medição da velocidade das ondas cisalhantes (V_s) no interior do solo. A obtenção dos valores de V_s é realizada independentemente dos registros durante a cravação do cone. Para isso, é necessário interromper o ensaio de cone em profundidades previamente determinadas para efetuar esses registros. Esse procedimento resulta em um número menor de leituras de V_s em comparação

aos parâmetros obtidos durante a cravação do cone, como resistência de ponta (q_t), poropressão (u) e atrito lateral (f_s).

A rigidez é fundamental em projetos de fundações sujeitos a cargas vibratórias, em fundações localizadas em áreas propensas a atividades sísmicas e em questões estáticas relacionadas a fundações rasas e profundas (Mayne, 2001). A aplicação de técnicas geofísicas para a determinação de parâmetros geotécnicos é justificada pelo fato de que o comportamento tensão-deformação de muitos solos é linear, apresentando valores elevados de rigidez para pequenos níveis de deformação. As deformações do terreno podem ser adequadamente previstas por meio de modelos não-lineares, considerando a elevada rigidez inicial (Matthews et al., 1996).

A propagação de ondas sísmicas provoca pequenas deformações cisalhantes no solo, geralmente inferiores a 0,001%, o que as torna adequadas para a determinação do Módulo de Cisalhamento Máximo (G_0). A Figura 28 ilustra a faixa de variação de G_0 para diferentes níveis de deformação. A estimativa da rigidez do terreno pode ser obtida por meio de três técnicas de campo. A primeira envolve a interpretação das ondas Rayleigh, que se deslocam próximo à superfície a partir de uma fonte vibratória contínua ou por impactos no solo. As outras duas técnicas utilizam a interpretação da componente cisalhante das ondas sísmicas em arranjos conhecidos como *crosshole* e *dowhole*. Essa nomenclatura é definida com base no posicionamento da fonte mecânica geradora de ondas elásticas e dos receptores sísmicos (acelerômetros e/ou geofones).

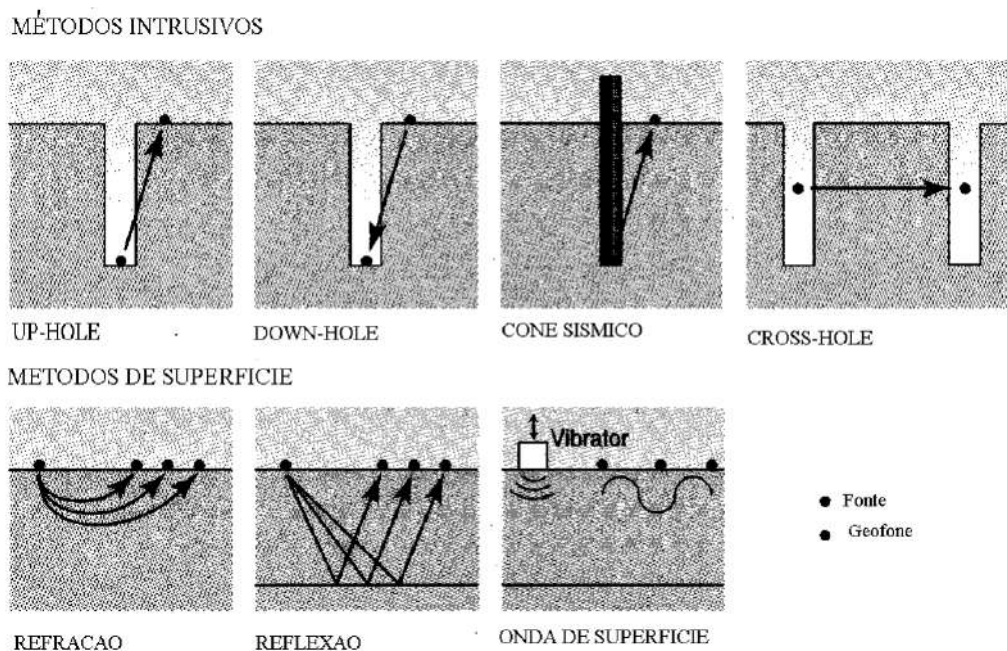
Figura 28: Variação da rigidez do solo em função da deformação. Rocha (2018) adaptado de Butcher e Powell (1996).



Ensaio triaxiais especiais (com medição de deformações locais), *bender e elements*, coluna ressonante e ensaio torcional são técnicas de laboratório utilizadas para determinar o módulo de cisalhamento máximo do solo. No entanto, as técnicas de campo são mais vantajosas, uma vez que operam em pequenos níveis de deformação, determinam parâmetros médios reduzindo os efeitos da variabilidade do solo e não são afetadas pelos processos de amostragem necessários para a realização de ensaios laboratoriais. Além das vantagens técnicas, é relevante mencionar que os métodos de campo geralmente apresentam uma economia substancial em termos de custos, tornando-os uma escolha atrativa.

Métodos convencionais utilizados para determinar a rigidez incluem testes de campo em placas, ensaios triaxiais e de coluna ressonante realizados em laboratório. A Figura 29 ilustra algumas opções de arranjo da fonte e dos geofones para a determinação do módulo de cisalhamento máximo.

Figura 29: Métodos sísmicos para determinação do módulo de cisalhamento do solo (Matthews *et al.*, 1996).



O SCPTu, ou teste sísmico do piezocone, é uma técnica *in-situ* para investigação do subsolo, proporcionando a caracterização de depósitos de solo por meio da coleta de três leituras contínuas com a profundidade: (a) resistência na ponta do cone, q_c , (b) atrito na luva, f_s , e (c) poropressão, u_2 . Adicionalmente, são obtidas duas leituras em intervalos discretos de profundidade: (d) tempo para 50% de dissipação da água do poro, t_{50} ; e (e) velocidade de onda de cisalhamento, V_s . O piezocone sísmico é um dispositivo híbrido eficiente e econômico, integrando as medições de um penetrômetro de cone, cisalhamento em furo e sonda de

piezocone com um teste geofísico em furo, simplificando assim o tempo de campo e aumentando a produtividade na caracterização geotécnica do local.

Por meio das diversas leituras obtidas pelo penetrômetro piezocone, torna-se possível distinguir tipos de solo e estimar propriedades geotécnicas essenciais de forma quantitativa, tais como parâmetros de resistência (ângulo de atrito, resistência não drenada), variáveis *in-situ* (coeficiente de pressão lateral, parâmetro de estado, densidade relativa), parâmetros de fluxo (coeficiente de consolidação e permeabilidade do solo) e rigidez (módulo de cisalhamento em pequenas deformações; módulo confinado). Adicionalmente, existem métodos para utilizar as leituras do piezocone a fim de avaliar diretamente a suscetibilidade à liquefação do solo, a capacidade de carga e deslocamentos de fundações rasas e profundas, bem como quantificar a variabilidade espacial (Pita, 2022).

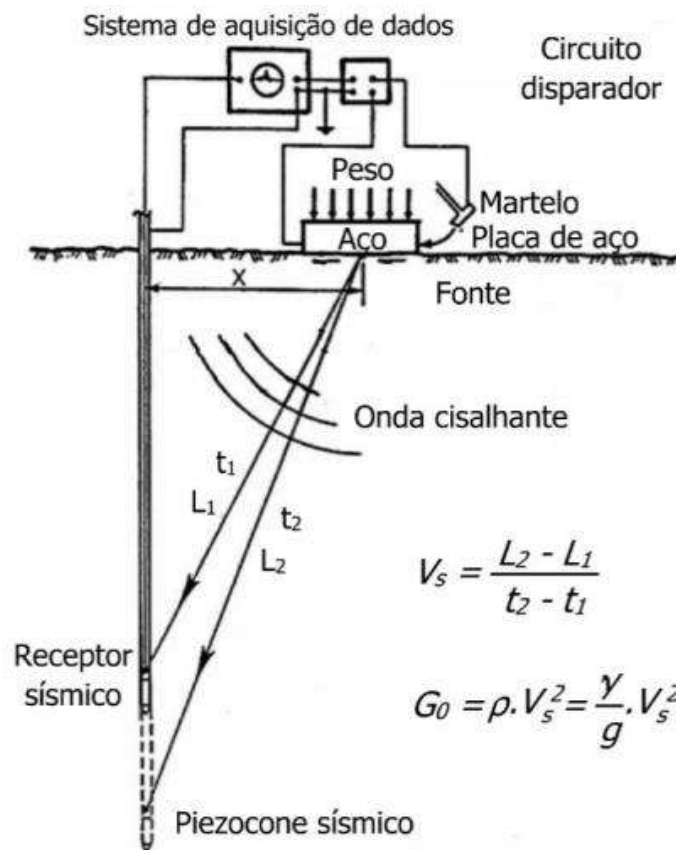
O SCPTu é uma ferramenta excelente para avaliar a variabilidade geotécnica, pois fornece informações suficientes para quantificar a variabilidade em três escalas: estratigráfica, litológica e variabilidade inerente (Uzielli et al., 2007). A avaliação da variabilidade estratigráfica utilizando o SCPTu tem sido abordada principalmente por meio de gráficos CPT, como os desenvolvidos por Robertson (1990; 2009; 2016) e Schneider et al. (2008; 2012). Esses gráficos utilizam as diferentes leituras do piezocone (ou seja, atrito da luva, resistência da ponta e poropressão) para classificar o comportamento *in-situ*, por exemplo, semelhante a argila, semelhante a areia e de transição (Pita, 2022).

Os gráficos são amplamente utilizados na prática para definir perfis estratigráficos e camadas representativas. A variabilidade litológica, que considera características não uniformes, como uma lente de areia dentro de uma camada semelhante a argila, também pode ser mapeada usando o piezocone, pois fornece um perfil quase contínuo, permitindo a detecção dessas características não uniformes. Essas características litológicas geralmente são observadas como picos (no caso de uma camada macia com uma lente de material rígido) ou quedas (no caso de uma camada rígida com uma lente de material macio) dentro de uma camada.

A Figura 30 apresenta uma representação esquemática dos componentes necessários para a realização do ensaio SCPTu. De acordo com Campanella et al. (1896), as medições de V_s devem ser realizadas em intervalos de 1 metro. Atualmente, as medições de V_s são conduzidas a cada meio metro. Existem três métodos para determinar V_s : primeiro tempo de chegada, *cross-over* e *cross-correlation*. Conforme observado por Campanella e Stewart

(1992), o método de cross-correlation supera os demais, pois é menos suscetível a distorções no sinal, resultando em dados mais consistentes e confiáveis.

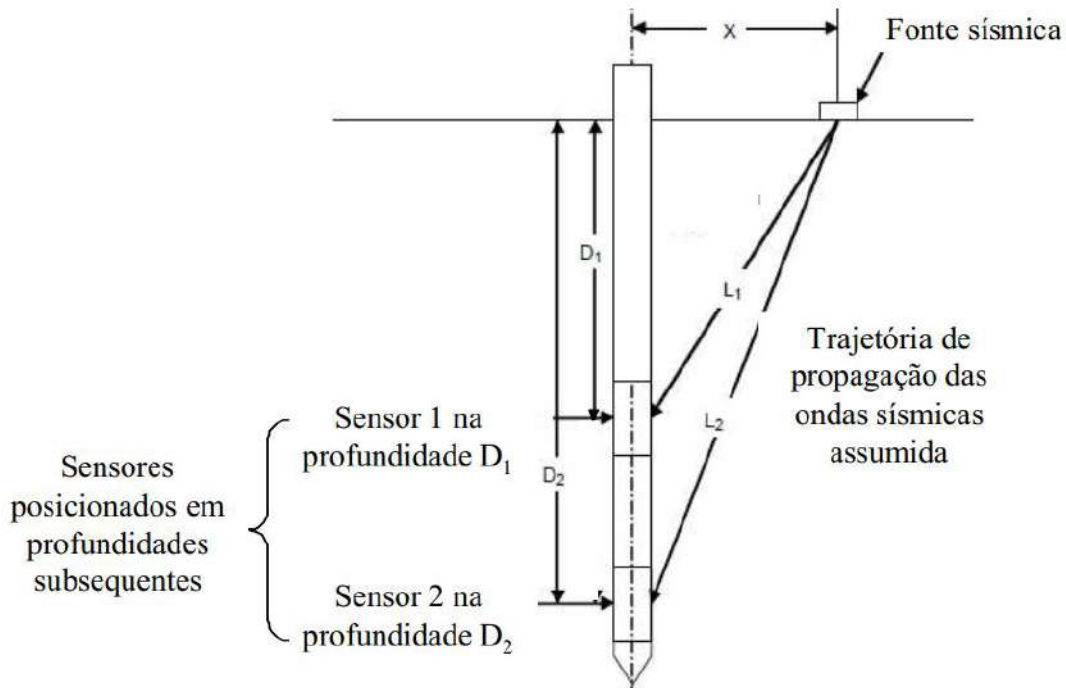
Figura 30: Layout de um ensaio SCPTu. Rocha (2018) adaptado de Campanella e Stewart (1992).



3.6.1. Ensaio sísmico down-hole

O ensaio sísmico *down-hole* trata-se de uma técnica mais econômica que o ensaio *cross-hole* que pode ser realizado cravando-se uma ponteira sísmica no subsolo. O ensaio consiste em determinar o tempo de propagação das ondas sísmicas geradas na superfície e captadas por um ou mais transdutores sísmicos, em geral geofones, posicionados a diferentes profundidades. Detalhes sobre a execução e interpretação dos resultados desse ensaio são apresentados Butcher et al. (2005). Na sua interpretação considera-se que as ondas percorram a trajetória da fonte ao receptor em trajetória linear. A cravação da ponteira sísmica no terreno mantém um excelente contato entre o instrumento e solo circundante, possibilitando o registro de sinais com excelente qualidade (Campanella e Stewart, 1992), além de dispensar a execução de um pré-furo, agilizando e barateando o processo. A Figura 31 ilustra o esquema de um ensaio sísmico *down-hole*.

Figura 31: Representação esquemática de um ensaio sísmico *down-hole* (Vitali, 2011).



No ensaio de piezocone sísmico incorpora-se transdutores sísmicos a ponteira do cone, possibilitando a realização da técnica sísmica *down-hole* durante interrupções na cravação da ponteira. Detalhes sobre ensaio de piezocone sísmico são encontrados em Campanella e Howie (2008) e em Butcher et al. (2005).

3.6.2. Interpretação de ensaios com piezocone (CPTU)

A base para a identificação do perfil geotécnico a partir dos resultados de ensaios de piezocone é a utilização de ábacos de classificação, como aquele sugerido por Robertson (2009), que correlaciona a resistência de ponta com a razão de atrito ($R_f = f_s/q_t$), obtidas durante a penetração (Figura 32 e Tabela 9). Basicamente, tem-se alta resistência de ponta associada a um baixo atrito lateral para as areias, e o inverso para as camadas argilosas.

Figura 32: Critérios de classificação dos solos para interpretação da estratigrafia, sistema de classificação de Robertson et. al. (2010).

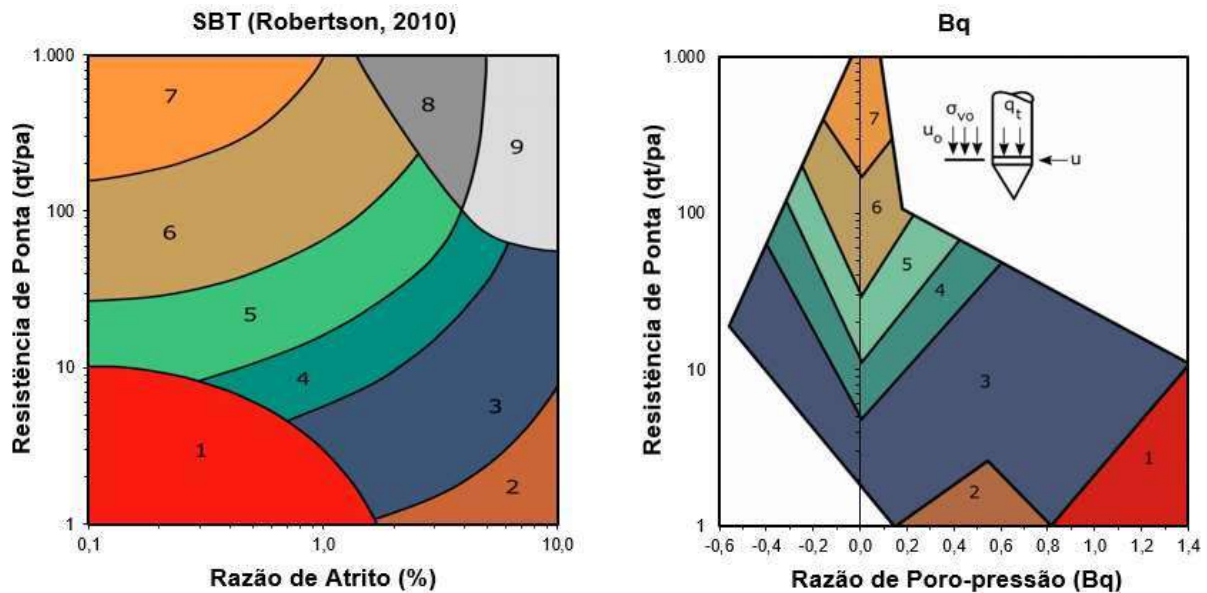


Tabela 9: Critérios de classificação dos solos para interpretação da estratigrafia, sistema de classificação de Robertson et. al. (2010).

SBT	Tipo de comportamento do solo
1	Solo fino sensível
2	Material orgânico
3	Argila a argila siltosa
4	Silte argiloso a argila siltosa
5	Areia siltosa a silte arenoso
6	Areia a areia siltosa
7	Areia pedregulhosa a areia
8	Areia muito rija a areia argilosa
9	Solo fino muito rijo

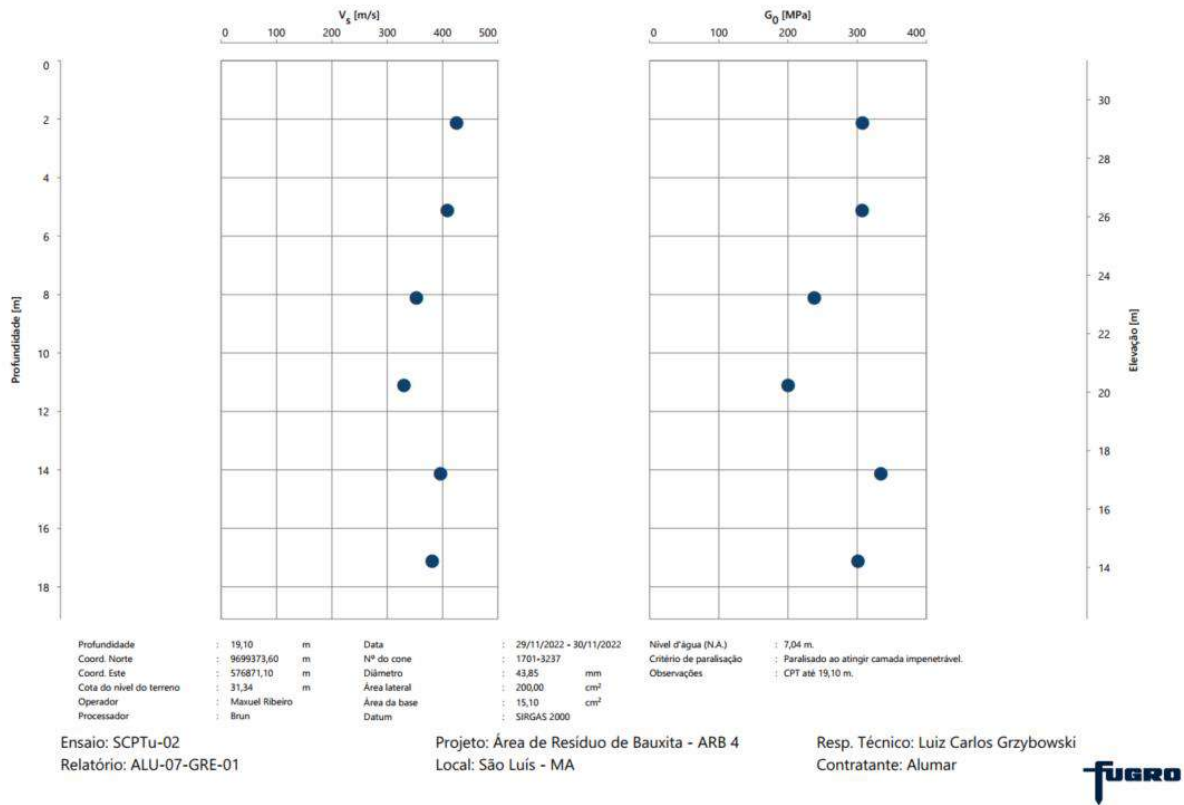
3.6.3. Interpretação de resultados de SCPTu

Ao realizar-se o ensaio sísmico no CPTu, intitulado de SCPTu, são obtidas leituras pontuais de velocidades de ondas cisalhantes (V_s) em profundidades determinadas. A quantidade de dados obtidos em cada ensaio, depende da necessidade do projetista e da empresa que realiza o ensaio.

Na Figura 33 é possível verificar os resultados obtidos com um ensaio SCPTu, onde são obtidos 6 dados de velocidades cisalhantes, nas profundidades de 2, 5, 8, 11, 14 e 17m de

profundidade. Nesse ensaio, também foi calculado os valores de módulo de cisalhamento (G_0), com a utilização dos valores de V_S e da densidade específica do solo (ρ).

Figura 33: Exemplo de resultado de análise sísmica de um ensaio SCPTu. Fugro (2023).



3.7. Correlações entre métodos geofísicos e métodos convencionais

Na literatura é possível encontrar correlações que permitem obter parâmetros (módulo de cisalhamento, poropressão, resistência não-drenada, e módulo de deformabilidade), a partir das ondas V_S , bem como correlações com parâmetros obtidos pelos métodos convencionais de sondagem como N_{SPT} e o CPTu.

3.7.1. Correlações entre V_S e N_{SPT}

Existem diversas correlações na literatura entre a velocidade de ondas de cisalhamento (V_S) e o número de golpes (N_{SPT}) medido no ensaio de penetração padrão (SPT). Uma das correlações mais simples (Equação 24), embora variável, é apresentada por Poulos (2022) na forma:

$$V_S = A \cdot N^B \quad \text{Equação 24}$$

Aqui, N representa o valor obtido pelo SPT, enquanto A e B são parâmetros empíricos com valores específicos que variam entre diferentes autores (Tabela 10). Observa-se uma considerável variabilidade nos coeficientes dessas correlações, atribuível às distintas condições geotécnicas, métodos e equipamentos utilizados nas investigações (FATEHNIA et al., 2015). Um meio de avaliar a diferença dos valores de N estimados por meio dessas correlações em comparação com o N medido no SPT é apresentado na Tabela 2.

Tabela 10: Correlações propostas entre N_{SPT} e V_S . Hanumantharao e Ramana (2008); Fatehnia et al (2015); Fernández (2017); Poulos, (2022).

Autor(es)	Tipo de solo	Correlações entre N_{SPT} e V_S (m/s)
Kanai (1966)	Todos os solos	$V_S = 19 \cdot N^{0,6}$
Imai e Yoshimura (1970)	Todos os solos	$V_S = 76 \cdot N^{0,39}$
Shibata (1970)	Areias	$V_S = 32 \cdot N^{0,50}$
Ohta et al (1972)	Areias	$V_S = 87 \cdot N^{0,36}$
Fujiwara (1972)	Todos os solos	$V_S = 92,1 \cdot N^{0,337}$
Ohsaki e Iwasaki (1973)	Todos os solos	$V_S = 81,4 \cdot N^{0,39}$
	Solos não coesivos	$V_S = 59,4 \cdot N^{0,47}$
Imai et al (1975)	Todos os solos	$V_S = 90 \cdot N^{0,34}$
Imai (1977)	Todos os solos	$V_S = 92,1 \cdot N^{0,337}$
	Areias	$V_S = 80,6 \cdot N^{0,331}$
	Argilas	$V_S = 102 \cdot N^{0,292}$
Fialho Rodrigues (1979)	Todos os solos	$V_S = 81,39 \cdot N^{0,34}$
JRA (1980)	Argilas	$V_S = 100 \cdot N^{0,33}$
	Areias	$V_S = 80 \cdot N^{0,33}$
Seed e Idriss (1981)	Todos os solos	$V_S = 61 \cdot N^{0,50}$
Imai e Tonouchi (1982)	Todos os solos	$V_S = 97 \cdot N^{0,314}$
Seed et al (1983)	Graduação grossa	$V_S = 56 \cdot N^{0,5}$
Lee (1990 in Madiyai, 1999)	Argila	$V_S = 114 \cdot N^{0,31}$
	Silte	$V_S = 105,6 \cdot N^{0,32}$
	Areias	$V_S = 57 \cdot N^{0,49}$
Yokota et al (1991)	Todos os solos	$V_S = 121 \cdot N^{0,27}$
Kalteziotis et al (1992)	Todos os solos	$V_S = 76,2 \cdot N^{0,24}$
	Solos coesivos	$V_S = 76,6 \cdot N^{0,45}$
	Solos não coesivos	$V_S = 49,1 \cdot N^{0,50}$
Athanasoupoulos (1995)	Todos os solos	$V_S = 107,6 \cdot N^{0,36}$
Iyisan (1996)	Todos os solos	$V_S = 51,5 \cdot N^{0,516}$
Maugeri e Carruba (1997)	Argila sobre consolidada	$V_S = 48 \cdot N^{0,55}$
Jafari et al (1997)	Todos os solos	$V_S = 22 \cdot N^{0,85}$
Imai (1997 in Ansal et al. 2003)	Todos os solos	$V_S = 91 \cdot N^{0,337}$
Kiku et al (2001)	Todos os solos	$V_S = 68,2 \cdot N^{0,292}$

Continuação da Tabela 10.

Jafari et al (2002)	Argilas	$V_S = 27 \cdot N^{0,73}$
	Siltes	$V_S = 27 \cdot N^{0,77}$
Anbazhagan e Sitharam (2006)	Todos os solos	$V_S = 50 \cdot (N_{60})^{0,41}$
Continuação da Tabela 10.		
Hasancebi e Ulusay (2006)	Todos os solos	$V_S = 90 \cdot N^{0,309}$
	Areias	$V_S = 90,82 \cdot N^{0,319}$
	Argilas	$V_S = 97,89 \cdot N^{0,269}$
Maheshwari et al (2008)	Todos os solos	$V_S = 95,64 \cdot N^{0,301}$
Dikmen (2009)	Todos os solos	$V_S = 58 \cdot N^{0,39}$
	Areias	$V_S = 73 \cdot N^{0,33}$
	Siltes	$V_S = 58 \cdot N^{0,36}$
	Argilas	$V_S = 58 \cdot N^{0,48}$
Fatehnia et al (2015)	Solos coesivos	$V_S = 77,1 \cdot N^{0,355}$

3.7.2. Correlações entre G_o e V_S

A obtenção do módulo de deformação cisalhante (G_o) fundamenta-se na teoria da elasticidade, que consiste em medir os tempos de chegada da onda de cisalhamento em sensores dispostos a uma profundidade específica e, em seguida, calcular a velocidade dessa onda entre os dois sensores (Schnaid e Odebrecht; 2012). De acordo com Fonseca (2008), a simples relação entre a velocidade das ondas sísmicas de cisalhamento de pequena amplitude e o módulo de deformação cisalhante (Equação 21).

A Tabela 11 apresenta a diversidade de fatores que afetam o módulo de cisalhamento dos solos, categorizando-os como muito importantes (V), de menor importância (L) e relativamente sem importância (U e R).

Tabela 11: fatores que afetam o módulo de cisalhamento em solos arenosos e coesivos. Hardin e Drnevich, (1972).

Fatores	Material	
	Areias Limpas	Solos Coesivos
Amplitude de deformação	V	V
Tensão normal efetiva octaédrica	V	V
Índice de vazios	V	V
Nº de ciclos de carregamento	R	R
Grau de saturação	R	V
Razão de sobreadensamento	R	L
Envoltória de resistência efetiva	L	L
Tensão cisalhante octaédrica	L	L
Frequência de vibração (> 0,1 Hz)	R	R
Efeitos do tempo	R	L
Características dos grãos	R	R
Estrutura do solo	R	R
Variação do volume devido a deformação cisalhante	U	R

É importante destacar, conforme Souza (2011), que o valor do módulo de cisalhamento pode ser influenciado por diversos fatores, conforme indicado nos estudos de Giacheti (2001) e Hardin e Drnevich (1972).

3.7.3. Correlações entre S_u e V_s

Assim como no CPTU, é possível estabelecer correlações entre a velocidade das ondas de cisalhamento e a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) para argilas, uma vez que ambas dependem de parâmetros em comum (L'heureux e Long; 2016). Nesse contexto, L'Heureux e Long (2016) propõem a seguinte correlação (Equação 25) entre esses parâmetros:

$$S_u = 0,02 \cdot V_s^{1,45} \quad \text{Equação 25}$$

Outra correlação também é apresentada por Agaiby e Mayne (2015), como pode ser visto na Equação 26:

$$S_u = 0,152 \cdot V_s^{1,142} \quad \text{Equação 26}$$

Onde em ambas equações, V_s é dada em m/s e S_u em kPa.

A Tabela 12 apresenta uma relação entre a resistência ao cisalhamento não drenada e a consistência do solo, bem como com o valor de N_{SPT} .

Tabela 12: Propriedades comuns de solos argilosos. Hunt (1984).

Consistência	N_{SPT60}	Identificação manual	S_u (kPa)
Dura	>30	Marca-se dificilmente	> 200
Muito rija	15 a 30	Marca-se com a unha do polegar	100 a 200
Rija	8 a 15	Marca-se com o polegar	50 a 100
Média	4 a 8	Moldável sob pressões fortes	25 a 100
Mole	2 a 4	Moldável sob pressões fracas	12,5 a 25
Muito mole	< 2	Desfaz entre os dedos	0 a 12,5

3.7.4. Correlações entre ν e V_s

O módulo de Poisson (ν) do solo pode ser obtido através da seguinte correlação apresentada por Fernandez (2017):

$$\nu = \frac{k-2}{2k-2} \quad \text{Equação 27}$$

Em que $k = (V_P / V_S)^2$. Sendo V_P a velocidade da onda P ou de compressão. A partir do valor de ν , é possível determinar o caráter do solo, de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13: Tipos de solos e sua correlação com o Módulo de Poisson. Teixeira e Godoy (1996).

Solo	ν
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3 a 0,5
Argila saturada	0,4 a 0,5
Argila não saturada	0,1 a 0,3

3.7.5. Correlações entre E e V_s

O Módulo de Young, ou Módulo de Deformabilidade (E) pode ser obtido através do módulo de Poisson (ν) e do módulo de cisalhamento (G_o) como mostra a seguinte fórmula da Teoria da Elasticidade:

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G_o \quad \text{Equação 28}$$

Como já apresentado, esses parâmetros podem ser obtidos através do V_s , com o G_o dado em MPa e ν adimensional, obtendo o valor de E em MPa. Assim, temos que E também pode ser obtido diretamente através de V_P e V_s , além da massa específica (ρ em kg/cm^3), como se pode constatar pela equação apresentada por Duarte (1997 *apud* Fernandez, 2017):

$$E = \rho \cdot V_s^2 \cdot \left(\frac{3V_P^2 - 2V_s^2}{V_P^2 - \frac{1}{3}V_s^2} \right) \quad \text{Equação 29}$$

Marangón (2018), apresenta a Tabela 14 com intervalos do valor de E para argilas saturadas na condição não drenada

Tabela 14: Valores para o módulo de deformabilidade em argilas saturadas. Marangon (2018).

Consistência	Módulo de Deformabilidade (MPa)
Muito mole	< 2,5
Mole	2,5 a 5
Consistência média	5 a 10
Rija	10 a 20
Muito rija	20 a 40
Dura	> 40

3.7.6. Correlações entre q_c , f_s , q_t e V_s

Existem diversas correlações que relacionam os valores encontrados no ensaio CPTu com as velocidades de onda cisalhante. Autores como Robertson (2012), Andrus *et al.* (2007), Madiari & Simoni (2004), Simonini & Cola (2000), Hegazy & Mayne (1995), desenvolveram equações que correlacionam os parâmetros de resistência de ponta, atrito lateral, resistência de

ponta corrigida com a velocidade V_s . As equações desenvolvidas por eles em seus trabalhos estão indicadas na Tabela 4.

Uma delas, a de Robertson (2012), correlaciona também com as tensões efetivas verticais e o parâmetro calculado I_c , que é o índice de consistência, resultado do produto da resistência de ponta com o atrito lateral ($I_c = q_c \cdot f_s$). As equações 32 e 33 evidenciam as equações desenvolvidas.

$$V_s = \frac{\alpha_{V_s}(q_t - \sigma'_{v0})^{0,5}}{P_a} \quad \text{Equação 30}$$

$$\alpha_{V_s} = 10^{0,55 \cdot I_c + 1,68} \quad \text{Equação 31}$$

3.7.7. Correlações entre G_o e q_c

Simonini & Cola (2000) e Bouckovalas et al. (1989) correlacionaram diretamente o módulo de cisalhamento (G_o), que indica a rigidez do solo, com o parâmetro de resistência de ponta (q_c). As equações foram mostradas na Tabela 4. Os estudos de Simonini & Cola (2000), vide equação 32, foram desenvolvidos para areias, siltes e argilas da Lagoa de Veneza, enquanto os de Bouckovalas et al. (1989) (equação 33) foi desenvolvido em argilas muito mole.

$$G_o = 49,2 \cdot q_c^{0,51} \quad \text{Equação 32}$$

Simonini & Cola (2000)

$$G_o = 28,0 \cdot q_c^{1,40} \quad \text{Equação 33}$$

Bouckovalas et al. (1989)

O aspecto significativo dessas correlações reside no fato de que não é necessário conhecer as densidades do solo, uma vez que elas utilizam diretamente o parâmetro q_c para estimar o módulo de cisalhamento do solo. Em casos onde não é conhecido diretamente a densidade do solo, a utilização das equações permite uma análise prévia da estimativa da rigidez e do comportamento do solo.

3.8. Aplicações na engenharia geotécnica de ensaios SCPTu e MASW

Tschuschke et al. (2020) destacaram a necessidade de monitoramento abrangente e contínuo para a operação segura de grandes instalações de armazenamento de resíduos, seja barragens ou pilhas. Eles questionaram a eficácia do monitoramento convencional das

condições da água nos rejeitos usando piezômetros em condições complexas. O estudo enfatizou que o ensaio SCPTu atende a padrões elevados, identificando as condições dos sedimentos que influenciam o regime da água nos rejeitos. Os resultados do SCPTu revelaram uma zona de rejeitos não totalmente saturados abaixo da superfície freática, contribuindo para melhorar a estabilidade do maciço de rejeitos e barragens, ao mesmo tempo que limita o risco de liquefação estática.

A interpretação dos resultados do ensaio de piezocone sísmico é essencial para diferenciar solos lateríticos de não-lateríticos. A análise de parâmetros como q_c , R_f e a relação G_o/q_c é eficaz, especialmente em solos argilosos com processos de pedogênese. A determinação da velocidade de onda sísmica é sensível ao método de tratamento, sendo o método da trajetória de onda mais preciso em solos sedimentares, mas com limitações em solos tropicais. O tratamento dos resultados de ensaios de piezocone sísmico, conforme observado por Mio (2005), ajuda a reduzir a variabilidade, obtendo parâmetros em diferentes escalas de sollicitação e posições no maciço.

No estudo de Rocha (2018) sobre a caracterização geotécnica de solos tropicais não saturados por meio de ensaios de campo, foi observado que a utilização de técnicas híbridas, como o SCPTu e o SDMT (Dilatômetro Sísmico), juntamente com perfis de umidade e curvas de retenção de água no solo, proporcionou uma caracterização mais aprimorada dos perfis investigados.

Zhang et al. (2023) abordaram os desafios na caracterização laboratorial de solos graníticos intemperizados devido à cimentação da rocha matriz. Enquanto o teste de penetração (CPT) é amplamente reconhecido em solos sedimentares, sua aplicação em solos graníticos intemperizados carece de avanços similares. O estudo emprega testes sísmicos de piezocone em um perfil granítico intemperizado, propondo gráficos atualizados para interpretar os resultados e avaliar os efeitos da intemperização. Destaca-se a importância do uso do SCPTu como ferramenta para fornecer informações valiosas sobre as propriedades do solo em perfis intemperizados, contribuindo significativamente para a compreensão desses materiais geotécnicos complexos.

Vários estudos (Zhang et al. (2023); Duan et. al. (2023), Meira (2022); (Pita (2022); Long et al (2020)) reconheceram que a variabilidade espacial dos depósitos de solo afeta o desempenho e a confiabilidade de estruturas geotécnicas. Apesar do reconhecimento da relevância da variabilidade espacial, nem sempre é explicitamente incluída e quantificada na

prática, principalmente devido aos desafios na caracterização da variabilidade do solo. Pita (2022) destacou a importância do uso do piezocone sísmico (SCPTu) como uma ferramenta *in-situ* para avaliar e caracterizar a resposta do solo em diferentes escalas, permitindo a medição de múltiplas respostas e características do solo em um único perfil. O SCPTu é capaz de quantificar tanto a variabilidade estratigráfica quanto a inerente, demonstrando ser uma ferramenta valiosa na análise da variabilidade do solo em campo.

Long et al. (2020) investigaram a aplicação de dois métodos geotécnicos, a Análise Multicanal de Ondas Superficiais (MASW) e o ensaio de cone sísmico (SCPTu), em estudos geotécnicos offshore (U-MASW). O ensaio U-MASW diferencia-se do MASW por ser realizado offshore, ou seja, na água. O estudo, que se concentrou na camada superior de 15 m do perfil sedimentar para otimizar o design de estruturas marítimas, enfatizou a confiabilidade do U-MASW em condições offshore irlandesas até 50 m de profundidade. O ajuste do espaçamento entre receptores no U-MASW e a comparação dos resultados do MASW com os do SCPTu mostraram concordância, evidenciando a complementaridade desses métodos para uma caracterização precisa de estruturas geotécnicas offshore.

Nierwinski (2021) empregou o Teste de Penetração Sísmica com Cone (SCPTu) para investigar um reservatório de rejeitos de mineração com duas camadas distintas: uma camada espessa e seca e outra camada espessa e saturada. A análise revelou que a interpretação do Teste de Penetração de Cone (CPTu) no mesmo reservatório pode classificar cada camada como um solo diferente, evidenciando variações significativas nas propriedades do solo. Destaca-se que rejeitos com permeabilidade intermediária podem apresentar condições parciais de drenagem durante o CPTu, exercendo influência nos resultados do teste. Essas conclusões ressaltam a importância de considerar a drenagem parcial na interpretação de resultados geotécnicos em estruturas de contenção de rejeitos de mineração.

O estudo de Marchi (2022) integra diversas técnicas, incluindo eletrorresistividade, sísmica (MASW), ensaios diretos como SPT e sondagem via seca com revestimento, em duas barragens de rejeito em uma mineração de areia. O objetivo é avaliar os procedimentos metodológicos para investigações geotécnicas *As Is* (como está). Os resultados mostram que, devido aos cálculos matemáticos usados pelos softwares de interpretação geofísica, as linhas de divisa das mudanças de velocidade e resistência não são exatas. A integração de métodos geofísicos, especialmente o MASW, desempenha um papel importante na identificação de alvos subsuperficiais, permitindo uma reconstrução eficiente da construção da barragem e seu comportamento. Essa abordagem facilita a identificação de pontos de fragilidade e a geração

de seções-base para estudos de estabilidade, evidenciando a importância do MASW na caracterização geotécnica e na tomada de decisões relacionadas à segurança de barragens.

Os estudos de Duan et al. (2023) e Costa (2022) destacaram a relevância dos métodos MASW e SCPTu na determinação da liquefação de solos, proporcionando contribuições significativas para a caracterização geotécnica em condições sísmicas e para a avaliação da estabilidade geotécnica. Costa (2022) concentrou-se na aplicabilidade de V_{S30} na classificação do local e mapeamento de liquefação, salientando a importância da análise da velocidade das ondas de corte em camadas de solo a menos de 15 metros de profundidade, influenciando diretamente os danos superficiais associados à liquefação. Adicionalmente, Duan et al. (2023) utilizou o ensaio RCPTU (CPTu com resistividade) para caracterizar o estado do solo, eficaz na avaliação do potencial de liquefação. Essa abordagem proporcionou correlações valiosas entre índices de estado *in-situ*, resistência à liquefação e dados de RCPTU, demonstrando sua confiabilidade na avaliação do estado *in-situ* de solos, especialmente em locais de engenharia de alto risco.

O estudo de Braz (2022) visou analisar e caracterizar áreas com potencial de colapsibilidade na região nordeste do Brasil, empregando informações geotécnicas de sondagens padrão (SPT), sondagens com métodos semidiretos (CPT e SCPTu), sondagens indiretas (MASW) e ensaios laboratoriais edométricos. Os resultados indicam a presença de solo com leve cimentação natural, típico da região nordeste, evidenciado pelas altas velocidades de onda (V_s) no ensaio geofísico e pela baixa resistência à penetração do amostrador no SPT. A colapsibilidade do solo foi confirmada por ensaios edométricos, incluindo sua classificação quanto à criticidade.

Na

Tabela 15, Braz (2022) destaca o comportamento das velocidades de ondas cisalhantes (m/s) obtidos por dois diferentes ensaios, MASW e SCPT, além de encontrar os desvios das amostras. Devido à ausência de dados de V_s em algumas profundidades, Braz (2022) interpolou os dados para obter os valores. Há uma grande variabilidade nos valores dos desvios tanto a maior como a menor. Esta constatação tem um impacto representativo e direto nos projetos de fundações já que o módulo cisalhante (G) é obtido a partir de uma degradação do módulo cisalhante a pequenas deformações (G_0).

Tabela 15: Confrontação dos resultados do SCPT e MASW (V_s). Braz (2022)

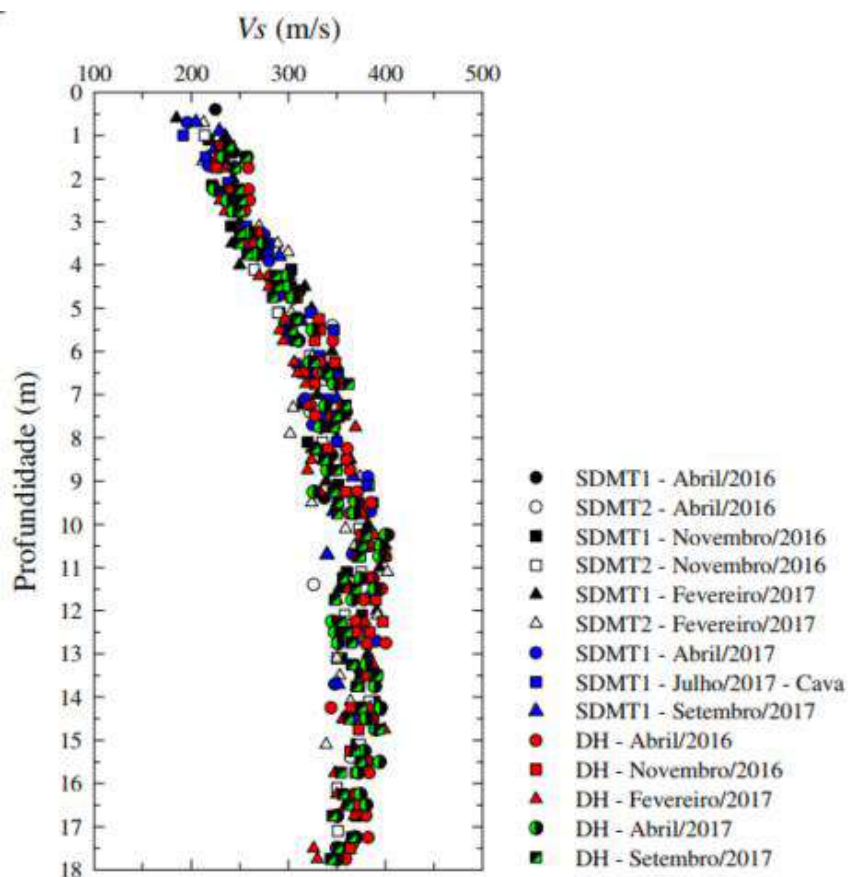
Prof.	01-22 WTG			01-23 WTG			01-24 WTG		
	MASW	SCPT	Desvio (%)	MASW	SCPT	Desvio (%)	MASW	SCPT	Desvio (%)
1	124	175	29	200	226	12	226	197	-15
2	275	334	18	324	392	17	470	333	-41
3	297	393	25	502	656	23	497	396	-26
4	320	475	33	580	588	1	518	474	-9
5	340	539	37	625	668	6	607	574	-6
6	363	696	48	659	579	-14	-	-	-
7	461	520	11	600	603	0	-	-	-

Além disso, o estudo revela diferenças nos valores de V_s obtidos pelos métodos SCPT (Procedimento *downhole*) e MASW. Os valores do MASW são superiores nos primeiros metros e inferiores em maiores profundidades em comparação com o SCPT. Essas discrepâncias têm implicações diretas no projeto de fundações, pois afetam a determinação do módulo cisalhante (G), utilizado para calcular a rigidez vertical (KV), horizontal (KH), de balanço (KR) e torcional (KT) do solo de fundação. Essas considerações são importantes para interpretação e elaboração de projetos geotécnicos.

Rocha (2018) constatou uma tendência de aumento de V_s com o aumento da profundidade. Em relação as tensões de confinamento, V_s apresentou uma taxa de aumento que tende a diminuir para as maiores tensões confinantes. Na Figura 34, elaborado por Rocha (2018), observa-se que, em todos os ensaios realizados, a tendência de aumento da velocidade de propagação de ondas cisalhantes com a profundidade até aproximadamente 10,0 m, seguido de uma tendência de estabilização, após esta profundidade.

As discrepâncias nas velocidades cisalhantes determinadas pelos métodos MASW e SCPTu podem ser atribuídas a diversas razões intrínsecas a cada técnica e às características do solo investigado. O MASW, fornece informações em diferentes profundidades, podendo alcançar regiões com mais de 50 m, enquanto o SCPTu, por sua vez, oferece dados mais próximos à superfície. Além disso, as técnicas apresentam sensibilidade a diferentes propriedades do solo, e a heterogeneidade do solo pode influenciar nas respostas dos métodos. Limitações específicas de cada técnica, condições ambientais, calibração dos equipamentos e configuração dos ensaios são fatores que contribuem para as divergências observadas. Uma abordagem integrada, considerando as vantagens de ambos os métodos, pode proporcionar uma compreensão mais abrangente das propriedades do solo.

Figura 34: Perfis de V_s determinados por meio dos ensaios com a ponteita sísmica e SDMT realizados no campo experimental da Unesp de Bauru. Rocha (2018).



3.9.Considerações finais

Os ensaios geotécnicos mencionados anteriormente podem ser aprimorados com tecnologias modernas, como sísmica e resistividade. O uso dessas técnicas adiciona uma camada mais detalhada à análise, fornecendo dados valiosos sobre as propriedades do solo e da subsuperfície.

O ensaio sísmico, por exemplo, utiliza ondas sísmicas para mapear a subsuperfície, indicando características geotécnicas e a estratigrafia do solo. Isso é especialmente útil para obter informações sobre a estratigrafia e a presença de camadas específicas de solo ou rochas. Já o ensaio de resistividade elétrica mede a resistência elétrica do solo, identificando variações na composição do solo, detectando a presença de água subterrânea e indicando camadas distintas. Essa abordagem é valiosa em investigações geotécnicas, principalmente quando a presença de água ou variações na composição do solo são fatores críticos. A combinação dessas tecnologias com ensaios tradicionais oferece uma visão mais completa e precisa do subsolo, sendo comumente empregada em estudos geotécnicos avançados e projetos que requerem uma compreensão mais profunda das condições do solo.

Por meio da aplicação do SCPTu e do MASW, torna-se viável a determinação das velocidades das ondas cisalhantes no solo, um elemento necessário para o projeto e dimensionamento adequado de uma barragem de resíduo. A obtenção do parâmetro V_s (velocidade de onda cisalhante) desempenha um papel fundamental, pois a partir dele é possível derivar o módulo de cisalhamento dinâmico, conhecido como G . Este último parâmetro é essencial para realizar uma análise sísmica detalhada na barragem, permitindo avaliar sua estabilidade tanto antes quanto após eventos sísmicos. Vale destacar que a ocorrência de sismicidade pode potencialmente induzir situações críticas, como liquefação do solo ou outras condições que podem comprometer a integridade da barragem. Nesse sentido, a determinação precisa do parâmetro G , alcançada por meio das técnicas mencionadas, desempenha um papel importante na mitigação de riscos e na garantia da segurança estrutural da barragem.

A discrepância nos valores provenientes de diferentes ensaios requer uma análise aprofundada para assegurar a confiabilidade dos dados escolhidos para utilização. A decisão sobre a preferência entre os resultados do MASW ou SCPTu, ou mesmo a possibilidade de empregar o SCPTu como referência na ausência do MASW, demanda uma avaliação criteriosa. Essa análise não apenas visa compreender as variações existentes entre os métodos, mas também determinar a consistência e a representatividade dos dados em relação aos objetivos específicos do estudo.

Em situações em que a ausência de dados de velocidade das ondas cisalhantes (V_s) é uma realidade, a realização de um novo ensaio específico para essa determinação pode se tornar onerosa e demorada. No entanto, em muitos casos, ensaios tradicionais como o CPTu e o SPT podem ter sido previamente conduzidos na mesma região, oferecendo informações valiosas sobre as características do solo.

Diante dessa realidade, a alternativa de utilizar parâmetros já conhecidos, como o N_{SPT} , q_c e f_s , para estimar a velocidade das ondas cisalhantes (V_s) emerge como uma estratégia pragmática. Essa abordagem não apenas otimiza o uso de dados disponíveis, mas também proporciona uma visão mais abrangente do comportamento geotécnico do solo, permitindo estimativas confiáveis da V_s com base em correlações bem estabelecidas. Essa flexibilidade no aproveitamento de dados pré-existentes ressalta a importância da integração eficiente de informações para uma análise geotécnica robusta e eficaz, reduzindo custos com a realização de ensaios e diminuindo o tempo de resposta na tomada de decisões.

4. METODOLOGIA

4.1. Área de estudo

A refinaria da ALUMAR é de propriedade das empresas Alcoa Alumínio S.A., South 32 e Rio Tinto e está localizada a 17 km ao sul da cidade de São Luís, no estado do Maranhão, no litoral norte do Brasil. Na Figura 35 é possível verificar a localização da Alumar no município de São Luís. A Alcoa, sócia majoritária do consórcio ALUMAR, é uma das quatro maiores produtoras de alumina do mundo, e uma das maiores empresas instaladas no Maranhão. Em sua área, encontram-se diversos equipamentos, como porto (carga e descarga de materiais), refinaria (produção de alumina), redução (produção de alumínio), parque ambiental e a as áreas de resíduos de bauxita (ARB's ou RSA em inglês).

As ARB's estão localizadas em uma área usada especificamente para a atividade de descarte de resíduos, situada a cerca de 8 km a leste da refinaria, acessando-a pela rodovia principal BR-135. Essas áreas estão destacadas na Figura 36.

Figura 35: Localização da Alumar no município de São Luís. (Google Earth, 2023).



Figura 36: Localização da área das ARB's e identificação da área de estudo. (Google Earth, 2023).

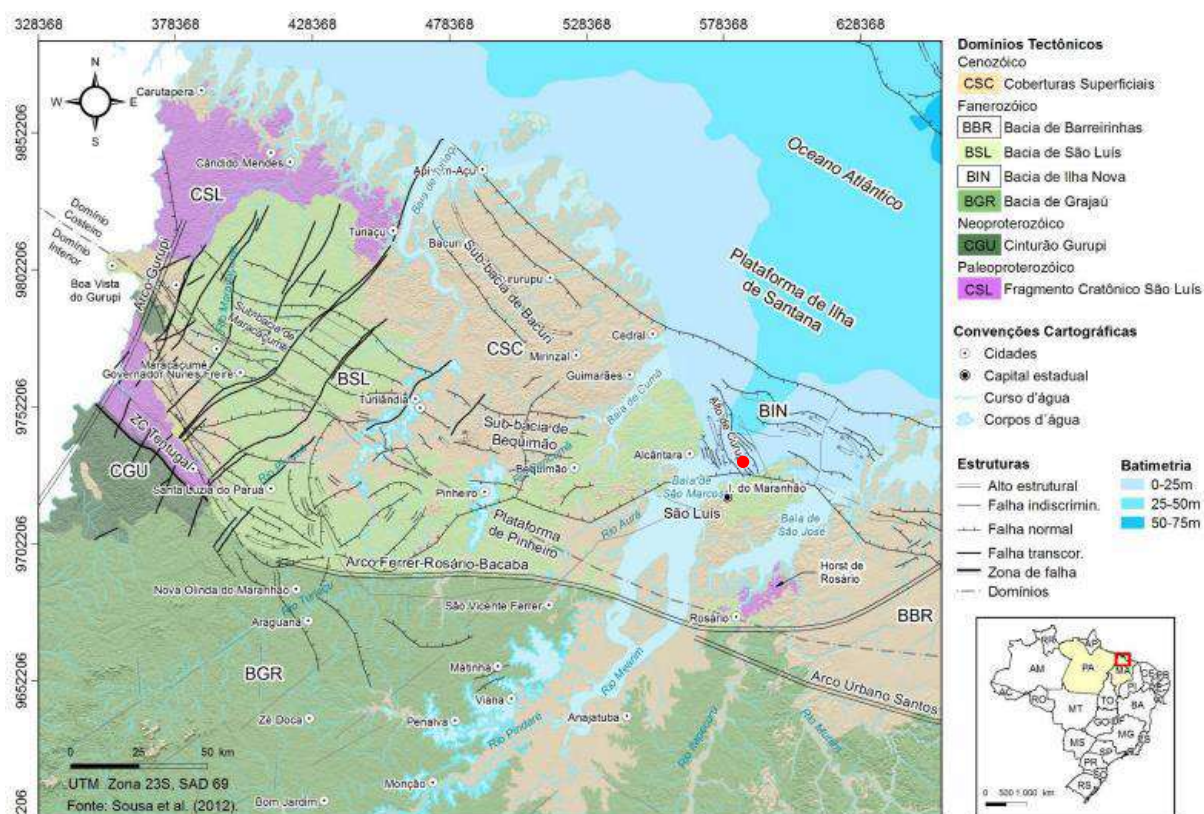


4.2. Geologia da Ilha do Maranhão

4.2.1. Geologia regional

A Ilha do Maranhão está inserida na porção leste da Bacia Intracratônica de São Luís (Figura 37), integrante, juntamente com as bacias de Bragança-Viseu e Ilha Nova, do Sistema de Grábens do Gurupi (Azevedo, 1991). Essas bacias pertencem a Província Costeira e Margem Continental Atlântico Equatorial (Schobbenhaus; Brito Neves, 2003; Cordani et al. 2009). Compreendem também o conjunto do Riftes Mesozoicos Abortados (Milani et al., 2007) no Cráton de São Luís, durante os processos de rifteamento do Mega continente Gondwana (Hasui, 2012) e de Abertura do Atlântico Sul Equatorial, entre o final do Aptiano e início do Albiano, no Cretáceo Superior.

Figura 37: Mapa geológico-estrutural da Bacia Intracratônica de São Luís, onde está inserida a Ilha do Maranhão a ARB10 (Sousa, 2021). Em vermelho, a localização da refinaria da ALUMAR.



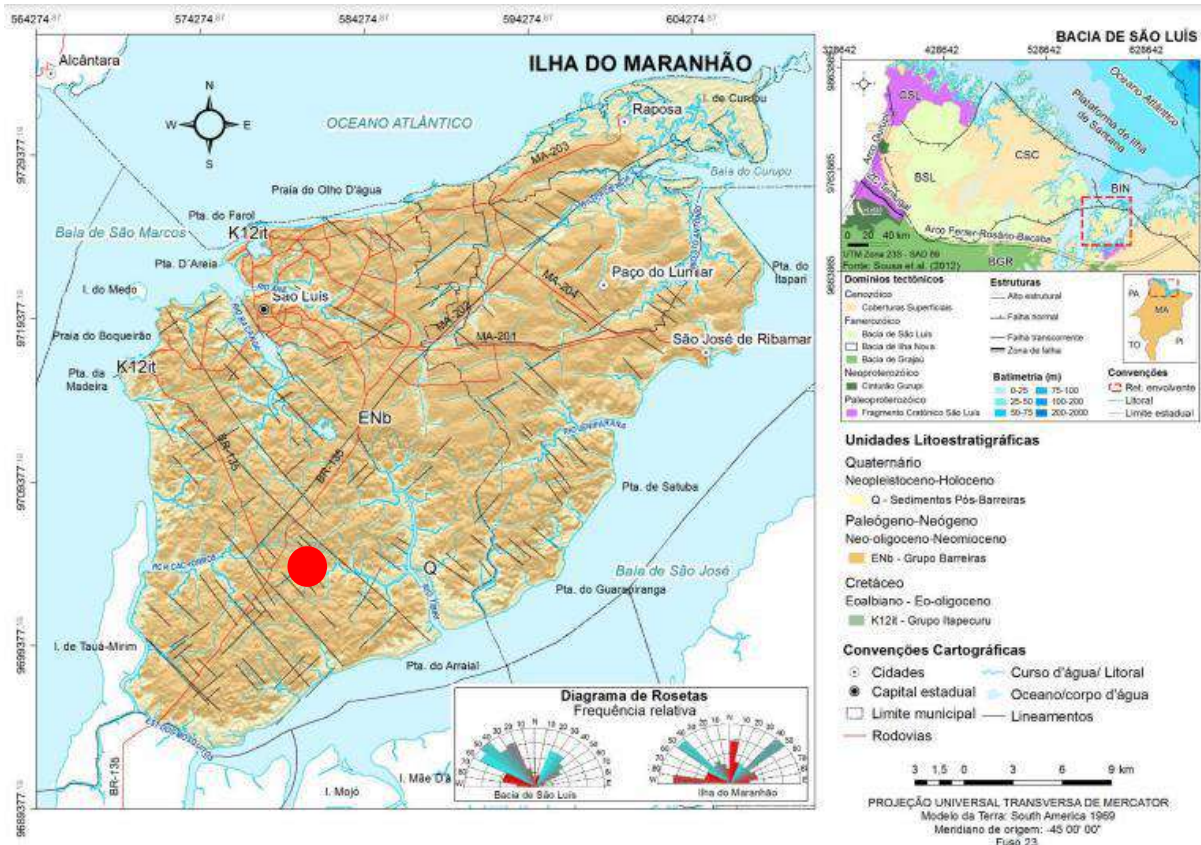
A Bacia Intracratônica de São Luís é limitada, a norte, com a Plataforma da Ilha de Santana, separando-a das bacias marítimas do Pará-Maranhão e Barreirinhas (porção submersa); a sul, com Arco Ferrer-Rosário-Bacabal, que a divide da Bacia de Grajaú; a leste, com Horst de Rosário, separando-a da porção emersa da Bacia de Barreirinhas; a oeste, com Arco do Gurupi, que confronta a Bacia de Bragança-Viseu; e a nordeste, com Alto de Curupu, limitando-a com a Bacia de Ilha Nova (Sousa, 2021).

A Bacia de São Luís é representada, na área de estudo, por rochas cretáceas da Formação Itapecuru, recobertas por formações superficiais de idade cenozoica do Grupo Barreiras. Capeando o Grupo Barreiras ocorrem coberturas lateríticas nos platôs e depósitos quaternários nas partes abatidas.

O Grupo Barreiras repousa sobre unidades mais antigas do Pré-Cambriano até o Paleógeno e é recoberto discordantemente pelos sedimentos de idade quaternária (pleistocênica e holocênica) denominados coberturas superficiais. Os sedimentos do Grupo Barreiras são afossilíferos, o que dificulta sua datação. Segundo Rodrigues et al. (1994a), a Formação Barreiras é constituída de três unidades de fácies: conglomerática (C), arenosa (A) e pelítica (P).

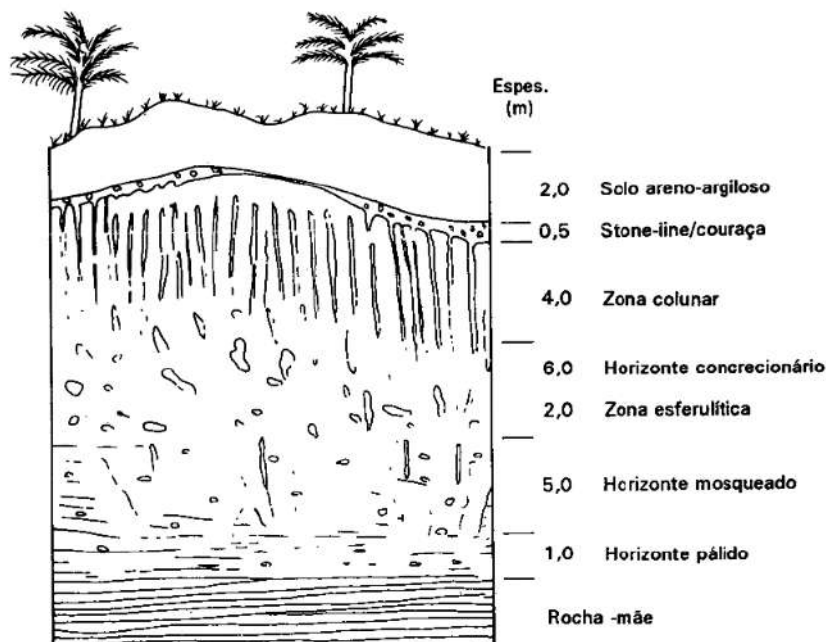
Autores como Costa (1984), Viegas (2015) e Souza (2021) classificaram os lateritos que ocorrem no Maranhão como imaturos, por apresentarem um perfil geológico simples, constituído de horizontes bem definidos. Souza (2021) distinguiu, do topo para a base: horizonte concrecionário, horizonte mosqueado, horizonte pálido e rocha-mãe. Tratam-se de sedimentos Pós-Barreiras e ocupam toda a área diretamente afetada (Figura 38).

Figura 38: Mapa Geológico da Ilha do Maranhão (Souza, 2021). Em vermelho, a localização da refinaria da ALUMAR.



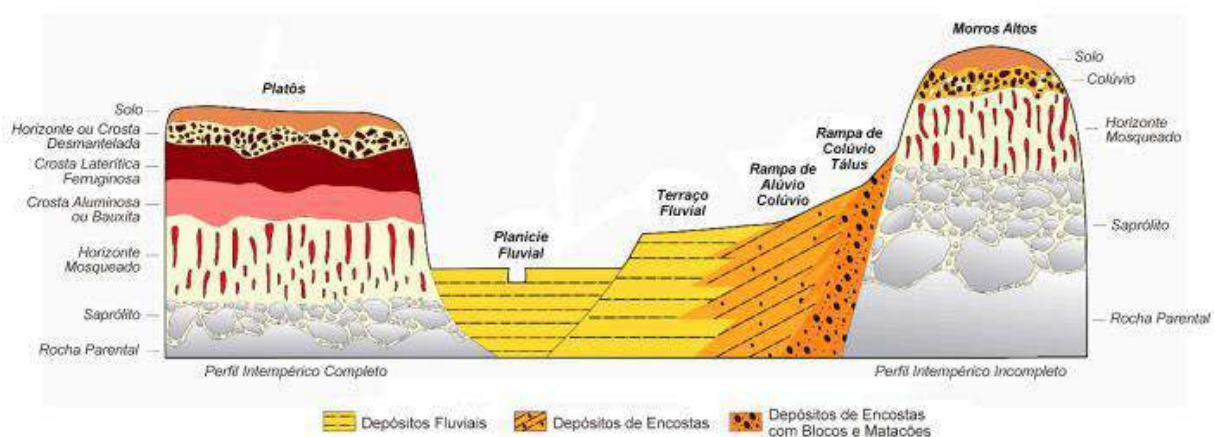
As Coberturas Detrítico-lateríticas ocorrem na região de estudo capeando a superfície do terreno, indistintamente da litologia subjacente. Rodrigues et al. (1994a) observaram três níveis irregulares de conglomerados de canga laterítica, que constituem *stone lines*, caracterizando os episódios de peneplanização que ocorreram desde o Neocretáceo até o Quaternário (Holoceno). O nível inferior marca, em alguns locais, a discordância entre o Cretáceo e o Paleógeno; e o intermediário, a Superfície pré-Barreiras. Admite-se que os processos de lateritização foram desencadeados a partir do final do Cretáceo - início do Paleógeno, em toda a região, atuando sobre as rochas do embasamento cristalino e sedimentos cretáceos e terciários. A Figura 39 mostra um perfil típico de laterita.

Figura 39: Perfil de laterita podendo ter até 3 linhas de seixos (*stone lines*). Rodrigues et al. (1994a).



Adicionalmente ocorrem outras unidades de mapeamento nem todas indicadas no mapa (Figura 38), por conta da escala do mapeamento. No entanto, se encontram descritas suas características e modos de ocorrências. As coberturas quaternárias pleistocênicas foram agrupadas em três unidades: depósitos de cordões litorâneos, depósitos de argilas adensadas com areias e depósitos eólicos continentais (Figura 40).

Figura 40: Distribuição esquemática dos distintos ambientes deposicionais quaternários e suas formações superficiais correlatas. Ramos et al. (2020).

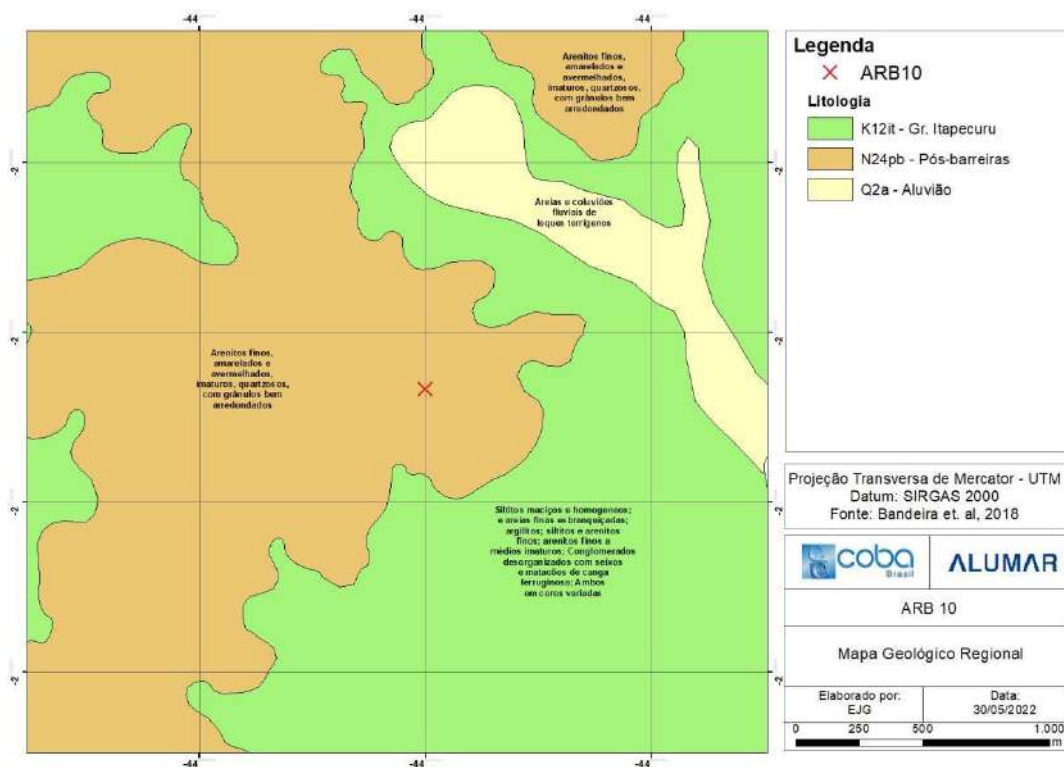


4.2.2. Geologia local

O mapa geológico local, com cerca de 2.500,00 ha, mostra a extensão da unidade Pós-Barreiras recortada e envolvida pela unidade Itapecuru subjacente (Figura 41). A unidade de mapeamento Pós-Barreiras é constituída por sedimentos finos, amarelados e avermelhados,

imaturos, quartzosos, com grânulos arredondados. A unidade de mapeamento Itapecuru é representada por siltitos maciços e homogêneos e areias finas esbranquiçadas; argilitos; siltitos e arenitos finos a médios imaturos; conglomerados desorganizados com seixos e matações de canga ferruginosa; ambos em cores variadas. De acordo com a Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM (2020) os cordões aluvionares que acompanham as margens das drenagens mais expressivas que aparecem no mapa estão fora da área diretamente afetada. O relevo é suavemente ondulado, solo espesso, bem drenado, nível d'água profundo.

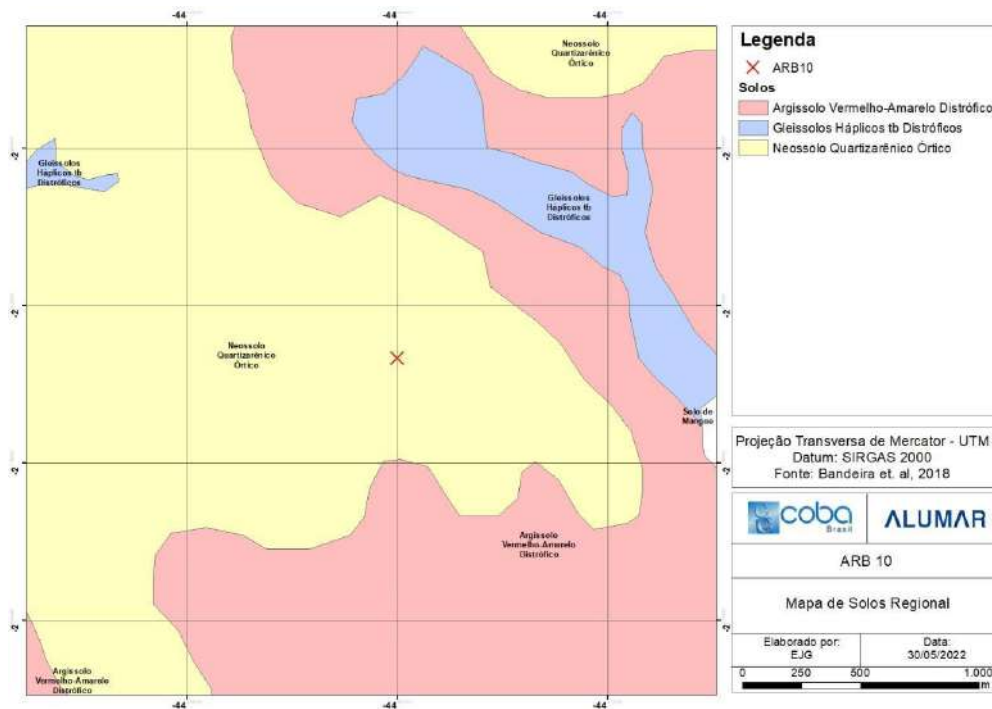
Figura 41: - Mapa Geológico para a região da refinaria da ALUMAR (CPRM, 2020).



4.2.3. Solo

Ocorrem na área de estudo Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos, Gleissolos Hápicos Distróficos e Neossolos Quartzarênicos Órticos. Na área das ARB's, destaque para a área da ARB10 como identificado na Figura 42 que ocorrem Neossolos Quartzarênicos Órticos.

Figura 42: Mapa Pedológico para a região da refinaria da ALUMAR (CPRM, 2020).

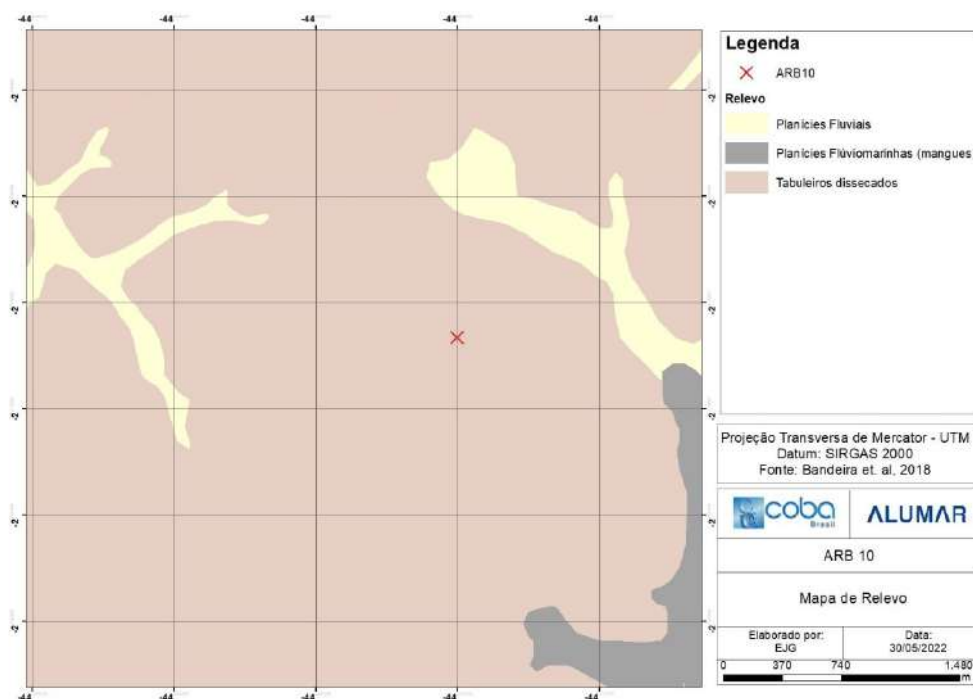


Os Neossolos Quartzarênicos Órticos ocorrem em relevo plano ou suave ondulado, apresenta textura arenosa ao longo do perfil e cor amarelado uniforme abaixo do horizonte A, que é ligeiramente escuro. Considerando-se o relevo de ocorrência, o processo erosivo não é alto, porém, deve-se precaver com a erosão devido à textura ser essencialmente arenosa. Por serem profundos, não existe limitação física para o desenvolvimento radicular em profundidade, mas a presença de caráter álico ou do caráter distrófico limita o desenvolvimento radicular em profundidade, agravado devido a reduzida quantidade de água disponível (textura essencialmente arenosa). Os teores de matéria orgânica, fósforo e micronutrientes são muito baixos. São solos excessivamente drenados, acarretando numa alta vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos subjacentes (CPRM, 2020).

4.2.4. Geomorfologia

Ocorrem na região de estudo os seguintes tipos de relevo: Planícies Fluviais, Planícies Flúvio-marinhas (mangues) e Tabuleiros Dissecados (Figura 43). Os Tabuleiros Dissecados tratam-se de terrenos sustentados por tabuleiros e tabuleiros dissecados, caracterizados por altitudes entre 45 e 60 metros, amplitudes e declividades baixas, bem estabilizados (CPRM, 2020).

Figura 43: Mapa de Relevo para a região da refinaria da ALUMAR (CPRM, 2020).



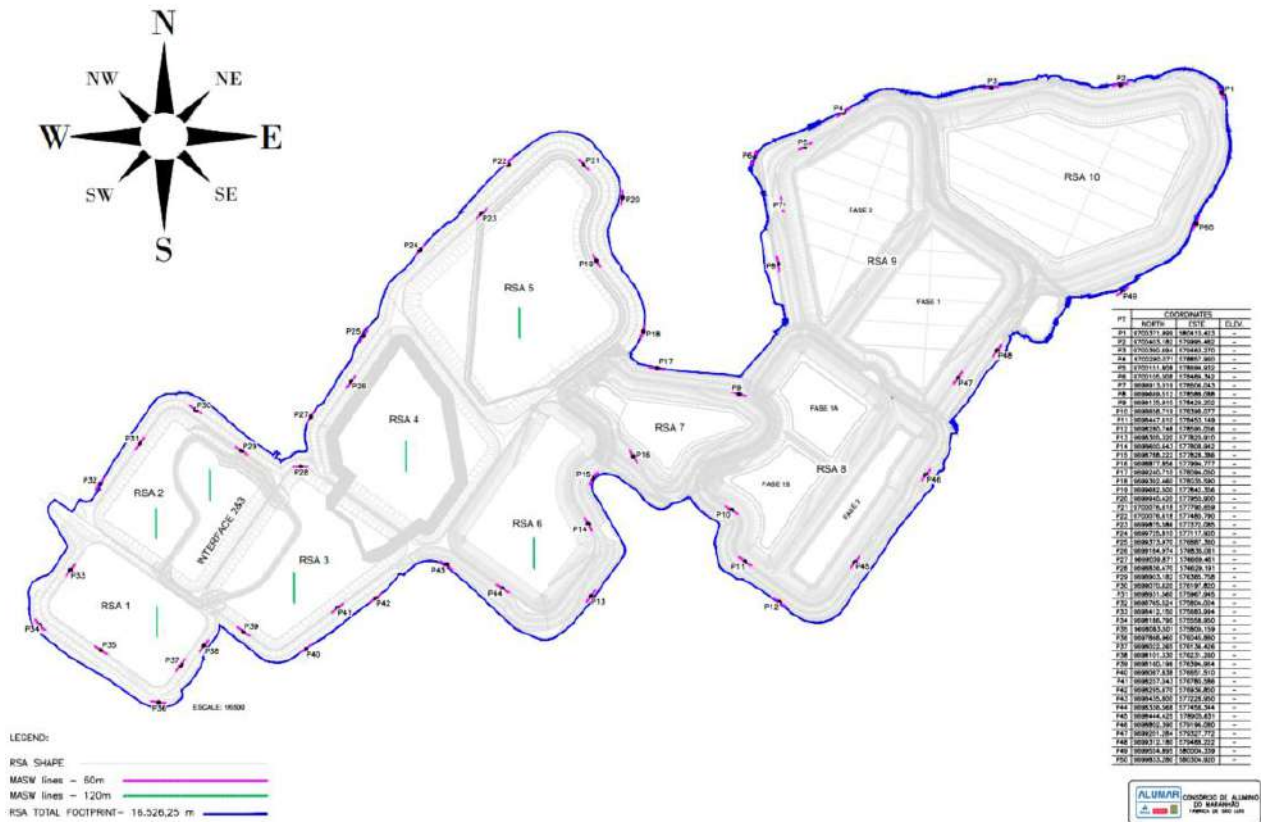
4.3. Localização dos ensaios

4.3.1. Localização do MASW

Dado as condições de área e ruído ambiente gerado pelas atividades da operação da construção da ARB10, os levantamentos de MASW ativa tiveram que ser suspensos nas suas proximidades, sendo necessário o levantamento através da técnica passiva. O croqui de posicionamento dos levantamentos geofísicos encontra-se na Figura 44. Os pontos de ensaio podem ser melhor visualizados por meio das imagens do APÊNDICE A.

Por solicitação da Alumar, ainda devido as dificuldades de execução e interferências entre frentes de serviço, foram cancelados os levantamentos P50 da ARB10 e o levantamento interno da ARB6. A Tabela 42 do APÊNDICE A, apresenta a relação dos levantamentos executados de acordo com a disponibilidade do local, bem como a localização de cada ponto levantado.

Figura 44: Croqui de posicionamento dos levantamentos MASW. Fugro (2023).



4.3.2. Localização dos SCPTu

Os ensaios SCPTu's conduzidos na área das ARB's desempenharam um papel importante neste estudo, sendo aplicados tanto para o dimensionamento das ARB10 e ARB9 como para a elaboração do estado atual (*As Is*) das barragens já existentes.

O *As Is* engloba a realização de ensaios geotécnicos e geofísicos, visando aprofundar a compreensão do comportamento das barragens e dos resíduos após a construção. Este processo não apenas proporciona uma análise mais aprofundada, mas também oferece condições aprimoradas para o monitoramento, especialmente considerando a escassez de alguns dados, principalmente em relação às barragens mais antigas. No *As Is* foram realizados ensaios tanto nos diques, quanto nos resíduos de bauxita, ou seja, na área interna do lago.

Já nos dados provenientes da ARB9 e ARB10, os ensaios foram conduzidos no solo de fundação, tendo em vista que os ensaios foram conduzidos para fornecer dados sobre o comportamento do solo e auxiliar no processo de dimensionamento das barragens. Nas Figura

Figura 46, Figura 47, Figura 48 e Figura 49, estão indicados as localizações dos ensaios SCPTu utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. A seleção dos ensaios se deu pela correspondência com os ensaios MASW realizados. A correspondência pode ser visualizada no item 4.7 - Correspondência entre os ensaios MASW e SCPTu.

Figura 45: Localização dos ensaios SCPTu utilizados na ARB 4. Alumar (2023).

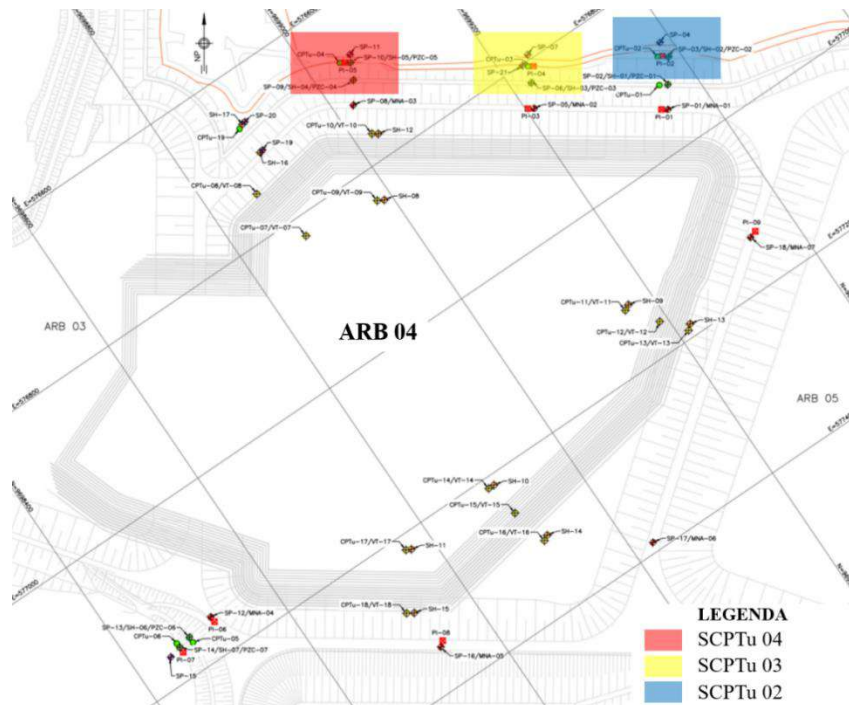


Figura 46: Localização dos ensaios SCPTu utilizados na ARB 5. Alumar (2023).

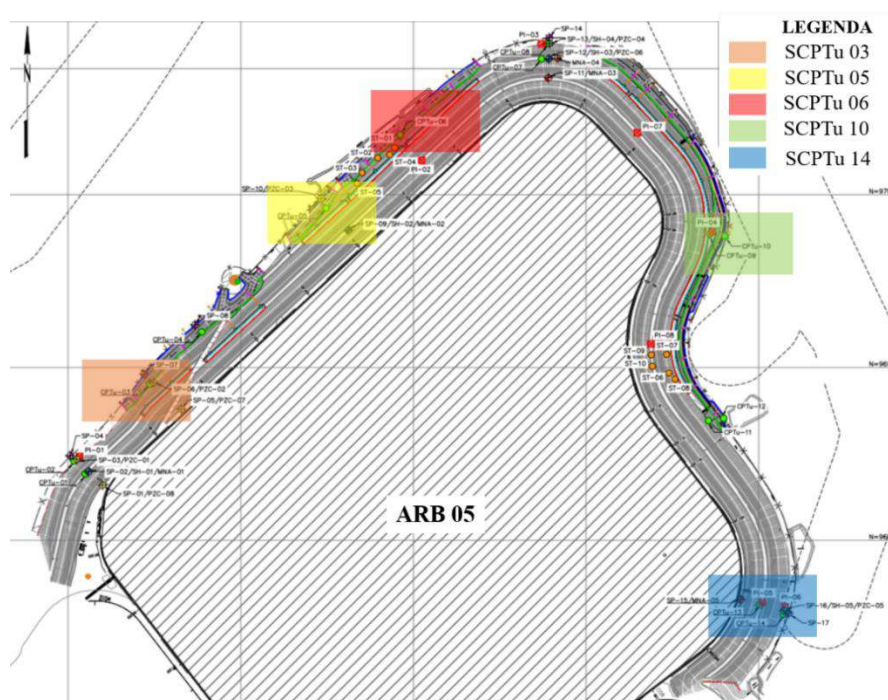


Figura 47: Localização dos ensaios SCPTu utilizados na ARB 6. Alumar (2023).

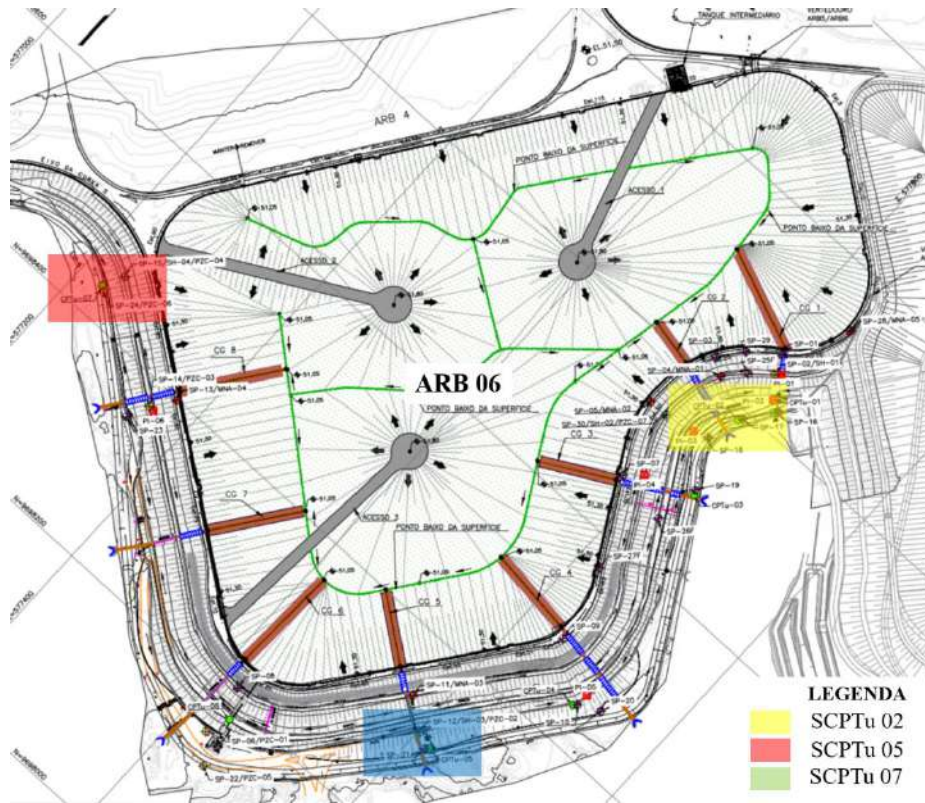


Figura 48: Localização dos ensaios SCPTu utilizados na ARB 9. Alumar (2023).

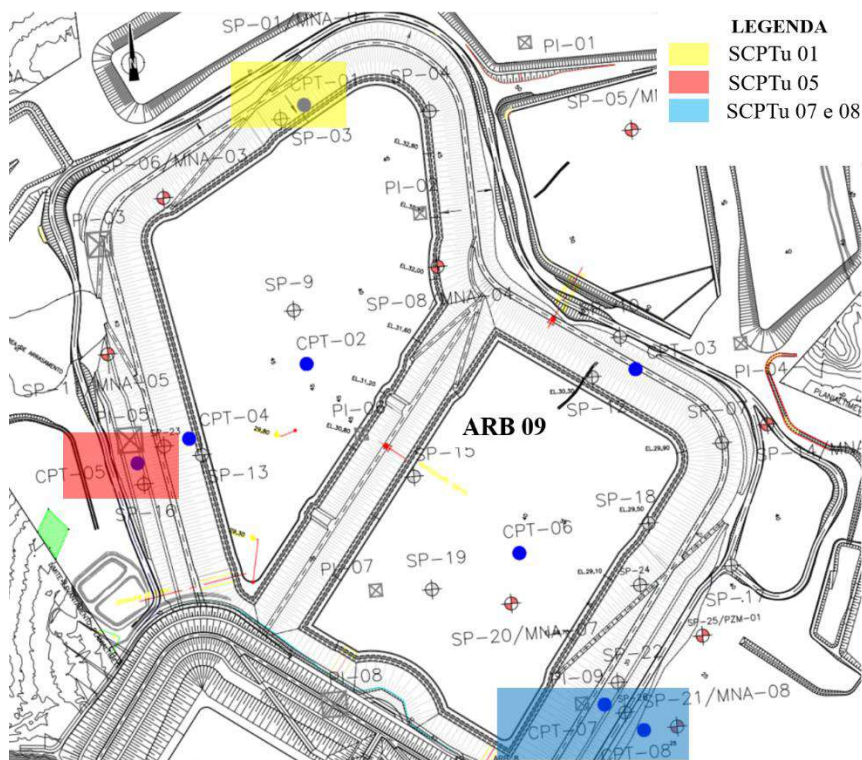
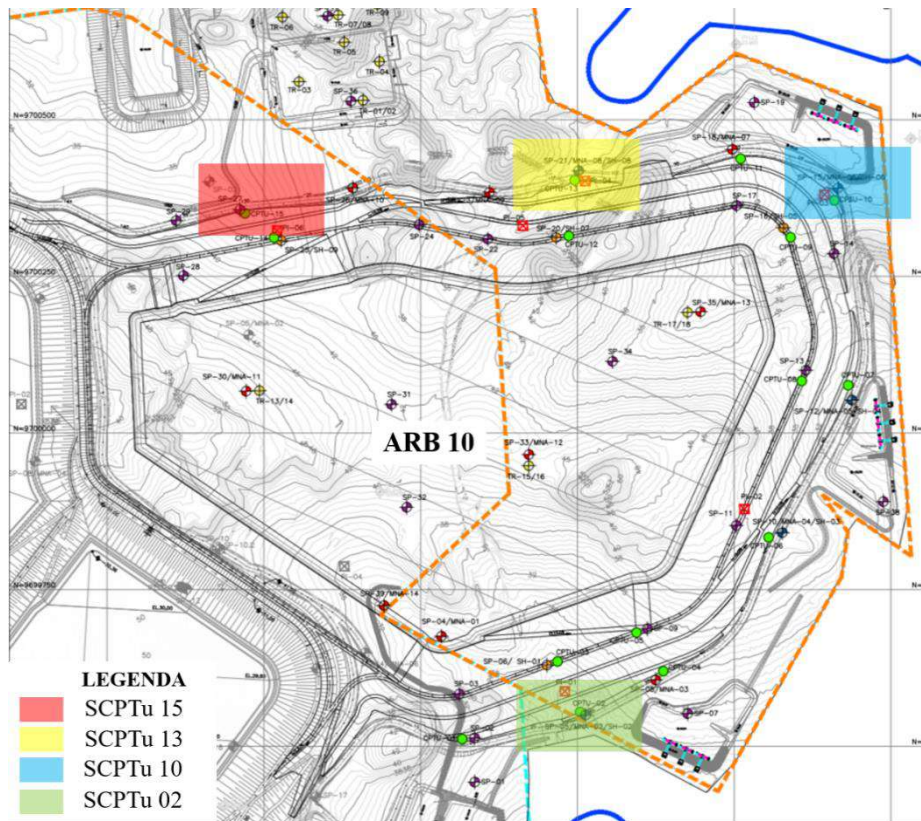


Figura 49: Localização dos ensaios SCPTu utilizados na ARB 10. Alumar (2023).



4.3.3. Localização dos ensaios SCPTu e SPT da ARB10

Os ensaios SPT e SCPTu da ARB10 foram conduzidos nos solos para fundações da barragem. Eles foram utilizados na tomada de decisões em relação ao projeto a ser desenvolvido para a construção da barragem. A escolha de utilizar exclusivamente os dados de SPT e SCPTu para as análises de correlação baseou-se na quantidade disponível desses dados e nas limitações de tempo para a realização das análises desenvolvidas. Na Figura 50 é possível identificar a posição de cada ensaio.

Figura 50: Localização dos ensaios SPT e SCPTu da ARB10. Alumar (2023).



4.4.MASW

O Método MASW realizado, encontra respaldo normativo na ABNT NBR 15935:2011, intitulada "Investigações Ambientais: Aplicação de Métodos Geofísicos", e internacionalmente na norma ASTM D5777-00:2006, "Standard Guide for Using Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation". A conformidade com ambas as normas confere ao MASW um respaldo técnico e metodológico sólido, destacando sua aplicação eficaz em estudos geotécnicos e ambientais.

4.4.1. Aquisição

O Método MASW, envolve a geração e registro de ondas sísmicas por meio de um arranjo linear de geofones equidistantes e próximos entre si, com o espaçamento determinado pela profundidade desejada para a investigação. A geração das ondas ocorre mediante uma fonte de impacto vertical, como uma marreta ou fontes do tipo queda de peso. Para o registro, são

utilizados geofones de componente vertical, preferencialmente de baixa frequência. Na Figura 51 é possível verificar a disposição de um arranjo e os equipamentos utilizados no ensaio.

Figura 51: Disposição de arranjo e equipamento utilizado para armazenamento de dados em campo - MASW. Fugro (2023).



Nos levantamentos de campo, foram empregados 24 geofones de 4,5 Hz, dispostos em linha num arranjo de 48 geofones com uso do sistema *roll along*, que possibilita a modificação da posição dos geofones com o avanço das aquisições. As energizações foram realizadas através do impacto vertical de uma marreta de 10 kg sobre uma placa metálica em pontos de tiro a cada 5,0 m de distância. A quantidade de pontos de energização variou de acordo com o tamanho das linhas programadas em campo, gravando-se de 4 a 6 energizações para estaqueamento dos dados na etapa de processamento. O equipamento utilizado foi o ABM 24, fabricado pela ABM Geofísica.

Na abordagem passiva, o levantamento implica na gravação das vibrações ambientes da área durante um período pré-determinado, empregando um arranjo linear de geofones equidistantes e pouco espaçados entre si. O espaçamento depende da profundidade desejada para a investigação, e nenhuma fonte ativa é utilizada. A janela de tempo de gravação permanece em 15 minutos contínuos. Apesar de demandar mais tempo que a técnica ativa, o levantamento passivo possibilita a execução em áreas de grande ruído ambiente. Para cada ponto, foram utilizados 24 geofones de 4,5 Hz, espaçados de 2,5 m entre si, com o arranjo movimentando-se a cada 5 metros.

4.4.2. Processamento

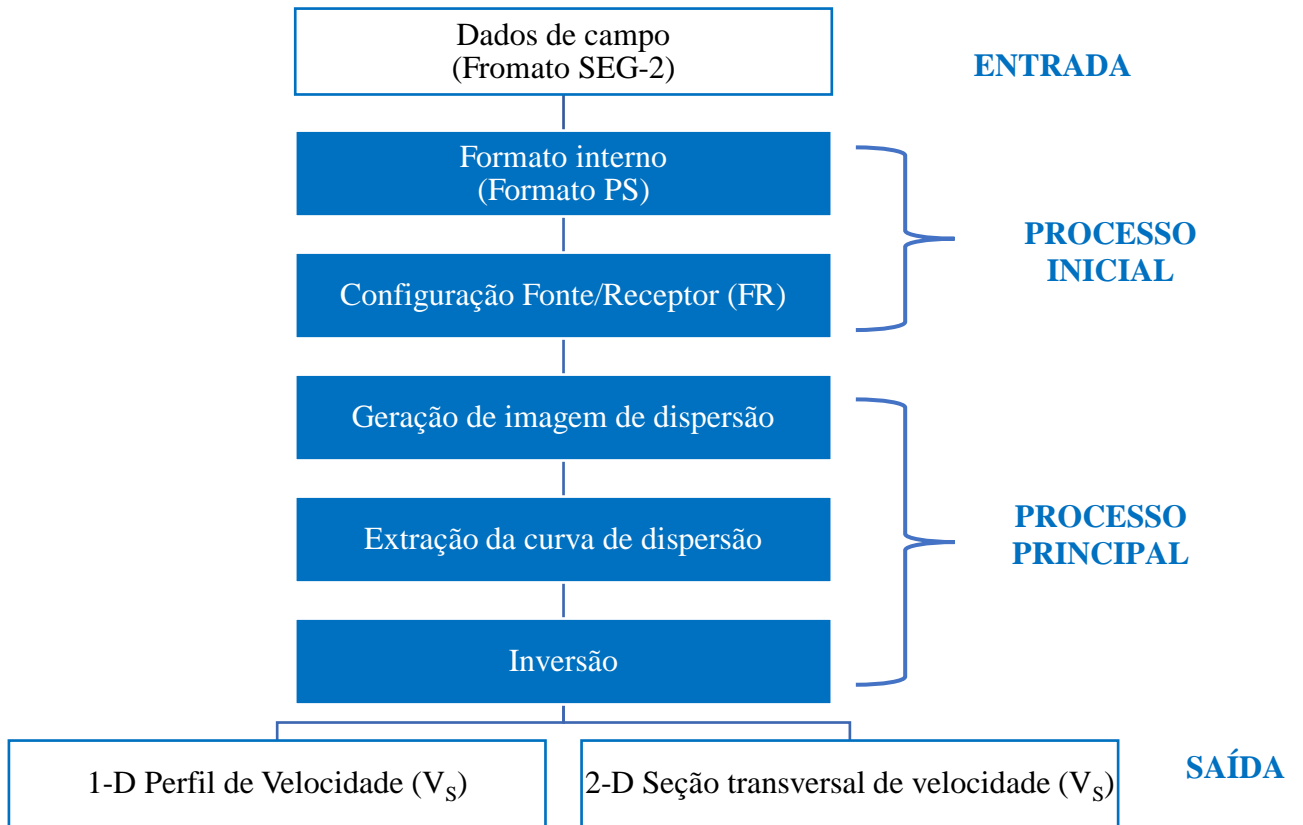
Na segunda etapa do processo, é realizada a obtenção da curva de dispersão da onda Rayleigh a partir do sismograma registrado, mediante uma operação de transformação dos sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência. Dado que as ondas Rayleigh detêm a maior parte da energia em um registro sismográfico, a curva de dispersão é adquirida pela identificação dos máximos de energia no domínio da frequência. A curva de dispersão selecionada é então empregada no processo de inversão.

A análise dos dados segue uma sequência de processamento que inclui:

- Conversão dos dados criptografados para o formato SEG-2;
- Unificação dos arquivos de dados de cada ponto de tiro ou linha;
- Seleção dos parâmetros da geometria de campo, de acordo com os dados de cada linha;
- Estaqueamento dos arquivos dos pontos de energização comum;
- Filtragem do dado com determinação do grupo de ondas a ser visualizado (topo e base do sinal);
- Seleção da faixa de frequência e velocidade do dado (3 a 70 Hz);
- Ajuste dos pontos na curva de dispersão;
- Ajuste das curvas de velocidade x frequência;
- Conversão da frequência para profundidade;
- Posicionamento lado a lado dos múltiplos pontos de impacto para kriagem do imageamento bidimensional de velocidades.

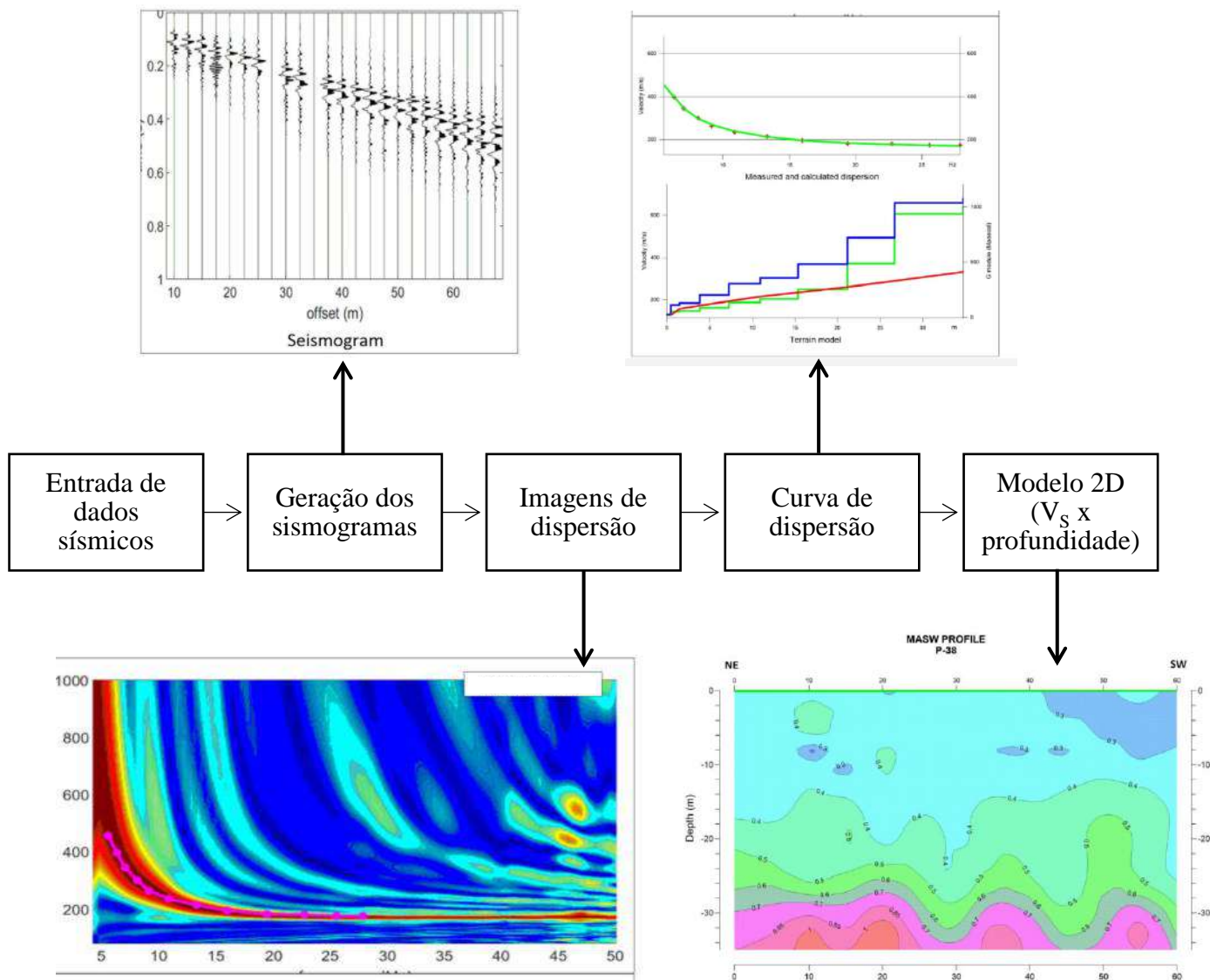
Na Figura 52, encontra-se uma síntese elucidativa do procedimento de processamento dos dados brutos obtidos durante o ensaio, destacando cada etapa do processo.

Figura 52: Fluxograma do passo a passo do processamento. Fugro (2023).



No fluxograma apresentado na Figura 53, é delineado o passo a passo para o tratamento dos dados, juntamente com a representação dos dados obtidos em cada etapa do processo.

Figura 53: Etapas do processamento de dados do MASW.



4.4.3. Inversão de velocidade e cálculo do módulo G

Na terceira e última etapa, um modelo de subsuperfície é inferido a partir da curva de dispersão, resultando em um perfil de velocidade da onda de cisalhamento (V_s) e, conseqüentemente, do módulo de cisalhamento máximo ($G_{\text{máx}}$), em função da profundidade para o ponto correspondente ao centro do arranjo de geofones. A determinação desses parâmetros ocorre de forma iterativa, buscando um modelo no qual a diferença entre a resposta teórica e a curva obtida em campo seja minimizada.

O principal parâmetro considerado em estudos relacionados com a resposta dos solos à solicitações dinâmicas é o módulo de cisalhamento (G), que pode ser determinado por diversos ensaios tanto de campo quanto de laboratório. Os ensaios de campo têm a vantagem

de eliminar os problemas associados à amostragem, pois investigam in situ um grande volume do terreno de forma não invasiva e não destrutiva. O módulo de cisalhamento do solo é fortemente dependente da deformação, podendo seu valor se reduzir em mais de dez vezes ao se passar de uma amplitude de deformação cisalhante de 10-3% para 1%. Os principais ensaios de campo são capazes de produzir no terreno deformações cisalhantes menores que 10-3%, determinando assim o módulo de cisalhamento máximo ($G_{\text{máx}}$), parâmetro associado a baixas deformações cisalhantes.

Dentre os ensaios de campo comumente utilizados, alguns podem ser destacados, como os ensaios sísmicos, que buscam determinar a velocidade de propagação da onda de cisalhamento (V_s). O valor de $G_{\text{máx}}$ pode ser obtido pela equação 34:

$$G_{MÁX} = \rho \cdot V_s^2 \quad \text{Equação 34}$$

Onde ρ é a massa específica do material.

Para terrenos sedimentares, utiliza-se por padrão o valor de $\rho=1,8\text{kg/cm}^3$. Especificamente, devido ao tipo de solos identificados na área, predominantemente arenosos, o valor de cálculo para o módulo G utilizado foi de $1,5\text{ kg/cm}^3$.

4.5. SCPTu

4.5.1. Equipamentos utilizados

Sistema de cravação

O equipamento utilizado para a cravação da ponteira foi um Penetrômetro provido de um sistema hidráulico, TG 73 200 de fabricação italiana (Pagani Geotechnical Equipment).

Ponteira de piezocone

O modelo da ponteira de piezocone utilizada é MKS de fabricação italiana (Pagani Geotechnical Equipment), seu diâmetro é de 35,8 mm e sua comunicação é feita por cabo, no qual os dados são transmitidos por sinais elétricos. Cada cone tem uma diferença de áreas, dependendo de seu projeto. Adotou-se a relação de área $a=0,795$ de acordo com as dimensões do piezocone utilizado nessa campanha de ensaios.

Posição do elemento poroso e medida de poro-pressões

Considerando que a poropressão pode ser medida em três posições ao longo do cone (face, base e topo da luva de atrito), a prática internacional tem consagrado a utilização deste elemento localizado na posição u2. Esta abordagem tem sido considerada satisfatória, sobretudo

quando utilizadas altas frequências de registros. A utilização do filtro de poropressões na posição u2 tem sido recomendada por uma série de organismos internacionais, entre os quais a ISSMFE a SGI – Swedish Geotechnical Institute. O equipamento utilizado pela Solo Sondagem tem seu elemento poroso localizado atrás da ponta, ou seja, na posição u2. A pedra porosa é saturada em glicerina para retirar todo o ar de seu interior.

4.5.2. Sistema para execução dos ensaios sísmicos Down-Hole

O sistema utilizado para realização dos ensaios sísmicos down-hole em conjunto com o piezocone foi desenvolvido a partir da proposta de Vitali (2011), descrito com detalhes em Vitali et al. (2012). O ensaio sísmico empregando esse sistema é feito logo após o término do ensaio CPTu, cravando-se a ponteira no mesmo furo do piezocone.

Esse sistema é composto por:

- ponteira de aço usinado (Figura 54), com 44 mm de diâmetro (15,2 cm² de área), que possui três geofones, espaçados em 0,5 m, modelo OMNI tipo GS-20DH fabricados pela Oyo Geospace;
- para aquisição dos dados, uma placa da National Instruments modelo NI USB-6251 e programa de computador para aquisição na plataforma Labview;
- para interpretação dos dados, programa de computador também na plataforma Labview;
- trigger de contato elétrico; e
- fonte sísmica (Figura 55), composta por uma barra de aço e um martelo de 2 kg para geração das ondas, que deve ser carregada contra o solo.

Figura 54: Ponteira utilizada, onde se observa a posição dos três geofones, numa versão atualizada daquela proposta por Vitali (2011).



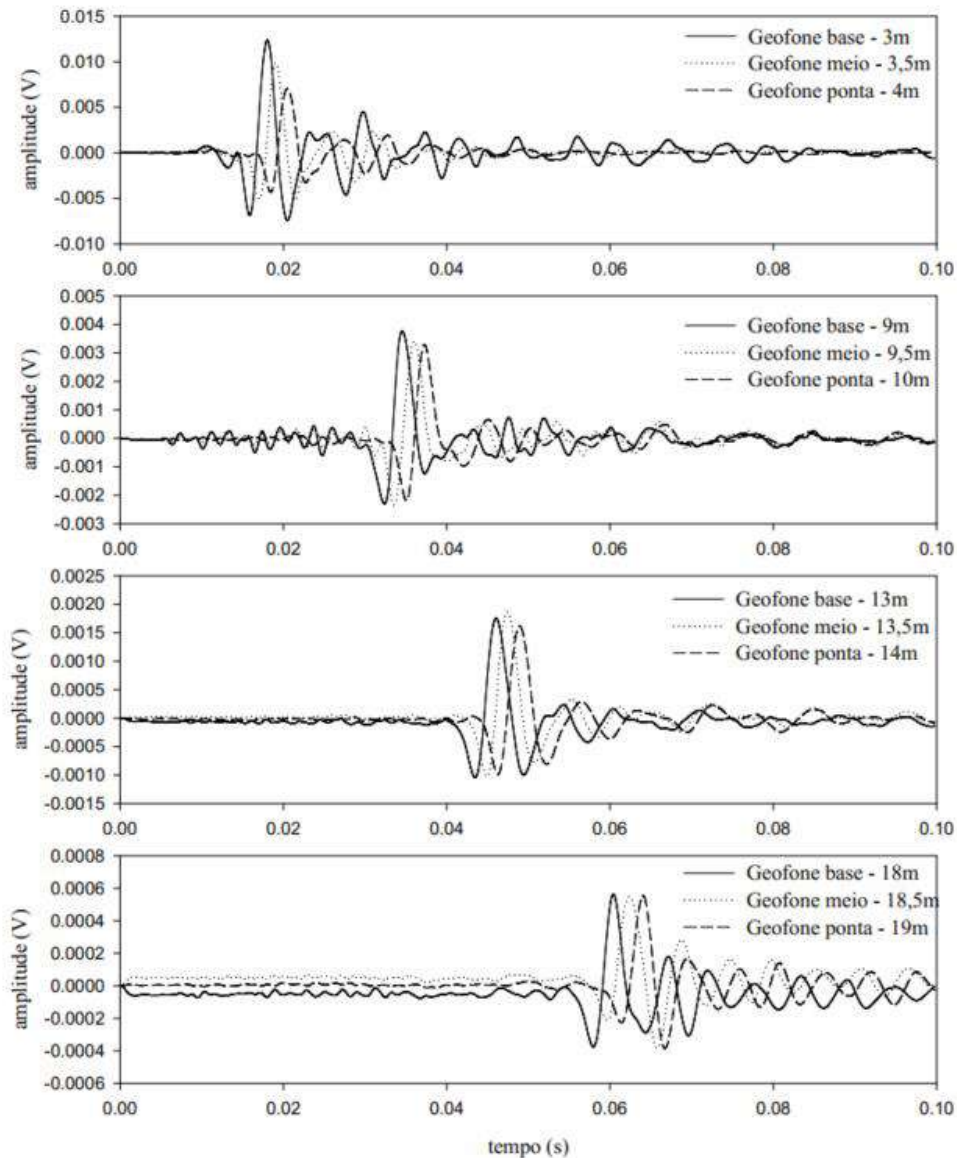
Figura 55: A fonte sísmica composta de barra de aço (a esquerda) e martelo (a direita) posicionada a frente do equipamento de cravação. Solo (2022).



4.5.3. Realização e interpretação dos ensaios

O ensaio sísmico consiste em cravar a ponteira continuamente no terreno, e quando da manobra para incorporação de uma nova haste, ou seja, a cada metro, realiza-se o ensaio sísmico. Ondas S são geradas na superfície por meio de golpes em uma fonte sísmica e captadas por três geofones instalados no interior da ponteira, cujo registros são armazenados em um sistema de aquisição de dados. Um resultado típico de um ensaio desse tipo é apresentado na Figura 56.

Figura 56: Resultado típico de ensaio sísmico com ponteira com três geofones (adaptado de Vitali et al. (2012)).



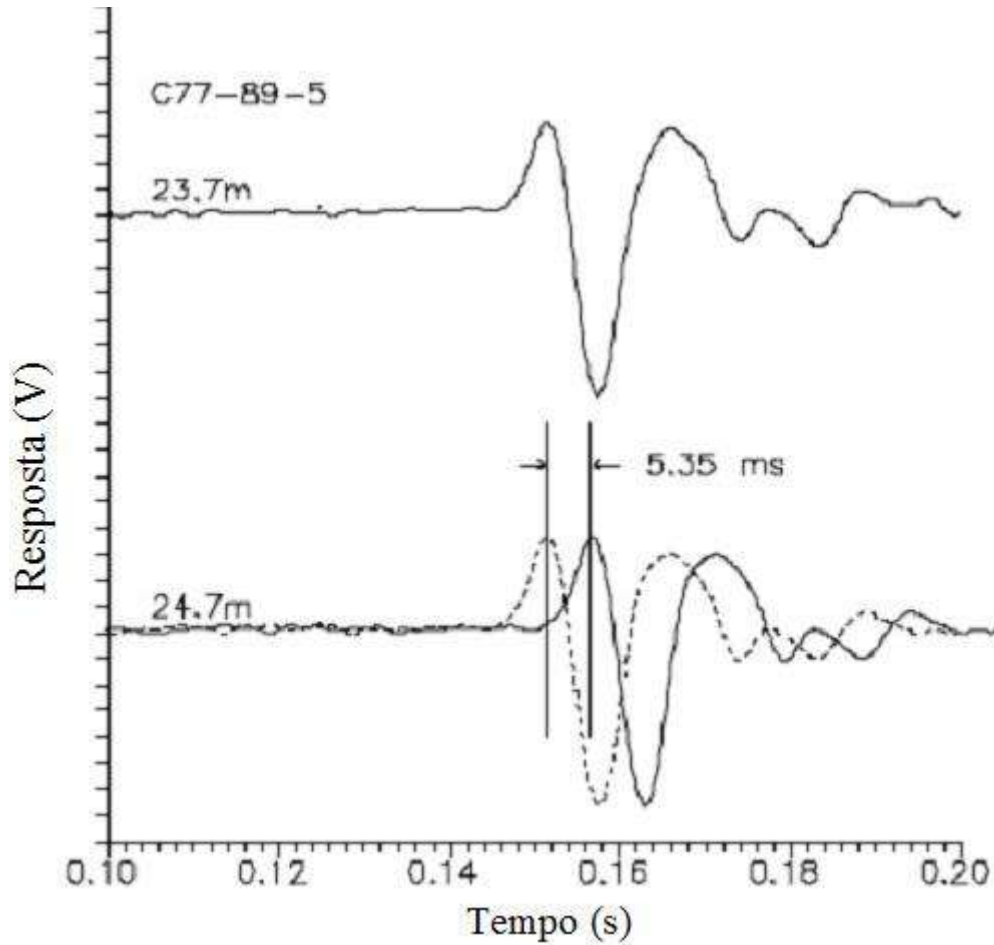
A interpretação dos registros de um ensaio desse tipo possibilita o cálculo da velocidade de propagação da onda (V_S) a intervalos de 0,5 de profundidade determinando-se o intervalo de tempo entre duas ondas ($\Delta t = T_2 - T_1$) gasto para elas percorrerem o caminho entre os dois geofones ($L_1 - L_2$), praticamente igual ao 0,5 m. A representação esquemática desse ensaio está na Figura 6 e a equação 35 é empregada para cálculo de V_S .

$$V_S = \frac{L_2 - L_1}{T_2 - T_1} \quad \text{Equação 35}$$

Quando se usa dois ou mais geofones em uma ponteira o método mais interessante para cálculo de V_S é o *cross-correlation*, que pode ser interpretado no domínio do tempo. Tal método consiste em deslocar no eixo das abcissas (tempo) um sinal em relação ao outro, o

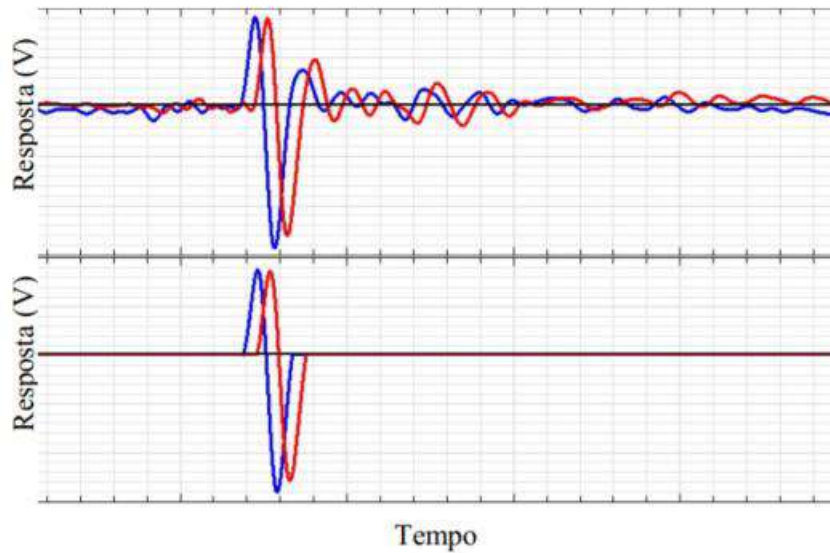
intervalo de tempo que fornece a maior correlação entre os sinais é o intervalo de tempo utilizado para o cálculo de V_s (Figura 57)

Figura 57: Determinação do intervalo de tempo através do método do *cross-correlation* no domínio do tempo (adaptado de Campanella e Stewart, 1992).



Os registros antes e após o pulso principal da onda S interferem na interpretação dos dados, portanto é conveniente removê-los. Campanella e Stewart (1992) recomendam selecionar uma revolução completa do pulso principal da onda, conforme Figura 58.

Figura 58: Seleção de uma revolução da onda S para determinação de V_s (Vitali, 2011).



Nesse trabalho, a interpretação dos registros de um ensaio desse pelo método *cross-correlation* empregou um programa de computador elaborado em Labview para o cálculo da velocidade de propagação da onda (V_s) a intervalos de 0,5 de profundidade.

4.5.4. Execução dos ensaios piezocone e sísmicos

Os testes com piezocone foram conduzidos em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela Norma ASTM-D 5778 (1995). Nesses ensaios, empregou-se uma ponteira cônica com um ângulo de 60 graus, apresentando um diâmetro de 35,8 mm (equivalente a 10 cm² de área). Durante o processo, foram registrados os perfis de resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s) e poro-pressões na posição padrão (u_2). As informações foram transmitidas ao sistema de aquisição de dados por meio de comunicação sonora. Na Figura 59 é possível visualizar a realização do ensaio SCPTu 15 no solo de fundação da ARB10.

Figura 59: Execução do ensaio SCPTu 15 da ARB10. Solo (2022).



A inserção da ponteira no solo foi realizada utilizando um penetrômetro multifuncional modelo Pagani TG 73 - 200, com capacidade de 200 kN, o qual estava firmemente ancorado no solo por meio de hastes helicoidais. Este procedimento envolve a cravação da ponteira cônica, conectada à extremidade de um conjunto de hastes, sendo introduzida no solo em intervalos de 1 metro, a uma velocidade constante de 2 cm/s. Importante ressaltar que o diâmetro das hastes é equivalente ao diâmetro do cone.

Os registros de resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s), poro-pressão (u_2), inclinação e velocidade de avanço foram obtidos a cada intervalo de 2 cm. Todos esses dados foram visualizados em tempo real na tela de um microcomputador portátil. Cabe mencionar que os registros de poro-pressão (u_2) foram obtidos empregando pedras porosas saturadas com glicerina, seguindo as recomendações de Lunne et al. (1997).

Os ensaios sísmicos *down-hole* foram realizados nos mesmos furos dos piezocone, logo após a realização de cada um deles. A velocidade de propagação das ondas S foi calculada pela média de três golpes na fonte sísmica em uma direção e três golpes na outra direção. Um resultado típico com os registros das ondas do ensaio sísmico é apresentado nas Figura 60 e Figura 61, onde pode-se observar as ondas capturadas em cada um dos três geofones (inferior, médio e superior), para um golpe em uma direção (Figura 60), e para um golpe na outra direção (Figura 61).

Foram realizados ensaios de piezocone com sísmica integrada localizados na área conforme apresentado no APÊNDICE C. Os resultados desses ensaios estão no APÊNDICE D, na forma de gráficos, com:

- Resistência de ponta (q_c) versus profundidade;
- Atrito lateral (f_s) versus profundidade;
- Poro-pressão (u) versus profundidade;
- Razão de atrito (R_f) versus profundidade; e
- Velocidade de propagação da onda cisalhante (V_s) versus profundidade.

Figura 60: Resultado típico de um ensaio sísmico realizado com golpe em uma direção. Solo (2022).

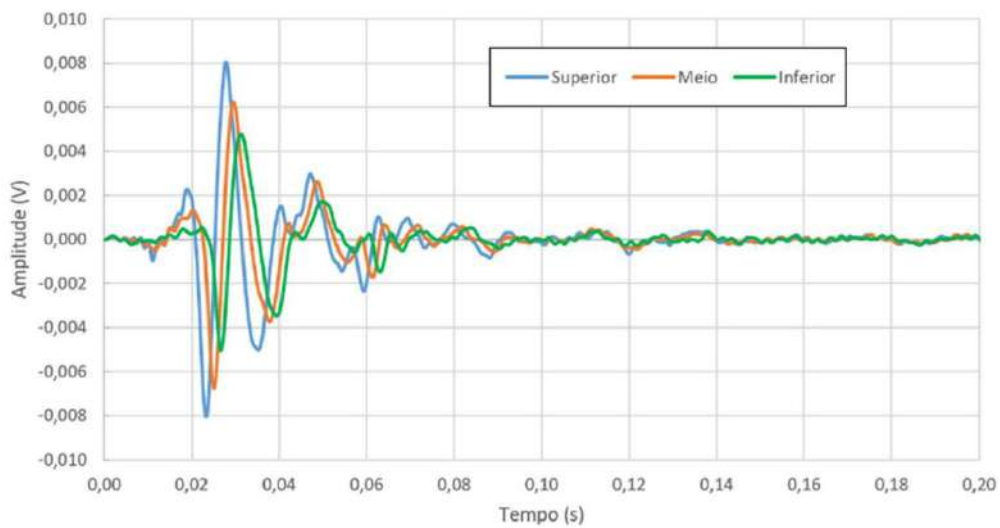
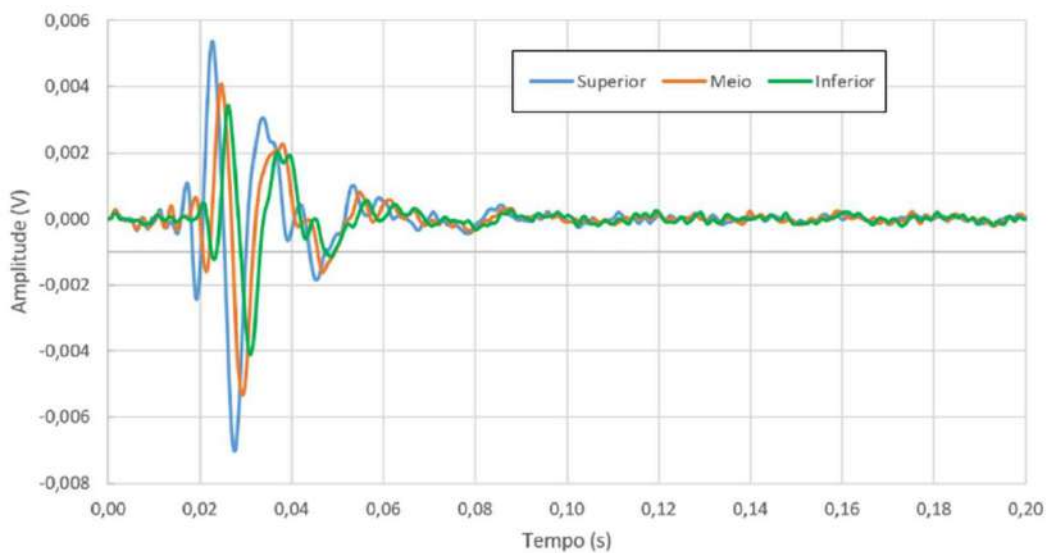


Figura 61: Resultado típico de um ensaio sísmico realizado com golpe em duas direções. Solo (2022).



Os resultados dos ensaios foram analisados utilizando o software Vitali (2011), que utiliza o método de *cross-correlation* entre dois geofones em um intervalo verdadeiro de 1m. Vale destacar que, neste software, a visualização das ondas ocorre apenas durante a execução do ensaio, não sendo disponibilizada posteriormente.

4.6. SPT

Em cada ponto de sondagem, montou-se um tripé e um conjunto de roldanas e cabos de aço, que auxilia no manuseio da composição de hastes por força manual. Coletou-se a amostra a zero metro iniciou-se a escavação com trado manual; na base do furo que teve o amostrador padrão acoplado a hastes de perfuração; ergueu-se o martelo padronizado ou “peso batente” de 65 kg até a altura de 75 cm e deixou-se cair em queda livre sobre a haste. Tal procedimento foi repetido até que o amostrador penetrasse 45 cm do solo, a soma do número de golpes necessários para a penetração do amostrador nos últimos 30 cm é o que deu o índice de resistência do solo na profundidade ensaiada (N_{SPT}). Nos casos que foi encontrado o N.A, o avanço realizou-se através da lavagem dos furos. O ensaio foi interrompido quando atingiu as exigências do contratante ou atingiu o impenetrável. As amostras coletadas a cada metro foram acondicionadas em recipientes, etiquetadas e enviadas ao laboratório para análise tátil-visual por geólogo.

As medições do nível d'água ocorreram após estabilização de 24 e 48 horas, os resultados dos ensaios de SPT estão representados nos perfis de sondagem individuais no Anexo 01, a escolha dos pontos para realização os ensaios foram definidos no projeto. Também foram realizadas coletas de amostras do bico do amostrador SPT para a realização do ensaio de teor de umidade. Na Figura 62 é possível visualizar a execução de um SPT sendo realizada. Os resultados dos furos SPT estudados estão disponíveis no APÊNDICE G.

Figura 62: Execução de um ensaio SPT na ARB10.



4.7. Correspondência entre os ensaios MASW e SCPTu

Na Tabela 16 é possível visualizar a correspondência existente entre os ensaios MASW e SCPTu, com a localização do ponto MASW e a referência do SCPTu da ARB correspondente. Ressalta-se que alguns ensaios SCPTu ainda não foram realizados, ou não há SCPTu para o ponto MASW realizado. Os pontos MASW que estão elencados com o nome da ARB e INTERFACE, foram realizados sobre o resíduo de bauxita, os demais pontos numerados de 1 a 50 foram realizados nos diques e/ou solo de fundação.

Tabela 16: Correspondência entre todos os ensaios MASW e SCPTu das ARB's.

Pontos MASW	Coordenadas do centro caminhada	SCPTu de Referência	ARBs	Observação
P1	N:9700315 E:580375	SCPTu 10	ARB 10	
P2	N: 9700403 E: 579995	SCPTu 13	ARB 10	
P3	N:9700396 E:579485	SCPTu 15	ARB 10	
P4	2°42'41"S 44°17'26"W	SCPTu 01	ARB 09	
P5	N: 9700151 E: 578699	-	ARB 09	Não há SCPTu
P6	2°42'44"S 44°17'33"W	-	ARB 09	Não há SCPTu
P7	N:9699910 E: 578605	-	ARB 09	Não há SCPTu
P8	2°42'58"S 44°17'36"W	SCPTu 05	ARB 09	
P9	2°43'17"S 44°17'44"W	SCPTu 06	ARB 07	Invest. SCPTu ainda não realizada
P10	2°43'33"S 44°17'42"W	SCPTu 01	ARB 08	Invest. SCPTu ainda não realizada
P11	2°43'41"S 44°17'38"W	-	ARB 08	Não há SCPTu
P12	2°43'44"S 44°17'36"W	SCPTu 02	ARB 08	Invest. SCPTu ainda não realizada
P13	2°43'45"S 44°18'00"W	SCPTu 05	ARB 06	
P14	2°43'35"S 44°18'00"W		ARB 06	Não há SCPTu

Continuação da Tabela 16.

P15	2°43'43"S 44°17'59"W	SCPTu 02	ARB 06	
P16	2°43'27"S 44°17'55"W	SCPTu 13	ARB 07	Invest. SCPTu ainda não realizada
P17	2°43'14"S 44°17'49"W	SCPTu 05	ARB 07	Invest. SCPTu ainda não realizada
P18	2°43'05"S 44°17'53"W	SCPTu 14	ARB 05	
P19	2°43'02"S 44°17'57"W		ARB 05	Não há SCPTu
P20	2°42'54"S 44°17'57"W	SCPTu 10	ARB 05	
P21	2°42'48"S 44°18'00"W		ARB 05	Não há SCPTu
P22	2°42'47"S 44°18'11"W	SCPTu 06	ARB 05	
P23	2°42'52"S 44°18'13"W	SCPTu 05	ARB 05	
P24	2°42'58"S 44°18'22"W	SCPTu 03	ARB 05	
P25	2°43'10"S 44°18'30"W	SCPTu 02	ARB 04	
P26	2°43'16"S 44°18'31"W	SCPTu 03	ARB 04	
P27	2°43'19"S 44°19'36"W	SCPTu 04	ARB 04	
P28	2°43'29"S 44°18'36"W	-	ARB 03	Não há SCPTu
P29	2°43'25"S 44°18'46"W	-	ARB 02	Não há SCPTu
P30	2°43'20"S 44°18'50"W	SCPTu 05	ARB 02	Invest. SCPTu ainda não realizada
P31	2°43'28"S 44°19'02"W	-	ARB 02	Não há SCPTu
P32	2°43'30"S 44°19'05"W	SCPTu 02	ARB 02	Invest. SCPTu ainda não realizada
P33	2°43'42"S 44°19'09"W	-	ARB 01	Não há SCPTu
P34	2°43'51"S 44°19'11"W	SCPTu 01	ARB 01	Invest. SCPTu ainda não realizada
P35	2°43'53"S 44°19'03"W	-	ARB 01	Não há SCPTu
P36	2°43'58"S 44°19'01"W	SCPTu 02	ARB 01	Invest. SCPTu ainda não realizada
P37	2°43'53"S 44°18'53"W	-	ARB 01	Não há SCPTu
P38	2°43'53"S 44°18'50"W	SCPTu 03	ARB 01	Invest. SCPTu ainda não realizada
P39	2°43'50"S 44°18'45"W	-	ARB 03	Não há SCPTu
P40	2°43'52"S 44°18'37"W	SCPTu 05 / SCPTu 06	ARB 03	Invest. SCPTu ainda não realizada
P41	2°43'48"S 44°18'35"W	-	ARB 03	Não há SCPTu
P42	2°43'44"S 44°18'28"W	SCPTu 02 / SCPTu 03	ARB 03	Invest. SCPTu ainda não realizada
P43	2°43'43"S 44°18'16"W	SCPTu 07	ARB 06	
P44	2°43'42"S 44°18'13"W		ARB 06	Não há SCPTu
P45	2°43'42"S 44°17'26"W	SCPTu 03	ARB 08	Invest. SCPTu ainda não realizada
P46	2°43'34"S 44°17'18"W	-	ARB 08	Não há SCPTu
P47	N: 9699201 E: 579327	SCPTu 07 / SCPTu 08	ARB 09	
P48	2°43'11"S 44°17'05"W		ARB 09	Não há SCPTu
P49	2°42'42"S 44°17'16"W	SCPTu 02	ARB 10	
P50	CANCELADO	SCPTu 06	ARB 10	
ARB1	2°43'50"S 44°18'52"W	-	ARB1	Não há SCPTu

Continuação da Tabela 16

ARB2	2°43'33"S 44°19'00"W	-	ARB2	Não há SCPTu
ARB3	2°43'45"S 44°18'138"W	-	ARB3	Não há SCPTu
ARB4	2°43'24"S 44°18'25"S	-	ARB4	Não há SCPTu
ARB5	2°43'06"S 44°18'07"W	-	ARB5	Não há SCPTu
ARB6	CANCELADO	-	ARB6	Não há SCPTu
INTERFACE	2°43'41"S 44°18'44"W	-	INTERFACE	Não há SCPTu

Na Tabela 17, são identificadas as relações que serão estudadas ao longo da pesquisa. Cada relação será de um ponto MASW com o(s) ensaio(s) SCPTu correspondente. A escolha foi feita baseando-se na disponibilidade de dados, disposição dos ensaios e a proximidade entre eles.

Tabela 17: Relação dos pontos MASW e SCPTu em estudo.

Relação	Pontos MASW	SCPTu de Referência	ARB's	Observação
R1	P25	SCPTu 02	ARB 04	SCPTu proveniente do As Is
R2	P26	SCPTu 03	ARB 04	SCPTu proveniente do As Is
R3	P27	SCPTu 04	ARB 04	SCPTu proveniente do As Is
R4	P18	SCPTu 14	ARB 05	SCPTu proveniente do As Is
R5	P20	SCPTu 10	ARB 05	SCPTu proveniente do As Is
R6	P22	SCPTu 06	ARB 05	SCPTu proveniente do As Is
R7	P23	SCPTu 05	ARB 05	SCPTu proveniente do As Is
R8	P24	SCPTu 03	ARB 05	SCPTu proveniente do As Is
R9	P13	SCPTu 05	ARB 06	SCPTu proveniente do As Is
R10	P15	SCPTu 02	ARB 06	SCPTu proveniente do As Is
R11	P43	SCPTu 07	ARB 06	SCPTu proveniente do As Is
R12	P4	SCPTu 01	ARB 09	SCPTu proveniente da campanha de investigação para construção
R13	P8	SCPTu 05	ARB 09	SCPTu proveniente da campanha de investigação para construção
R14	P47	SCPTu 07	ARB 09	SCPTu proveniente da campanha de investigação para construção
R15	P47	SCPTu 08	ARB 09	SCPTu proveniente da campanha de investigação para construção
R16	P1	SCPTu 10	ARB 10	SCPTu proveniente da campanha de investigação para construção
R17	P2	SCPTu 13	ARB 10	SCPTu proveniente da campanha de investigação para construção
R18	P3	SCPTu 15	ARB 10	SCPTu proveniente da campanha de investigação para construção
R19	P49	SCPTu 02	ARB 10	SCPTu proveniente da campanha de investigação para construção

Os ensaios realizados durante a campanha de investigação para a construção das barragens se concentraram exclusivamente no perfil natural do solo utilizado como base para as estruturas. Por outro lado, os resultados dos dados provenientes do *As Is* das ARBs 4, 5 e 6

não se limitaram apenas ao solo natural, abrangendo, em alguns casos, também os diques das barragens e os resíduos de bauxita.

4.8. Correspondência entre os ensaios SCPTu e SPT da ARB10

Na Tabela 18, são identificadas as correlações entre os ensaios SCPTu e SPT que foram estudadas ao longo da pesquisa. Cada relação será de um ponto SCPTu com o(s) ensaio(s) SPT correspondente. A escolha foi feita baseando-se na disponibilidade de dados, disposição dos ensaios e a proximidade entre eles.

Tabela 18: Correlação dos pontos SPT e SCPTu em estudo.

Correlação	SCPTu de referência	SPT de referência
C1	SCPTu 01	SPT2
C2	SCPTu 01	SPT3
C3	SCPTu 02	SPT5
C4	SCPTu 03	SPT6
C5	SCPTu 04	SPT7
C6	SCPTu 04	SPT8
C7	SCPTu 05	SPT9
C8	SCPTu 06	SPT10
C9	SCPTu 06	SPT11
C10	SCPTu 07	SPT12
C11	SCPTu 08	SPT13
C12	SCPTu 09	SPT14
C13	SCPTu 09	SPT16
C14	SCPTu 10	SPT15
C15	SCPTu 11	SPT18
C16	SCPTu 12	SPT20
C17	SCPTu 12	SPT22
C18	SCPTu 13	SPT21
C19	SCPTu 13	SPT23

4.9. Correspondência entre os ensaios MASW, SCPTu e SPT da ARB10

Na Tabela 19, são identificadas as correlações entre os ensaios MASW, SCPTu e SPT que serão estudadas ao longo da pesquisa. Cada relação será de um ponto MASW com o(s) ensaio(s) SCPTu e SPT correspondente. A escolha foi feita baseando-se na disponibilidade de dados, disposição dos ensaios e a proximidade entre eles.

Tabela 19: Correlação dos pontos MASW, SCPTu e SPT em estudo da ARB10.

Correlação	MASW de referência	SCPTu de referência	SPT de referência
V1	P1	SCPTu 10	SPT 2
V2	P1	SCPTu 10	SPT 3
V3	P2	SCPTu 13	SPT 21
V4	P2	SCPTu 13	SPT 22
V5	P3	SCPTu 15	SPT 27
V6	P3	SCPTu 15	SPT 28

4.10. Análises realizadas

4.10.1. Determinação das velocidades de ondas cisalhantes V_s

A metodologia para a determinação das velocidades de ondas cisalhantes (V_s) desempenha um papel central na caracterização do subsolo em investigações sísmicas. Este tópico explora a abordagem adotada para calcular as V_s , apresentando uma visão geral dos passos essenciais envolvidos. A precisão dessas velocidades é fundamental para uma compreensão aprofundada das propriedades do solo. Este segmento destaca a metodologia empregada, fornecendo a base para a interpretação posterior dos resultados obtidos.

A Tabela 20 apresenta o método utilizado no cálculo das velocidades médias de onda cisalhante (MV_{S1} e MV_{S2}) em diversos pontos de interesse, onde são consideradas duas médias distintas. A necessidade de utilizar esses dois tipos de médias é decorrente da variação obtida pelas velocidades, a depender da profundidade e da distância do ponto de referência.

Tabela 20: Método para determinação de MV_{S1} e MV_{S2} .

MASW PX	V_s (m/s)					MV_{S1}
	X_1	X_2	X_3	...	X_n	
Z1	i_{11}	i_{12}	i_{13}	...	i_{1n}	$MV_{S1Z1} = (i_{11}+i_{12}+i_{13}+...+i_{1n}) / n$
Z2	i_{21}	i_{22}	i_{23}	...	i_{2n}	$MV_{S1Z2} = (i_{21}+i_{22}+i_{23}+...+i_{2n}) / n$
Z3	i_{31}	i_{32}	i_{33}	...	i_{3n}	$MV_{S1Z3} = (i_{31}+i_{32}+i_{33}+...+i_{3n}) / n$
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋅ ⋅ ⋅
Zm	i_{m1}	i_{m2}	i_{m3}	...	i_{mn}	$MV_{S1Zm} = (i_{m1}+i_{m2}+i_{m3}+...+i_{mn}) / n$

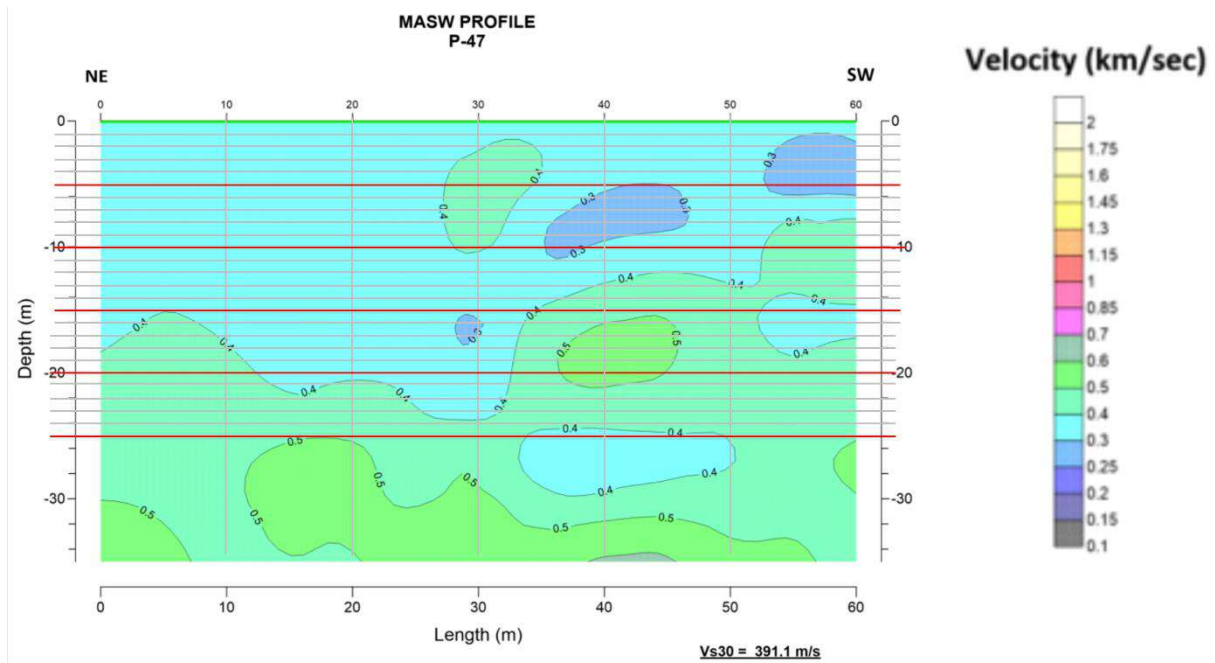
$$MV_{S2} = (i_{11}+i_{12}+i_{13}+...+i_{mn}) / m \cdot n \quad \text{ou ainda,}$$

$$MV_{S2} = (MV_{S1Z1} + MV_{S1Z2} + MV_{S1Z3} + ... + MV_{S1Zm}) / m$$

As velocidades utilizadas foram encontradas pontualmente, utilizando a média de referência obtida na legenda. Para cada V_s proveniente de uma profundidade do SCPTu foi

encontrado uma velocidade correspondente a mesma profundidade no ensaio MASW correspondente. A Figura 63 ilustra como foi realizada a determinação das velocidades em cada ponto. A quantidade de dados pontuais obtidos variou de acordo com as profundidades de dados provenientes do SCPTu. Essa metodologia também foi utilizada por Meira (2022).

Figura 63: Determinação das V_s pontuais no MASW.



Todos as imagens do MASW com os referidos pontos analisados e determinações de valores pontuais estão no APÊNDICE E. Os valores das velocidades encontrados e calculados estão descritos no item 4.10.1.

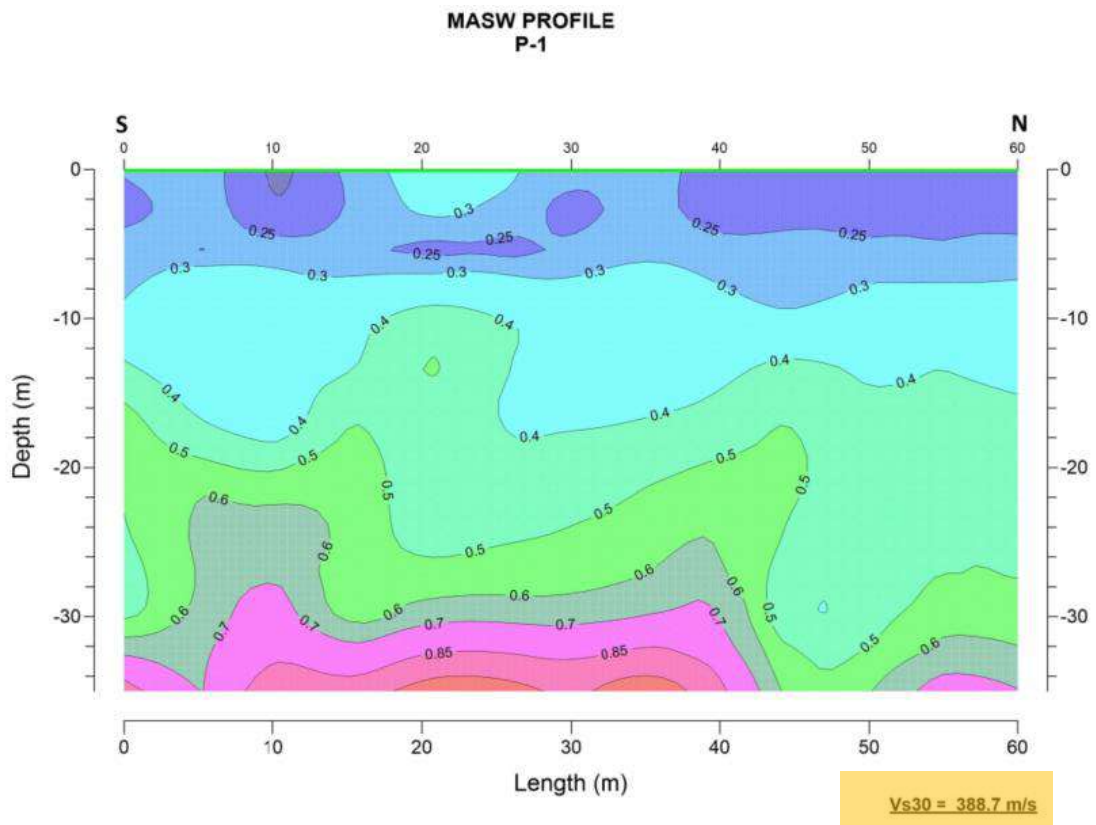
Nos ensaios SCPTu, foram apresentados os valores das velocidades V_s para determinadas profundidades (Z_m). A partir dos valores, obteve-se uma média das velocidades cisalhantes (MV_{S3}) para cada ensaio SCPTu estudado. A Tabela 21 mostra o método para sua determinação.

Tabela 21: Método para determinação de MV_{S3} .

Resultados V_s (m/s) compilados do SCPTu XX	
	X_1
Z_1	i_{11}
Z_2	i_{21}
Z_3	i_{31}
\vdots	\vdots
Z_m	i_{m1}
$MV_{S3} = i_{11} + i_{21} + i_{31} \dots i_{m1} / m$	

Por fim, o valor do $MV_{S4} = V_{S30}$, que é a média geral obtida com o MASW para os 30 m iniciais de camadas analisadas, tal valor inclui não apenas as camadas alcançadas pelo SCPTu, mas toda a camada estudada pelo MASW, tendo em vista que alguns ensaios obtiveram dados com mais de 30 metros de profundidade e 60 metros de comprimento. Os valores foram calculados no ensaio e mostrados no resultado final indicados no APÊNDICE B. Os resultados estão presentes na parte inferior direita, como destacado em amarelo na Figura 64.

Figura 64: Localização do resultado V_{S30} do MASW.



A determinação dos valores MV_{S1} , MV_{S2} , MV_{S3} e MV_{S4} serão importantes para a determinação da rigidez do solo, podendo ser possível analisar o seu comportamento em diferentes perspectivas.

4.10.2. Determinação dos módulos de cisalhamento do solo G_o

A Tabela 22 apresenta o método utilizado no cálculo dos módulos de cisalhamento do solo (G_{o2} , G_{o3} , G_{o4} e G_{o6}) em diversos pontos de interesse. A necessidade de recorrer a esses tipos de médias decorre da considerável variação observada nas velocidades, bem como das alterações na densidade do solo em relação à profundidade e distância do ponto de referência.

Tabela 22: Método para determinação de G_{o2} , G_{o3} , G_{o4} e G_{o6} .

MASW PX	G_o (MPa)					G_{oz}	G_Z
	X_1	X_2	X_3	...	X_n		
Z_1	g_{11}	g_{12}	g_{13}	...	g_{1n}	$G_{oz1} = (g_{11}+g_{12}+g_{13}+...+g_{1n}) / n$	$G_{Z1} = (MV_{S1}^2 \cdot \rho_{z1}) / (1000 \cdot n)$
Z_2	g_{21}	g_{22}	g_{23}	...	g_{2n}	$G_{oz2} = (g_{21}+g_{22}+g_{23}+...+g_{2n}) / n$	$G_{Z2} = (MV_{S1}^2 \cdot \rho_{z2}) / (1000 \cdot n)$
Z_3	g_{31}	g_{32}	g_{33}	...	g_{3n}	$G_{oz3} = (g_{31}+g_{32}+g_{33}+...+g_{3n}) / n$	$G_{Z3} = (MV_{S1}^2 \cdot \rho_{z3}) / (1000 \cdot n)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots		\vdots	\cdot	\cdot
Z_m	g_{m1}	g_{m2}	g_{m3}	...	g_{mn}	$G_{ozm} = (i_{m1}+i_{m2}+i_{m3}+...+i_{mn}) / n$	$G_{Zm} = (MV_{S1}^2 \cdot \rho_{zm}) / (1000 \cdot n)$

$$G_{o2} = (G_{Z1} + G_{Z2} + G_{Z3} + \dots + G_{Zm}) / m$$

$$G_{o3} = (MV_{S2}^2 \cdot \rho_{méd}) / (1000)$$

$$G_{o4} = (G_{oz1} + G_{oz2} + G_{oz3} + \dots + G_{ozm}) / m$$

$$G_{o6} = (MV_{S4}^2 \cdot \rho_{méd}) / (1000)$$

Nos ensaios SCPTu, foram apresentados os valores das velocidades V_S para determinadas profundidades (Z_m). A partir dos valores, obteve-se uma média das velocidades cisalhantes (MV_{S3}), por consequência, calculou-se o módulo de cisalhamento (G_{o5}) para cada ensaio SCPTu estudado. A Tabela 23 mostra o método para sua determinação.

Tabela 23: Método para determinação de G_{o5} .

Resultados G_{o5} (MPa) compilados do SCPTu XX	
	X_1
Z_1	g_{11}
Z_2	g_{21}
Z_3	g_{31}
\vdots	\vdots
Z_m	g_{m1}
$G_{o5} = (g_{11} + g_{21} + g_{31} \dots g_{m1}) / m$	

Por fim, o valor do $G_{o6} = (MV_{S4}^2 \cdot \rho_{méd}) / (1000)$, que é a média geral obtida com o MASW para todas as camadas analisadas, tal valor inclui não apenas as camadas alcançadas

pelo SCPTu, mas toda a camada estudada pelo MASW, tendo em vista que alguns ensaios obtiveram dados de até 30 metros de profundidade e 60 metros de comprimento.

Vale ressaltar que a densidade do solo, necessário para o cálculo do módulo de cisalhamento (G_0) foi utilizado de diferentes maneiras. Para o cálculo dos módulos G_{03} e G_{06} , foi utilizado uma densidade média ($\rho_{méd}$) das densidades conhecidas. Nos demais módulos foi utilizada a densidade específica (ρ_{zm}) para a profundidade (Z) analisada.

4.10.3. Análise de correlação entre as variáveis q_c , f_s , N_{SPT} , IC e Z

Na análise de correlação analisada, serão estudados os comportamentos e a relação entre as variáveis, q_c (resistência de ponta), f_s (atrito lateral), N_{SPT} , IC (índice de conformidade) e Z (profundidade).

A matriz de correlação é utilizada para iniciar a análise estatística dos dados históricos dos diversos universos estudados, identificando visualmente as variáveis envolvidas no estudo que se relacionam entre si. A determinação do grau de relação entre duas variáveis é dada pelo coeficiente de Pearson, também chamado de coeficiente de correlação, ou simplesmente correlação para os pares de variáveis. Esse coeficiente é um número entre -1 e 1 que expressa o grau de dependência linear entre duas variáveis quantitativas, que quando negativa indica que uma variável diminui com o aumento da outra, e positiva quando uma variável aumenta com o aumento da outra (Johnson e Wichern, 2007).

Segundo Cressie (2015), em estatística espacial, o correlograma (ou função de correlação) reflete graficamente a estrutura de dependência de um processo espacial subjacente e como essa estrutura de dependência muda com a distância geográfica. O correlograma é o gráfico utilizado em séries temporais para traçar as autocorrelações em diversas defasagens. A análise desse gráfico permite entender se a série é aleatória ou possui alguma tendência ou sazonalidade.

Utilizando o software R Studio 3.3.0, foi construído um correlograma, com os parâmetros citados, para verificar a existência de correlações significativas entre conjuntos de dados, ou seja, se os dados desses conjuntos variaram da mesma maneira de acordo com o tempo de degradação.

Teste de normalidade

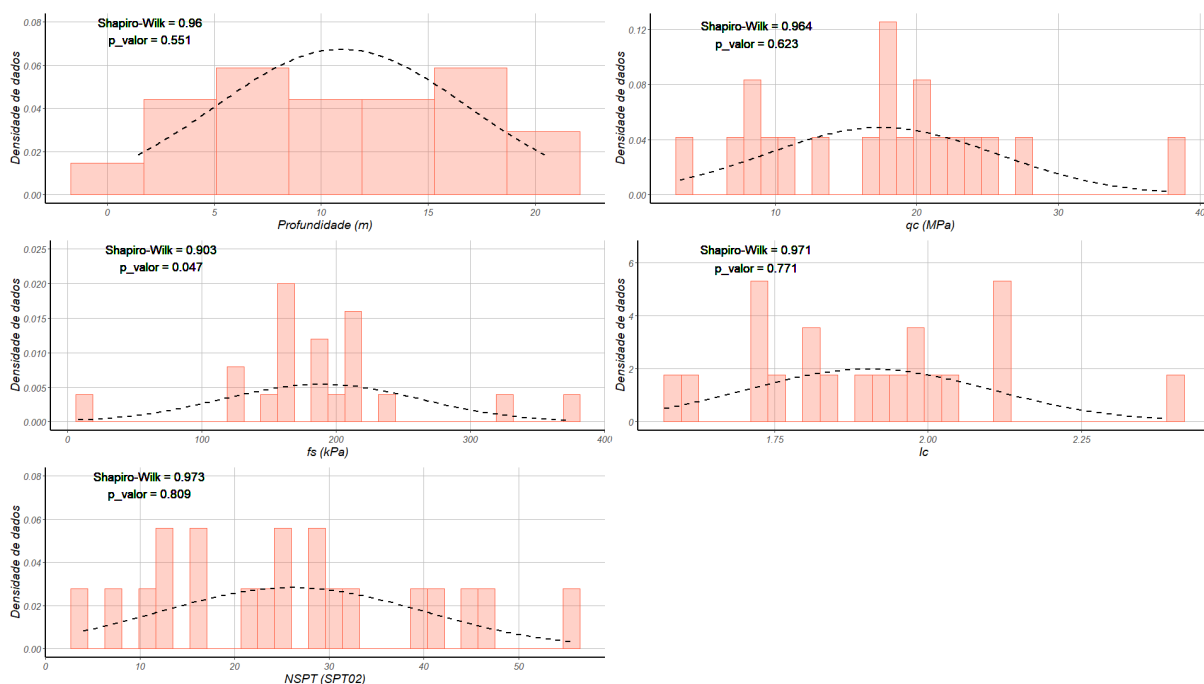
A normalidade do banco de dados foi verificada através do teste de Shapiro-Wilk. Esse teste permitiu avaliar se o banco de dados segue o formato de curva gaussiana. O teste de

Shapiro-Wilk fornece dois resultados principais, uma variável estatística (W) associada a um valor-p.

Para verificação dos resultados, foram aplicadas duas hipóteses, a hipótese nula (H0) foi aceita quando o valor-p foi maior que 0,05, indicando a normalidade do conjunto de dados. Já a hipótese alternativa (H1), foi aceita com valores-p menores que 0,05, apontando que os dados não seguem a distribuição normal.

A Figura 65 indica como funciona a distribuição dos dados obtidos, indicando os valores de Shapiro-Wilk e o valor-p. Os testes de normalidade estão no APÊNDICE H.

Figura 65: Teste de normalidade da correlação C1, entre o SCPTu 01 e o SPT 02.



Análise de Correlação

Para realização das análises de correlação foram utilizadas as metodologias de Pearson e Spearman. Quando os dados de ambas as variáveis analisadas apresentaram distribuição aproximadamente normais, foi aplicada a correlação de Pearson (Equação 36).

$$R = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad \text{Equação 36}$$

Sendo:

X_i e Y_i : valores individuais das duas variáveis.

\bar{X} e \bar{Y} : as médias das duas variáveis, respectivamente.

Entretanto, caso os dados não seguissem uma distribuição normal, foi escolhida a correlação de Spearman (Equação 37), que é robusta a desvios de normalidade e a valores discrepantes.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{Equação 37}$$

Sendo:

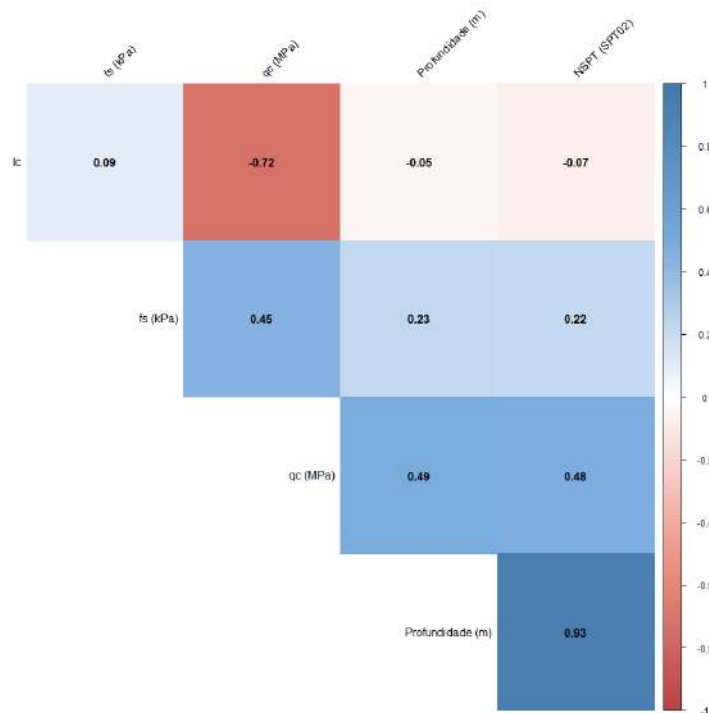
di: diferença entre os rankings das observações em ambas as variáveis.

n: número de observações.

O resultado do teste de correlação foi expresso com o valor do coeficiente de correlação (R). Se estiver próximo de 1 ou -1, há uma forte correlação entre as variáveis, se estiver próximo de 0, indica uma correlação fraca.

A Figura 66 ilustra as correlações entre os parâmetros analisados da correlação C1, para todas as 19 correlações, foi obtido esses dados de correlação. Quanto mais forte a cor, mais correlacionado são os parâmetros, seja positivo ou negativo. Os correlogramas estão no APÊNDICE I.

Figura 66: Correlograma da correlação C1, entre o SCPTu 01 e o SPT 02.



4.10.4. Correlação entre q_c , f_s e V_s dos ensaios SCPTu da ARB10

Nessa análise, serão utilizados todos os pares de dados obtidos com o SCPTu, para a plotagem de um gráfico de dispersão e encontrar uma equação que represente o modelo. Além da equação, será obtido um valor R^2 que indicará se o comportamento dos parâmetros analisados possui uma boa correlação. Será analisado 2 pares de dados diferentes, V_s e q_c e V_s e f_s . Para a análise, será utilizado software Excel 2019 da Microsoft.

Cada valor de q_c e f_s foi retirado da profundidade exata em que se tinha a leitura de V_s , para cada ensaio, totalizando a análise dos 15 SCPTu da ARB10. Foi escolhido apenas os ensaios da ARB10 devido a quantidade de dados disponíveis.

4.10.5. Correlação entre q_c , f_s e N_{SPT} dos ensaios SCPTu e SPT da ARB10

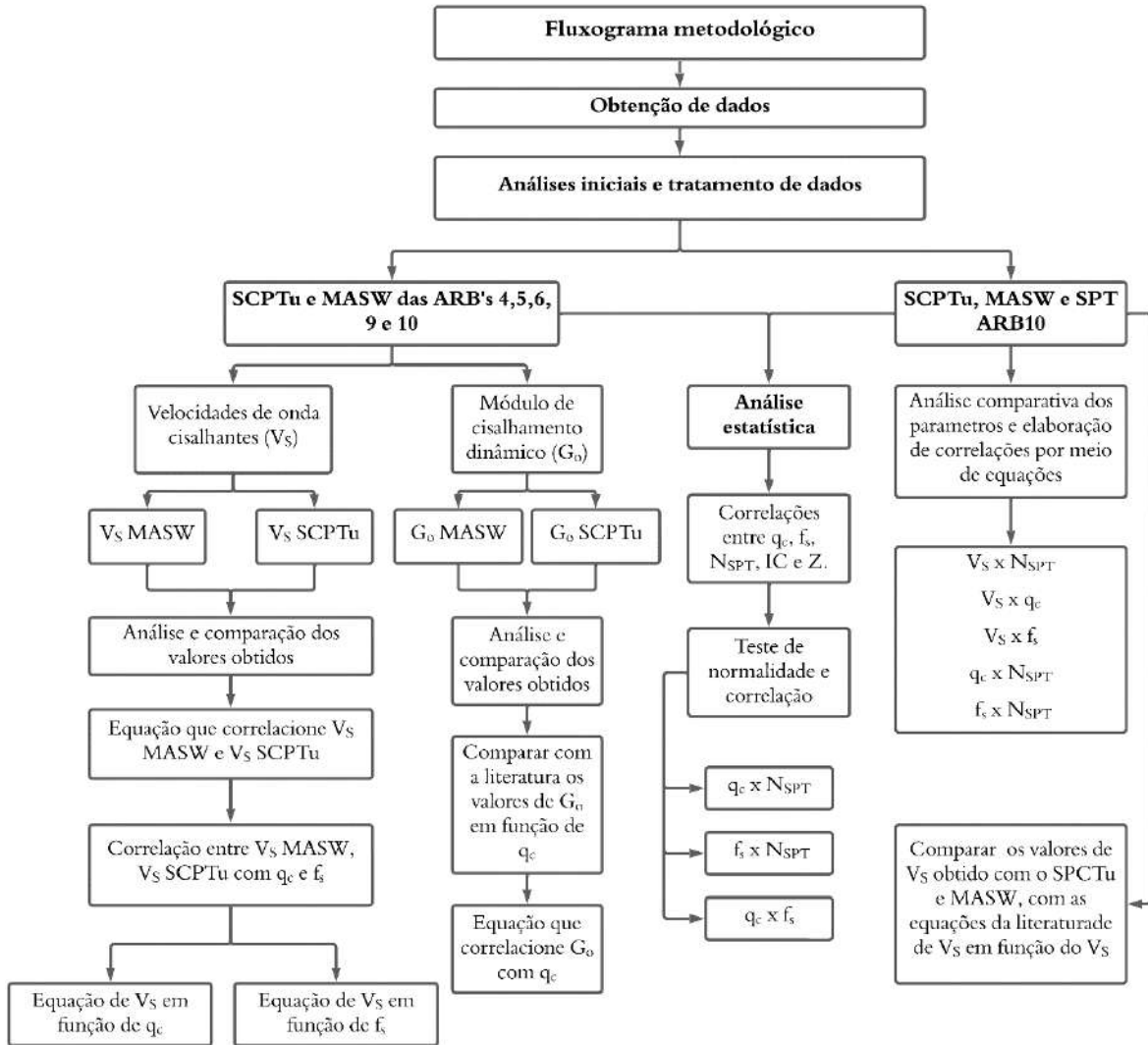
Na presente análise, serão empregados todos os conjuntos de dados obtidos por meio do SCPTu, visando à elaboração de um gráfico de dispersão que propicie a identificação de uma equação representativa do modelo em questão. Adicionalmente à referida equação, será calculado o coeficiente de determinação (R^2), o qual indicará a qualidade da correlação entre os parâmetros analisados. Dois conjuntos de dados distintos serão objeto de análise: q_c e N_{SPT} , bem como f_s e N_{SPT} . Para a condução desta análise, será utilizado o software Excel 2019 da Microsoft.

Cada valor correspondente a q_c e f_s foi associado à profundidade específica em que a leitura de N_{SPT} foi efetuada, ou seja, a cada metro em cada ensaio. Este procedimento resultou na análise de 19 ensaios SPT e 13 ensaios SCPTu, todos provenientes da ARB10. A seleção exclusiva destes ensaios da ARB10 foi realizada em virtude da disponibilidade robusta de dados para a análise em curso.

4.11. Fluxograma metodológico

No Fluxograma 1 está detalhado todas as análises realizadas na pesquisa, além dos resultados obtidos em cada etapa.

Fluxograma 1: Fluxograma metodológico da pesquisa.



5. RESULTADOS

5.1. Resultado das V_{S30} obtidas no MASW

Na Tabela 24 estão identificados todos os valores de velocidades de cisalhamentos V_{S30} (m/s) encontrados com o ensaio MASW para todos os pontos ensaiados.

Tabela 24: Resultado das V_{S30} obtidas no MASW.

Ponto	Velocidade (m/s)	Ponto	Velocidade (m/s)	Ponto	Velocidade (m/s)
P1	388,7	P23	405,5	P25	439,6
P2	383,4	P24	480,6	P26	382,9
P3	403,6	P25	439,6	P27	440,5
P4	440,8	P26	382,9	P28	382,1
P5	409,3	P27	440,5	P29	389,2
P6	450,3	P28	382,1	P30	428,9
P7	Sem resultados	P29	389,2	P41	389,6
P8	398,1	P30	428,9	P42	445,9
P9	391,5	P31	417,7	P43	436,9
P10	413,0	P32	486,9	P44	361,2
P11	365,5	P33	426,0	P45	377,0
P12	437,2	P34	465,2	P46	411,5
P13	456,1	P35	414,2	P47	391,1
P14	385,0	P36	405,9	P48	381,5
P15	420,7	P37	420,7	P49	361,2
P16	422,1	P38	411,9	P50	Cancelado
P17	435,6	P39	383,4	ARB1	308,0
P18	450,2	P40	426,9	ARB2	313,8
P19	370,9	P21	355,0	ARB3	304,2
P20	469,3	P22	384,5	ARB4	244,6
P21	355,0	P23	405,5	ARB5	227,3
P22	384,5	P24	480,6	ARB6	Cancelado
INTERFACE	261,6				

5.2. Resultado dos V_s pontual e G_o pontual

Nos itens a seguir serão apresentados todos os valores obtidos e calculados das 19 relações analisadas.

5.2.1. Exemplo de cálculo pontual da R1 - Relação 1

A relação R1, consiste na análise dos dados entre o ponto P25 do MASW e o SCPTu 02 da ARB4. A compilação dos dados pode ser vista na Tabela 25.

Tabela 25: Resultados compilados do SCPTu 02 da ARB4.

Resultados compilados do SCPTu 02			
Z (m)	V_S (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	425	307,8	1,70
5	409	307,3	1,84
8	353	238,1	1,91
11	330	200,4	1,84
14	396	334,2	2,13
17	381	301,0	2,07
Média	MV _{S3} = 382,5	G _{o5} = 281,5	ρ _{med} = 1,91

Os dados pontuais de V_S do ponto P25 do MASW, podem ser vistos na Tabela 26. Assim como os dados G_o's pontuais calculados para o P25, podem ser visualizados na Tabela 27.

Tabela 26: Resultado das V_S pontuais do P25 do MASW.

MA'SW P25	V_S (m/s)							MV_{S1}
	X (m)							
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	
2	350	350	350	350	350	275	350	339
5	350	350	350	350	350	350	350	350
8	350	400	450	450	350	450	350	400
11	350	350	450	450	350	400	400	393
14	350	350	350	350	350	350	450	364
17	450	450	400	400	450	500	550	457
Média	366,7	375,0	391,7	391,7	366,7	387,5	408,3	383,9
MV_{S2} = Média total pontual							383,9	
MV_{S4} = Média geral MASW							439,6	

Tabela 27: Resultado dos G_o 's pontuais do P25 do MASW.

MASW P25	G_o (MPa)							Média G_o	
	X (m)							$G_{o4} =$ Média G_o em Z	Pela média V_s
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	128,7	208,5	197,1	195,9
5	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4
8	234,0	305,6	386,8	386,8	234,0	386,8	234,0	309,7	305,6
11	224,9	224,9	371,8	371,8	224,9	293,8	293,8	286,6	283,4
14	260,7	260,7	260,7	260,7	260,7	260,7	431,0	285,0	282,4
17	419,2	419,2	331,3	331,3	419,2	517,6	626,3	437,7	432,7
Média	262,1	274,1	297,4	297,4	262,1	302,2	336,5	290,3	$G_{o2}=287,6$
$G_{o3} =$ Média G total pontual							282,2		
$G_{o6} =$ Média geral G pelo MASW							370,0		

O processo de obtenção de dados e cálculos para a Relação R1 foi replicado para as demais 18 relações. As tabelas com todos os dados estão disponíveis no APÊNDICE F.

5.3. Resumo dos dados de todas as relações (R1 a R19) de V_s e G_o

Na Tabela 28, é possível verificar todos os resultados obtidos e calculados para todas as relações.

Tabela 28: Resumo de dados de V_s e G_o obtidos e calculados para todas as relações.

Relação	V_s (m/s)			G_o (Mpa)				
	MV_{s2}	MV_{s3}	MV_{s4}	G_{o2}	G_{o3}	G_{o4}	G_{o5}	G_{o6}
R1	383,9	382,5	439,6	287,58	282,21	290,27	281,47	369,99
R2	289,3	449,8	382,9	171,39	167,25	172,81	433,12	293,01
R3	374,3	387,8	440,5	286,86	286,08	291,08	316,02	396,26
R4	418,5	472,9	450,2	339,47	332,99	334,62	426,98	385,43
R5	451,8	388,9	469,3	428,93	391,38	427,29	310,86	422,31
R6	392,1	407,6	384,5	321,21	305,89	320,65	425,72	294,08
R7	339,3	363,3	405,5	285,78	283,18	284,33	291,83	404,50
R8	416,7	440,2	480,6	334,61	340,48	333,23	388,26	452,98
R9	391,1	206,0	456,1	288,71	285,02	287,53	83,32	387,68
R10	349,3	330,8	420,7	241,93	232,44	239,24	213,29	337,20
R11	391,4	340,5	436,9	294,91	284,66	294,29	218,93	354,63

Continuação da Tabela 28.

R12	420,0	384,5	440,8	320,54	305,17	317,82	312,06	336,15
R13	361,8	321,9	398,1	234,06	226,51	230,65	202,59	274,18
R14	388,0	379,2	391,1	266,38	260,44	262,61	271,59	264,62
R15	388,0	365,4	391,1	266,38	260,44	262,61	258,74	264,62
R16	316,1	417,9	388,7	179,26	172,83	177,56	164,25	261,38
R17	317,0	324,0	383,4	175,33	173,81	177,67	183,25	254,30
R18	340,7	306,5	403,6	203,84	200,83	208,90	303,68	281,80
R19	344,3	383,4	361,2	208,58	205,06	211,25	440,12	225,71

Onde:

MV_{S2} = Média total pontual com os dados MASW;

MV_{S3} = Média SCPTu's;

MV_{S4} = Média geral MASW (V_{S30});

G_{02} = Média G_o pela média V_s ;

G_{03} = Média G total pontual;

G_{04} = Média G_o em Z;

G_{05} = Média geral pelo SCPTu;

G_{06} = Média geral G_o pelo MASW.

5.4. Análise dos resultados de V_s e G_o

5.4.1. Análise de $MV_{S4} - V_{S30}$ do MASW

Com base nas análises realizadas nos solos de fundação e ao longo dos diques das barragens, observou-se que a menor velocidade de onda cisalhante para os 30 metros de profundidade analisado foi de 355 m/s, exatamente no ponto P21, enquanto a maior velocidade foi de 486,9 m/s no ponto P32.

De acordo com Mari (2019) os materiais possuem diferentes velocidades de onda cisalhantes, conforme evidenciado na Tabela 5. Os materiais analisados possuem um comportamento variando entre: areia seca (100 a 500m/s); areia úmida (400-1200m/s) e/ou argila (200-800m/s). Quando comparado com a Tabela 6 de Foti et al. (2017), o comportamento varia entre uma argila dura (200-600m/s) e uma areia compacta (200-500m/s).

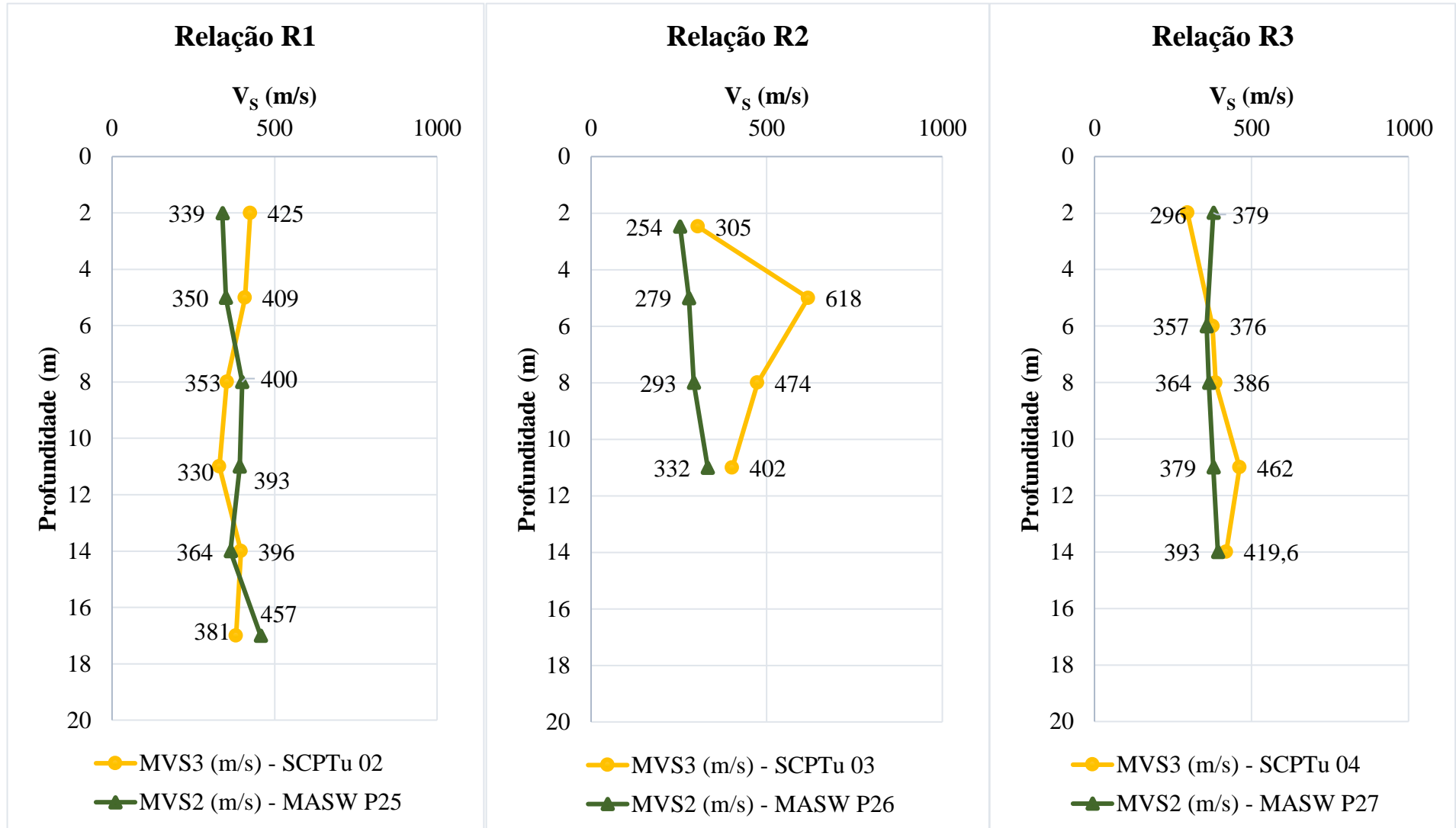
Já nos ensaios realizados sobre os resíduos de bauxita, identificou-se velocidades variando de 227,3 m/s a 313,8 m/s. As ARB1, ARB2 e ARB3, possuem velocidades acima de 300 m/s, enquanto as demais, ARB4, ARB5, e Interface, ficaram abaixo desse valor. Tomando como base a Tabela 5 e Tabela 6, o comportamento fica entre as variações de velocidade citadas para os pontos dos diques e dos solos de fundação, excetuando-se pela condição de areia úmida.

Um aspecto relevante para a interpretação desses resultados é que o menor valor de velocidade de onda cisalhante nos resíduos foi identificado na ARB5, barragem que foi descaracterizada recentemente entre as analisadas. A descaracterização de barragem é o processo de desativação ou remoção de uma barragem para reduzir riscos ou mitigar impactos ambientais e sociais. Esse fato pode estar relacionado ao tempo de deposição dos resíduos de bauxita na barragem, indicando a influência temporal na resposta geotécnica desses materiais.

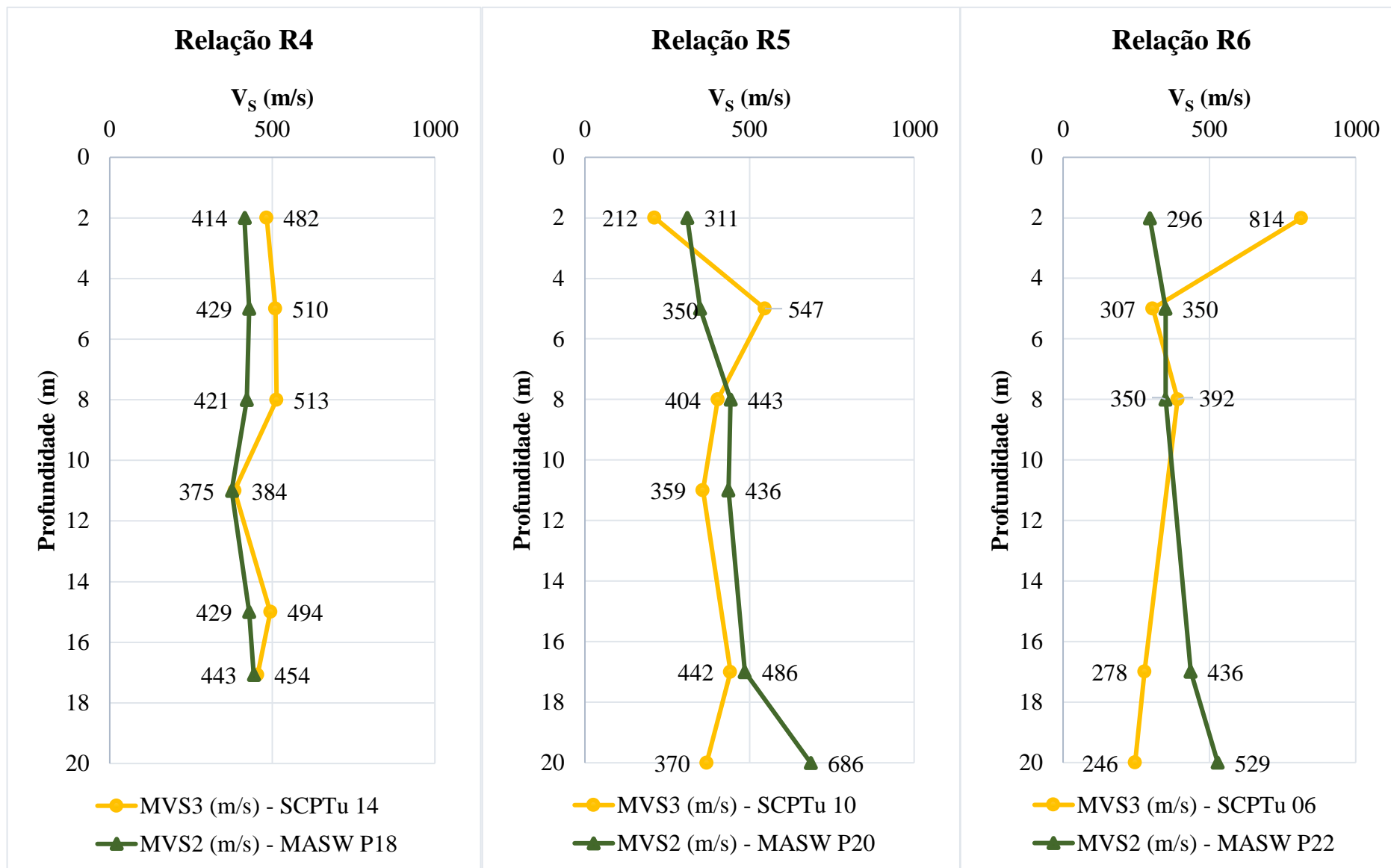
5.4.2. Gráficos de MV_{S2} x MV_{S3}

A seguir, serão apresentados os gráficos de todas as relações estudadas, comparando as velocidades MV_{S2} e MV_{S3} . Ao todo serão 20 relações, pois decidiu-se plotar as relações R14 e R15 em outro gráfico, tendo em vista a proximidade dos dois pontos e a base de comparação é o mesmo MASW, o P47. Não foi possível traçar os valores de MV_{S4} , pois esses dados representam a média de um perfil 2D, fornecida integralmente com os resultados do ensaio.

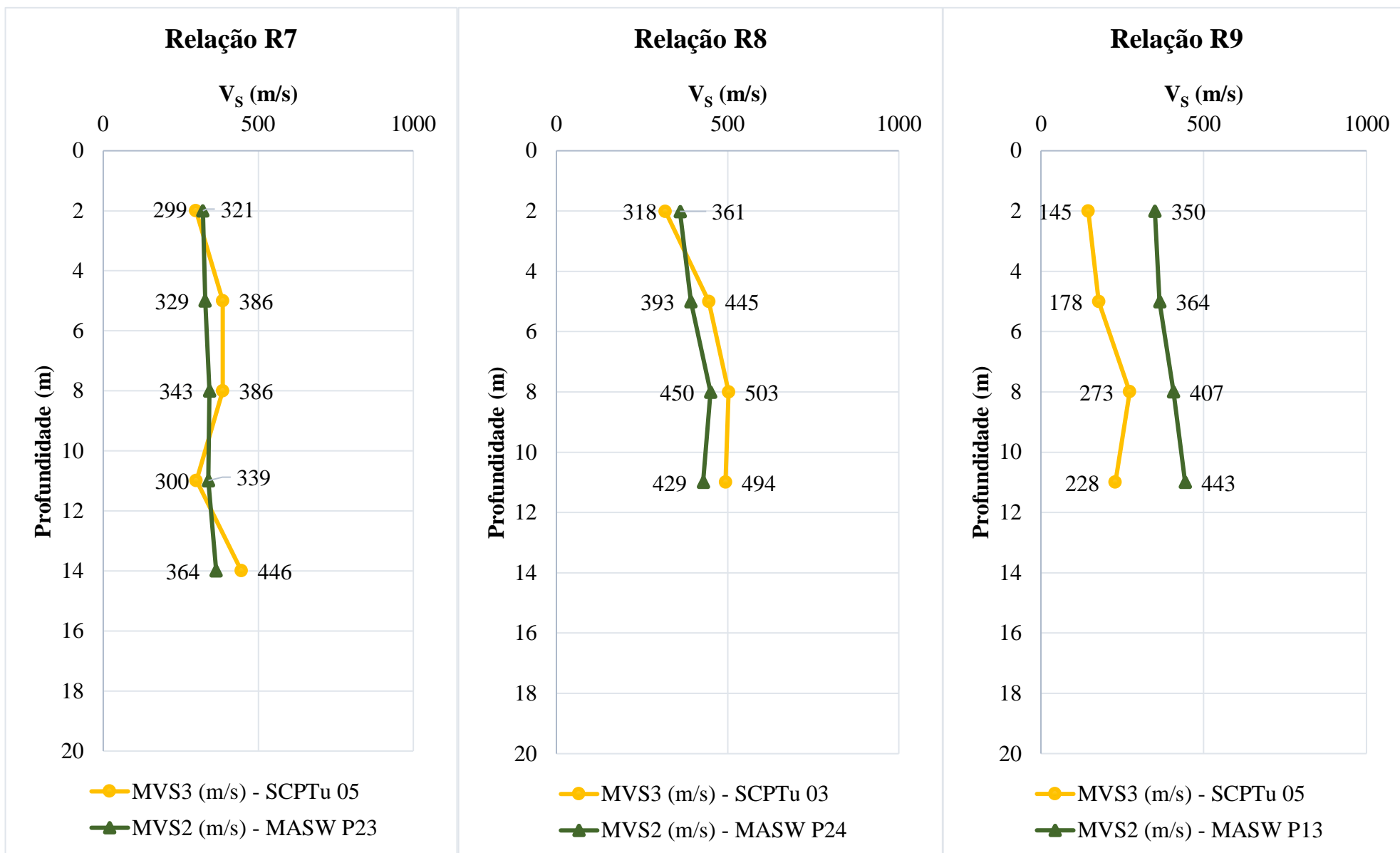
Gráficos de comportamento das velocidades MV_{S2} e MV_{S3} das relações, R1, R2 e R3.



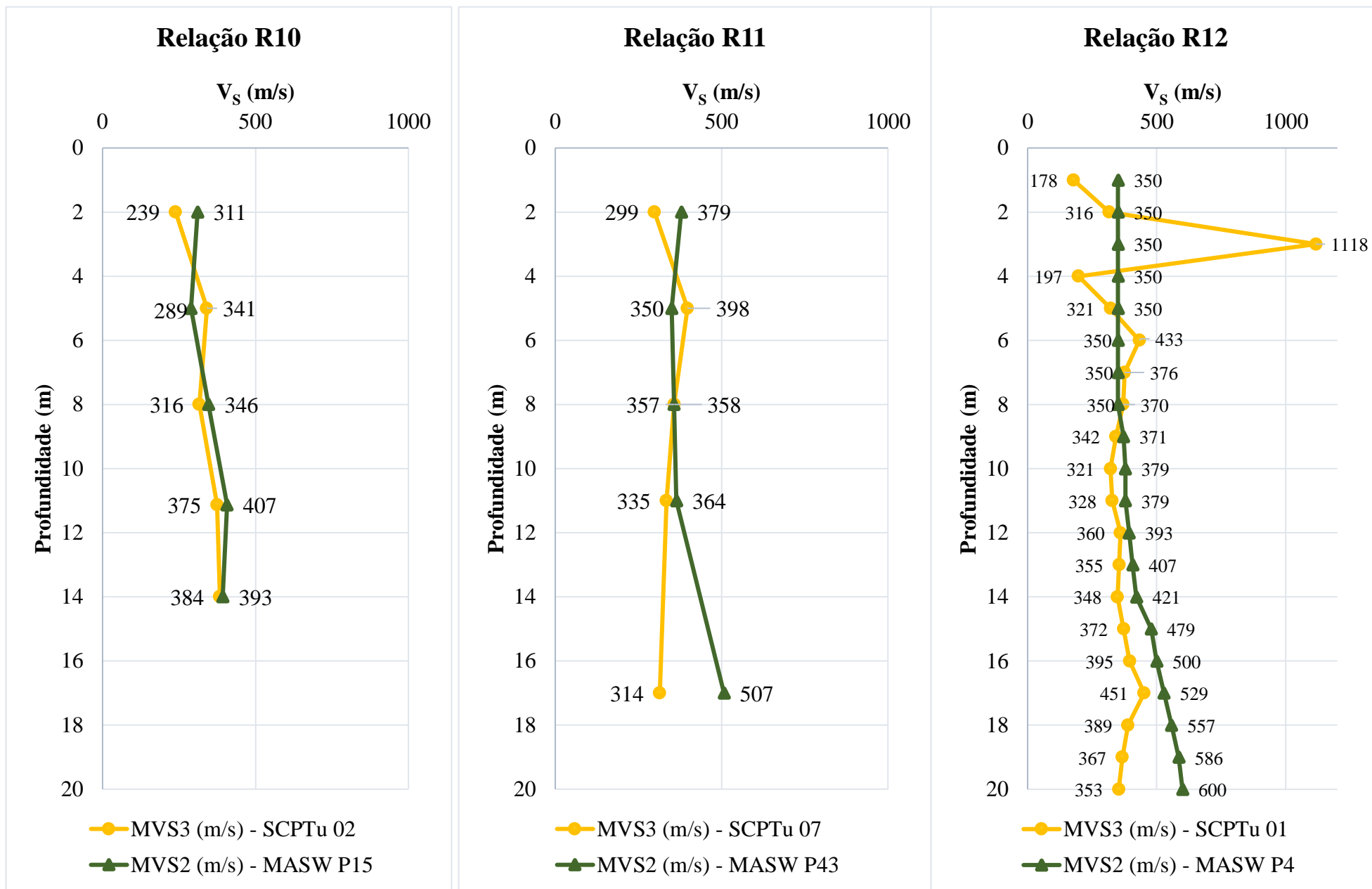
Gráficos de comportamento das velocidades MV_{S2} e MV_{S3} das relações, R4, R5 e R6.



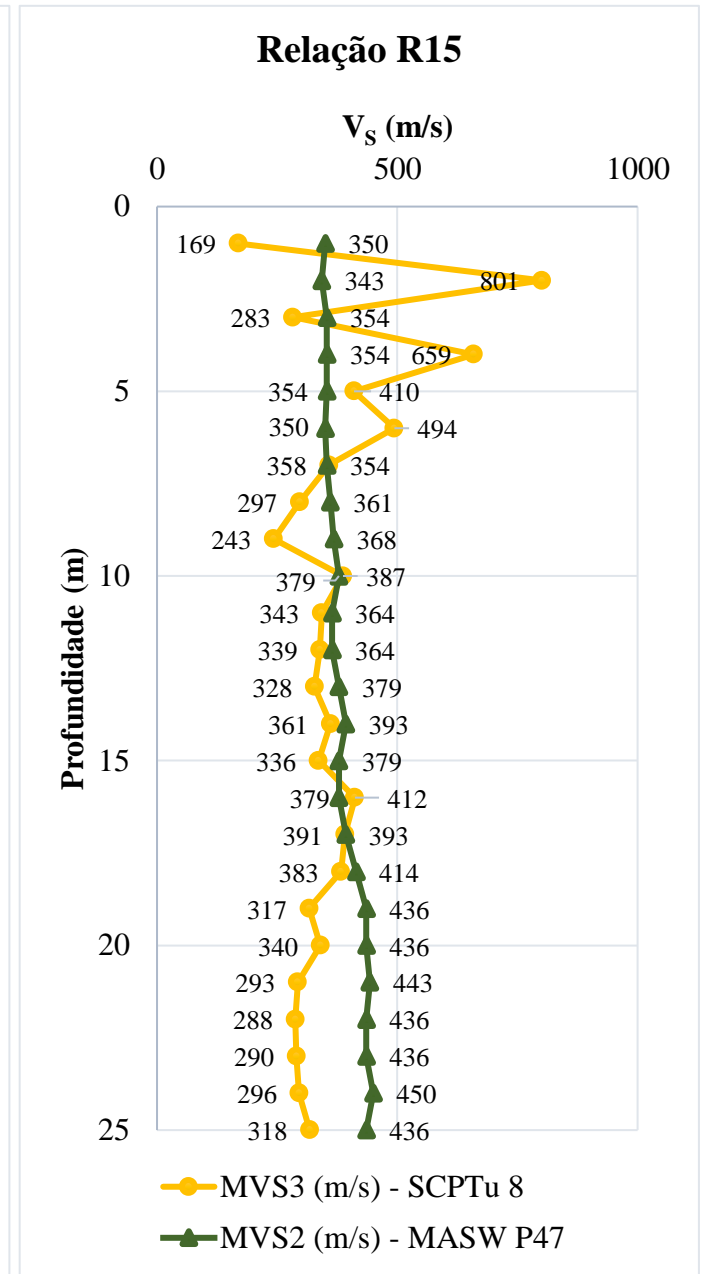
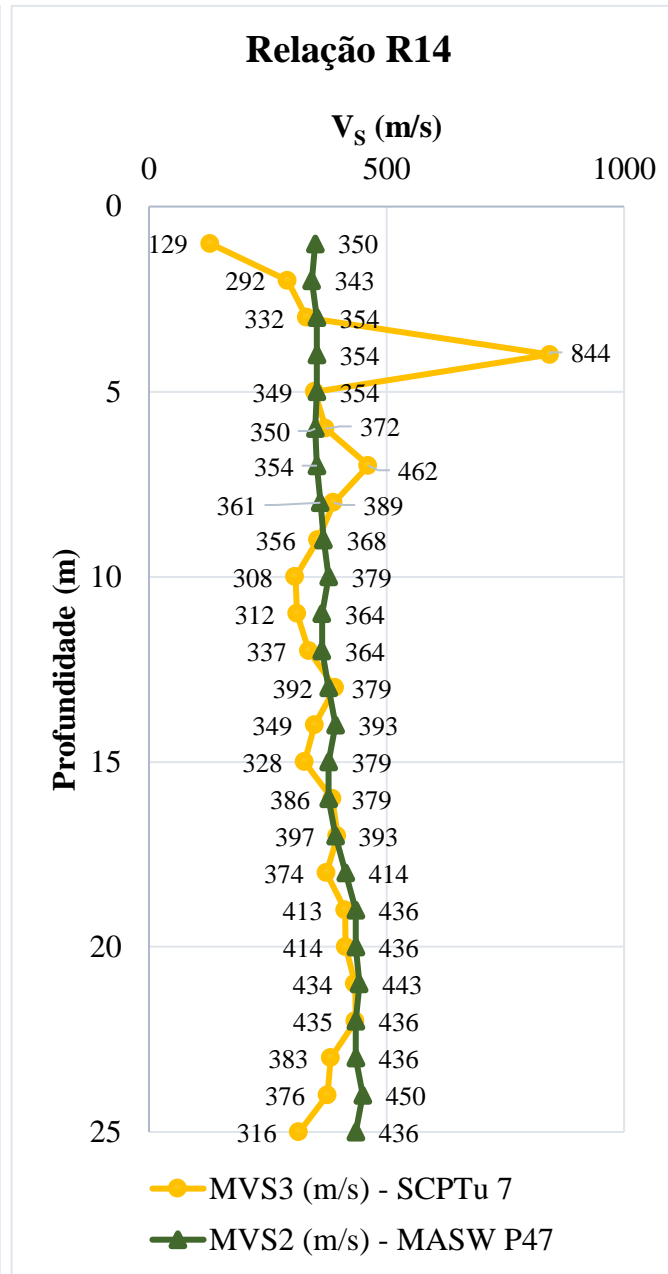
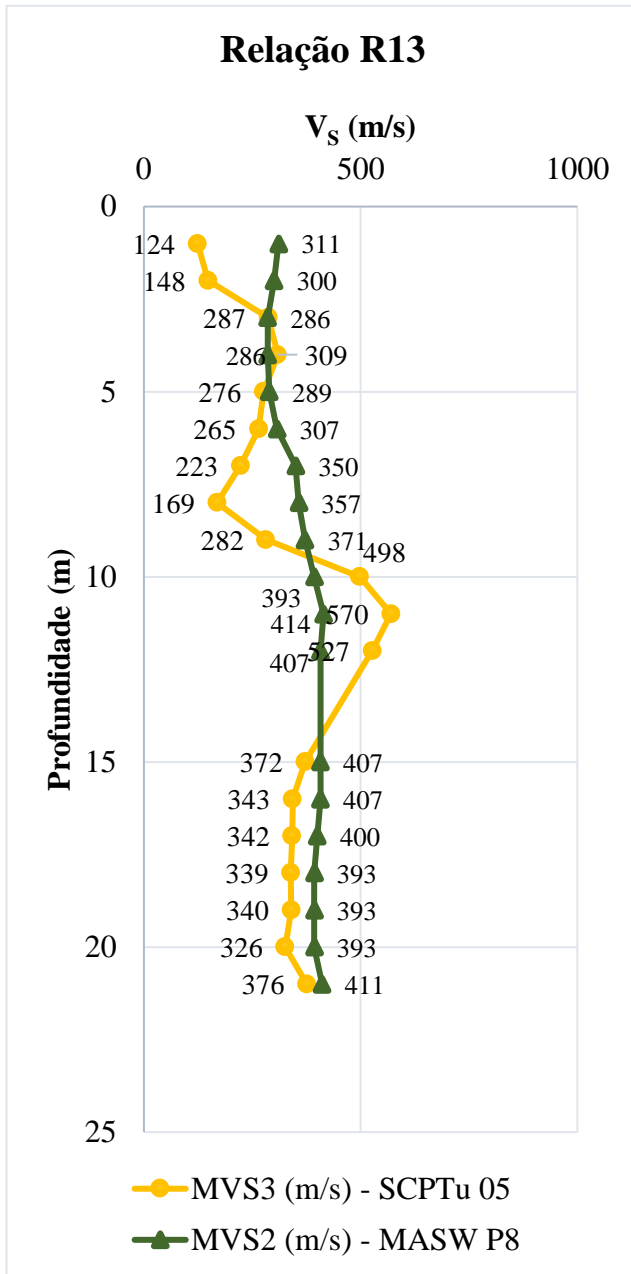
Gráficos de comportamento das velocidades MV_{S2} e MV_{S3} das relações, R7, R8 e R9.

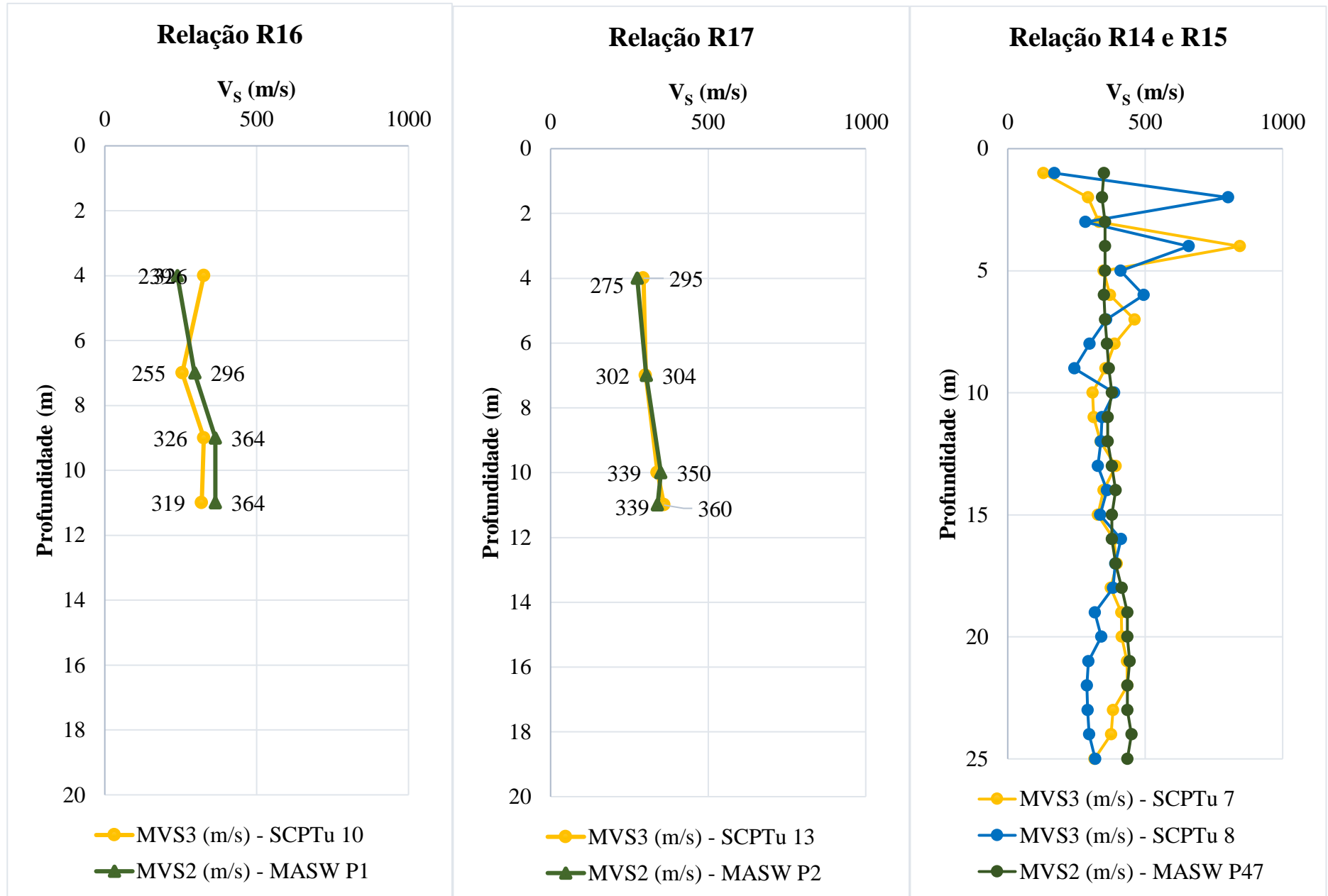


Gráficos de comportamento das velocidades MV_{S2} e MV_{S3} das relações, R10, R11 e R12.

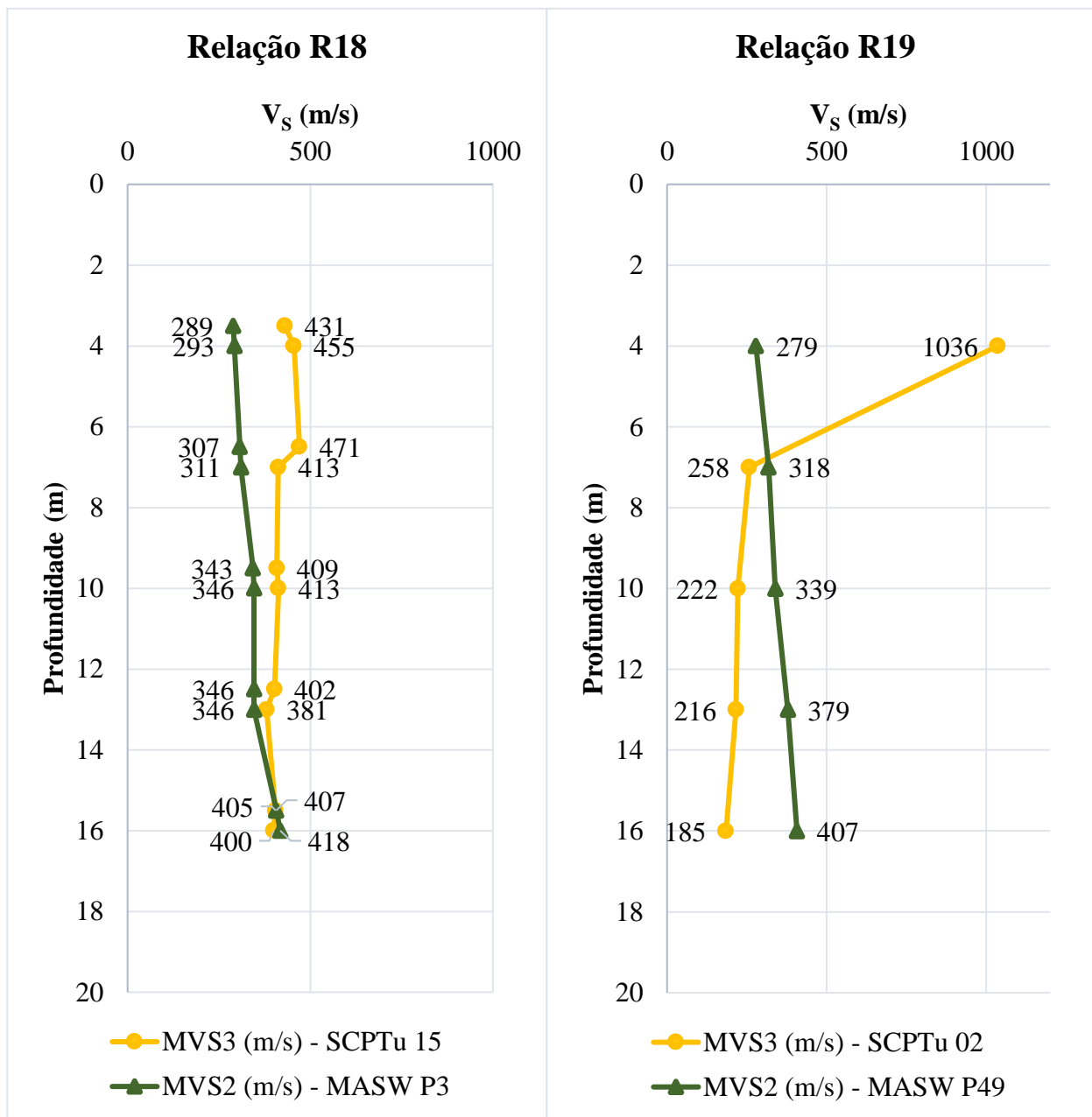


Gráficos de comportamento das velocidades MV_{S2} e MV_{S3} das relações, R13, R14 e R15.





Gráficos de comportamento das velocidades MV_{S2} e MV_{S3} das relações, R18 e R19.



No geral, obteve-se um comportamento convergente de dados em praticamente todas as relações. Alguns gráficos com o das relações, R19, R12, R6, e R2, apresentaram medidas pontuais discrepantes das demais medidas, podendo ser indícios de falhas de leitura, ou alteração brusca de tipo de solo. O comportamento do ensaio MASW não apresenta variações bruscas ao longo do perfil analisado. Os SCPTu's por serem ensaios pontuais, tem variações mais abruptas em alguns pontos.

Na maioria dos ensaios SCPTu's, observou-se uma diminuição da velocidade nos metros finais analisados, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R8, R11, R12, R14, R16 e R19. Já no MASW, as diminuições nos metros finais só foram observadas em R8, R10 e R17. Essas diferenças podem ser decorrentes de interferências nos dados obtidos por meio do ensaio SCPTu, decorrente do aumento da profundidade ou até da sensibilidade dos instrumentos utilizados. A diminuição das velocidades de onda cisalhante, pode ser decorrente também da diminuição da taxa de aumento da V_s em função da profundidade, debatida por Braz (2022) e Rocha (2018), que pode ser entendido com uma breve redução nas velocidades, seguidas de aumento de V_s , a partir daquele ponto, no entanto, só é possível garantir tal hipótese tomando como base o ensaio MASW ou realizando um novo ensaio SCPTu no local. Apesar desse comportamento, os resultados foram relevantes, indicando boa concordância entre os dados. Para efeitos de comparação, serão analisadas duas faixas de variação, 10 e 20%.

5.4.3. Comparativo entre as MV_s 's

Comparativo entre MV_{s2} e MV_{s3}

A Tabela 29 proporciona uma análise comparativa entre as velocidades de ondas cisalhantes (MV_{s2} e MV_{s3}) em 19 relações distintas. Essa comparação, que engloba as médias MV_{s3} obtidas por SCPTu's e as médias MV_{s2} obtidas pela média pontual do método MASW, destaca variações significativas em diferentes pontos de interesse.

Tabela 29: Comparativo entre MV_{S2} e MV_{S3} (m/s)

Comparativo entre MV_{S2} e MV_{S3} (m/s)				
Relação	MV_{S2} = Média total pontual	MV_{S3}=Média SCPTu's	Diferença	Variação
R1	383,9	382,5	0,38%	<10%
R2	289,3	449,8	55,49%	-
R3	374,3	387,8	3,62%	<10%
R4	418,5	472,9	13,01%	<20%
R5	451,8	388,9	13,91%	<20%
R6	392,1	407,6	3,93%	<10%
R7	339,3	363,3	7,09%	<10%
R8	416,7	440,2	5,64%	<10%
R9	391,1	206,0	47,32%	-
R10	349,3	330,8	5,28%	<10%
R11	391,4	340,5	13,02%	<20%
R12	420,0	384,5	8,45%	<10%
R13	361,8	321,9	11,04%	<20%
R14	388,0	379,2	2,28%	<10%
R15	388,0	365,4	5,81%	<10%
R16	316,1	417,9	32,23%	-
R17	317,0	324,0	2,22%	<10%
R18	340,7	306,5	10,04%	<20%
R19	344,3	383,4	11,36%	<20%

Os resultados apresentam uma análise comparativa entre as velocidades de ondas cisalhantes (MV_{S2} e MV_{S3}), destacando discrepâncias significativas em algumas relações. Os principais pontos de observação incluem:

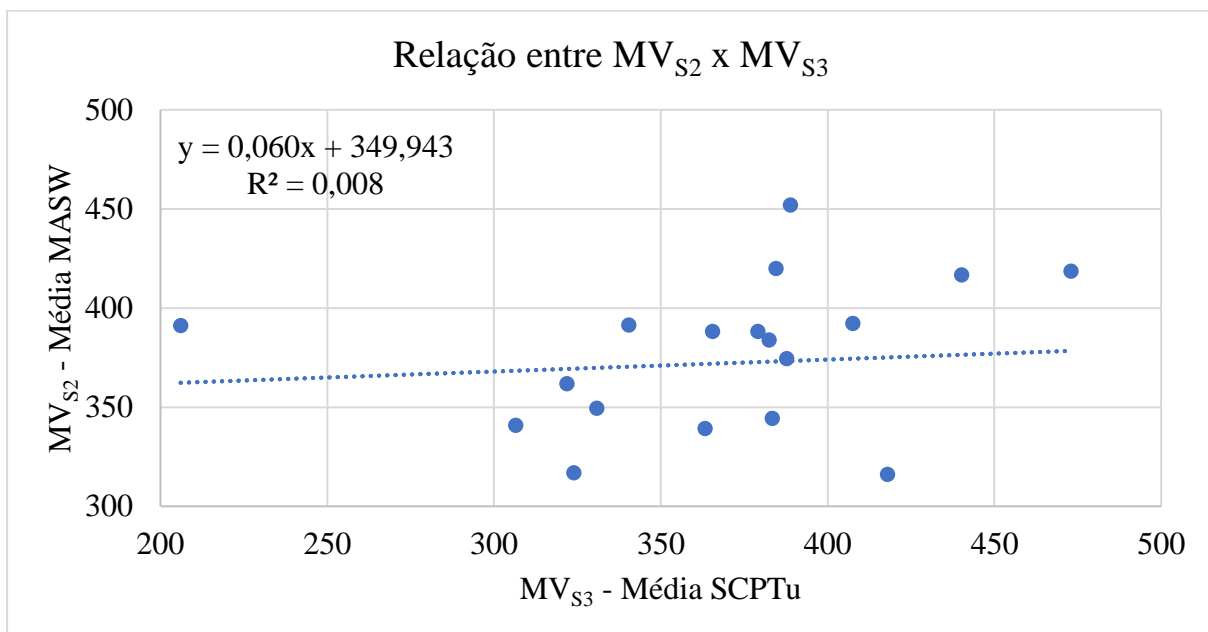
- Relações com Variação Inferior a 10% ou 20% (R1, R3, R6, R7, R8, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R17, R18, R19):
 - Indicam consistência entre as médias pontuais e aquelas derivadas dos perfis SCPTu's, sugerindo uma concordância entre diferentes abordagens de medição.
- Relações com Variação Significativa (R2, R5, R16):
 - Apresentam variação superior a 20%, indicando possíveis disparidades na interpretação ou nas condições do solo. Esses casos demandam uma análise mais aprofundada para compreender as razões por trás das diferenças.
- Relações com Variação Moderada (R4, R9):

- Mesmo com diferença significativa, a variação está dentro da faixa de 10-20%, sugerindo uma certa consistência nas medições.

Ao realizar uma análise global das 19 relações, 16 apresentam resultados com variação menor que 20%, onde 10 apresentam variação inferior a 10%, e 6 estão na faixa de 10-20%. Isso sugere uma concordância razoável entre as médias, destacando a necessidade de uma investigação mais aprofundada nos casos com variações mais expressivas, sendo necessário comparar com os resultados provenientes de outros ensaios de campo e laboratório.

O Gráfico 1 mostra a dispersão dos dados nas 19 relações analisadas entre as velocidades MV_{S2} e MV_{S3} .

Gráfico 1: Comparativo de dispersão das 19 relações entre MV_{S2} e MV_{S3} .



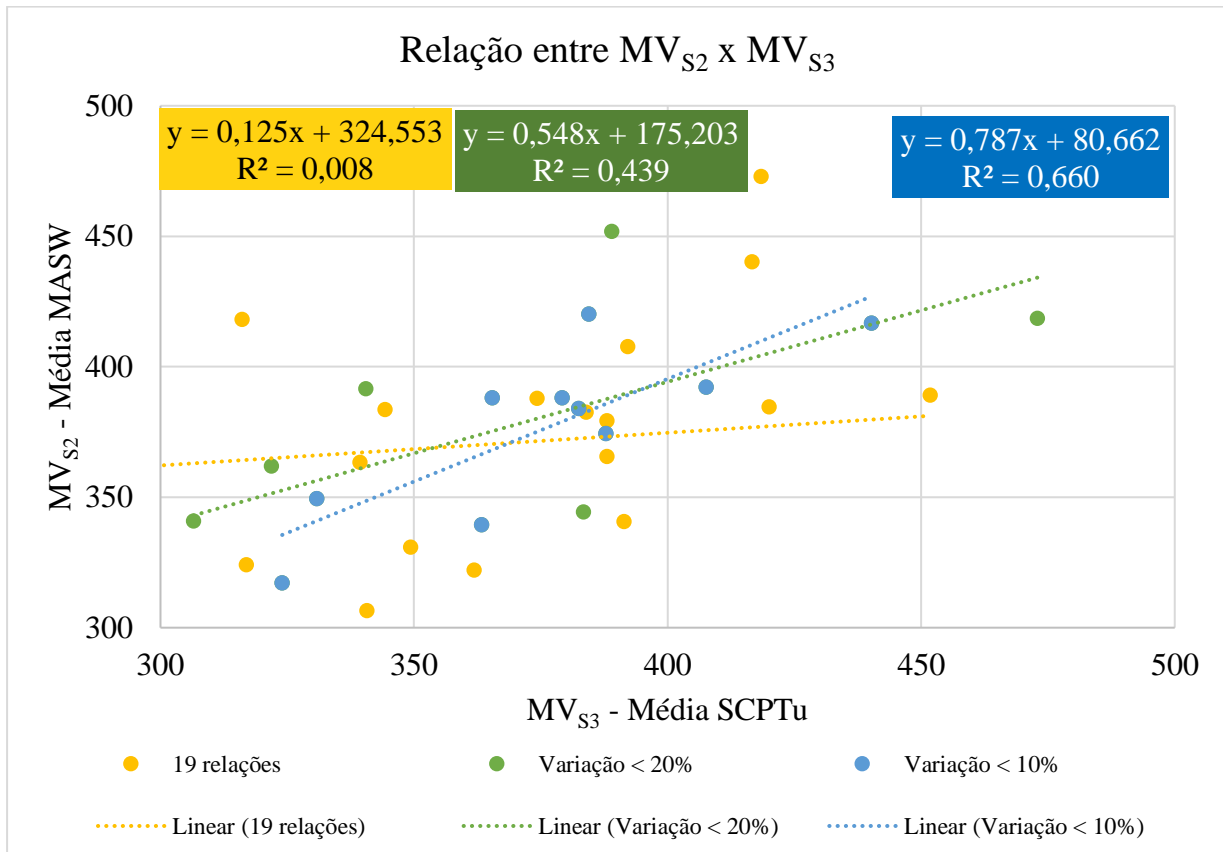
O valor de R^2 encontrado nessa dispersão foi de 0,008. Ao comparar com os dados da Tabela 30, para o número de observações e um nível de significância de 95%, o valor de referência para considerar que a relação é aceitável, seria de 0,456. Logo, essa relação encontrada não está aceitável.

Tabela 30: Valores críticos para o controle de correlação (R^2), para níveis de significância ($1 - \alpha$) e N observações. (Chasse e Brown, 1992).

N	$\alpha = 5\%$	$\alpha = 1\%$	N	$\alpha = 5\%$	$\alpha = 1\%$
4	0,95	0,999	20	0,444	0,561
6	0,811	0,917	24	0,404	0,515
7	0,754	0,875	26	0,388	0,496
8	0,707	0,834	28	0,374	0,479
9	0,666	0,798	29	0,368	0,47
10	0,632	0,765	30	0,361	0,463
11	0,602	0,735	40	0,312	0,402
12	0,576	0,708	50	0,279	0,361
13	0,553	0,684	60	0,254	0,33
14	0,532	0,661	90	0,205	0,239
15	0,514	0,641	100	0,196	0,256
16	0,497	0,623	250	0,124	0,163
17	0,482	0,606	500	0,088	0,115
18	0,456	0,575	1000	0,062	0,081
19	0,456	0,575			

Tendo em vista o baixo valor de R^2 obtido com as 19 relações comparadas, plotou-se novamente em um gráfico de dispersão (Gráfico 2) os valores obtidos na Tabela 29 que obtiveram variações menores que 20 e 10%, de modo a reanalisar o R^2 obtido.

Gráfico 2: Comparativo de dispersão das relações com variação menor que 10 e 20% entre MV_{S2} e MV_{S3} .



Das 19 relações analisadas, 16 apresentaram variações inferiores a 20%, enquanto 10 mostraram variações abaixo de 10%. Os valores de R^2 obtidos foram de 0,439 para variações de até 20% e 0,660 para variações de até 10%. Em comparação, os valores de referência estabelecidos por Chasse e Brown (1992) para 16 e 10 observações são de 0,497 e 0,632, respectivamente. Notavelmente, apenas as relações com variações inferiores a 10% excederam os valores mínimos de R^2 estabelecidos por esses autores.

Comparativo entre MV_{S3} e MV_{S4}

A Tabela 31 proporciona uma análise comparativa entre as velocidades de ondas cisalhantes (MV_{S3} e MV_{S4}) em 19 relações distintas. Essa comparação, que engloba médias obtidas por SCPTu's (MV_{S3}) e pela média geral do método MASW (MV_{S4}), destaca variações significativas em diferentes pontos de interesse.

Tabela 31: Comparativo entre MV_{S3} e MV_{S4} (m/s).

Comparativo entre MV_{S3} e MV_{S4} (m/s)				
Relação	MV_{S3}=Média SCPTu's	MV_{S4} = Média geral MASW	Diferença	Variação
R1	382,5	439,6	14,93%	<20%
R2	449,8	382,9	14,87%	<20%
R3	387,8	440,5	13,58%	<20%
R4	472,9	450,2	4,80%	<10%
R5	388,9	469,3	20,66%	-
R6	407,6	384,5	5,66%	<10%
R7	363,3	405,5	11,60%	<20%
R8	440,2	480,6	9,19%	<10%
R9	206,0	456,1	121,37%	-
R10	330,8	420,7	27,16%	-
R11	340,5	436,9	28,32%	-
R12	384,5	440,8	14,64%	<20%
R13	321,9	398,1	23,67%	-
R14	379,2	391,1	3,15%	<10%
R15	365,4	391,1	7,02%	<10%
R16	417,9	388,7	7,00%	<10%
R17	324,0	383,4	18,33%	<20%
R18	306,5	403,6	31,68%	-
R19	383,4	361,2	5,79%	<10%

A análise comparativa entre as velocidades de ondas cisalhantes, representadas por MV_{S3} e MV_{S4} , revela nuances importantes em diferentes relações. Abordemos os aspectos fundamentais destacados por esses resultados:

- Relações com Variação Inferior a 10% ou 20% (R1, R3, R6, R8, R12, R14, R15, R16, R19):
 - Nestas instâncias, a variação entre MV_{S3} e MV_{S4} permanece abaixo de 10% ou 20%, denotando uma notável concordância entre as médias derivadas dos perfis SCPTu's e do método MASW. Este alinhamento robusto sugere uma coerência confiável entre as distintas abordagens de medição.
- Relações com Variação Significativa (R2, R5, R7, R9, R10, R11, R13, R17, R18):
 - Nestas relações, observa-se variações significativas, ultrapassando os 20%. Tal cenário aponta para possíveis disparidades na interpretação ou nas condições do

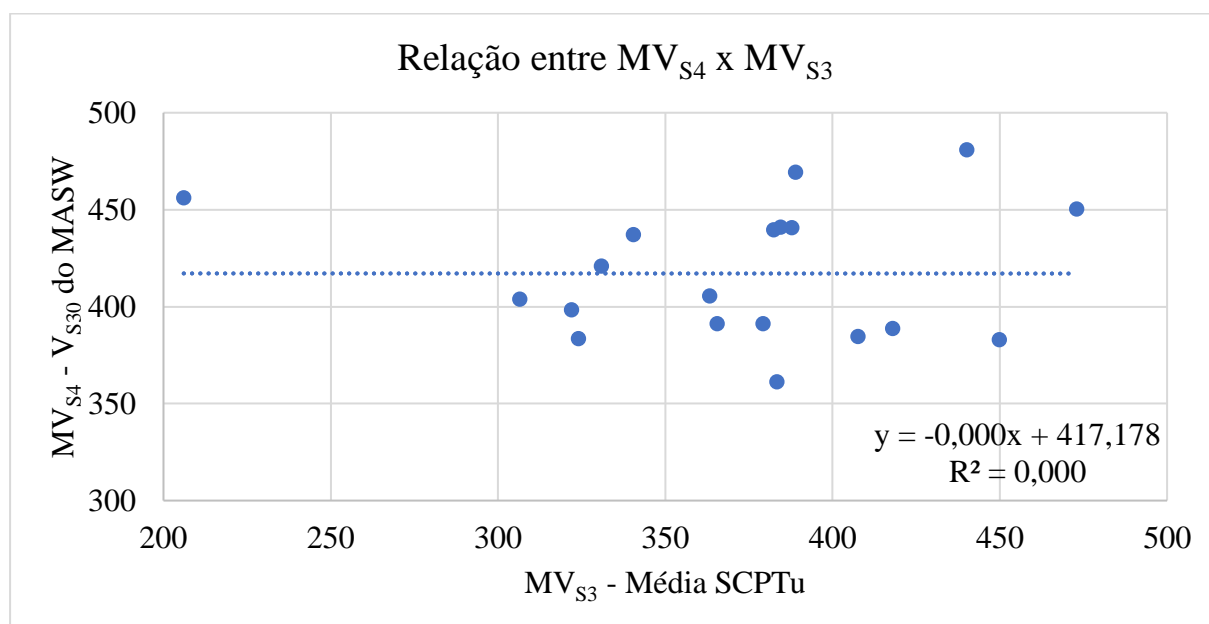
solo, demandando uma análise mais pormenorizada para compreender as razões subjacentes a tais divergências.

- Relação com Variação Moderada (R4):
 - Nota-se uma variação moderada, situada dentro da faixa de 10-20%, entre MV_{S3} e MV_{S4} . Este cenário sugere uma consistência aceitável nas medições, merecendo atenção para uma avaliação mais detalhada.

Do conjunto de 19 relações, 7 apresentam variação inferior a 10%, ao passo que 13 situam-se na faixa de 10-20%. Este panorama indica uma concordância razoável entre as médias, realçando, contudo, a importância de uma investigação aprofundada nos casos de variação mais expressiva.

O Gráfico 3 mostra a dispersão dos dados nas 19 relações analisadas entre as velocidades MV_{S4} e MV_{S3} .

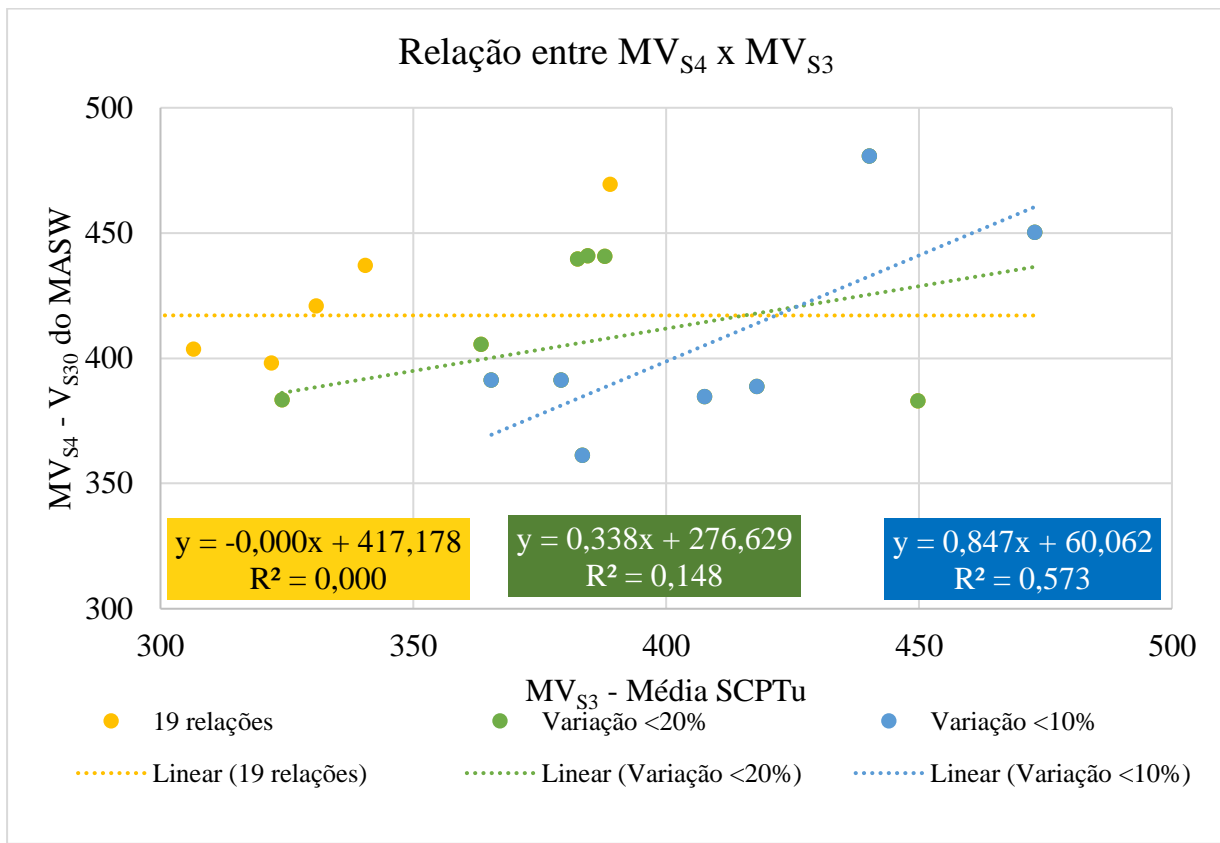
Gráfico 3: Comparativo de dispersão das 19 relações entre MV_{S4} e MV_{S3} .



O valor de R^2 encontrado nessa dispersão foi de 0,000. Ao comparar com os dados da Tabela 30, para o número de observações e um nível de significância de 95%, o valor de referência para considerar que a relação é aceitável, seria de 0,456. Logo, essa relação encontrada não está aceitável.

Tendo em vista o baixo valor de R^2 obtido com as 19 relações comparadas, plotou-se novamente em um gráfico de dispersão (Gráfico 4) apenas com os valores obtidos na Tabela 31 que obtiveram variações menores que 20 e 10%, de modo a reanalisar o R^2 obtido.

Gráfico 4: Comparativo de dispersão das relações com variação menor que 10 e 20% entre MV_{S4} e MV_{S3} .



Das 19 relações analisadas, 13 apresentaram variações inferiores a 20%, enquanto 7 mostraram variações abaixo de 10%. Os valores de R^2 obtidos foram de 0,148 para variações de até 20% e 0,573 para variações de até 10%. Em comparação, os valores de referência estabelecidos por Chasse e Brown (1992) para 13 e 7 observações são de 0,553 e 0,754, respectivamente. Nessa análise, apesar da melhora nos índices de R^2 , nenhum dos dois casos superou o valor mínimo de R^2 recomendado.

5.4.4. Considerações sobre os comparativos das MV_S 's

A análise criteriosa entre as variáveis MV_{S2} e MV_{S3} , bem como MV_{S3} e MV_{S4} , foi importante na análise do comportamento dos solos em relação às velocidades de onda cisalhantes dos materiais e a obtenção dos dados por cada ensaio.

Ao comparar MV_{S2} e MV_{S3} em 19 relações, observou-se que em 10 delas a variação foi inferior a 10%, indicando uma consistência significativa entre essas médias. Das 9 relações restantes, 6 apresentaram uma variação entre 10% e 20%, evidenciando uma concordância razoável, embora com algumas variações moderadas. Destaca-se a robustez da correlação entre

MV_{S2} e MV_{S3} , ressaltando que variações moderadas podem ser resultado de condições geotécnicas específicas em cada local.

Na comparação entre MV_{S3} e MV_{S4} , em 19 relações, 7 apresentaram variação inferior a 10%, indicando consistência significativa. Nas 12 relações restantes, a variação de 6 deles esteve entre 10% e 20%, revelando concordância considerável, com algumas variações moderadas. A análise destaca a correlação geral entre MV_{S3} e MV_{S4} , ressaltando que variações moderadas podem decorrer de diferentes métodos de medição e interpretações geotécnicas.

Tais variações podem ser decorrentes de alguns fatores como, diferença no tipo de solo, tendo em vista que alguns ensaios não foram feitos exatamente sobre o mesmo ponto, podendo gerar variações. As relações foram definidas de acordo com as proximidades, contudo, alguns ensaios possuem variações de até 200 m da realização do SCPTu com o MASW, fator que pode ser crucial nessas variações. Contudo, no geral, foi possível visualizar uma convergência de valores na maioria dos resultados.

É relevante salientar um fator adicional na análise, conforme evidenciado no APÊNDICE B: as médias gerais do método MASW (MV_{S4}) frequentemente examinaram o solo em profundidades superiores às consideradas pelo SCPTu. Esse aspecto contribuiu para a observação de valores mais elevados de velocidade de ondas cisalhantes (V_S) na maioria dos resultados obtidos com o MASW.

A predominância de análises em profundidades mais acentuadas pelo MASW está associada à característica intrínseca de obter V_S superiores em solos mais profundos, devido à maior densidade e compactação do material nesses estratos. Essa diferença na abordagem de profundidade destaca a necessidade de considerar esse aspecto ao interpretar e comparar resultados entre os métodos. A variação nos pontos de análise enfatiza a complexidade geotécnica e a importância de uma avaliação cautelosa ao correlacionar informações provenientes do SCPTu e do método MASW. Em suma, ambas as comparações, MV_{S2} x MV_{S3} e MV_{S3} x MV_{S4} , demonstraram consistência nas relações geotécnicas estudadas.

Não há uma clara superioridade de uma sobre a outra, pois ambas fornecem resultados alinhados na maioria dos casos., apesar de serem resultados obtidos em condições diferentes de profundidade analisada. Contudo, nos testes entre as velocidades MV_{S2} x MV_{S3} , verificou-se a existência de um maior número de relações com menor variação, sendo necessário uma análise mais aprofundada dessa relação.

A análise dessa relação é necessária, tendo em vista que, por serem dados obtidos da mesma profundidade, permitem analisar melhor o comportamento do solo. A relação MV_{S4} , embora muito próxima das demais, foi obtida com uma análise maior de camadas (30 metros de profundidade), podendo gerar inconsistências durante a análise de comportamento, quando comparadas a velocidades obtidas em um número menor de camadas.

Conforme mencionado por Braz (2022) e Rocha (2018), observou-se um aumento nas velocidades cisalhantes com o aumento da profundidade das camadas, acompanhado por uma redução na taxa de acréscimo de velocidade a partir de certas profundidades. Não foi realizada a extrapolação dos dados obtidos no SCPTu para estimar a velocidade V_{S30} , devido às variações identificadas nos dados iniciais, que poderiam resultar em estimativas imprecisas. A plotagem dos dados em gráficos foi empregada para facilitar a compreensão do comportamento do solo em cada ensaio.

Na Tabela 32, está representado todos os valores obtidos de R^2 para as 6 análises realizadas, além de mostrar os valores de referência do número de observações.

Tabela 32: Resultados dos R^2 das análises de V_s .

Relação estudada	Dados analisados	N (número de observações)	R^2 de referência (Chasse e Brown, 1992)	R^2 calculado
MV_{S2} x MV_{S3}	Todos	19	0,456	0,0015
	Var. < 20%	16	0,497	0,439
	Var. < 10%	10	0,632	0,6607
MV_{S4} x MV_{S3}	Todos	19	0,456	0,000
	Var. < 20%	13	0,553	0,148
	Var. < 10%	7	0,754	0,573

Var. = Variação.

Diante dos dados obtidos e calculados, apenas a relação com variações menores que 10% entre os dados de MV_{S2} e MV_{S3} , obtiveram valor superior aos de referência. Contudo, as variações da mesma análise com valores menores que 20% ficaram próximos do valor de referência, o que indicam certa representatividade nos dados. Por fim, diante das análises de R^2 dos casos analisados, antes e após tratamento realizado, ficou evidente que a melhor relação existente é entre os valores com variações menores que 10% obtido com a análise comparativa entre os valores MS_{V2} e MS_{V3} . Logo, fica evidenciado a necessidade de tratamento nos dados,

de modo a retirar os valores dispersivos que influenciam diretamente na relação entre os parâmetros.

Com base nas análises conduzidas neste estudo, foi formulada uma nova equação (Equação 38) que permite inferir o valor da velocidade de onda cisalhante obtida no ensaio MASW a partir dos dados do ensaio SCPTu.

$$MV_{S2} = 0,787 \cdot MV_{S3} + 80,662 \quad \text{Equação 38}$$

Reescrevendo:

$$V_{S-MASW} = 0,787 \cdot V_{S-SCPTu} + 80,662$$

$$R^2 = 0,660$$

5.4.5. Comparativo entre os G_o 's

Comparativo entre G_{o2} e G_{o5} (MPa)

A Tabela 33 apresenta uma análise entre os módulos de cisalhamento do solo, G_{o2} e G_{o5} , expressos em MPa. A análise explora a concordância e disparidades entre as médias derivadas da média do módulo de cisalhamento G_{o2} , que é a média G_o obtido pelas médias G_{zi} , ou seja, foi utilizado no cálculo dos módulos a densidade específica para cada profundidade, obtido pelas médias V_s e o módulo G_{o5} , obtido pelas médias dos G_o do SCPTu.

Tabela 33: Comparativo entre G_{o2} e G_{o5} (MPa).

Comparativo entre G_{o2} e G_{o5} (MPa)				
Relação	G_{o2} = Média G_o pela média V_s do MASW	G_{o5} = Média G_o pelo SCPTu	Diferença	Variação
R1	287,58	281,47	2,12%	<10%
R2	171,39	433,12	152,72%	-
R3	286,86	316,02	10,16%	<20%
R4	339,47	426,98	25,78%	-
R5	428,93	310,86	27,53%	-
R6	321,21	425,72	32,54%	-
R7	285,78	291,83	2,12%	<10%
R8	334,61	388,26	16,03%	<20%
R9	288,71	83,32	71,14%	-
R10	241,93	213,29	11,84%	<20%
R11	294,91	218,93	25,76%	-
R12	320,54	312,06	2,65%	<10%
R13	234,06	202,59	13,44%	<20%
R14	266,38	271,59	1,96%	<10%

Continuação da Tabela 33.

R15	266,38	258,74	2,87%	<10%
R16	179,26	164,25	8,37%	<10%
R17	175,33	183,25	4,52%	<10%
R18	203,84	303,68	48,98%	-
R19	208,58	440,12	111,01%	-

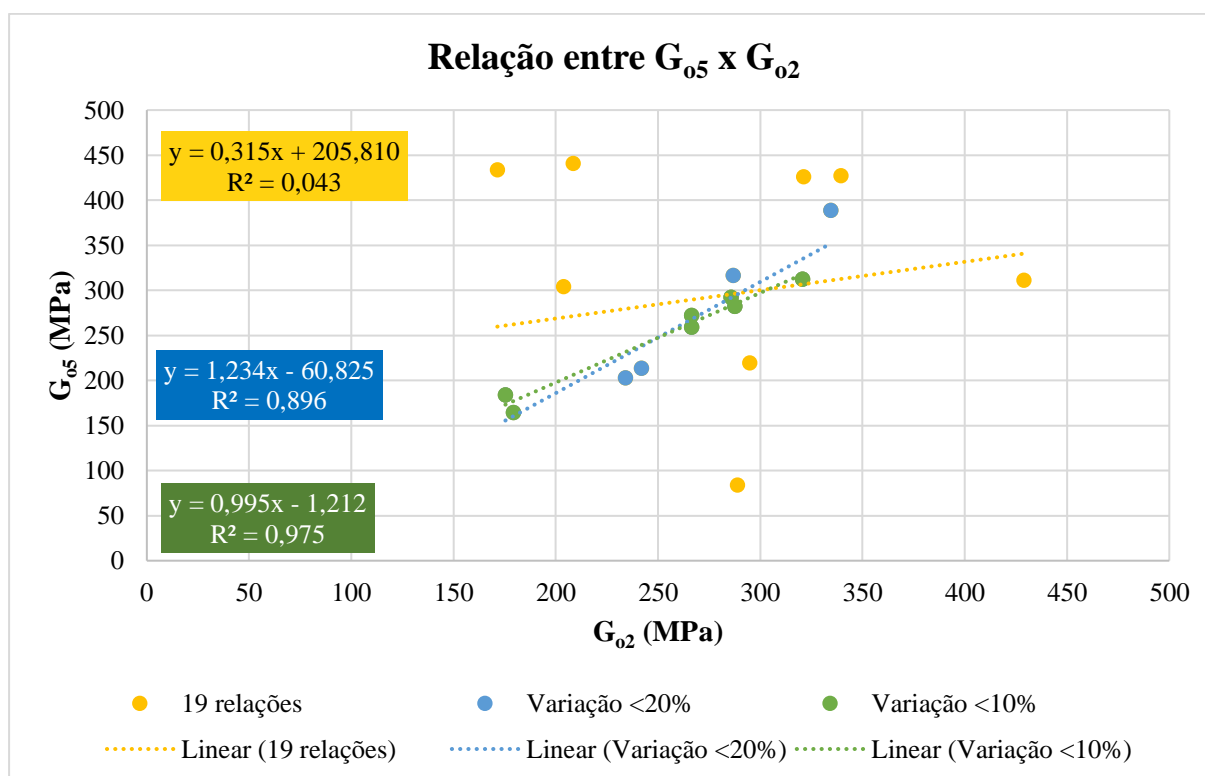
A análise comparativa entre os módulos de cisalhamento do solo (G_{o2} e G_{o5} , em MPa) revela nuances distintas em diferentes relações geotécnicas. Destacamos os principais pontos desses resultados:

- Relações com Variação Inferior a 10% ou 20% (R1, R3, R7, R8, R10, R12, R13, R14, R15, R16, R17):
 - Nesses cenários, a variação entre G_{o2} e G_{o5} permanece abaixo de 10% ou 20%, indicando uma consistência notável. Essa concordância sugere uma correlação robusta entre as médias dos módulos de cisalhamento obtidas pela média do módulo de cisalhamento e pelo SCPTu.
- Relações com Variação Significativa (R2, R4, R5, R6, R9, R11, R18, R19):
 - Nestes casos, observa-se variação substancial, ultrapassando os 20%. Essas disparidades apontam para a necessidade de uma análise mais aprofundada, a fim de compreender as razões subjacentes a essas diferenças consideráveis.

Das 19 relações, 7 exibem variação inferior a 10%, enquanto 11 estão na faixa de 20%. Este cenário destaca a complexidade na correlação entre os módulos de cisalhamento obtidos pelos métodos G_{o2} e G_{o5} , sublinhando a importância de uma interpretação criteriosa dos resultados.

O Gráfico 5 de dispersão entre os valores calculados de módulos de cisalhamento G_{o5} e G_{o2} , evidenciam as dispersões existentes quando analisadas todas as amostras. Após o refinamento dos dados e a retirada de valores com dispersão acima de 20% e posteriormente de 10%, os valores de R^2 aumentaram substancialmente.

Gráfico 5: Plotagem da dispersão dos valores de G_{05} e G_{02} .



Os valores de R^2 inicialmente foram de 0,043 para as 19 relações. Após analisar as relações com variação menor que 20%, esse valor aumentou para 0,896. Posteriormente, ao considerar apenas as relações com variação menor que 10%, o valor de R^2 aumentou significativamente para 0,975.

Uma análise mais refinada dos valores de R^2 serão realizadas no tópico 5.4.6, levando em consideração não apenas o valor do R^2 , mas a quantidade de observações analisadas, tendo como base a Tabela 30.

Comparativo entre G_{04} e G_{05} (MPa)

A Tabela 34 apresenta uma análise entre os módulos de cisalhamento do solo, G_{04} e G_{05} , expressos em MPa. A análise explora a concordância e disparidades entre as médias derivadas da média do módulo de cisalhamento G_{04} , que é a média G_0 obtido pelas médias g_{mn} 's e G_{0z} , ou seja, foi utilizado no cálculo dos módulos a densidade específica média, ou seja, foi utilizado no cálculo dos módulos a densidade específica para cada profundidade, com o módulo G_{05} , obtido pelas médias dos G_0 do SCPTu.

Tabela 34: Comparativo entre G_{04} e G_{05} (MPa).

Comparativo entre G_{04} e G_{05} (Mpa)					
Relação	G_{04} = Média G_0 em Z	G_{05} = Média G_0 pelo SCPTu	Diferença	Variação	
R1	290,27	281,47	3,03%	<10%	
R2	172,81	433,12	150,63%	-	
R3	291,08	316,02	8,57%	<10%	
R4	334,62	426,98	27,60%	-	
R5	427,29	310,86	27,25%	-	
R6	320,65	425,72	32,77%	-	
R7	284,33	291,83	2,64%	<10%	
R8	333,23	388,26	16,51%	<20%	
R9	287,53	83,32	71,02%	-	
R10	239,24	213,29	10,85%	<20%	
R11	294,29	218,93	25,61%	-	
R12	317,82	312,06	1,81%	<10%	
R13	230,65	202,59	12,16%	<20%	
R14	262,61	271,59	3,42%	<10%	
R15	262,61	258,74	1,47%	<10%	
R16	177,56	164,25	7,49%	<10%	
R17	177,67	183,25	3,14%	<10%	
R18	208,90	303,68	45,37%	-	
R19	211,25	440,12	108,35%	-	

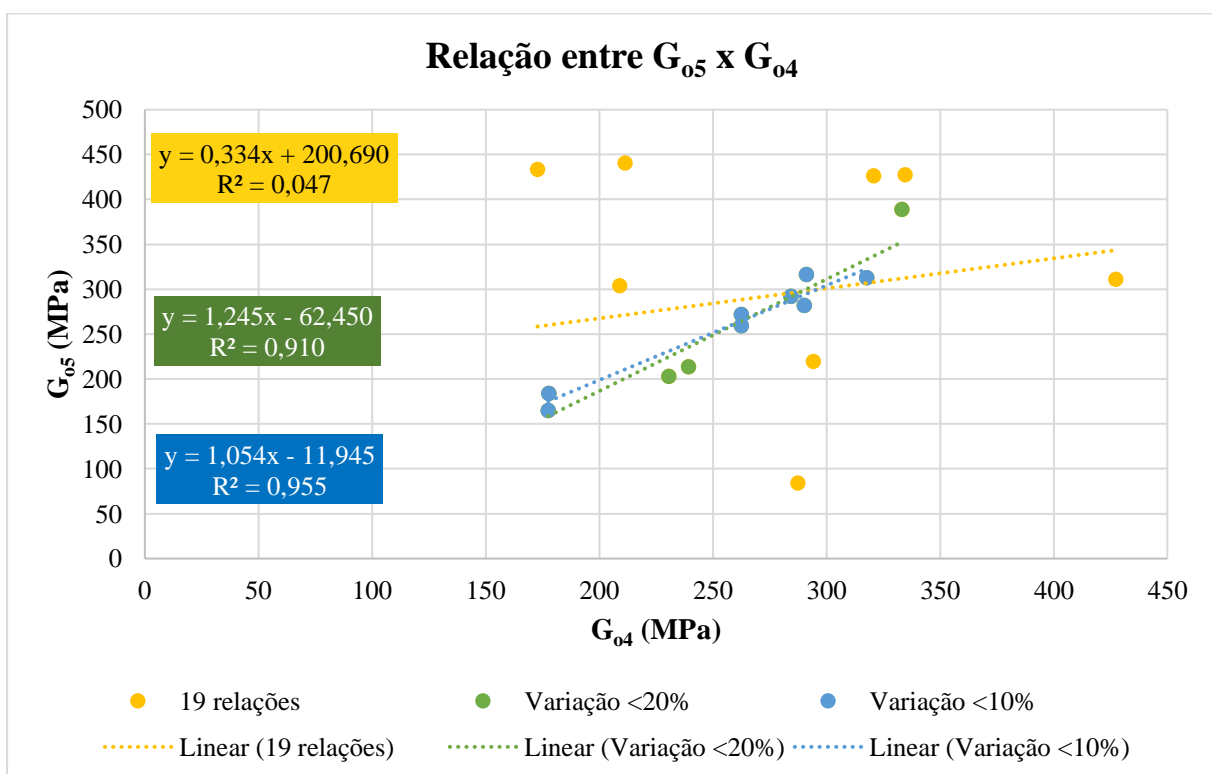
A análise comparativa entre os módulos de cisalhamento do solo, G_{04} e G_{05} (em MPa), revela divergências em 19 relações geotécnicas distintas. Destaca-se dos resultados os seguintes pontos:

- Relações com Variação Inferior a 10% ou 20% (R1, R3, R7, R8, R10, R12, R13, R14, R15, R16, R17):
 - Nestas instâncias, a variação entre G_{04} e G_{05} mantém-se abaixo de 10% ou 20%, indicando notável consistência. Essa concordância sugere uma correlação robusta entre as médias dos módulos de cisalhamento obtidos pela média do módulo de cisalhamento e pelo SCPTu.
- Relações com Variação Significativa (R2, R4, R5, R6, R9, R11, R18, R19):
 - Nestes casos, observa-se variação substancial, ultrapassando os 20%. Essas disparidades indicam a necessidade de análise mais profunda para compreender as razões subjacentes a essas diferenças consideráveis.

Das 19 relações, 8 apresentam variação inferior a 10%, enquanto 11 estão na faixa de 20%. Este cenário destaca a complexidade na correlação entre os módulos de cisalhamento obtidos pelos métodos G_{04} e G_{05} , reforçando a importância de uma interpretação criteriosa dos resultados.

O Gráfico 6 de dispersão entre os valores calculados de módulos de cisalhamento G_{05} e G_{04} mostra as dispersões presentes em todas as amostras. Após o refinamento dos dados e a remoção dos valores com dispersão acima de 20% e, posteriormente, de 10%, os valores de R^2 aumentaram consideravelmente.

Gráfico 6: Plotagem da dispersão dos valores de G_{05} e G_{04} .



Os valores de R^2 inicialmente foram de 0,047 para as 19 relações. Após analisar as relações com variação menor que 20%, esse valor aumentou para 0,910. Posteriormente, ao considerar apenas as relações com variação menor que 10%, o valor de R^2 aumentou significativamente para 0,955.

Comparativo entre G_{03} e G_{05} (MPa)

A Tabela 35 apresenta uma análise entre os módulos de cisalhamento do solo, G_{03} e G_{05} , expressos em MPa. A análise explora a concordância e disparidades entre as médias derivadas da média do módulo de cisalhamento G_{03} , obtido com a utilização das velocidades MV_{S2} e o ρ_{med} , com o módulo G_{05} , obtido pelas médias dos G_0 do SCPTu.

Tabela 35: Comparativo entre G_{03} e G_{05} (MPa).

Comparativo entre G_{03} e G_{05} (MPa)				
Relação	G_{03} = Média G total pontual	G_{05} = Média G_0 pelo SCPTu	Diferença	Variação
R1	282,21	281,47	0,26%	<10%
R2	167,25	433,12	158,97%	-
R3	286,08	316,02	10,46%	<20%
R4	332,99	426,98	28,23%	-
R5	391,38	310,86	20,57%	-
R6	305,89	425,72	39,17%	-
R7	283,18	291,83	3,05%	<10%
R8	340,48	388,26	14,03%	<20%
R9	285,02	83,32	70,77%	-
R10	232,44	213,29	8,24%	<10%
R11	284,66	218,93	23,09%	-
R12	305,17	312,06	2,26%	<10%
R13	226,51	202,59	10,56%	<20%
R14	260,44	271,59	4,28%	<10%
R15	260,44	258,74	0,65%	<10%
R16	172,83	164,25	4,96%	<10%
R17	173,81	183,25	5,43%	<10%
R18	200,83	303,68	51,22%	-
R19	205,06	440,12	114,63%	-

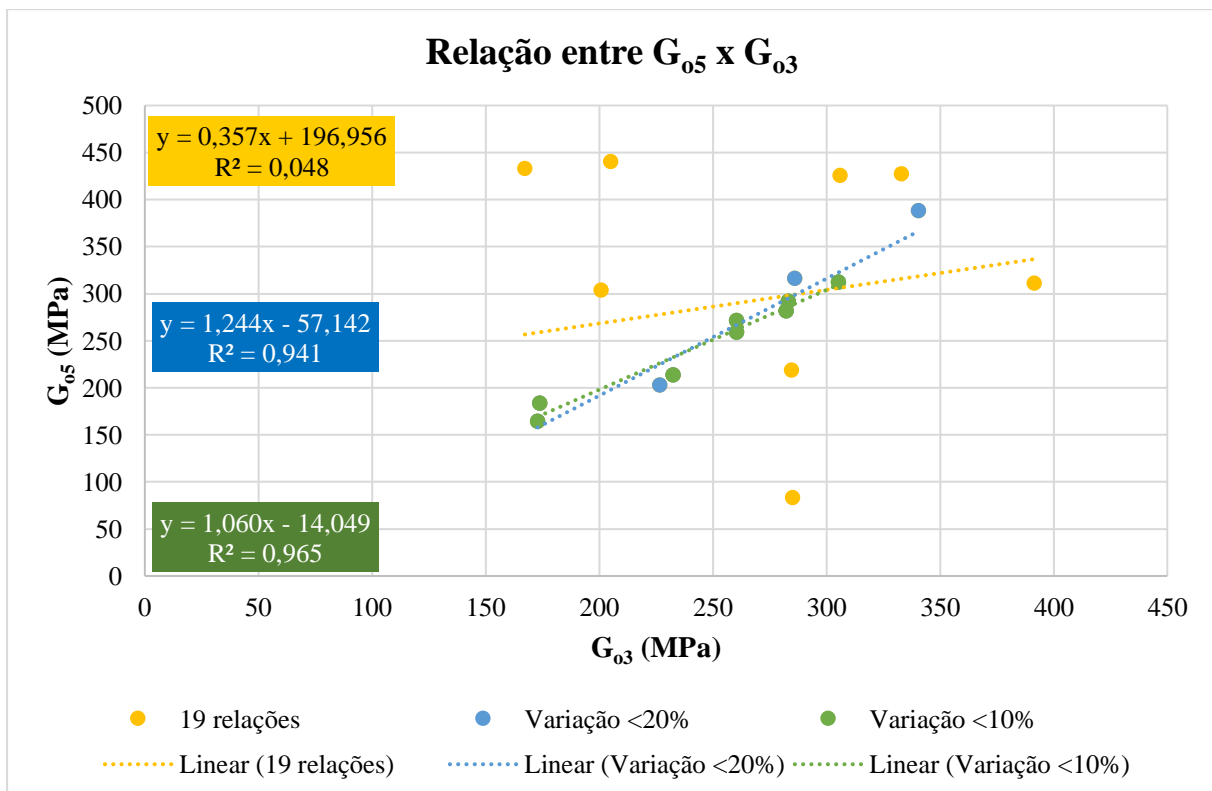
A análise comparativa entre os módulos de cisalhamento do solo, G_{03} e G_{05} (em MPa) fornece uma visão detalhada das discrepâncias nos módulos de cisalhamento do solo. Destaca-se dos resultados os seguintes pontos:

- Relações com Variação Inferior a 10% ou 20% (R1, R3, R7, R8, R10, R12, R13, R14, R15, R16, R17):
 - Nesses casos, a variação entre G_{03} e G_{05} permanece abaixo de 10% ou 20%, indicando uma consistência notável. Essa concordância sugere uma correlação robusta entre as médias dos módulos de cisalhamento obtidos pela média do módulo de cisalhamento e pelo SCPTu.
- Relações com Variação Significativa (R2, R4, R5, R6, R9, R11, R18, R19):
 - Nestas instâncias, observa-se uma variação substancial, ultrapassando os 20%. Essas disparidades indicam a necessidade de uma análise mais aprofundada para compreender as razões subjacentes a essas diferenças consideráveis.

No geral, das 19 relações, 8 apresentam variação inferior a 10%, enquanto 11 estão na faixa de 20%.

O Gráfico 7 evidencia as dispersões encontradas em todas as amostras entre os valores calculados dos módulos de cisalhamento G_{05} e G_{03} . Após o refinamento dos dados, com a exclusão dos valores com dispersão acima de 20% e, posteriormente, de 10%, houve um notável aumento nos valores de R^2 , indicando uma melhora significativa na qualidade da análise estatística.

Gráfico 7: Plotagem da dispersão dos valores de G_{05} e G_{03} .



Comparativo entre G_{05} e G_{06} (MPa)

A Tabela 36 apresenta uma análise entre os módulos de cisalhamento do solo, G_{05} e G_{06} , expressos em MPa. A análise explora a concordância e disparidades entre as médias derivadas da média do módulo de cisalhamento G_{06} , obtido com a utilização das velocidades MV_{S4} e o ρ_{med} , com o módulo G_{05} , obtido pelas médias dos G_0 do SCPTu.

Tabela 36: Comparativo entre G_{05} e G_{06} (MPa).

Comparativo entre G_{05} e G_{06} (MPa)				
Relação	G_{05} = Média G_0 pelo SCPTu	G_{06} = Média geral G pelo V_{S30} MASW	Diferença	Variação
R1	281,47	369,99	31,45%	-
R2	433,12	293,01	32,35%	-
R3	316,02	396,26	25,39%	-
R4	426,98	385,43	9,73%	<10%
R5	310,86	422,31	35,85%	-
R6	425,72	294,08	30,92%	-
R7	291,83	404,50	38,61%	-
R8	388,26	452,98	16,67%	<20%
R9	83,32	387,68	365,29%	-
R10	213,29	337,20	58,10%	-
R11	218,93	354,63	61,99%	-
R12	312,06	336,15	7,72%	<10%
R13	202,59	274,18	35,33%	-
R14	271,59	264,62	2,57%	<10%
R15	258,74	264,62	2,27%	<10%
R16	164,25	261,38	59,14%	-
R17	183,25	254,30	38,77%	-
R18	303,68	281,80	7,20%	<10%
R19	440,12	225,71	48,72%	-

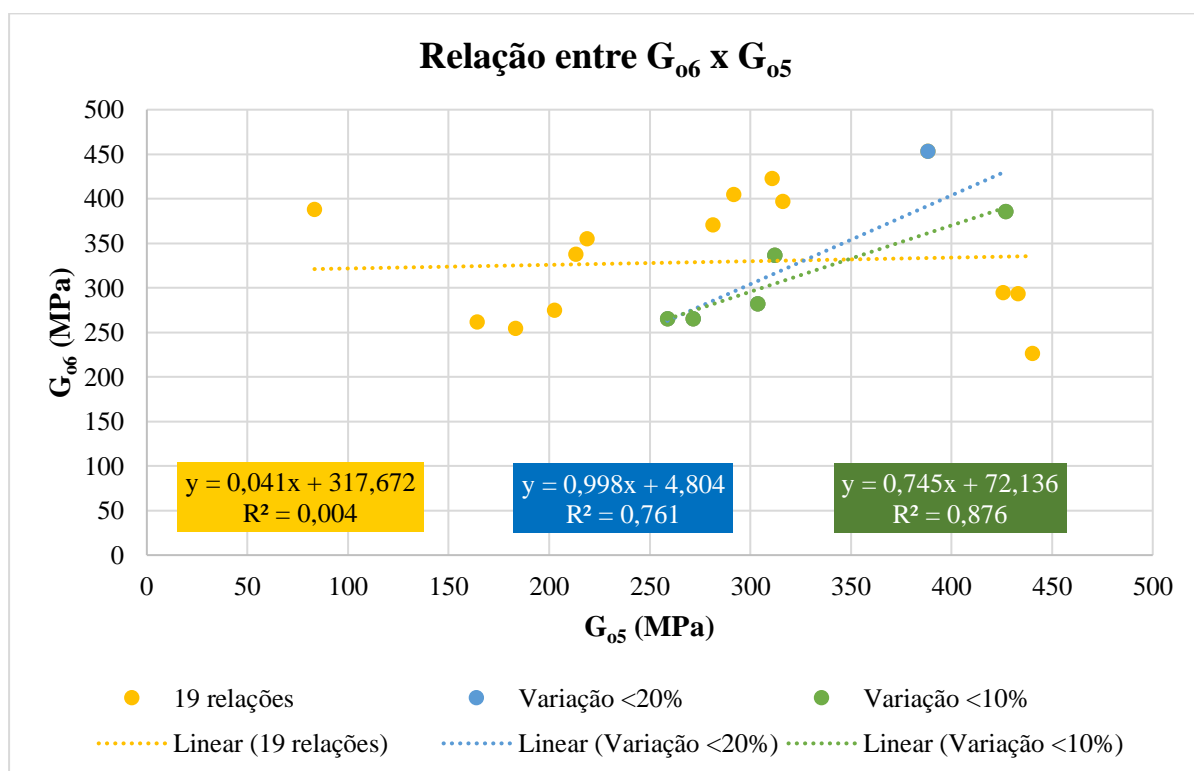
A Tabela 36 de comparativo entre G_{05} e G_{06} (em MPa) apresenta uma análise detalhada das discrepâncias nos módulos de cisalhamento do solo em várias relações geotécnicas. Abaixo, destacam-se os principais aspectos revelados pelos resultados:

- Relações com Variação Inferior a 10% ou 20% (R4, R8, R12, R14, R15, R18):
 - Nestes casos, a variação entre G_{05} e G_{06} permanece abaixo de 10% ou 20%, indicando uma consistência notável. Essa concordância sugere uma correlação robusta entre as médias dos módulos de cisalhamento obtidos pelo SCPTu e pelo método MASW.
- Relações com Variação Significativa (R1, R2, R3, R5, R6, R7, R9, R10, R11, R13, R16, R17, R19):
 - Nestas instâncias, observa-se uma variação substancial, ultrapassando os 30%. Essas disparidades indicam a necessidade de uma análise mais aprofundada para compreender as razões subjacentes a essas diferenças consideráveis.

Das 19 relações, 5 apresentam variação inferior a 10%, enquanto 6 estão na faixa de 20%. Este cenário destaca a complexidade na correlação entre os módulos de cisalhamento obtidos pelos métodos G_{05} e G_{06} , sublinhando a importância de uma interpretação criteriosa dos resultados.

O Gráfico 8 apresenta as dispersões observadas em todas as amostras entre os valores calculados dos módulos de cisalhamento G_{06} e G_{05} . Além disso, são apresentadas análises considerando amostras com dispersões de valores que variaram menos de 10% e 20%, mostrando a influência desse refinamento na precisão dos resultados.

Gráfico 8: Plotagem da dispersão dos valores de G_{06} e G_{05} .



5.4.6. Considerações sobre os comparativos dos G_o 's

A análise comparativa dos módulos de cisalhamento (G_o) proporcionou avaliar a consistência e concordância entre diferentes métodos de medição. Dentre as diversas comparações realizadas, destacam-se as análises entre G_{02} e G_{05} , G_{04} e G_{05} , bem como G_{05} e G_{03} .

A relação entre G_{02} (determinado pela média V_s do MASW) e G_{05} (adquirido via SCPTu) evidencia disparidades notáveis em diversos pontos de análise. A variação atinge um patamar considerável, alcançando até 152,72% de diferença em determinadas localizações.

Contudo, vale salientar que 7 das 19 relações apresentam variações inferiores a 10%, e 11 das 19 variam menos de 20%, o que sugere uma correlação mais favorável nesses casos específicos.

A comparação entre G_{04} (calculado em Z pelo MASW) e G_{05} (determinado pelo SCPTu) destaca divergências expressivas em algumas localizações, com uma variação que atinge até 150,63%. No entanto, é necessário salientar que 8 das 19 relações exibem variações inferiores a 10%, e 11 das 19 variam menos de 20%, indicando concordâncias mais satisfatórias em uma parcela significativa das análises.

Ao contrastar G_{03} (média G total pontual do MASW) com G_{05} (obtido pelo SCPTu), percebe-se uma variação considerável em diversas localizações, com uma diferença que chega a 158,97%. Não obstante, é relevante mencionar que 8 das 19 relações apresentam variações inferiores a 10%, e 11 das 19 variam menos de 20%, sinalizando concordâncias mais robustas em determinadas instâncias.

A relação entre G_{05} (determinado pelo SCPTu) e G_{06} (média geral G pelo MASW) revela divergências marcantes, com variações que atingem até 365,29%. Apenas 5 das 19 relações apresentam variações inferiores a 10%, e 6 das 19 variaram menos de 20%, indicando concordâncias mais consistentes em apenas uma porção mais limitada das análises. Vale ressaltar que a média G_{06} leva em consideração perfis de solos não alcançados pelo ensaio SCPTu, como já mencionado no item 5.4.4.

As melhores relações obtidas foram entre G_{05} e G_{03} , G_{05} e G_{04} com forte consistência em 8 relações, bem como entre G_{02} e G_{05} , apresentando forte consistência em 7 relações. Adicionalmente, análises complementares podem ser consideradas para garantir a precisão interpretativa nos casos de variações mais expressivas. Essa abordagem sistemática proporciona uma compreensão abrangente da concordância e consistência entre os diferentes métodos de medição de módulos de cisalhamento.

O emprego da densidade média (ρ_{med}) no cálculo do módulo de cisalhamento G_{03} revelou-se eficaz, mesmo em situações em que simplificações foram necessárias. Esta abordagem evidenciou uma robusta correlação em diversos casos, sugerindo que, em determinadas circunstâncias, a utilização de simplificações torna-se viável na obtenção de resultados preliminares e indicativos do comportamento dos solos.

A forte correlação observada entre o módulo de cisalhamento calculado com base na densidade média e outras variáveis indica que, embora simplificações tenham sido adotadas, os resultados ainda são representativos. Isso ressalta a importância de estratégias pragmáticas na

obtenção de dados, especialmente quando a agilidade na análise inicial é crucial para orientar as investigações subsequentes.

A abordagem adotada na determinação dos módulos de cisalhamento G_{02} e G_{04} , considerando as densidades específicas associadas a cada profundidade (ρ_{zi}) conforme os valores registrados na base de dados, apresentou resultados promissores e consistentes. Recomenda-se o uso do valor conhecido da densidade específica para a profundidade analisada. No entanto, como destacado anteriormente, em situações de desconhecimento ou não determinação desse parâmetro, a utilização de uma densidade específica média (ρ_{med}) se mostra adequada para análises preliminares.

A ausência de convergência entre os pontos R2, R9 e R19 pode ser atribuída a leituras pontuais que divergiram consideravelmente das demais medições. Esses três pontos em particular destacaram-se por apresentar as maiores discrepâncias entre as análises realizadas, indicando a necessidade de uma análise mais detalhada e minuciosa para compreender as razões por trás dessas diferenças.

No caso do ponto R2, ocorreu discrepância entre as leituras das profundidades 5 e 8m, comparada com as do MASW. As velocidades cisalhantes em 5 e 8 metros pelo SCPTu foram 618 m/s e 474 m/s, respectivamente. Enquanto no MASW, os valores variaram entre 250 m/s e 350 m/s, para a mesma profundidade analisada. Tais discrepâncias de resultados, geraram variações da ordem de 55,49% no comparativo das MV_s 's e de até 158,97% nos comparativos de G_o 's

No caso do ponto R9, nas duas primeiras leituras de V_s , na profundidade de 2 e 5 metros, obteve-se as velocidades de 145 m/s e 178 m/s, respectivamente, enquanto no MASW, os valores obtidos para as mesmas profundidades, ficou acima de 350 m/s. Diante disso, ocorreram variações consideráveis entre as médias, gerando variações de velocidade da ordem de 121,37%, e de módulos de cisalhamento de até 365,29%.

No ponto R19, a variação significativa na velocidade de onda cisalhante (V_s) entre as profundidades de 4 metros (1036 m/s) e 7 metros (258 m/s) destaca-se. Essa discrepância resulta em uma variação considerável no módulo de cisalhamento. Nesse cenário, a utilização da média pode não ser uma representação precisa do comportamento do solo, levantando a possibilidade de um erro de leitura no SCPTu. Recomenda-se uma revisão cuidadosa dessa medição para assegurar a confiabilidade dos dados.

Os valores de R^2 analisados para cada comparativo estudado, estão compilados na Tabela 37.

Tabela 37: Resultados dos R^2 das análises de G_o .

Comparativo	Dados analisados	N (número de observações)	R^2 referência (Chasse e Brown, 1992)	R^2 calculado
G_{02} x G_{05}	Todos	19	0,456	0,043
	Var. <20%	11	0,602	0,896
	Var. <10%	7	0,754	0,975
G_{03} x G_{05}	Todos	19	0,456	0,048
	Var. <20%	11	0,602	0,941
	Var. <10%	8	0,707	0,965
G_{04} x G_{05}	Todos	19	0,456	0,047
	Var. <20%	11	0,602	0,910
	Var. <10%	8	0,	0,955
G_{05} x G_{06}	Todos	19	0,456	0,004
	Var. <20%	6	0,811	0,761
	Var. <10%	5	0,881	0,876

Var. = Variação.

É importante destacar que as análises comparativas realizadas entre os valores de módulos de cisalhamento obtidos com o ensaio MASW (G_{02} , G_{03} , G_{04} e G_{06}), utilizando diferentes métodos de cálculo, foram conduzidas com o objetivo de determinar a abordagem mais adequada. Essa avaliação é fundamental para posterior comparação com os resultados do ensaio SCPTu (G_{05}), visando garantir a consistência e a precisão das análises geotécnicas realizadas.

Analisando inicialmente os valores de R^2 , com todas as amostras, nenhuma das correlações obteve um valor R^2 calculado acima do recomendado por Chasse e Brown (1992). A correlação entre G_{05} e G_{06} , apesar do R^2 de referência ser maior que o R^2 calculado os valores ficaram bem próximos. Essas variações podem decorrer da utilização do valor de MV_{S4} , que é $\sigma_{V_{S30}}$ do MASW para calcular o módulo de cisalhamento G_{06} . Isso decorre do aumento nos valores de velocidade, já discutido nos itens 5.4.1, 5.4.3 e 5.4.4.

Dentre as análises que foram refinadas, a relação entre G_{02} e G_{05} destacou-se com o maior valor de R^2 , atingindo 0,975 com variações inferiores a 10%. Apesar de envolver algumas aproximações no cálculo, o parâmetro G_{02} demonstrou um excelente desempenho e correlação

com os valores de SCPTu. No geral, as três relações, com exceção daquela envolvendo o valor de G_{06} , apresentaram bons valores de R^2 , indicando consistência e pouca variação entre eles.

5.5. Comparativo entre V_s MASW, V_s SCPTu e NSPT

Na Tabela 38 estão apresentados os valores utilizados para as análises de correlação entre os parâmetros.

Tabela 38: Dados das 6 relações entre V_s MASW, V_s SCPTU e N_{SPT} .

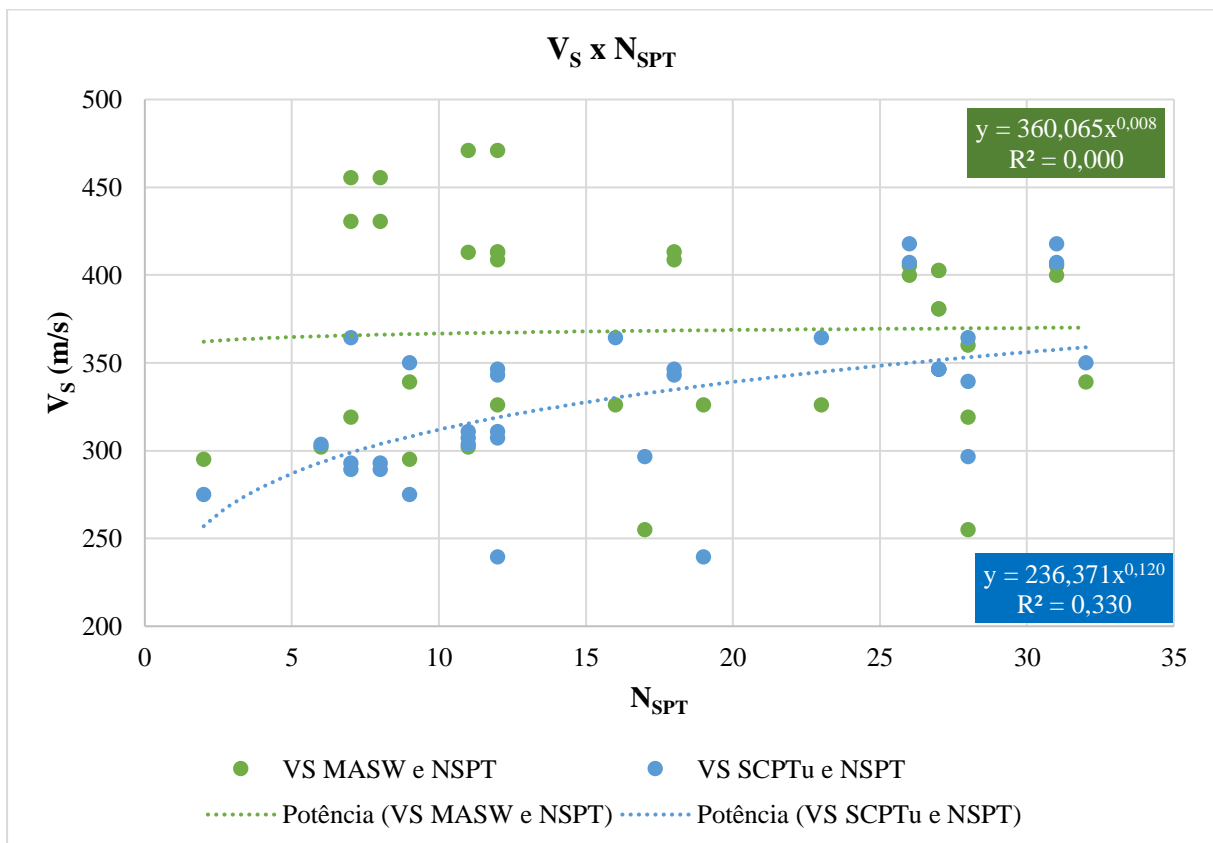
Relação	Profundidade (m)	V_s MASW (m/s)	V_s SCPTu (m/s)	N_{SPT}
V1	4	326	239	12
	7	255	296	17
	9	326	364	23
	11	319	364	28
V2	4	326	239	19
	7	255	296	28
	9	326	364	16
	11	319	364	7
V3	4	295	275	2
	7	302	304	6
	10	339	350	9
V4	4	295	275	9
	7	302	304	11
	10	339	350	32
	11	360	339	28
V5	3,5	431	289	7
	4	455	293	7
	6,5	471	307	12
	7	413	311	12
	9,5	409	343	12
	10	413	346	12
	12,5	402	346	27
	13	381	346	27
	15,5	405	407	26
16	400	418	26	
V6	3,5	431	289	8
	4	455	293	8
	6,5	471	307	11
	7	413	311	11
	9,5	409	343	18

Continuação da Tabela 38.

V6	10	413	346	18
	12,5	402	346	27
	13	381	346	27
	15,5	405	407	31
	16	400	418	31

Com os dados, foi plotado 2 curvas de dispersão, comparando os dados do MASW e SPT e outra comparando os dados do SCPTu com o SPT. No Gráfico 9 é possível visualizar a dispersão e a tendência dos valores analisados.

Gráfico 9: Comparativo entre valores de V_s MASW e V_s SCPTu com o N_{SPT} .



Duas equações potenciais foram derivadas através da análise de dispersão dos dados. A escolha de uma curva potencial foi fundamentada na ampla utilização desse tipo de modelagem por diversos autores, conforme referenciado na Tabela 10. Ao todo, foram examinados 35 conjuntos de dados compreendendo valores de V_s e N_{SPT} , resultando na obtenção de dois coeficientes de determinação (R^2) e suas respectivas equações para as relações V_s MASW x N_{SPT} e V_s SCPTu x N_{SPT} .

Segundo os parâmetros estabelecidos por Chasse e Brown (1992), o valor de referência de R^2 para 35 observações é de 0,336. No entanto, ao compararmos os resultados, observamos que o coeficiente de determinação para a relação entre V_S MASW e N_{SPT} foi calculado em 0,000, ficando aquém do limite estabelecido.

Por outro lado, ao analisarmos a relação entre V_S SCPTu e N_{SPT} , observamos um coeficiente de determinação da ordem de 0,330, muito próximo do valor de referência. Esses resultados sugerem que os dados de velocidade de onda cisalhante estão mais intimamente relacionados aos dados do SPT, indicando sua utilidade como referência para estimar os valores de V_S na ausência de dados provenientes do SCPTu e MASW. Logo, a equação 39, foi proposta para poder auxiliar na obtenção de dados de V_S a partir do valor N_{SPT} . Vale ressaltar que nessa análise, o comportamento do SCPTu com o N_{SPT} foi melhor que o comportamento do MASW.

$$V_S = 236,371 \cdot N^{0,120} \quad \text{Equação 39}$$

$$R^2 = 0,330 \rightarrow 35 \text{ observações}$$

5.6. Comparativo dos valores V_S MASW e V_S SCPTu com os V_S obtidos com os N_{SPT}

A fim de avaliar a eficácia da equação 39 na determinação de V_S em função do N_{SPT} , torna-se imperativo confrontá-la com as equações propostas por outros pesquisadores. Neste contexto, serão consideradas as formulações mais recentes apresentadas na Tabela 10, as quais abrangem diversos tipos de solo, além da equação desenvolvida por Fialho Rodrigues (1979). Complementarmente, serão incluídas as equações propostas por Maheshwari et al. (2008) e Dikmen (2009).

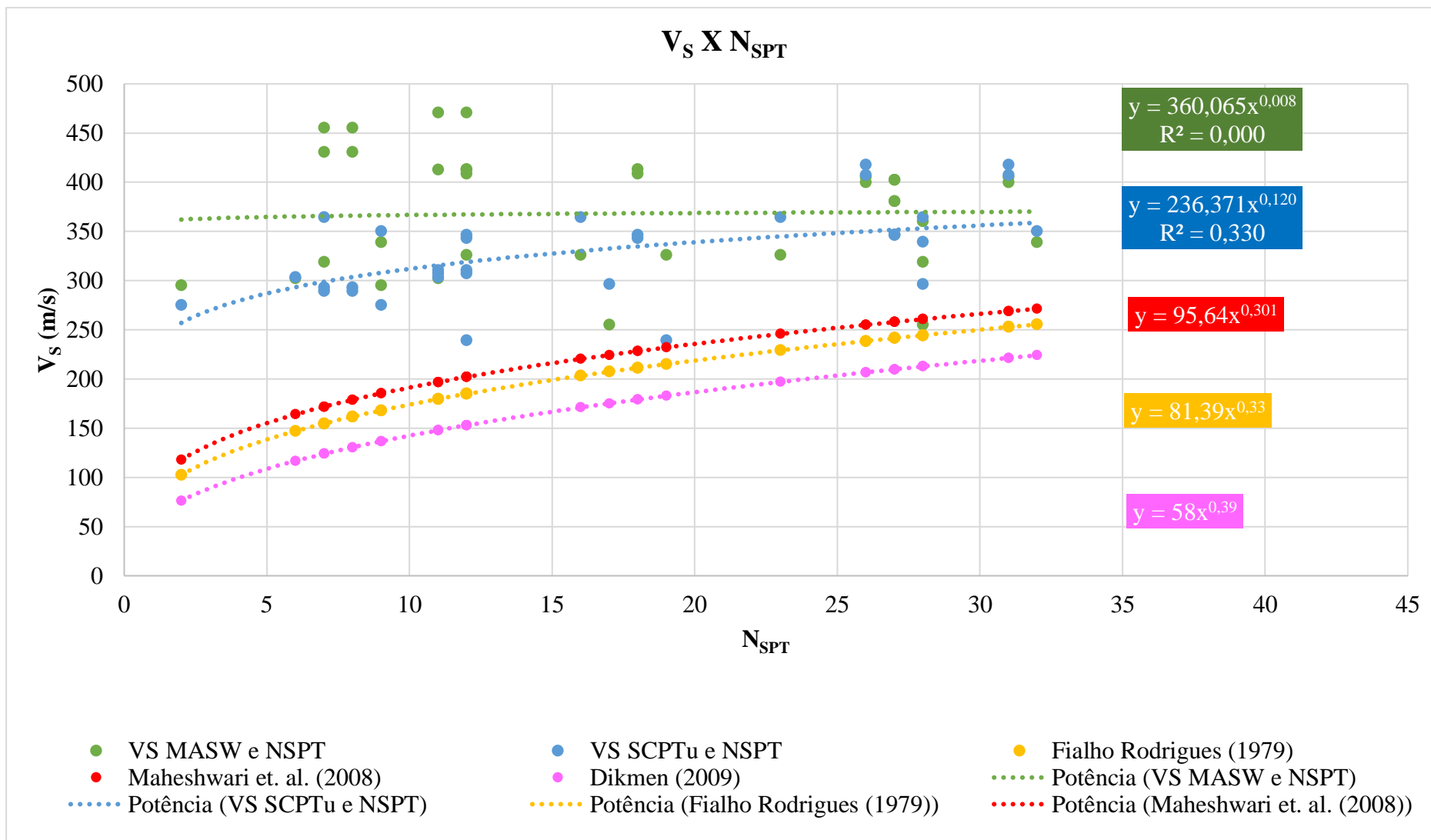
Os valores de V_S foram calculados para cada valor N_{SPT} obtido nas 6 relações estudadas. Na Tabela 39 é possível visualizar as equações utilizadas para o cálculo do V_S em função do N_{SPT} , proposta por cada autor analisado.

Os dados obtidos na Tabela 39 foram dispersos no Gráfico 10, juntamente com os valores de V_S do SCPTu e MASW já plotados no Gráfico 9 para efeitos de comparação e discussão entre os valores calculados por equações e os obtidos com os ensaios.

Tabela 39: Valores de V_S calculados a partir do N_{SPT} utilizando equações proposta por outros autores.

N_{SPT}	V_S (m/s)		
	Fialho Rodrigues (1976) $V_S = 81,39 \cdot N^{0,33}$	Maheshwari et. al. (2008) $V_S = 95,64 \cdot N^{0,301}$	Dikmen (2009) $V_S = 58 \cdot N^{0,39}$
12	185	202	153
17	207	224	175
23	229	246	197
28	244	261	213
19	215	232	183
28	244	261	213
16	203	220	171
7	155	172	124
2	102	118	76
6	147	164	117
9	168	185	137
9	168	185	137
11	180	197	148
32	255	271	224
28	244	261	213
7	155	172	124
7	155	172	124
12	185	202	153
12	185	202	153
12	185	202	153
12	185	202	153
27	242	258	210
27	242	258	210
26	239	255	207
26	239	255	207
8	162	179	131
8	162	179	131
11	180	197	148
11	180	197	148
18	211	228	179
18	211	228	179
27	242	258	210
27	242	258	210
31	253	269	221
31	253	269	221

Gráfico 10: Comparativo entre valores de V_S MASW, V_S SCPTu e V_S calculados com o N_{SPT} .



Observou-se que o comportamento das curvas calculadas se assemelha às curvas obtidas pela dispersão dos dados, com exceção da curva gerada a partir dos dados de V_s do MASW. A discrepância entre os valores de velocidades de ondas cisalhantes obtidos por meio das equações em comparação com os valores obtidos pelo MASW e SCPTu sugere uma possível diferença nos tipos de solo analisados ou a presença de um fator de segurança incorporado nas equações propostas por Fialho Rodrigues (1979), Maheshwari et al. (2008) e Dikmen (2009). É importante ressaltar que, devido à natureza estimativa dos valores obtidos por meio de equações, a precisão só pode ser alcançada por meio da realização de ensaios específicos para obtenção dos dados desejados.

5.7. Comparativo dos valores G_o obtidos com MASW, SCPTu com os obtidos com o q_c

No item 3.7.7 foram elencadas duas equações (42 e 43) que utilizam os valores de q_c obtidos com o ensaio SCPTu para estimar os módulos de cisalhamento. A equação 40 de Simonini e Cola (2000) e a equação 41 de Bouckovalas et. al. (1989) foram utilizadas para comparar com os valores de cisalhamento obtido com o SPCTu (G_{o5}) e o módulo de cisalhamento com a melhor correlação obtido com o MASW que foi o G_{o2} .

$$G_o = 49,2 \cdot q_c^{0,51} \quad \text{Equação 40}$$

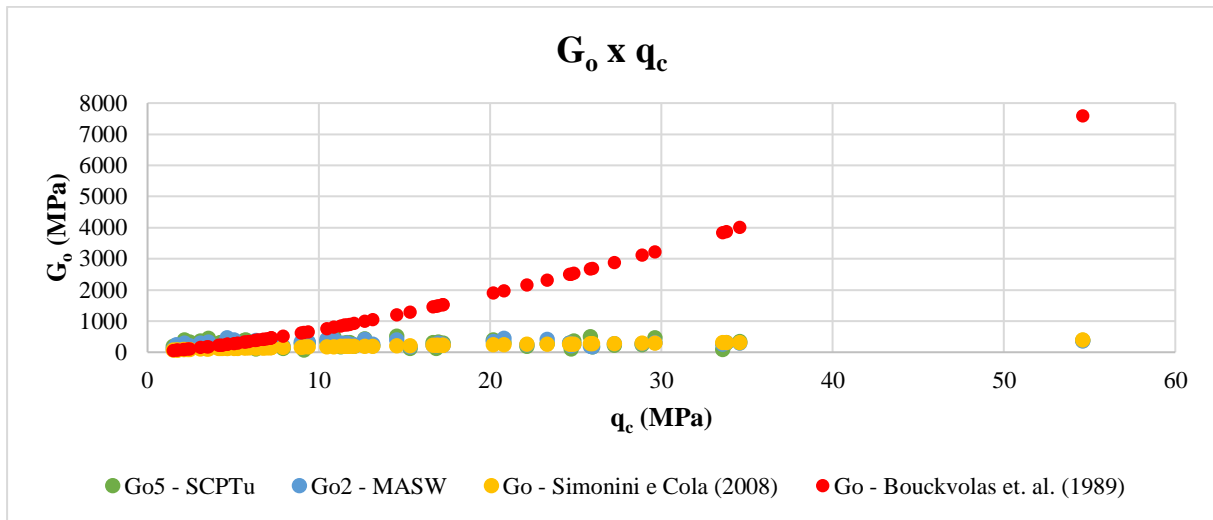
Simonini & Cola (2000)

$$G_o = 28,0 \cdot q_c^{1,40} \quad \text{Equação 41}$$

Bouckovalas et al. (1989)

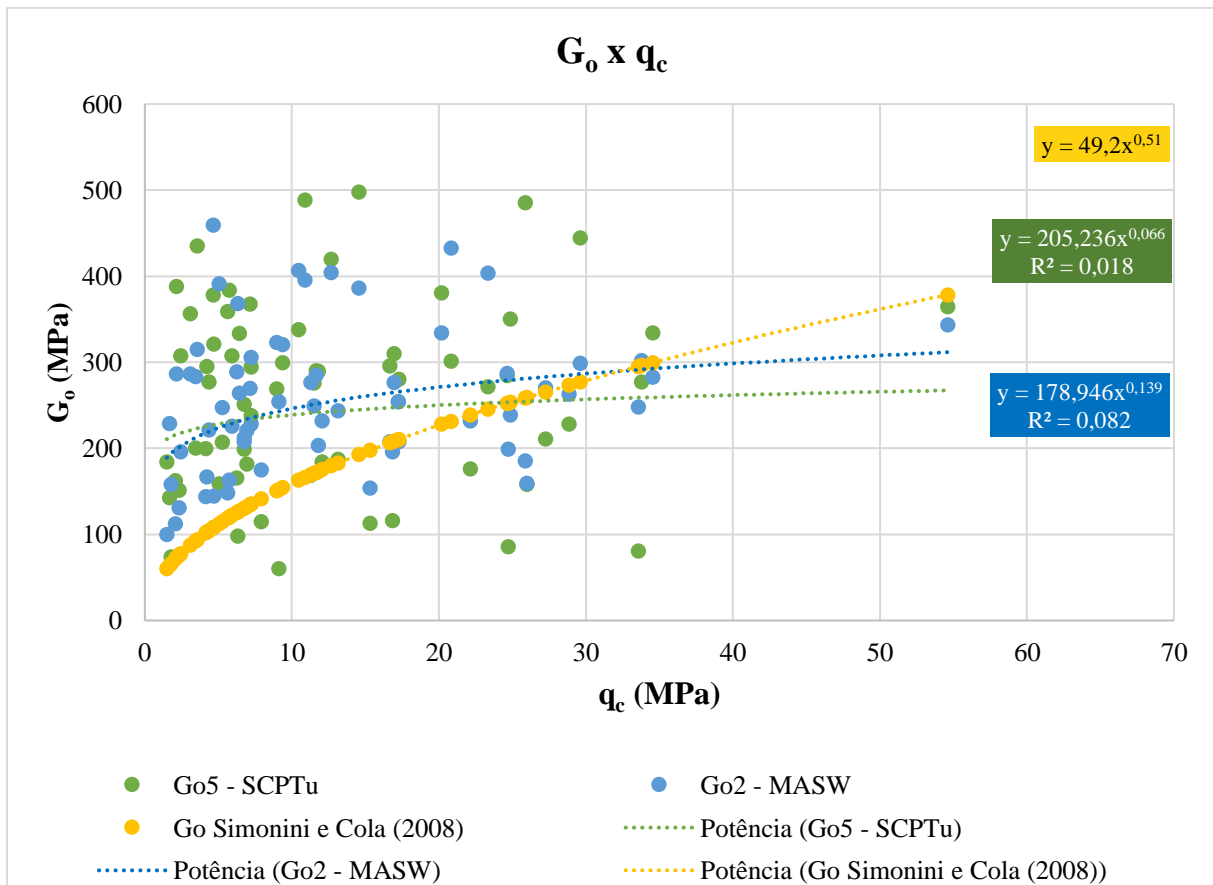
Os dados obtidos foram plotados no Gráfico 11.

Gráfico 11: Comparativo entre valores de G_o MASW, G_o SCPTu e G_o calculados com o q_c .



O comportamento da equação proposta por Bouckovalas et al. (1989) dispersou consideravelmente das outras equações e valores encontrados, logo, decidiu-se utilizar apenas a equação de Simonini & Cola (2000) para efeito de comparação, o Gráfico 12 foi plotado sem os valores calculados pela equação de Bouckovalas et al. (1989).

Gráfico 12: Comparativo refinado entre valores de G_o MASW, G_o SCPTu e G_o calculados com o q_c .



Após o refinamento dos dados, foi possível analisar o comportamento das três dispersões estudadas. Observou-se que os módulos de cisalhamento obtidos através MASW e do SCPTu exibem comportamentos bastante semelhantes. No entanto, é importante ressaltar que, embora o coeficiente de determinação (R^2) do MASW seja de 0,082, enquanto o do SCPTu é de 0,014. foram analisados 65 pares de dados referentes ao módulo de cisalhamento e à resistência de ponta e , de acordo com Chasse e Brown (1992), para o número de observações realizado neste estudo, o valor de referência para o coeficiente de determinação é de 0,240. Notavelmente, a equação obtida com os valores de G_{o2} apresentou o valor mais próximo desse referencial de R^2 .

Portanto, os resultados indicam que a relação entre o módulo de cisalhamento e a resistência de ponta possui uma correlação razoável, embora o R^2 obtido ainda possa ser aprimorado para melhorar a precisão das previsões. Essas descobertas são relevantes para a compreensão e modelagem do comportamento mecânico dos solos investigados, fornecendo informações valiosas para aplicações geotécnicas. Logo, a equação 42, proposta por esse trabalho, pode auxiliar na obtenção de dados de G_o a partir do valor q_c .

$$G_o = 178,946 \cdot q_c^{0,139} \quad \text{Equação 42}$$

$$R^2 = 0,082 \rightarrow 65 \text{ observações}$$

5.8.Resultado das correlações entre as variáveis q_c , f_s , N_{SPT} , IC e Z

Os valores obtidos com as correlações, foram distribuídos na Tabela 40, para facilitar a visualização dos dados. De modo que, foi destacado as relações entre o q_c x N_{SPT} , f_s x N_{SPT} e, q_c x f_s . As relações obtidas entre os fatores de q_c , f_s e N_{SPT} com a profundidade obtiveram boas correlações, como pode ser visualizado no APÊNDICE F.

Tabela 40: Índice de correlação entre os parâmetros q_c , f_s e N_{SPT} .

Correlação	Valor da correlação (R^2)		
	$q_c \times N_{SPT}$	$f_s \times N_{SPT}$	$q_c \times f_s$
C1	0,48	0,22	0,45
C2	0,19	0,00	0,45
C3	0,88	0,83	0,74
C4	0,80	0,81	0,97
C5	0,71	0,71	0,91
C6	0,69	0,68	0,91
C7	0,80	0,73	0,88
C8	0,58	0,73	0,50
C9	0,58	0,84	0,74
C10	0,57	0,57	0,47
C11	0,54	0,66	0,70
C12	0,64	0,76	0,93
C13	0,92	0,95	0,94
C14	0,80	0,42	0,66
C15	0,78	0,69	0,90
C16	0,43	0,58	0,61
C17	0,69	0,76	0,61
C18	0,26	0,80	0,51
C19	0,39	0,54	0,62

O parâmetro IC, por ser um fator calculado, com o auxílio dos valores de q_c e u_2 , obteve uma forte correlação com o q_c , o que faz sentido, tendo em vista que eles estão diretamente ligados devido a equação utilizada para sua determinação. Portanto, não foi destacado na Tabela 40.

5.9. Análise dos resultados das correlações entre as variáveis q_c , f_s , N_{SPT} , IC e Z

5.9.1. Análise da correlação q_c com N_{SPT}

A observação dos resultados revela uma variabilidade significativa nas correlações entre a resistência à penetração (q_c) e N_{SPT} nas diferentes amostras. Destacam-se os casos C3, C4, C7, C13 e C14, nos quais os coeficientes atingiram valores notáveis de 0,88, 0,80, 0,80, 0,92 e 0,80, respectivamente. Esses dados sugerem uma correlação substancialmente positiva entre eles, indicando que a resistência à penetração pode ser considerada como um indicativo válido do NSPT nessas amostras específicas. Dentre as correlações, as que obtiverem os menores valores foram a C2 e a C18, com valor de 0,19 e 0,26, respectivamente. Entretanto,

das 19, 9 obtiveram valores superior a 0,60 e 14 superior a 0,50, indicando boa correspondência entre as resistências de ponta e o índice N_{SPT} .

5.9.2. Análise da correlação f_s com N_{SPT}

A análise da relação entre o atrito lateral (f_s) e o N_{SPT} revela uma gama variada de correlações nos diversos casos estudados. Destaca-se a concordância entre esses parâmetros nas amostras C3, C4, C9, C13 e C18, onde os coeficientes alcançaram valores notáveis de 0,83, 0,81, 0,84, 0,95 e 0,80, respectivamente. Estes resultados sugerem uma ligação substancial entre o fator de segurança e o N_{SPT} , indicando que o f_s pode ser uma métrica útil na avaliação das condições geotécnicas, particularmente nessas amostras. No entanto, algumas correlações precisam ser destacadas, em relação a baixa e/ou inexistência de correlação, como é o caso da C1 e C2, com valores 0,22 e 0,00, respectivamente.

5.9.3. Análise da correlação entre q_c e f_s

A análise da correlação entre a resistência à penetração (q_c) e o atrito lateral (f_s) apresenta resultados que variam significativamente entre as diferentes amostras. Destacam-se os casos C4, C5, C6, C12, C13 e C15, nos quais os coeficientes foram notavelmente elevados, atingindo valores de 0,97, 0,91, 0,91, 0,93, 0,94 e 0,90, respectivamente. Esses resultados indicam uma relação robusta e positiva entre a resistência à penetração e o atrito lateral

Dentre as análises, apenas 3 das 19 apresentaram valores abaixo de 0,50, que foi as correlações C1, C2 e C10, com 0,45, 0,45 e 0,47, respectivamente.

Nos 3 casos analisados, C1 e C2 se comportaram de modo que não apresentam correlação, fato que pode gerar a discrepâncias nas análises globais de correlação a serem desenvolvidas posteriormente. Logo, faz-se necessário pontuar se seria necessário a retirada desses dados das análises ou se uma reavaliação posterior dos mesmos seria necessária.

5.10. Resultado das correlações entre q_c , f_s , V_s e N_{SPT}

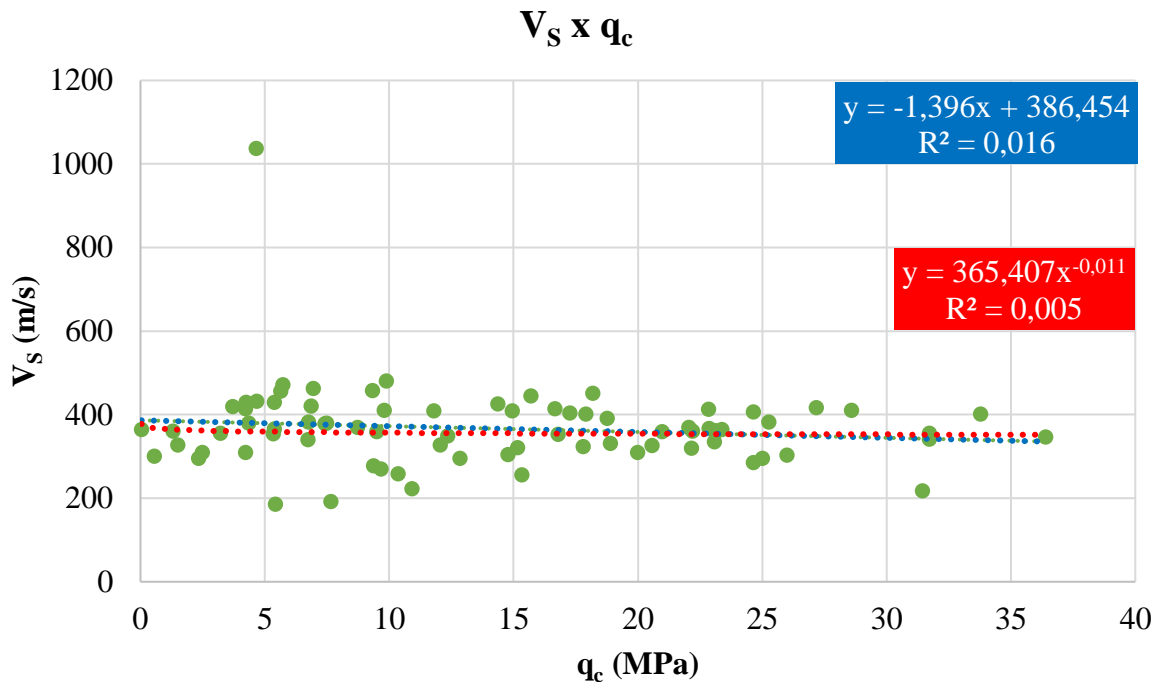
5.10.1. Correlação entre q_c , f_s e V_s dos ensaios SCPTu da ARB10

Correlação entre V_s e q_c

No Gráfico 13, é possível visualizar o comportamento de dispersão dos dados obtidos entre os valores de velocidade de onda cisalhante (V_s) e resistência de ponta (q_c) dos ensaios SCPTu da ARB10. Todos os dados utilizados estão no APÊNDICE J. Diante disso, foi possível determinar uma equação que representasse o comportamento dos dados e obter um R^2 , que

indica o quão representativo é essa equação. Os valores variam entre 0 e 1, quanto mais próximo de 1, mais representativo será o resultado.

Gráfico 13: Correlação entre V_s e q_c dos SPCTu's da ARB10.

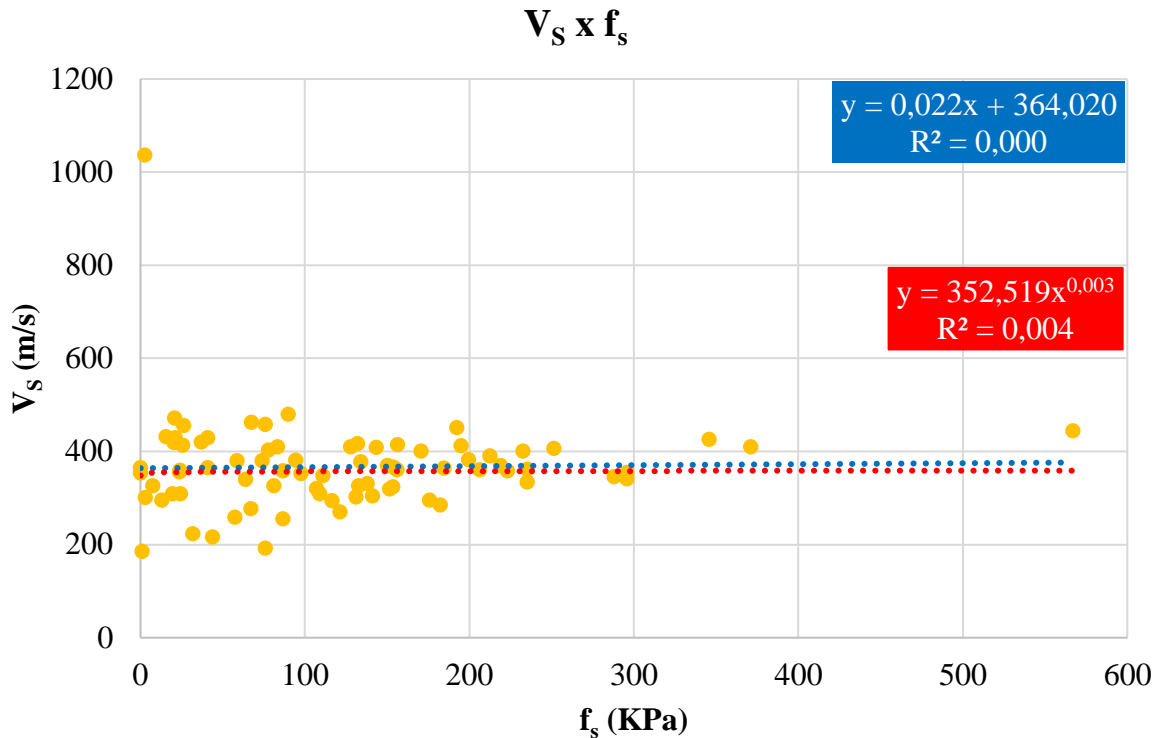


Após a plotagem dos dados no gráfico, determinou-se duas equações, sendo uma linear, destacada em azul e outra potencial, em vermelho. As duas equações obtiveram valores de R^2 , menores que 0,1, ou seja, estão muito próximos de zero. Tais resultados indicam que a correlação entre os dados não é boa. Não sendo possível obter uma equação que represente bem o comportamento dos dados.

Correlação entre V_s e f_s

No Gráfico 14, é possível visualizar o comportamento de dispersão dos dados obtidos entre os valores de velocidade de onda cisalhante (V_s) e o atrito lateral (f_s) dos ensaios SCPTu da ARB10. Todos os dados utilizados estão no APÊNDICE J. Diante disso, foi possível determinar uma equação que representasse o comportamento dos dados e obter um R^2 .

Gráfico 14: Correlação entre V_s e f_s dos SPCTu's da ARB10.



Após a plotagem dos dados no gráfico, determinou-se duas equações, sendo uma linear, em azul e outra potencial, em vermelho. As duas equações obtiveram valores de R^2 , ambos da ordem de 0,000. Tais resultados indicam que a correlação entre os dados não é boa. Não sendo possível obter uma equação que represente bem o comportamento dos dados. Isso decorre da grande dispersão de dados da linha de tendência obtida. Logo, não foi possível obter boas correlações entre os dados de $V_s \times q_c$ e $V_s \times f_s$.

5.10.2. Correlação entre q_c , f_s e N_{SPT} dos ensaios SCPTu e SPT da ARB10

Correlação entre q_c e f_s

Nos Gráfico 15 e Gráfico 16, é possível visualizar o comportamento de dispersão dos dados obtidos entre os valores de velocidade de resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s) dos ensaios SCPTu da ARB10. Foram obtidas duas equações, um de q_c em função de f_s e outra de f_s em função de q_c . Os dados de q_c e f_s utilizados, foram obtidos nas mesmas profundidades de dados obtidos com o ensaio N_{SPT} . Todos os dados utilizados estão no APÊNDICE J. Diante disso, foi possível determinar uma equação que representasse o comportamento dos dados e obter um R^2 , que indica o quão representativo é essa equação.

Gráfico 15: Correlação de f_s em função de q_c .

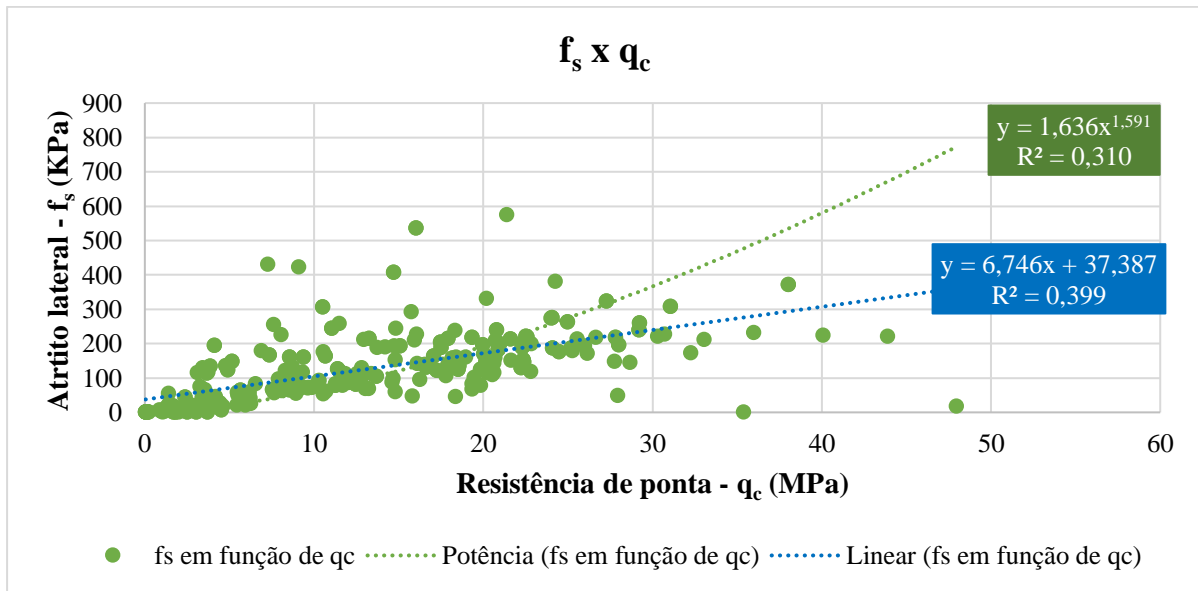
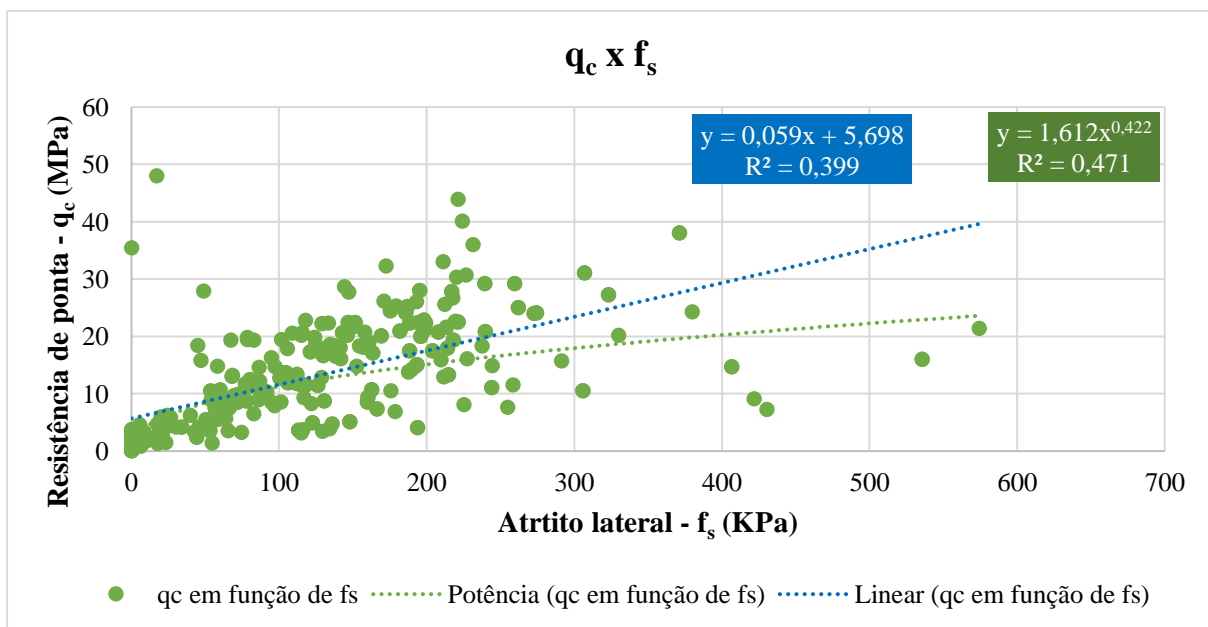


Gráfico 16: Correlação de q_c em função de f_s .



Na relação de f_s em função de q_c , foi obtido com a equação potencial um R^2 de 0,310, enquanto com a equação linear, um R^2 de 0,399. Ao analisar a relação q_c em função de f_s , foi obtido um R^2 de 0,471 com a equação potencial e um R^2 de 0,399 com a relação linear. Ao comparar com o R^2 de referência de Chasse e Brown (1992) para as 332 observações estudadas, que é 0,106, percebe-se que as equações obtidas são consideráveis e podem auxiliar na obtenção dos valores de resistência de ponta e atrito lateral quando ocorrerem ausência de dados e/ou erros de leituras.

Logo, propõe-se quatro equações (43, 44, 45 e 46) para obtenção dos dados de q_c e f_s . No entanto, as equações com melhor R^2 e com maior potencial de utilização são a 44 e a 45.

$$f_s = 1,636 \cdot q_c^{1,591} \quad \text{Equação 43}$$

$$R^2 = 0,310 \rightarrow 332 \text{ amostras.}$$

$$f_s = 6,746 \cdot q_c + 37,387 \quad \text{Equação 44}$$

$$R^2 = 0,399 \rightarrow 332 \text{ amostras.}$$

$$q_c = 1,612 \cdot f_s^{0,422} \quad \text{Equação 45}$$

$$R^2 = 0,471 \rightarrow 332 \text{ amostras.}$$

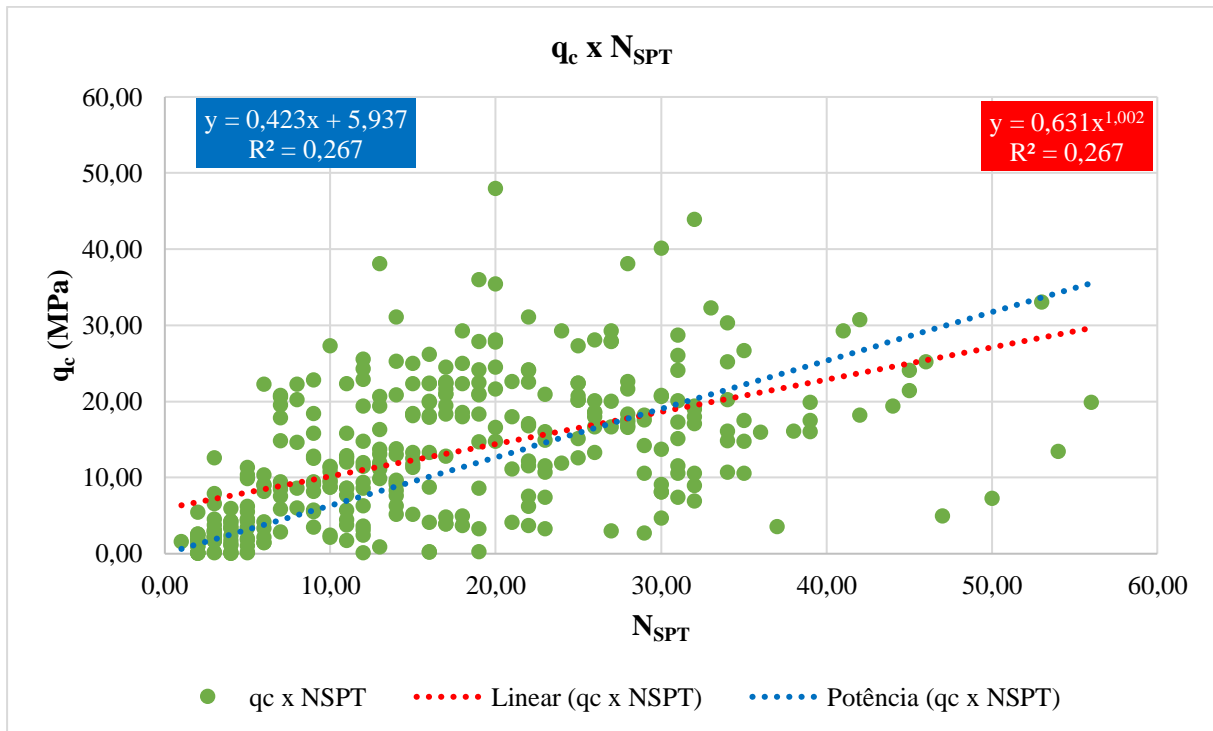
$$q_c = 0,059 \cdot f_s + 37,387 \quad \text{Equação 46}$$

$$R^2 = 0,399 \rightarrow 332 \text{ amostras.}$$

Correlação entre q_c e N_{SPT}

No Gráfico 17, é possível visualizar o comportamento de dispersão dos dados obtidos entre os valores de resistência de ponta (q_c) dos ensaios SCPTu e dos N_{SPT} obtido nos ensaios SPT da ARB10. Diante disso, foi possível determinar uma equação que representasse o comportamento dos dados e obter um R^2 , que indica o quão representativo é essa equação. Os valores variam entre 0 e 1, quanto mais próximo de 1, mais representativo o resultado será.

Gráfico 17: Correlação entre q_c e N_{SPT} dos SPCTu's e SPT's da ARB10.

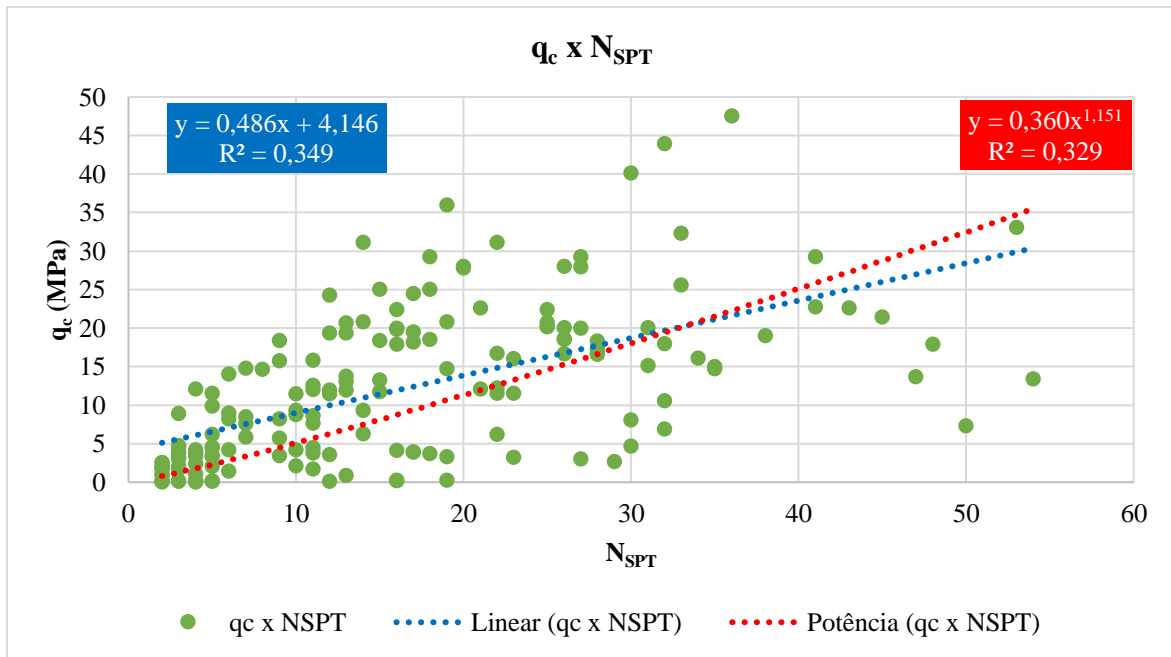


Após a plotagem dos dados no gráfico, determinou-se duas equações, sendo uma linear, em azul e outra potencial, em vermelho. Na literatura, conforme exposto por Cunha (2016) as relações entre q_c e N_{SPT} , são obtidas geralmente na forma de equações lineares. Das equações, foram obtidos um valor de R^2 de 0,267 para as relações linear e potencial.

O valor R^2 de 0,267 obtido com as equações, quando comparado ao valor de referência de Chasse e Brown (1992) de 0,106 para as 332 observações estudadas, indica que as equações obtidas possuem uma boa correlação e pode ser considerada aceitável para estimar os valores de resistência de ponta (q_c) com o uso do índice N_{SPT} .

Para efeitos de comparação, realizou-se uma nova plotagem, Gráfico 18, retirando os dados que apresentaram correlação da Tabela 40 menor que 0,60, objetivo de obter uma equação com um R^2 maior. Foi realizado a retirada de algumas correlações, restando os dados de C3, C4, C5, C6, C7, C12, C13, C14, C15 e C17. Utilizou-se os dados de 10 das 19 relações estudadas.

Gráfico 18: Correlação reanalisada entre q_c e N_{SPT} dos SPCTu's e SPT's da ARB10.



É notório o aumento que ocorreu no valor do R^2 da equação linear, antes da reanálise, o valor estava na ordem de 0,267, e após foi para 0,349. Em relação a equação potencial, não ocorreu grandes variações, saindo de 0,267 para 0,329. Devido a retirada de dados, o valor de referência para as 167 observações reanalisadas é de 0,160. Logo, as duas equações potenciais obtidas, antes e pós reanálise, estão aceitáveis para estimar os valores de q_c a partir dos dados de N_{SPT} . Logo, propõe-se duas equações (47 e 48) para estimar o q_c a partir do índice N_{SPT} .

$$q_c = 0,486 \cdot N_{SPT} + 4,146 \quad \text{Equação 47}$$

$$R^2 = 0,349 \rightarrow 167 \text{ amostras}$$

$$q_c = 0,360 \cdot N_{SPT}^{1,151} \quad \text{Equação 48}$$

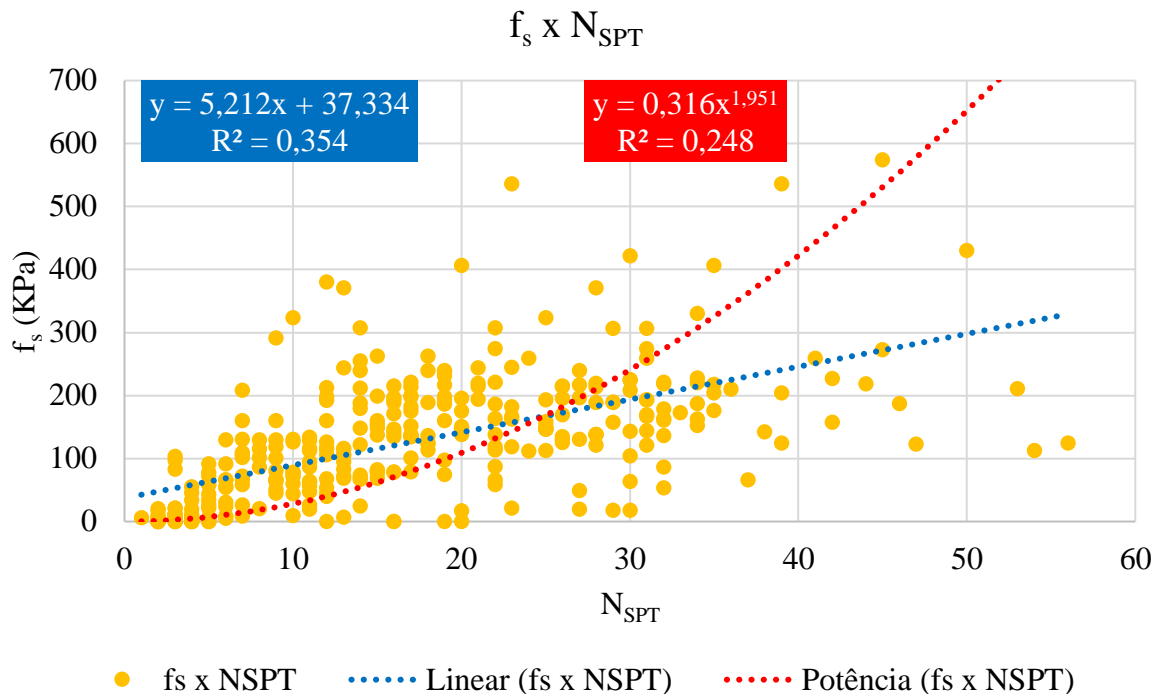
$$R^2 = 0,329 \rightarrow 167 \text{ amostras}$$

Correlação entre f_s e N_{SPT}

No Gráfico 19, é perceptível a representação do comportamento de dispersão dos dados coletados relativos aos valores de atrito lateral (f_s) nos ensaios SCPTu, em comparação aos resultados obtidos nos ensaios SPT realizados na área ARB10. Nesse contexto, foi

conduzida uma análise com o intuito de determinar uma equação que melhor expressasse o comportamento desses dados, sendo fundamental alcançar um coeficiente de determinação (R^2) significativo.

Gráfico 19: Correlação entre f_s e N_{SPT} dos SPCTu's e SPT's da ARB10



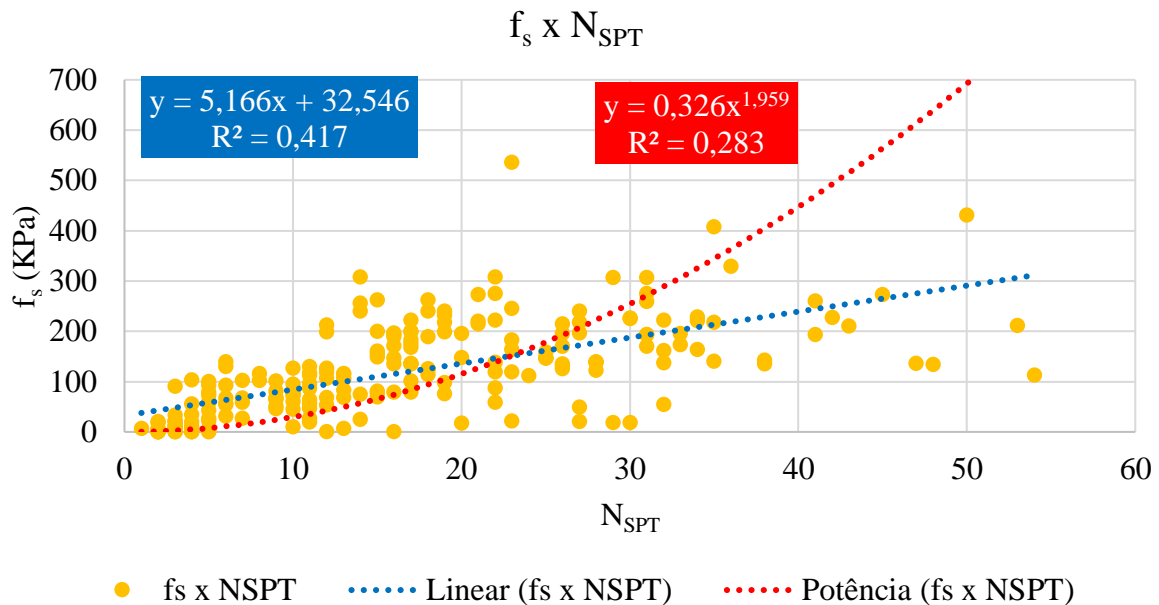
Após a representação gráfica dos dados, foram determinadas duas equações distintas, sendo uma linear (em azul) e outra potencial (em vermelho). Na literatura, de acordo com Cunha (2016), as relações lineares são as mais utilizadas para estimar os valores, tanto de q_c quanto de f_s a partir do N_{SPT} . Ambas as equações foram acompanhadas por coeficientes de determinação (R^2), registrando valores de 0,354 para a relação linear e 0,248 para a equação potencial. Em comparação com as correlações obtidas nas seções 5.10.1, observa-se uma melhoria substancial nas correlações a partir dessas novas equações. Estes resultados indicam uma melhor correlação entre os dados analisados.

O valor do coeficiente de determinação (R^2) de 0,354 obtido com a equação linear é significativamente superior ao valor de referência estabelecido por Chasse e Brown (1992), que é de 0,106 para o número total de 332 observações estudadas. Esse resultado indica que a equação possui uma correlação robusta e é capaz de fornecer estimativas confiáveis para os valores de atrito lateral (f_s) com base no índice N_{SPT} .

Contudo, realizou-se uma reanálise dos dados, retirando as correlações menores que 0,60, com objetivo de aumentar o R^2 . No Gráfico 20 é possível visualizar a nova dispersão

encontrada. Os valores tomados como referência estão na Tabela 40. Foi realizado a retirada de algumas correlações, restando os dados de C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C11, C12, C13, C15, C17 e C18. Foi utilizado os dados de 10 relações das 19 estudadas. Utilizou-se os dados de 13 das 19 correlações.

Gráfico 20: Correlação reanalisada entre f_s e N_{SPT} dos SPCTu's e SPT's da ARB10.



O aumento substancial nos valores do coeficiente de determinação (R^2) para a equação linear, de 0,354 para 0,417, após a reanálise, é um indicativo promissor do impacto positivo dessa revisão nos resultados. Essa melhoria sugere uma correlação mais robusta entre os dados de entrada (índice N_{SPT}) e os valores estimados de atrito lateral (f_s), o que aumenta a confiabilidade das previsões feitas por essa equação.

Por outro lado, mesmo que as variações na equação potencial sejam menos expressivas, passando de 0,248 para 0,283, essa mudança ainda é significativa e não deve ser menosprezada. Esse aumento no R^2 indica uma melhoria na capacidade da equação potencial em explicar a variação nos valores de atrito lateral com base nos dados de N_{SPT} .

Ao comparar esses valores de R^2 com o R^2 de referência para as 224 observações reanalisadas, que é de 0,130, pode-se concluir que tanto a equação linear quanto a equação potencial apresentam correlações significativas e promissoras para estimar os valores de atrito lateral a partir dos dados de N_{SPT} . Esses resultados indicam uma precisão bastante satisfatória nas previsões, o que é fundamental para aplicações geotécnicas e projetos de engenharia.

Logo, as duas equações, linear e potencial, obtidas pós reanálise, estão aceitáveis para estimar os valores de q_c a partir dos dados de N_{SPT} . Logo, tem-se duas equações (49 e 50) para estimar o q_c a partir do índice N_{SPT} .

$$f_s = 5,166 \cdot N_{SPT} + 32,456 \quad \text{Equação 49}$$

$$R^2 = 0,417 \rightarrow 332 \text{ amostras}$$

$$f_s = 0,326 \cdot N_{SPT}^{1,959} \quad \text{Equação 50}$$

$$R^2 = 0,283 \rightarrow 224 \text{ amostras}$$

5.10.3. Correlação entre q_c e f_s com $(q_c/Pa)/N_{SPT}$

O processo de normalização utilizado por autores como Cunha (2016) e Costa et al. (2022) consiste em uma técnica estatística empregada para comparar e analisar as relações entre parâmetros geotécnicos, tais como q_c , f_s e N_{SPT} . Essa normalização envolve a criação de um gráfico de dispersão, no qual os valores de q_c ou f_s são representados ao longo do eixo das ordenadas (y), enquanto uma razão (k) entre a resistência de ponta, a pressão atmosférica e o índice N_{SPT} é representada ao longo do eixo das abscissas (x), conforme expresso na equação 51.

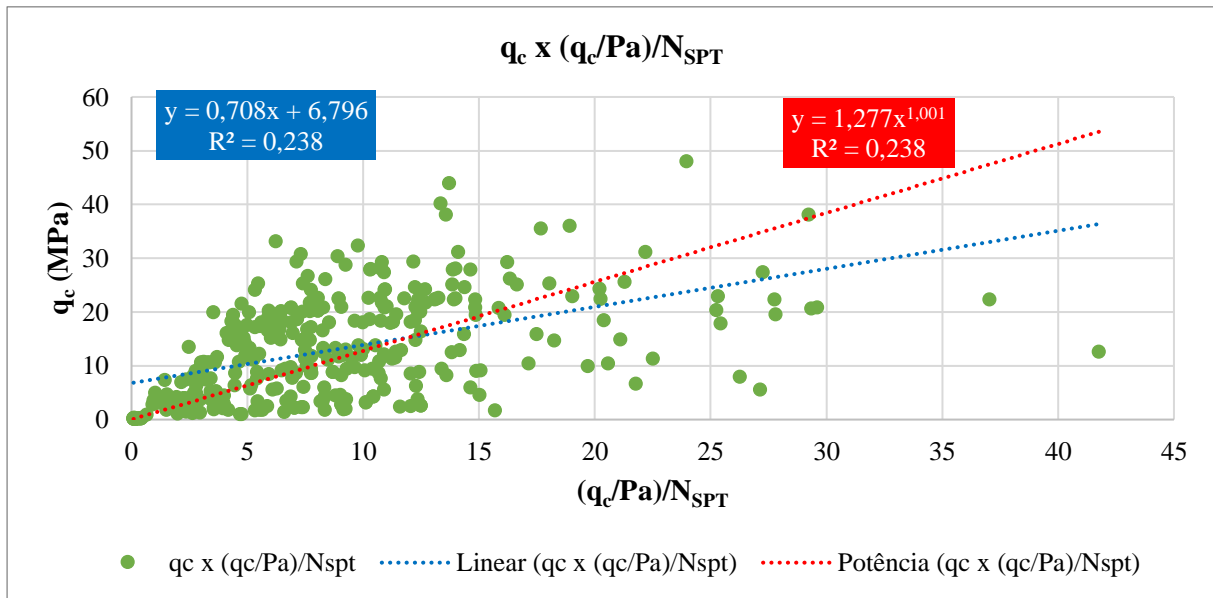
$$k = \frac{\left(\frac{q_c}{Pa}\right)}{N_{SPT}} \quad \text{Equação 51}$$

Onde Pa é a pressão atmosférica.

Correlação entre q_c e $(q_c/Pa)/N_{SPT}$

O Gráfico 21 apresenta o comportamento da relação analisada entre a resistência de ponta e o parâmetro k, utilizado para normalizar os resultados.

Gráfico 21: Correlação entre q_c e $(q_c/Pa)/N_{SPT}$.



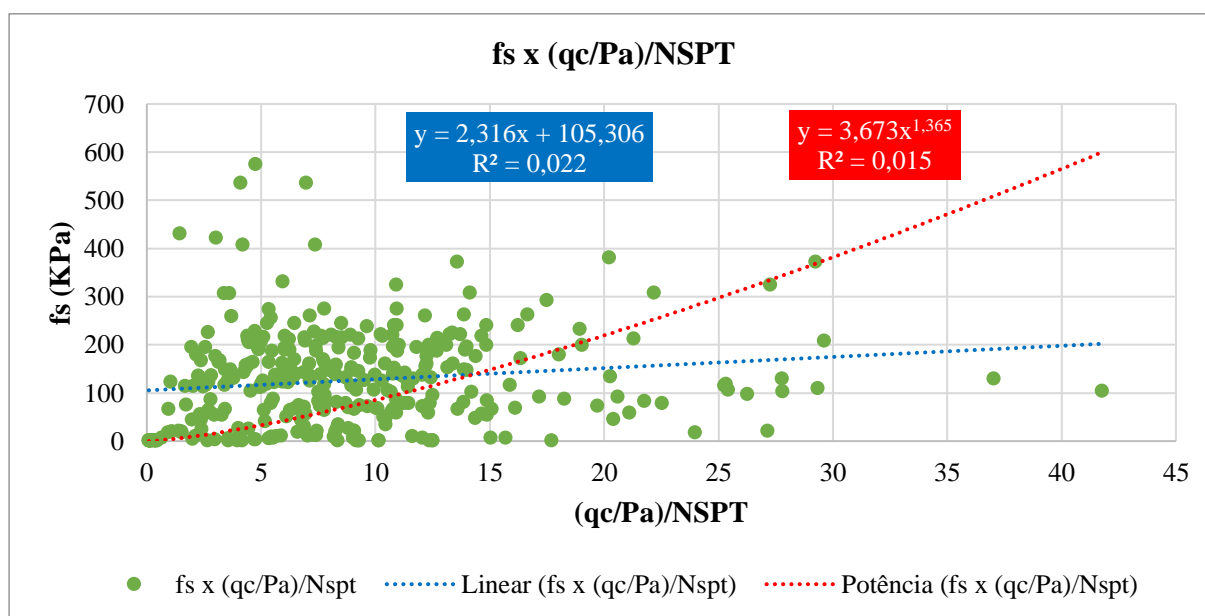
Ao realizar a análise da dispersão, diferentemente do encontrado pelo autor Cunha (2016), a relação potencial encontrou um valor de R^2 superior ao linear, para o caso estudado. Por outro lado, Cunha (2016), além da análise geral com todos os dados, também analisou pontualmente cada ensaio, já Costa et. al. (2022), assim como nesse trabalho, analisou os valores apenas globalmente, no entanto, não especificou os valores de R^2 encontrado.

Tendo como referência o valor de R^2 de 0,106 para as 332 observações analisadas de acordo com Chasse e Brown (1992), os dois valores de R^2 encontradas, pela análise linear ($R^2=0,238$) e potencial ($R^2=0,238$), são aceitáveis.

Correlação entre f_s e $(q_c/Pa)/N_{SPT}$

O Gráfico 22 apresenta o comportamento da relação analisada entre a resistência de ponta e o parâmetro k , utilizado para normalizar os resultados.

Gráfico 22: Correlação entre f_s e $(q_c/Pa)/N_{SPT}$.



A análise da dispersão realizada neste estudo revelou resultados contrastantes com os encontrados pelo autor Cunha (2016). Enquanto a relação potencial apresentou um valor de R^2 inferior ao linear para o caso estudado, com um R^2 máximo de 0,015, a análise linear conduzida por Cunha resultou em um R^2 de 0,524. Vale ressaltar que Costa et al. (2022) não forneceram os valores de R^2 encontrados em sua pesquisa, impossibilitando uma comparação direta dos resultados.

Considerando o valor de referência de R^2 de 0,106 para 332 observações conforme relatado por Chasse e Brown (1992), constatou-se que os R^2 obtido pela análise linear ($R^2=0,022$) e potencial ($R^2=0,015$) não atenderam aos requisitos mínimos estabelecidos, invalidando a utilização dessa equação para estimar f_s .

5.11. Análise dos resultados das correlações

As correlações estudadas no item 5.10.1, não foram representativas. Os valores de R^2 analisados das correlações entre V_s x q_c e V_s x f_s , ficaram abaixo de 0,1, o que indica que não há correlação entre os parâmetros. Logo, verificou-se que com os dados analisados não é possível inferir os resultados de V_s apenas com os dados de resistência de ponta e atrito lateral obtidos no ensaio SCPTu convencional.

No que se refere ao item 5.10.2, foram obtidos valores mais representativos, variando de 0,267 a 0,471. As melhores relações obtidas foram com as equações lineares dos dois comparativos, q_c x N_{SPT} e f_s x N_{SPT} , antes da reanálise, os valores foram de 0,267 e 0,354,

respectivamente. Após a reanálise, os melhores resultados de R^2 continuaram sendo provenientes das equações lineares, sendo 0,349 para a resistência de ponta e 0,417 para o atrito lateral. A diminuição no número de dados e a melhoria na qualidade dos dados na reanálise do item 5.10.2, foi de extrema importância no entendimento do comportamento dos dados estudados e na obtenção de melhores resultados.

As análises realizadas no item 5.10.3, auxiliaram no entendimento do comportamento dispersivo entre os dados de resistência de ponta, atrito lateral e índice N_{SPT} , no entanto, é mais salutar utilizá-lo apenas para efeito de análise, sendo as equações encontrados no item 5.10.2, mais representativas e de mais fácil entendimento e aplicação.

A reanálise desempenhou um papel crucial no aprimoramento do entendimento dos dados, destacando a importância de um cuidadoso tratamento estatístico para garantir a robustez e confiabilidade das correlações. Nesse sentido, propõe-se a implementação de medidas específicas para otimizar a qualidade dos dados, como a redução do número de correlações na plotagem, focando naquelas que exibem coeficientes superiores a 0,80, por exemplo.

Além disso, a identificação e remoção de *outliers* são passos essenciais na busca por uma representação mais precisa dos dados. As leituras de velocidade excedendo 1000m/s e resistências de ponta zeradas como exemplos de *outliers* reforça a necessidade de um processo rigoroso de filtragem para eliminar essas observações discrepantes que podem distorcer as análises estatísticas.

A incorporação dessas medidas de refinamento contribuirá significativamente para a obtenção de dados mais confiáveis, fortalecendo as bases para conclusões mais sólidas e confiáveis no contexto da pesquisa em questão.

5.12. Considerações sobre os resultados

Ao longo do trabalho, algumas equações foram analisadas, visando facilitar a obtenção de dados geotécnicos, como as velocidades de onda cisalhantes (V_s) através de parâmetros do SPT e do SPCTu. Outros parâmetros que tiveram equações determinadas foram a obtenção do módulo de cisalhamento (G_o) em função da resistência de ponta do SPCTu (q_c), a obtenção da resistência de ponta (q_c) e do atrito lateral (f_s) em função do N_{SPT} , além das relações entre q_c e f_s .

Algumas equações determinadas, como V_s em função de q_c e f_s , não foram representativas, logo, tiveram de ser desconsideradas para esse estudo. No entanto, foi possível

determinar 9 equações de correlações para estimativa de parâmetros. Na Tabela 41, é identificado a equação e o número correspondente no trabalho, o R² e a descrição da equação.

Tabela 41: Resumo das equações propostas.

Item	Equação	Nº da equação	R ²	Descrição
5.4.4	$V_{S-MASW} = 0,787 \cdot V_{S-SCPTu} + 80,662$	38	0,660	Estimativa do valor de V _S -MASW a partir do valor de V _S SCPTu
5.5	$V_S = 236,371 \cdot N_{SPT}^{0,120}$	39	0,330	Estimativa do valor de V _S a partir do índice N _{SPT}
5.7	$G_o = 178,946 \cdot q_c^{0,139}$	42	0,082	Estimativa do valor de G _o a partir da resistência de ponta (q _c) do SCPTu
5.10.2	$f_s = 1,636 \cdot q_c^{1,591}$	43	0,310	Estimativa do valor de atrito lateral (f _s) a partir da resistência de ponta (q _c)
	$f_s = 6,746 \cdot q_c + 37,387$	44	0,399	
	$q_c = 1,612 \cdot f_s^{0,422}$	45	0,471	Estimativa do valor de resistência de ponta (q _c) a partir do atrito lateral (f _s)
	$q_c = 0,059 \cdot f_s + 5,698$	46	0,399	
	$q_c = 0,360 \cdot N_{SPT}^{1,151}$	47	0,329	
	$q_c = 0,486 \cdot N_{SPT} + 4,146$	48	0,349	Estimativa do valor de resistência de ponta (q _c) a partir do índice N _{SPT}
	$f_s = 0,326 \cdot N_{SPT}^{1,959}$	49	0,283	Estimativa do valor de atrito lateral (f _s) a partir do índice N _{SPT}
	$f_s = 5,166 \cdot N_{SPT} + 32,546$	50	0,417	

A equação 38 proporciona uma alternativa valiosa na ausência do ensaio MASW, permitindo a estimativa da velocidade de onda cisalhante (V_S) com base nos dados de V_S obtidos pelo SCPTu. Observou-se que o MASW, ao analisar as médias de velocidades ao longo de um perfil 2D, apresenta uma amplitude de dados mais abrangente, caracterizada pela ausência de variações abruptas nas leituras. Em contraste, as medições pontuais de V_S realizadas com o SCPTu não seguem um padrão uniforme de profundidade para todos os ensaios, resultando em variações mais acentuadas quando os intervalos entre medições são longos, como, por exemplo, a cada 4 metros.

Ao comparar os valores de V_S obtidos em ambos os ensaios, MASW e SCPTu, observou-se uma tendência de convergência entre as leituras, embora em determinados pontos o MASW apresentasse valores superiores, enquanto em outros registros inferiores aos do SCPTu.

A equação 39 pode ser uma ferramenta valiosa na estimativa das velocidades de onda cisalhante na falta de ensaios sísmicos, uma vez que ela permite estimar V_S com base no valor do N_{SPT} . Quanto às equações 45 e 46, trata-se essencialmente da mesma relação, diferenciando-se apenas na forma como o parâmetro a ser determinado é isolado. As equações 47 a 50 oferecem a possibilidade de estimar apenas do ensaio SPT. Entre as equações propostas, algumas se destacam pelo seu potencial de aplicação, influenciado principalmente pela ausência de dados de ensaios, como os valores de V_S , q_c , f_s , e pelos valores de R^2 obtidos. Nesse contexto, merecem menção as equações 39, 44, 45, 48 e 50.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi explorar a eficácia dos ensaios de Penetração Padrão (SPT), Cone de Penetração Sísmica (SCPTu) e Análise Multicanal de Ondas Sísmicas (MASW) como ferramentas para caracterizar solos naturais em áreas de barragens de resíduos de bauxita no estado do Maranhão. As análises realizadas a partir dos resultados desses ensaios visaram compreender melhor o comportamento dos solos nessas áreas e fornecer suporte para a obtenção de dados que auxiliem no projeto, gestão e planejamento de segurança das barragens. A seguir, apresentamos as conclusões fornecidas por cada etapa de análise conduzida nesta pesquisa.

- a) Comparar e analisar os resultados de velocidade de ondas sísmicas (V_s) obtidos pelo SCPTu e pelo MASW, identificando eventuais discrepâncias ou concordâncias nos dados em diferentes seções das áreas de solos naturais e barragem da Alumar;

Os resultados sugerem que os dados do SCPTu são representativos e podem ser utilizados em análises geotécnicas, especialmente quando os ensaios MASW não são viáveis devido à falta de recursos. A introdução do SCPTu em campanhas de ensaios de CPTu em andamento pode resultar em ganhos econômicos significativos, eliminando a necessidade de realizar ensaios adicionais e otimizando o tempo de análise dos dados. Assim, o SCPTu emerge como uma alternativa viável em casos em que o ensaio MASW não é uma opção.

- b) Analisar as variações nos módulos de cisalhamento (G) em diferentes estratos de solo e barragem;

A análise comparativa dos módulos de cisalhamento (G) entre diferentes métodos de medição destacou variações significativas em diversos pontos de análise. A relação entre G_{02} (determinado pelo MASW) e G_{05} (adquirido via SCPTu) evidenciou disparidades notáveis, com variações chegando a 152,72% em certos locais. No entanto, 7 das 19 relações apresentaram variações inferiores a 10%, indicando uma correlação mais favorável em casos específicos.

Destaca-se a relação entre G_{02} e G_{05} como a mais consistente, com um R^2 de 0,975 e variações inferiores a 10%. Apesar das aproximações no cálculo, o parâmetro G_{02} demonstrou excelente desempenho e correlação com os valores de SCPTu. No geral, as relações analisadas, exceto aquela envolvendo o valor de G_{06} , apresentaram bons valores de R^2 , indicando consistência e pouca variação entre eles.

- c) Estudar a correlação entre dados de velocidade de ondas sísmicas com o N_{SPT} ;

Foram estudadas seis relações entre V_S do MASW, V_S do SCPTu e V_S calculado com o N_{SPT} em diferentes profundidades. Os dados foram comparados e analisados por meio de curvas de dispersão, e a partir da análise de dispersão dos dados, propôs-se a Equação 39, que permite estimar V_S a partir do N_{SPT} .

- d) Comparar os valores obtidos de velocidades de onda cisalhante no SCPTu e MASW com os calculados a partir do N_{SPT} ;

Ao comparar os resultados obtidos com a equação 39, na determinação de V_S em relação ao N_{SPT} , com equações propostas por Fialho Rodrigues (1979), Maheshwari et al. (2008) e Dikmen (2009), observou-se uma discrepância entre os valores calculados e os obtidos pelos métodos de ensaio. Enquanto as curvas calculadas a partir das equações se assemelhavam à dispersão dos dados do SCPTu e N_{SPT} , os valores de V_S do MASW apresentaram uma diferença significativa. Isso sugere possíveis diferenças nos tipos de solo propostas por Fialho Rodrigues (1979), de Maheshwari et al. (2008) e Dikmen (2009).

- e) Comparar os valores obtidos de módulo de cisalhamento no SCPTu e MASW com os calculados a partir do q_c ;

No item 3.7.7, foram apresentadas duas equações (42 e 43) que usam os valores de q_c do ensaio SCPTu para estimar os módulos de cisalhamento. A equação 40 de Simonini e Cola (2000) e a equação 41 de Bouckovalas et al. (1989) foram comparadas com os valores de G_o obtidos pelo SCPTu (G_{o5}) e o módulo de cisalhamento com melhor correlação obtido pelo MASW, que foi o G_{o2} . A plotagem dos dados em gráficos revelou que a equação de Bouckovalas et al. (1989) se dispersou consideravelmente dos outros valores.

Após o refinamento dos dados, observou-se que os módulos de cisalhamento obtidos pelo MASW e SCPTu apresentam comportamentos bastante similares. Entretanto, os valores de R^2 foram de 0,082 para o MASW e 0,014 para o SCPTu, abaixo do valor de referência de 0,240. A equação derivada dos valores de G_{o2} apresentou o R^2 mais próximo desse referencial, no entanto, relação entre o módulo de cisalhamento e a resistência de ponta não foi significativa.

- f) Avaliar a correlação entre resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s) com a velocidade de ondas sísmicas (V_S) obtidas por SCPTu e MASW;

Após a análise da correlação entre os valores de velocidade de onda cisalhante (V_S) e as medidas de resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s) nos ensaios SCPTu da ARB10, foi

possível determinar equações que representassem o comportamento dos dados. No entanto, ambas as equações, tanto para $V_S \times q_c$ quanto para $V_S \times f_s$, apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2) muito próximos de zero. Esses resultados indicam uma correlação extremamente fraca entre V_S e as medidas de q_c e f_s , sugerindo que não há uma relação significativa entre esses parâmetros nos dados analisados. Portanto, não foi possível estabelecer correlações confiáveis entre V_S e q_c , assim como entre V_S e f_s .

g) Avaliar a correlação entre resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s) com o índice N_{SPT} .

Nas correlações entre q_c e N_{SPT} e f_s e N_{SPT} , tanto a equação linear quanto a equação potencial apresentaram bons resultados, obtendo valores de R^2 acima da referência. Foi proposto 4 equações, duas lineares e duas potenciais para estimar os valores de q_c e f_s a partir do N_{SPT} (equações 47 a 50). A equação 48, linear, possui o melhor R^2 para estimar os valores de q_c a partir do N_{SPT} , enquanto a equação 50, potencial, possui o melhor R^2 para estimar f_s a partir do N_{SPT} .

Esses resultados evidenciam a importância da reanálise dos dados, demonstrando uma relação mais robusta entre a resistência de ponta, o atrito lateral e o índice N_{SPT} . Os valores de R^2 obtidos após a reavaliação são consideravelmente superiores aos valores de referência, confirmando a confiabilidade das equações propostas e oferecendo uma base mais sólida para futuras estimativas e análises. Assim, com base nos valores de R^2 obtidos, pode-se afirmar que tanto a resistência de ponta (q_c) quanto o atrito lateral (f_s) apresentam uma correlação significativa e promissora com o índice N_{SPT} , fornecendo estimativas confiáveis para esses parâmetros com base nos dados do SPT.

Diante do exposto, ficou evidente que na ausência de dados, é viável estimar valores de velocidade de onda cisalhante, resistência de ponta, atrito lateral e módulo de cisalhamento a partir de dados obtidos por diferentes ensaios. Algumas equações propostas neste estudo foram validadas com um nível de confiança de 95%, conforme os valores de R^2 de referência estabelecidos por Chasse e Brown (1992). No entanto, é importante ressaltar que os dados analisados refletem as características dos solos da região estudada, podendo não ser totalmente representativos para outras regiões. Assim, a validação das equações em solos de diversas localidades e com diferentes propriedades se faz necessária.

Nesse contexto, torna-se evidente o potencial significativo do método SCPTu na determinação dos valores de V_S , dispensando, portanto, a realização do ensaio MASW quando já se dispõe de dados provenientes do SCPTu. Essa constatação não apenas simplifica o

processo de obtenção de dados geotécnicos, mas também otimiza os recursos, eliminando a necessidade de conduzir ensaios adicionais quando há disponibilidade de informações suficientes provenientes do SCPTu.

Na ausência de dados sísmicos obtidos com o SCPTu ou MASW, a estimativa da velocidade das ondas cisalhantes (V_s) a partir dos ensaios SPT pode emergir como uma alternativa viável no levantamento geotécnico, como medida preliminar para análise dos dados. Essa abordagem, embora não seja tão precisa quanto a obtenção direta por métodos sísmicos, pode oferecer uma solução mitigadora, especialmente em situações em que recursos limitados ou restrições operacionais inviabilizam a realização de ensaios mais elaborados. A aplicação do SPT para estimar a V_s pode proporcionar uma avaliação preliminar da subsuperfície e ajudar a orientar as próximas etapas de investigação geotécnica, embora deva ser realizada com cautela e considerando as limitações inerentes a essa abordagem.

Vale ressaltar que nenhuma estimativa de dados por meio de equações, onde são aplicados dados referentes a outros ensaios, substituem os ensaios específicos para o levantamento de dados. Entretanto, as estimativas dos dados podem auxiliar nas avaliações preliminares dos solos, auxiliar nas tomadas de decisões quanto a realização de novos ensaios, além de surgir como uma maneira de analisar possíveis discordâncias entre os dados.

6.2.Sugestões para trabalhos futuros

- Utilizar métodos estatísticos ou modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA) para elaboração das equações que levem em consideração também o parâmetro de profundidade (Z) na estimativa de V_s , q_c e f_s em função do N_{SPT} ;
- Comparar V_s para cada profundidade específica;
- Separar e analisar V_s e G a partir de cada tipo de solo (areia, silte, argila);
- Expandir as análises de determinação dos parâmetros V_s , q_c , f_s e G_o para outras regiões do Brasil e aumentar o número de dados utilizados na elaboração de cada correlação;
- Estudar a interferência dos valores de S_u (resistência não drenada) e u (poropressão) no comportamento das equações, $V_s \times q_c$, $V_s \times f_s$, $G_o \times q_c$, $V_s \times N_{SPT}$, $q_c \times N_{SPT}$, $f_s \times N_{SPT}$;
- Utilizar-se de métodos estatísticos ou RNA para estimar o V_{S30} a partir dos valores de V_s SCPTu, q_c , f_s e/ou N_{SPT} .

7. REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10905: solo – ensaios de palheta in situ**. 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: ABNT, 1991.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15935: Investigações ambientais — Aplicação de métodos geofísicos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16796: Solo — Método padrão para avaliação de energia em SPT**. Rio de Janeiro: ABNT, 10/2020.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6484 – Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio**. 2000. 32p. Rio de Janeiro.
- ABREU, A. E. S.; GANDOLFO, O. C. B.; VILAR, O. M. **Characterizing a Brazilian Sanitary Landfill Using Geophysical Seismic Techniques**. Waste Management, v. 53, p. 116-127, 2016.
- AFC GEOFÍSICA (Porto Alegre). **Sísmicos: sísmica de reflexão. Sísmica de Reflexão**. Disponível em: <<http://www.afcgeofisica.com.br/metodos/sismicos/>>. Acesso em: 19 dez. 2023.
- AGAIBY, Shehab; MAYNE, Paul. **Use of shear wave velocity to estimate stress history and undrained shear strength of clays**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016.
- ALUMAR. **Localização dos ensaios de investigações geotécnicas da ARB's**. São Luís, 2023.
- ÁLVAREZ, Bosco Intriago et al. **Geotechnical characterization of the estuarine deltaic deposits in the Guayaquil city through in situ and laboratory tests**. Soils And Rocks, São Paulo, v. 45, n. 3, p. 1-15, 9 jul. 2022. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.28927/sr.2022.074021>>. Acesso em: 9 jul. 2022.
- ANDRUS R.D., MOHANAN N.P., PIRATHEEPAN P., ELLIS B.S., HOLZER T.L. (2007). Predicting shear-wave velocity from cone penetration resistance. Proceedings, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece.
- ARMADA, Charles Alexandre Souza. **Os desastres ambientais de Mariana e Brumadinho em face ao estado socioambiental Brasileiro**. Territorium, n. 28 (I), p. 13-22, 2021.
- ASTEN, M.W., 1978. Geological control of the three-component spectra of Rayleigh-wave microseisms. Bulletin of the Seismological Society of America 68 (6), 1623–1636.
- ASTEN, M.W., Henstridge, J.D., 1984. Arrays estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. Geophysics 49 (11), 1828–1837.
- ASTM – American Society of Testing and Materials. **D5778-12: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils**, 2012.

ASTM – American Society of Testing and Materials. **D 2573: Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil.** USA: ASTM, 2008.

ASTM – American Society of Testing and Materials. **D 4719: Standard Test Methods for Prebored Pressuremeter Testing in Soils.** USA: ASTM, 2020.

ASTM – ASTM - American Society of Testing and Materials. **D 5777: Standard Guide for Using Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation.** USA: ASTM, 2006.

ASTM – American Society of Testing and Materials. **D 5778: Standard test method for performing electric friction cone and piezocone penetration testing of soils.** USA: ASTM, 2000.

ASTM – American Society of Testing and Materials. **D 2573-08 - Standard test method for field vane shear test in cohesive soil,** 2008.

AYRES NETO, A. **Uso da Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e da Sonografia na Exploração Mineral Submarina.** Revista Brasileira de Geografia, v. 18, n. 3, p. 241-256, 2000.

BARRERA, S.; VALENZUELA, L.; CAMPAÑA, J. **Sand Tailings Dams: Design, Construction and Operation.** In: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TAILINGS AND MINE WASTE, 15., 2011, Vancouver. Proceedings... Tailings and Mine Waste. Vancouver: Institute Of Mining Engineering. p. 1 – 6. 2011.

BARROS, Márcio Luiz de Siqueira Campos. **Modelo de aferição da velocidade de partículas através de parâmetro energético.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE. 2008.

BELICANTA, A.; Ferraz, R. L. **Fundamentos e métodos de medidas de energia dinâmica no SPT.** Acta Scientiarum, UEM, v. 22, n. 5, p. 1473-1482, 2000.

BELLO, M. I. M. C. V. **Parâmetros geotécnicos e banco de dados de argilas moles: o caso de Suape.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco. UFPE. Recife, 2011.

BOAS, D. B. R. **Sísmica de Reflexão para Alvos Geotécnicos.** Trabalho de Conclusão de Curso, UFBA, Salvador, BA, 86 p, 2014.

BOLT, B. A. **Inside the Earth: Evidence from Earthquakes.** W. H. Freeman and Company, San Francisco, USA, 191 p, 1982.

BONNEFOY-CLAUDET, S.; COTTON, F.; BARD, P. Y. **The Nature of Noise Wavefield and Its Applications for Site Effects Studies: A Literature Review.** Earth-Science Reviews, v. 79, n. 3-4, p. 205-227, 2006.

BOUCKOVALAS G., KALTEZIOTIS N., SABATAKAKIS N., ZERVOGIANNIS H. (1989). **Shear wave velocity in a very soft clay-measurements and correlations.** Proceedings, 12th International Conference Soil Mechanics Foundation Engineering (ICSMFE), Rio de Janeiro, Brazil, pp. 191–194

BRASIL. **Lei nº 14066,** de 30 de setembro de 2020. Brasília, 2020.

BRAZ, Evandro Medeiros. **Identificação e caracterização de solos colapsíveis em fundações de aerogeradores.** Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc, Florianópolis, 2022.

BRIAUD J. L. (1992). “The Pressuremeter”. Published by Balkema, Rotterdam.

BUTCHER, A. P.; CAMPANELLA, R. G.; KAYNIA, A. M.; MASSARCH, K. R. **Seismic cone downhole procedure to measure shear wave velocity - A guideline.** The International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Technical Committee No 10: Geophysical testing and geotechnical engineering, 2005.

BUTCHER, A. P.; POWELL, J. J. M. **Practical considerations for field geophysical techniques used to assess ground stiffness.** In: Advances in site investigation practice. Thomas Telford, London, Proceedings..., v. 2, 1996, p. 701-714.

CAMPANELLA, R. G.; HOWIE, J.A. **Guidelines for the use, interpretation and application of seismic piezocone test data.** Geotechnical Research Group Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2008.

CAMPANELLA, R. G.; ROBERTSON, P. K.; GILLESPIE, D. **Seismic Cone Penetration Test.** Geotechnical Eng. Div. Journal (ASCE). Geotechnical Special Publication (GSP), n. 86, p. 116-129, 1986.

CAMPANELLA, R. G.; STEWART, W. P. **Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization.** Canadian Geotechnical Journal, v. 29, n. 3, p. 477-486, 1992.

CARDOZO, F. A. C.; PEÑA, F. P.; ZINGANO, A. C. **Considerações e Comparações entre Métodos Construtivos de Barragens de Rejeito.** In: 9º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, 2018, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: IBRAM, MG. 2018.

CARDOZO, F. A. C.; PEÑA, F. P.; ZINGANO, A. C. **Considerações e Comparações entre Métodos Construtivos de Barragens de Rejeito.** In: 9º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, 2018, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: IBRAM, MG. 2018.

CARDOZO, F. A. C.; RIVER, C. A. **Considerações a Riscos em Barragens de Rejeito.** 2019.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini. **BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO: CONSIDERAÇÕES GERAIS E ASPECTOS GEOTÉCNICOS.** 2019. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. **Métodos Construtivos de Barragens de Rejeitos de Mineração–Uma Revisão.** HOLOS, v. 8, p. 77-85, 2016.

CASTRO, Paulo de Tarso A.; RUCHKYS, Úrsula; MANINI, Rafael Tertolino. **A sociedade civil organizada e o rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG): porque é preciso difundir a Geoética.** Terræ Didática, v. 14, n. 4, p. 439-444, 2018.

CASTRO, Paulo de Tarso A.; RUCHKYS, Úrsula; MANINI, Rafael Tertolino. **A sociedade civil organizada e o rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG): porque é**

preciso difundir a geoética. Terrae Didactica, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 439-444, 2018. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8654194>. Acesso em: 27 nov. 2019.

CAVALCANTE, E. H. **Investigação teórico-experimental sobre SPT.** Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

CHANDLER, R. **The In-Situ Measurement of the Undrained Shear Strength of Clays Using the Field Vane. Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies.** 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1988. p. 13-13–32.

CHASSE, W.; BROWN, F. **General Statistics.** New York, John Wiley & Sons, Inc. 1992.

COMISSÃO PARLAMENTAR DE INQUÉRITO. **Relatório Final Consolidado. Rompimento da Barragem de Brumadinho.** Outubro de 2019.

CORDANI, U. G.; BRITO NEVES, B. B. de; THOMAZ FILHO, A. **Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras (atualização).** Boletim de Geociências da Petrobras, v. 17, n. 1, p. 205-219, nov. 2008/mai. 2009.

COSTA, Ana Rita Alves da. **Análise da aplicabilidade de vs30 na classificação do local e no mapeamento de liquefação.** Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2022.

COSTA, Gabriel Fernando et al. **Interpretação dos Resultados de Ensaios SPT e CPTu Realizados no Município de Biguaçu – SC.** In: Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica, 20., 2022, Campinas. Anais [...] . [S.L.]: Cobramseg, 2022. p. 7584-7591.

COSTA, M.L. da. **A dinâmica de formação de lateritas: o exemplo do NE do Pará e do NW do Maranhão.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984. Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: SBG. 1984. v. 4, p. 4.823-4.837.

CPRM. BARROS, José Sidiney (org.); BANDEIRA, Íris Celeste Nascimento. **Geodiversidade da Ilha do Maranhão.** Teresina: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2020. 149 p.

CRESSIE, Noel. **Statistics for spatial data.** John Wiley & Sons, 2015.

CUNHA, Emanuel Erivan Silva da. **Correlações entre resultados de ensaios SPT e CPT para solo arenoso sedimentar.** 2016. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 561 pp. ISBN 85-221-0548-0.

DAVIES, M. P. e MARTIN T. E. **Upstream constructed tailings dams - A review of the basics.** Tailings and Mine Waste 00. Colorado, USA, A.A. Balkema, Rotterdam: pp. 3-15. 2000.

DAVIES, M.P. & CAMPANELLA, R.G. **Piezoconetechology: downhole geophysics for the geoenvironmental characterization of soil.** In: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, SAGEEP'95, 1995, Orlando. Proceedings... Orlando (Florida, USA), 1995, 11 p.

DE SOUZA, Talles Jhonattan Elias. **Os impactos ambientais decorrentes do rompimento da barragem em Mariana.** Revista do CNMP, n. 7, p. 139-145, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Método de Ensaio DNIT-ME 045/95 - Prospecção geofísica pelo método da sísmica de refração.** Brasília: DNIT, 1995.

DIKMEN, Ü. (2009). Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(1), 61-72.

DUAN, W. et al. **Characterizing the in-situ state of sandy soils for liquefaction analysis using resistivity piezocone penetration test.** *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 164, 107529, 2023.

DUARTE O. O. **Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia.** Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1997. 304p.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco.** Dissertação de mestrado apresentada a Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

EBELING, C. W. **Chapter One – Inferring Ocean Storm Characteristics from Ambient Seismic Noise: A Historical Perspective.** *Advances in Geophysics*, v. 53, p. 1-33, 2012.

EIKMEIER, Claus Naves. **Análise multicanal de ondas de superfície (MASW): um estudo comparativo com fontes ativas e passivas, ondas rayleigh e love e diferentes modos de propagação.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

ENGELS, J. **Risk Reduction Actions for Substandard or Impaired Tailings Facilities.** Report of the European RTD project TAILS SAFE, <http://www.tailSAFE.com/>, 29 p. 2004.

EPA - Environmental Protection Agency. **Design and evaluation of tailings dams.** Technical report, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, USA, 59 p. 1994.

FAGUNDES, Lucas Rodrigues. **Correlação entre DPSH e SPT com ponderações de eficiência energética.** 2023. 143 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Construções Cívicas, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico da Guarda, Guarda, 2023.

FATEHNIA, M., HAYDEN, M., & LANDSCHOOT, M. **Correlation between shear wave velocity and SPT-N values for North Florida soils.** *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 20, n. 22, p. 12421-12430, 2015.

FERNÁNDEZ, B. P. **Caracterização geológico-geotécnica de solos da Asa Sul a partir de métodos de aquisição sísmica.** Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas). Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

FERREIRA, B. N. **O Uso de Ondas de Superfície do Ruído Sísmico Cultural e Ambiental para a Detecção de Alvos Rasos.** Dissertação de Mestrado, IG/UnB, Brasília, DF, 2018. 103 p.

FICHTNER, A., GUALTIERI, L. & NAKATA, N. **Introduction.** In: N. Nakata; L. Gualtieri & A. Fichtner (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 21-28, 2019.

FLORES, Henry Casani. **Caracterización Geofísica – Geotécnica Mediante Los Métodos De Refracción Sísmica Y Masw Para Determinar El Potencial De Excavabilidad De La Cantera Leones, Río Tumbes – Tumbes 2022.** Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Geofísica, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa - Perú, 2023.

FONSECA, A. Viana da. **Caracterização de solos residuais em projeto geotécnico assistido por ensaios.** Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2008. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/67289>.

FOTI, S.; HOLLENDER, F.; GAROFALO, F.; ALBARELLO, D.; ASTEN, M.; BARD, P. Y.; COMINA, C.; CORNOU, C.; COX, B.; GIULIO, G.; FORBRIGER, T.; HAYASHI, K.; Lunedei, E.; MARTIN, A.; MERCERAT, D.; OHRNBERGER, M.; POGGI, V.; RENALIER, F.; SICILIA, D.; SOCCO, V. **Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project.** Bull Earthquake Eng, p. 1-54, 2017. doi: 10.1007/s10518-017-0206-7

FUGRO. Alumar. **Relatório de investigação sísmica pelo método MASW: levantamentos geofísicos - área de resíduo de bauxita (planta geral).** São Luís, 2023. Relatório ALU007GFS-GRE-01.

GAUER, E. A. **Efeitos de velocidade em ensaios de palheta.** 2015. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

GIACHETI, H. L. **Os ensaios de campo na investigação do subsolo: Estudos e considerações quanto à aplicação em solos tropicais.** Tese (Doutorado), FEB – UNESP, 2001.

GOOGLE. Google Earth. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/search/alumar+sao+luis/@-2.71111697,-44.31055061,25.33128519a,11853.67254368d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCbpUiU9LmixAEbVUiU9LmizAGVmJdvQX8z1AIYM5UagXRU7A>>. Acesso em: 04 out. 2023.

GUIRELI NETTO, L.; GANDOLFO, O. C. B.; MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J. C. **Integração dos Métodos de Sísmica de Refração de Onda S e Análise Multicanal de Ondas Superficiais (MASW) em Barragem de Terra.** International Congress of the Brazilian Geophysical Society & Expogef, Rio de Janeiro, Brasil, 2020. 5 p.

GUTENBERG, B., 1958. **Microseisms.** *Advances in Geophysics* 5, 53–92. Harkrider, D.G., 1964. **Surface waves in multilayered elastic media. I. Rayleigh and Love waves from buried sources in a multilayered elastic half-space.** *Bulletin of the Seismological Society of America* 54 (2), 627–679.

HANUMANTHARAO, C.; RAMANA, G. V. **Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India.** *Journal of earth system science*, v. 117, p. 719-730, 2008.

HARDIN, B. O.; DRNEVICH, V.P. **Shear modulus and damping in soils.** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v. 98, n. 7, p. 667-692, 1972.

HASUI, Y. **Tectônica de placas e evolução dos continentes.** In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M. de; BARTORELLI, A. (Org.). Geologia do Brasil. São Paulo: Beca, 2012. p. 66-111.

Hegazy Y.A., Mayne, P.W. 1995. **Statistical correlations between Vs and CPT data for different soil types.** Proceedings, Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'95), Swedish Geotechnical Society Linköping, vol. 2, 173-178.

HUNT, R.E. **Geotechnical Engineering Investigation Manual.** McGraw-Hill, Nova York, 201-216, 1984.

HUSSAIN, Y., CARVAJAL, H. M., CONDORI, C., UAGODA, R., SOTO, M. C., CAVALCANTE, A. L. B., CUNHA, L. S. & MARTINO S. **Ambient Seismic Noise: A Continuous Source for the Dynamic Monitoring of Landslides.** Terrae Didactica, v. 15, n. 1, p. 1-5, 2018.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Economia Mineral do Brasil.** Relatório disponível em: <<http://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2018/08/economiamineral-brasil-set2018.pdf>>, 2018.

IBRAM Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração,** 2016.

Imai, T., & Yoshimura, Y. (1970). Elastic wave velocity and soil properties in soft soil. Tsuchito-Kiso, 18(1), 17-22. [in Japanese]

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnósticos dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Relatório de pesquisa, disponível em: <http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>, 2012.

IYISAN, R. (1996). **Correlations between shear wave velocity and in-situ penetration test results.** Teknik Dergi, 7, 371- 374. [in Turkish]

JINAN, Z. (1987). **Correlation between seismic wave velocity and the number of blow of SPT and depth.** Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 92-100.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, W. W. **Applied multivariate statistical analysis.** Pearson Education, Inc, 2007. p. 773.

KALTEZIOTIS, N., Sabatakakis, N., & Vassiliou, J. (1992). **Evaluation of dynamic characteristics of Greek soil formations, In Second Hellenic.** Conference on Geotechnical Engineering (pp. 239-246). Conference on Geotechnical Engineering (in Greek).

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Introdução à Exploração Geofísica.** 3. ed. Wiley-Blackwell, 2013. 281 p.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I.; tradução MARIA C. M. COELHO. **Geofísica de Exploração.** Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2009. 438 p.

KLOHN, E. J. **The development of current tailing dam design and construction methods.** Design and Construction of Tailing Dams, D. Wilson (ed.), Colorado School of Mines, Golden, USA, 1981.

L'HEUREUX, J.S.; LONG, M. (2016). **Correlations between shear wave velocity and geotechnical parameters in Norwegian clays.** J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 04017013-1 to 20. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317759597_Correlations_between_shear_wave_velocity_and_geotechnical_parameters_in_Norwegian_clays.

LEÃO, Suiane Rodrigues; SANTIAGO, Alvany Maria dos Santos. **Cenário das barragens de rejeito: conhecer para evitar novas catástrofes.** Ambiente & Sociedade, v. 25, 2022.

LEI 12.305: **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para assuntos jurídicos, 12 de agosto de 2010.

LEROPE, S.; MARKOWICZ, K.; GRAD, M. **Impacto do Vento no Ruído Sísmico Ambiente Registrado pela Rede Sísmica “13 BB Star” no Norte da Polônia.** Geophysical Journal International, v. 205, 2016. p. 1406-1413.

L'HEUREUX, J. S.; LONG, M. **Correlações entre velocidade de onda cisalhante e parâmetros geotécnicos em argilas norueguesas.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 143, n. 8, 2016. p. 04017013-1 a 04017013-20.

LOBO, B. O. **Mecanismo de Penetração Dinâmica em Solos Granulares.** 2009. 231p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LONG, M.; TRAFFORD, A.; McGRATH, T.; O'CONNOR, P. **Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW) para Investigações Geotécnicas Offshore.** Engineering Geology, v. 272, 2020. p. 105649.

LOPEZ, R. **Avaliação Geofísica-Geotécnica do Projeto da Central Hidrelétrica Chilia, Região de Huánuco - Ancash.** Tese (Doutorado), Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 2016.

LOWRIE, W. **Fundamentos de Geofísica.** Cambridge University Press, 2007. 381 p.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K. & POWELL, J. J. M. (1987): **Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice,** Blackie Academic & Professional, 312 p.

Madiai C., Simoni G. (2004). Shear wave velocity penetration resistance correlation for Holocene and Pleistocene soils of an area in central Italy. Proceedings, 2th International Conference on Geotechnical Site Characterization (ISC'2), Porto, Portugal.

MAINSANT, G.; LAROSE, E.; BRONNIMANN, C.; JONGMANS, D.; MICHOD, C.; JABOYEDOFF, M. **Monitoramento de Ruído Sísmico Ambiente de um Deslizamento de Argila: em Direção à Predição de Falhas.** Journal of Geophysical Research, v. 117, n. F1, 2012. p. 1-12.

MARANGON, M. **Mecânica dos Solos: Capítulo 06 – Empuxos de Terra.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de Engenharia – Departamento de Transportes e Geotecnia, 2018.

MARCHETTI, A.; MONACO, P. **Curso sobre Dilatômetro Plano (DMT)**. University of L'Aquila, Italy, 2001. 21p.

MARCHETTI, S. **In Situ Tests by Flat Dilatometer**. Jnl. American Society of Civil Engineers vol. 106 n. GT3 Mar., 1980.

MARCHI, E. **Procedimentos Metodológicos de Investigação Geotécnica de Barragens de Rejeito de Mineração para Projetos “As Is”**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2022.

MARI, J. L. **Propagação de Ondas**. In: **Seismic Imaging: A Practical Approach**. Ed. J. L. Mari & M. Mendes. EDP Sciences, 2019. p. 17-34.

MARTIN, T.E. e MCROBERTS E.C. **Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams**. Tailings and Mine Waste. 2002.

MASSAD, Faíçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. Oficina de textos, 2010.

MASW. **Hardware para Levantamento MASW**. Disponível em: <http://masw.com/Hardware.html>.

MATTHEWS, M. C.; HOPE, V. S.; CLAYTON, C. R. L. **Uso de ondas de superfície na determinação de perfis de rigidez do solo**. Proceedings of the Institution of Civil Engineering – Geotechnical Engineering, v. 119, n. 2, 1996. p. 84-95.

MAYNE, P. W. **Parâmetros de tensão-deformação-resistência-fluxo obtidos a partir de testes in situ aprimorados**. In: **International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories**, Bali, Indonesia, 2001. p. 27-48.

McNAMARA, D. E.; BULAND, R. P. **Níveis de Ruído Ambiente nos Estados Unidos Continentais**. Bulletin of the Seismological Society of America, v. 94, n. 4, 2004. p. 1517-1527.

McNAMARA, D. E.; RINGLER, A. T.; HUTT, C. R.; GEE, L. S. **Buscas Sísmicas Observadas no Canal do Panamá**. Journal of Geophysical Research, v. 116, n. B04312, 2011. p. 1-12.

MEIRA, G. S. **Uso dos Métodos Sísmicos de Refração e MASW para Investigação e Caracterização de Taludes**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

MENDECKI, A. J.; LYNCH, R. A.; MALOVICHKO, D. A. **Monitoramento Microsísmico Rotineiro em Minas**. Australian Earthquake Engineering Society 2010 Conference, Perth, Austrália, 2010. 33 p.

MILANI, E. J.; RANGEL, H. D.; BUENO, G. V.; STICA, J. M.; WINTER, W. R.; CAIXETA, J. M.; PESSOA NETO, O. da C. **Bacias sedimentares brasileiras – cartas estratigráficas**. Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 15, n. 2, p. 183-205, mai./nov. 2007.

MILSOM, J.; ERIKSEN. **Geofísica de Campo: Série de Guias Geológicas de Campo**. Wiley, 2011. 232 p.

MIO, Giuliano de. **Condicionantes geológicas na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental**. 2005. 359 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MUCCIARELLI, M. **Medições de Ruído Ambiente em Solo e Edifícios**. Bulletin of Earthquake Engineering, v. 8, n. 3, 2010. p. 481-482.

NAZARIAN, S. & STOKOE, II K. H. (1984) - **In situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves**. Proc. 8th Conf. on Earthquake Engineering, S.

NAZARIAN, S. (1984). **In Situ Determination of Elastic Moduli of Soil Deposits and Pavements by Spectral Analysis of Surface Waves Method**. Ph.D. Dissertation, University of Texas, Austin, Texas. 453 p.

NIERWINSKI, H. P.; HEIDEMANN, M.; LAVALLE, L. A.; SELL, B. **Estudo dos Parâmetros Geotécnicos de Rejeitos de Mineração Obtidos de Testes SCPTu Realizados em Camadas Secas e Saturadas**. In: MATEC Web of Conferences, v. 337, 2021. p. 04010.

NIERWINSKI, Helena Paula. **Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração**. 2019. 231 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

NOGUEIRA, P. V. **Integração de Sísmica de Refração e Eletrorresistividade para Elaboração de um Modelo 2D do Depósito de Ferro N4WS do Complexo Serra Norte, Carajás-PA**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

NOVOTNY, O. **Ondas de Superfície Sísmicas**. Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, 1999. 156 p.

O SUL, Jornal. **Desde 2000, o Brasil tem um rompimento de barragem a cada dois anos**. Site Jornal O Sul. Porto Alegre, 2019. Disponível em: <<https://www.osul.com.br/desde-2000-o-brasil-tem-um-rompimento-de-barragem-a-cada-dois-anos-veja-lista/>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

ODEBRECHT, E. **Medidas de Energia no Ensaio do SPT**. 2003. 230p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

OHSAKI, Y., & IWASAKI, R. (1973). On dynamic shear moduli and Poisson's ratios of soil deposits. Soil and Foundation, 13(4), 61-73

OKADA, H. **Método de Levantamento Microtremor**. Society of Exploration Geophysicists, 2003. 135 p.

ORTIGÃO, J. A. R.; COLLET, H. B. **Erros causados pelo atrito no ensaio de Vane Field**. In: **ASTM Symp. on Laboratory and Field Vane Shear Strength Testing**. STP 1014. PP. 104-116. Tampa, 1987.

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; RYDEN, N.; XIA, J.; IVANOV, J. **Combined Use of Active and Passive Surface Waves**. JEEG, p. 323-334, 2005.

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J. **Análise Multicanal de Ondas de Superfície usando Vibroseis (MASW)**. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996, 1996. p. 68-71. DOI: 10.1190/1.1826742.

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J. **Imagem de curvas de dispersão de ondas de superfície em gravação de vários canais**. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1998. p. 1377-1380. DOI: 10.1190/1.1820161.

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J. **Multichannel Analysis of Surface Waves**. Geophysics, v. 64, n. 3, p. 800-808, 1999. DOI: 10.1190/1.1444590.

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J.; IVANOV, J. Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. **The Leading Edge**, v. 26, n. 1, p. 60-64, 2007. doi: 10.1190/1.2431832

PARK, C.; MILLER, R. D.; NEB, C.; IVANOV, J.; BENNETT, B.; HUGGINS, R. **Imaging dispersion curves of passive surface wave**. SEG Technical Program Expanded Abstracts, p. 1357-1360, 2014. DOI: 10.190/1.1851112.

PARK, C.; MILLER, R.; LAFLEN, D.; NEB, C.; IVANOV, J.; BENNETT, B.; HUGGINS, R. Imaging dispersion curves of passive surface waves. **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, p. 1357-1360, 2004. doi: 10.1190/1.1851112

PITA, Lina-María Pua. **Multiscale Analysis Of Spatial Variability In Geotechnical Engineering**. 2022. 226 f. Tese (Doutorado) - Curso de Science, School Of Civil And Environmental Engineering, Georgia Institute Of Technology, Atlanta, 2022.

PLANÈS, T.; MOONEY, M. A.; RITTGERS, J. B. R.; PAREKH, M. L.; BEHM, M.; SNIEDER, R. **Time-lapse Monitoring of Internal Erosion in Earthen Dams and Levees Using Ambient Seismic Noise**. Géotechnique, v. 66, n. 4, p. 301-312, 2016.

POULOS, H. G. **Use of shear wave velocity for foundation design**. Geotechnical and Geological Engineering, v. 40, n. 4, p. 1921-1938, 2022.

PRICE, D. G. **Engineering Geology: Principles and Practice**. Springer, Berlin, GER, 2009. 450 p.

RAMOS, M. A. B.; DANTAS, M. E.; MAIA, M. A. M.; MACHADO, M. F.; PFALTZGRAFF, P. A.; AMBROSIO, M. F.; OSÓRIO, C. **Projeto geodiversidade: manual metodológico para levantamento da Geodiversidade em escalas 1:100.000 a 1:50.000**. Brasília: CPRM, 2020. 50 p. KLEIN, Evandro Luiz, SOUSA, Cristiane Silva de (Orgs.). **Geologia e recursos minerais do estado do Maranhão**. Belém. CPRM, 2012, 150p.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. Wiley-Blackwell, England, UK, 2011. 696 p.

RICHART, F. E.; HALL, J. R.; WOODS, R. D. **Vibration of soils and foundations**. Prentice-Hall, 1970. 414 p.

ROBERTSON, P. K. (2009). **Interpretation of cone penetration tests—A unified approach**. Canadian Geotechnical Journal, 46(11), 1337–1355. <https://doi.org/10.1139/T09-065>

ROBERTSON, P. K. **Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system—An update.** Canadian Geotechnical Journal, v. 53, n. 12, p. 1910–1927, 2016. DOI: 10.1139/cgj-2016-0044.

ROBERTSON, P. K. **Interpretation of cone penetration tests—A unified approach.** Canadian Geotechnical Journal, v. 46, n. 11, p. 1337–1355, 2009. DOI: 10.1139/T09-065.

ROBERTSON, P. K. **Soil classification using the cone penetration test.** Canadian Geotechnical Journal, v. 27, n. 1, p. 151–158, 1990.

ROCHA, Breno Padovezi. **Caracterização geotécnica de solos tropicais não saturados por meio de ensaios de campo.** 2018. 272 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

ROCHA, M. P. **Introdução: Ondas Sísmicas.** Notas de aula. Curso de Métodos Sísmicos com Ondas Superficiais. 20 p, 2020.

RODRIGUES, T.L. das N; ARAÚJO, C.C. de; CAMOZZATO, E.; RANGRAB, G.E. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.** São Luís, Folha SA.23-Z-A. Cururupu. Folha SA.23-X.C. Estado do Maranhão. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1994a. 114p. il.

ROY, M.; LEBLANC, A. **The in situ measurement of the undrained shear strength of clays using the field vane.** In: Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies, ASTM STP 1014. Filadélfia: A. F. Richards, 1988.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas Aplicações à Engenharia.** São Paulo: Oficina do texto, 2012.

SCHNEIDER, J. A., HOTSTREAM, J. N., MAYNE, P. W., & Randolph, M. F. (2012). Comparing CPTU $Q - F$ and $Q - \Delta u / \sigma'_{v0}$ soil classification charts. *Geotechnique Letters*, 2(4), 209–215. <https://doi.org/10.1680/geolett.12.00044>

SCHNEIDER, J. A., XU, X., & LEHANE, B. M. (2008). Database Assessment of CPT-Based Design Methods for Axial Capacity of Driven Piles in Siliceous Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(9), 1227–1244. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:9\(1227\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:9(1227))

SCHOBENHAUS, C.; BRITO NEVES, B. B. **A geologia do Brasil no contexto Plataforma Sul-Americana.** In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, F. H (Org.). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e sig.* Brasília: CPRM, 2003. p. 5-25.

SILVA, Washington Pirete da. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001).** 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia): Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2010.

SIMONINI P., COLA S. (2000). **On the use of the piezocone to predict the maximum stiffness of Venetian soils.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, n°4, pp. 378-382

SOLO – SONDAGENS E CONSTRUÇÕES LTDA. **Estudo do terreno - Ensaio CPTU com sísmica (ARB10)**. São Luís, 2022.

SOUSA, Cláudio José da Silva de. **CARACTERIZAÇÃO DOS AQUÍFEROS NA ILHA DO MARANHÃO: reconhecimento, levantamento de áreas estratégicas e contribuições ao processo de gestão**. 2021. 273 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Hidrogeologia e Meio Ambiente, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SOUZA, Eduardo Nassar de; SOUZA, Gabrielle Amorim Sena; SILVA, Igor Ferreira da; TATTO, Kelly Santos; LUZ, Paulo Afonso de Cerqueira. **Estudo de caso da ruptura da barragem de Fundão (Mariana-MG)**. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, [s. l], v. 21, p. 92-117, jun. 2022.

SOUZA, L. A. P.; GANDOLFO, O. C. B. **Geofísica Aplicada**. In: Geologia de Engenharia e Ambiental, A. M. S. Oliveira & J. J. Monticeli (eds.), ABGE, São Paulo, BRA, pp. 313-334, 2018.

SOUZA, L. A. P.; GANDOLFO, O. C. B. **Métodos Geofísicos em Geotecnia Ambiental**. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA), v. 2, p. 9-27, 2012.

SOUZA, Luiz Antonio Pereira de; GANDOLFO, Otávio Coaracy Brasil. **Geofísica Aplicada à Geologia de Engenharia e Meio Ambiente: manual de boas práticas**. São Paulo: Abge, 2021. 156 p.

SOUZA, Tiago de Jesus. **Previsão da curva tensão-recalque em solos tropicais arenosos a partir de ensaios de cone sísmico**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. DOI: 10.11606/D.18.2011.tde-25042012-163755.

STOKOE, K. H.; WRIGHT, S. G.; BAY, J. A.; ROESSET, J. M. **Characterization of geotechnical sites by SASW method**. In: Technical Review: Geophysical Characterization of Sites, ISSMFE Technical Committee 10, New Delhi, p. 15-25, 1994.

STOKOE, K. H.; WRIGHT, S. G.; BAY, J. A.; ROESSET, J. M. **Characterization of geotechnical sites by SASW method**. In: Technical Review: Geophysical Characterization of Sites, ISSMFE Technical Committee 10, New Delhi, p. 15-25, 1994.

STROBBIA, C. **Surface Wave Method. Acquisition, Processing and Inversion**. 2003. 317 f. Tese (Doutorado) – Politecnico di Torino, Torino, 2003.

TEIXEIRA, A. T.; GODOY, N. S. **Análise, projeto e execução de fundações rasas**. In: Fundação: Teoria e prática, Hachick et al. (eds). Ed. Pini Ltda, São Paulo, Cap.7, p.227-264, 1996.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990. 744 p.

TICONA, P. **Caracterización de los suelos del instituto geofísico de la UNSA, a través de metodologías sísmicas y eléctricas**. Tesis, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2019.

TRONCOSO, J.H. **Geotechnics of Tailings dams and sediments International Congress of Environmental Geotechnics ICEG pp.1405-1423, 1997.**

TSCHUSCHKE, W.; GOGOLIK, S.; WRÓZYŃSKA, M.; KROLL, M.; STEFANEK, P. **The application of the seismic cone penetration test (SCPTU) in tailings water conditions monitoring.** *Water*, v. 12, n. 3, p. 737, 2020.

UZIELLI, M.; LACASSE, S.; NADIM, F.; PHOON, K. **Soil variability analysis for geotechnical practice.** In: *Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, Vol. 3, Taylor & Francis Group, London, p. 1653–1752, 2007.

VICK, S.G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams.** John Wiley & Sons, Inc., 369 p, 1983.

VIEGAS, Josué Carvalho. **DIAGNÓSTICO DOS AGENTES E PROCESSOS ATUANTES NA FRAGMENTAÇÃO DA PAISAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PERICUMÃ, AMBIENTE DE AMAZÔNIA MARANHENSE.** 2015. 175 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Presidente Prudente, 2015.

VITALI, O. P. M. **Desenvolvimento de sistema para realização de sísmica down-hole em conjunto com ensaios de piezocone.** Dissertação de Mestrado em Engenharia - Geotecnia, São Carlos - Universidade de São Paulo - USP, 2011.

VITALI, O. P. M.; PEDRINI, R. A. A.; GIACHETI, H. L.; OLIVEIRA, L. P. R. (2012). **Developing a system for down-hole seismic test together with the CPTu.** *Soils & Rocks*, v. 35, p. 75-88.

Wair, B.R., DeJong, J.T., & Shantz, T. (2012). *Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles.* Pacific Earthquake Engineering Research Center.

WIT, T.; OLIVIER, G. **Imaging and Monitoring Tailings Dam Walls with Ambient Seismic Noise.** 24th International Conference on Paste, Thickened, and Filtered Tailings, Brisbane, Austrália, 2018.

XIA, J.; MILLER, R. D.; PARK, C. B.; IVANOV, J. **Construction of 2d vertical shear-wave velocity field by the multichannel analysis of surface wave technique.** In: *Proc. of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems*, Arlington, Va., p. 1197-1206, 2000.

XIA, J.; PARK, C. B.; MILLER, R. D. **Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves.** *Geophysics*, v. 64, n. 3, p. 691-700, 1999.

XIA, J.; XU, Y.; LUO, Y.; MILLER, R. D.; CAKIR, R.; ZENG, C. **Advantages of Using Multichannel Analysis of Love Waves (MALW) to Estimate Near-Surface Shear-Wave Velocity.** *Surveys in Geophysics*, v. 33, n. 5, p. 841-860, 2012. doi: 10.1007/s10712-012-9174-2

ZHANG, X.; LIU, X.; AN, R.; LI, X. **Site observations of weathered granitic soils subjected to cementation and partial drainage using SCPTU.** *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 15, n. 4, p. 984-996, 2023. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.12.005.

APÊNDICE A

LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MASW

Tabela 42: Quantitativo da campanha MASW. Fugro (2023).

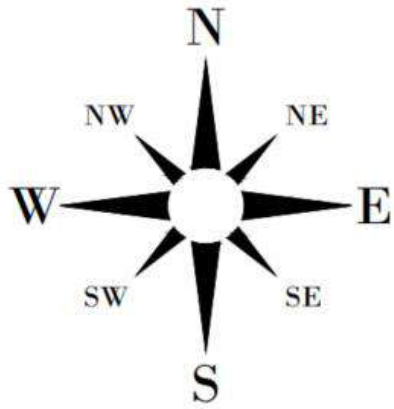
Ponto	Coordenado do ponto central		Total de pontos	Total medido (m)	Data de execução
P1	N:9700315	E:580375	14	60	07/11/2023
P2	N:9700403	E:579995	14	60	14/01/2023
P3	N:9700396	E:579485	14	60	09/11/2023
P4	2°42'41"S	44°17'26"W	14	60	21/10/2023
P5	N:9700151	E:578699	14	60	14/11/2023
P6	2°42'44"S	44°17'33"W	14	60	22/10/2023
P7	N:9699910	E:578605	14	60	26/10/2023
P8	2°42'58"S	44°17'36"W	14	60	22/10/2023
P9	2°43'17"S	44°17'44"W	14	60	30/10/2023
P10	2°43'33"S	44°17'42"W	14	60	26/10/2023
P11	2°43'41"S	44°17'38"W	14	60	27/10/2023
P12	2°43'44"S	44°17'36"W	14	60	20/10/2023
P13	2°43'45"S	44°18'00"W	14	60	18/10/2023
P14	2°43'35"S	44°18'00"W	14	60	02/11/2023
P15	2°43'43"S	44°17'59"W	14	60	23/10/2023
P16	2°43'27"S	44°17'55"W	14	60	02/11/2023
P17	2°43'14"S	44°17'49"W	14	60	22/10/2023
P18	2°43'05"S	44°17'53"W	14	60	18/10/2023
P19	2°43'02"S	44°17'57"W	14	60	29/10/2023
P20	2°42'54"S	44°17'57"W	14	60	18/10/2023
P21	2°42'48"S	44°18'00"W	14	60	30/10/2023
P22	2°42'47"S	44°18'11"W	14	60	17/10/2023
P23	2°42'52"S	44°18'13"W	14	60	29/10/2023
P24	2°42'58"S	44°18'22"W	14	60	05/11/2023
P25	2°43'10"S	44°18'30"W	14	60	02/10/2023
P26	2°43'16"S	44°18'31"W	14	60	29/10/2023
P27	2°43'19"S	44°19'36"W	14	60	21/10/2023
P28	2°43'29"S	44°18'36"W	14	60	02/11/2023
P29	2°43'25"S	44°18'46"W	14	60	25/10/2023
P30	2°43'20"S	44°18'50"W	14	60	17/10/2023
P31	2°43'28"S	44°19'02"W	14	60	25/10/2023
P32	2°43'30"S	44°19'05"W	14	60	17/10/2023
P33	2°43'42"S	44°19'09"W	14	60	24/10/2023
P34	2°43'51"S	44°19'11"W	14	60	14/10/2023
P35	2°43'53"S	44°19'03"W	14	60	24/10/2023
P36	2°43'58"S	44°19'01"W	14	60	14/10/2023
P37	2°43'53"S	44°18'53"W	14	60	24/10/2023
P38	2°43'53"S	44°18'50"W	14	60	16/10/2023
P39	2°43'50"S	44°18'45"W	14	60	25/10/2023
P40	2°43'52"S	44°18'37"W	14	60	16/10/2023
P41	2°43'48"S	44°18'35"W	14	60	25/10/2023
P42	2°43'44"S	44°18'28"W	14	60	19/10/2023
P43	2°43'43"S	44°18'16"W	14	60	23/10/2023

P44	2°43'42"S	44°18'13"W	14	60	05/11/2023
P45	2°43'42"S	44°17'26"W	14	60	30/10/2023
P46	2°43'34"S	44°17'18"W	14	60	20/10/2023
P47	N:9699201	E:579327	14	60	12/11/2023
P48	2°43'11"S	44°17'05"W	14	60	20/10/2023
P49	2°42'42"S	44°17'16"W	14	60	29/10/2023
P50				Cancelado	
ARB1	2°43'50"S	44°18'52"W	1		05/11/2023
ARB2	2°43'33"S	44°19'00"W	26	120	02/11/2023
ARB3	2°43'45"S	44°18'38"W	26	120	02/11/2023
ARB4	2°43'24"S	44°18'25"W	26	120	02/11/2023
ARB5	2°43'06"S	44°18'07"W	26	120	02/11/2023
ARB6				Cancelado	
INTERFACE	2°43'41"S	44°18'44"W	1		05/11/2023
Total executado				3.415,00 m	

Vista área da posição dos levantamentos MASW. Fugro (2023).



Croqui de posicionamento dos levantamentos MASW. Fugro (2023).



PT	COORDINATES		
	NORTH	ESTE	ELEV.
P1	9700371.999	580410.423	-
P2	9700403.183	579995.483	-
P3	9700390.694	579463.270	-
P4	9700290.071	578857.960	-
P5	9700151.808	578699.932	-
P6	9700105.008	578489.342	-
P7	9699913.019	578606.043	-
P8	9699669.512	578588.088	-
P9	9699135.910	578429.232	-
P10	9698656.719	578398.077	-
P11	9698447.610	578453.149	-
P12	9698280.748	578595.056	-
P13	9698305.320	577820.910	-
P14	9698600.643	577808.942	-
P15	9698786.222	577828.386	-
P16	9698877.858	577994.777	-
P17	9699240.710	578094.050	-
P18	9699392.460	578035.590	-
P19	9699682.500	577842.356	-
P20	9699940.420	577950.900	-
P21	9700076.618	577790.659	-
P22	9700076.618	577485.790	-
P23	9699875.586	577372.085	-
P24	9699725.810	577117.820	-
P25	9699373.970	576887.360	-
P26	9699184.974	576836.061	-
P27	9699039.871	576669.461	-
P28	9698836.470	576629.191	-
P29	9698903.182	576385.758	-
P30	9699070.620	576197.820	-
P31	9699031.560	575987.945	-
P32	9698765.524	575804.004	-
P33	9698412.150	575683.994	-
P34	9698166.790	575558.950	-
P35	9698083.501	575809.159	-
P36	9697868.960	576045.880	-
P37	9698222.365	576136.426	-
P38	9698101.330	575923.260	-
P39	9698160.198	576394.964	-
P40	9698087.838	576651.510	-
P41	9698257.043	576780.586	-
P42	9698295.670	576936.850	-
P43	9698435.800	577228.950	-
P44	9698326.568	577456.544	-
P45	9698444.425	578005.631	-
P46	9698802.390	578196.080	-
P47	9699201.284	579327.772	-
P48	9699312.180	579488.222	-
P49	9699554.895	580004.339	-
P50	9699833.280	580304.920	-

LEGEND:

RSA SHAPE

MASW lines - 60m

MASW lines - 120m

RSA TOTAL FOOTPRINT- 16.526,25 m

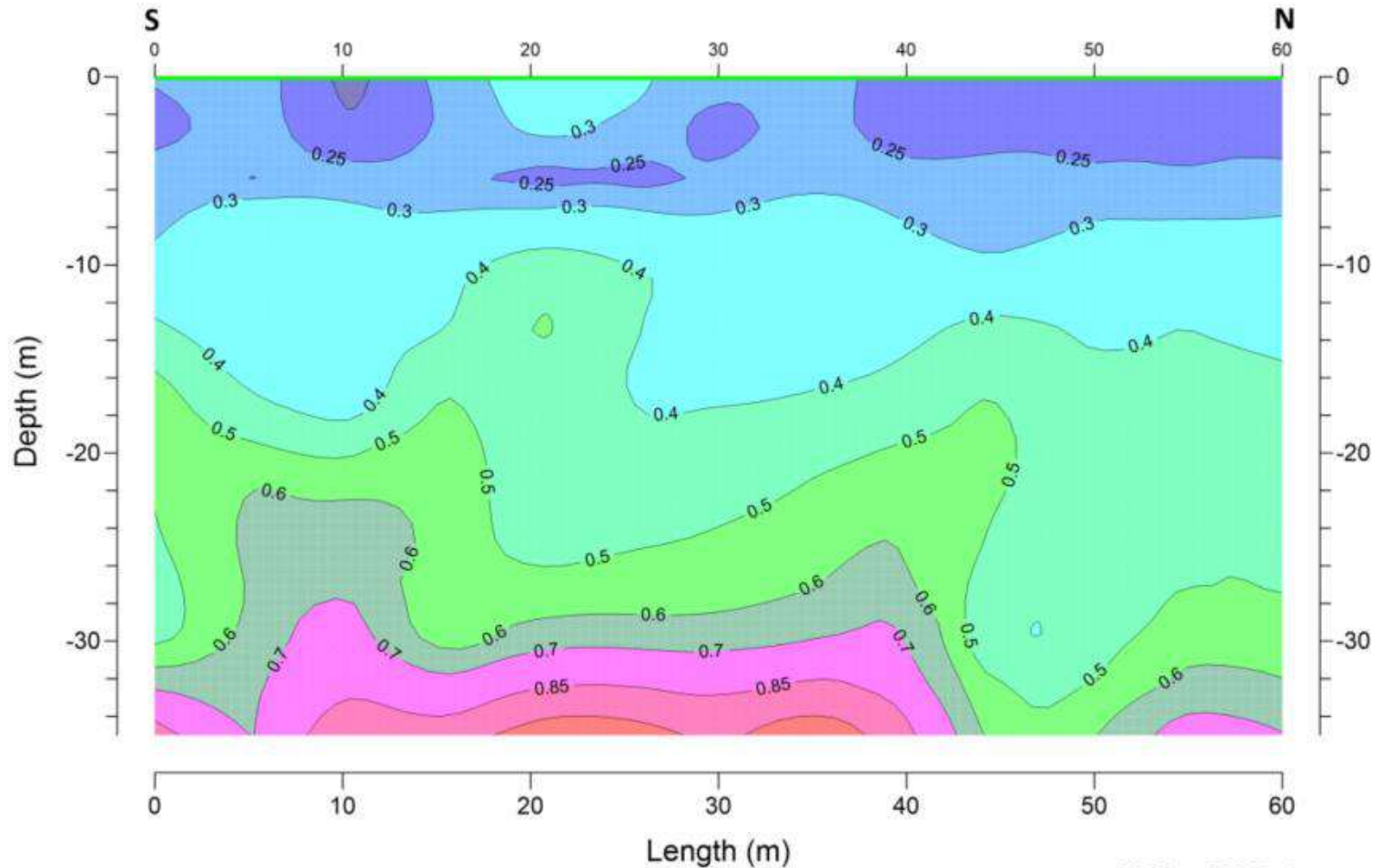
ESCALE: 1:6500



APÊNDICE B

RESULTADO DOS ENSAIOS MASW

MASW PROFILE P-1



Vs30 = 388.7 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26 09 2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

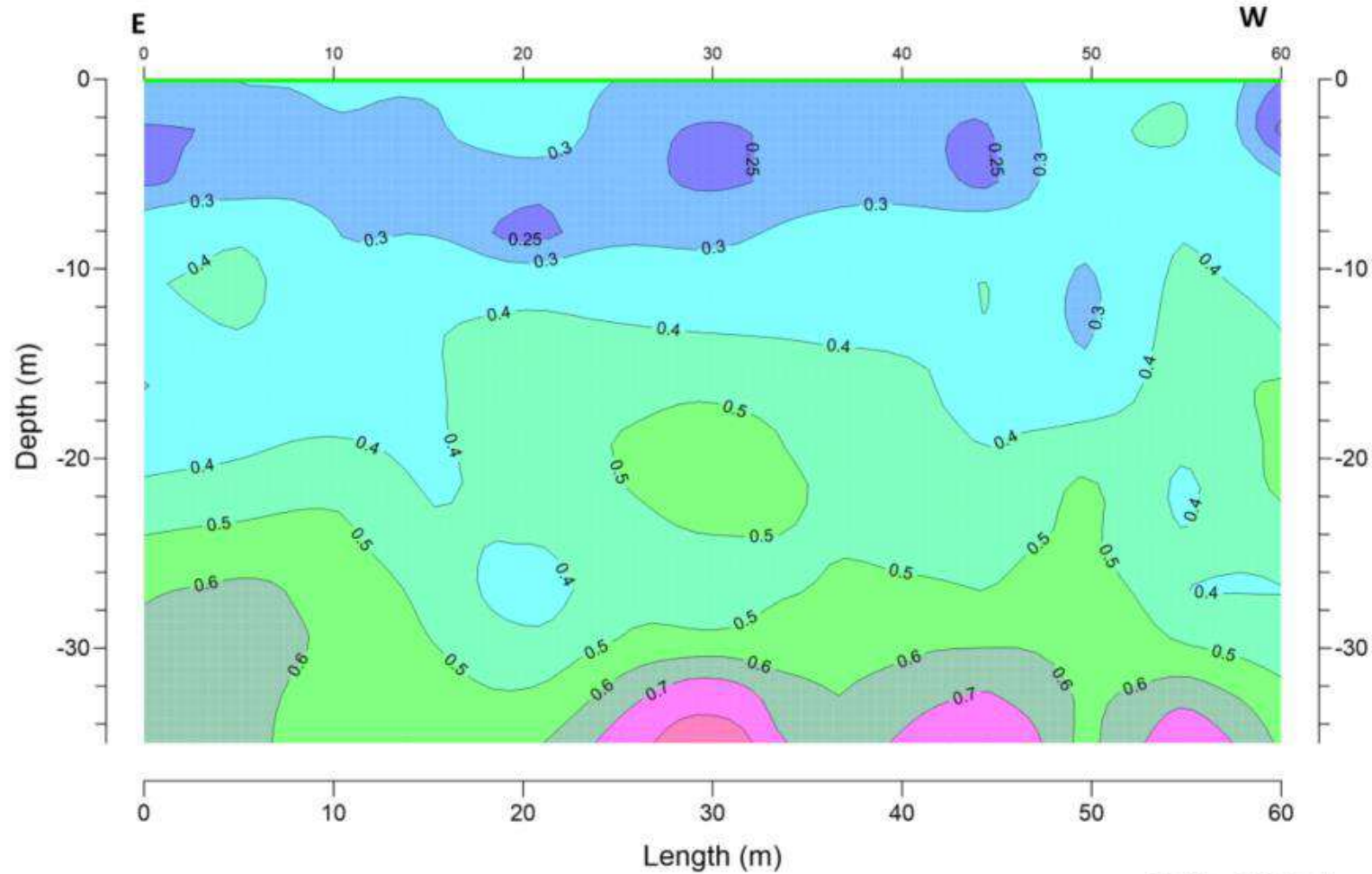
ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 01 st , 2023

	Fugro Document No: ALU007GFS-GRE-01
	Geophysicist: Luis D'Agostino Geologist: GRE
	Client: ALUMAR
	Provider: ALUMAR
	Contact: Etesandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Baurite Waste Areas (RSA)		
Drawn title: MASW Profile - P-1		
Location: ARB1D - São Luis/MA		Preparation date: Nov 07 th , 2023
Drafting date: Dec 1 st , 2023	Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino
Appendix: A. II - MASW Profiles		

MASW PROFILE P-2



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 01 st , 2023



Page Document No:
ALU007GFS-GRE-01
Geophysical
Luis D'Agostino
Geologist/CECA

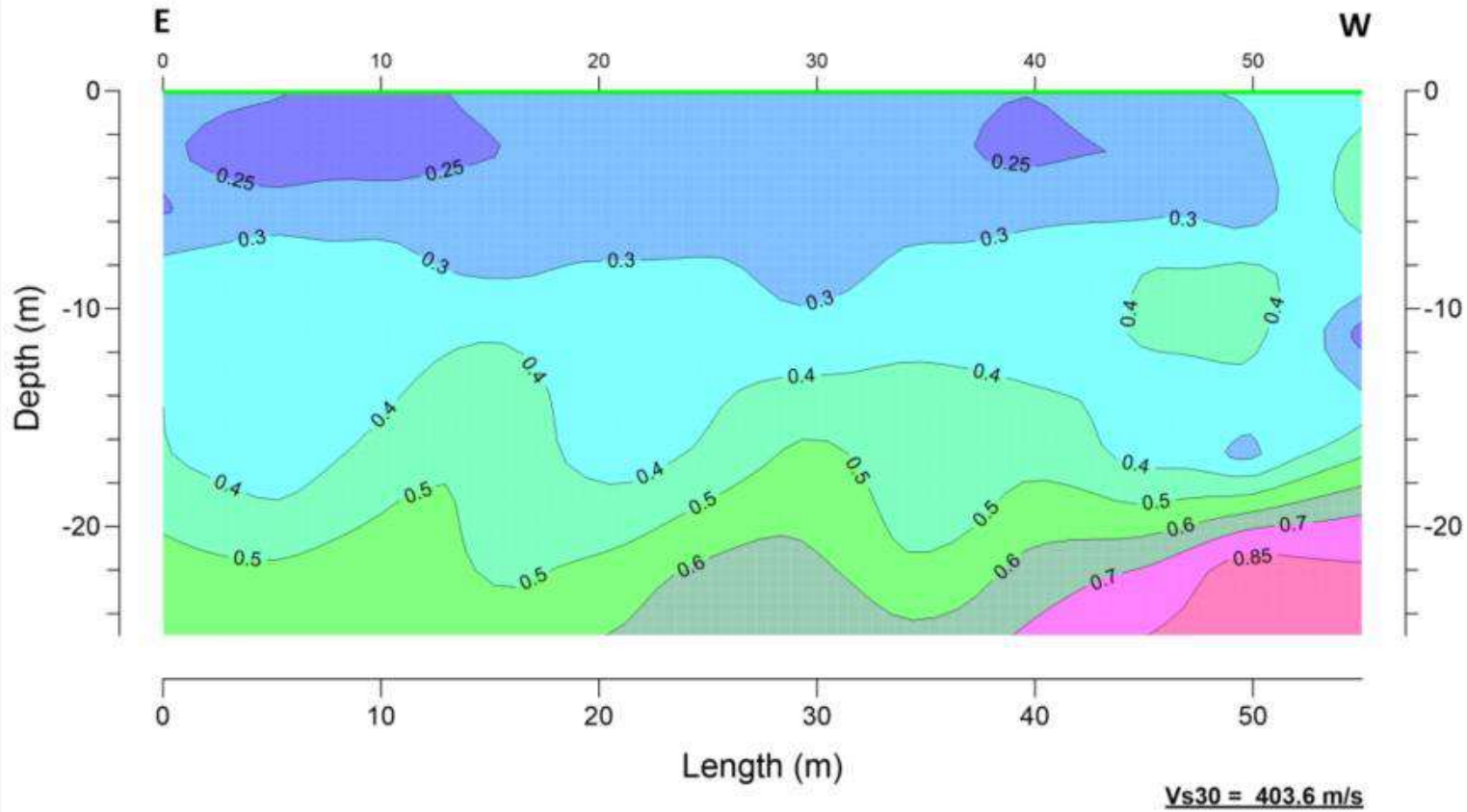


Client:
ALUMAR
Fabrication:
ALUMAR
Contact:
Elessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-2		
Location: ARB10 - São Luis/MA	Revision date: Nov 14 th , 2023	
Drawing date: Dec 1 st , 2023	Page No: 02 of 54	Appendix: A. II - MASW Profiles
Drawn by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

MASW PROFILE P-3

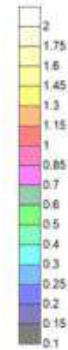


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 01 st , 2023


 Page controlled by:
 ALU007GFS-GRE-01
 Geophysicist:
 Luis D'Agostino
 Geologist: CBEA

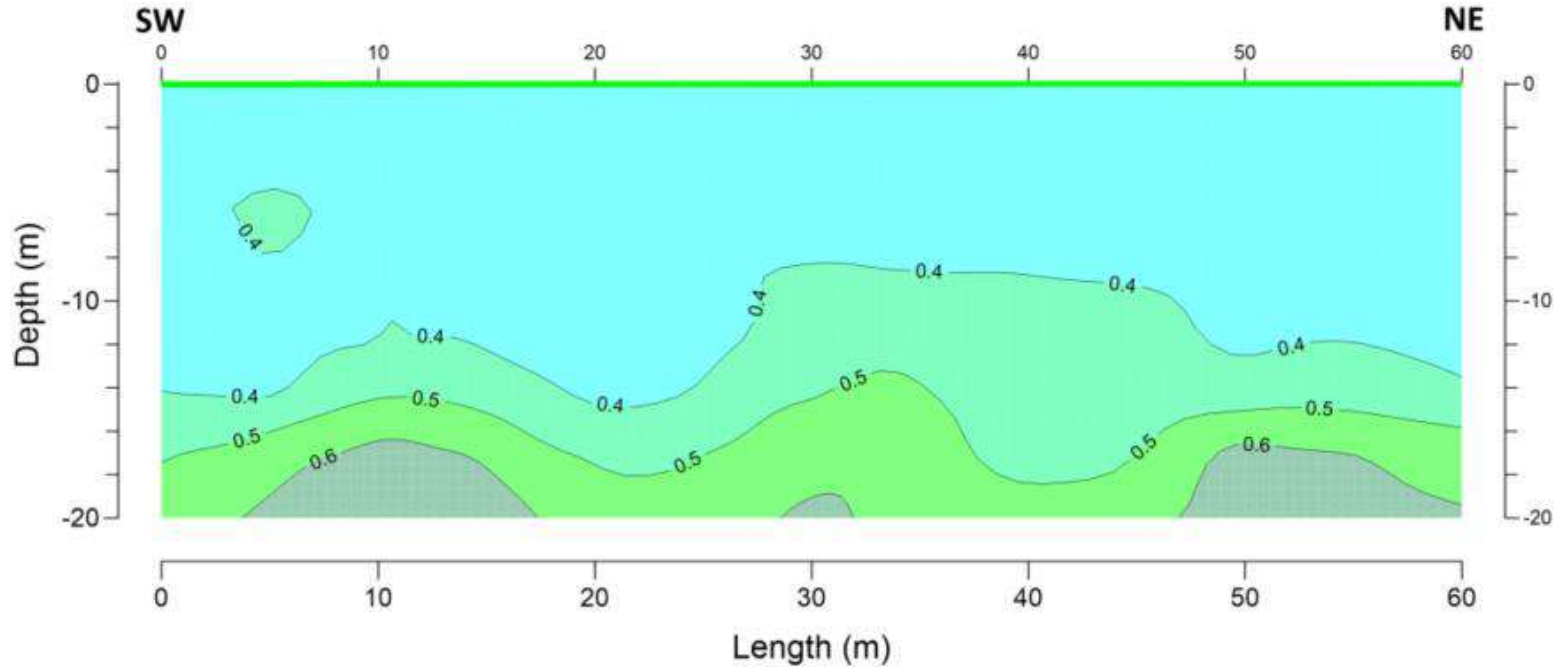

 Client:
 ALLUMAR
 Foundation:
 ALUMAR
 Contact:
 Alessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw title: MASW Profile - P-3		
Location: ARB10 - São Luis/MA	Execution date: Nov 09 th , 2023	
Drawing date: Dec 1 st , 2023	Drawn by: 03 of 54	Appended: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-4



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 01 st , 2023



Project Document No:
ALU007GFS-GRE-01
Geophysicist:
Luis D'Agostino
Geologist: D'IFA

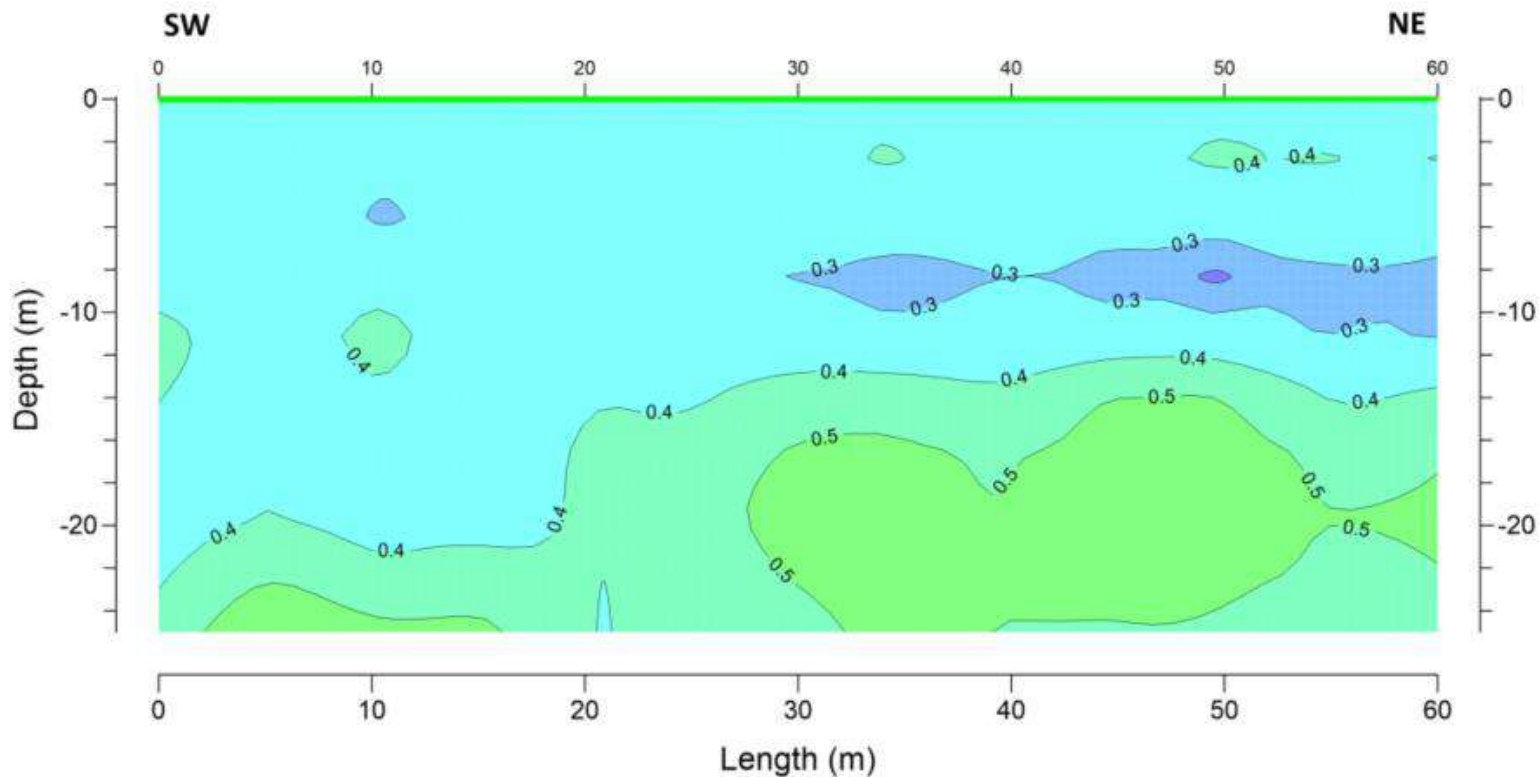


Client:
ALUMAR
Fluorolubrifico
ALUMAR
Contact:
Elessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-4		
Location: RSA 09 - São Luis/MA	Formulation date: Oct 21 st , 2023	
Drilling date: Dec 1 st , 2023	Design No: 04 of 54	Appends: A, B - MASW Profiles
Designed by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



MASW PROFILE P-5



Vs30 = 409.3 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	Final Issue	Dec 01 st , 2023

fugro | Fugro Services for:
ALU007GFS-GRE-01
Geophysical
Luis D'Agostino
Geologist / GREA

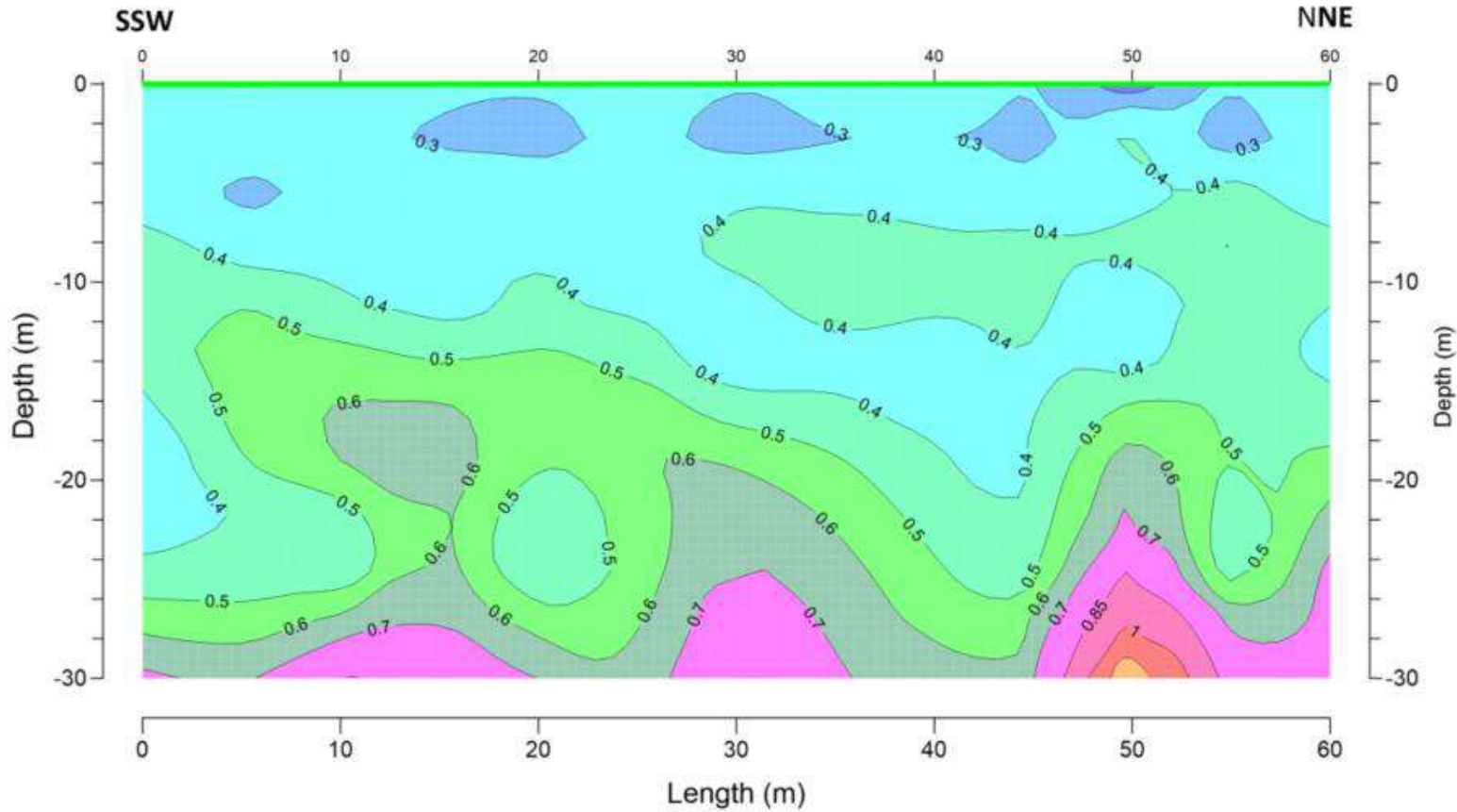
ALUMAR | Client:
ALUMAR
Professional:
ALUMAR
Contact:
Elessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)			
Draw Title: MASW Profile - P-5			
Location: RSA 09 - São Luís/MA		Erection date: Nov 14 th , 2023	
Drawing date: Dec 1 st , 2023	Design by: 05 of 54	Approved: A. II - MASW Profiles	
Drawn by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino		

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-6



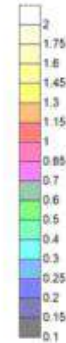
$V_{s30} = 450.3 \text{ m/s}$

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 04 th , 2023



Project Document for
ALU007GFS-GRE-01
Geophysicist
Luís D'Agostino
Manager / O&E



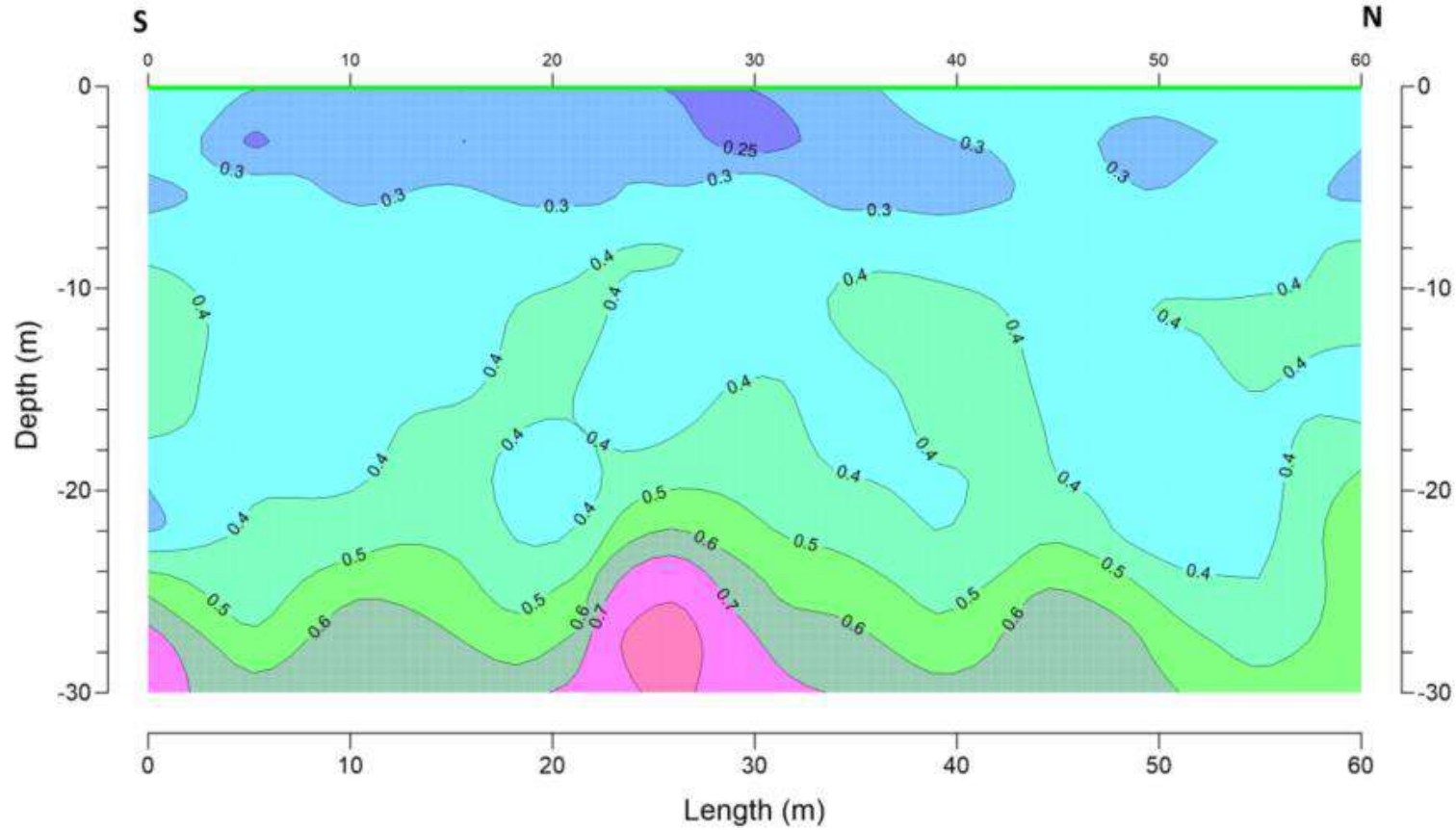
Client
ALUMAR
Facility
ALUMAR
Contact
Elessandro A. Pereira

Project MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw title MASW Profile - P-6		
Location RSA 09 - São Luís/MA	Execution date Oct 22 nd , 2023	
Drawing date Dec 4 th , 2023	Version file 06 of 54	Approved by A. II - MASW Profiles
Drawn by Luís D'Agostino	Approved by Luís D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-8



REFERENCE DOCUMENT	
CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS		
Velocity (km/sec)		

REVISION HISTORY		
ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 04 th , 2023

Fugro Document No: ALU007GFS-GRE-01
 Drafter: Luis D'Agostino
 Designer: GRE5

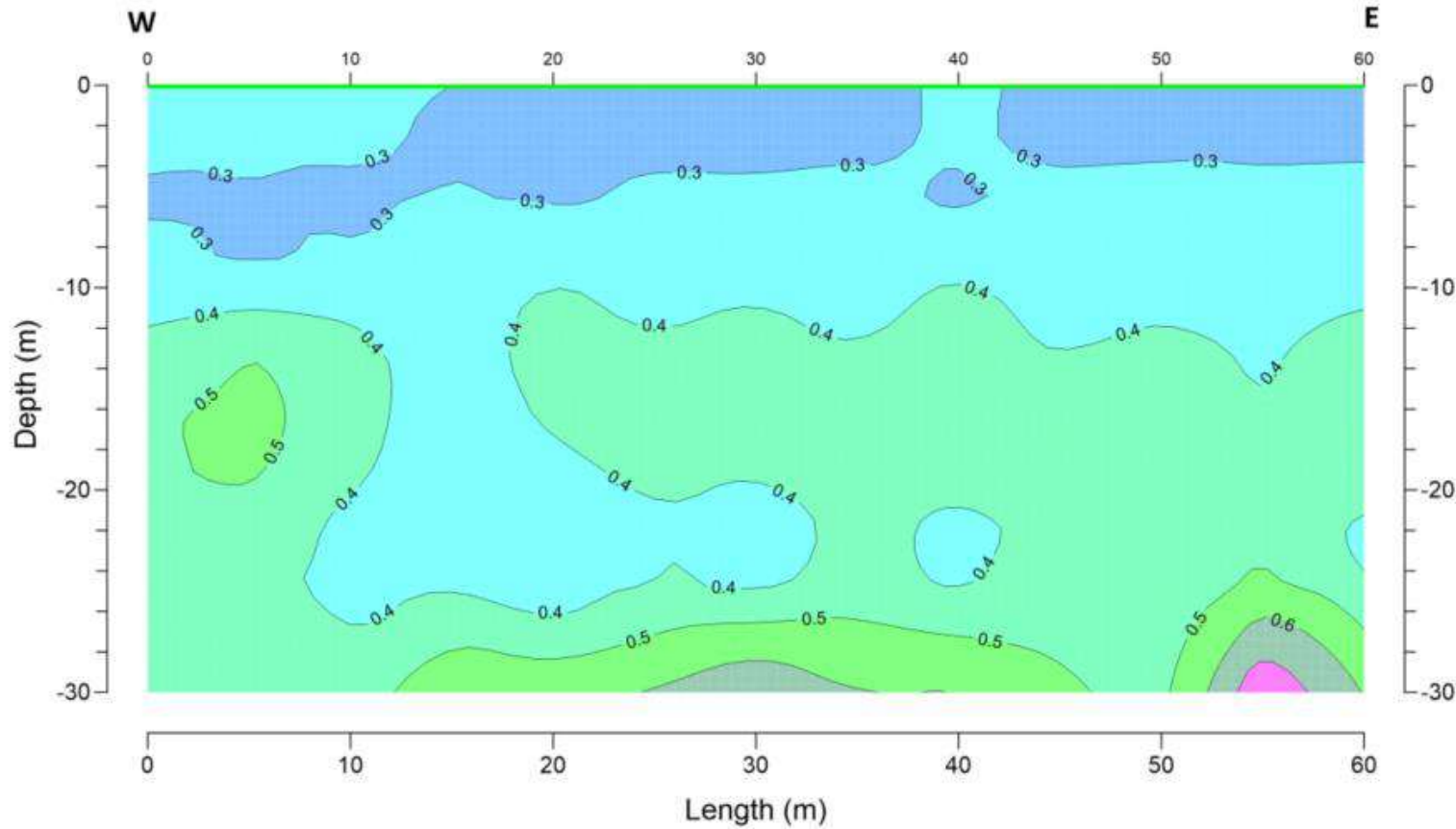
Client: ALUMAR
 Provider: ALUMAR
 Contact: Alessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-8		
Location: RSA 09 - São Luis/MA	Revision date: Oct 22 nd , 2023	
Drafting date: Dec 4 th , 2023	Design No: 07 of 54	Appr: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-9



REFERENCE DOCUMENT	
CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS	
Velocity (km/sec)	

REVISION HISTORY		
ISSUE	STATUS	DATE
00	First issue	Dec. 04 th , 2023

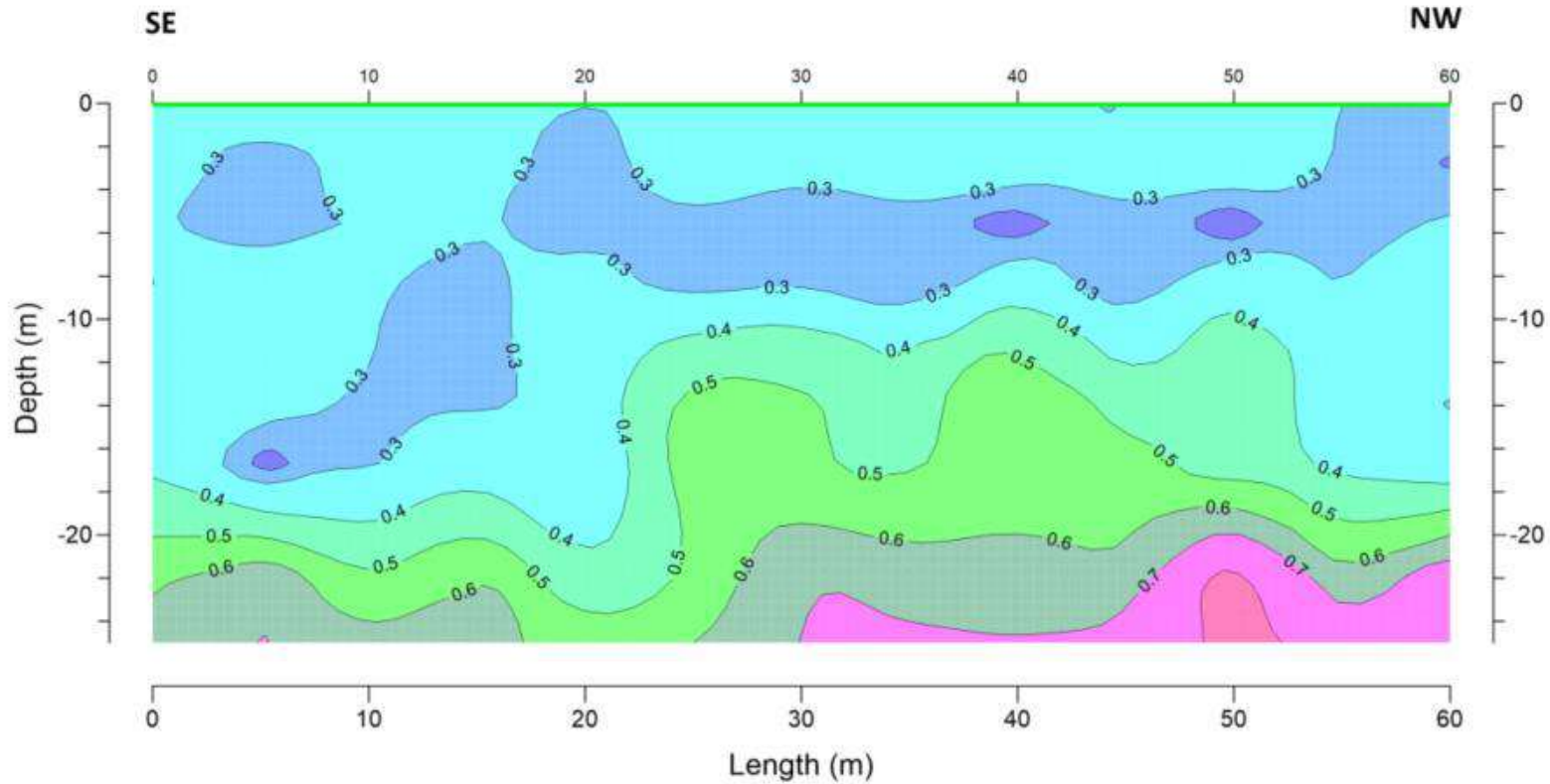
	Fugro Document No: ALU007GFS-GRE-01 Prepared by: Luis D'Agostino Reviewed by: (blank)
	Client: ALUMAR Facility: ALUMAR Contact: Alessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)			
Draw title: MASW Profile - P-9			
Location: RSA 07 - São Luis/MA		Execution date: Oct 30 th , 2023	
Drawing date: Dec 4 th , 2023	Design file: 08 of 54	Approb.: A. II - MASW Profiles	
Drawn by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino		

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-10



Vs30 = 413 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 04 th , 2023

fugro Page Document No: ALU007GFS-GRE-01
 (Geophysical)
 Luis D'Agostino
 Geologist / OES

ALUMAR Client: ALUMAR
 Provider: ALUMAR
 Contact: Alessandro A. Pereira

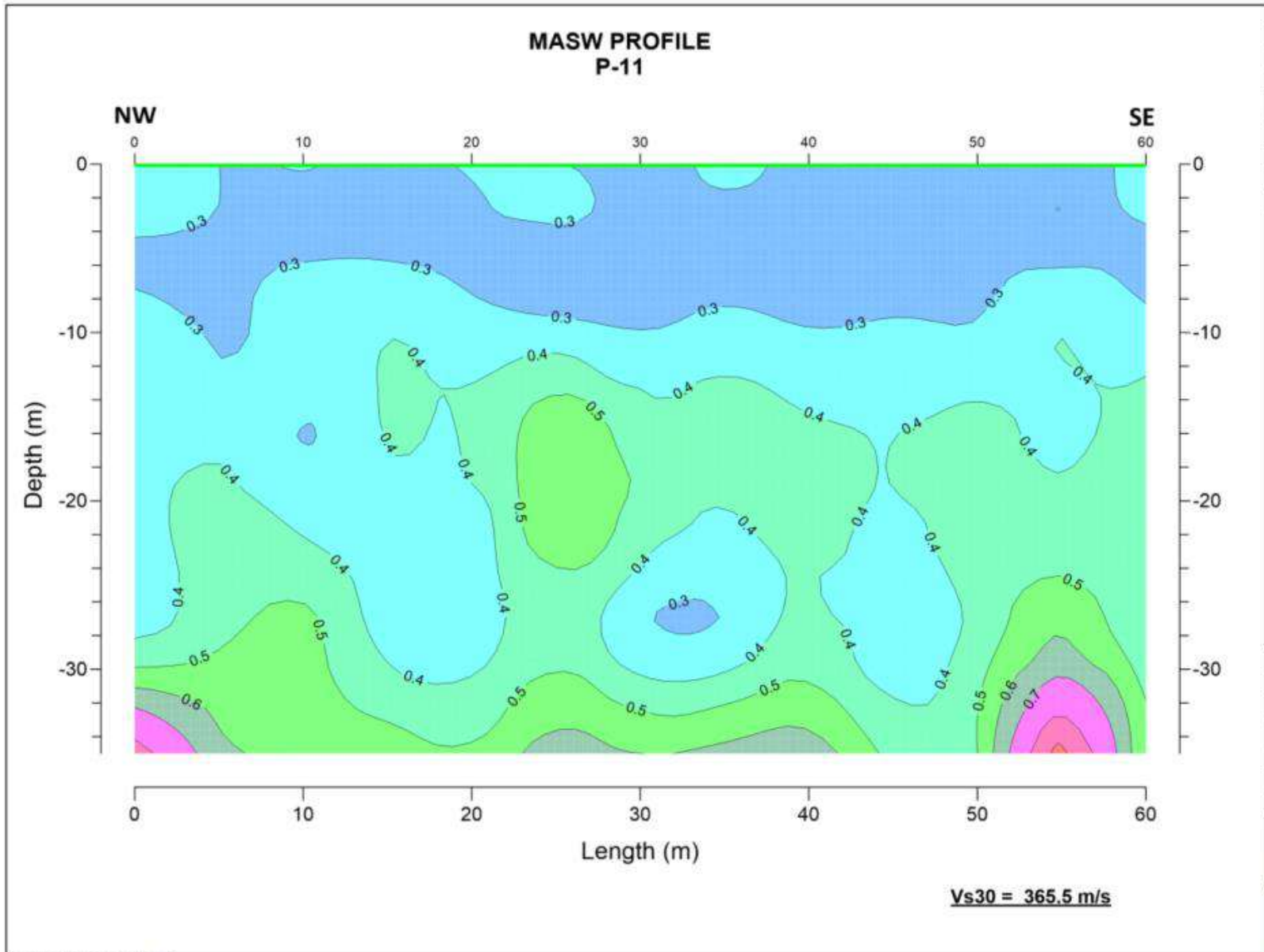


Project: MASW Survey - Bauville Waste Areas (RSA)

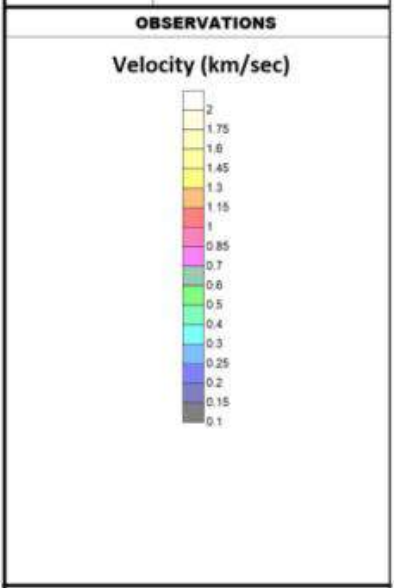
Draw Title: MASW Profile - P-10

Location: RSA 08 - São Luis/MA Execution date: Oct 26th, 2023

Drawing date: Dec 4 th , 2023	Design No: 09 of 54	Appendix: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



REFERENCE DOCUMENT	
CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 04 th , 2023

Fugro Document No:
ALU007GFS-GRE-01

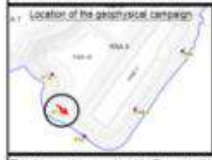
Designated:
Luís D'Agostino

Geologist:
CEEA

Client:
ALUMAR

Fluorinated:
ALUMAR

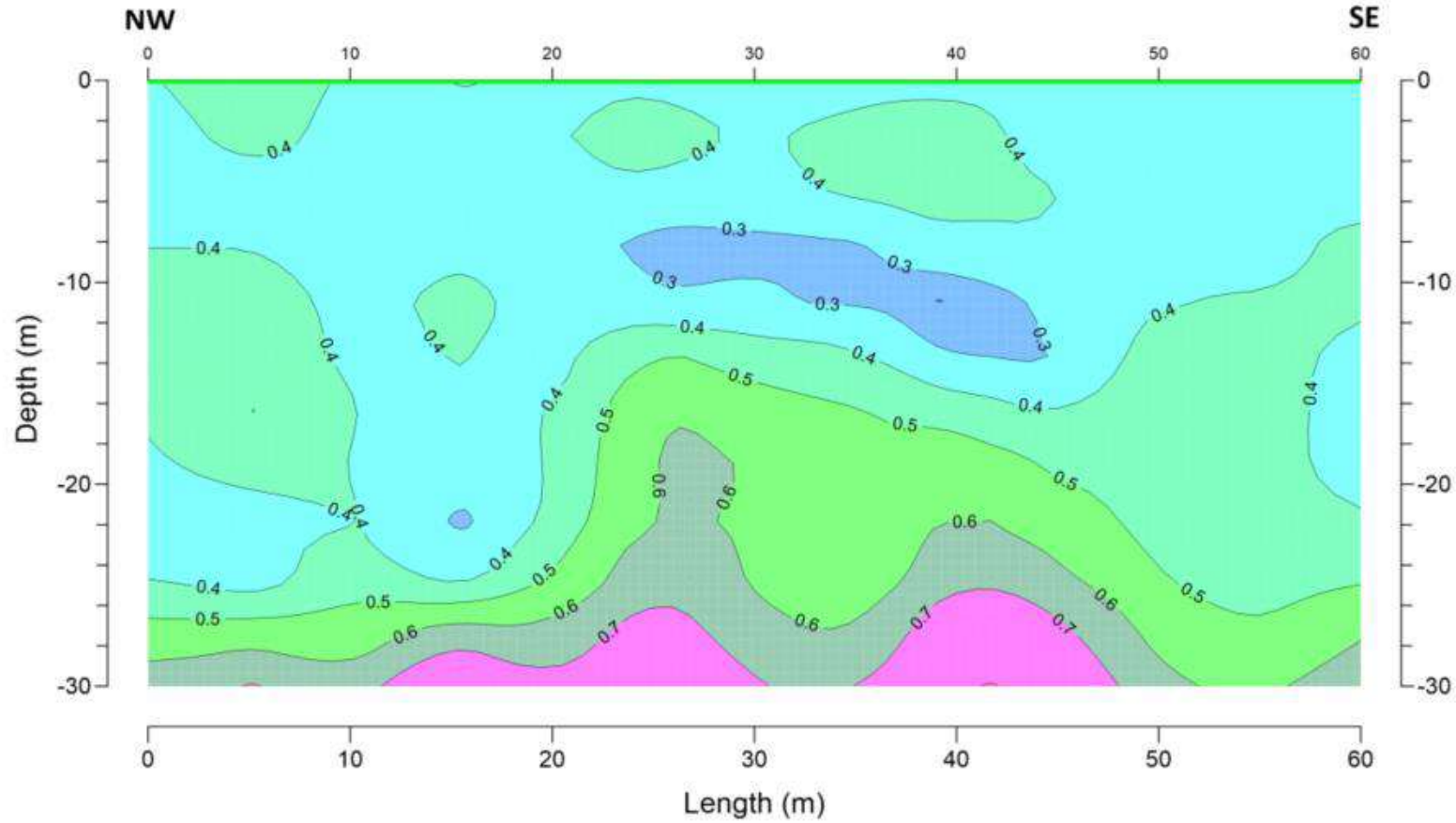
Contact:
Elessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-11		
Location: RSA 08 - São Luís/MA		Execution date: Oct 27 th , 2023
Drawing date: Dec 4 th , 2023	Design no: 10 of 54	Appendix: A, B - MASW Profiles
Design by: Luís D'Agostino	Approved by: Luís D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-12

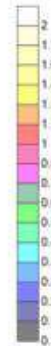


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



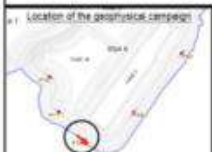
REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec. 05 th , 2023

FUGRO	Page Document No: ALU007GFS-GRE-01 Geophysicist: Luís D'Agostino Geologist: DREA
--------------	--

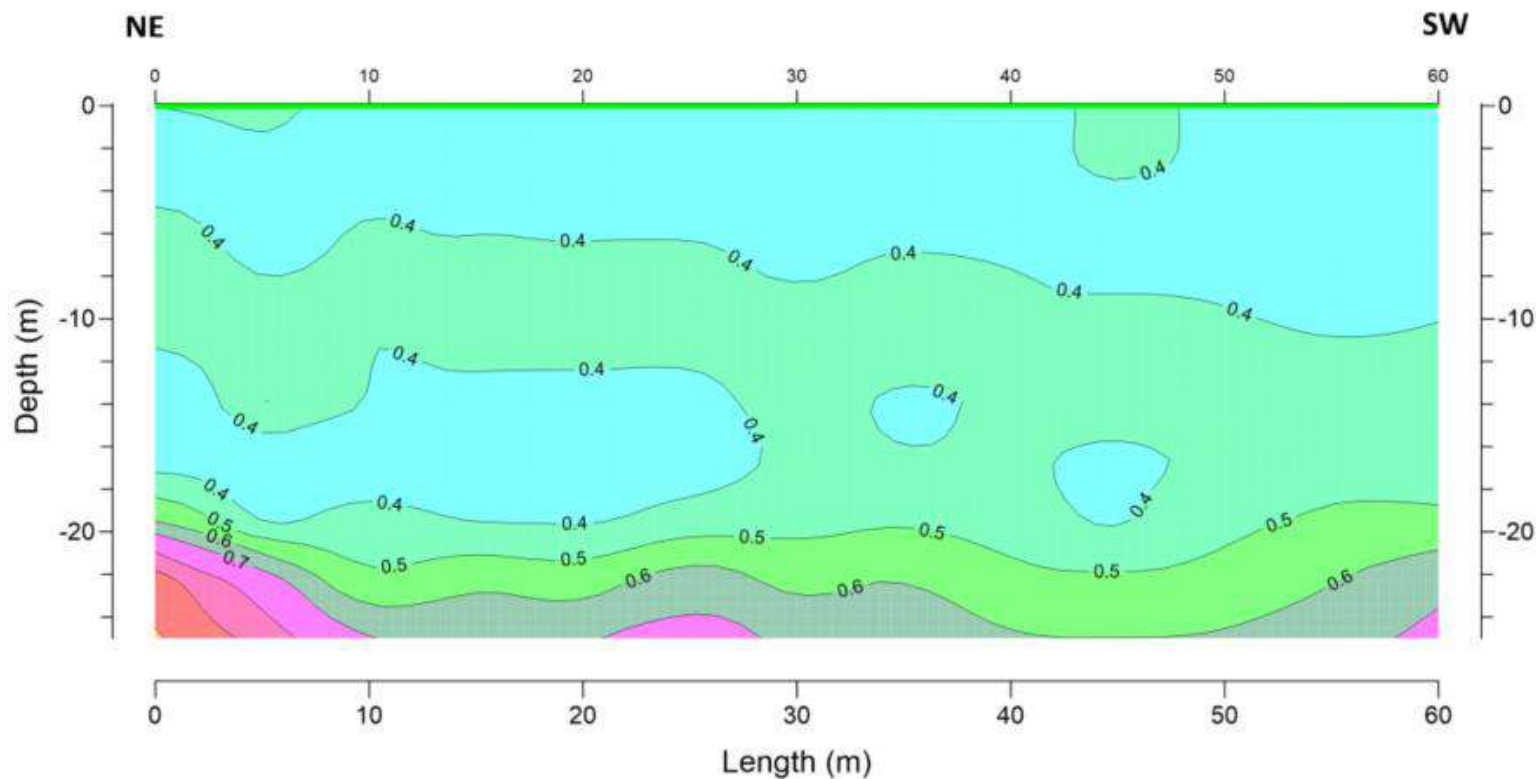
ALUMAR	Client: ALUMAR Facilities: ALUMAR Contact: Elesandro A. Pereira
---------------	--

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)	
Draw title: MASW Profile - P-12	
Location: RSA 08 - São Luís/MA	Revision date: Nov 10 th , 2023
Drawing date: Dec 5 th , 2023	Design No: 11 of 54
Design by: Luís D'Agostino	Approved by: A. II. - MASW Profiles Luís D'Agostino



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-13



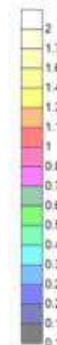
Vs30 = 456.1 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

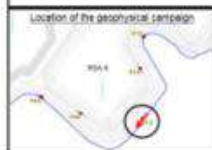
ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 09, 2023



Project: ALU007GFS-GRE-01
Geophysical: Luis D'Agostino
Geologist: CREA

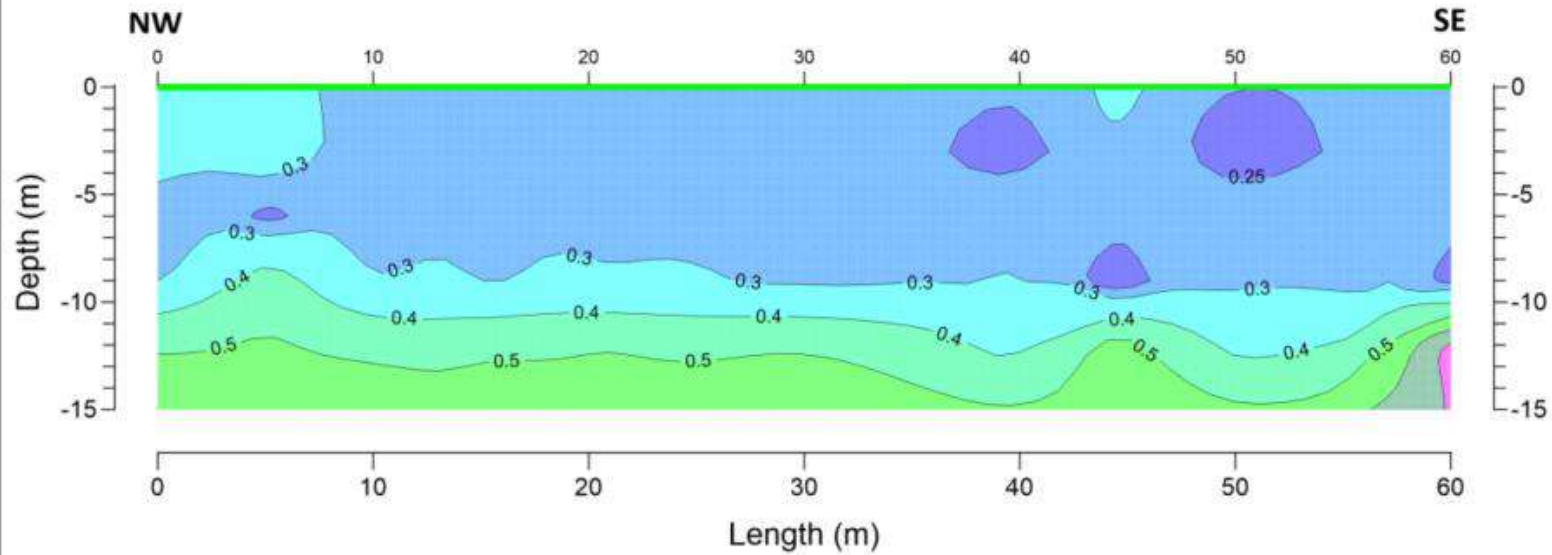


Client: ALUMAR
Facilitator: ALUMAR
Contact: Alessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-13		
Location: RSA 06 - São Luis/MA	Revision date: Oct 19, 2023	
Issued date: Dec 09, 2023	Design No: 12 of 54	Appendix: A. B - MASW Profiles
Designed by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

MASW PROFILE P-14



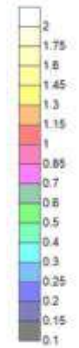
Vs30 = 385 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

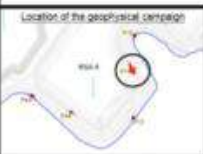
Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 05 th , 2023

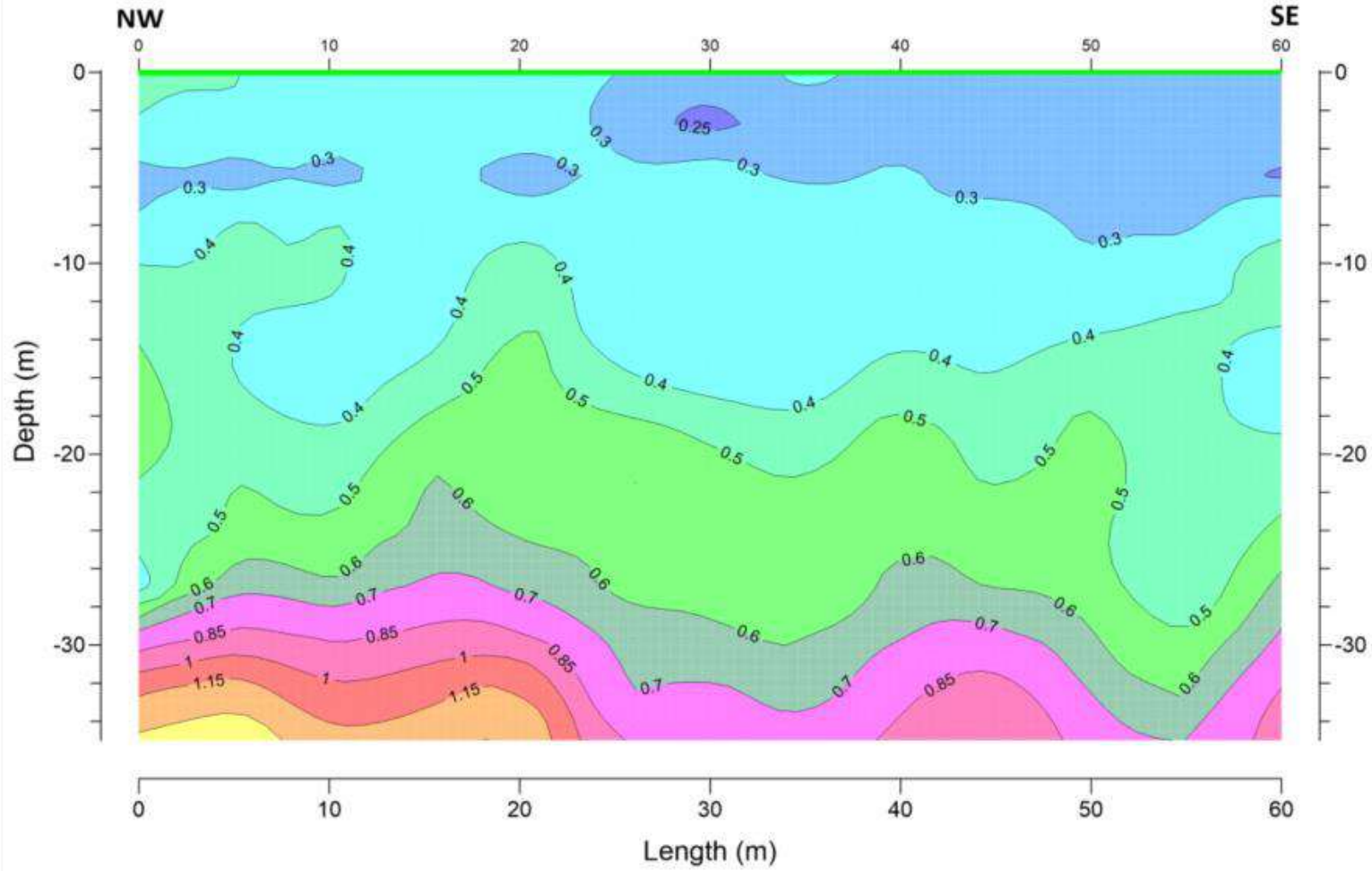
	Project Document No. ALU007GFS-GRE-01
	Drawn by Luis D'Agostino Geologist / CREA
	Client ALUMAR
	Project ALUMAR Contact Elessandro A. Pereira



Project MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Drawn by MASW Profile - P-14		
Location RSA 06 - São Luis/MA	Revision Date Nov 02 nd , 2023	
Drawing Date Dec 5 th , 2023	Design No. 13 of 54	Approved By A. II - MASW Profiles
Designed by Luis D'Agostino	Approved by Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-15



Vs30 = 420.7 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 05 th , 2023

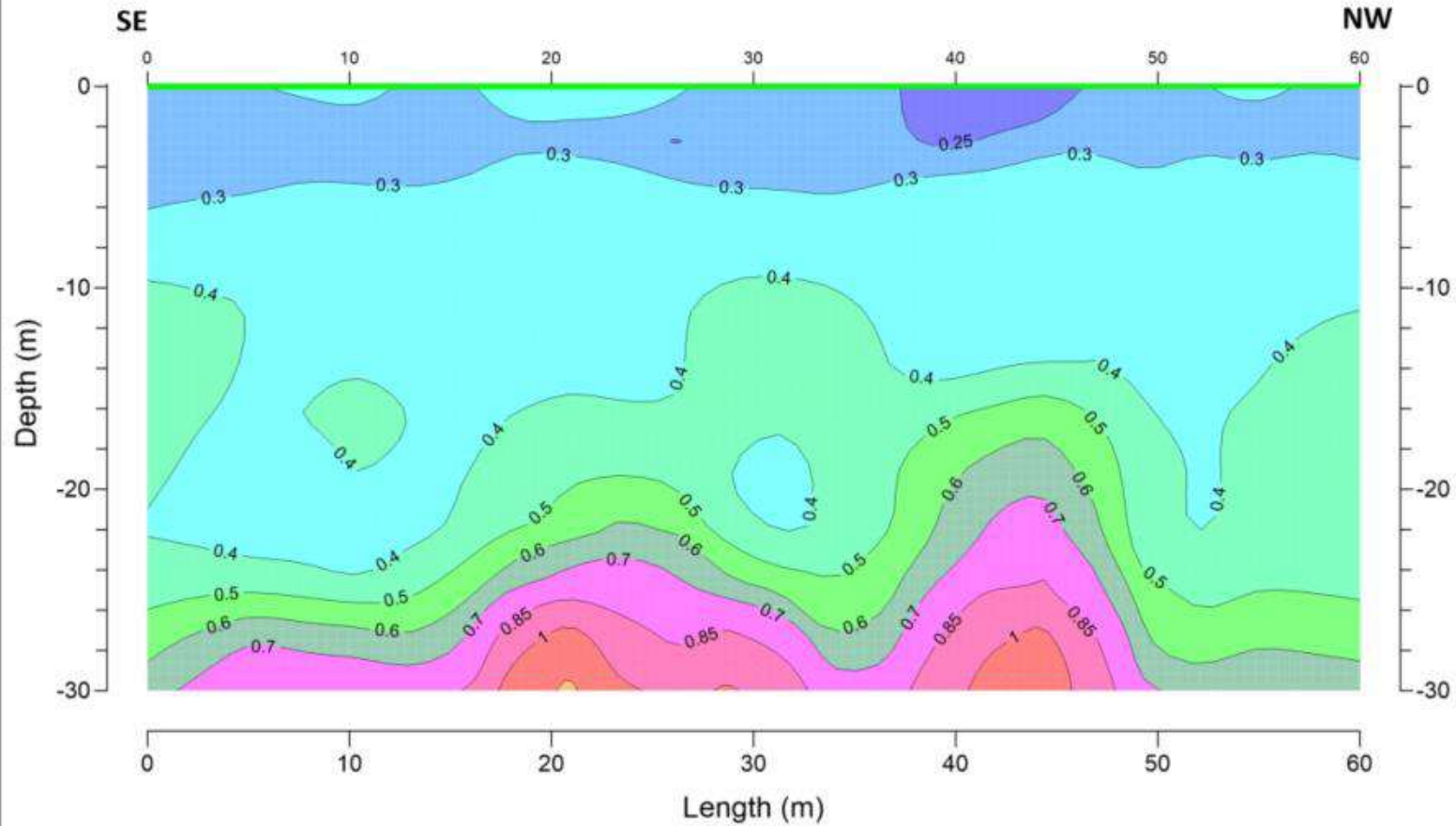
	Page Document No: ALU007GFS-GRE-01
	Geophysicist: Luis D'Agostino Designer: DECA
	Client: ALUMAR
	Fabricator: ALUMAR Contact: Alessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw title: MASW Profile - P-15		
Location: RSA 06 - São Luis/MA		Execution date: Oct 23 rd , 2023
Drawing date: Dec 5 th , 2023	Design No: 14 of 54	Appendix: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-16



Vs30 = 422.1 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 05 th , 2023



Project: ALU007GFS-GRE-01
 Client: ALUMAR
 Contact: Alessandro A. Pereira



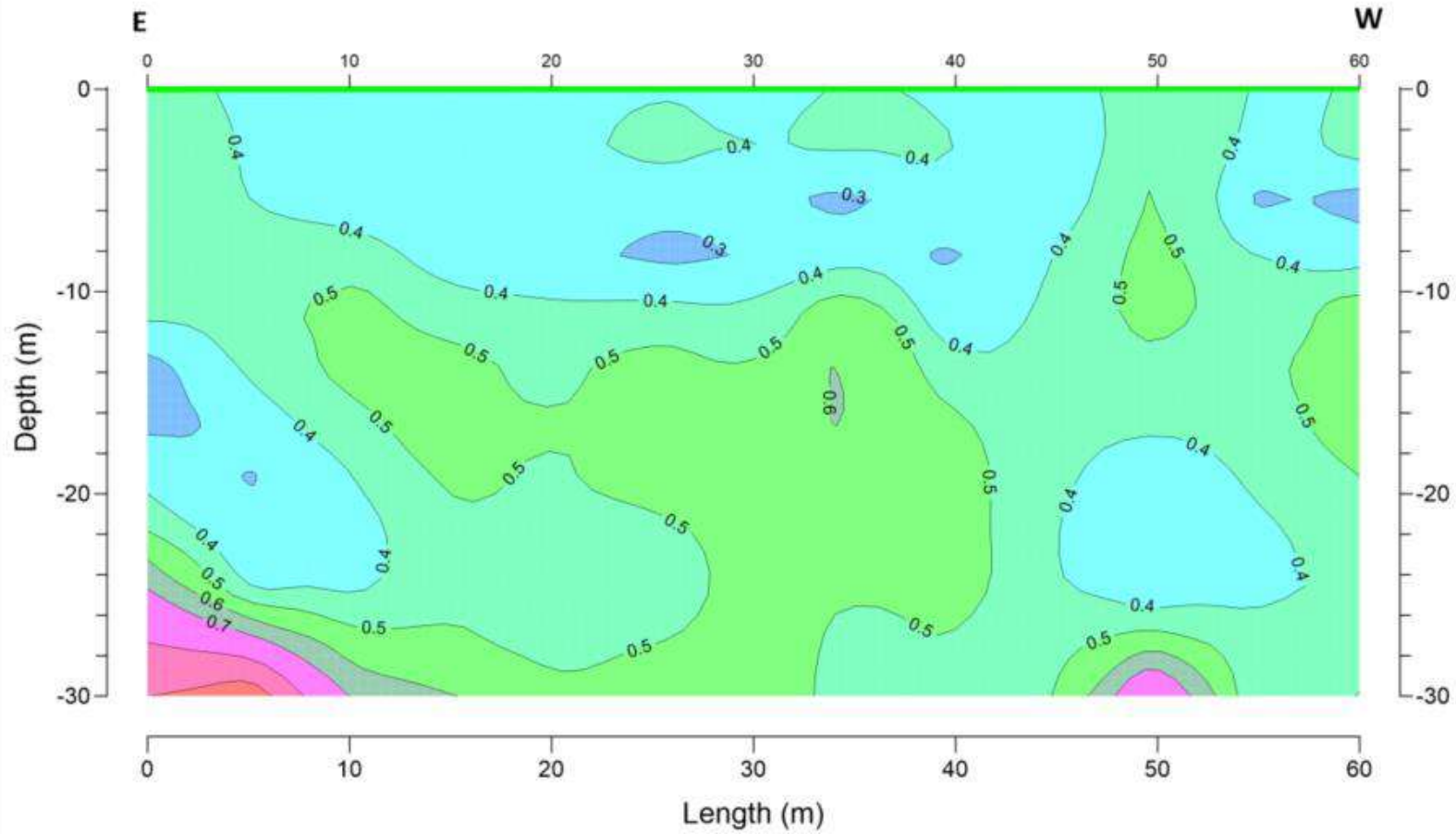
Client: ALUMAR
 Project: ALUMAR
 Contact: Alessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Drawn by: MASW Profile - P-16		
Location: RSA 07 - São Luis/MA		Revision date: Nov 02 nd , 2023
Drawing date: Dec 05 th , 2023	Design No: 15 of 54	Applicable: A. II - MASW Profiles
Designed by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-17



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 05 th , 2023

fugro Logo
 Fugro Reference No: ALU007GFS-GRE-01
 Geophysicist: Luis D'Agostino
 Geologist: CREA

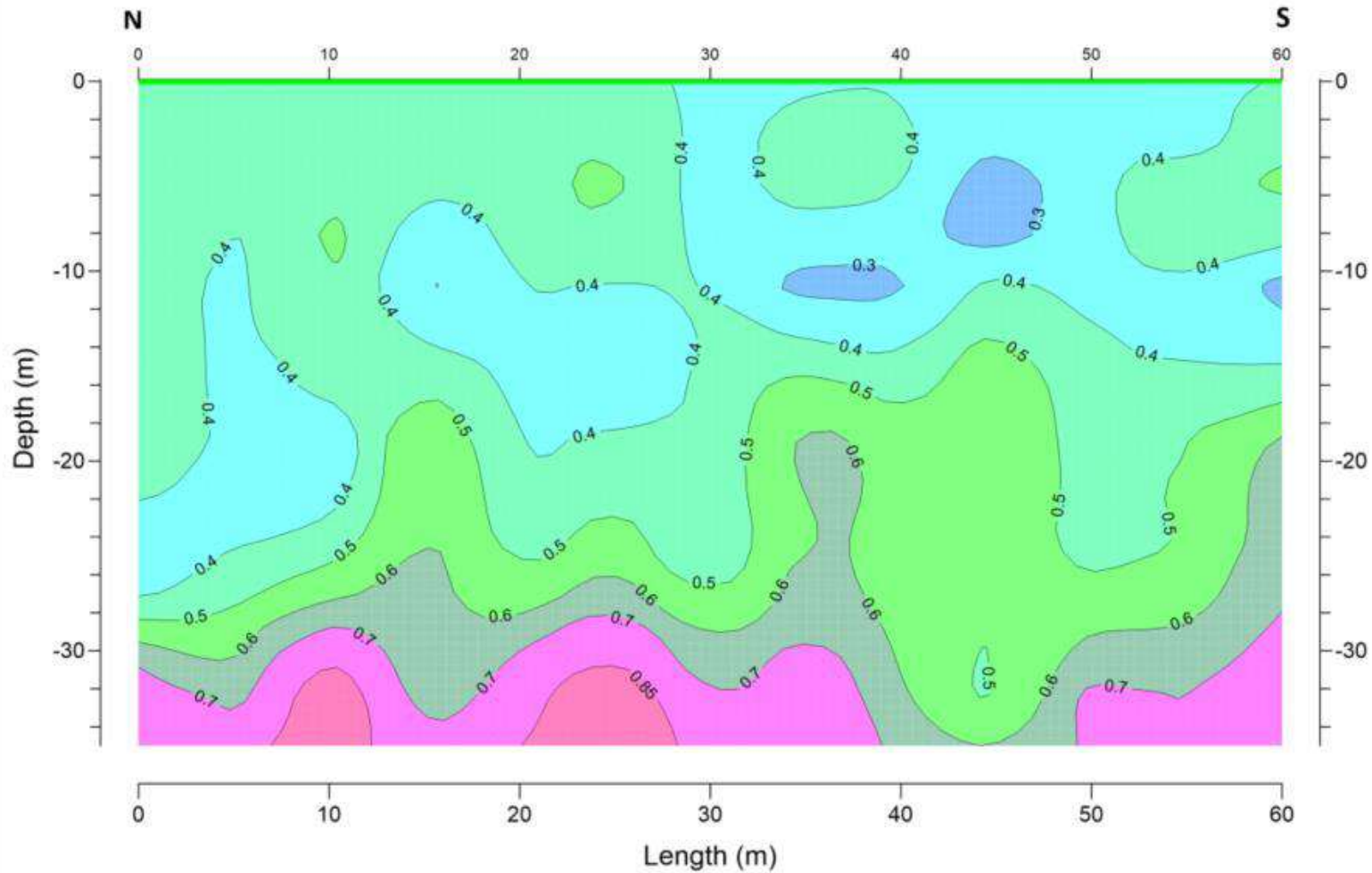
ALUMAR Logo
 Client: ALUMAR
 Provider: ALUMAR
 Contact: Alessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-17		
Location: RSA 07 - São Luis/MA		Revision date: Oct 22 nd , 2023
Drawn by: Dec 05 th , 2023	Sheet No: 16 of 54	Apprentice: A. II - MASW Profiles
Drawn by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-18



Vs30 = 450.2 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 09 ^a , 2023

Page Document No: ALU007GFS-GRE-01
FUGRO
 Geophysical
 Luis D'Agostino
 Manager / CRE

Client:
ALUMAR
 Title/Project:
 ALUMAR
 Contact:
 Eleassandro A. Pereira

Project:
 MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)

Draw title:
 MASW Profile - P-18

Location:
 RSA 05 - São Luis/MA

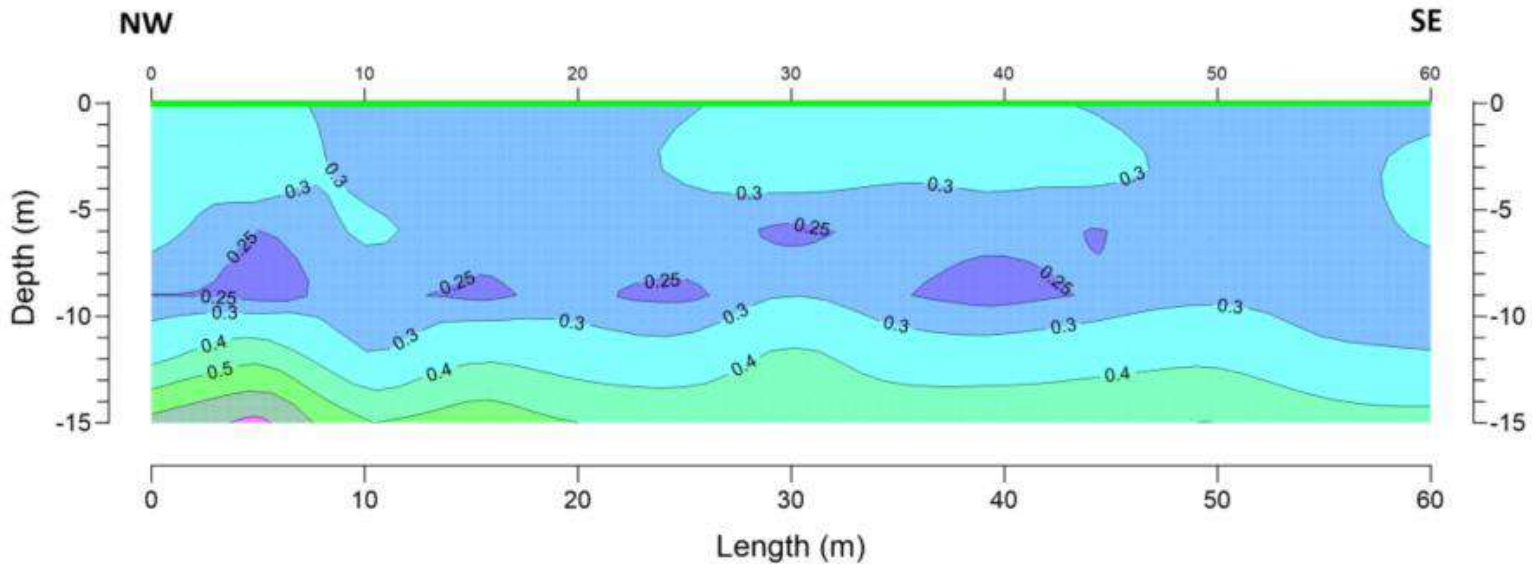
Execution date:
 Nov 09^a, 2023

Drawing date: Dec 5 ^a , 2023	Design No: 17 of 54	Approved: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-19



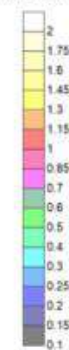
Vs30 = 370.9 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec. 05 ^a , 2023



Page Document No.
ALU007GFS-GR-01
Geophysicist
Luís D'Agostino
Geologist / GSI



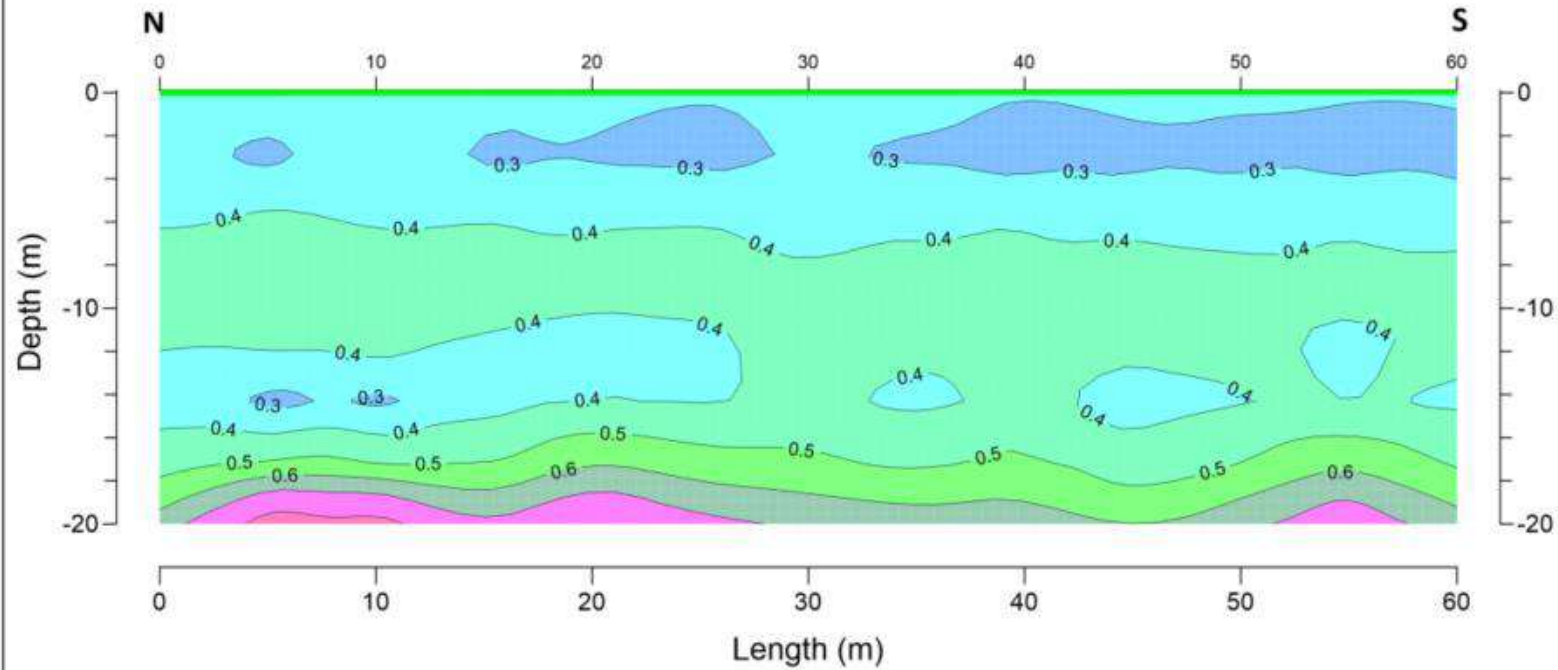
Client
ALUMAR
Facilitator
ALUMAR
Contact
Elessandro A. Pereira



Project
MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)
Drawn by
MASW Profile - P-19
Location
RSA 05 - São Luís/MA
Drawing date
Dec 5^a, 2023
Design No.
18 of 54
Approved by
Luís D'Agostino
Luís D'Agostino
Revision date
Oct 29^a, 2023
Approval
A. it - MASW Profiles

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-20

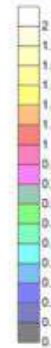


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 05 th , 2023

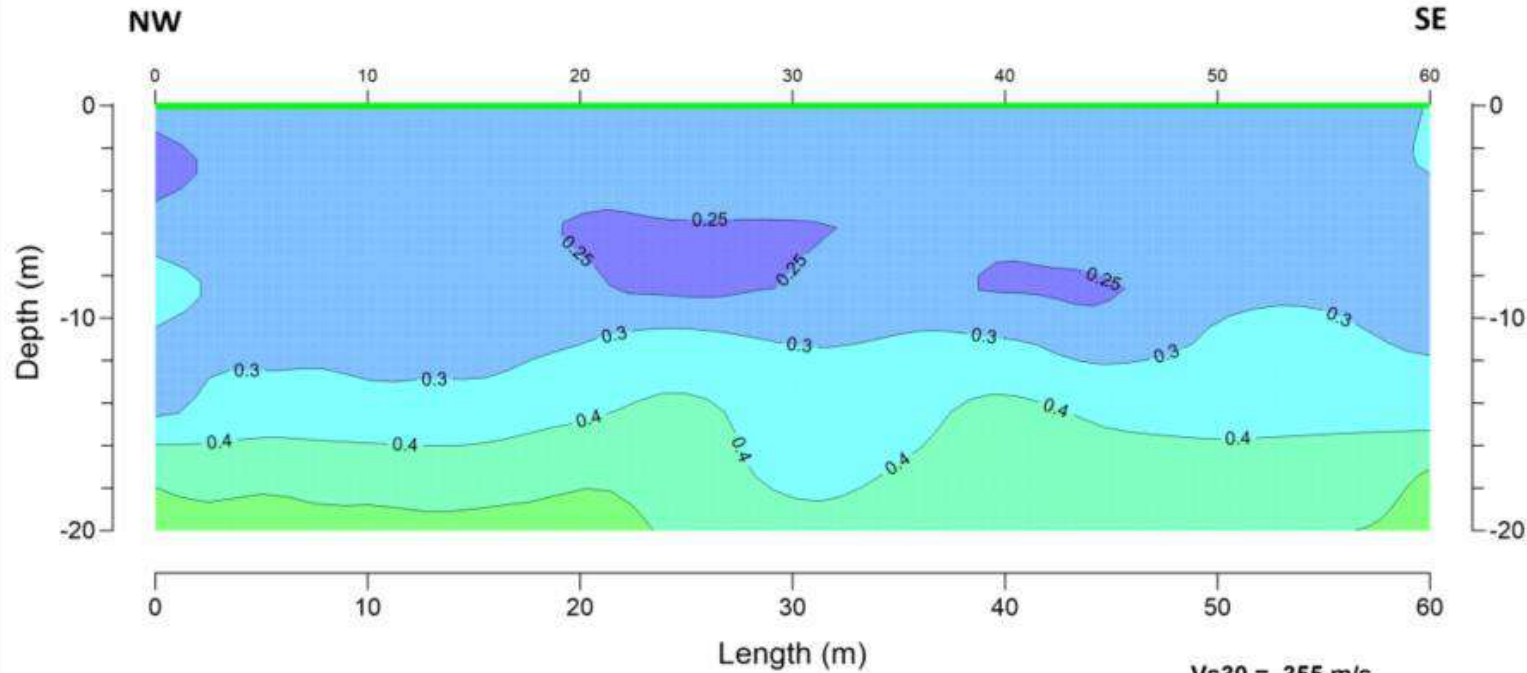

 Page Controlled by:
 ALU007GFS-GRE-01
 Geophysicist:
 Luis D'Agostino
 Geophysicist/AREA


 Client:
 ALUMAR
 Fabricante:
 ALUMAR
 Contato:
 Alessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-20		
Location: RSA 05 - São Luis/MA		Revision date: Oct 18 th , 2023
Created date: Dec 5 th , 2023	Revised by: 19 of 54	Approved by: A. II - MASW Profiles
Created by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



MASW PROFILE P-21

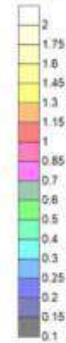


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 07 th , 2023


 Page Enclosed to:
 ALU007GF5-GRE-01
 Geophysical
 Luis D'Agostino
 Geotech / GRE


 Client:
 ALUMAR
 Escalador:
 ALUMAR
 Contact:
 Elessandro A. Pereira

Project:
 MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)

Draw Title:
 MASW Profile - P-21

Location:
 RSA 05 - São Luis/MA

Location Date:
 Oct 27th, 2023

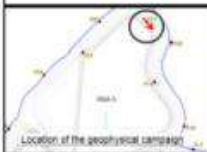
Drafting date:
 Dec 7th, 2023

Design No:
 20 of 54

Appendix:
 A. II - MASW Profiles

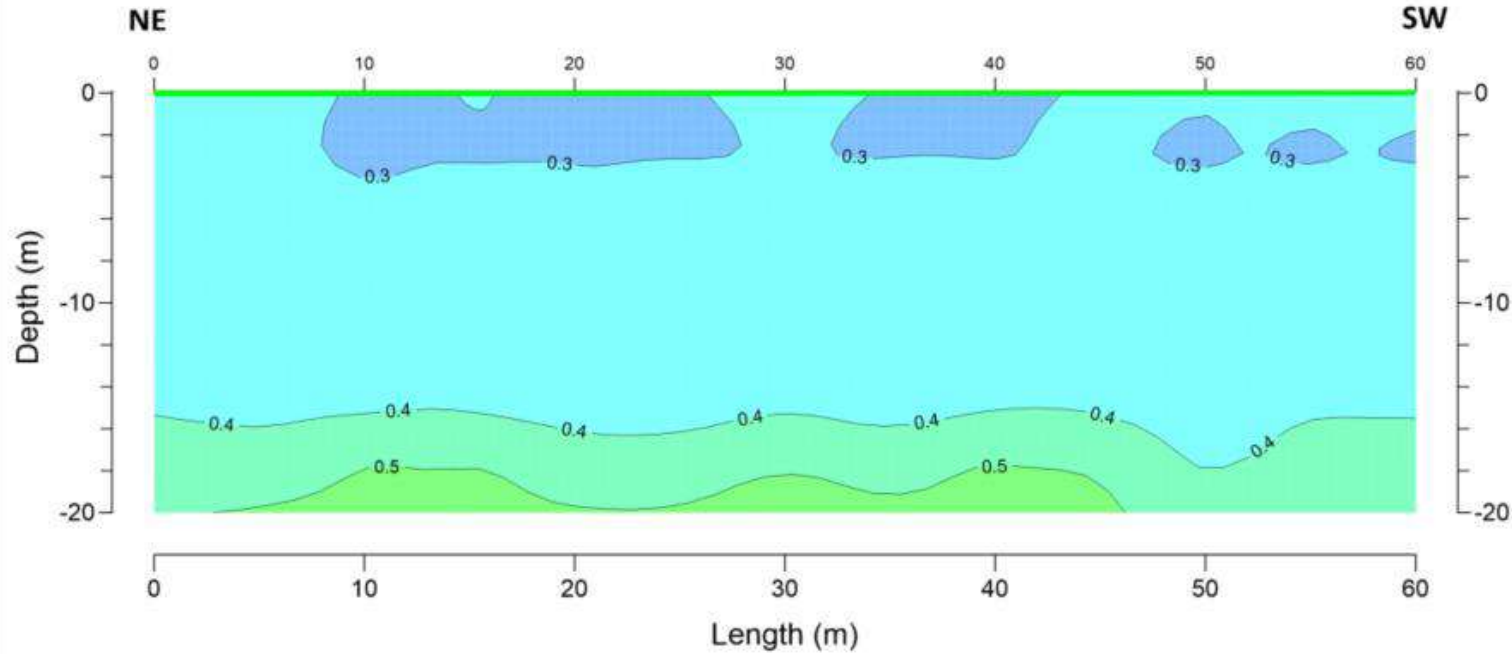
Design by:
 Luis D'Agostino

Approved by:
 Luis D'Agostino



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-22



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



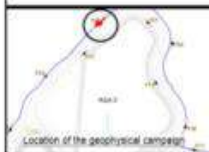
REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First issue	Dec 07 th , 2023

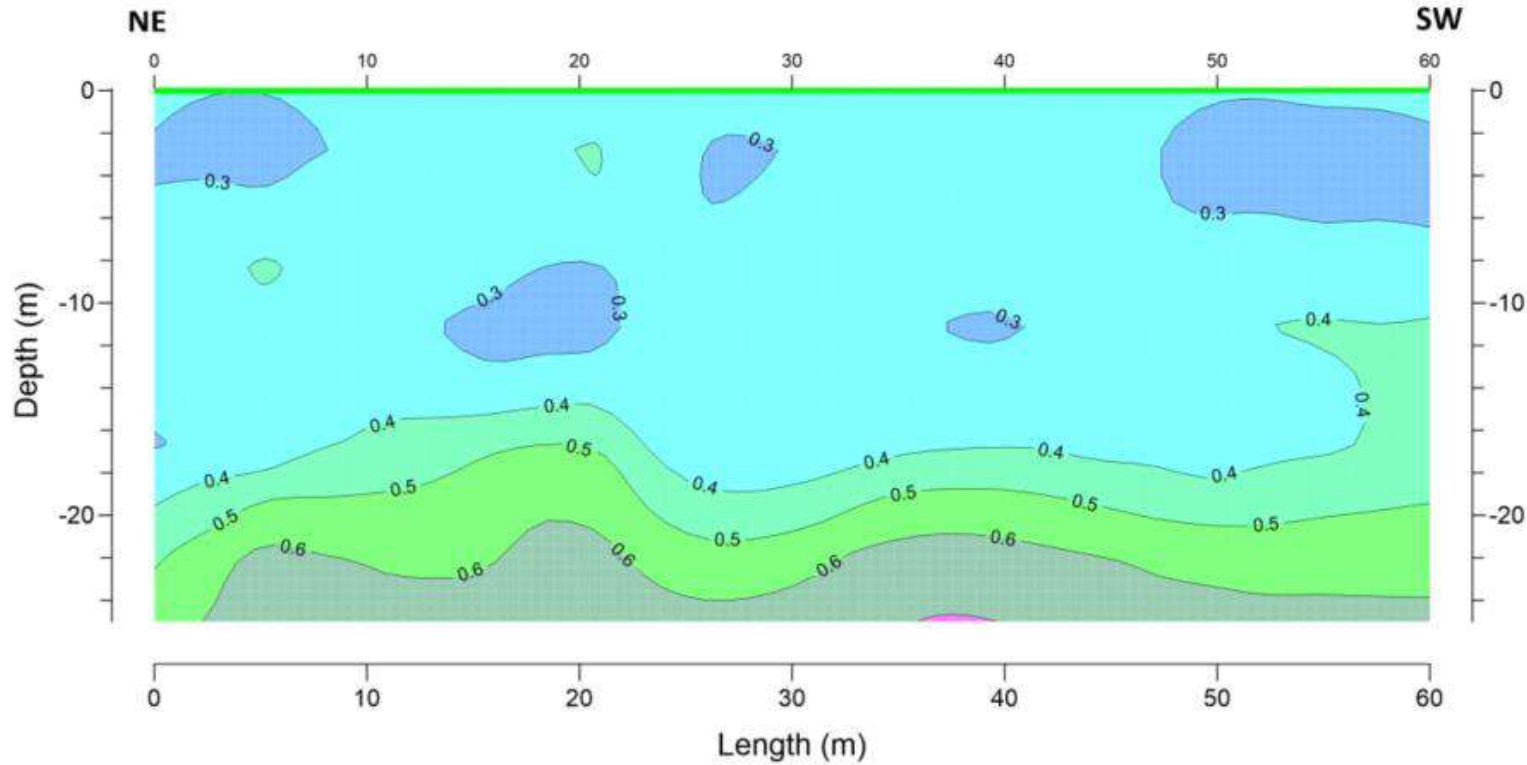
	Page Document No: ALU07GFS-GRE-01
	Author: Luis D'Agostino Geologist - GRECA

	Client: ALUMAR
	Function: ALUMAR
	Contact: Elessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-22		
Location: RSA 05 - São Luis/MA		Execution date: Oct 27 th , 2023
Drawing date: Dec 7 th , 2023	Design No: 21 of 54	Appoint: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approvers: Luis D'Agostino	



MASW PROFILE P-23

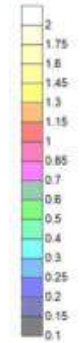


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 07 th , 2023



Project Document No.
ALU007GFS-GRE-01
Geophysicist
Luís D'Agostino
Geologist/CREA



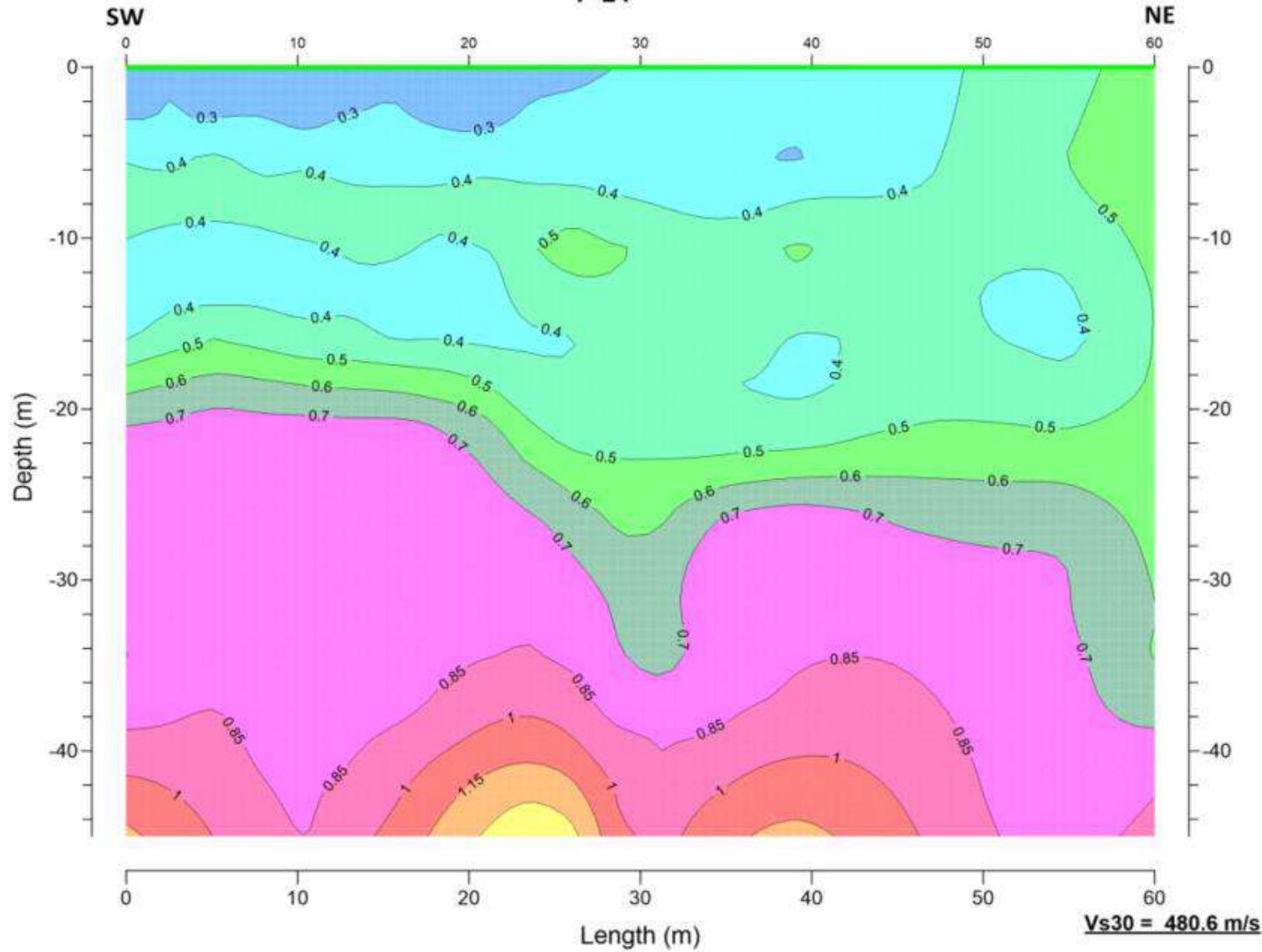
Client
ALUMAR
Fabricator
ALUMAR
Contractor
Elessandro A. Pereira



Project MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title MASW Profile - P-23		
Location RSA 05 - São Luís/MA		Issuance date Oct 28 th , 2023
Drawing date Dec 7 th , 2023	Design No. 22 of 54	Appendix A. II - MASW Profiles
Drawn by Luís D'Agostino	Approved by Luís D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-24



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00.	Final Issue	Dec 05 th , 2023

fugro Project Document file
ALU007GFS-GRE-01
Geophysical
Luis D'Agostino
Geologist / CREX

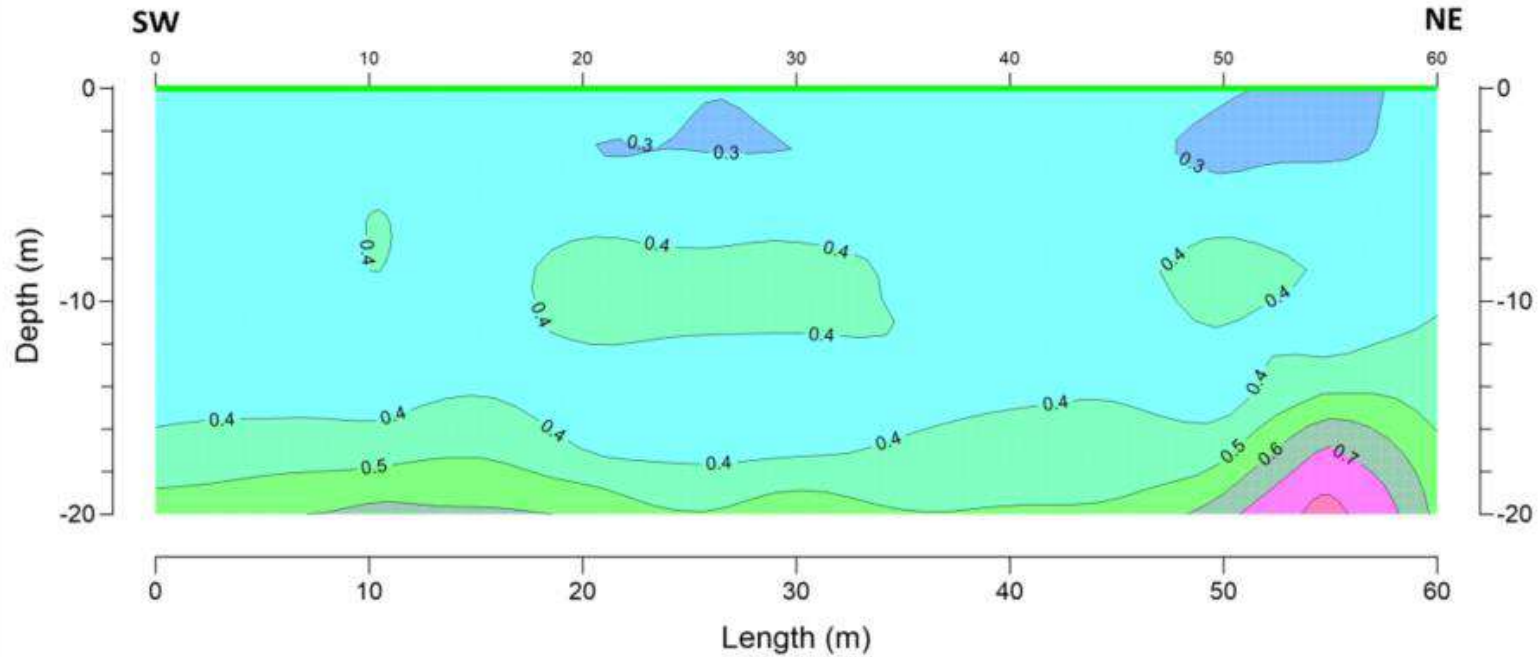
ALUMAR Client
ALUMAR
Facultadon
ALUMAR
Contract
Elessandro A. Pereira

<small>Project</small> MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
<small>Draw Title</small> MASW Profile - P-24		
<small>Location</small> RSA 05 - São Luís/MA	<small>Execution date</small> Nov 05 th , 2023	
<small>Drawn by</small> Dec 05 th , 2023	<small>Design by</small> 23 of 54	<small>Approved by</small> A. II - MASW Profiles
<small>Design by</small> Luis D'Agostino	<small>Approved by</small> Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-25



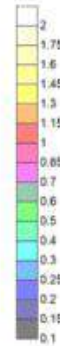
Vs30 = 439.6 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 09 th , 2023



Project:
AL0007GFS-GRE-01
Geophysicist:
Luís D'Agostino
Geologist/CSE:
Elessandro A. Pereira



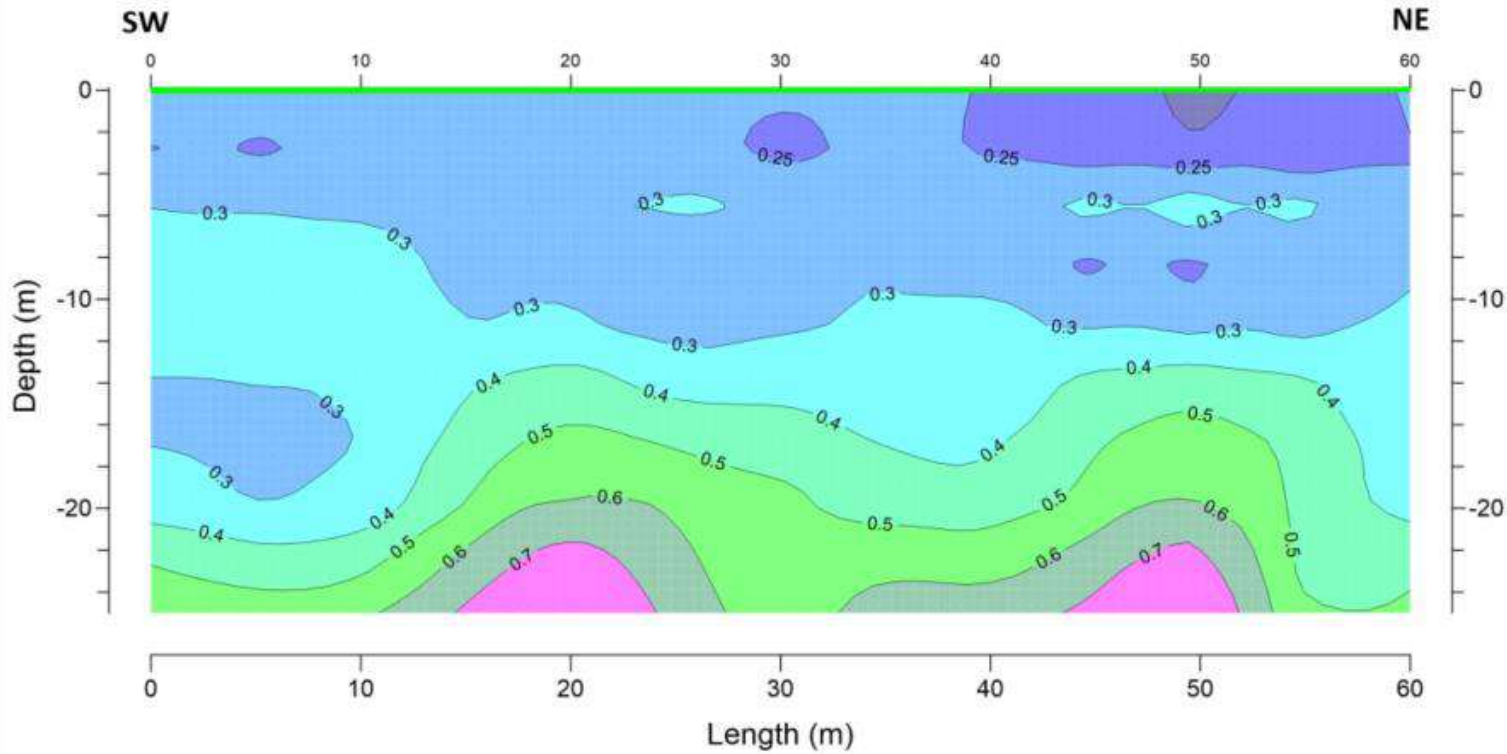
Client:
ALUMAR
Fornecedor:
ALUMAR
Consultor:
Elessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Drawn by: MASW Profile - P.25		
Location: RSA 04 - São Luís/MA		Execution date: Oct 21 st , 2023
Drawing date: Dec 7 th , 2023	Design by: 24 of 54	Approved by: A. II - MASW Profiles
Drawn by: Luís D'Agostino	Approved by: Luís D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-26



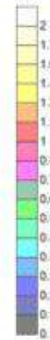
Vs30 = 382.9 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS


Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 05 th , 2023


 Page Document No: ALU007GFS-GRE-01
 Geotechnical: Luis D'Agostino
 Geologist: ORECA

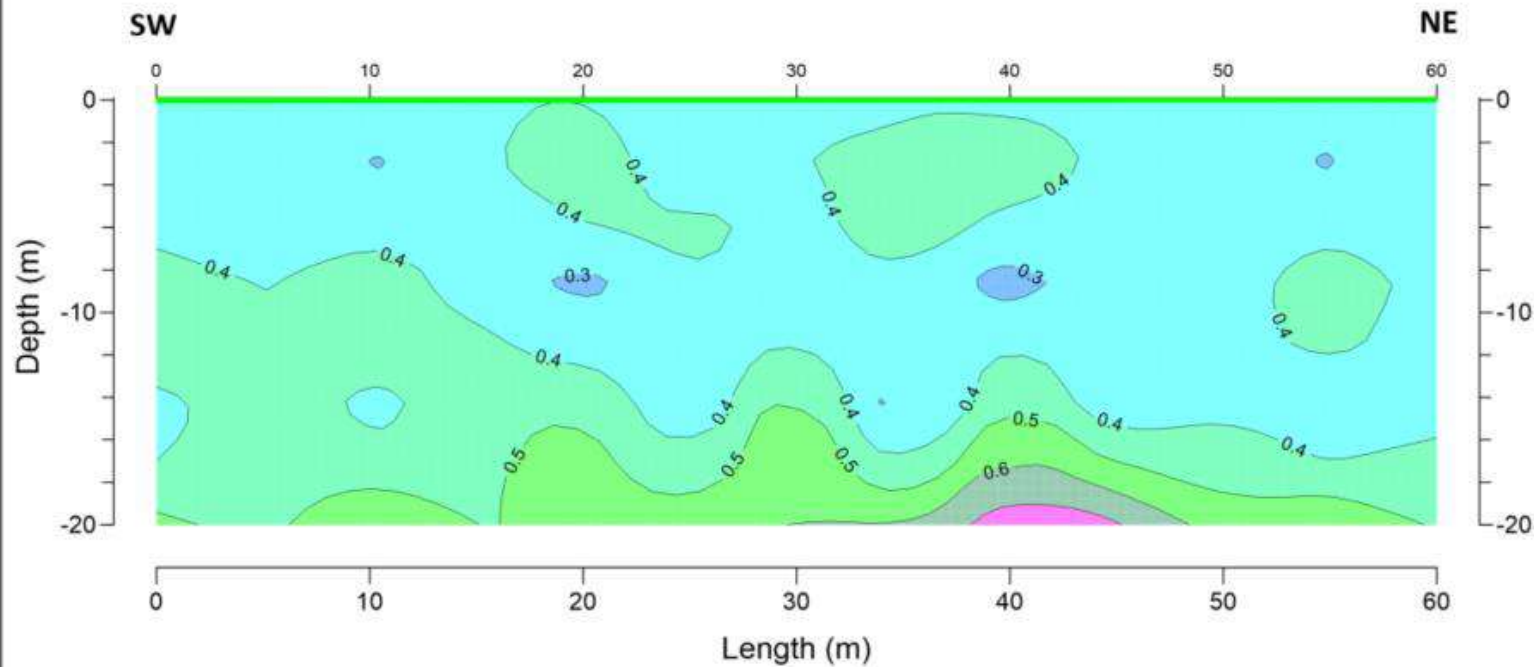

 Client: ALUMAR
 Project: ALUMAR
 Contact: Alessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauste Waste Areas (RSA)		
Draw title: MASW Profile - P-26		
Location: RSA 04 - São Luis/MA		Execution date: Oct 29 th , 2023
Drawing date: Dec 7 th , 2023	Design No: 25 of 54	Appendix: A. II - MASW Profiles
Geotechnical: Luis D'Agostino	Geotechnical: Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-27



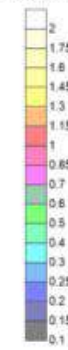
Vs30 = 440.5 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 05 th , 2023


 Page Derived for:
 ALU007GFS-GRE-01
 Geophysicist:
 Luis D'Agostino
 Geologist / CREA


 Client:
 ALUMAR
 Provider:
 ALUMAR
 Contact:
 Elesandro A. Pereira



Project:
 MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)

Draw title:
 MASW Profile - P-27

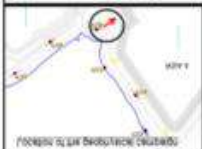
Location:
 RSA 04 - São Luis/MA

Issue date:
 Oct 21st, 2023

Drawing date: Dec 7 th , 2023	Design No: 26 of 54	Appendix: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

Επισημαίνεται πως τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτό το έγγραφο προκύπτουν από τη χρήση του λογισμικού που αναφέρεται στην επόμενη σελίδα.



Γραφείο Μετεωρολογίας Δ/νση: 5053 Τμήμα: 55 Αρ. Πρωτ.: 286/2019 Ημερ. έκδοσης: 19/05/2019 Αρ. Πρωτ. Αποστολής: 5053	Γραφείο Μετεωρολογίας Δ/νση: 5053 Τμήμα: 55 Αρ. Πρωτ.: 286/2019 Ημερ. έκδοσης: 19/05/2019 Αρ. Πρωτ. Αποστολής: 5053
--	--

	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

	Γραφείο Μετεωρολογίας Δ/νση: 5053 Τμήμα: 55 Αρ. Πρωτ.: 286/2019 Ημερ. έκδοσης: 19/05/2019
--	---

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

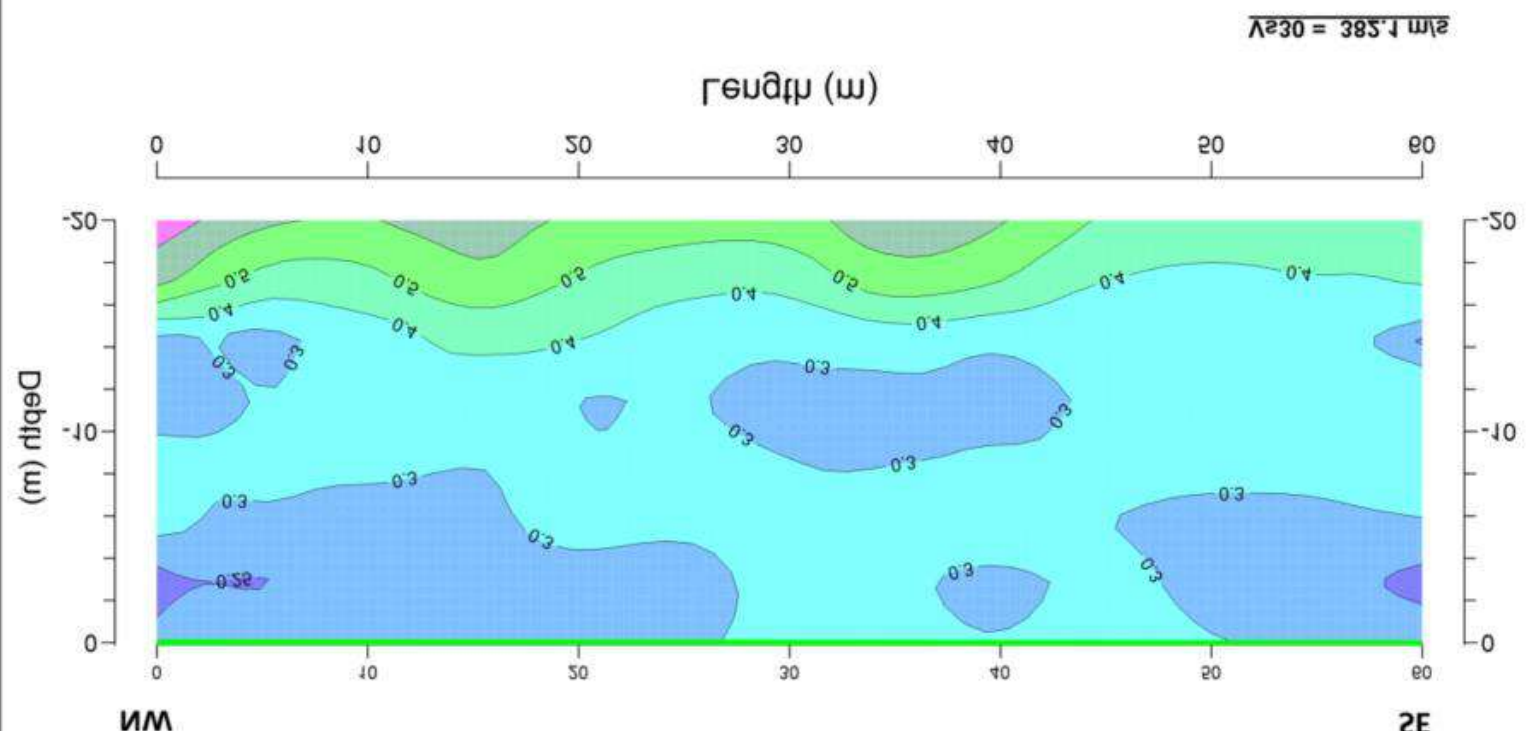
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--

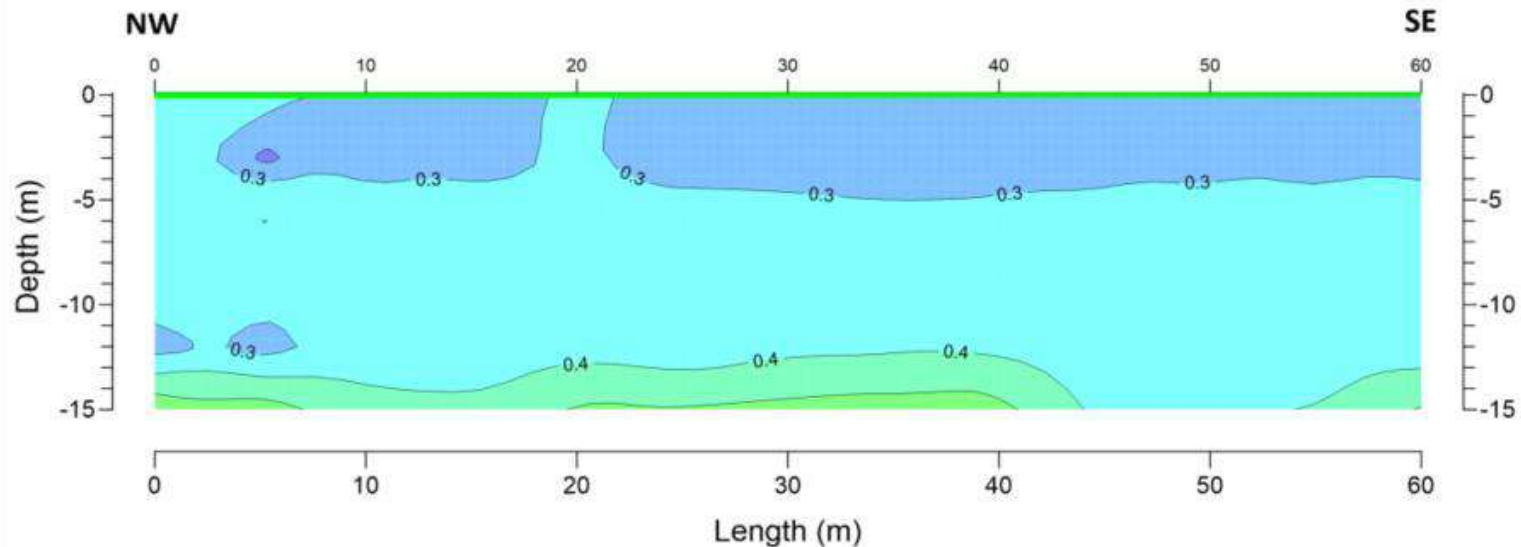
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΡΑ ΟΡΑΜΑ
--	--



$\lambda_{230} = 385.1 \text{ m}^2$

**B-38
ΜΑΣΜ ΠΡΟΦΙΛΕ**

MASW PROFILE P-29

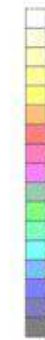


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 05 th , 2023

FUGRO	Project	ALU007GFS-GRE-01
	Geophysicist	Luis D'Agostino
	Geologist/CREA	

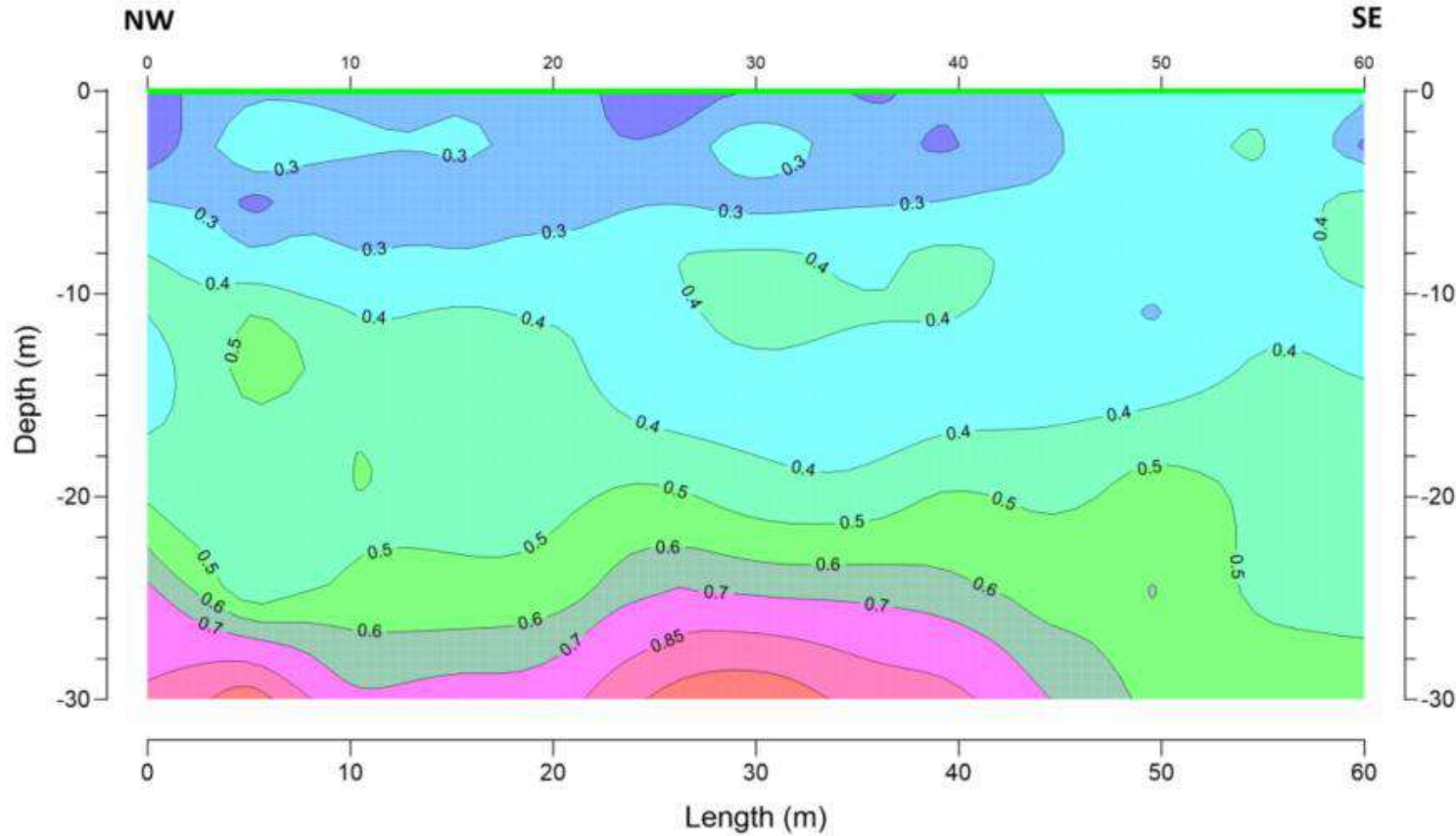
ALUMAR	Client	ALUMAR
	Facilitator	ALUMAR
	Contract	
	Contract	Elessandro A. Pereira

Project		
MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title		
MASW Profile - P-29		
Location	Revision date	
RSA 02 - São Luis/MA	Oct 25 th , 2023	
Printing date	Page No.	Appendix
Dec 5 th , 2023	28 of 54	A. II - MASW Profiles
Checked by	Approved by	
Luis D'Agostino	Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-30



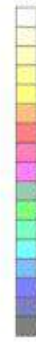
$V_{s30} = 428.9$ m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 05 th , 2023

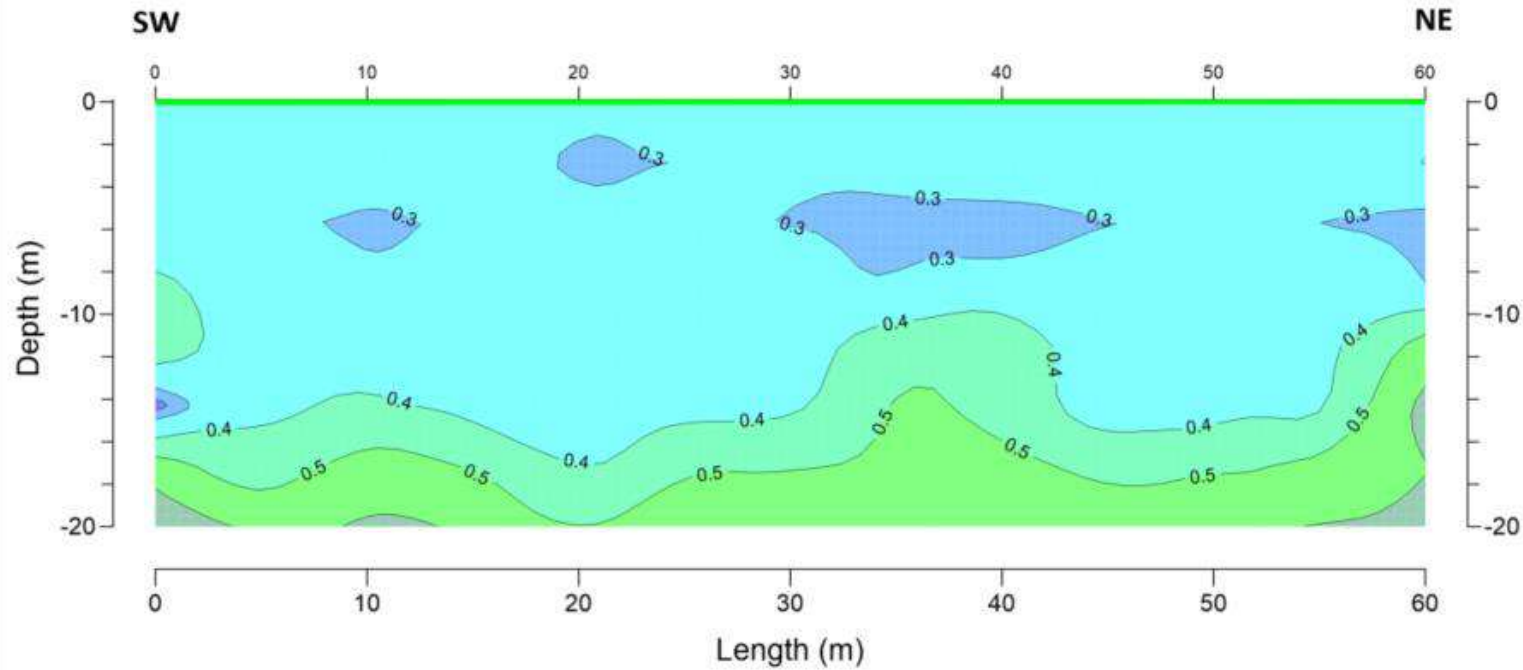
 Page Document No: ALU007GFS-GRE-01
 Geophysicist: Luis D'Agostino
 Geologist: OREA
 Client: ALUMAR
 Project Name: ALUMAR
 Contact: Alessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Baútle Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-30		
Location: RSA 02 - São Luis/MA	Execution Date: Oct 17 th , 2023	
Drawing Date: Dec 5 th , 2023	Design No: 29 of 54	Approach: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approach by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-31

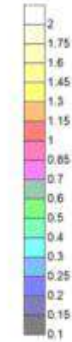


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 06 th , 2023

	Page Document for ALU007GFS-GRE-01 Geophysicist Luis D'Agostino Geologist / CREA
--	--

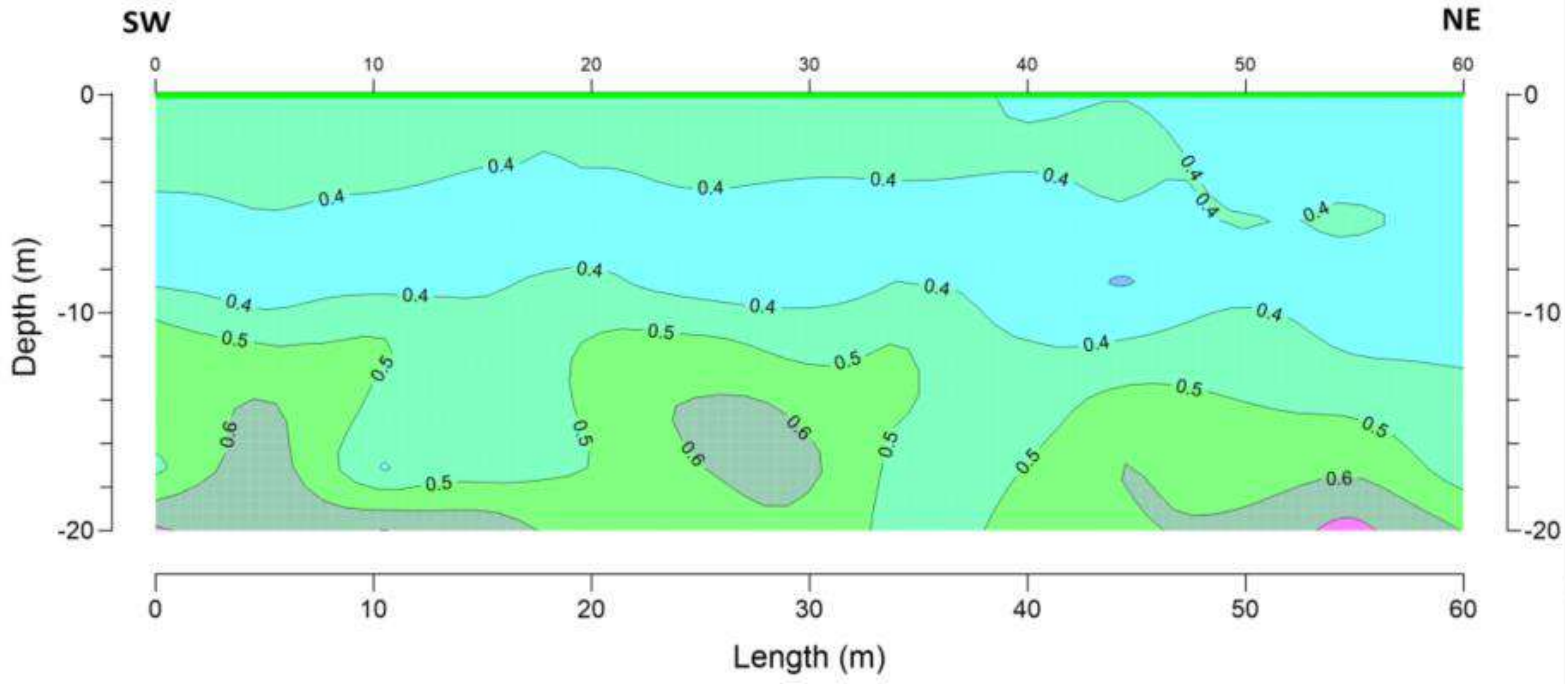
	Client ALUMAR Fabrication ALUMAR CONSULT Alessandro A. Pereira
--	---

Project MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Site MASW Profile - P-31		
Location RSA 02 - São Luis/MA		Execution date Oct 25 th , 2023
Drawing date Dec 06 th , 2023	Design file 30 of 54	Appendix A. II - MASW Profiles
Design by Luis D'Agostino	Approved by Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-32



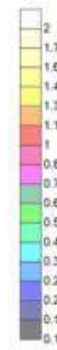
Vs30 = 486.9 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	Final issue	Dec 06 th , 2023



Project Document No:
ALU007GFS-GRE-01
Geophysicist
Luís D'Agostino
Geologist: CREA



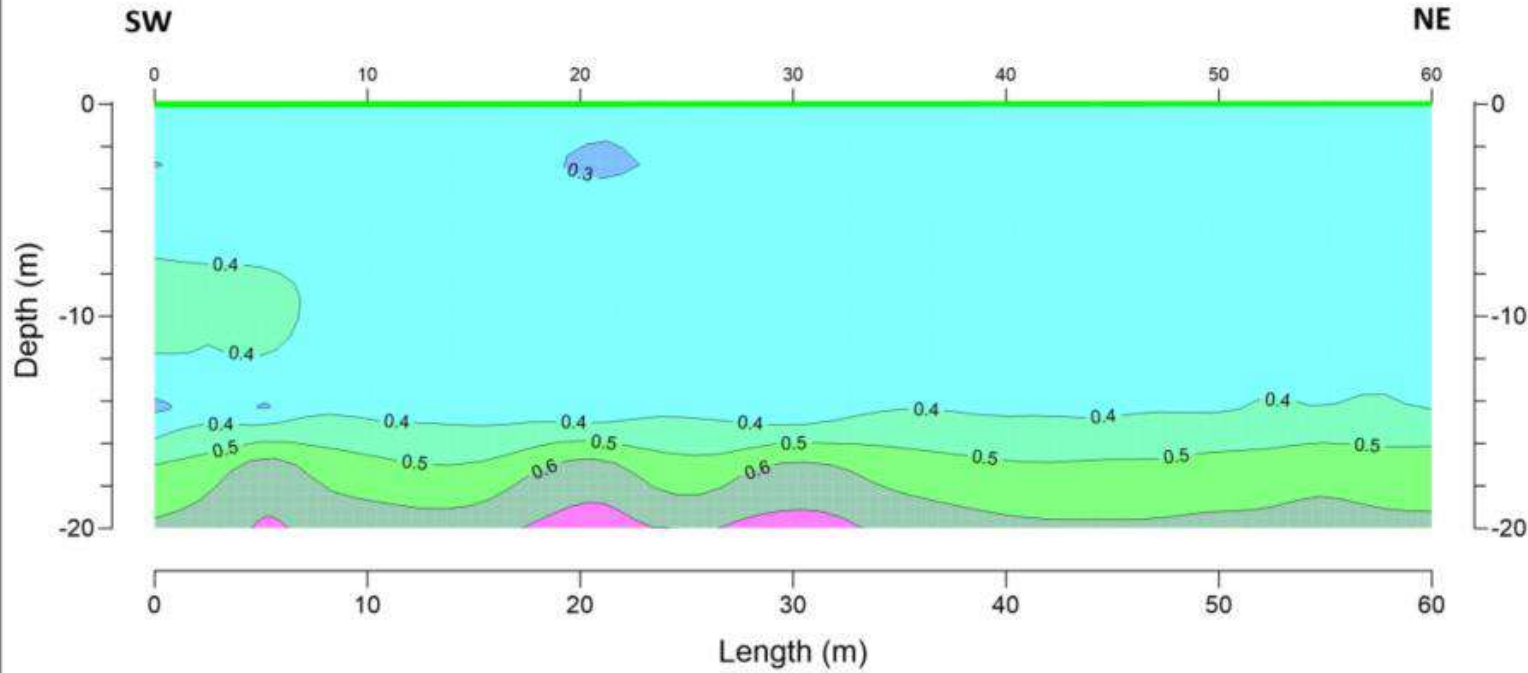
Client:
ALUMAR
Fabrication:
ALUMAR
Contact:
Elessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Drawn by: MASW Profile - P-32		
Location: RSA 02 - São Luís/MA		Revision date: Oct 17 th , 2023
Drawing date: Dec 6 th , 2023	Design No: 31 of 54	Appoints: A, II - MASW Profiles
Designer: Luís D'Agostino	Appointed by: Luís D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-33



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	Final Issue	Dec 06 ^o , 2023

FUGRO	Project Number ALU007GFS-GRE-01
	Investigator Luis D'Agostino
	Geologist/CPRA

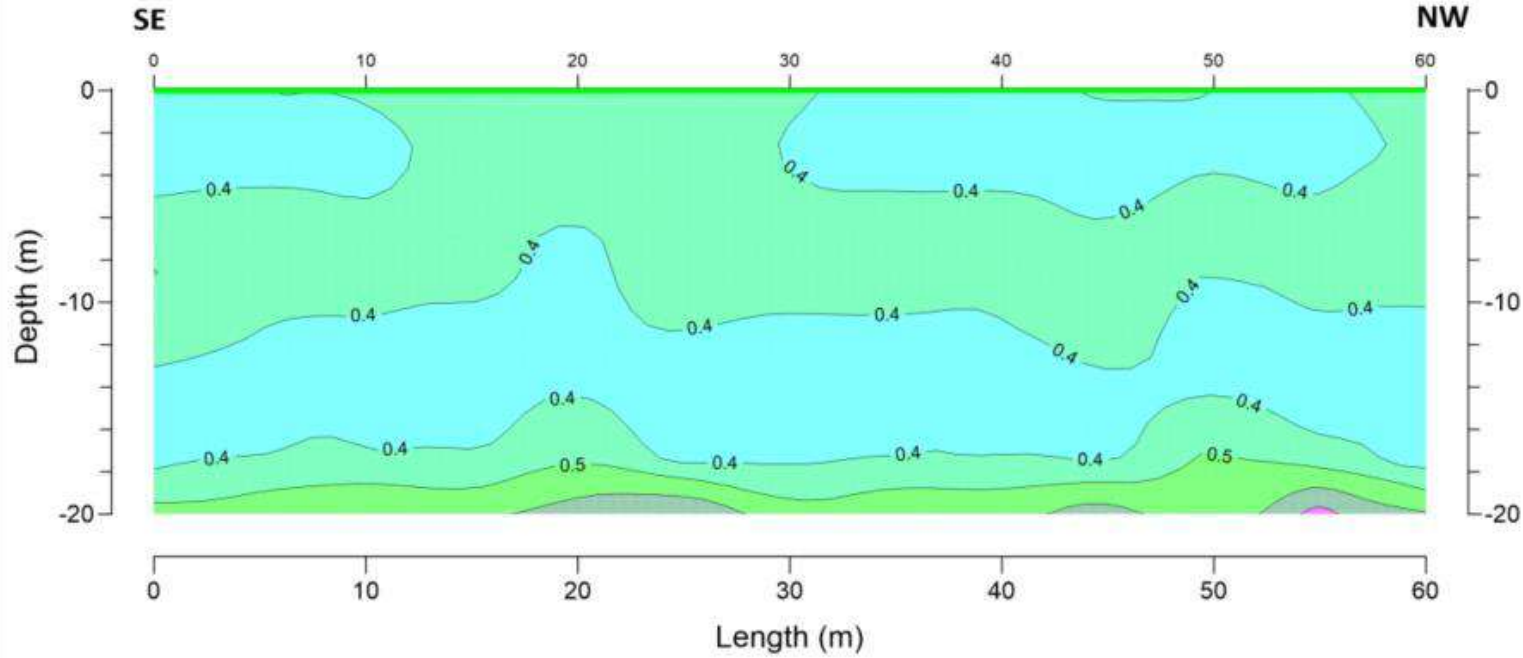
ALUMAR	Client ALUMAR
	Facilitation ALUMAR
	Contact Elessandro A. Pereira

Project MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title MASW Profile - P-33		
Location RSA 01 - Silo Luis/MA	Execution date Oct 24 ^o , 2023	
Drawing date Dec 0 ^o , 2023	Design by 32 of 54	Approved by A. II - MASW Profiles
Drawn by Luis D'Agostino	Approved by Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-34



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First issue	Dec 06 th , 2023

fugro Project Location: ALU007GFS-GRE-01
Geophysical: Luis D'Agostino
Geologist: TEREZ

ALUMAR Client: ALUMAR
Filiation: ALUMAR
Contact: Alessandro A. Pereira

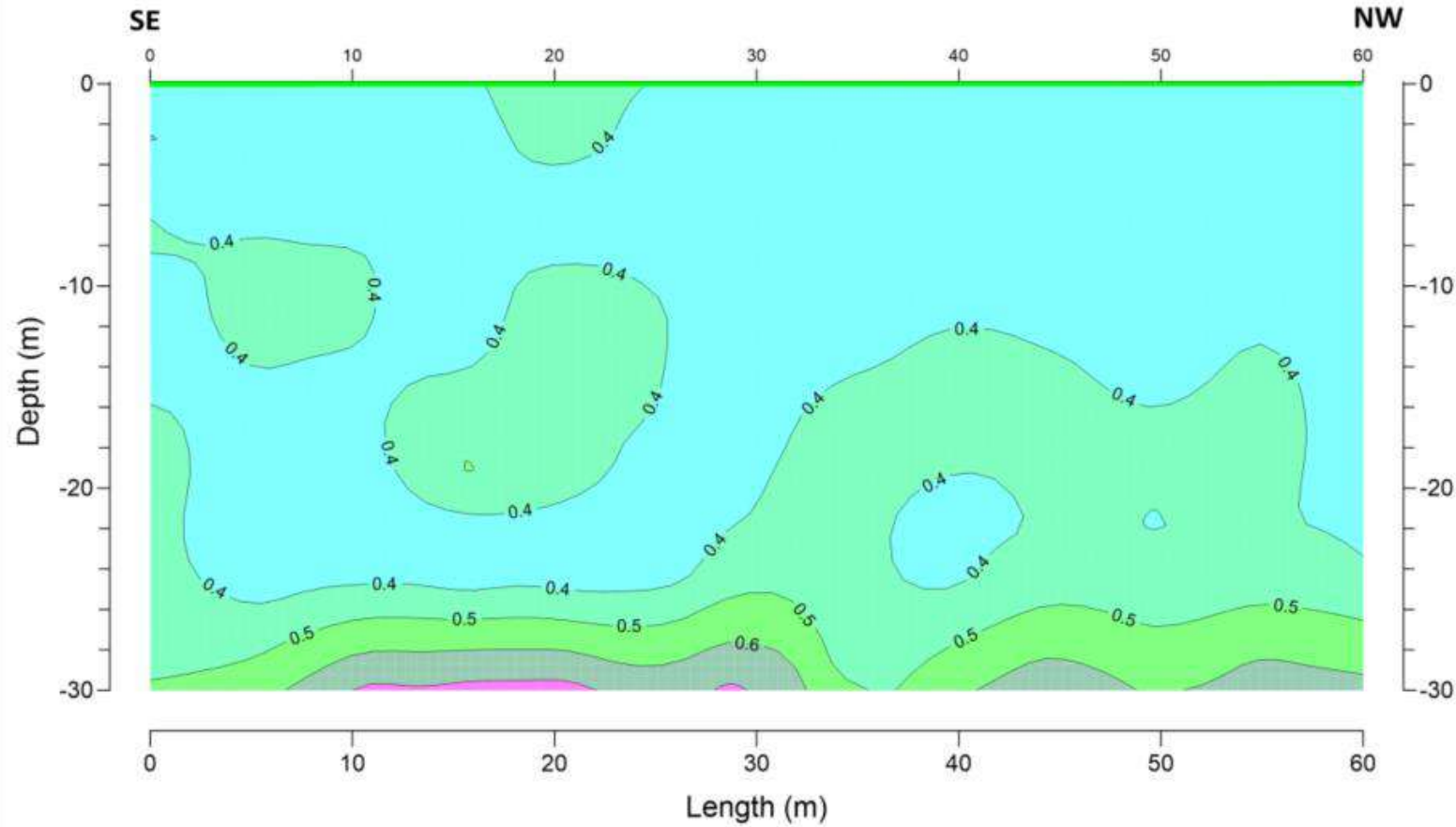


Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)
Draw title: MASW Profile - P-34
Location: RSA 01 - São Luis/MA
Revision date: Oct 14th, 2023

Drawing date: Dec 06 th , 2023	Design by: 33 of 54	Approved by: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-35

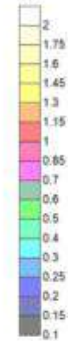


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 06 th , 2023

	Page Document No: ALU007GFS-GRE-01
	Geophysicist: Luis D'Agostino
	Geologist/CREA:

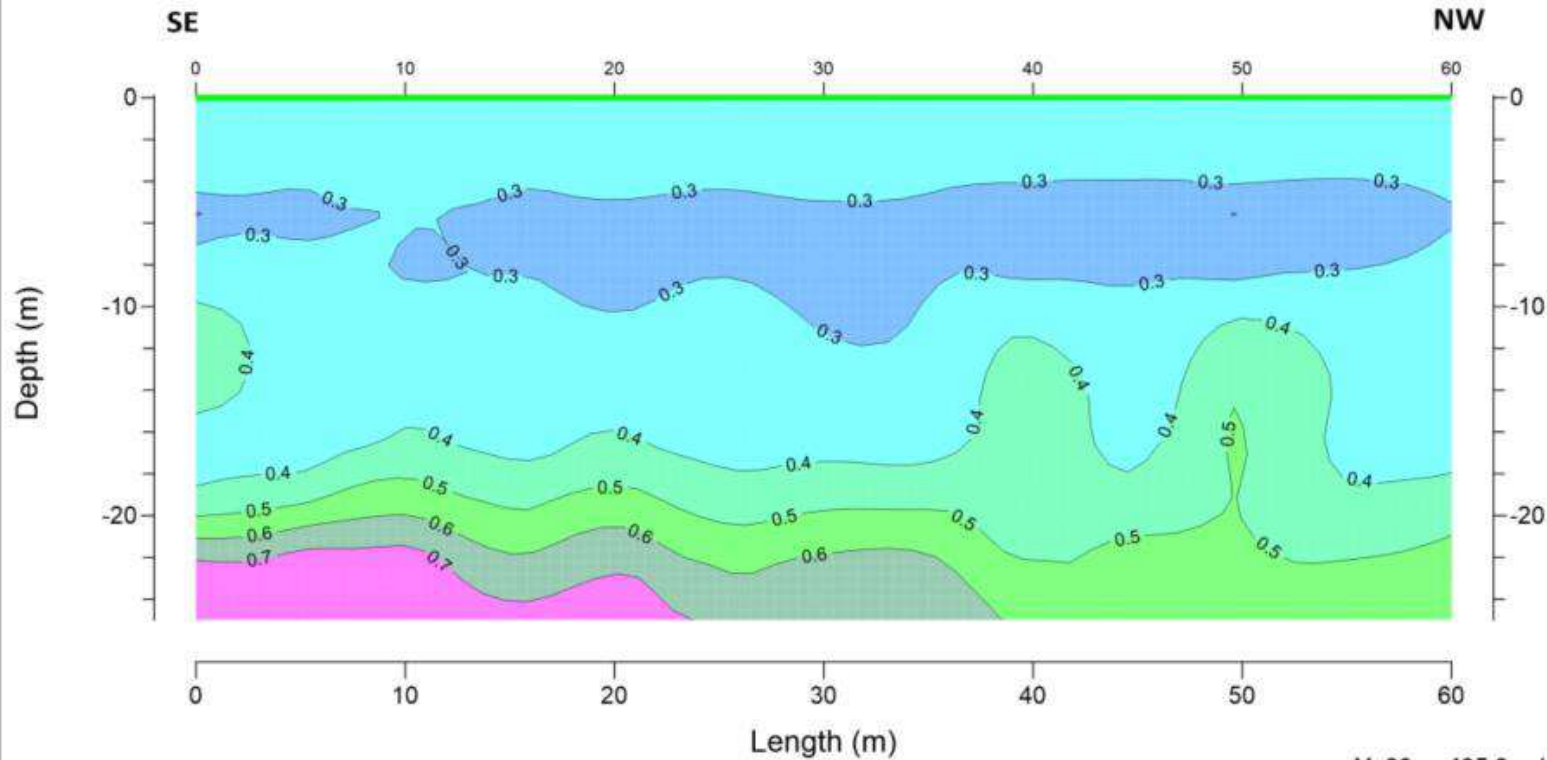
	Client: ALUMAR
	Flotation: ALUMAR
	Contact: Elessandro A. Pereira
	Date:

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-35		
Location: RSA 01 - São Luis/MA		Creation date: Oct 24 th , 2023
Drafting date: Dec 6 th , 2023	Design No: 34 of 54	Appends: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-36



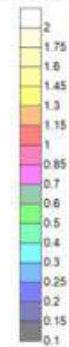
Vs30 = 405.9 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

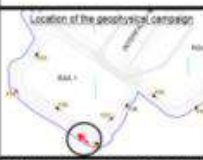
ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 06 th , 2023



Project: ALU007GFS-GRE-01
Geotechnical: Luis D'Agostino
Geologist: DREA



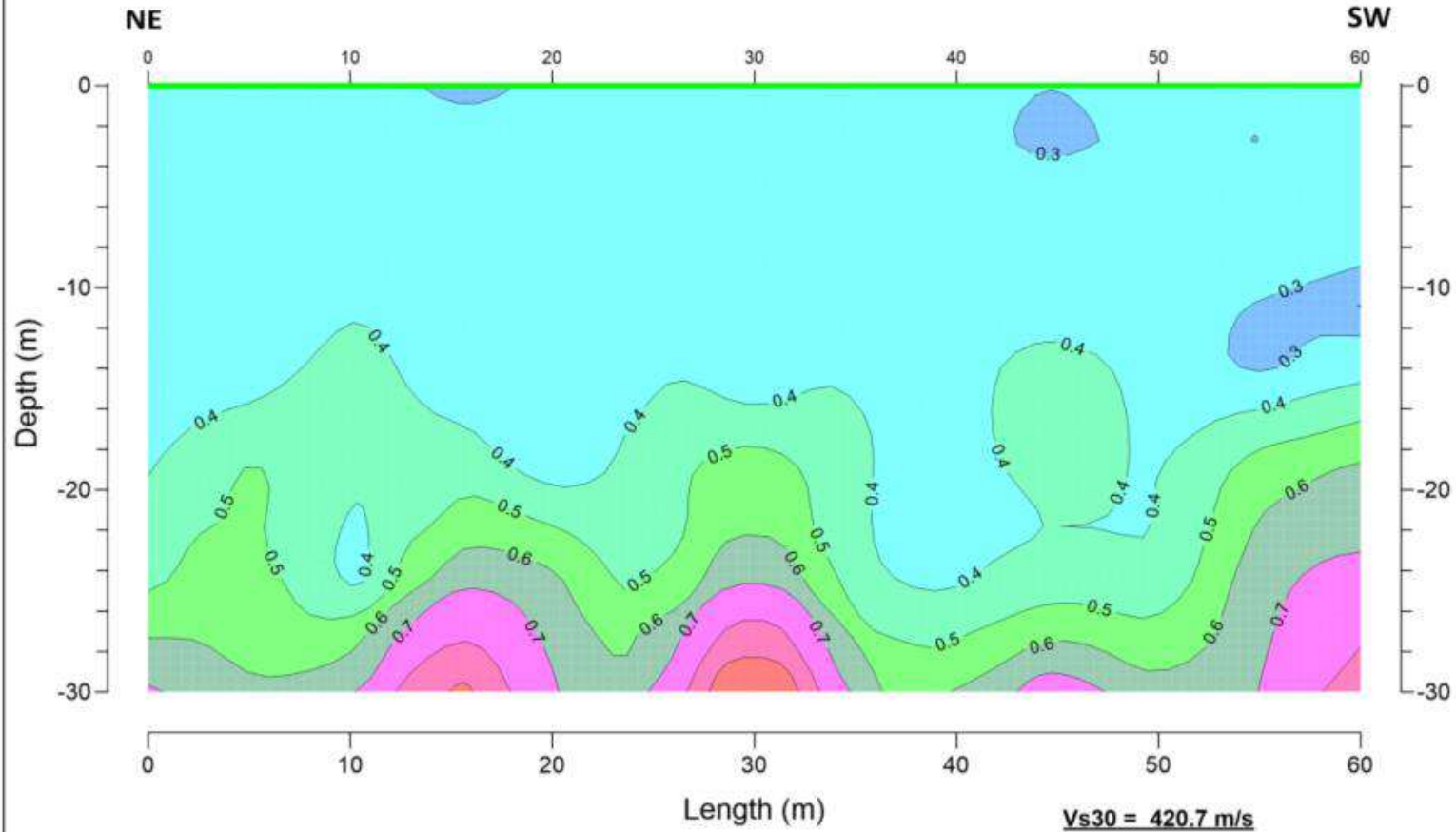
Client: ALUMAR
Facilities: ALUMAR
Contact: Alessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Baurite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-36		
Location: RSA 01 - São Luis/MA		Creation date: Oct 14 th , 2023
Created on: Dec 6 th , 2023	Sheet No: 35 of 54	Approb: A. II - MASW Profiles
Drawn by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-37

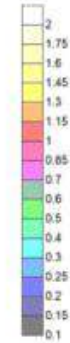


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 06 th , 2023

Page Document No:
ALU007GFS-GRE-01
 Geophysicist:
Luis D'Agostino
 Geologist/CREA

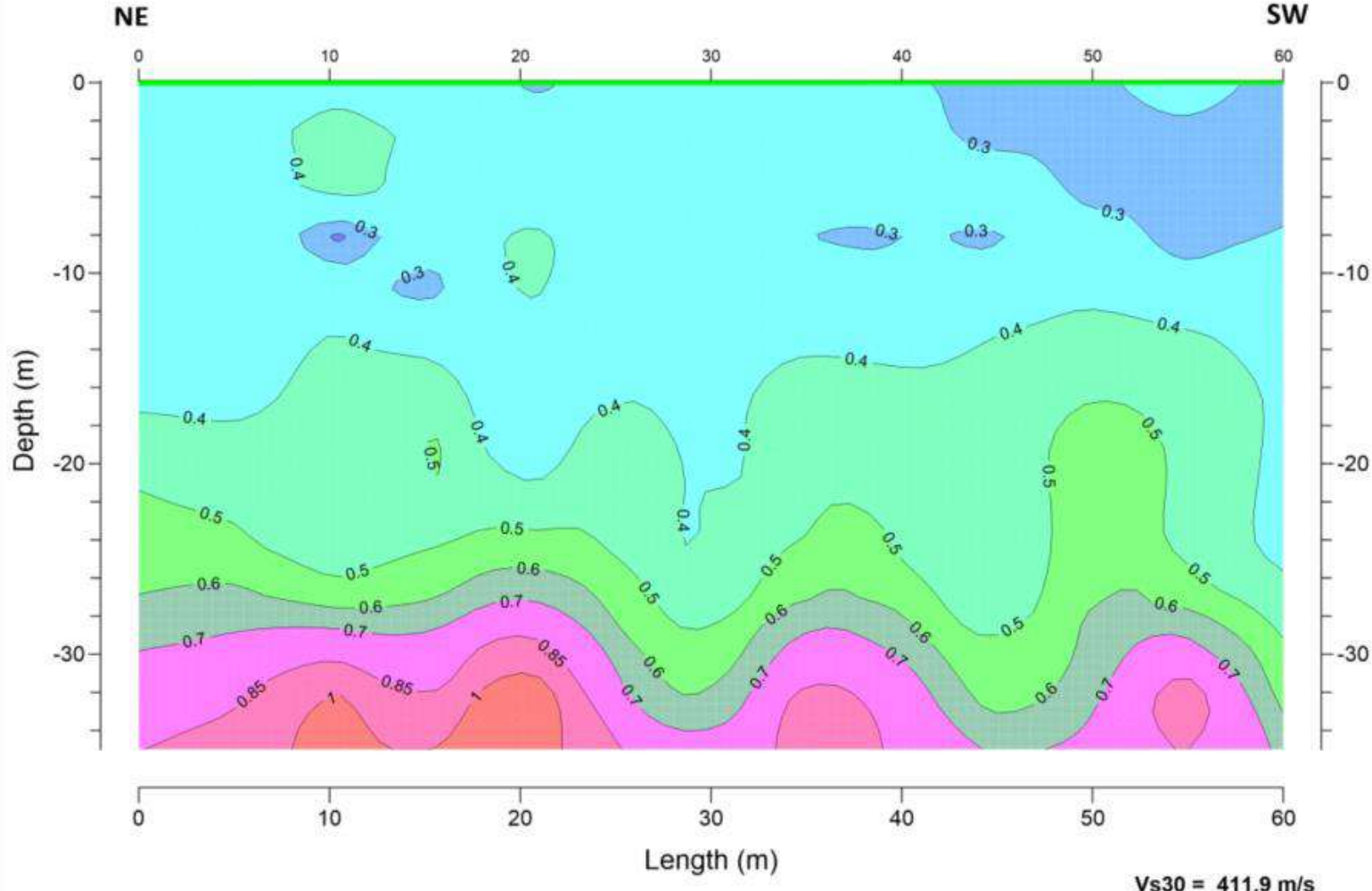
Client:
ALUMAR
 Fabricator:
ALUMAR
 Contact:
Elessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-37		
Location: RSA 01 - São Luis/MA	Execution date: Oct 24 th , 2023	
Drawing date: Dec 06 th , 2023	Design file: 36 of 54	Appraisal: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Appraisal by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-38

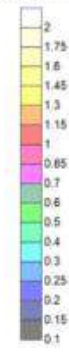


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 06 th , 2023

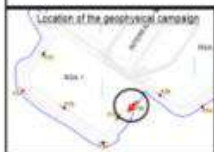


Page Document No:
ALU007GFS-GRE-01
Geophysicist:
Luís D'Agostino
Geologist (CRE)



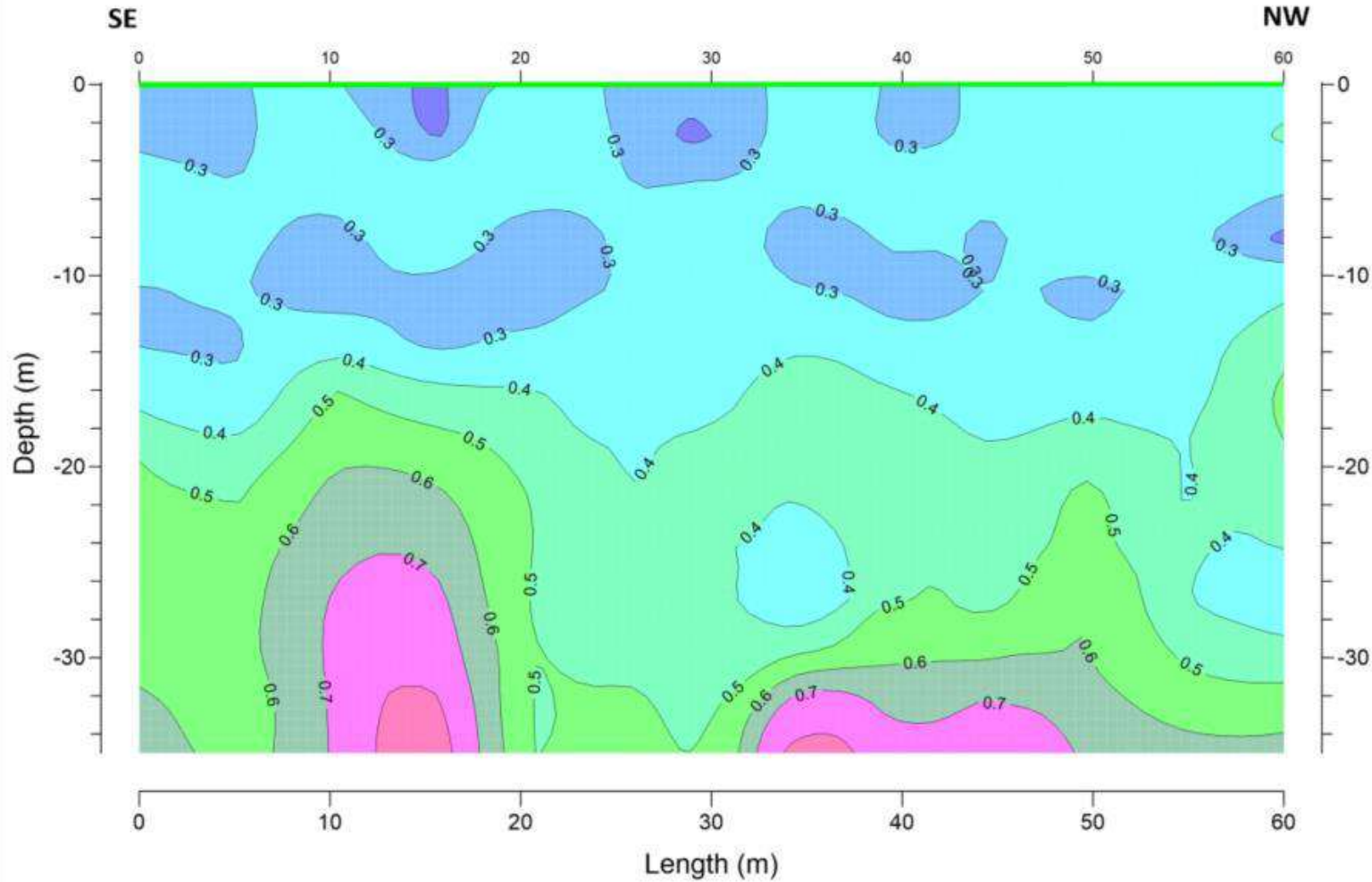
Client:
ALUMAR
Facilitador:
ALUMAR
Contact:
Elessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw title: MASW Profile - P-38		
Location: RSA 01 - São Luís/MA	Execution date: Oct 16 th , 2023	
Drafting date: Dec 06 th , 2023	Drawn by: 37 of 54	Approved by: A. II - MASW Profiles
Drawn by: Luís D'Agostino	Approved by: Luís D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-39



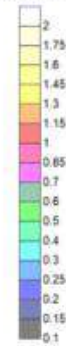
Vs30 = 383.4 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 06 th , 2023

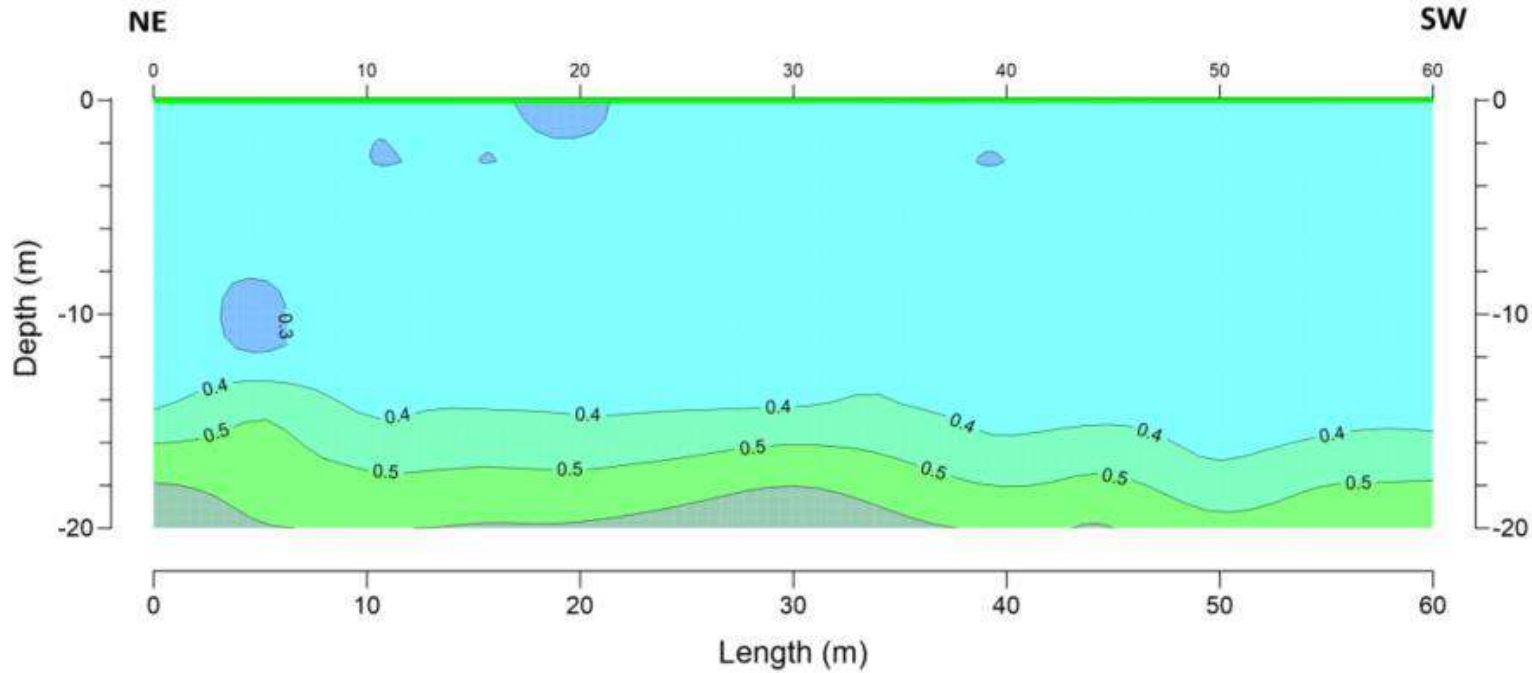
fugro	Project Document No: ALU007GFS-ORE-01
	Geophysicist: Luís D'Agostino Registration (CREA):
ALUMAR	Client: ALUMAR
	Project: ALUMAR
	Consultant: Elesandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-39		
Location: RSA 03 - São Luís/MA	Execution date: Oct 25 th , 2023	
Drawing date: Dec 06 th , 2023	Design No: 38 of 54	Appends: A. II - MASW Profiles
Drawn by: Luís D'Agostino	Approved by: Luís D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-40



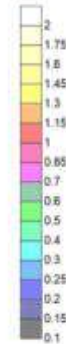
Vs30 = 426.9 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)

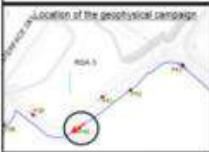


REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec. 09 th , 2023

FUGRO
Project: ALU007GFS-GRE-01
Geophysicist: Luis D'Agostino
Geologist: UDEP

ALUMAR
Client: ALUMAR
Facilitation: ALUMAR
Contact: Eleassandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)
Draw Title: MASW Profile - P-40

Location: RSA 03 - São Luis/MA

Issue Date: Dec 09th, 2023

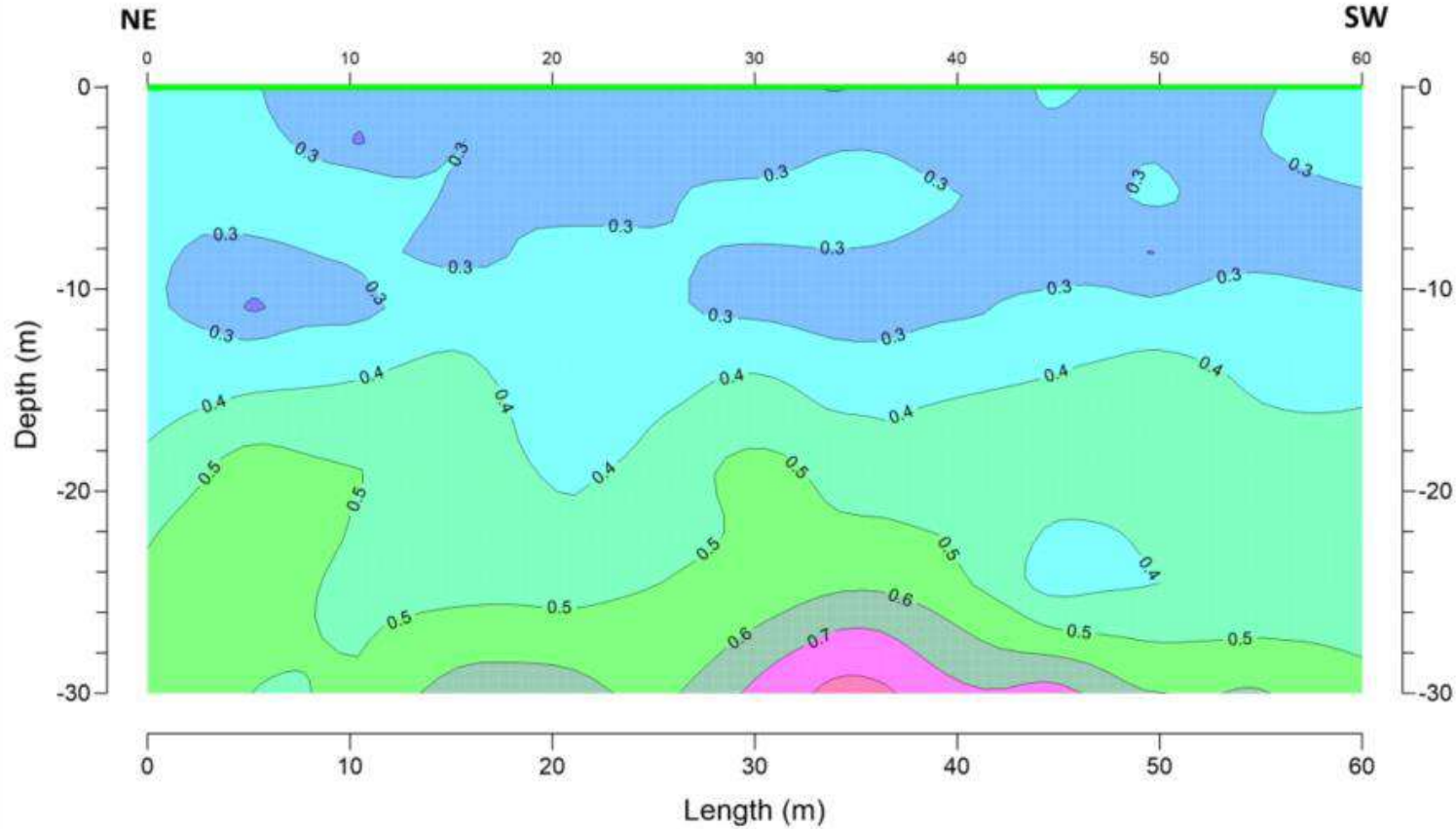
Revision Date: Oct 18th, 2023

Drawn by: Luis D'Agostino

Checked by: Luis D'Agostino

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-41



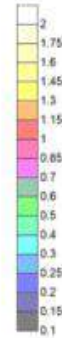
Vs30 = 389.6 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

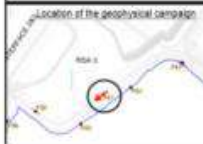
ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 07 th , 2023



Project Document No:
ALL007GFS-GRE-01
Geophysicist:
Luis D'Agostino
Geologist/SEER:



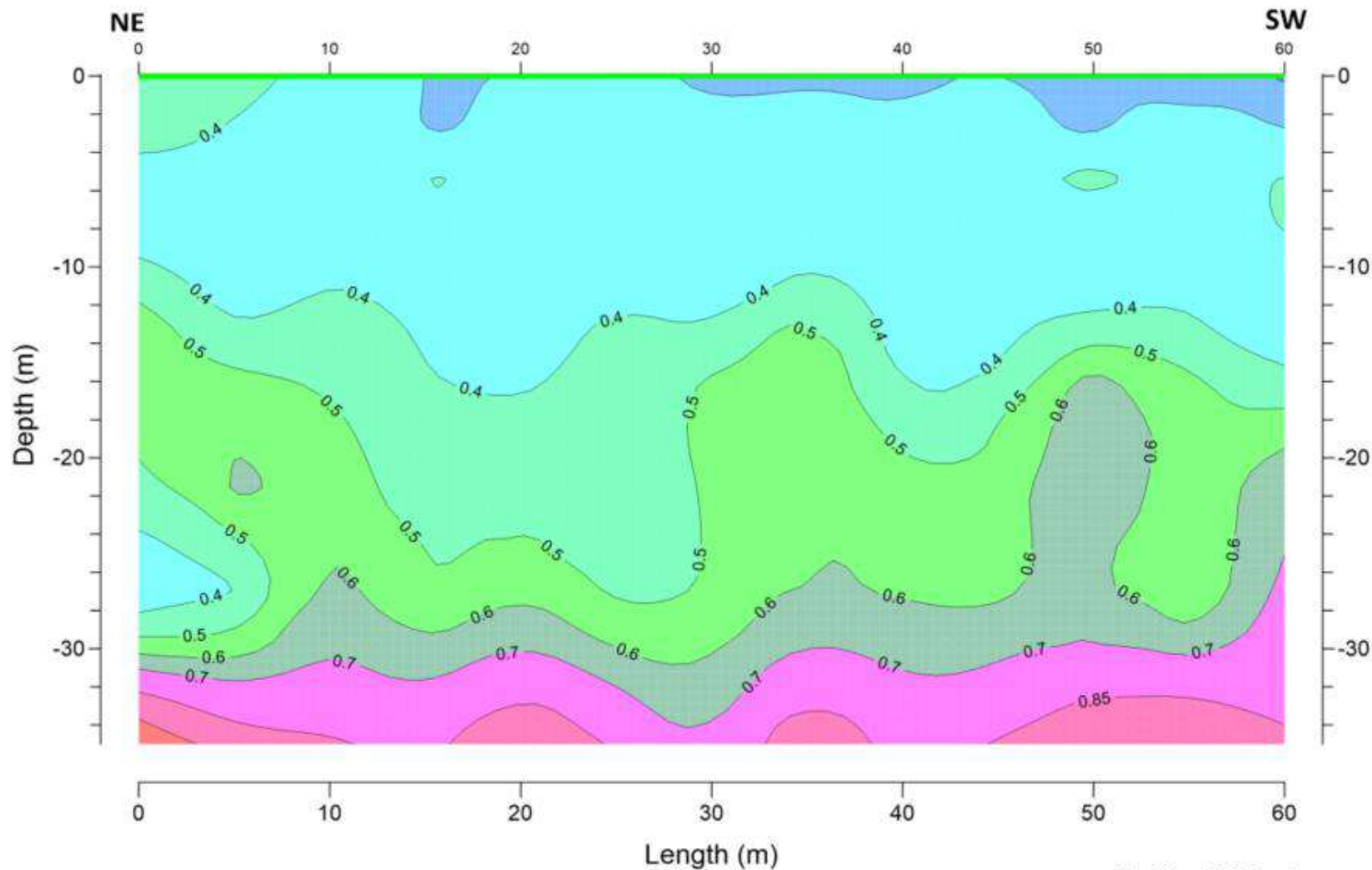
Client:
ALUMAR
Fundación:
ALUMAR
Titolador:
Elessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Drawn Site: MASW Profile - P-41		
Location: RSA 03 - São Luís/MA	Execution date: Oct 25th, 2023	
Drawing date: Dec 7th, 2023	Design file: 40 of 54	Appendix: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-42



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)

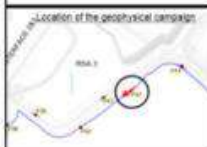


REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 th , 2023

	Project Document No. ALU007GFS-GRE-01
	Geophysicist Luís D'Agostino Geologist GREGA

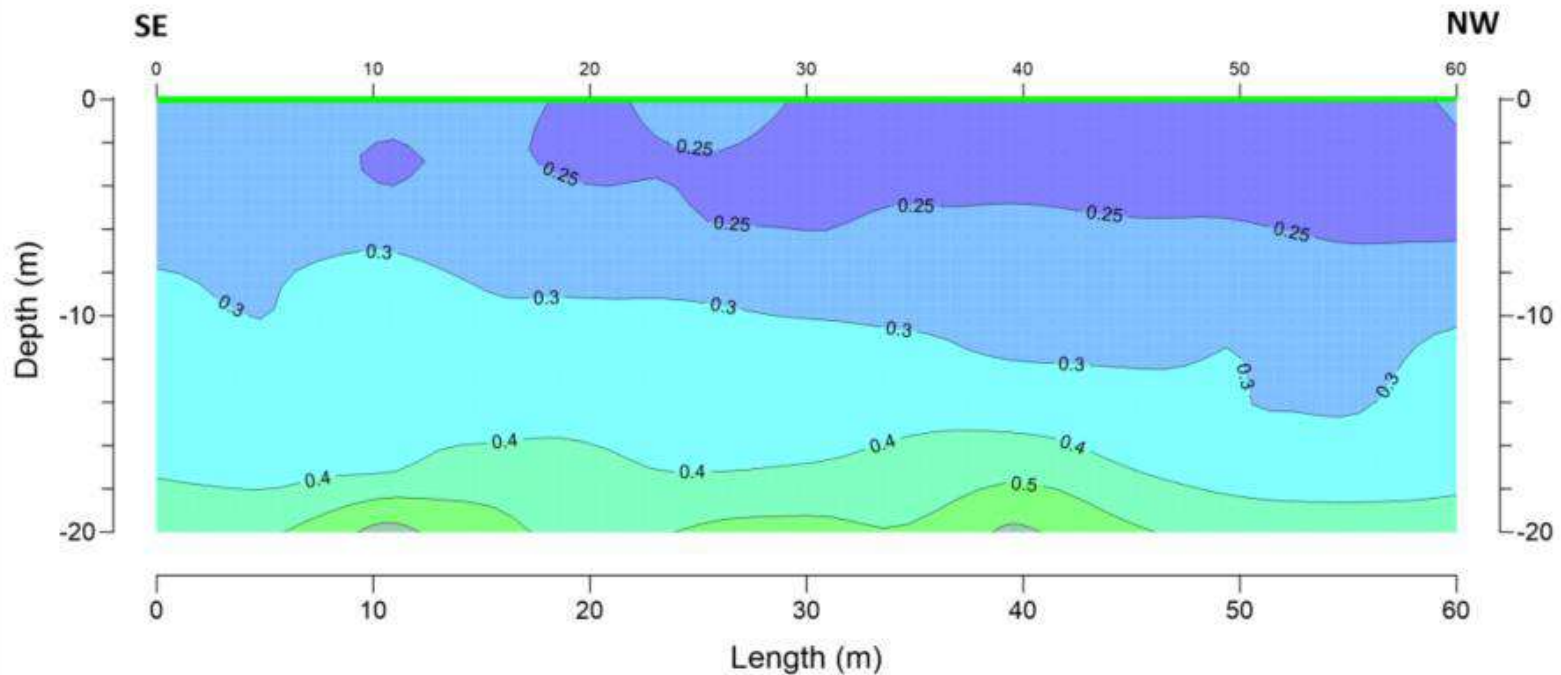
	Client ALUMAR
	Technician ALUMAR Coordinator Elessandro A. Pereira



Project MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Drawn file MASW Profile - P-42		
Location RSA 03 - São Luís/MA		Execution date Oct 10 th , 2023
Drawing date Dec 08 th , 2023	Design file 41 of 54	Appendix A. II - MASW Profiles
Drawn by Luís D'Agostino	Approved by Luís D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-44



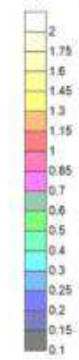
Vs30 = 361.2 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 ^o , 2023

FUGRO
 Project Document No: ALU007GFS-GRE-01
 Designer: Luis D'Agostino
 Designer: OREA

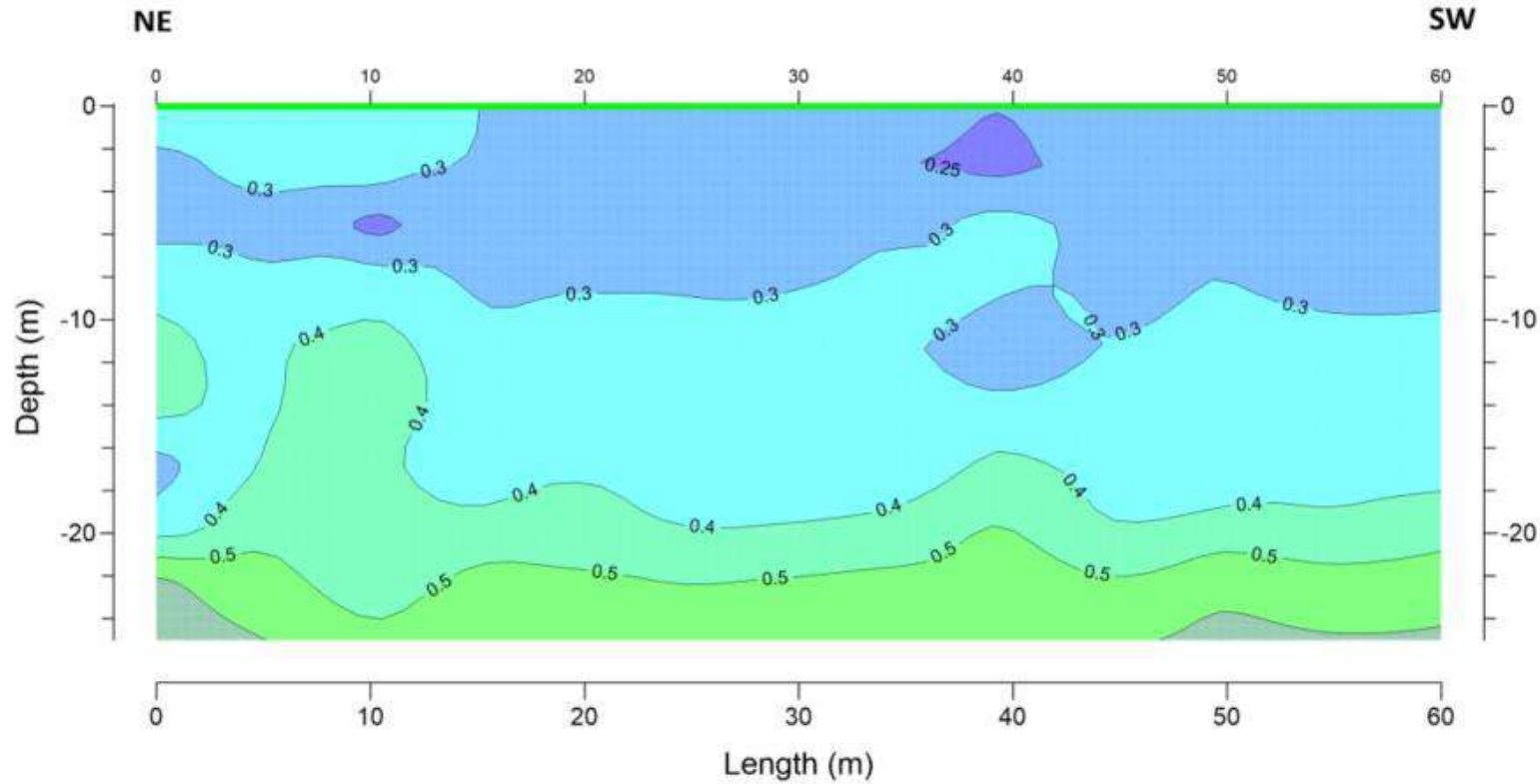
ALUMAR
 Client: ALUMAR
 Fabricator: ALUMAR
 Contact: Alessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-44		
Location: RSA 08 - São Luis/MA		Execution date: Nov 05 ^o , 2023
Issued date: Dec 8 ^o , 2023	Draw No: 43 of 54	Approach: A, II - MASW Profiles
Drawn by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-45



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

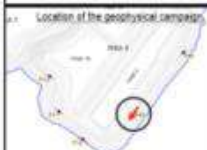
ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 th , 2023



Project:
ALU0070FS-GRE-01
Geotechnical
Luis D'Agostino
luis@fugro.com

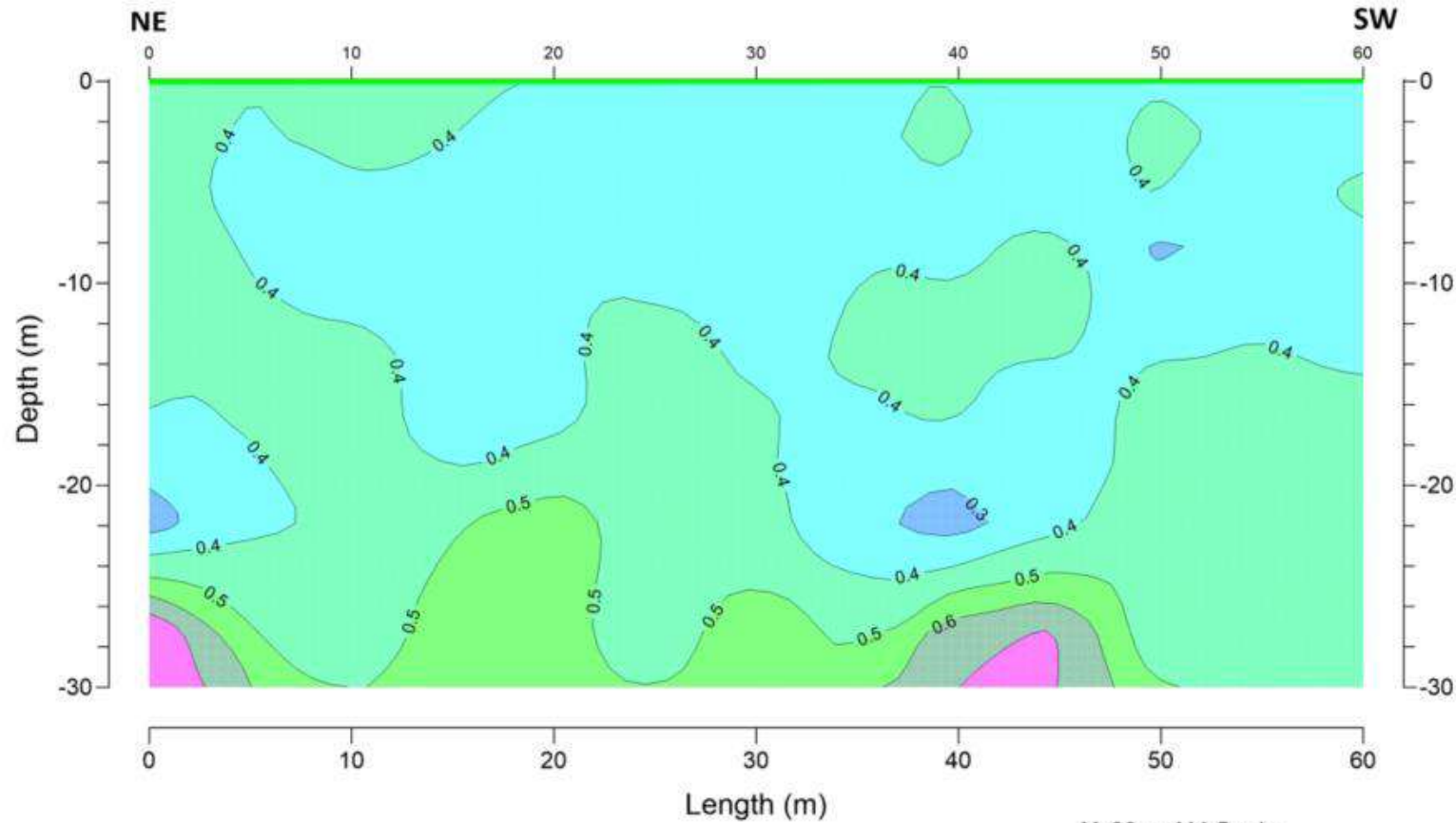


Client:
ALUMAR
Division:
ALUMAR
Contact:
Elessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw title: MASW Profile - P-45		
Location: RSA 08 - São Luis/MA		Execution date: Oct 30 th , 2023
Drawing date: Dec 8 th , 2023	Drawn by: 44 of 54	Approved: A. II - MASW Profiles
Drawn by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

MASW PROFILE P-46



Vs30 = 411.5 m/s

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	Final Issue	Dec 08 th , 2023


 Page Document No: ALU007GFS-GRE-01
 Geophysicist: Luis D'Agostino
 Geologist: DEEA

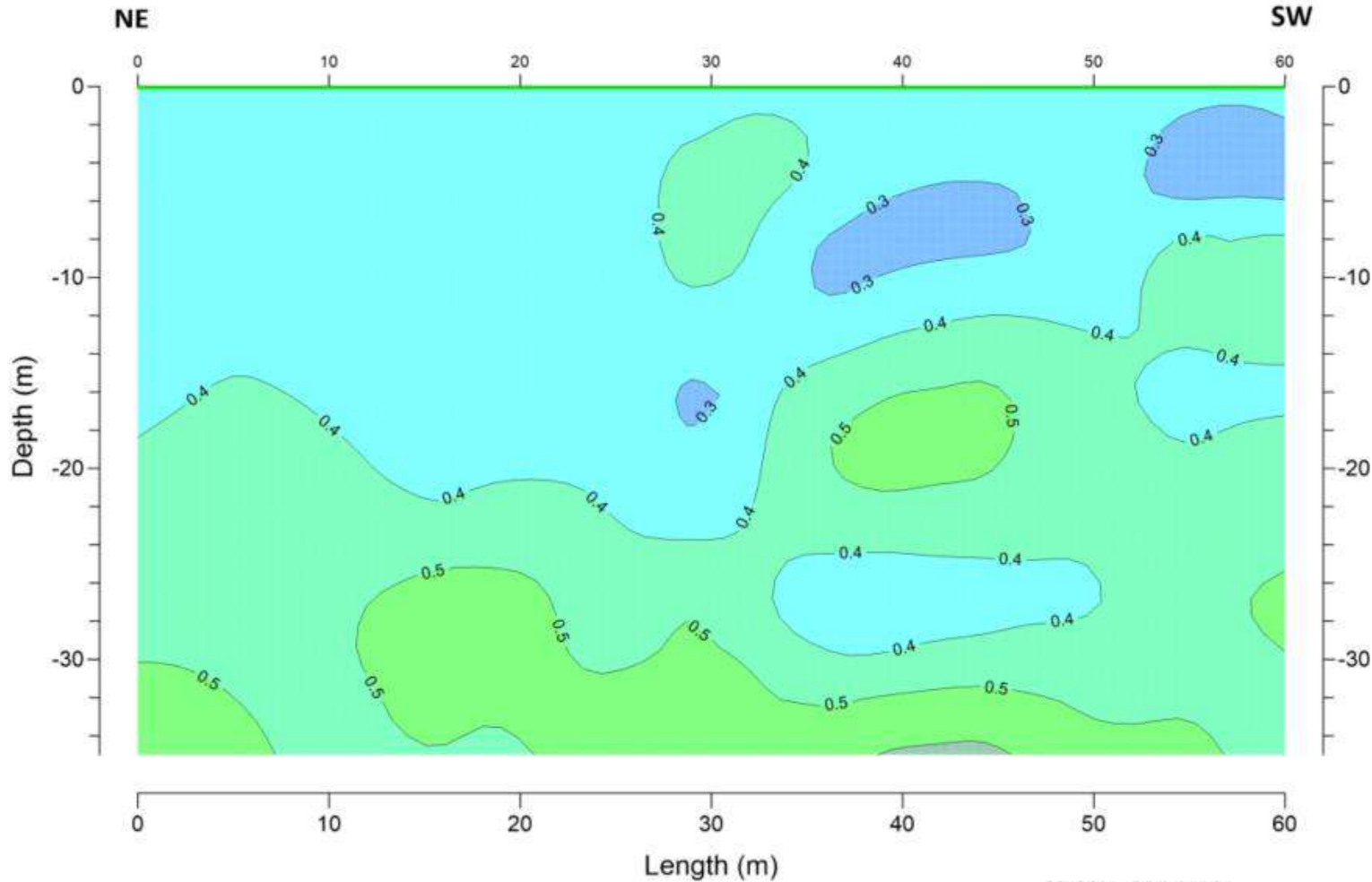

 Client: ALUMAR
 Filial/División: ALUMAR
 Contact: Eleassandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-46		
Location: RSA 08 - São Luis/MA	Revision date: Oct 20 th , 2023	
Drawing no: Dec 8 th , 2023	Design No: 45 of 54	Revisão: A. II - MASW Profiles
Desenho by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-47

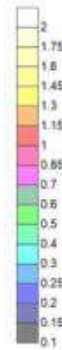


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 th , 2023

Page Document No: ALU007GFS-GRE-01
 Geophysicist: Luis D'Agostino
 Geophysicist: DREA

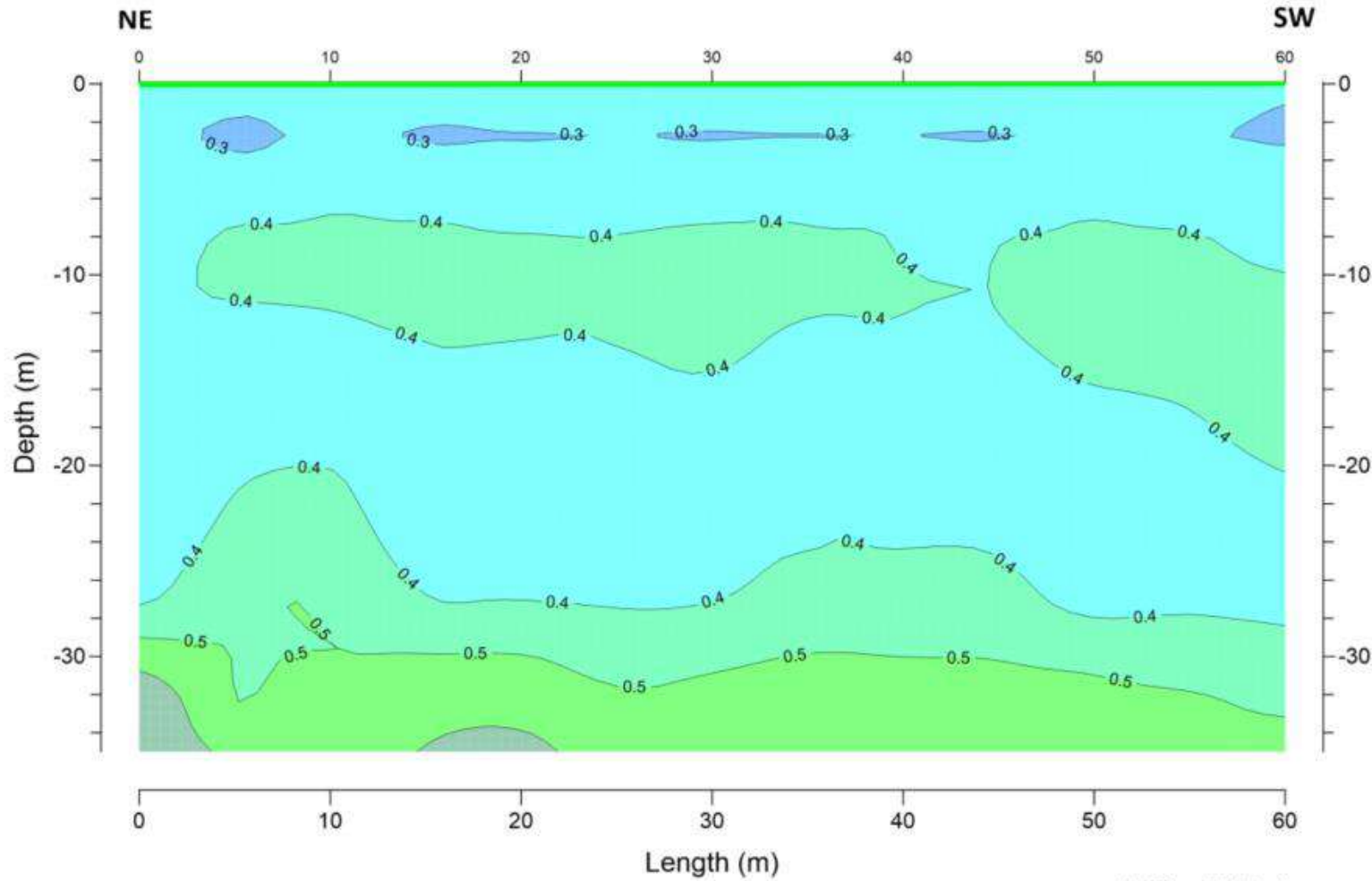
Client: ALUMAR
 Fabricator: ALUMAR
 Collector: Alessandro A. Pereira



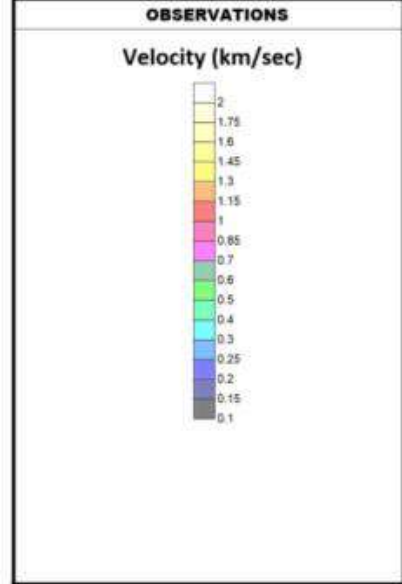
Project: MASW Survey - Baurite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-47		
Location: RSA 09 - São Luis/MA	Revision date: Nov 12 th , 2023	
Drawing Date: Dec 8 th , 2023	Drawing No: 46 of 54	Applicant: A. II - MASW Profiles
Drawn by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE P-48



REFERENCE DOCUMENT	
CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf



REVISION HISTORY		
ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 th , 2023

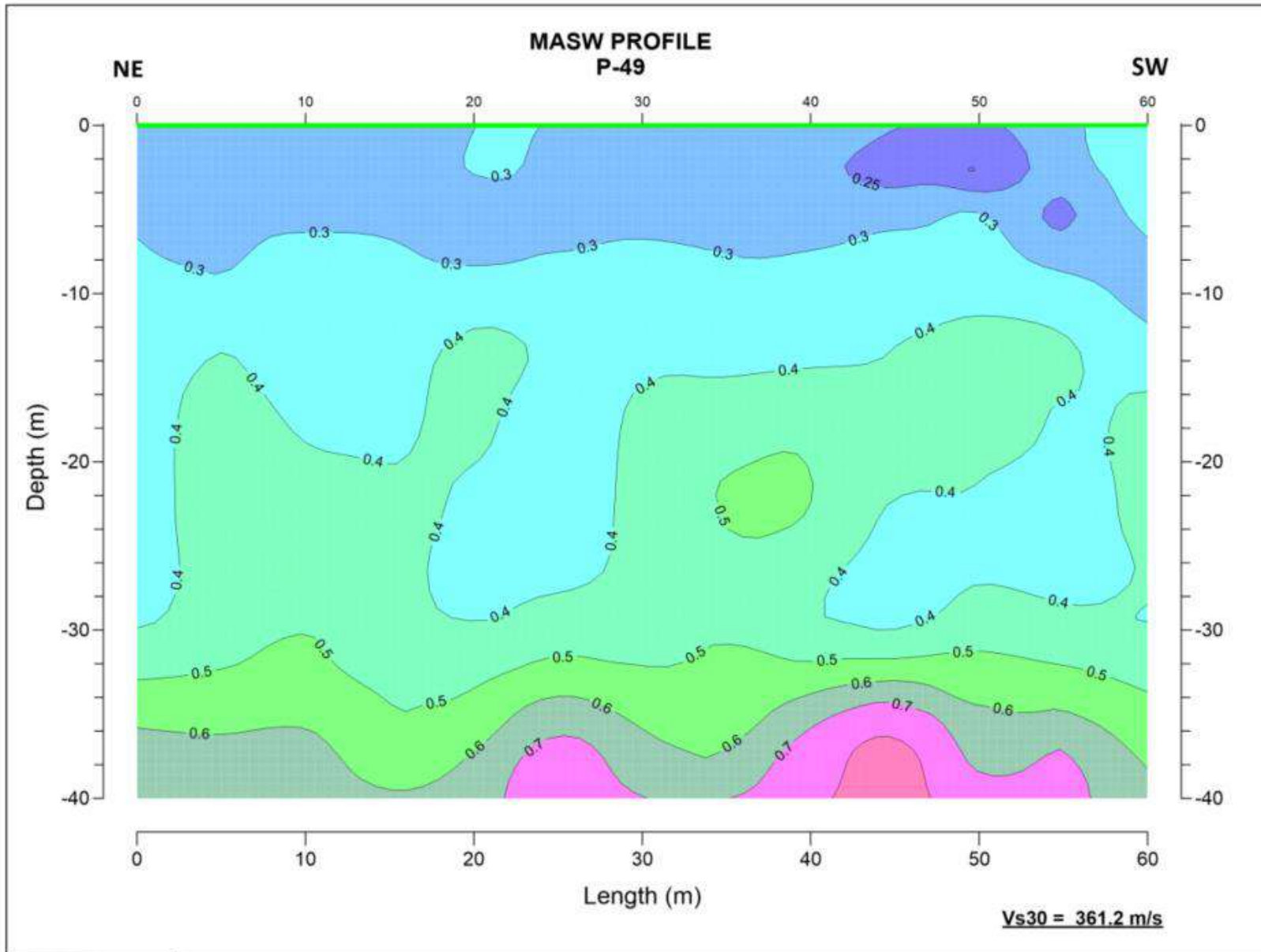
Page Document No: ALU007GFS-GRE-01
 Supervisor: Luis D'Agostino
 Geologist: DREA

 Client: ALUMAR
 Fluvio: ALUMAR
 Contact: Alessandro A. Pereira

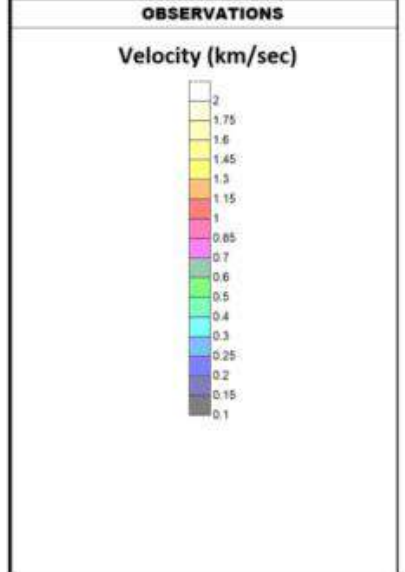


Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-48		
Location: RSA 09 - São Luis/MA	Execution date: Oct 20 th , 2023	
Drawing size: 47 of 54	Design No: A. II - MASW Profiles	
Drawing date: Dec 8 th , 2023	Approvers: Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.



REFERENCE DOCUMENT	
CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 th , 2023

Project Document No:
ALU007GFS-GRE-01

Geophysicist:
Luis D'Agostino

Geologist/LOGG:

Client:
ALUMAR

Representative:
ALUMAR

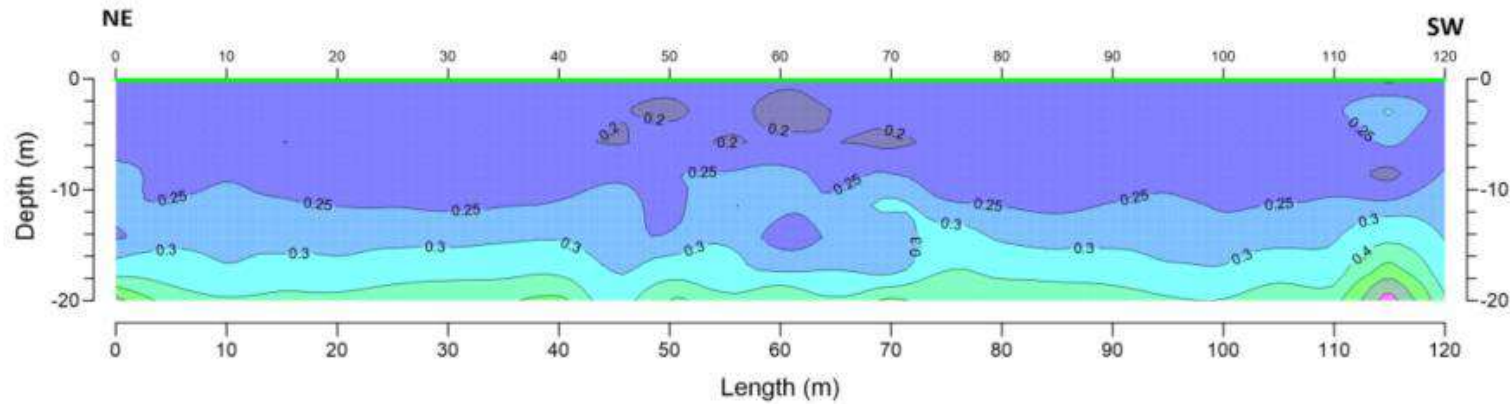
Contact:
Elessandro A. Pereira



Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - P-49		
Location: RSA 09 - São Luís/MA	Execution date: Oct 29 th , 2023	
Drawing date: Dec 8 th , 2023	Design No: 48 of 54	Appoints: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE Inner RSA 2

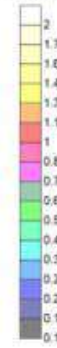


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 th , 2023

FUGRO
 Fugro Account No: ALU007GFS-GRE-01
 Geotechnical: Luis D'Agostino
 Geology/DEE:

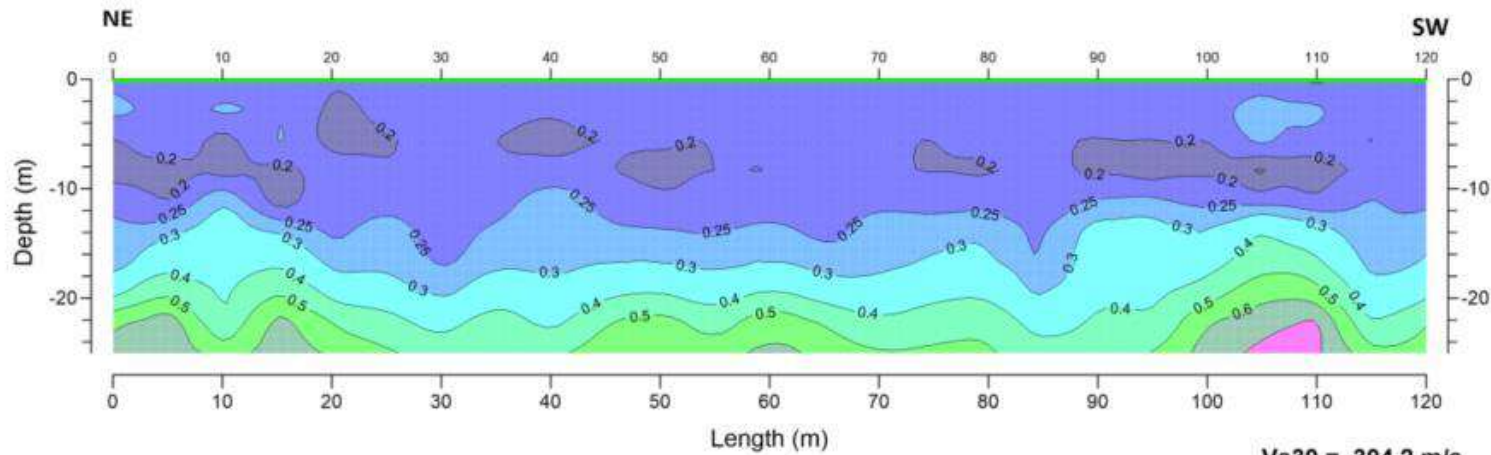
ALUMAR
 Client: ALUMAR
 Focalization: ALUMAR
 Contact: Eleassandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw title: MASW Profile - Inner portion of RSA 2		
Location: RSA 02 - São Luís/MA	Execution date: Nov 02 nd , 2023	
Drawing date: Dec 8 th , 2023	Drawing no: 49 of 54	Appendix: A. II - MASW Profiles
Drawn by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE Inner RSA 3



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

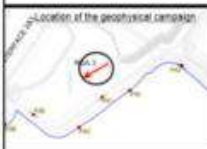
Velocity (km/sec)



REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 th , 2023

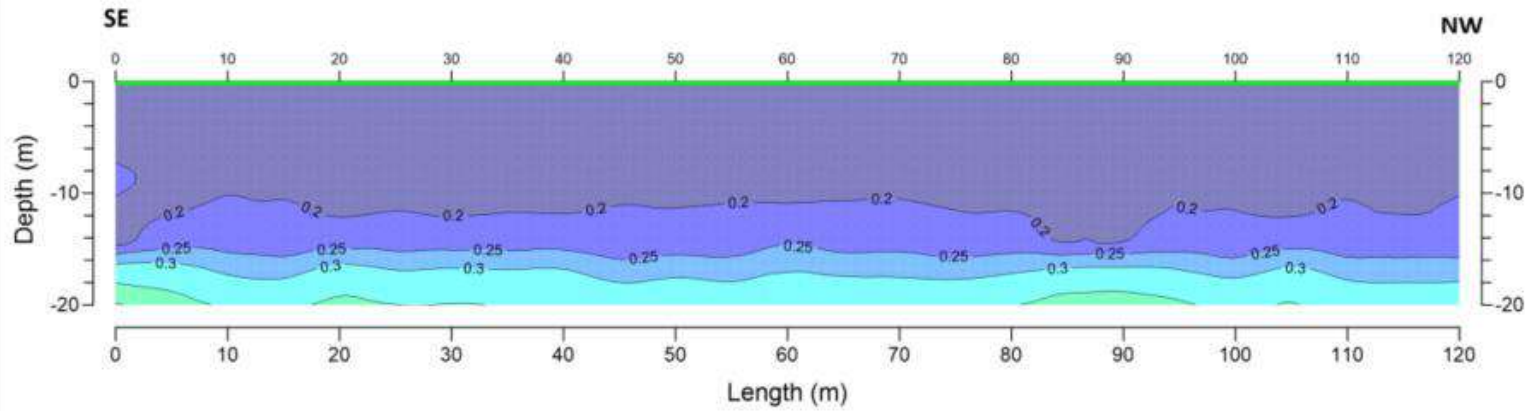
fugro	Project Document No. ALU007GFS-GRE-01
	Geophysicist Luis D'Agostino Geologist DREA
ALUMAR <small>Active Partner</small>	Client ALUMAR
	Finalization ALUMAR
	Contact Elessandro A. Pereira



Project MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Drawn title MASW Profile - Inner portion of RSA 3		
Location RSA 03 - São Luís/MA	Execution date Nov 02 nd , 2023	
Drawing date Dec 8 th , 2023	Design No. 50 of 54	Appendix A. II - MASW Profiles
Design by Luis D'Agostino	Approved by Luis D'Agostino	

This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE Inner RSA 4

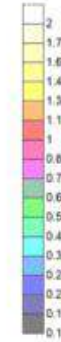


REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

Velocity (km/sec)



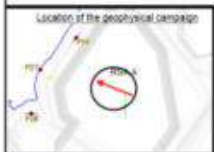
REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 th , 2023

fugro | Fugro Document No:
ALU007GFS-GRE-01
Geophysical
Luis D'Agostino
Geologist / CREG

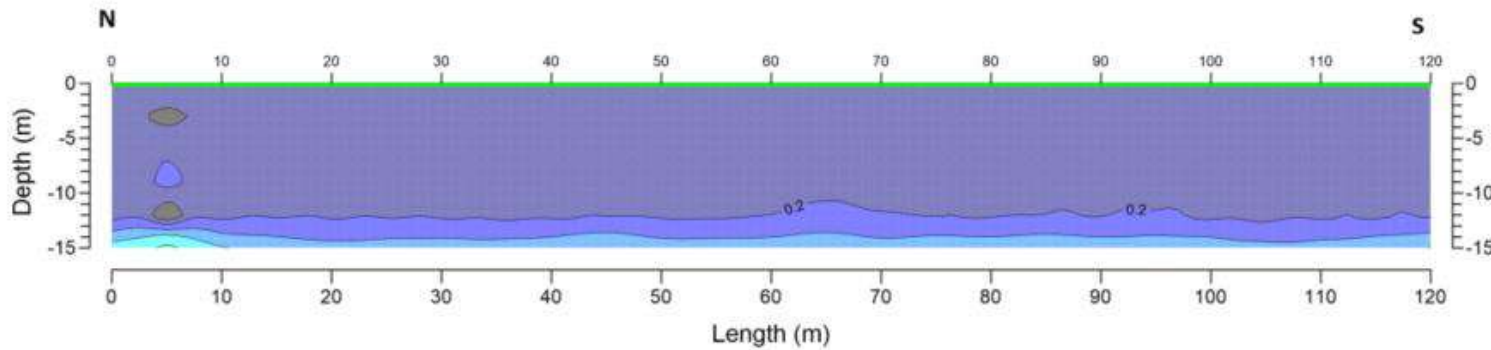
ALUMAR | Client:
ALUMAR
Fundadora:
ALUMAR
Contact:
Elessandro A. Pereira

Project MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title MASW Profile - Inner portion of RSA 4		
Location RSA 04 - Silo Luis/MA	Execution date Nov 02 nd , 2023	
Drawing date Dec 08 th , 2023	Design file 51 of 54	Approval A. II - MASW Profiles
Designer Luis D'Agostino	Approver Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW PROFILE Inner RSA 5



REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS


Velocity (km/sec)



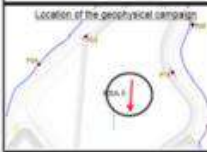
REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 th , 2023


 Page Document No:
 ALU057GFS-GRE-01
 Geophysicist:
 Luis D'Agostino
 Geologist/CPRA:

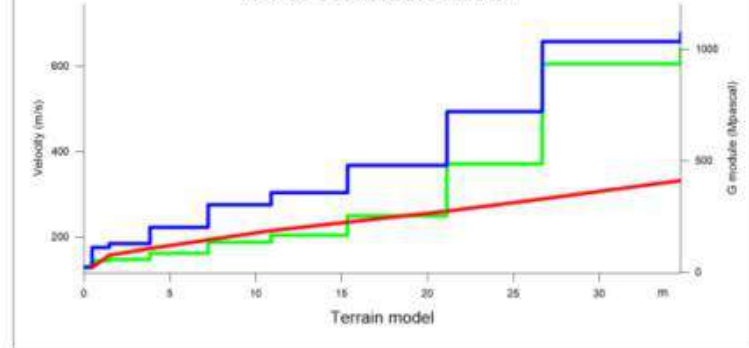
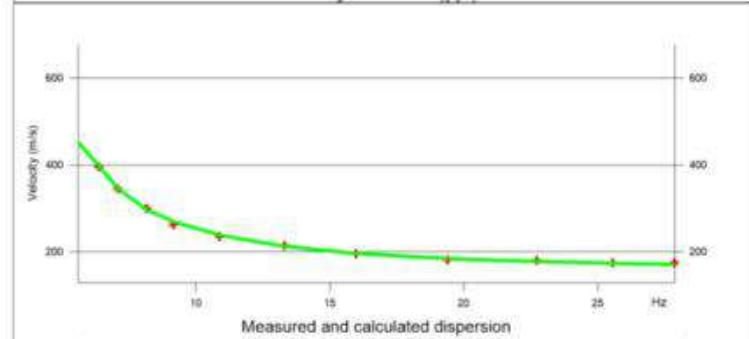
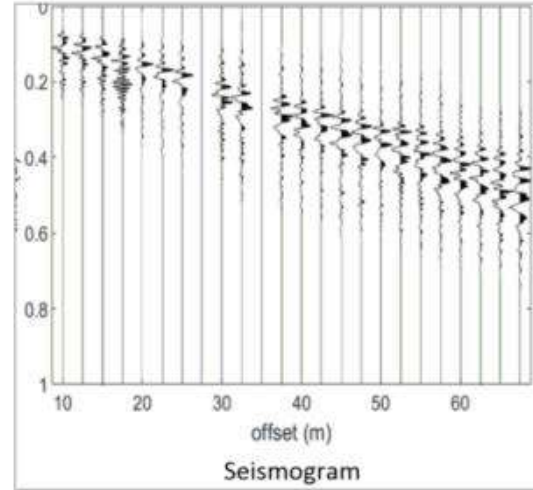
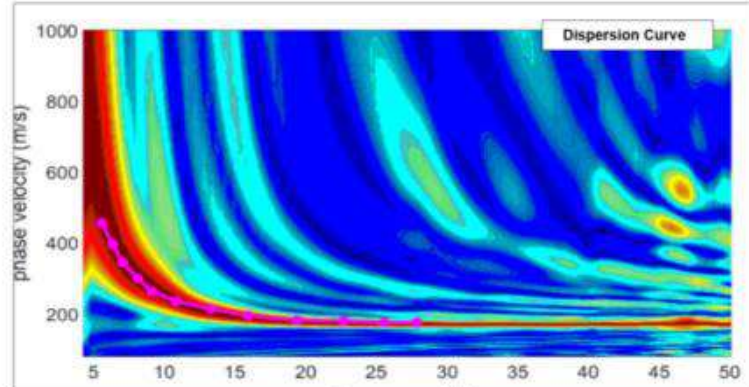

 Client:
 ALUMAR
 Facility:
 ALUMAR
 Contact:
 Alessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw Title: MASW Profile - Inner portion of RSA 5		
Location: RSA 05 - São Luis/MA	Effective date: Nov 02 nd , 2023	
Drawn by: Dec 8 th , 2023	Design No: 52 of 54	Appends: A. II - MASW Profiles
Drawn by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW DISPERSION CURVE Inner RSA 1



CALCULATION SHEET

From (m) to (m)	Vs	Vp	v	E	G	d
0 - 5	129	413	45	78	27	1.6
5 - 1.5	176	466	42	147	52	1.7
1.5 - 3.8	185	478	41	163	58	1.7
3.8 - 7.2	223	536	4	240	86	1.7
7.2 - 10.9	276	624	38	373	135	1.8
10.9 - 15.3	304	674	37	458	167	1.8
15.3 - 21.1	368	791	36	890	253	1.9
21.1 - 26.7	494	1028	35	1314	487	2
26.7 - 34.7	658	1346	34	2510	934	2.2

Obs: the approximate value of the volume weight for calculating the G parameter is obtained through equation:
 $D = 1.5 + Vs / 1000$

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS

DESCRIPTION

- + Measured dispersion curve
- Calculated dispersion curve
- Shear wave velocity (m/s)
- G module (Mpasca)
- Vs "x" - average velocity

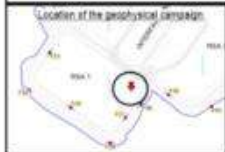
REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First Issue	Dec 08 th , 2023

FUGRO
 Page Document for:
 ALU007GFS-GRE-01
 Geophysical:
 Luis D'Agostino
 Geologist (CRE)

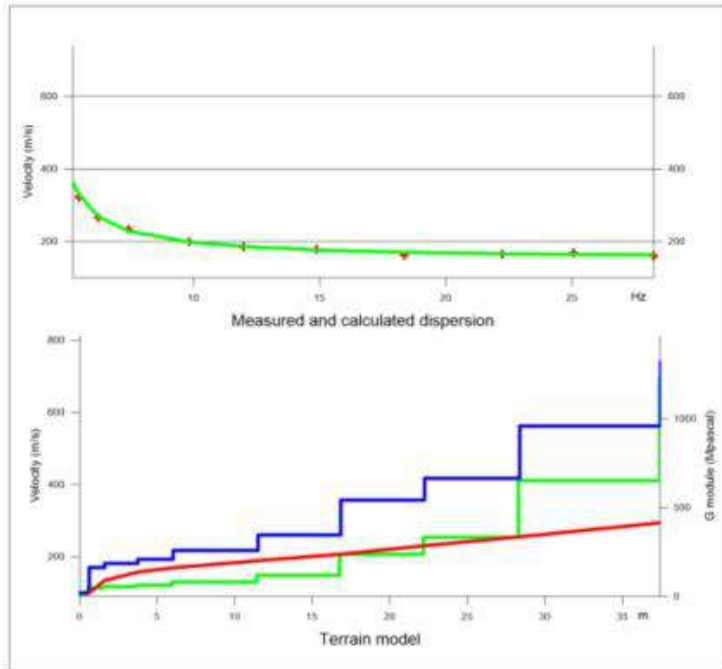
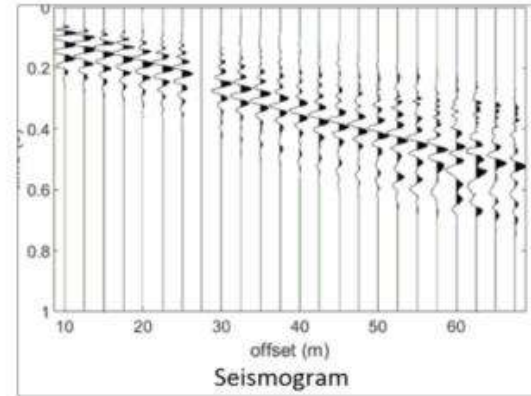
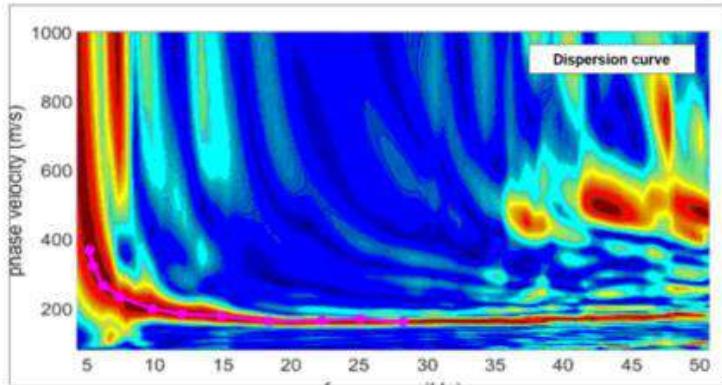
ALUMAR
 Client:
 ALUMAR
 Fluo/Fluio:
 ALUMAR
 Contact:
 Alessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw title: MASW dispersion curve - inner portion of RSA 1		
Location: RSA 01 - São Luis/MA	Execution date: Nov 05 th , 2023	
Drawing date: Dec 8 th , 2023	Design No: 53 of 54	Appends: A. II - MASW Profiles
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	



This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

MASW DISPERSION CURVE INTERFACE



CALCULATION SHEET

From (m) to (m)	Vs	Vp	v	E	G	d
0	.6	100	400	.47	47	16
.6	1.6	170	458	.42	137	48
1.6	3.8	181	473	.41	156	55
3.8	6	193	490	.41	178	63
6	11.5	217	526	.4	226	81
11.5	16.8	260	597	.38	329	119
16.8	22.2	357	770	.36	645	237
22.2	28.4	417	882	.36	904	333
28.4	37.5	562	1160	.35	1754	651

Obs: the approximate value of the volume weight for calculating the G parameter is obtained through equation:
 $D = 1.5 + Vs / 1000$

REFERENCE DOCUMENT

CODE	TITLE
	Footprint Total-26.09.2023 (1).pdf

OBSERVATIONS


DESCRIPTION

- + Measured dispersion curve
- Calculated dispersion curve
- Shear wave velocity (m/s)
- G module (Mpasca)
- Vs "x" - average velocity

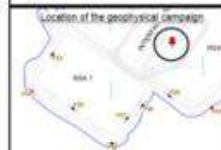
REVISION HISTORY

ISSUE	STATUS	DATE
00	First issue	Dec 08 th , 2023


 Project: ALU007GFS-GRE-01
 Geophysicist: Luis D'Agostino
 Geophysicist: TORA


 Client: ALUMAR
 Provider: ALUMAR
 Contact: Alessandro A. Pereira

Project: MASW Survey - Bauxite Waste Areas (RSA)		
Draw file: MASW dispersion curve - Interface		
Location: Interface RSA 2 & 3 - São Luis/MA		Revision date: Nov 09 th , 2023
Drawing date: Dec 8 th , 2023	Design by: A. II - MASW Profiles	Approved by: Luis D'Agostino
Design by: Luis D'Agostino	Approved by: Luis D'Agostino	

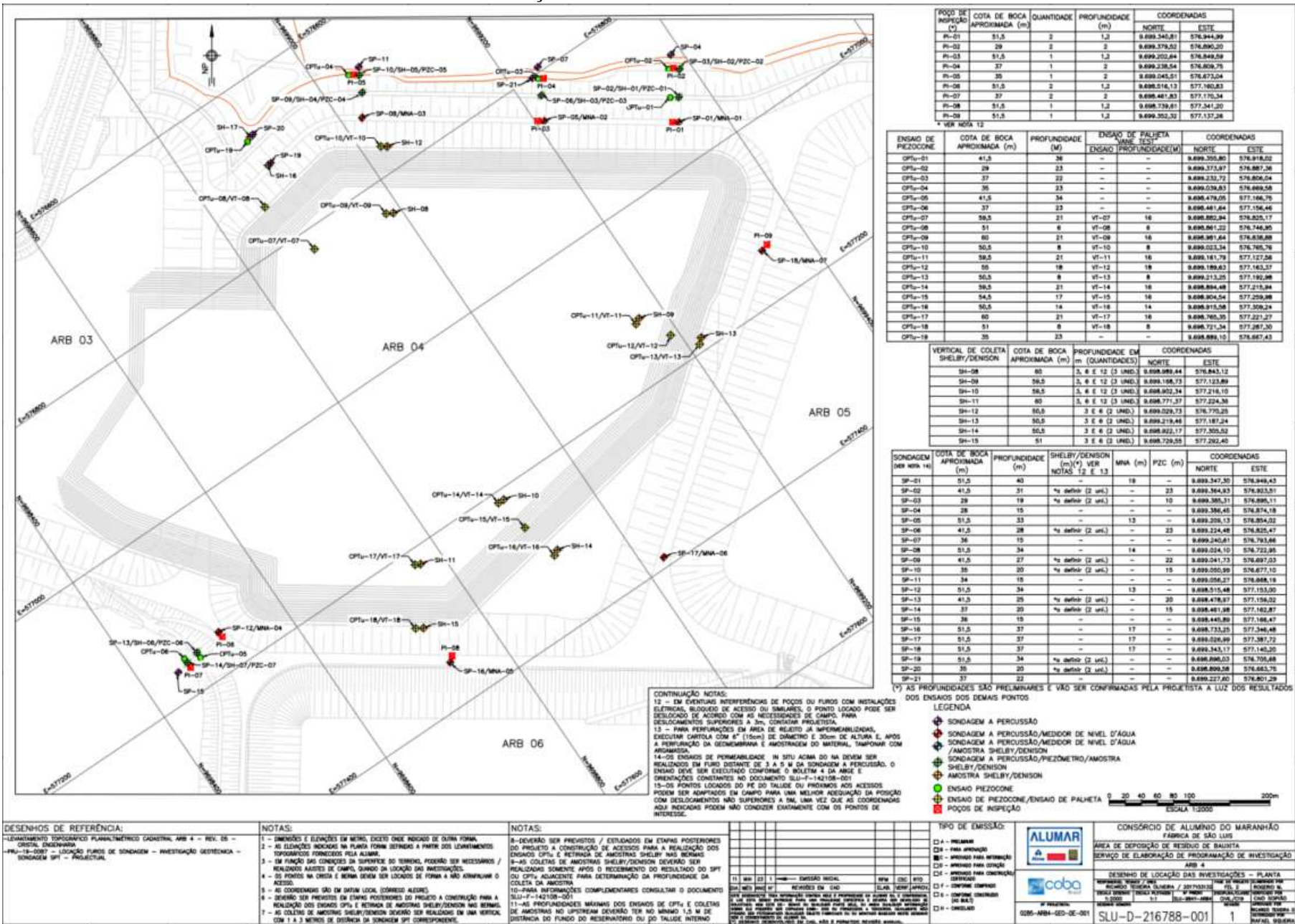


This document was produced by Fugro and it is for the exclusive use of the requester. Fugro is not responsible for any unauthorized changes made by requester or third parties.

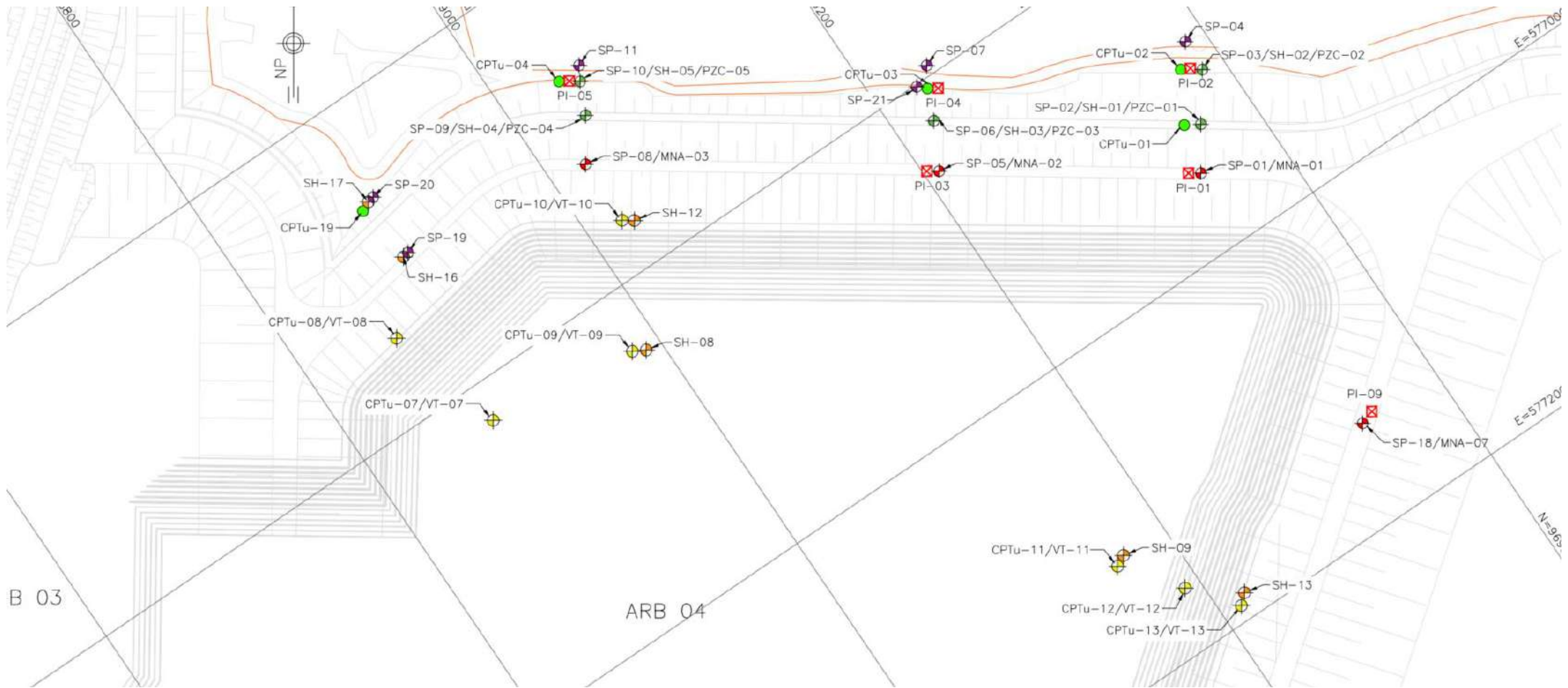
APÊNDICE C

LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS SCPT_u

Localização dos ensaios SCPTu na ARB 4



Localização dos ensaios SCPTu na ARB 4



Localização dos ensaios SCPTu na ARB 5



SONDAGEM A TRADO	PROFUNDIDADE (M)*	COORDENADAS	
		NORTE	ESTE
ST-01	7	9.700.068	577.472
ST-02	7	9.700.063	577.448
ST-03	7	9.700.031	577.425
ST-04	11	9.700.058	577.465
ST-05	11	9.700.014	577.418
ST-06	15	9.699.742	577.870
ST-07	15	9.699.768	577.866
ST-08	10	9.699.733	577.878
ST-09	19	9.699.768	577.844
ST-10	19	9.699.781	577.845

*O OBJETIVO DAO STA É VERIFICAR A EXISTÊNCIA DOS EREDOOS CONSTRUTIVOS DE ACHOHO INDICADOS NO AS BUILT, DE FORMA QUE A PROFUNDIDADE SEJA SER PAVIMENTAÇÃO LOCO SEM CONFIRMAÇÃO A PRESEÇA DO EREDOO.



PLANTA CHAVE

ENSAIO DE PIEZOCONE	COTA DE BOCA APROXIMADA (m)	PROFUNDIDADE (M)	COORDENADAS	
			NORTE	ESTE
CPTu-01	41,5	27	9.699.206,22	577.024,77
CPTu-02	34	23	9.699.814,81	577.026,21
CPTu-03	34	23	9.699.725,81	577.117,92
CPTu-04	32	22	9.699.801,28	577.193,48
CPTu-05	28,5	24	9.699.983,39	577.373,28
CPTu-06	28,5	24	9.700.086,77	577.480,79
CPTu-07	31,5	27	9.700.196,55	577.685,01
CPTu-08	25,3	21	9.700.215,11	577.692,73
CPTu-09	31	25	9.699.943,19	577.929,35
CPTu-10	27	22	9.699.242,42	577.955,20
CPTu-11	31,3	23	9.699.673,00	577.927,25
CPTu-12	29	22	9.699.676,05	577.948,18
CPTu-13	31,5	24	9.699.405,19	578.001,06
CPTu-14	29	22	9.699.392,48	578.035,59

SONDAGEM	COTA DE BOCA APROXIMADA (m)	PROFUNDIDADE (M)	SHELBY/DENISON (mN)	PZC (m)	COORDENADAS	
					NORTE	ESTE
SP-01	51,5	41	-	38	9.699.579,75	577.049,53
SP-02	41,5	28	5 - 10 - 12(3 un.)	-	9.699.599,39	577.038,60
SP-03	34	23	-	18	9.699.617,18	577.212,40
SP-04	34	15	-	-	9.699.622,58	577.002,80
SP-05	31,5	41	-	36	9.699.689,38	577.184,04
SP-06	34	23	-	18	9.699.728,09	577.123,40
SP-07	32	15	-	-	9.699.740,67	577.110,14
SP-08	25,4	16	-	-	9.699.811,70	577.183,35
SP-09	41,5	33	11 - 18 - 21(3 un.)	-	9.699.848,68	577.406,20
SP-10	26,4	15	-	10	9.699.904,32	577.366,67
SP-11	41,5	34	-	-	9.700.189,04	577.695,37
SP-12	31,5	24	4 - 9 - 14(3 un.)	17	9.700.196,72	577.696,12
SP-13	25,3	19	5 - 9(2 un.)	10	9.700.218,88	577.696,96
SP-14	28	15	-	-	9.700.226,92	577.696,81
SP-15	51,5	40	-	-	9.699.414,21	577.973,97
SP-16	29	19	5 - 9(2 un.)	14	9.699.398,09	578.046,30
SP-17	30	15	-	-	9.699.394,47	578.043,27

(*) AS PROFUNDIDADES SÃO PRELIMINARES E VÃO SER CONFIRMADAS A LUZ DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS DEMAS PONTOS

PLANTA ESC. 1:2500

POÇO DE INSPEÇÃO	COTA DE BOCA APROXIMADA (m)	QUANTIDADE	PROFUNDIDADE (m)	COORDENADAS	
				NORTE	ESTE
PI-01	34	1	2,0	9.699.621,43	577.016,02
PI-02	41,5	2	1,2	9.700.049,71	577.511,95
PI-03	25,3	2	2,0	9.700.216,18	577.695,53
PI-04	31	2	1,2	9.699.245,95	577.932,71
PI-05	41,5	2	1,2	9.699.410,18	578.054,94
PI-06	29	2	2,0	9.699.403,37	578.038,27
PI-07	41,5	2	1,2	9.700.085,74	577.824,16
PI-08	41,5	2	1,2	9.699.784,16	577.843,96

MNA	COTA DE BOCA APROXIMADA(M)	PROFUNDIDADE (M)	COORDENADAS	
			NORTE	ESTE
MNA-01	41,5	5	9.699.599,39	577.029,65
MNA-02	41,5	12	9.699.948,68	577.406,00
MNA-03	41,5	13	9.700.169,04	577.695,37
MNA-04	31,5	4	9.700.197,02	577.708,52
MNA-05	51,5	18	9.699.414,21	577.973,97

CONTINUAÇÃO LEGENDA:

- TUBO PERIF. (CP1)
- CAIXA DE PASSAGEM (CP2)
- BUEIRO SIMPLES TUBULAR DE CONCRETO 800mm
- DISSIPADOR (COMPLEMENTAR)
- DISSIPADOR (À DEMOUR)
- DRENAGEM EXISTENTE
- ENROSCAMENTO (ENR1) - (1x1M)
- ENROSCAMENTO (ENR2) - (2x2M)

LEGENDA INVESTIGAÇÕES:

- SONDAGEM A PERCUSSÃO
- MEDIDOR DE NÍVEL D'ÁGUA
- SONDAGEM A PERCUSSÃO/PIEZOMETRO
- SONDAGEM A PERCUSSÃO/MEDIDOR DE NÍVEL D'ÁGUA

CONTINUAÇÃO DAS NOTAS:

- 8- DEVERÃO SER PREVISTOS / ESTUDADOS EM ETAPAS POSTERIORES DO PROJETO A CONSTRUÇÃO DE ACESSOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS CPTU E RETIRADA DE AMOSTRAS SHELBY/DENISON NAS BERMAS
- 9- AS COLETAS DE AMOSTRAS SHELBY/DENISON DEVERÃO SER REALIZADAS SOMENTE APÓS O RECEBIMENTO DO RESULTADO DO SPT OU CPTU ADIQUATE PARA DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DA COLETA DA AMOSTRA
- 10- OS PUNOS ST-02, ST-03, CPTU-04, CPTU-05 E CPTU-06 POSSEM TER INTERFERÊNCIA COM A BERMA DE BACALHO, DEVEDO SER DELIMITADO PARA O TALUDE A MONITORE, PROVINDO A BORDA DO ACESSO DA BERMA, COM UMA DISTÂNCIA APROXIMADA DE 1m DA BORDA.

- SONDAGEM A PERCUSSÃO/PIEZOMETRO/AMOSTRA SHELBY/DENISON
- SONDAGEM A PERCUSSÃO/MEDIDOR DE NÍVEL D'ÁGUA/AMOSTRA SHELBY/DENISON
- ENSAIO PIEZOCONE
- POÇOS DE INSPEÇÃO

DESENHOS DE REFERÊNCIA:
 SLU-D-20283-001 - DIAE DE PARTIDA - INFRAESTRUTURA - ARRANJO - PLANTA GERAL, TALUDE EXTERNO - ARB 5 - (FORNECIDO PELA ALUMAR)
 SLU-D-21478-001 - RETIÇÃO DA OBRAGA DA ARB 5 - PROJETO CONSTRUTIVO - ARRANJO GERAL - PLANTA

NOTAS:
 1 - DIMENSÕES E ELEVADOS DE METRO, EXCETO ONDE INDICADO DE OUTRA FORMA.
 2 - AS ELEVADOS INDICADOS NA PLANTA FORMAM DENTRAS A PARTIR DOS LEVANTAMENTOS TIPOGRÁFICOS FORNECIDOS PELA ALUMAR.
 3 - EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DO TERRENO, PODENDO SER NECESSÁRIO O REALIZADO ABAIXE DE CANTOS, QUANDO DA LOCALIZAÇÃO DAS INVESTIGAÇÕES.
 4 - OS PONTOS NA OBRAGA E BERMAS DEVERÃO SER LOCALIZADOS DE FORMA A NÃO OBSTACELHO O ACESSO.
 5 - AS COORDENADAS SÃO EM DATUM LOCAL (COORDENADAS UTM).
 6 - OBRAGA DE PROJETO NA ETAPA POSTERIORES DO PROJETO A CONSTRUÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS CPTU E RETIRADA DE AMOSTRAS SHELBY/DENISON NAS BERMAS.
 7 - AS COLETAS DE AMOSTRAS SHELBY/DENISON DEVERÃO SER REALIZADAS DE UMA METRO, COM 1 A 2 METROS DE DISTÂNCIA DA SONDAÇÃO SPT CORRESPONDENTE.

LEGENDA:
 BERMA DE REFORÇO
 MURO DE CONTENÇÃO
 DESODIA MAPIA (DR1-1)
 CANALETA MEIA-CANA (CM-1)
 CANALETA RETANGULAR COM TAMPA (CRT-1)
 CANALETA RETANGULAR (CR1-1)
 CANALETA RETANGULAR (CR2-1)
 BUEIRO SIMPLES TUBULAR DE CONCRETO 800mm (BT)
 SAIAETA TRIANGULAR DE CONCRETO (STC)

CONSORCIO DE INVESTIGAÇÕES GEOTECNICAS

ÁREA DE RESÍDUO DE BARRIO - Nº 3

PROGRAMAÇÃO DE INVESTIGAÇÕES GEOTECNICAS

LOCALIZAÇÃO - PLANTA

PROJETO: SLU-D-216789-001

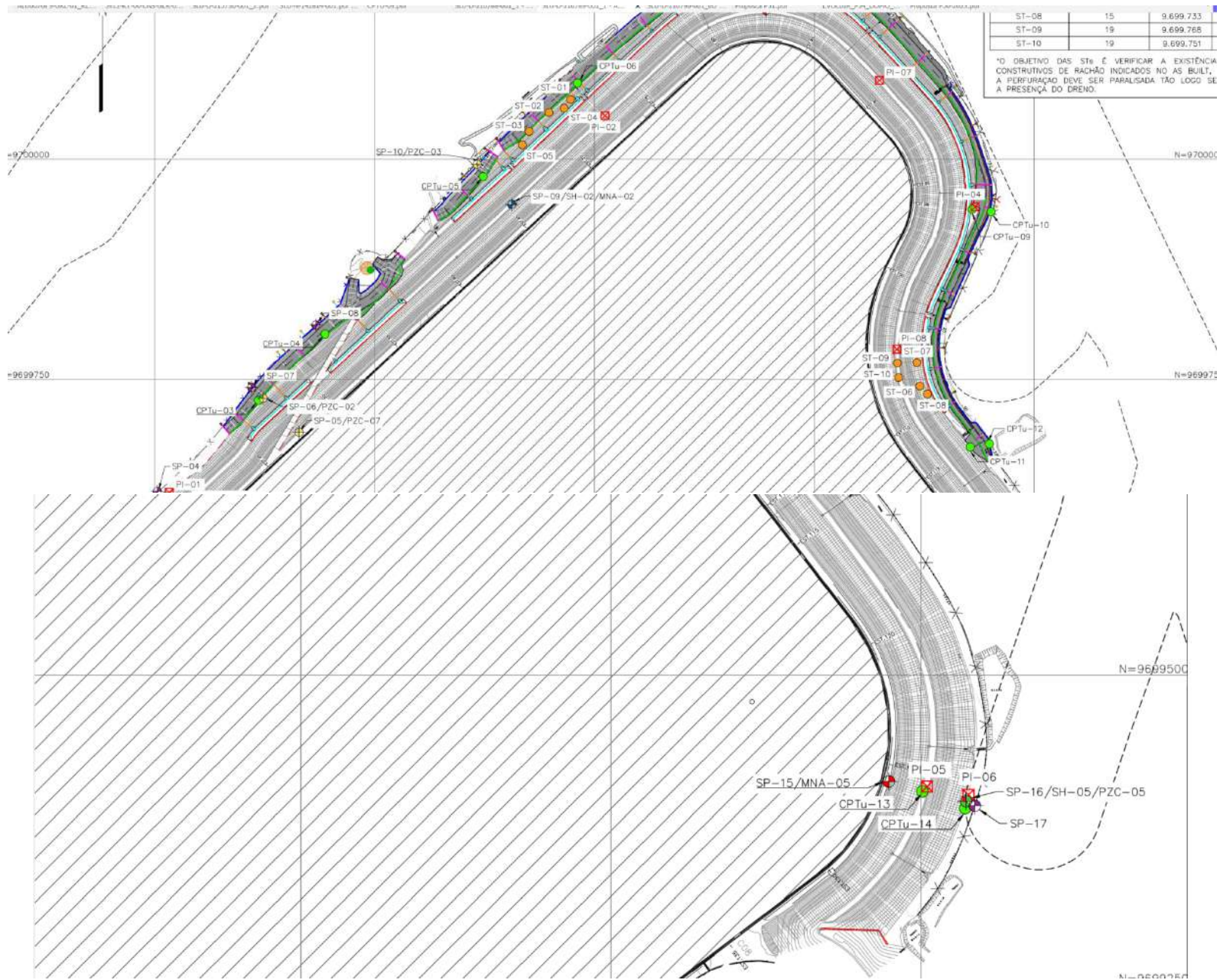
1

CONSORCIO DE INVESTIGAÇÕES GEOTECNICAS

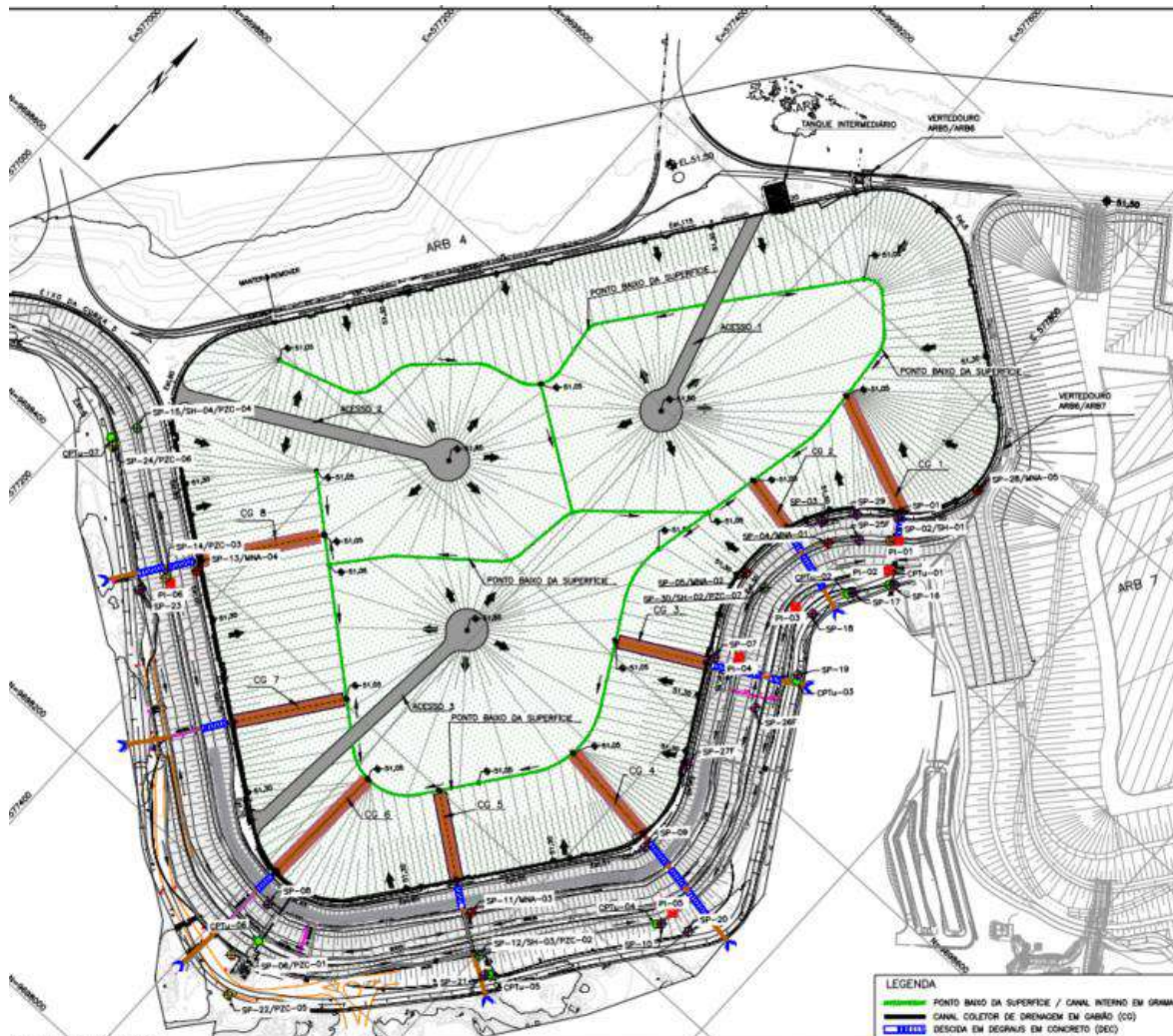
FABRICA DE SÃO LUIS

REFRABR

Localização dos ensaios SCPTu na ARB 5



Localização dos ensaios SCPTu na ARB 6



POÇO DE INSPEÇÃO	DOTA DE BOCA APROXIMADA (m)	QUANTIDADE	PROFUNDIDADE (m)	COORDENADAS	
				NORTE	ESTE
P-01	41,5	2	1,20	9.698.828,08	577.829,20
P-02	31,5	2	1,20	9.698.828,44	577.841,52
P-03	30	2	2,60	9.698.746,48	577.801,25
P-04	41,5	2	1,20	9.698.678,84	577.793,75
P-05	27	2	1,20	9.698.461,13	577.807,51
P-06	31,5	2	1,20	9.698.375,26	577.398,97

ENSAIO DE PIEZOCONE	DOTA DE BOCA APROXIMADA (m)	PROFUNDIDADE (m)	COORDENADAS	
			NORTE	ESTE
CP1-01	30,5	15	9.698.819,69	577.850,80
CP1-02	29,5	15	9.698.787,60	577.828,53
CP1-03	29,0	15	9.698.696,78	577.847,70
CP1-04	27,0	15	9.698.443,72	577.803,51
CP1-05	27,0	15	9.698.305,32	577.820,81
CP1-06	31,5	21	9.698.184,41	577.842,81
CP1-07	33,0	17	9.698.435,80	577.228,95

SONDAGEM	DOTA DE BOCA APROXIMADA (m)	PROFUNDIDADE (m)	SHELBY/DENISON (m)²	MNA (m)	PZC (m)	COORDENADAS	
						NORTE	ESTE
SP-01	51,5	38	-	-	-	9.698.870,90	577.815,26
SP-02	41,5	30	14, 22 (2 u/s)	-	-	9.698.849,86	577.824,68
SP-03	51,5	39	-	-	-	9.698.821,50	577.785,11
SP-04	41,5	31	-	8	-	9.698.810,09	577.783,33
SP-05	51,5	37	-	19	-	9.698.739,50	577.746,34
SP-06	29,5	15	-	-	13	9.698.157,43	577.850,80
SP-07	51,5	36	-	-	-	9.698.687,03	577.773,23
SP-08	41,5	30	-	-	-	9.698.215,15	577.826,43
SP-09	51,5	42	-	-	-	9.698.489,10	577.847,46
SP-10	27	15	-	-	-	9.698.447,06	577.806,68
SP-11	41,5	32	-	11	-	9.698.336,16	577.770,57
SP-12	27	12	4, 7 (2 u/s)	-	10	9.698.311,88	577.800,33
SP-13	51,5	32	-	-	18	9.698.398,17	577.320,73
SP-14	41,5	27	-	-	24	9.698.373,89	577.353,79
SP-15	41,5	26	5, 11, 15 (3 u/s)	-	24	9.698.408,41	577.240,50
SP-16	30,5	15	-	-	-	9.698.822,89	577.854,63
SP-17	29,5	15	-	-	-	9.698.791,90	577.831,36
SP-18	30	10	-	-	-	9.698.750,17	577.816,43
SP-19	29	10	-	-	-	9.698.701,56	577.844,51
SP-20	24	10	-	-	-	9.698.458,70	577.829,88
SP-21	27	10	-	-	-	9.698.501,98	577.817,84
SP-22	26	10	-	-	9	9.698.128,81	577.855,54
SP-23	32	10	-	-	-	9.698.349,21	577.342,69
SP-24	33	16	-	-	16	9.698.430,80	577.234,97
SP-25P	41,5	30	-	-	-	9.698.831,24	577.800,80
SP-26P	51,5	21	-	-	-	9.698.852,84	577.836,11
SP-27P	51,5	41	-	-	-	9.698.571,21	577.850,40
SP-28	51,5	38	-	-	15	9.698.839,10	577.850,70
SP-29	51,5	38	-	-	-	9.698.847,47	577.785,18
SP-30	41,5	32	7, 16, 24 (3 u/s)	-	27	9.698.740,23	577.767,67

(*) AS PROFUNDIDADES SÃO PRELIMINARES E VÃO SER CONFIRMADAS A LUIZ DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS DIFERENTES PONTOS

LEGENDA:

- SONDAGEM A PERCUSSÃO
- SONDAGEM A PERCUSSÃO/PIEZMETRO
- SONDAGEM A PERCUSSÃO/AMOSTRA SHELBY/DENISON
- SONDAGEM A PERCUSSÃO/AMOSTRA SHELBY/DENISON
- SONDAGEM A PERCUSSÃO/MEDIDOR DE NÍVEL D'ÁGUA
- SONDAGEM A PERCUSSÃO/MEDIDOR DE NÍVEL D'ÁGUA /AMOSTRA SHELBY/DENISON
- SONDAGEM A PERCUSSÃO/PIEZMETRO/AMOSTRA SHELBY/DENISON
- ENSAIO PIEZOCONE
- POÇOS DE INSPEÇÃO

CONTINUAÇÃO DAS NOTAS:

12 - OS ENDAÇOS DE PERMEABILIDADE IN SITU ACIMA DO NA, PREVISTOS NO DOCUMENTO SLU-F-142110-001, DEVEM SER REALIZADOS EM FURTO DESTINTE DE 3 A 5 M DA SONDADEJA A PERCUSSÃO CORRESPONDENTE. O ENSAIO DEVE SER EXECUTADO CONFORME O BOLETIM 4 DA ARBE E ORIENTAÇÕES CONSTANTES NO DOCUMENTO SLU-F-142110-001

13 - PIS LOCALIZADOS NO MARCADO DEVEM SER ESCAVADOS ATÉ 1,20 M DE PROFUNDIDADE, ENQUANTO POÇOS LOCALIZADOS NO TERRENO DE JUSANTE PODEM SER ESCAVADOS COM 2 M DE PROFUNDIDADE, SENDO COMPRIADO AS ORIENTAÇÕES CONSTANTES NO DOCUMENTO SLU-F-142110-001

14 - OS PONTOS SP-08, CPTU-08 E SP-06 DEVEM SER LOCALIZADOS DE FORMA A NÃO GERAR INTERFERÊNCIA COM A GALERIA, DEVENDO SER REALIZADOS AJUSTES EM CAMPO CASO NECESSÁRIO.

RESENHOS DE REFERÊNCIA:

SLU-D-214956-001 - FECHAMENTO DA ARB 6 - PROJETO BÁSICO - ARRANJO GERAL - PLANTA

ED-D-100090-203 - ARB 6 - ADEQUATEZAMENTO - ORTOGNÓMICO - PLANTA

SLU-D-211300-001 - ARB 6 - PROJETO DETALHADO - RECUPERAÇÃO DE SAÍDAIS - ARRANJO GERAL PLANTA

NOTAS:

1 - DIMENSÕES E ELEVACIONES EM METRO, EXCETO ONDE INDICADO DE OUTRA FORMA.

2 - AS ELEVACIONES INDICADAS NA PLANTA FORMAM SÉRIAS A PARTIR DOS LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS FORNECIDOS PELA ALUMAR.

3 - EM FUNDO DAS CANALIZAÇÕES DE SUPERFÍCIE DO TERRENO, PODERÃO SER NECESSÁRIOS / REALIZADOS AJUSTES DE CAMPO, QUANDO DA LOCALIZAÇÃO DAS INVESTIGAÇÕES.

4 - OS PONTOS NA ORDEM E SEMA SEMER SER LOCALIZADOS DE FORMA A NÃO INTERFERIR COM O ACESSO.

5 - AS COORDENADAS SÃO EM SISTEMA LOCAL (CORREIO ALGAR).

6 - DEVEM SER PREVISTOS OS EQUIPAMENTOS DO PROJETO A CONSTRUÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS CPTU E RETIRADA DE AMOSTRAS SHELBY/DENISON NAS BERMAS.

7 - AS COLÉTIAS DE AMOSTRAS SHELBY/DENISON DEVEM SER REALIZADAS EM UMA VERTICAL COM 1 A 3 METROS DE DISTÂNCIA DA SONDADEJA INÍCIO CORRESPONDENTE.

CONTINUAÇÃO DAS NOTAS:

8- DEVEM SER PREVISTOS / ESTUDADOS EM ETAPAS POSTERIORES DO PROJETO A CONSTRUÇÃO DE ACESSOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENDAÇOS CPTU E RETIRADA DE AMOSTRAS SHELBY NAS BERMAS

9- AS COLÉTIAS DE AMOSTRAS SHELBY/DENISON DEVEM SER REALIZADAS SOMENTE APÓS O RECEBIMENTO DO RESULTADO DO SPT OU CPTU ADJACENTE PARA DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DA COLÉCTIA DA AMOSTRA.

10- PARA INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES CONSULTAR O DOCUMENTO SLU-F-142111-001

11- OS DOCUMENTOS SLU-F-014982-001 E SLU-F-014805-001 APRESENTAM OUTRAS PROGRAMAÇÕES DE INVESTIGAÇÃO PARA A ARB 6

TIPO DE EMISSÃO:			
13	JUL	23	ATENDIMENTO COMENTÁRIOS
14	AGO	03	ATENDIMENTO COMENTÁRIOS
15	AGO	08	ATENDIMENTO COMENTÁRIOS
16	OUT	21	REVISÃO DO CDD
17	OUT	21	REVISÃO DO CDD

ALUMAR

geocoban

CONSORCIO DE ALUMINIO DO MARAHO FABRICA DE SAO LUIS

9847-ARB6

ÁREA DE RESÍDUO DE BAURITA - Nº 6

PROGRAMAÇÃO DE INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

LOCALIZAÇÃO - PLANTA

SLU-D-216790-001

00

REVISÃO: 01

ELABORADO: 11/11/2010

REVISADO: 11/11/2010

APROVADO: 11/11/2010

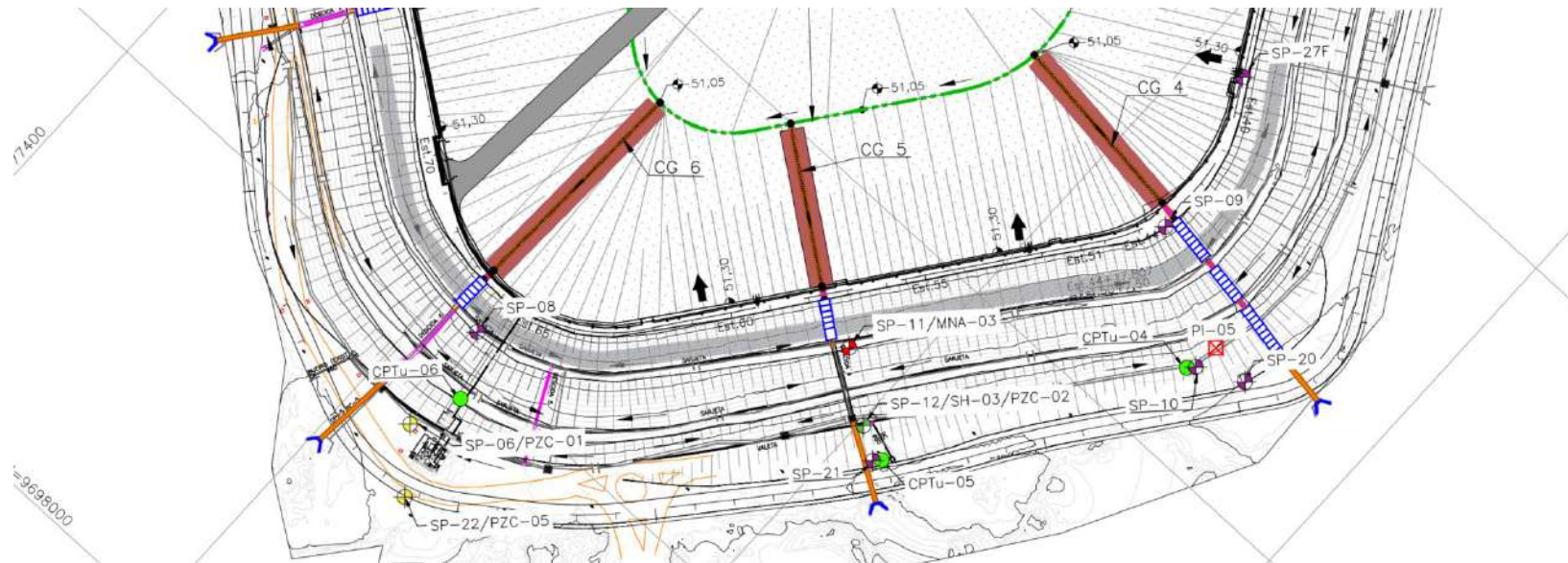
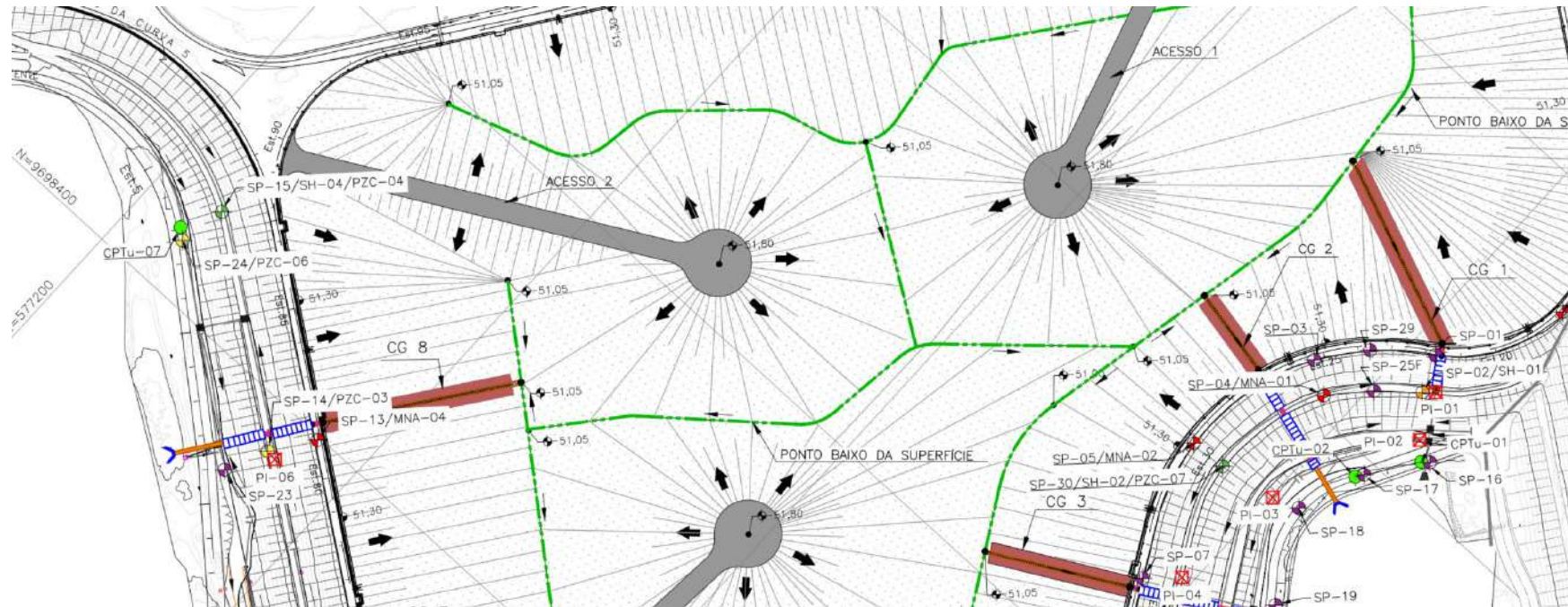
REVISÃO: 01

ELABORADO: 11/11/2010

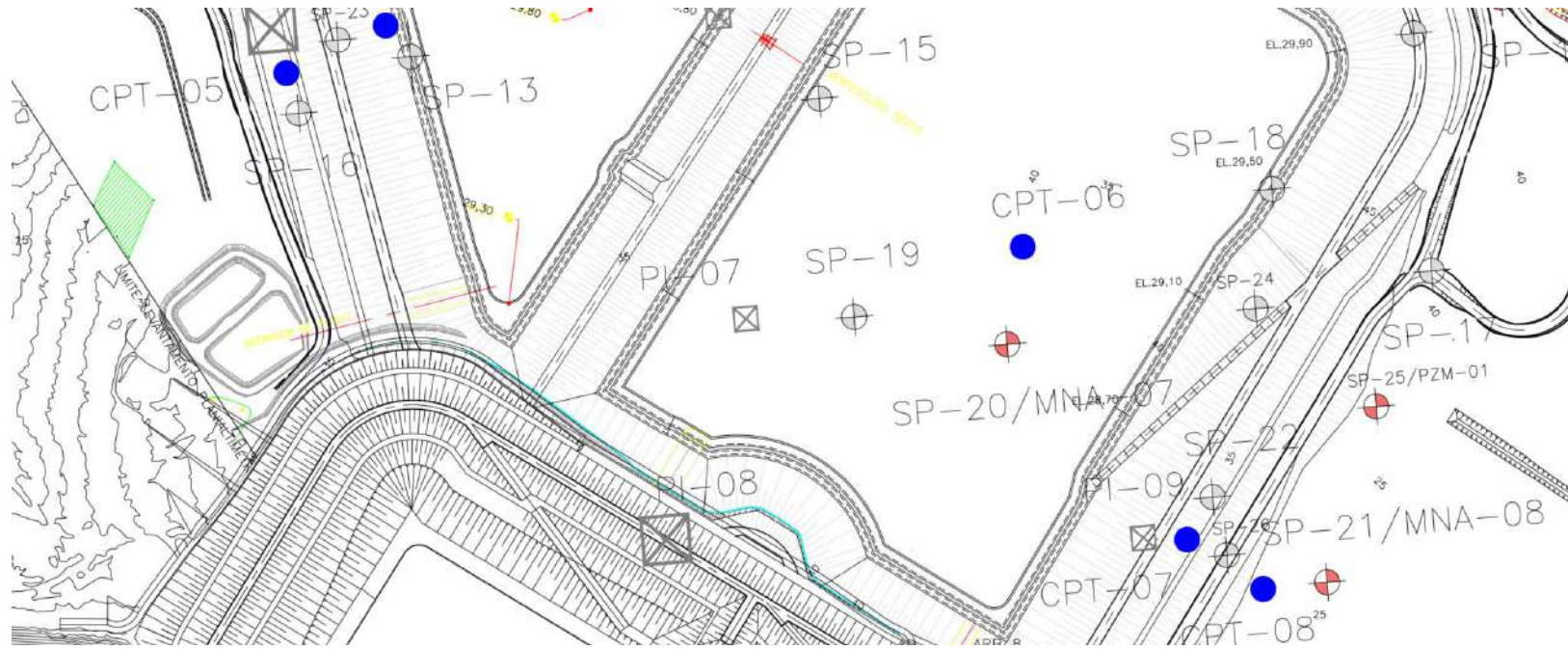
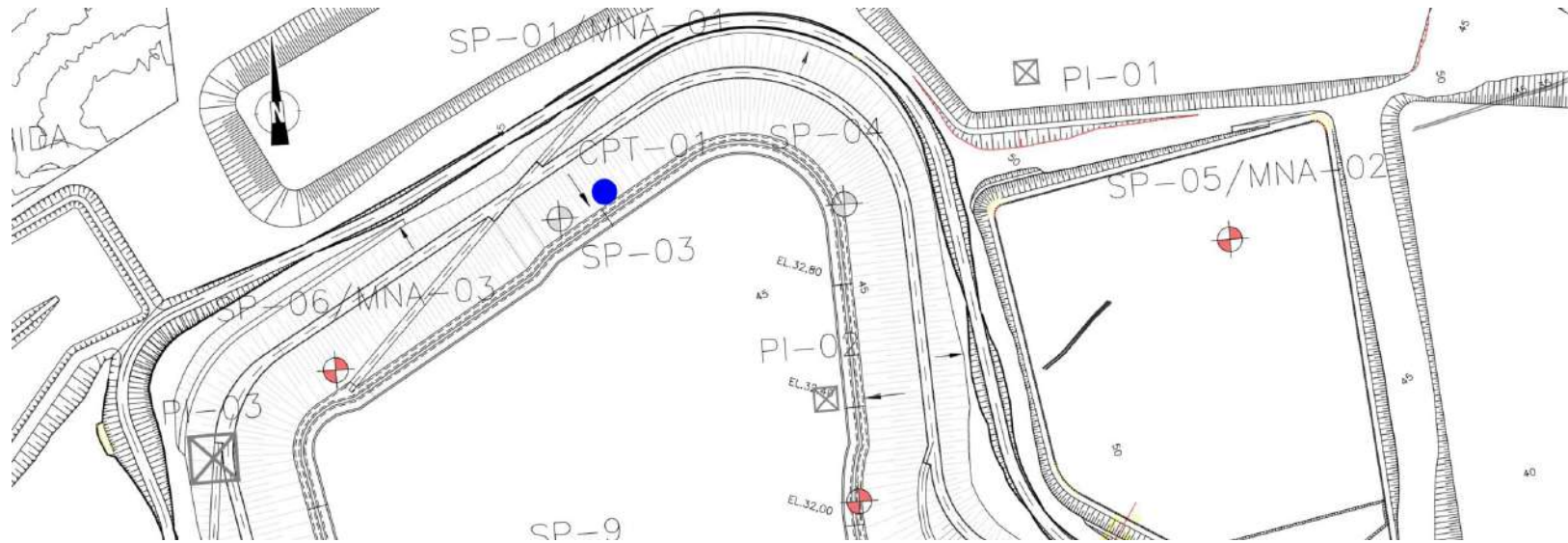
REVISADO: 11/11/2010

APROVADO: 11/11/2010

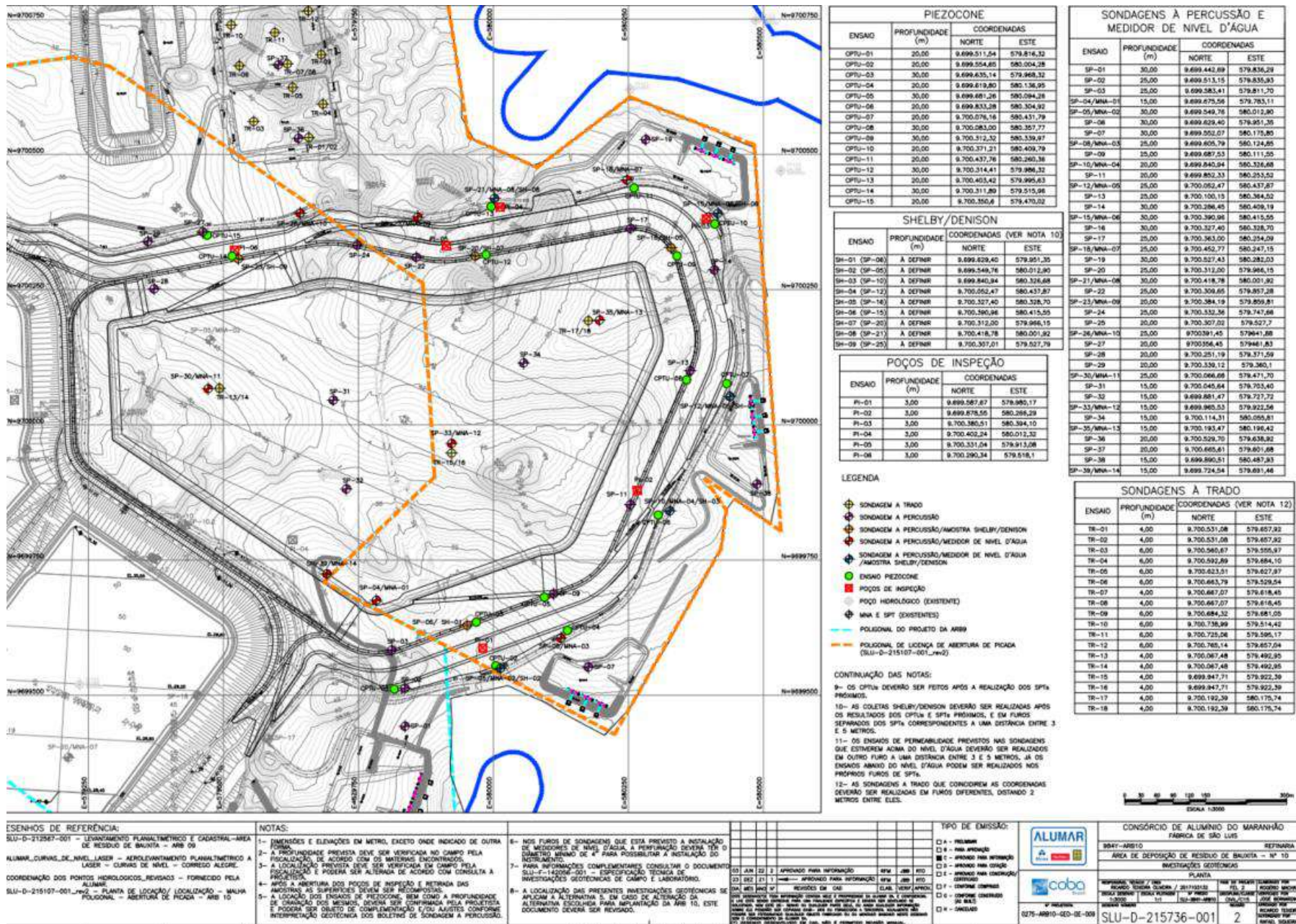
Localização dos ensaios SCPTu na ARB 6



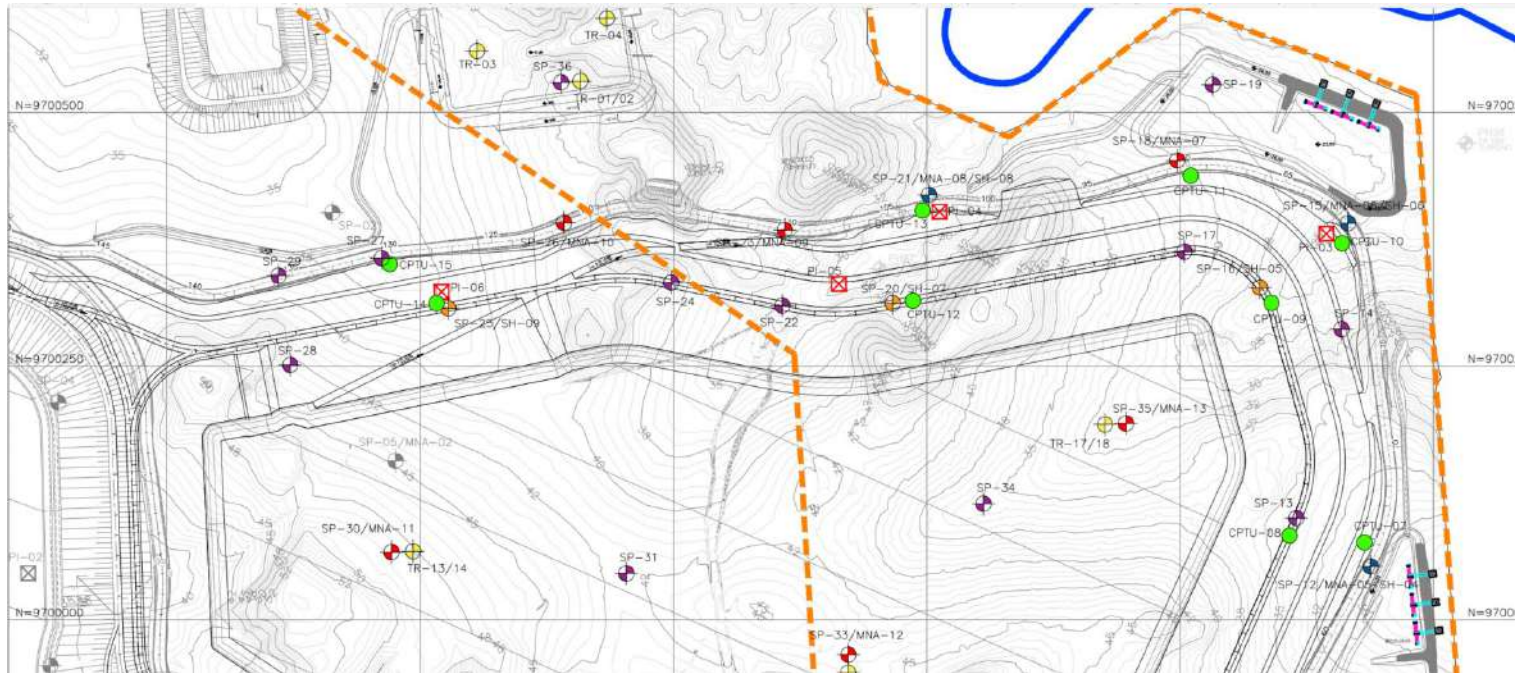
Localização dos ensaios SCPTu na ARB 9



Localização dos ensaios SCPTu na ARB 10



Localização dos ensaios SCPTu na ARB 10

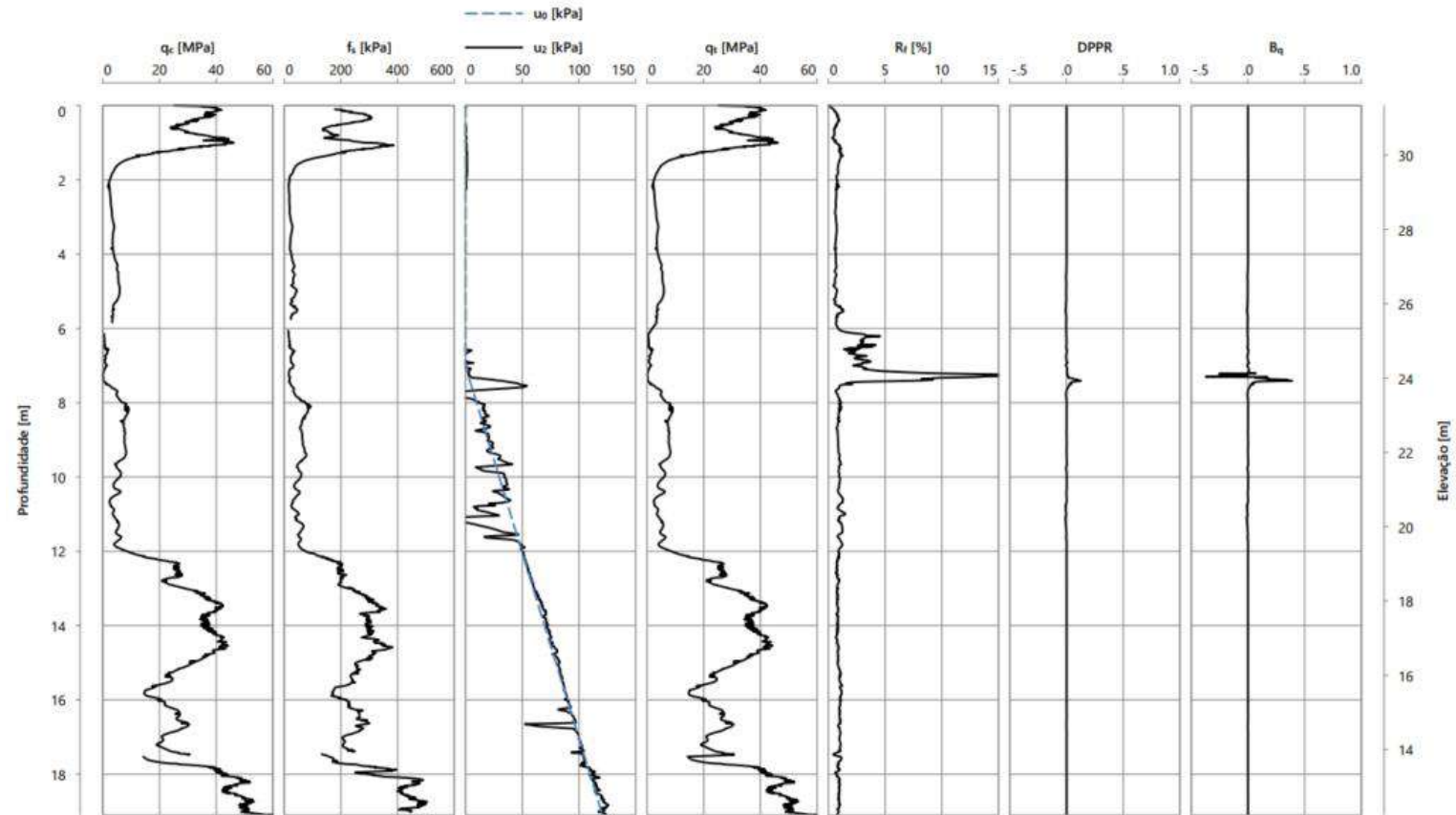


APÊNDICE D

RESULTADO DOS ENSAIOS SCPT_u

SCPTu's da ARB 4

SCPTu 02- ARB 4



Profundidade : 19,10 m
 Coord. Norte : 9699373,60 m
 Coord. Este : 576871,10 m
 Cota do nível do terreno : 31,34 m
 Operador : Maxuel Ribeiro
 Processador : Bruno

Data : 29/11/2022 - 30/11/2022
 Nº do cone : 1701-3237
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : SIRGAS 2000

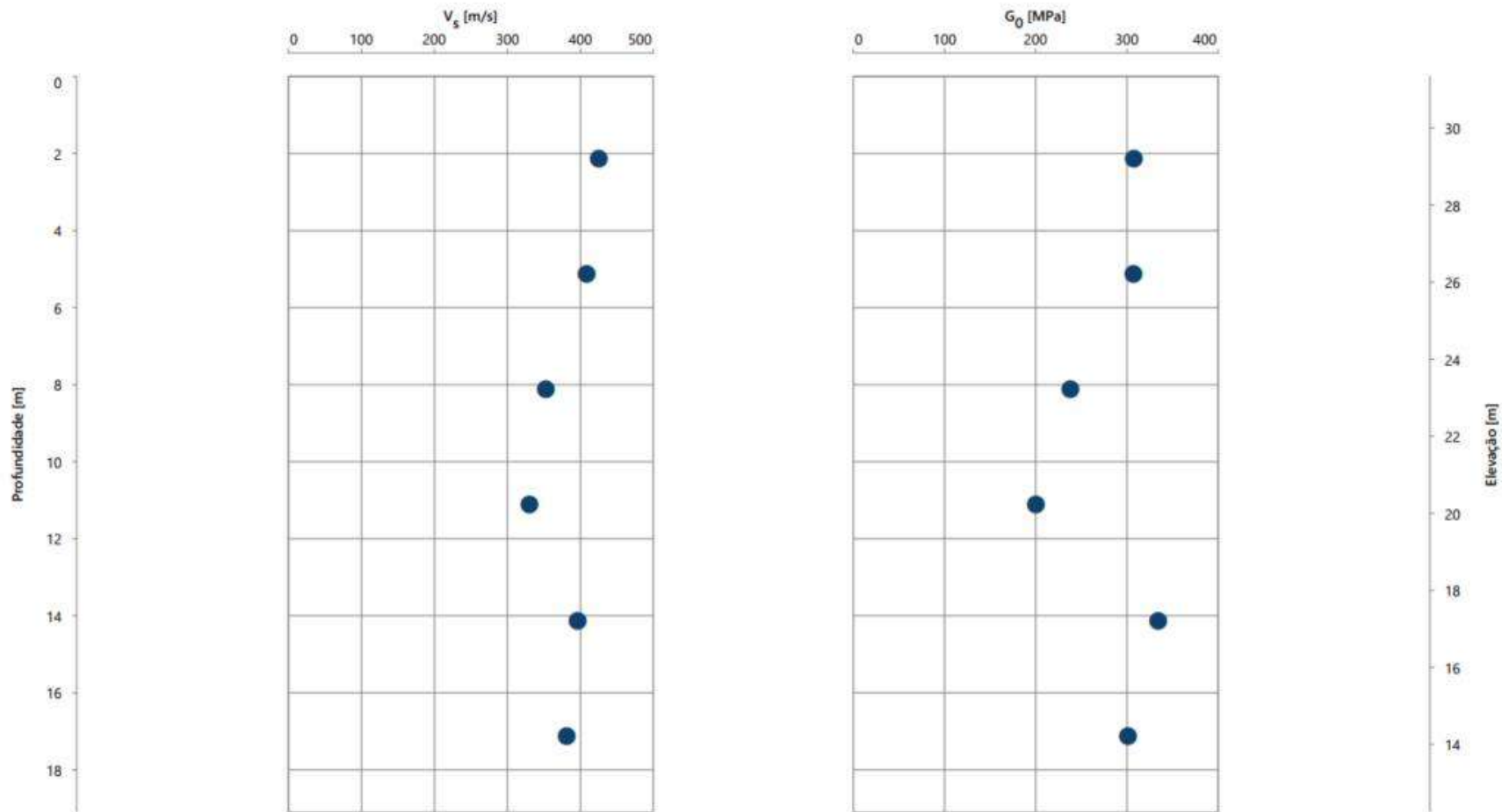
Nível d'água (N.A.) : 7,04 m.
 Critério de paralisação : Paralisado ao atingir camada impenetrável.
 Observações : CPT até 19,10 m.

Ensaio: SCPTu-02
 Relatório: ALU-07-GRE-01

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 4
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar





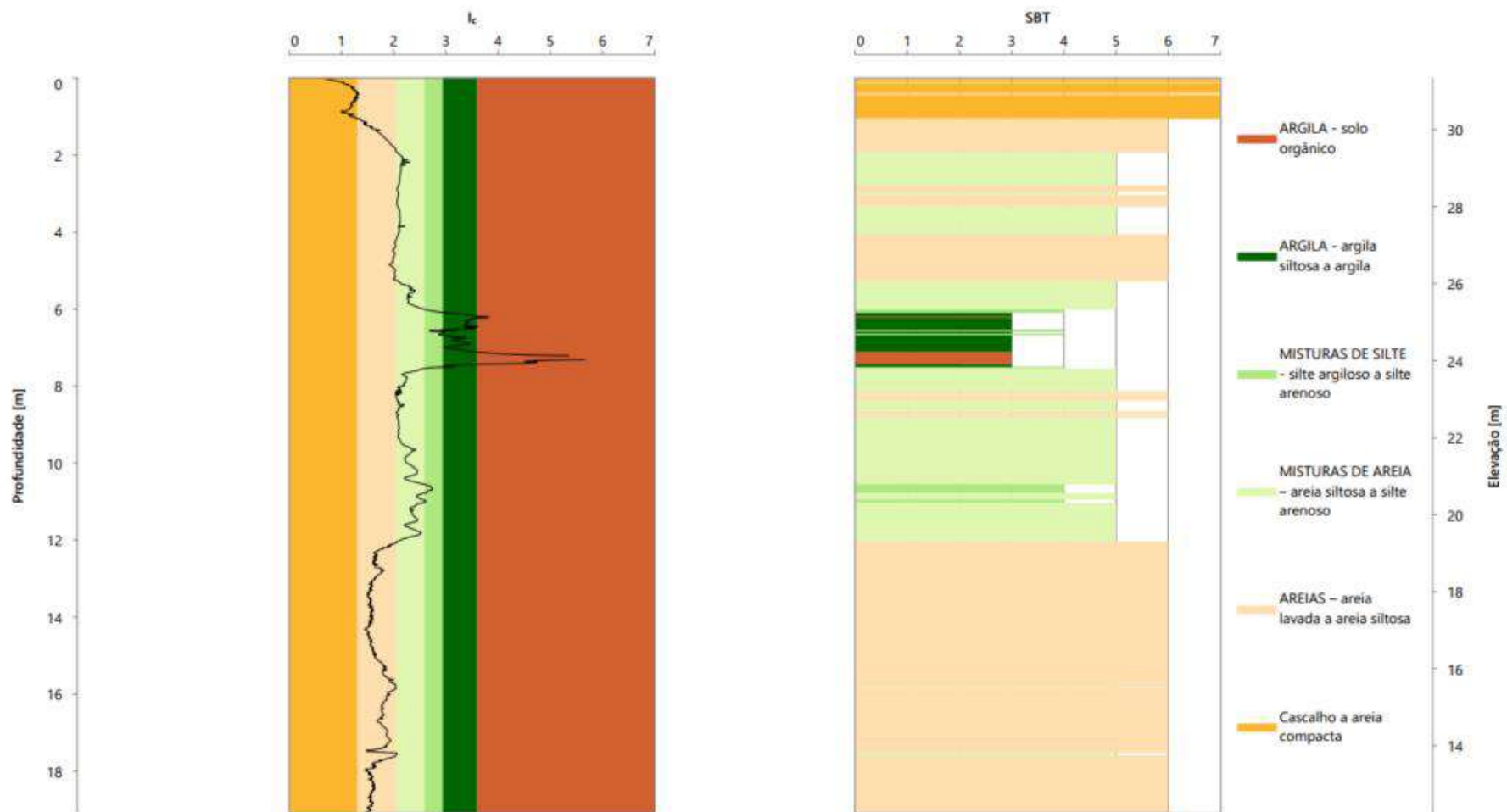
Profundidade	: 19,10	m	Data	: 29/11/2022 - 30/11/2022	Nível d'água (N.A.)	: 7,04 m.	
Coord. Norte	: 9699373,60	m	Nº do cone	: 1701-3237	Critério de paralisação	: Paralisado ao atingir camada impenetrável.	
Coord. Este	: 576871,10	m	Diâmetro	: 43,85	mm	Observações	: CPT até 19,10 m.
Cota do nível do terreno	: 31,34	m	Área lateral	: 200,00	cm ²		
Operador	: Maxuel Ribeiro		Área da base	: 15,10	cm ²		
Processador	: Brun		Datum	: SIRGAS 2000			

Ensaio: SCPTu-02
Relatório: ALU-07-GRE-01

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 4
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar





Profundidade	: 19,10	m	Data	: 29/11/2022 - 30/11/2022	Nível d'água (N.A.)	: 7,04 m.	
Coord. Norte	: 9699373,60	m	Nº do cone	: 1701-3237	Critério de paralisação	: Paralisado ao atingir camada impenetrável.	
Coord. Este	: 576871,10	m	Diâmetro	: 43,85	mm	Observações	: CPT até 19,10 m.
Cota do nível do terreno	: 31,34	m	Área lateral	: 200,00	cm ²		
Operador	: Maxuel Ribeiro		Área da base	: 15,10	cm ²		
Processador	: Bruno		Datum	: SIRGAS 2000			

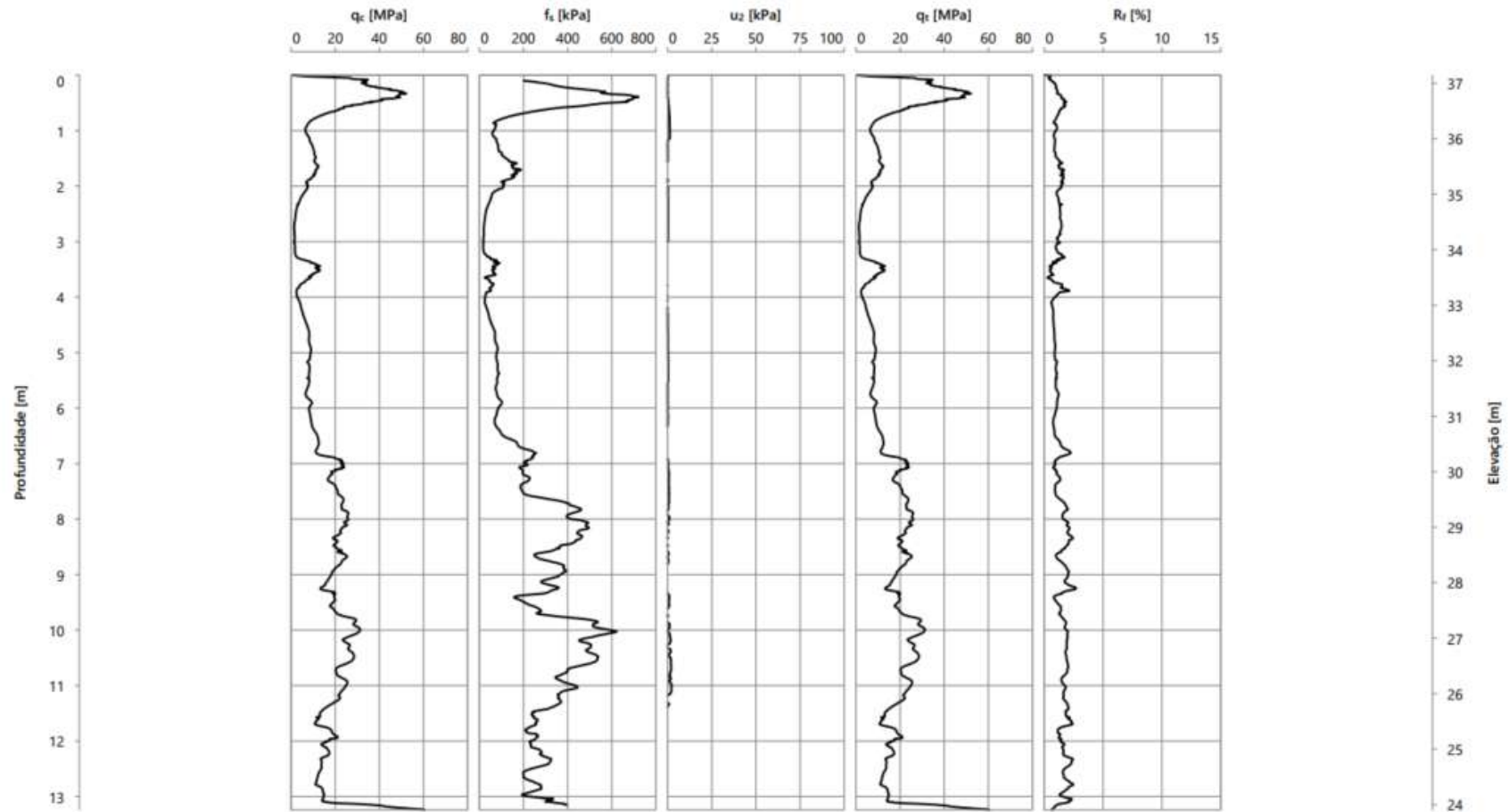
Ensaio: SCPTu-02
Relatório: ALU-07-GRE-01

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 4
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar



SCPTu 03 – ARB 4



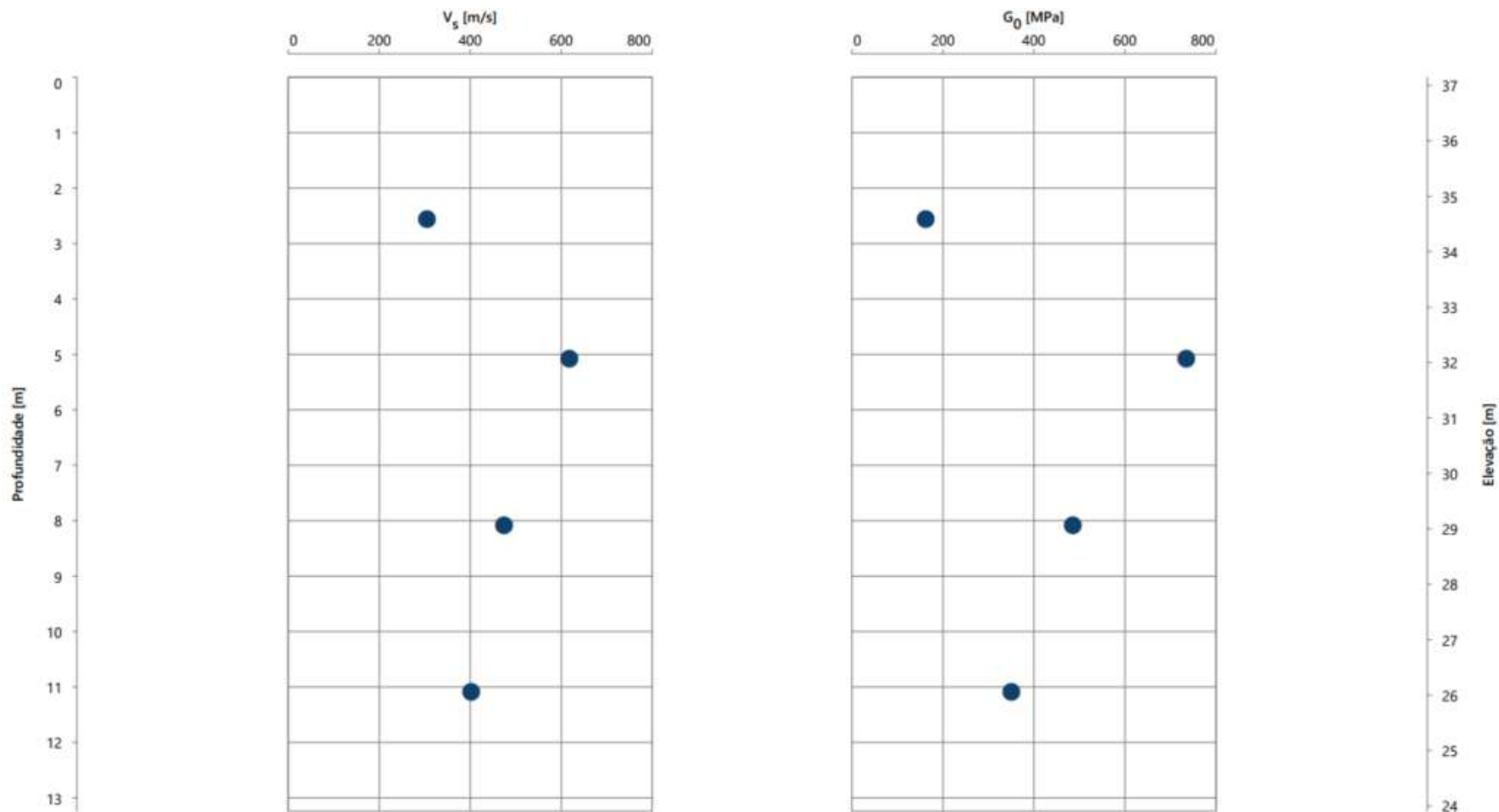
Profundidade	: 13,24	m	Data	: 16/12/2022 - 16/12/2022	Nível d'água (N.A.)	: Não identificado.
Coord. Norte	: 9699232,14	m	Nº do cone	: 1701-3237	Critério de paralisação	: Paralisado ao atingir alta resistência de ponta do cone.
Coord. Este	: 576790,02	m	Diâmetro	: 43,85	Observações	: CPT até 13,24 m.
Cota do nível do terreno	: 37,15	m	Área lateral	: 200,00		
Operador	: Marcelo Boeno		Área da base	: 15,10		
Processador	: Luana		Datum	: SIRGAS 2000		

Ensaio: SCPTu-03
Relatório: ALU-07-GRE-01

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 4
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar





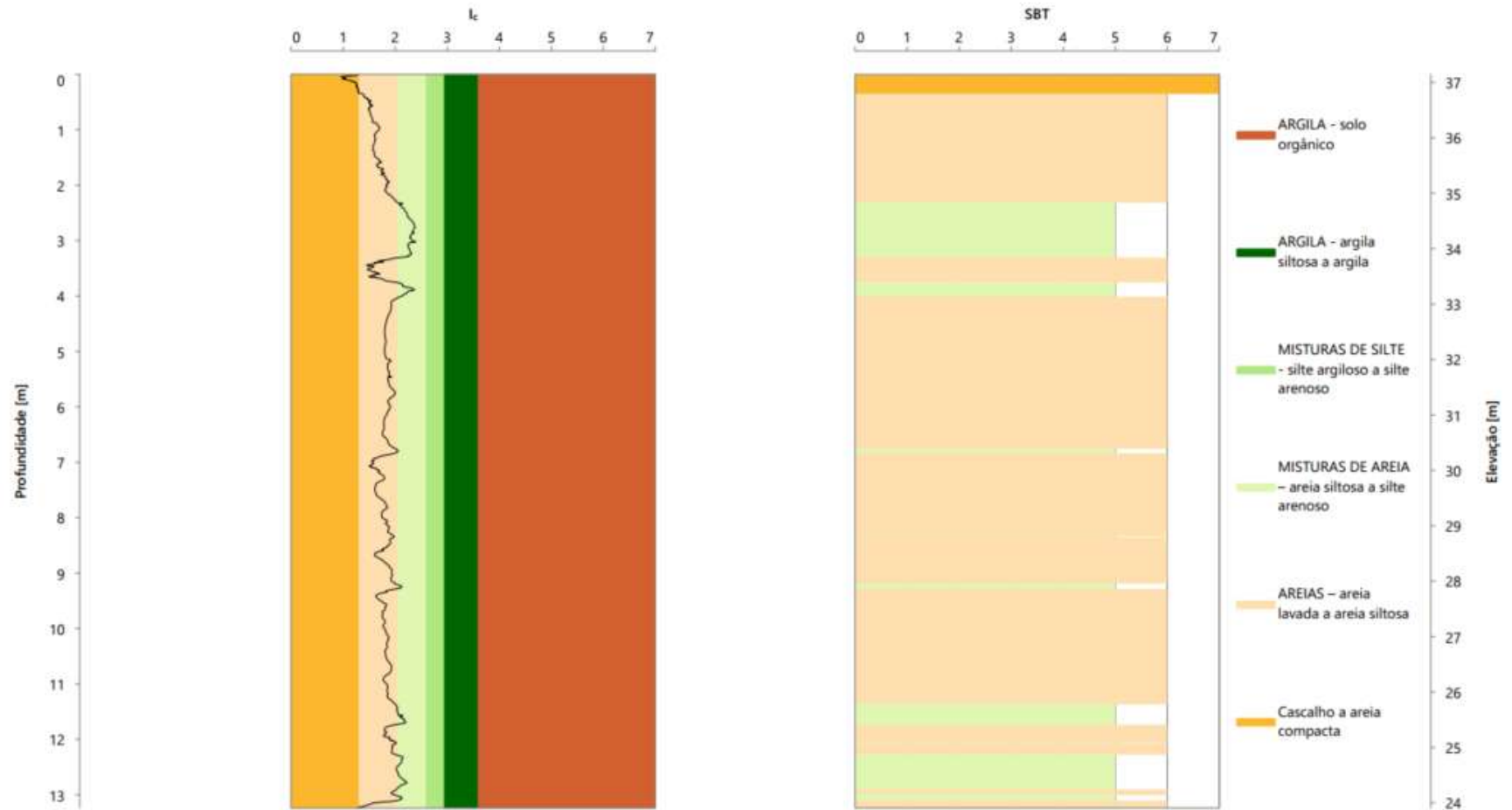
Profundidade	: 13,24	m	Data	: 16/12/2022 - 16/12/2022	Nível d'água (N.A.)	: Não identificado.	
Coord. Norte	: 9699232,14	m	Nº do cone	: 1701-3237	Critério de paralisação	: Paralisado ao atingir alta resistência de ponta do cone.	
Coord. Este	: 576790,02	m	Diâmetro	: 43,85	mm	Observações	: CPT até 13,24 m.
Cota do nível do terreno	: 37,15	m	Área lateral	: 200,00	cm ²		
Operador	: Marcelo Boeno		Área da base	: 15,10	cm ²		
Processador	: Luana		Datum	: SIRGAS 2000			

Ensaio: SCPTu-03
Relatório: ALU-07-GRE-01

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 4
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar





Profundidade : 13,24 m
 Coord. Norte : 9699232,14 m
 Coord. Este : 576790,02 m
 Cota do nível do terreno : 37,15 m
 Operador : Marcelo Boeno
 Processador : Luana

Data : 16/12/2022 - 16/12/2022
 Nº do cone : 1701-3237
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : SIRGAS 2000

Nível d'água (N.A.) : Não identificado
 Critério de paralisação : Paralisado ao atingir alta resistência de ponta do cone.
 Observações : CPT até 13,24 m.

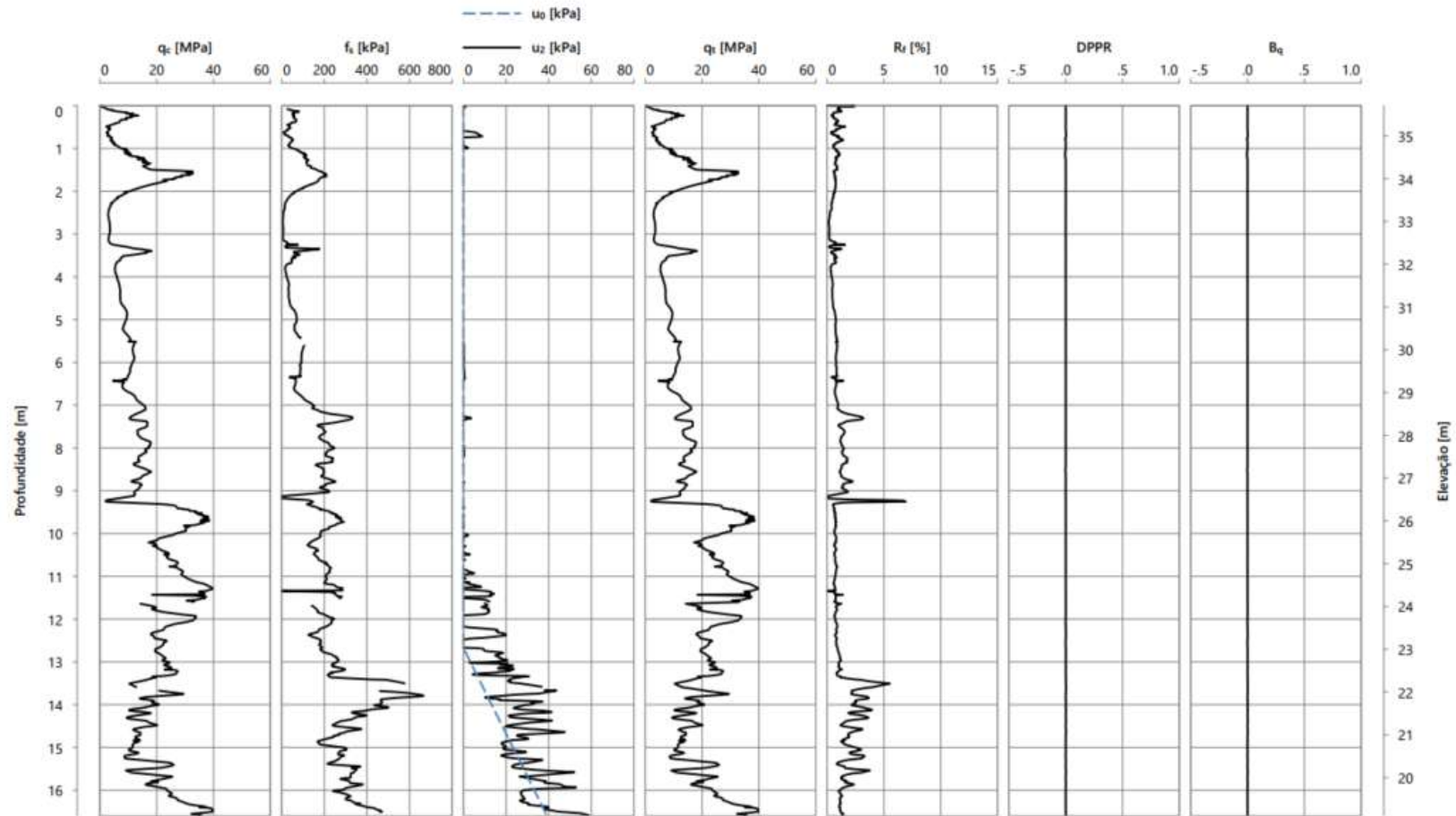
Ensaio: SCPTu-03
 Relatório: ALU-07-GRE-01

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 4
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar



SCPTu 04 – ARB 4



Profundidade : 16,63 m
 Coord. Norte : 9699039,01 m
 Coord. Este : 576653,91 m
 Cota do nível do terreno : 35,70 m
 Operador : Maxuel Ribeiro
 Processador : Luana

Data : 11/01/2023 - 12/01/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : SIRGAS 2000

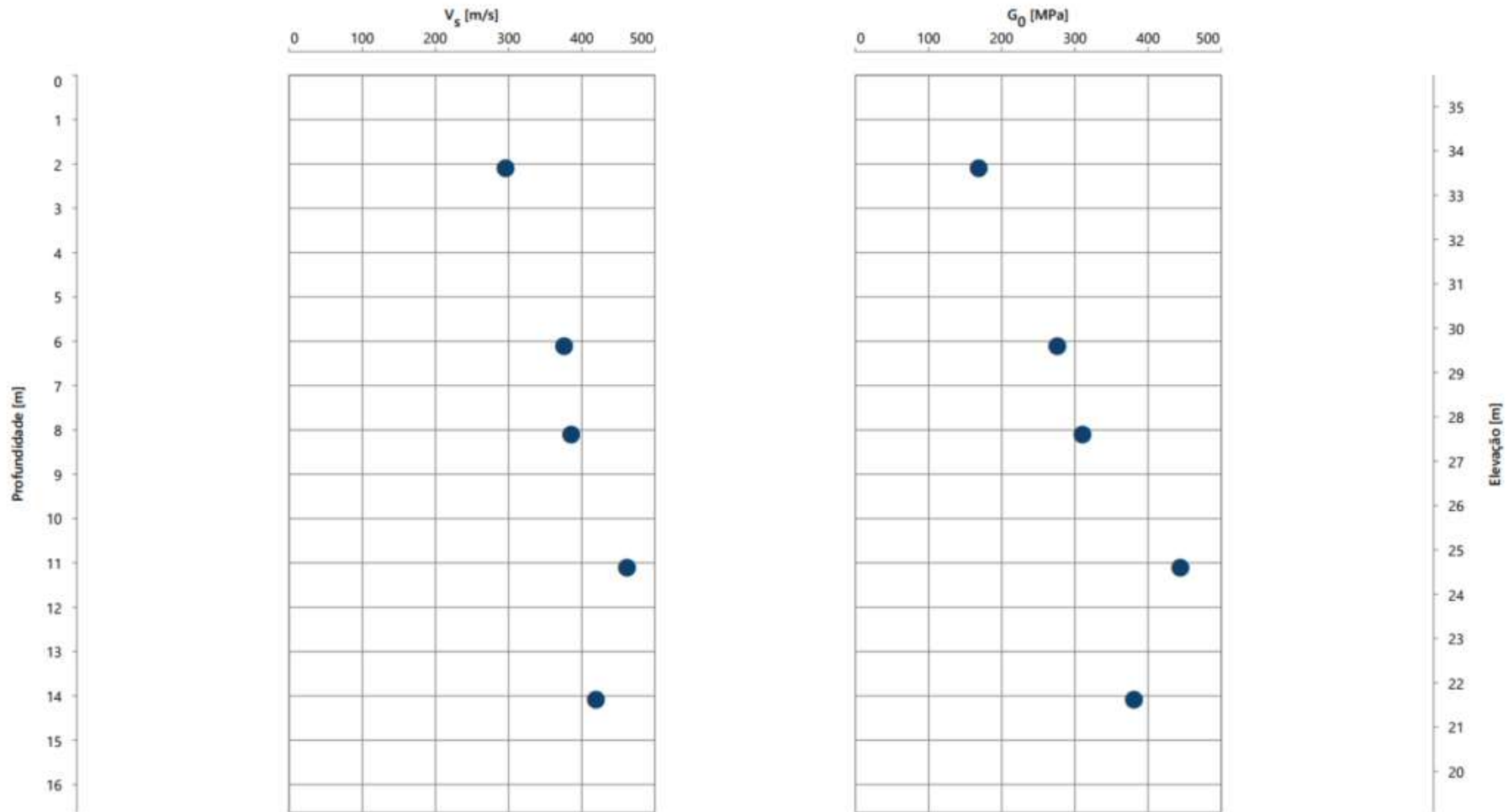
Nível d'água (N.A.) : 12,68 m.
 Critério de paralisação : Paralisado devido a alta inclinação do cone.
 Observações : CPT até 11,70 m. Nas profundidades 5,52 m, 11,70 m e 13,59 m, as falhas no log ocorrem pela mudança de manobra do ensaio.

Ensaio: SCPTu-04
 Relatório: ALU-07-GRE-01

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 4
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar





Profundidade	: 16,63	m	Data	: 11/01/2023 - 12/01/2023
Coord. Norte	: 9699039,01	m	Nº do cone	: 1701-3254
Coord. Este	: 576653,91	m	Diâmetro	: 43,85 mm
Cota do nível do terreno	: 35,70	m	Área lateral	: 200,00 cm ²
Operador	: Maxuel Ribeiro		Área da base	: 15,10 cm ²
Processador	: Luana		Datum	: SIRGAS 2000

Nível d'água (N.A.)	: 12,68 m.
Critério de paralisação	: Paralisado devido a alta inclinação do cone.
Observações	: CPT até 11,70 m. Nas profundidades 5,52 m, 11,70 m e 13,59 m, as falhas no log ocorrem pela mudança de manobra do ensaio.

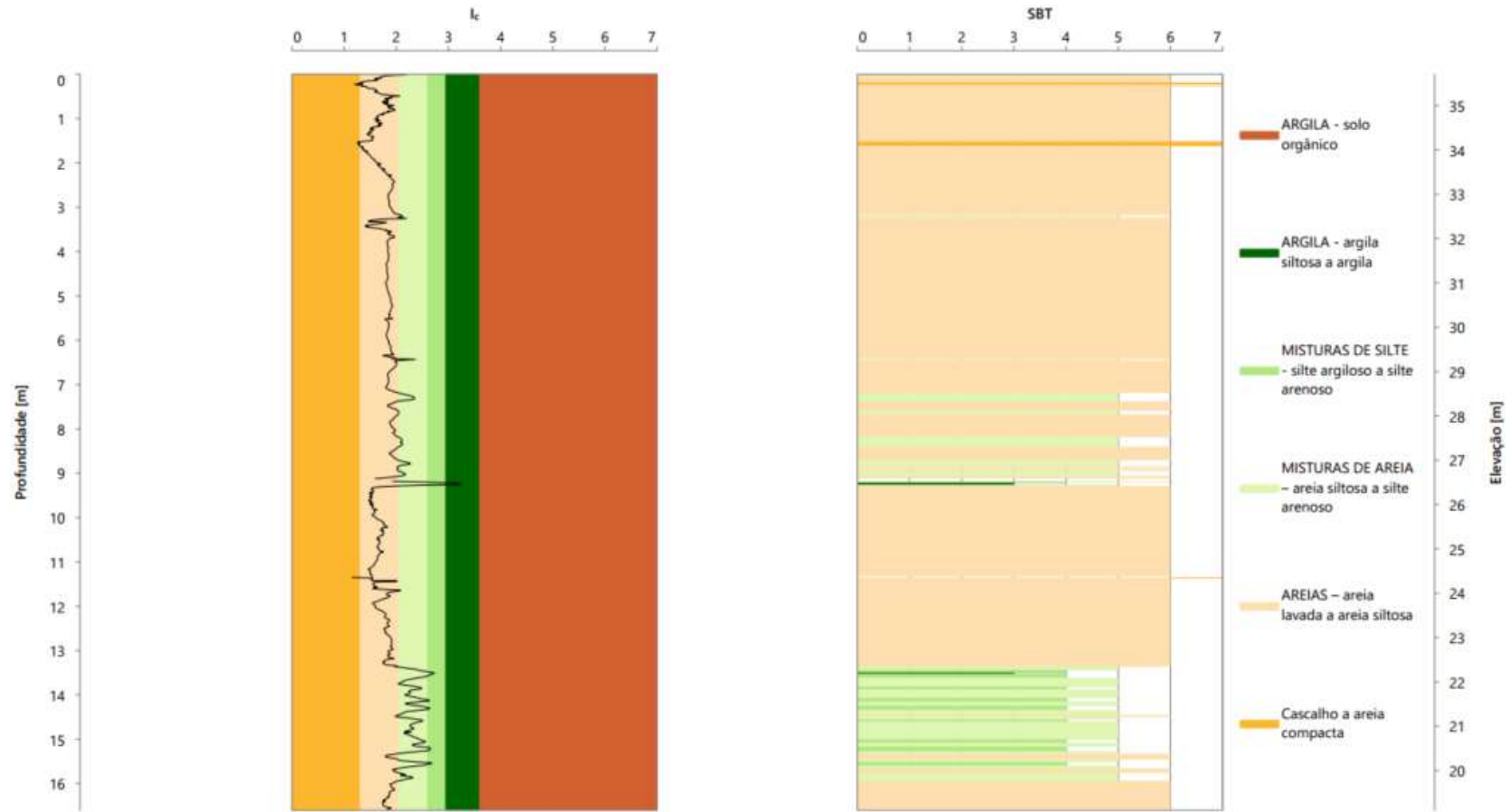
Ensaio: SCPTu-04
Relatório: ALU-07-GRE-01

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 4
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar



Classificação P. K. Robertson (2010)



Profundidade : 16,63 m
 Coord. Norte : 9699039,01 m
 Coord. Este : 576653,91 m
 Cota do nível do terreno : 35,70 m
 Operador : Maxuel Ribeiro
 Processador : Luana

Data : 11/01/2023 - 12/01/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : SIRGAS 2000

Nível d'água (N.A.) : 12,68 m.
 Critério de paralisação : Paralisado devido a alta inclinação do cone.
 Observações : CPT até 11,70 m. Nas profundidades 5,52 m, 11,70 m e 13,59 m, as falhas no log ocorrem pela mudança de manobra do ensaio.

Ensaio: SCPTu-04
 Relatório: ALU-07-GRE-01

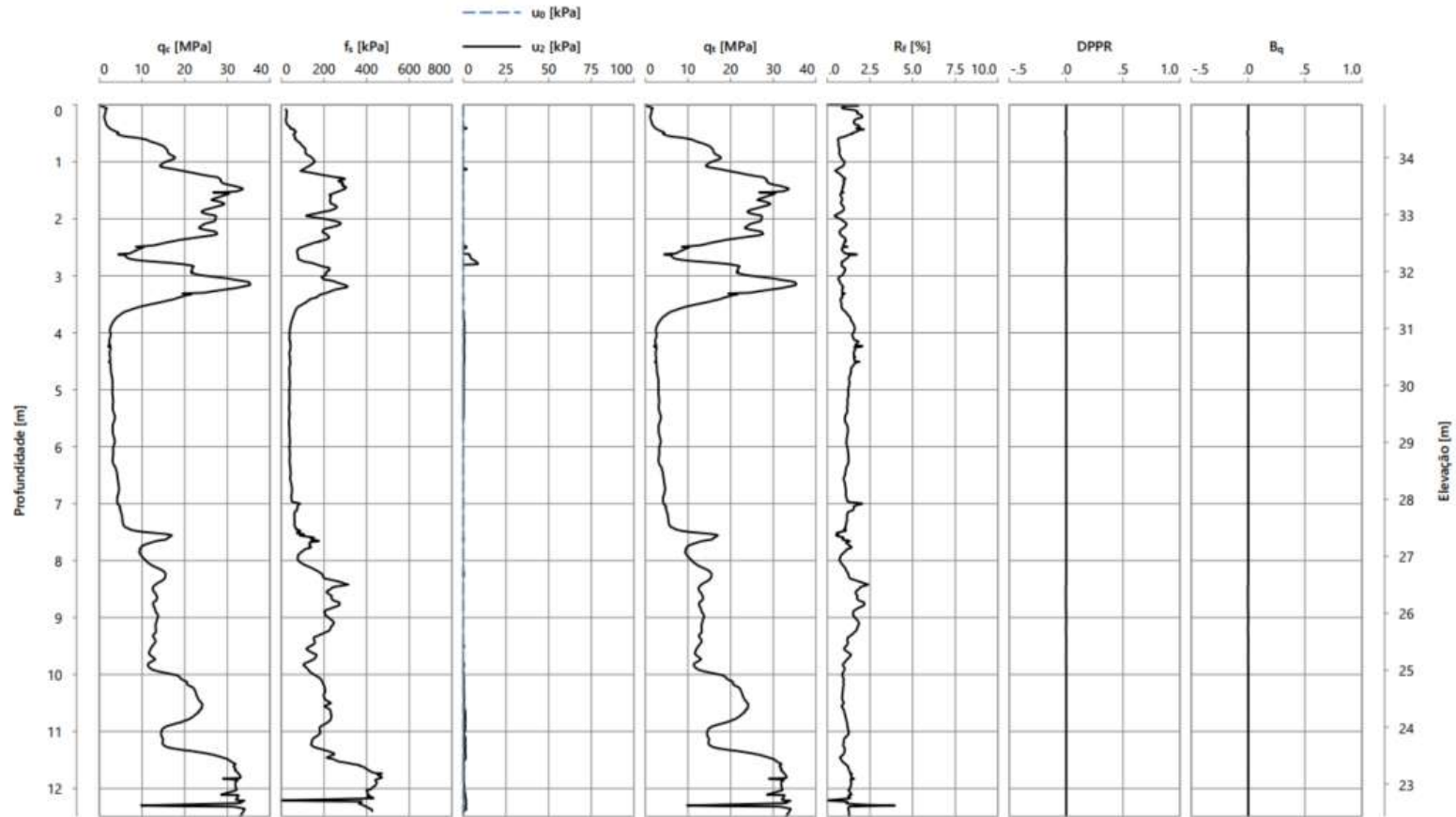
Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 4
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Gzybowski
 Contratante: Alumar



SCPTu's da ARB 5

SCPTu 03- ARB 5



Profundidade : 12,49 m
 Coord. Norte : 9699725,81 m
 Coord. Este : 577117,91 m
 Cota do nível do terreno : 34,93 m
 Operador : Jonathan Borges
 Processador : Luana

Data : 16/01/2023 - 16/01/2023
 Nº do cone : 1701-3237
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm^2
 Área da base : 15,10 cm^2
 Datum : SIRGAS 2000

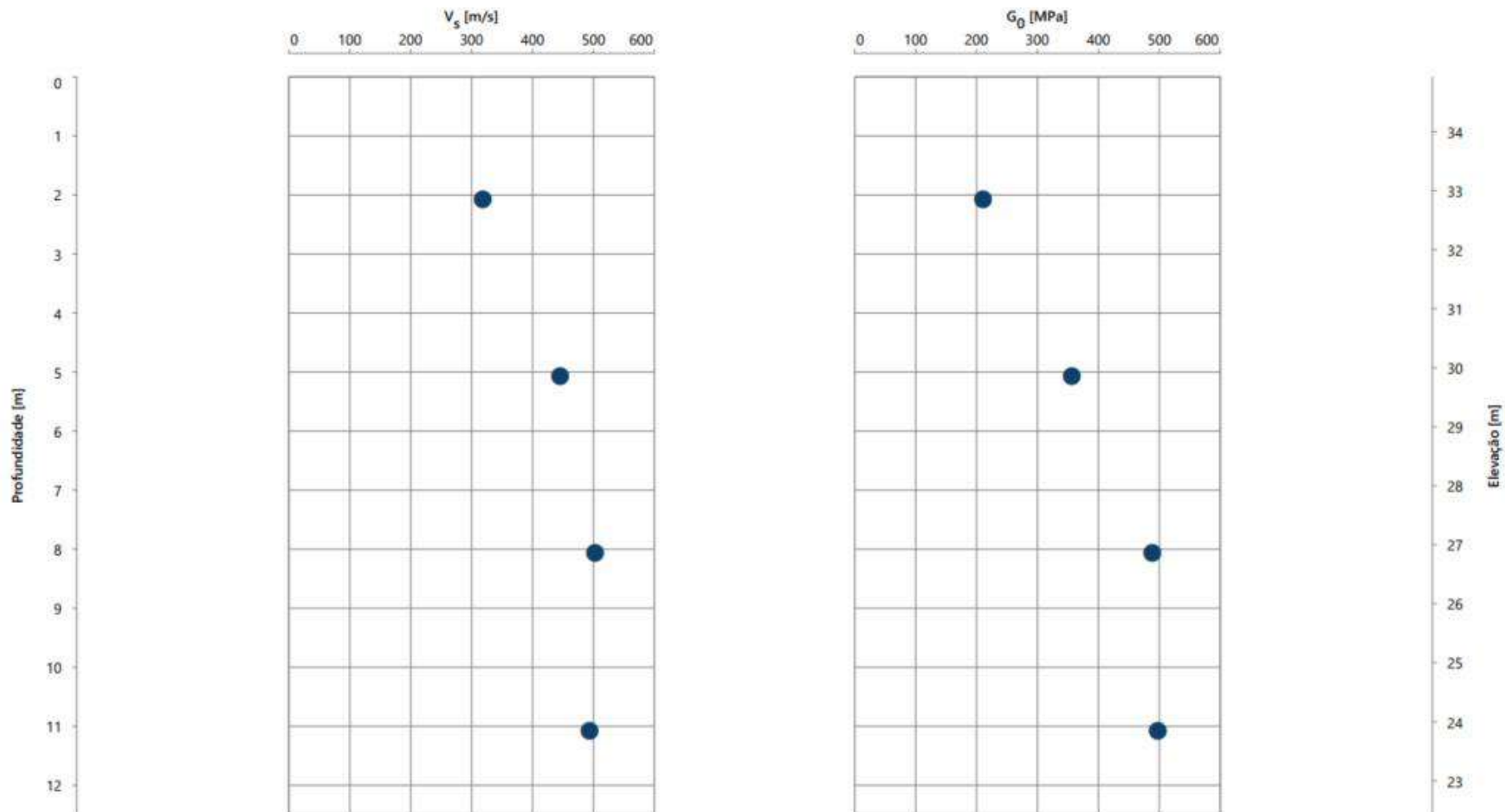
Nível d'água (N.A.) : Não identificado.
 Critério de paralisação : Paralisado ao atingir limite do equipamento.
 Observações : CPT até 12,49 m.

Ensaio: SCPTu-03
 Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar





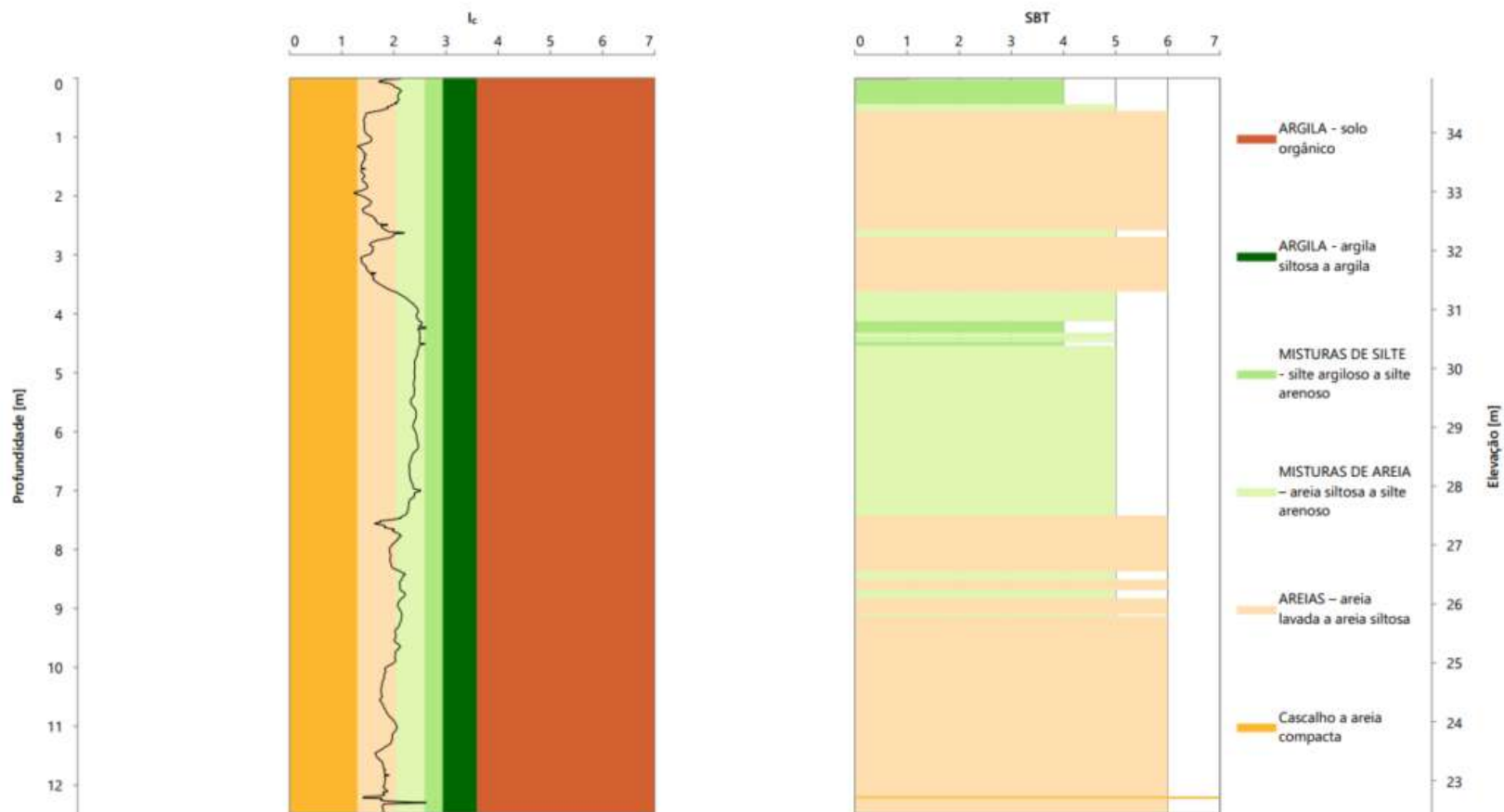
Profundidade	: 12,49	m	Data	: 16/01/2023 - 16/01/2023	Nível d'água (N.A.)	: Não identificado.	
Coord. Norte	: 9699725,81	m	Nº do cone	: 1701-3237	Critério de paralisação	: Paralisado ao atingir limite do equipamento.	
Coord. Este	: 577117,91	m	Diâmetro	: 43,85	mm	Observações	: CPT até 12,49 m.
Cota do nível do terreno	: 34,93	m	Área lateral	: 200,00	cm ²		
Operador	: Jonathan Borges		Área da base	: 15,10	cm ²		
Processador	: Luana		Datum	: SIRGAS 2000			

Ensaio: SCPTu-03
Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Residuo de Bauxita - ARB 5
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar





Profundidade	: 12,49	m	Data	: 16/01/2023 - 16/01/2023
Coord. Norte	: 9699725,81	m	Nº do cone	: 1701-3237
Coord. Este	: 577117,91	m	Diâmetro	: 43,85
Cota do nível do terreno	: 34,93	m	Área lateral	: 200,00
Operador	: Jonathan Borges		Área da base	: 15,10
Processador	: Luana		Datum	: SIRGAS 2000

Nível d'água (N.A.)	: Não identificado.
Critério de paralisação	: Paralisado ao atingir limite do equipamento.
Observações	: CPT até 12,49 m.

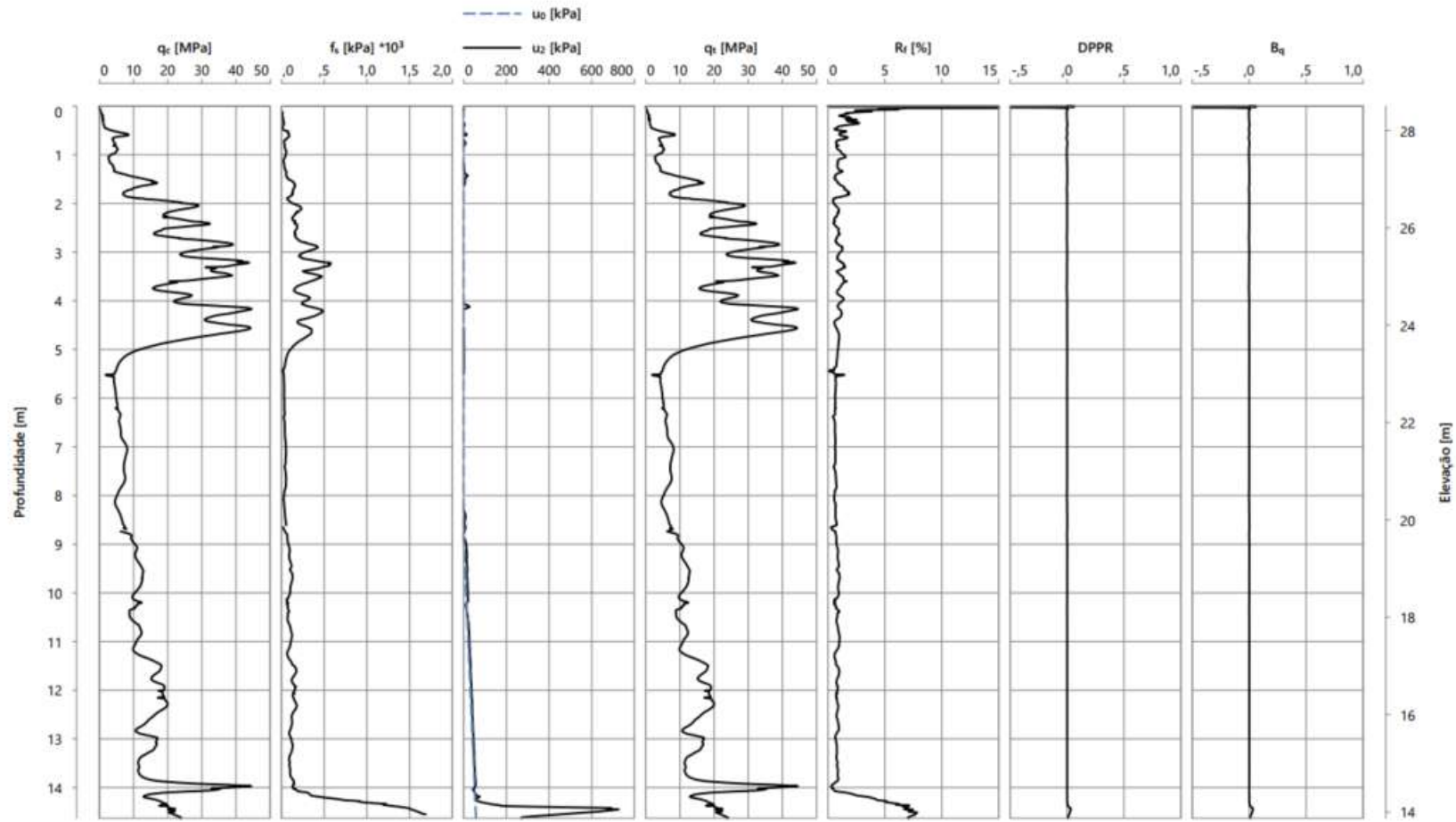
Ensaio: SCPTu-03
Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar



SCPTu 05- ARB 5



Profundidade : 14,66 m
 Coord. Norte : 9699980,39 m
 Coord. Este : 577373,28 m
 Cota do nível do terreno : 28,50 m
 Operador : Maxuel Ribeiro
 Processador : Bruno Correa

Data : 23/01/2023 - 23/01/2023
 Nº do cone : 1701-3237
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : Córrego Alegre (Alumar)

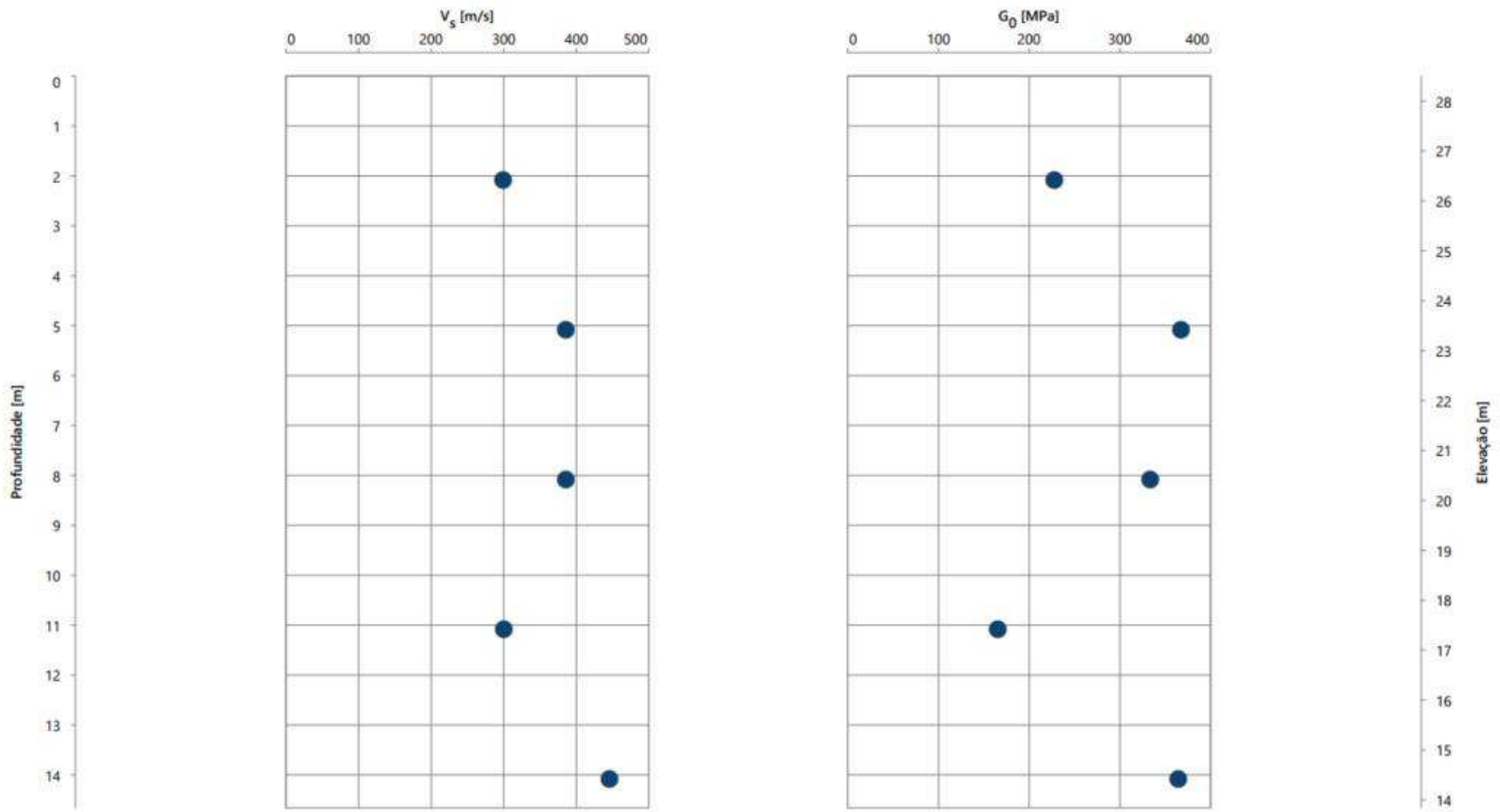
Nível d'água (N.A.) : 8,87 m
 Critério de paralisação : Paralisado devido à alta inclinação do cone.
 Observações : CPT até 14,66 m. N.A. inserido pelo início dos valores de u2 continuamente positivos. Na profundidade 8,70 m, a falha no log ocorre pela mudança de manobra do ensaio. Topografia referente ao ensaio SCPTu-05.

Ensaio: SCPTu-05A
 Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar





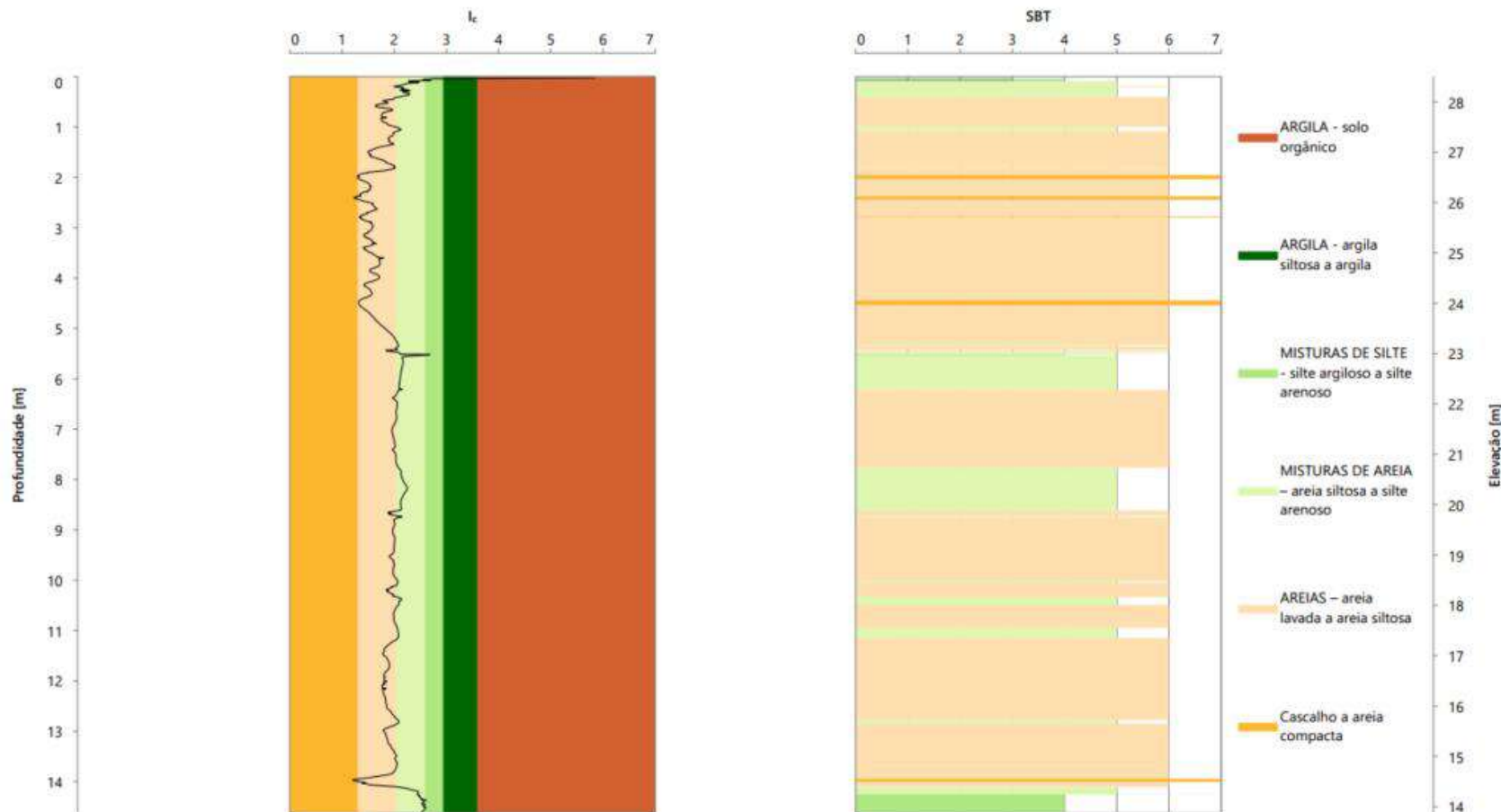
Profundidade	: 14,66	m	Data	: 23/01/2023 - 23/01/2023	Nível d'água (N.A.)	: 8,87 m
Coord. Norte	: 9699980,39	m	Nº do cone	: 1701-3237	Critério de paralisação	: Paralisado devido à alta inclinação do cone.
Coord. Este	: 577373,28	m	Dímetro	: 43,85	Observações	: CPT até 14,66 m. N.A. inserido pelo início dos valores de u2 continuamente positivos. Na profundidade 8,70 m, a falha no log ocorre pela mudança de manobra do ensaio. Topografia referente ao ensaio SCPTu-05.
Cota do nível do terreno	: 28,50	m	Área lateral	: 200,00	cm ²	
Operador	: Maxuel Ribeiro		Área da base	: 15,10	cm ²	
Processador	: Bruno Correa		Datum	: Córrego Alegre (Alumar)		

Ensaio: SCPTu-05A
Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar





Profundidade	: 14,66	m	Data	: 23/01/2023 - 23/01/2023
Coord. Norte	: 9699980,39	m	Nº do cone	: 1701-3237
Coord. Este	: 577373,28	m	Diâmetro	: 43,85 mm
Cota do nível do terreno	: 28,50	m	Área lateral	: 200,00 cm ²
Operador	: Maxuel Ribeiro		Área da base	: 15,10 cm ²
Processador	: Bruno Correa		Datum	: Córrego Alegre (Alumar)

Nível d'água (N.A.)	: 8,87 m
Critério de paralisação	: Paralisado devido à alta inclinação do cone.
Observações	: CPT até 14,66 m. N.A. inserido pelo início dos valores de u2 continuamente positivos. Na profundidade 8,70 m, a falha no log ocorre pela mudança de manobra do ensaio. Topografia referente ao ensaio SCPTu-05.

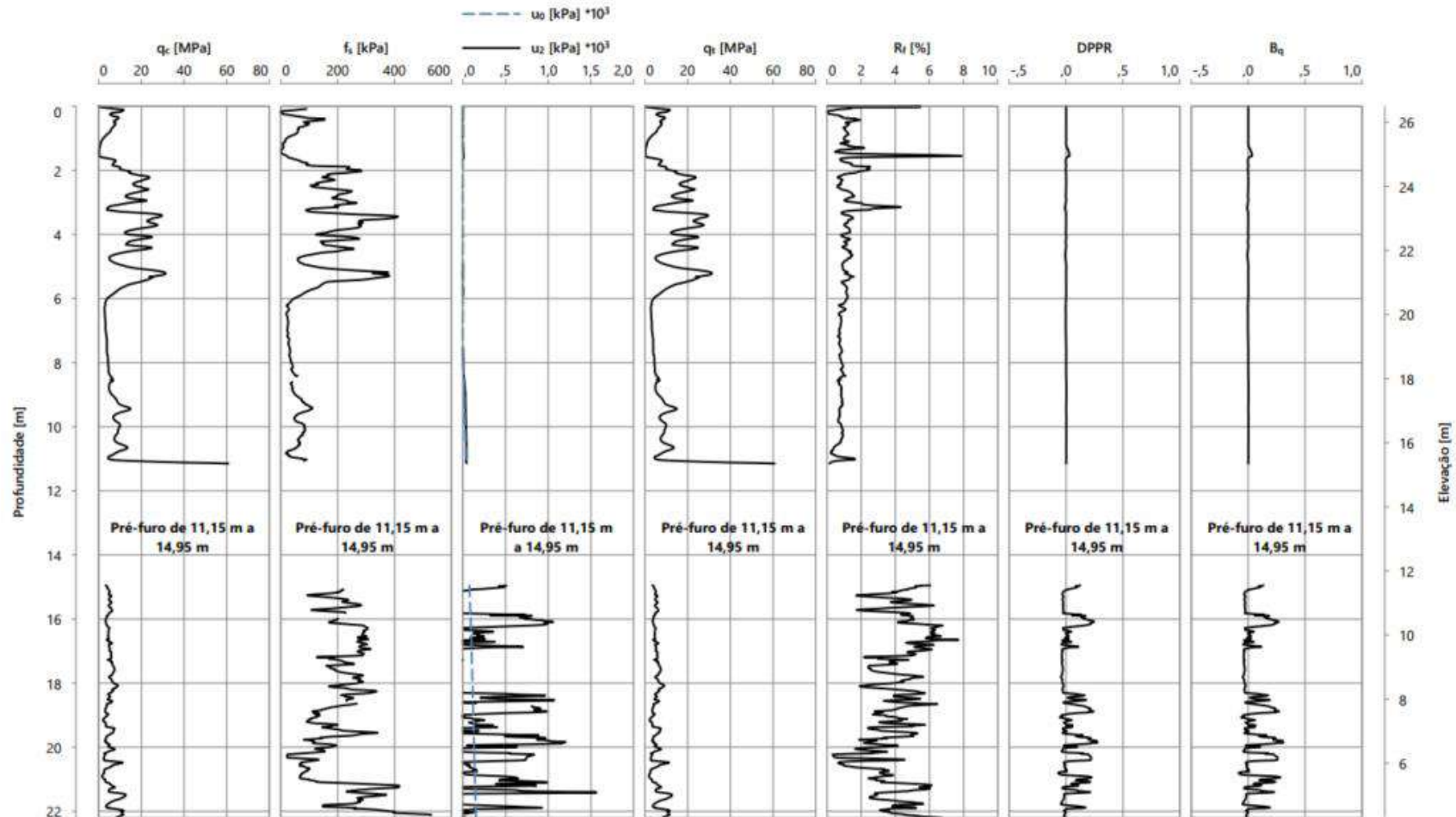
Ensaio: SCPTu-05A
Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar



SCPTu 06- ARB 5



Profundidade : 22,23 m
 Coord. Norte : 9700086,77 m
 Coord. Este : 577480,79 m
 Cota do nível do terreno : 26,50 m
 Operador : Marcelo Boeno
 Processador : Luana

Data : 09/08/2023 - 04/09/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : Córrego Alegre (Alumar)

Nível d'água (N.A.)
 Critério de paralisação
 Observações

: 7,59 m.
 : Paralisado ao atingir limite do equipamento.
 : CPT até 8,51 m. Pré-furo de 11,15 m a 14,95 m para passar camada impenetrável. Nas profundidades 8,51 m e 15,90 m, as lacunas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio. Topografia de projeto do ensaio SCPTu-06.

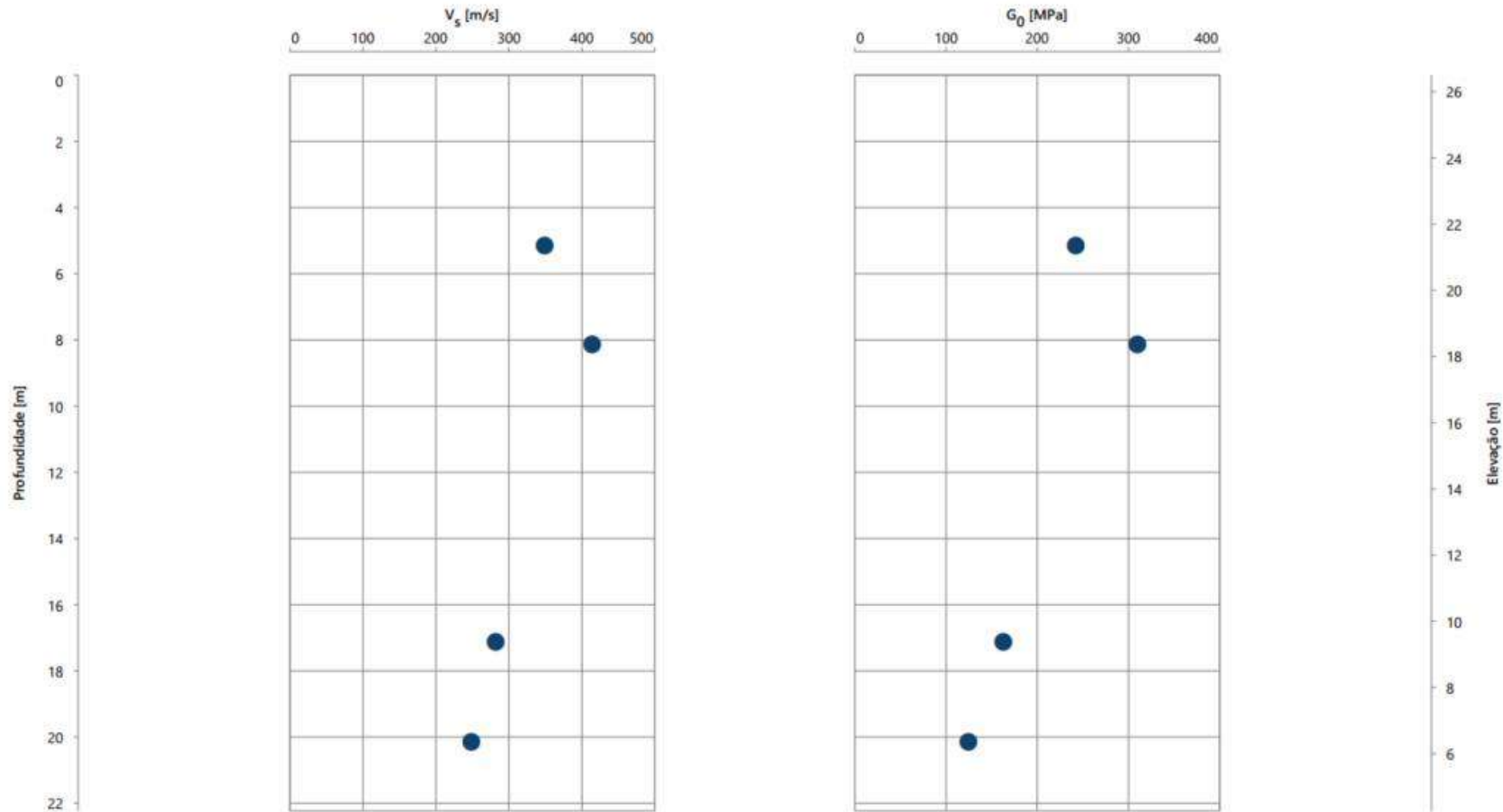
Ensaio: SCPTu-06B
 Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar



Observação: Para o ensaio sísmico executado em 2,01 m, foi obtido o valor de 1.304,85 m/s de V_s . Esse valor pode ser decorrente de mudança de camada entre os geofones.



Profundidade	: 22,23	m	Data	: 09/08/2023 - 04/09/2023
Coord. Norte	: 9700086,77	m	Nº do cone	: 1701-3254
Coord. Este	: 577480,79	m	Diâmetro	: 43,85 mm
Cota do nível do terreno	: 26,50	m	Área lateral	: 200,00 cm ²
Operador	: Marcelo Boeno		Área da base	: 15,10 cm ²
Processador	: Luana		Datum	: Córrego Alegre (Alumar)

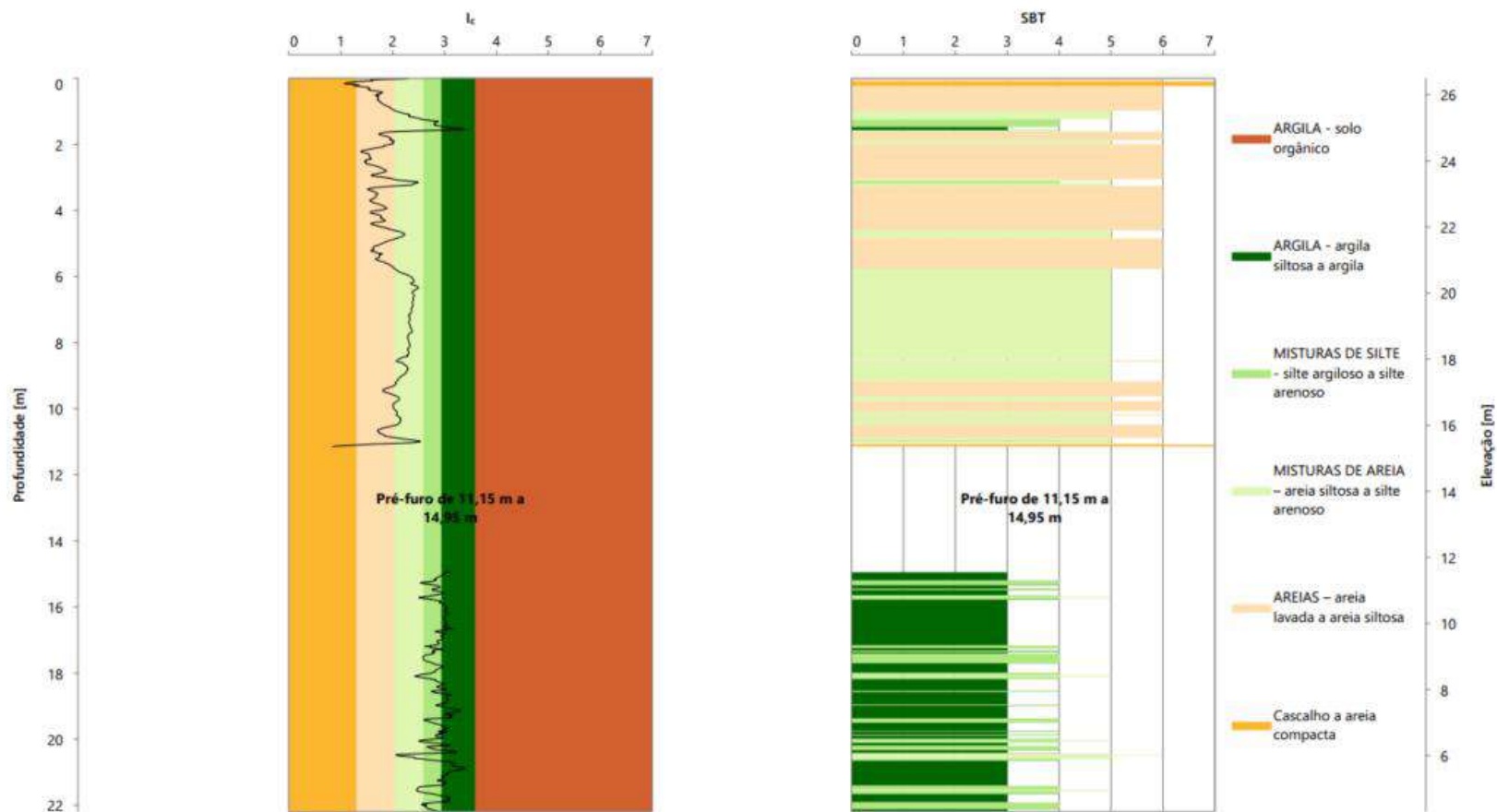
Nível d'água (N.A.)	: 7,59 m.
Critério de paralisação	: Paralisado ao atingir limite do equipamento.
Observações	: CPT até 8,51 m. Pré-furo de 11,15 m a 14,95 m para passar camada impenetrável. Nas profundidades 8,51 m e 15,90 m, as lacunas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio. Topografia de projeto do ensaio SCPTu-06.

Ensaio: SCPTu-06B
Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar





Profundidade	: 22,23	m	Data	: 09/08/2023 - 04/09/2023
Coord. Norte	: 9700086,77	m	Nº do cone	: 1701-3254
Coord. Este	: 577480,79	m	Diâmetro	: 43,85 mm
Cota do nível do terreno	: 26,50	m	Área lateral	: 200,00 cm ²
Operador	: Marcelo Boeno		Área da base	: 15,10 cm ²
Processador	: Luana		Datum	: Córrego Alegre (Alumar)

Nível d'água (N.A.)	: 7,59 m.
Critério de paralisação	: Paralisado ao atingir limite do equipamento.
Observações	: CPT até 8,51 m. Pré-furo de 11,15 m a 14,95 m para passar camada impenetrável. Nas profundidades 8,51 m e 15,90 m, as lacunas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio. Topografia de projeto do ensaio SCPTu-06.

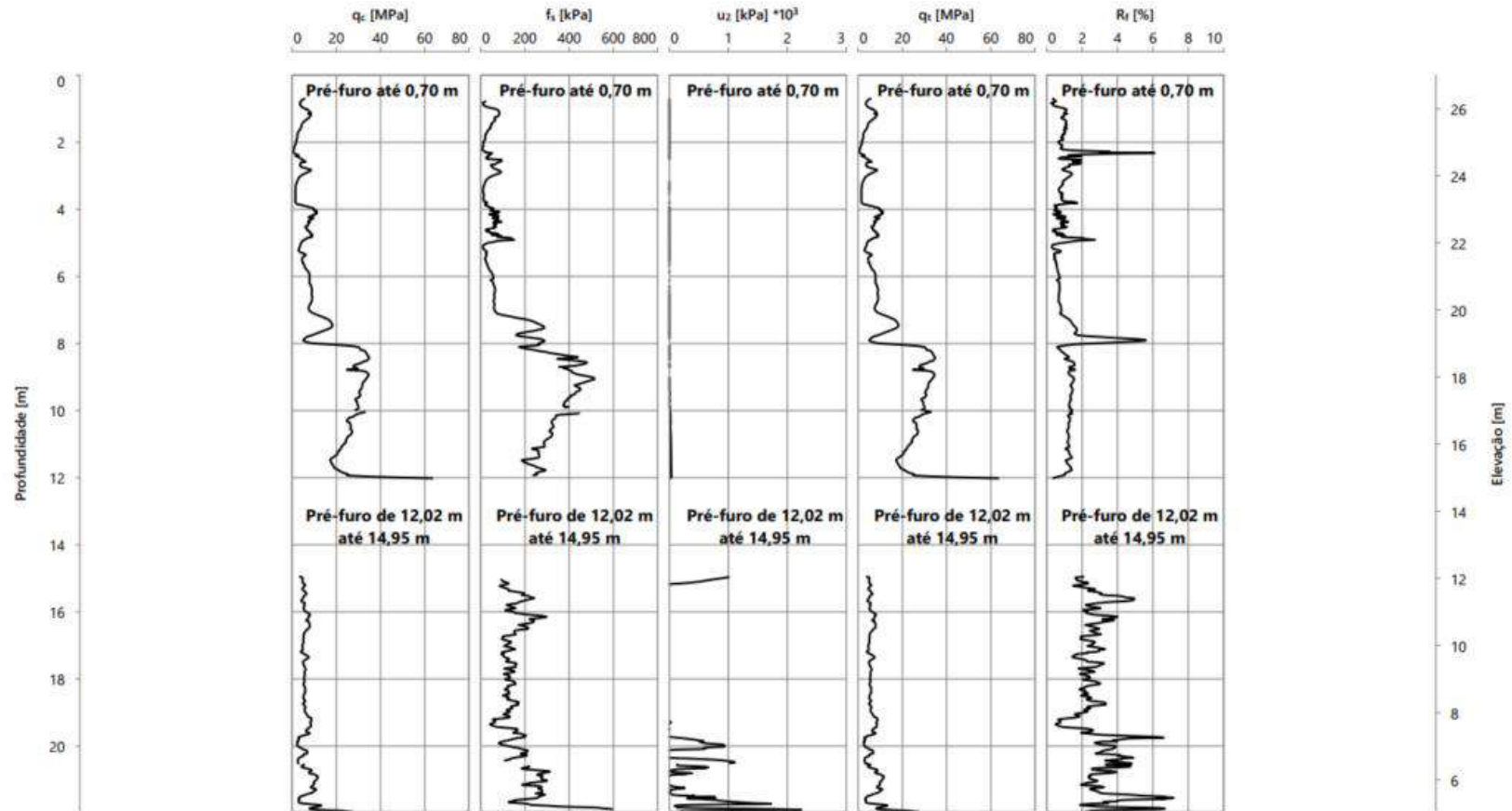
Ensaio: SCPTu-06B
Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar



SCPTu 10- ARB 5



Profundidade : 21,97 m
 Coord. Norte : 9699940,42 m
 Coord. Este : 577950,90 m
 Cota do nível do terreno : 27,00 m
 Operador : Marcelo Boeno
 Processador : Luana

Data : 20/07/2023 - 28/07/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : Córrego Alegre (Alumar)

Nível d'água (N.A.)
 Critério de paralisação
 Observações

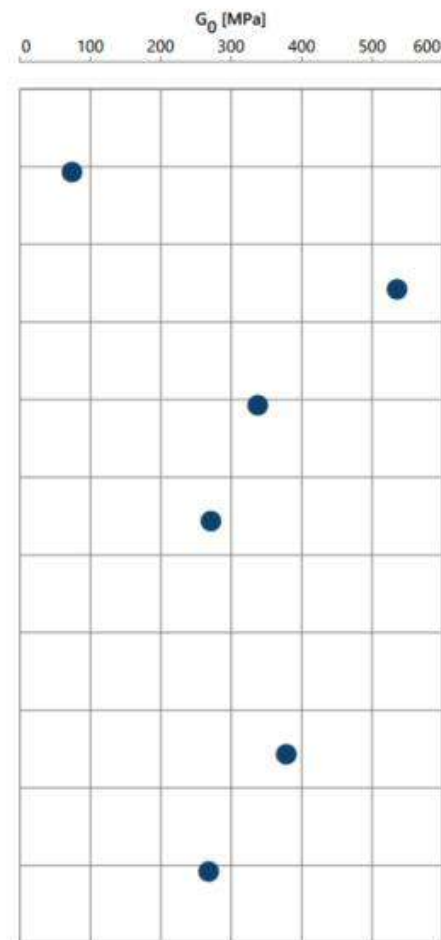
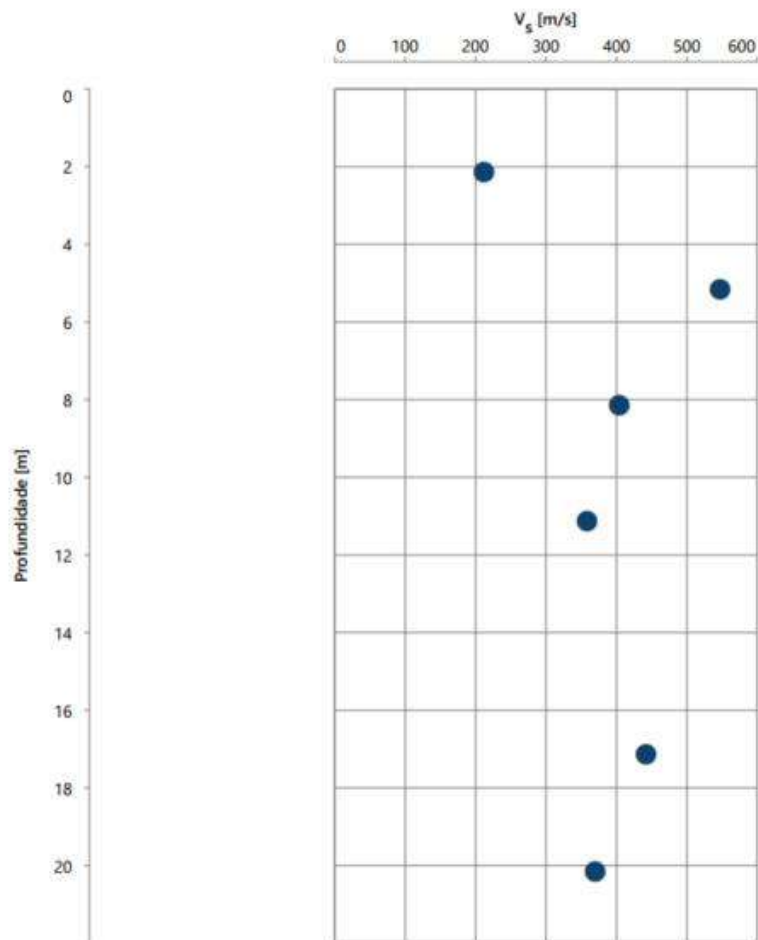
: Não identificado.
 : Paralisado ao atingir camada impenetrável.
 : Pré-furo até 0,70 m e de 12,02 m até 14,95 m. CPT de 0,70 m até 10,00 m. Nas profundidades 10,00 m e 20,52 m, as lacunas de log ocorrem pela mudança de manobra do ensaio.

Ensaio: SCPTu-10
 Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar





Profundidade	: 21,97	m	Data	: 20/07/2023 - 28/07/2023
Coord. Norte	: 9699940,42	m	Nº do cone	: 1701-3254
Coord. Este	: 577950,90	m	Diâmetro	: 43,85 mm
Cota do nível do terreno	: 27,00	m	Área lateral	: 200,00 cm²
Operador	: Marcelo Boeno		Área da base	: 15,10 cm²
Processador	: Luana		Datum	: Córrego Alegre (Alumar)

Nível d'água (N.A.)	: Não identificado.
Critério de paralisação	: Paralisado ao atingir camada impenetrável.
Observações	: Pré-furo até 0,70 m e de 12,02 m até 14,95 m. CPT de 0,70 m até 10,00 m. Nas profundidades 10,00 m e 20,52 m, as lacunas de log ocorrem pela mudança de manobra do ensaio.

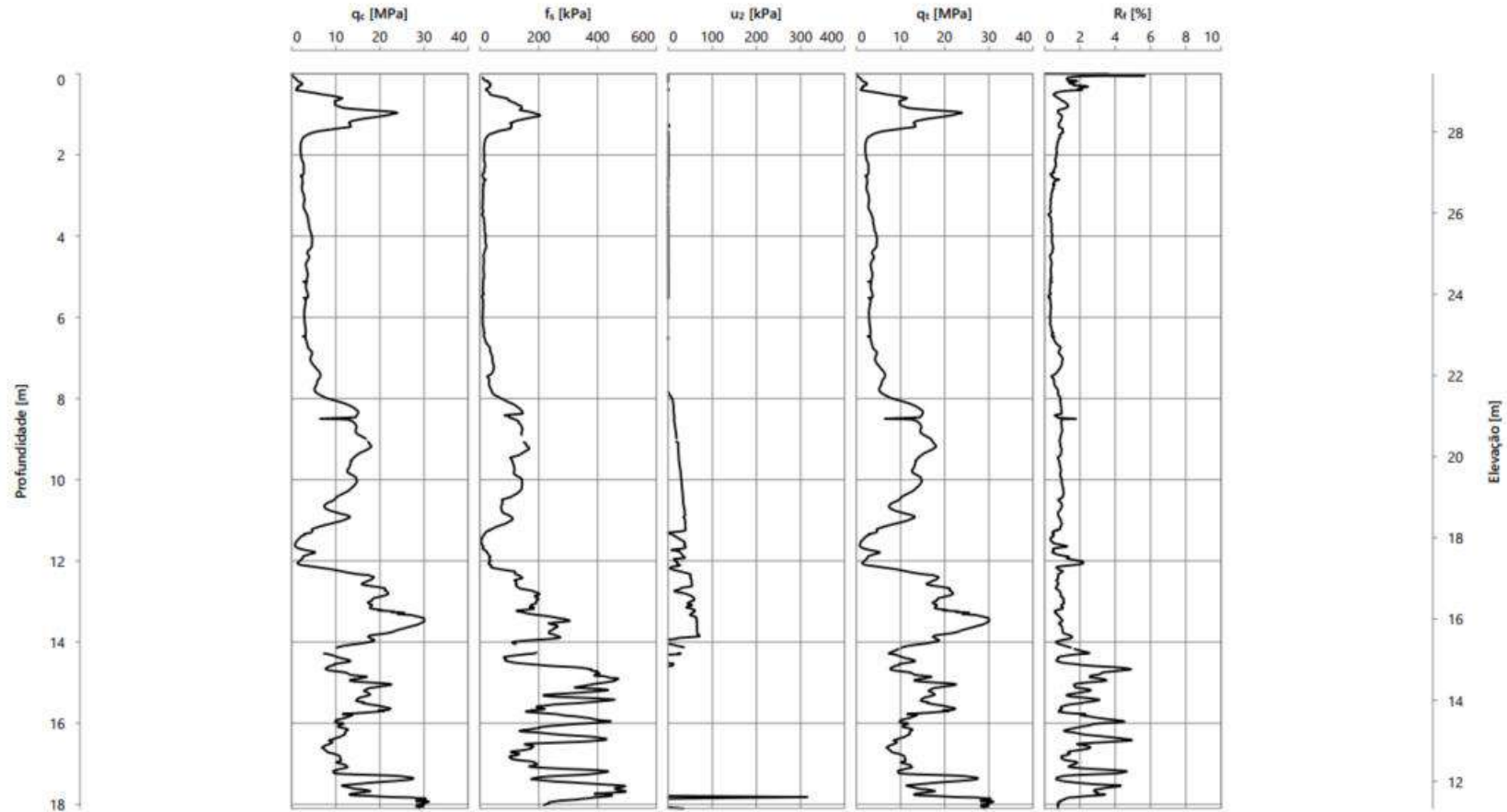
Ensaio: SCPTu-10
Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar



SCPTu 14- ARB 5



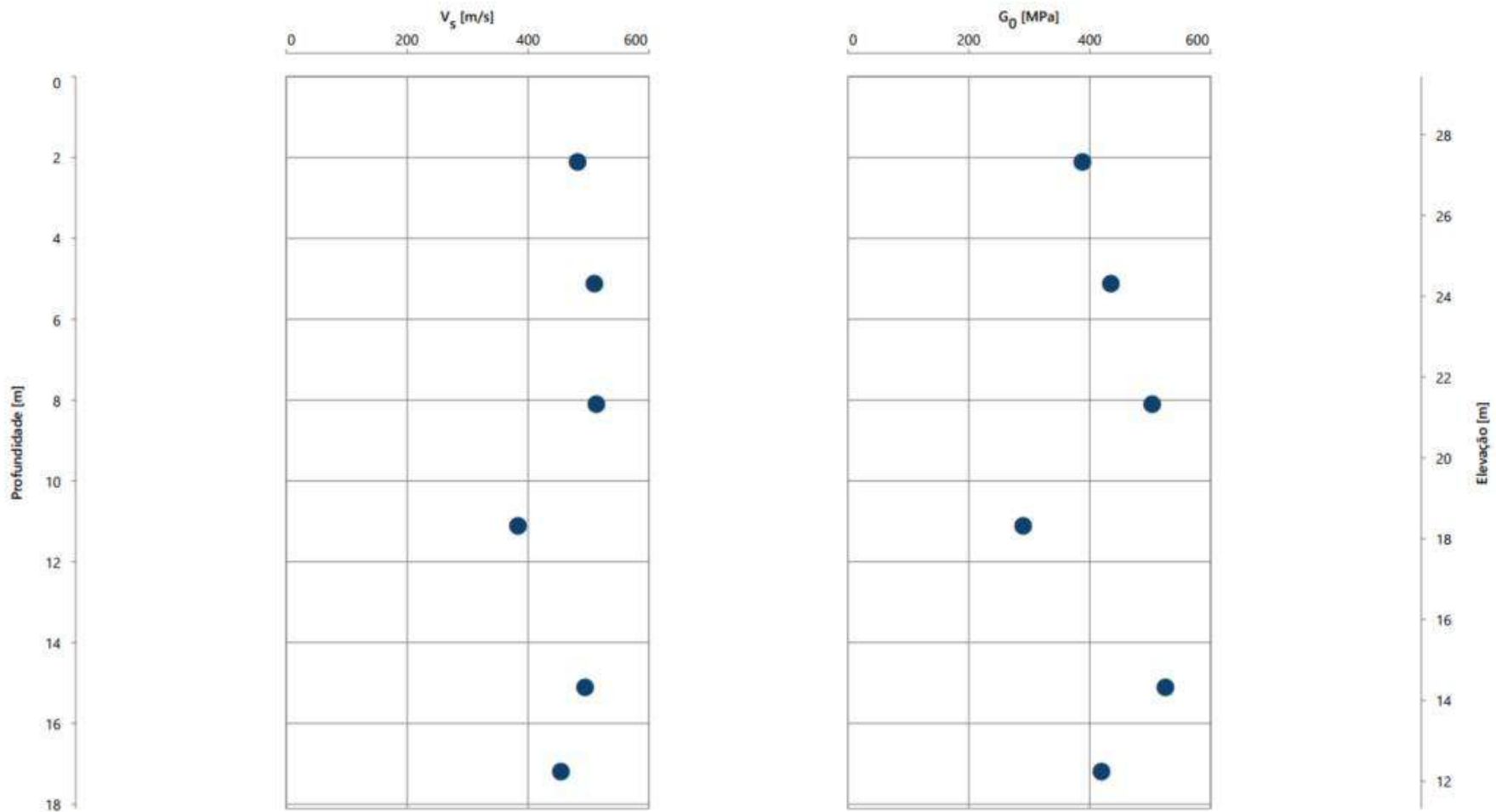
Profundidade	: 18,11	m	Data	: 09/02/2023 - 09/02/2023	Nível d'água (N.A.)	: Não identificado
Coord. Norte	: 9699392,28	m	Nº do cone	: 1701-3254	Critério de paralisação	: Paralisado devido a limite do equipamento.
Coord. Este	: 578034,53	m	Diâmetro	: 43,85	Observações	: CPT até 9,00 m. Nas profundidades 9,00 m e 14,71 m, as falhas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio.
Cota do nível do terreno	: 29,43	m	Área lateral	: 200,00		
Operador	: Maxuel Ribeiro		Área da base	: 15,10		
Processador	: Bruno		Datum	: SIRGAS 2000		

Ensaio: SCPTu-14
Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar





Profundidade	: 18,11	m	Data	: 09/02/2023 - 09/02/2023
Coord. Norte	: 9699392,28	m	Nº do cone	: 1701-3254
Coord. Este	: 578034,53	m	Diâmetro	: 43,85 mm
Cota do nível do terreno	: 29,43	m	Área lateral	: 200,00 cm ²
Operador	: Maxuel Ribeiro		Área da base	: 15,10 cm ²
Processador	: Bruno		Datum	: SIRGAS 2000

Nível d'água (N.A.)	: Não identificado
Critério de paralisação	: Paralisado devido a limite do equipamento.
Observações	: CPT até 9,00 m. Nas profundidades 9,00 m e 14,71 m, as falhas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio.

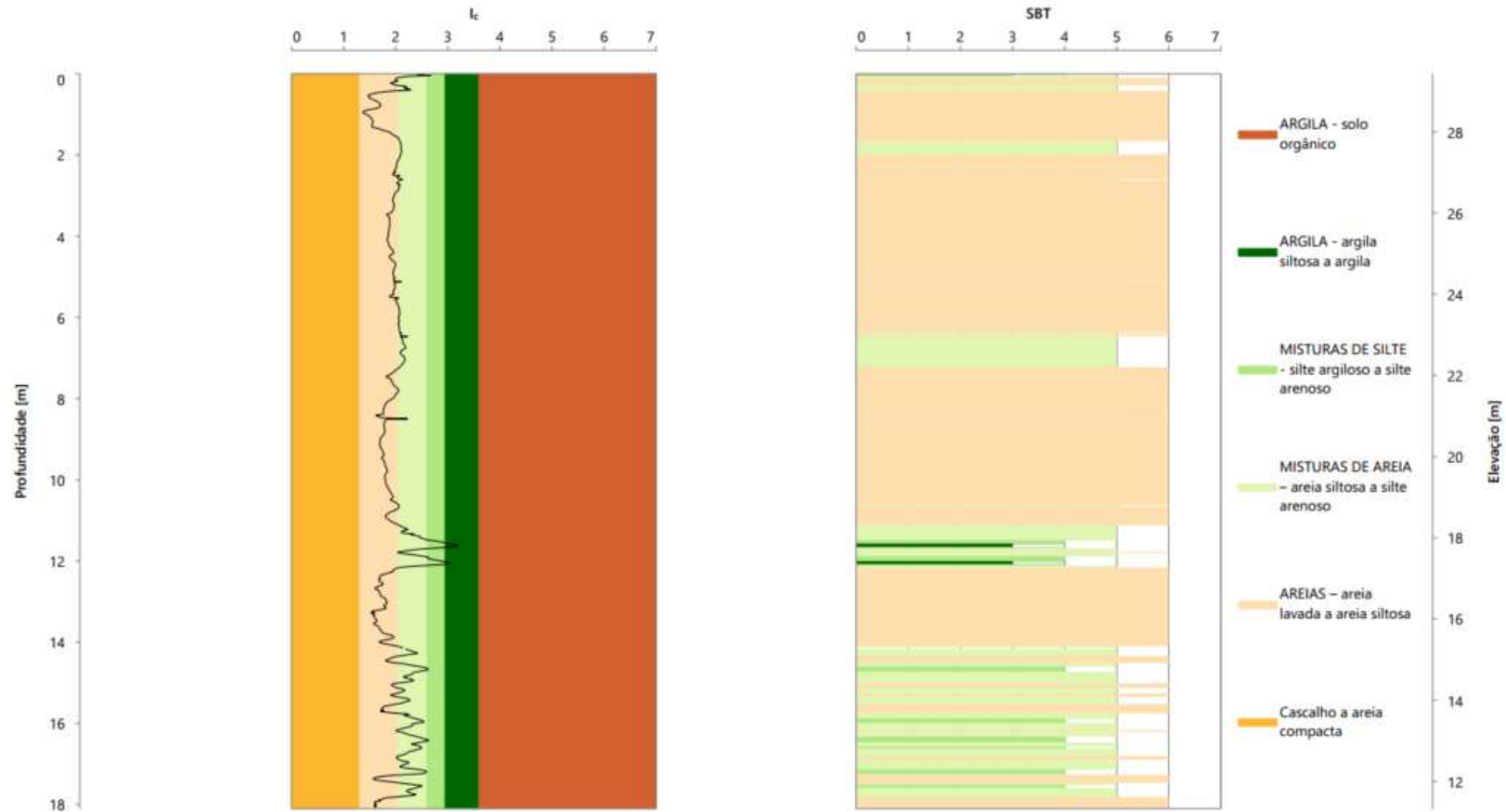
Ensaio: SCPTu-14
Relatório: ALU-07-GRE-02

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar



Classificação P. K. Robertson (2010)



Profundidade : 18,11 m
 Coord. Norte : 9699392,28 m
 Coord. Este : 578034,53 m
 Cota do nível do terreno : 29,43 m
 Operador : Maxuel Ribeiro
 Processador : Bruno

Data : 09/02/2023 - 09/02/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : SIRGAS 2000

Nível d'água (N.A.) : Não identificado
 Critério de paralisação : Paralisado devido a limite do equipamento.
 Observações : CPT até 9,00 m. Nas profundidades 9,00 m e 14,71 m, as falhas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio.

Ensaio: SCPTu-14
 Relatório: ALU-07-GRE-02

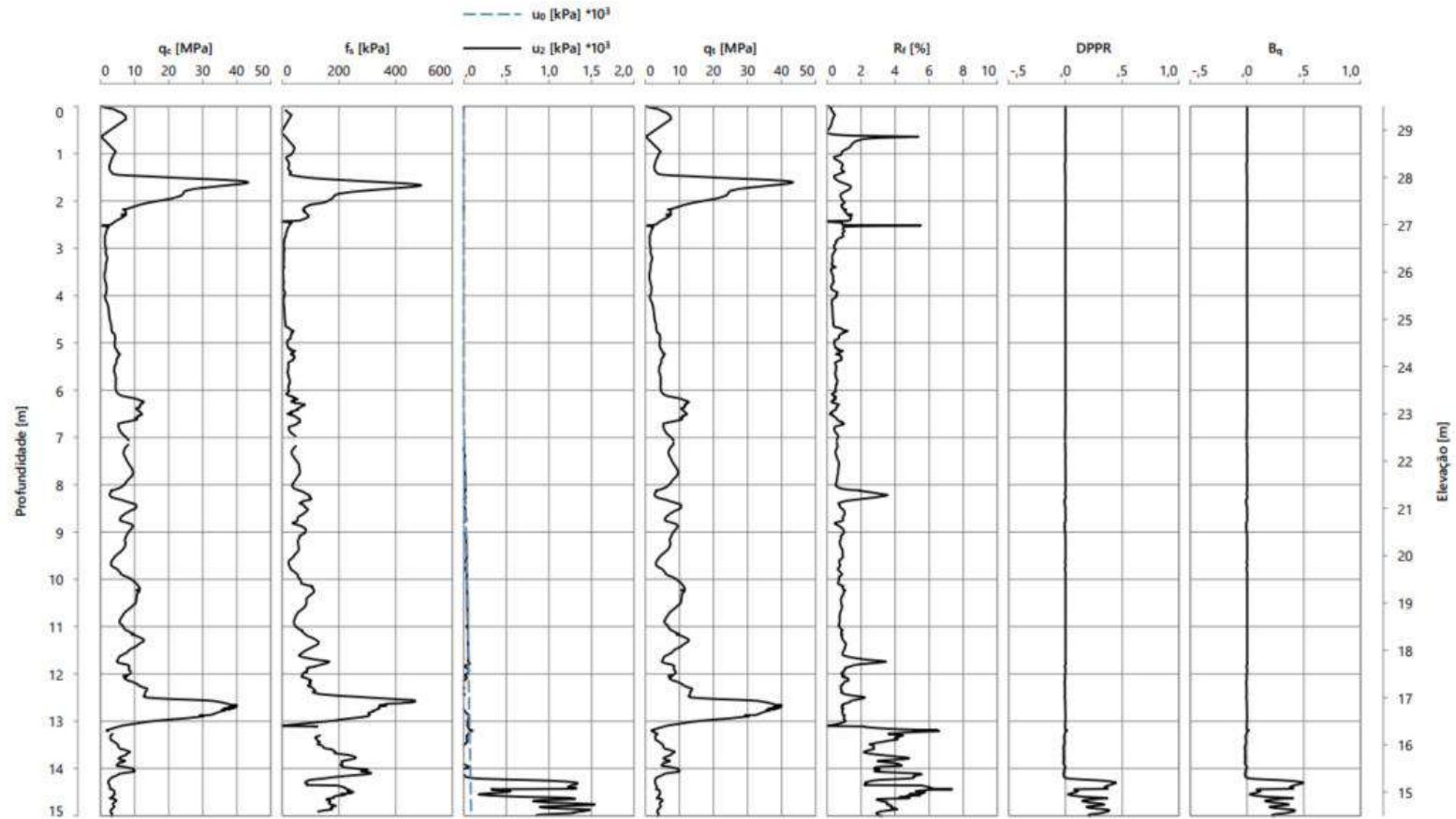
Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 5
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar



SCPTu's da ARB 6

SCPTu 02- ARB 6



Profundidade : 15,00 m
 Coord. Norte : 9698787,60 m
 Coord. Este : 577828,33 m
 Cota do nível do terreno : 29,50 m
 Operador : Marcelo Boeno
 Processador : Luana

Data : 22/06/2023 - 23/06/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : Córrego Alegre (Alumar)

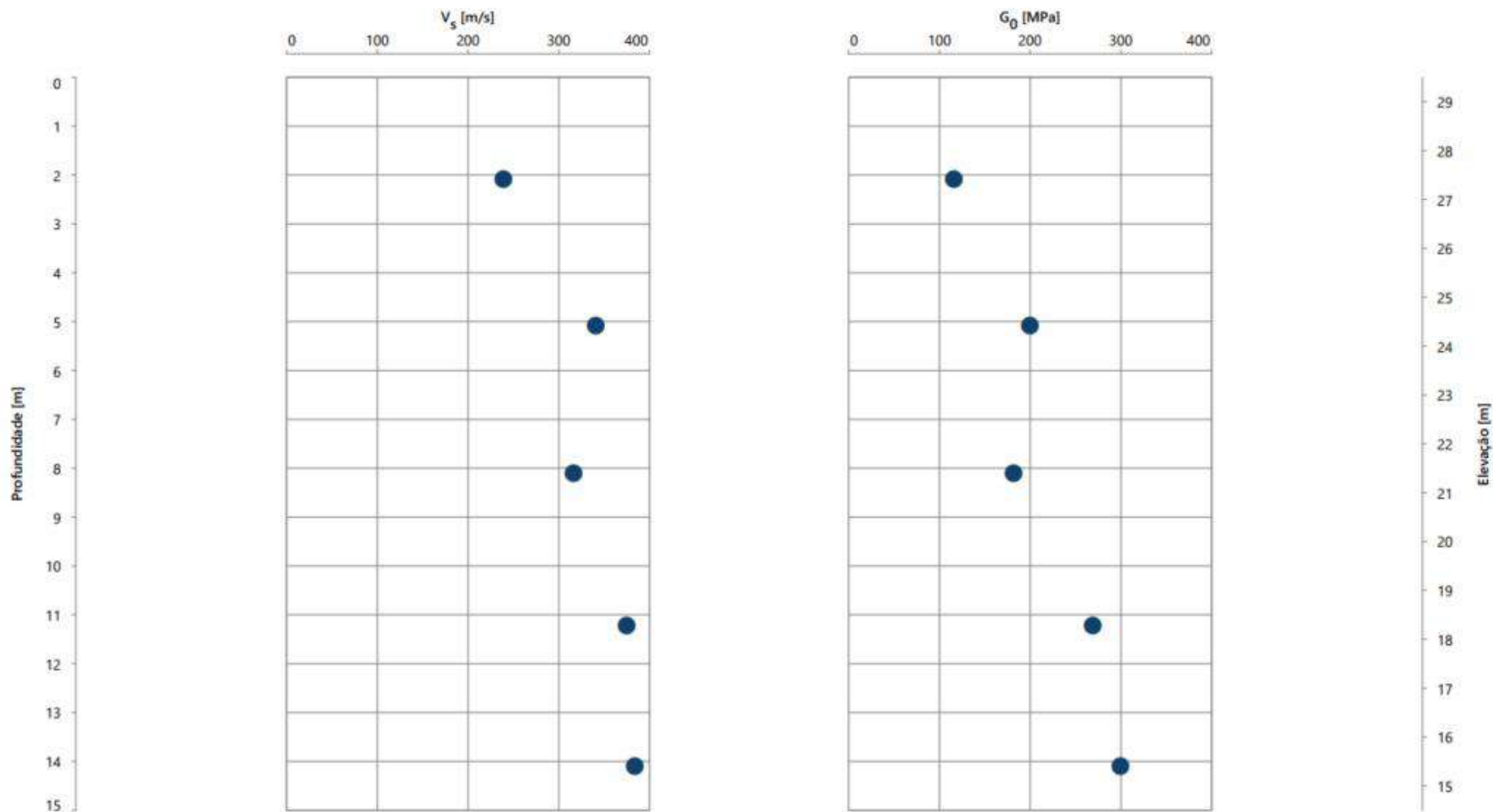
Nível d'água (N.A.) : 6,35 m.
 Critério de paralisação : Paralisado ao atingir profundidade determinada pela E.T. (SLU-F-142110-001, revisão 0C).
 Observações : CPT até 7,06 m. Nas profundidades 7,06 m e 13,22 m, as lacunas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio.

Ensaio: SCPTu-02
 Relatório: ALU-07-GRE-04

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 6
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar





Profundidade : 15,00 m
 Coord. Norte : 9698787,60 m
 Coord. Este : 577828,33 m
 Cota do nível do terreno : 29,50 m
 Operador : Marcelo Boeno
 Processador : Luana

Data : 22/06/2023 - 23/06/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : Córrego Alegre (Alumar)

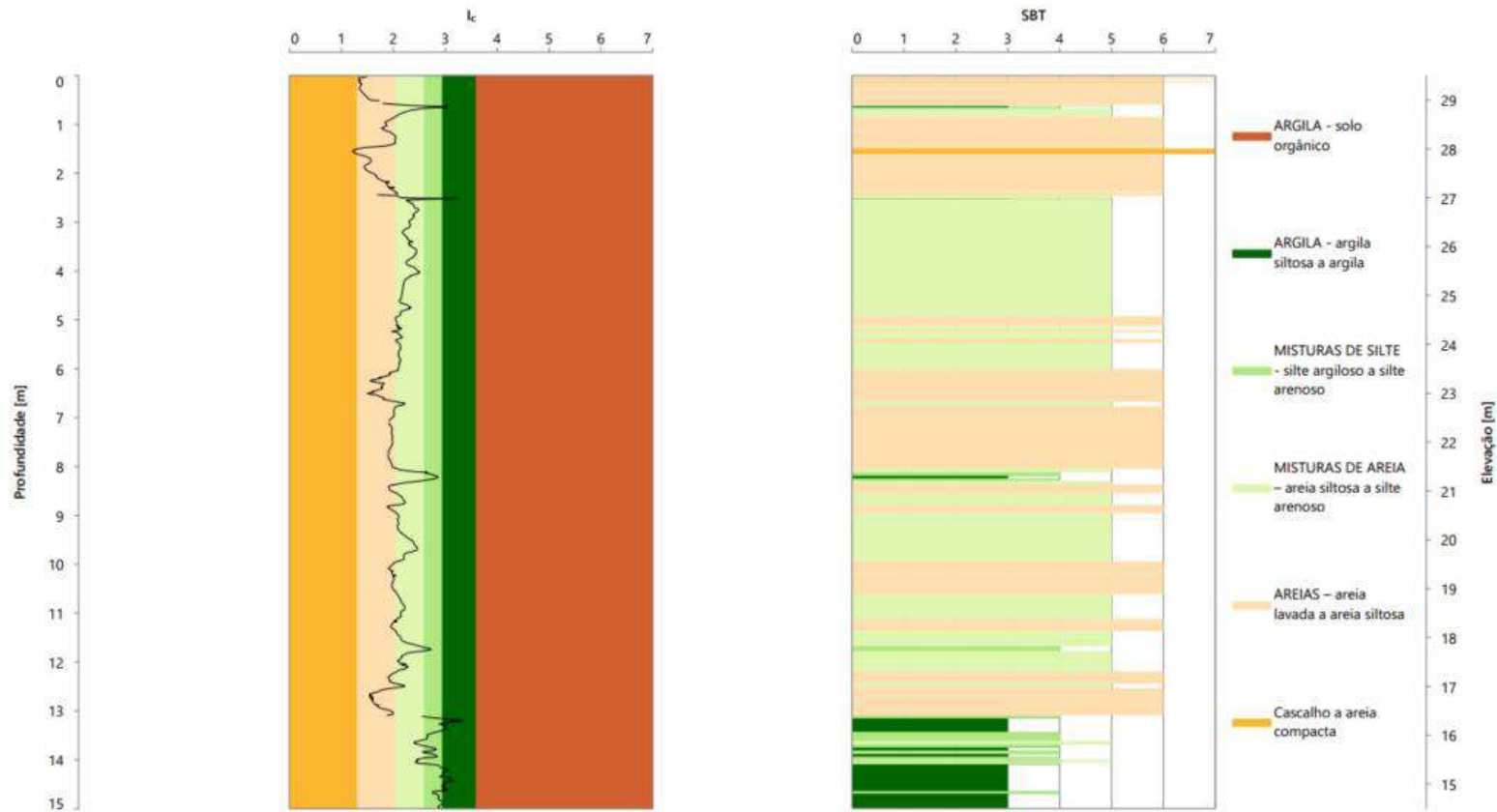
Nível d'água (N.A.) : 6,35 m
 Critério de paralisação : Paralisado ao atingir profundidade determinada pela E.T. (SLU-F-142110-001, revisão 0C).
 Observações : CPT até 7,06 m. Nas profundidades 7,06 m e 13,22 m, as lacunas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio.

Ensaio: SCPTu-02
 Relatório: ALU-07-GRE-04

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 6
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar





Profundidade	: 15,00	m	Data	: 22/06/2023 - 23/06/2023
Coord. Norte	: 9698787,60	m	Nº do cone	: 1701-3254
Coord. Este	: 577828,33	m	Diâmetro	: 43,85 mm
Cota do nível do terreno	: 29,50	m	Área lateral	: 200,00 cm ²
Operador	: Marcelo Boeno		Área da base	: 15,10 cm ²
Processador	: Luana		Datum	: Córrego Alegre (Alumar)

Nível d'água (N.A.)	: 6,35 m.
Critério de paralisação	: Paralisado ao atingir profundidade determinada pela E.T. (SLU-F-142110-001, revisão 0C).
Observações	: CPT até 7,06 m. Nas profundidades 7,06 m e 13,22 m, as lacunas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio.

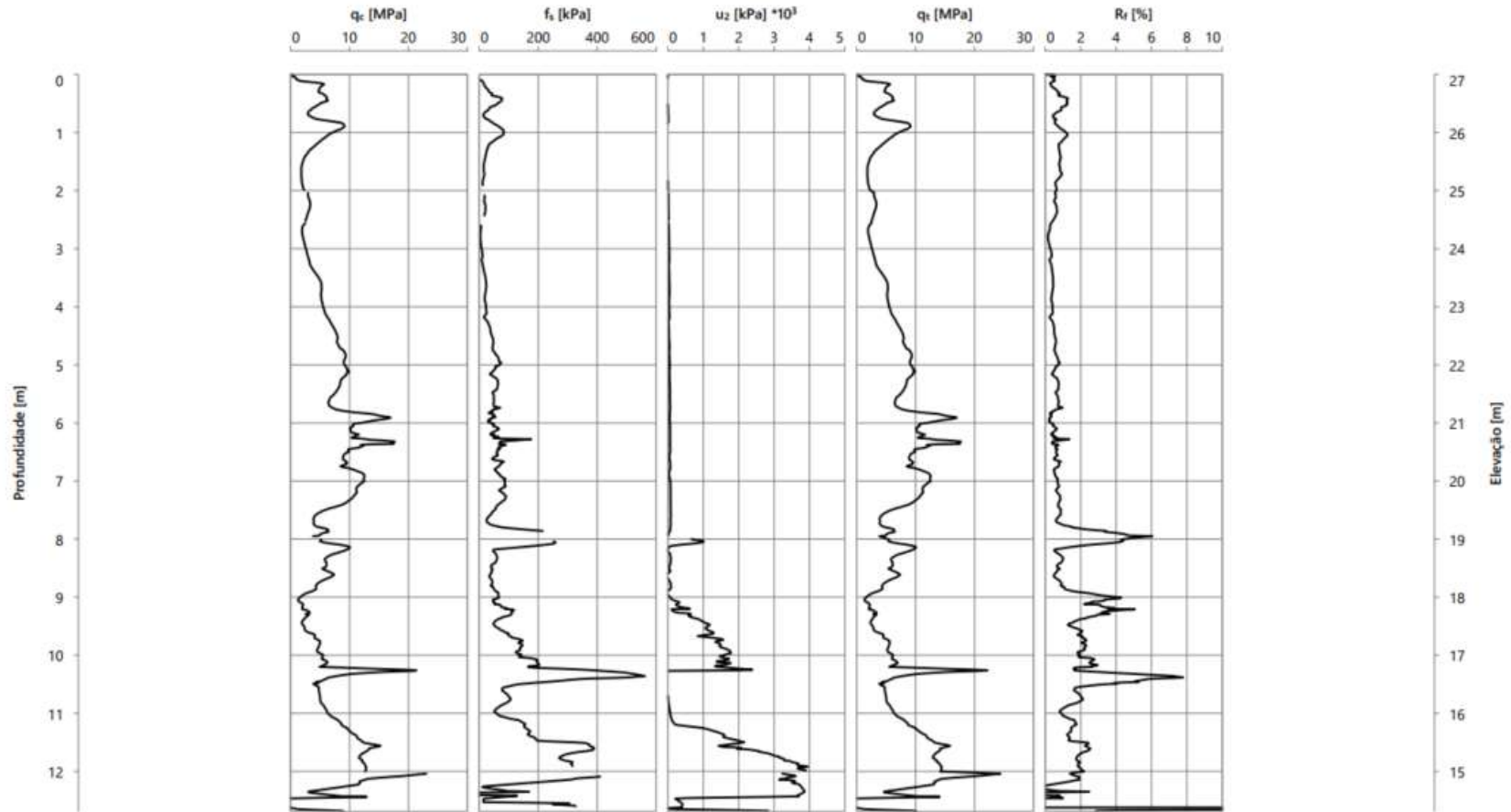
Ensaio: SCPTu-02
Relatório: ALU-07-GRE-04

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 6
Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
Contratante: Alumar



SCPTu 05- ARB 6



Profundidade : 12,71 m
 Coord. Norte : 9698305,32 m
 Coord. Este : 577820,91 m
 Cota do nível do terreno : 27,00 m
 Operador : Marcelo Boeno
 Processador : Luana

Data : 19/06/2023 - 21/06/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : Córrego Alegre (Alumar)

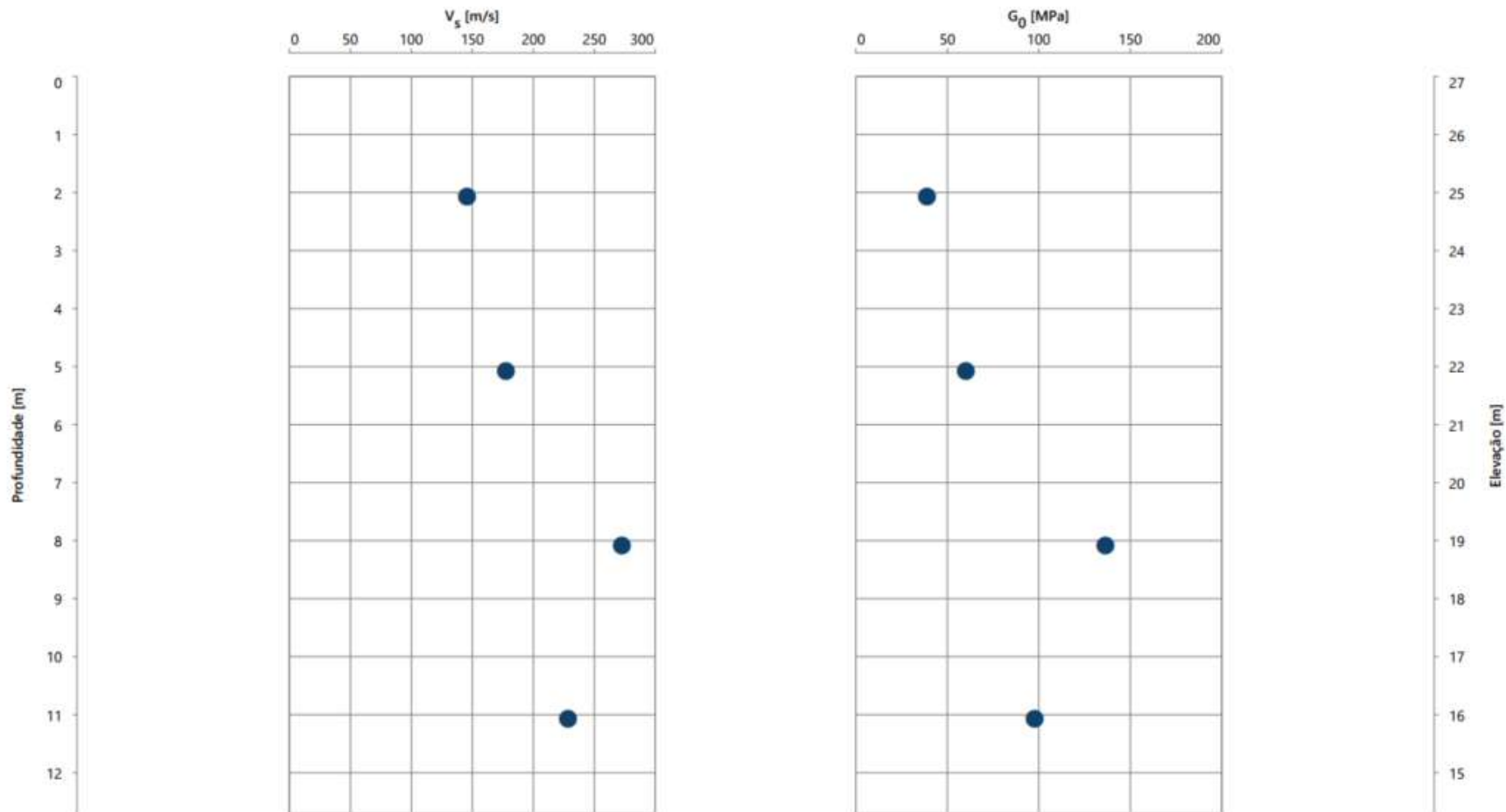
Nível d'água (N.A.) : Não identificado.
 Critério de paralisação : Paralisado ao atingir obstáculo.
 Observações : CPT até 2,00 m. Nas profundidades 2,00 m, 2,52 m, 7,96 e 12,00 m, as lacunas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio. Furo deslocado e profundidade final alterada conforme orientação da projetista.

Ensaio: SCPTu-05
 Relatório: ALU-07-GRE-04

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 6
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar





Profundidade : 12,71 m
 Coord. Norte : 9698305,32 m
 Coord. Este : 577820,91 m
 Cota do nível do terreno : 27,00 m
 Operador : Marcelo Boeno
 Processador : Luana

Data : 19/06/2023 - 21/06/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : Córrego Alegre (Alumar)

Nível d'água (N.A.) : Não identificado.
 Critério de paralisação : Paralisado ao atingir obstáculo.
 Observações : CPT até 2,00 m. Nas profundidades 2,00 m, 2,52 m, 7,96 e 12,00 m, as lacunas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio. Furo deslocado e profundidade final alterada conforme orientação da projetista.

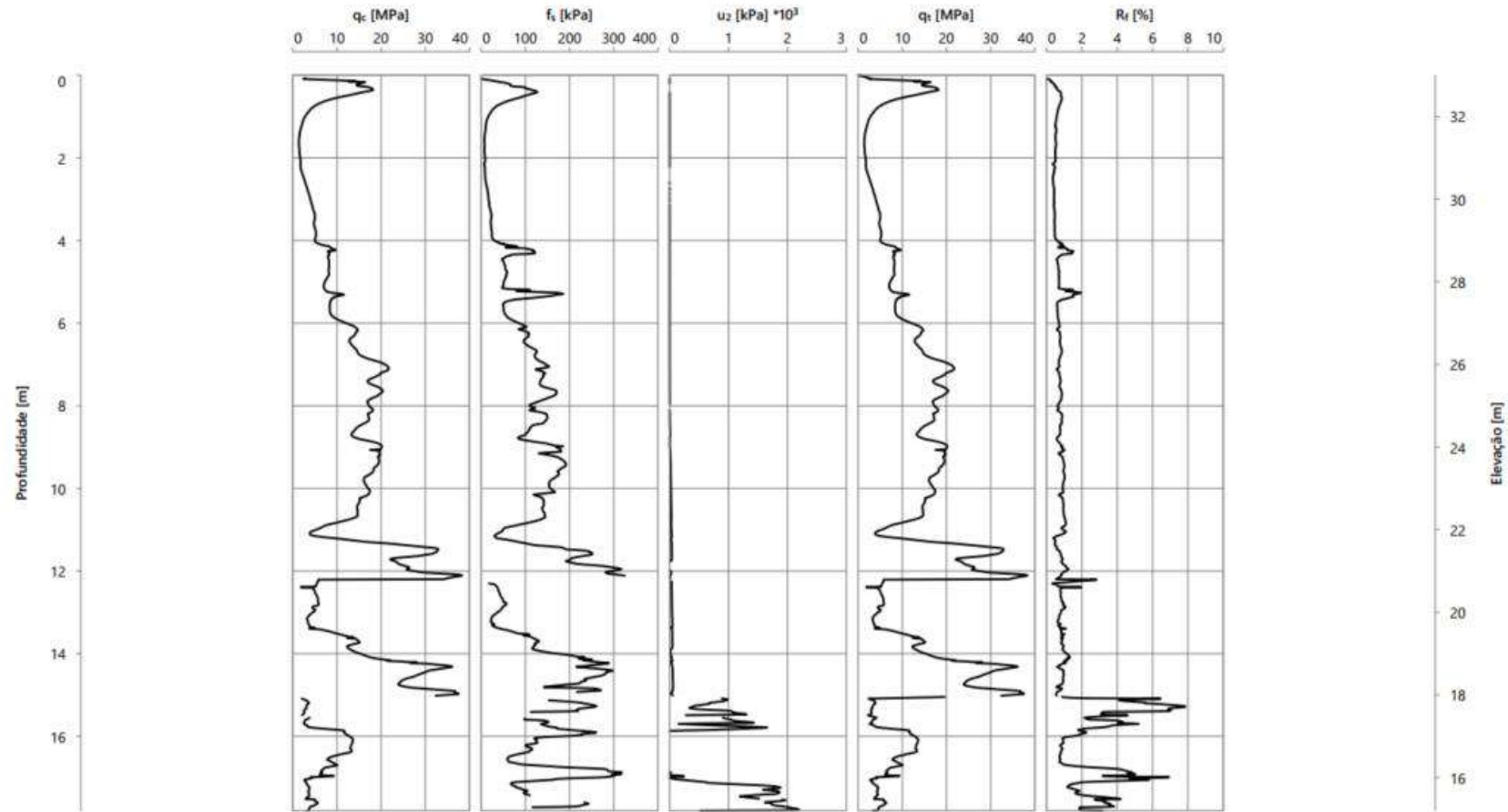
Ensaio: SCPTu-05
 Relatório: ALU-07-GRE-04

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 6
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar



SCPTu 07- ARB 6



Profundidade : 17,81 m
 Coord. Norte : 9696435,80 m
 Coord. Este : 577228,95 m
 Cota do nível do terreno : 33,00 m
 Operador : Jonathan
 Processador : Luana

Data : 09/05/2023 - 23/05/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : Córrego Alegre (Alumar)

Nível d'água (N.A.)
 Critério de paralisação
 Observações

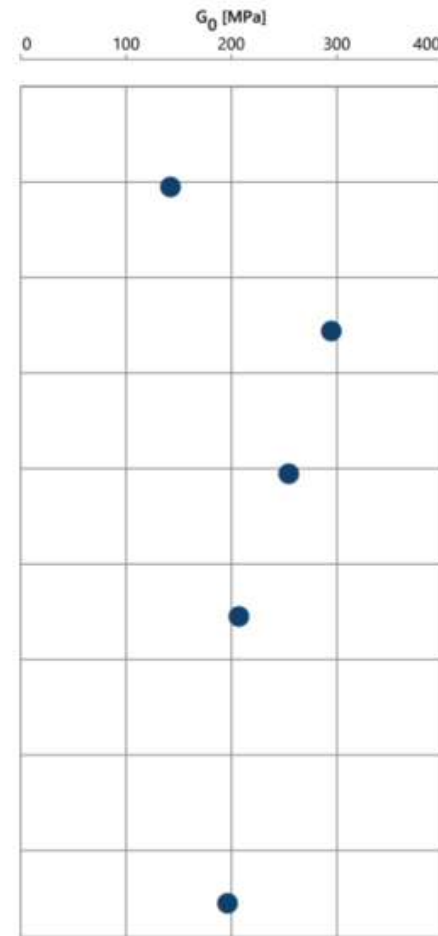
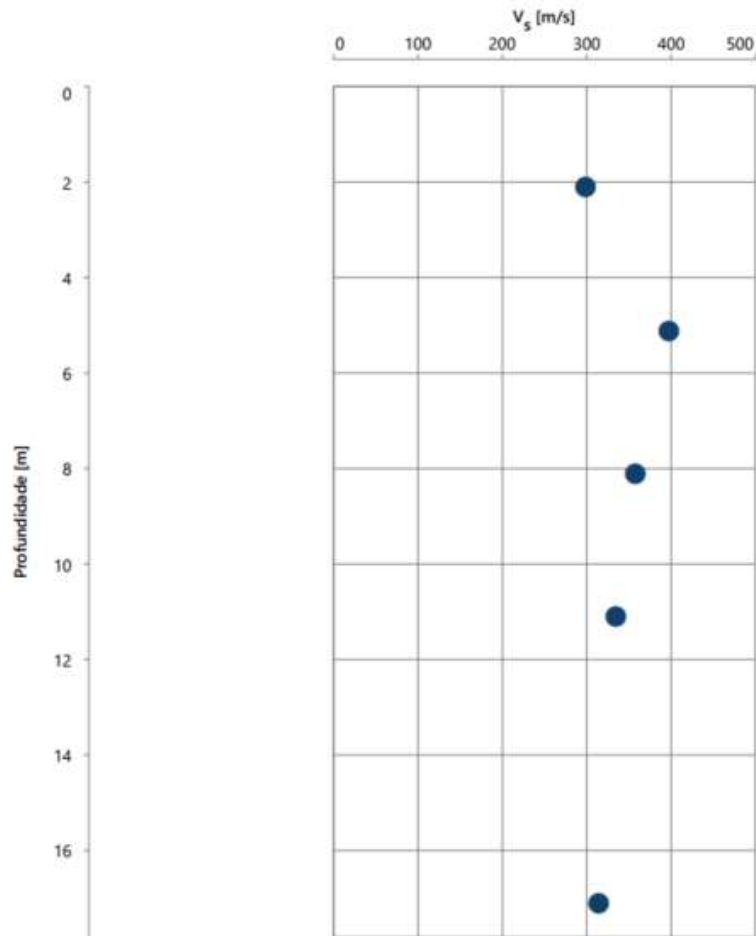
: Não identificado.
 : Paralisado ao atingir profundidade determinada pela E.T. (SLU-F-142110-001, revisão 0C).
 : CPT até 12,20 m. Nas profundidades 12,20 m, 15,05 m, 15,50 m e 17,52 m, as lacunas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio.

Ensaio: SCPTu-07
 Relatório: ALU-07-GRE-04

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 6
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar





Profundidade : 17,81 m
 Coord. Norte : 9698435,80 m
 Coord. Este : 577228,95 m
 Cota do nível do terreno : 33,00 m
 Operador : Jonathan
 Processador : Luana

Data : 09/05/2023 - 23/05/2023
 Nº do cone : 1701-3254
 Diâmetro : 43,85 mm
 Área lateral : 200,00 cm²
 Área da base : 15,10 cm²
 Datum : Córrego Alegre (Alumar)

Nível d'água (N.A.) : Não identificado.
 Critério de paralisação : Paralisado ao atingir profundidade determinada pela E.T. (SLU-F-142110-001, revisão 0C).
 Observações : CPT até 12,20 m. Nas profundidades 12,20 m, 15,05 m, 15,50 m e 17,52 m, as lacunas no log ocorrem pelas mudanças de manobra do ensaio.

Ensaio: SCPTu-07
 Relatório: ALU-07-GRE-04

Projeto: Área de Resíduo de Bauxita - ARB 6
 Local: São Luís - MA

Resp. Técnico: Luiz Carlos Grzybowski
 Contratante: Alumar



SCPTu's da ARB 9

SCPTu 01- ARB 9



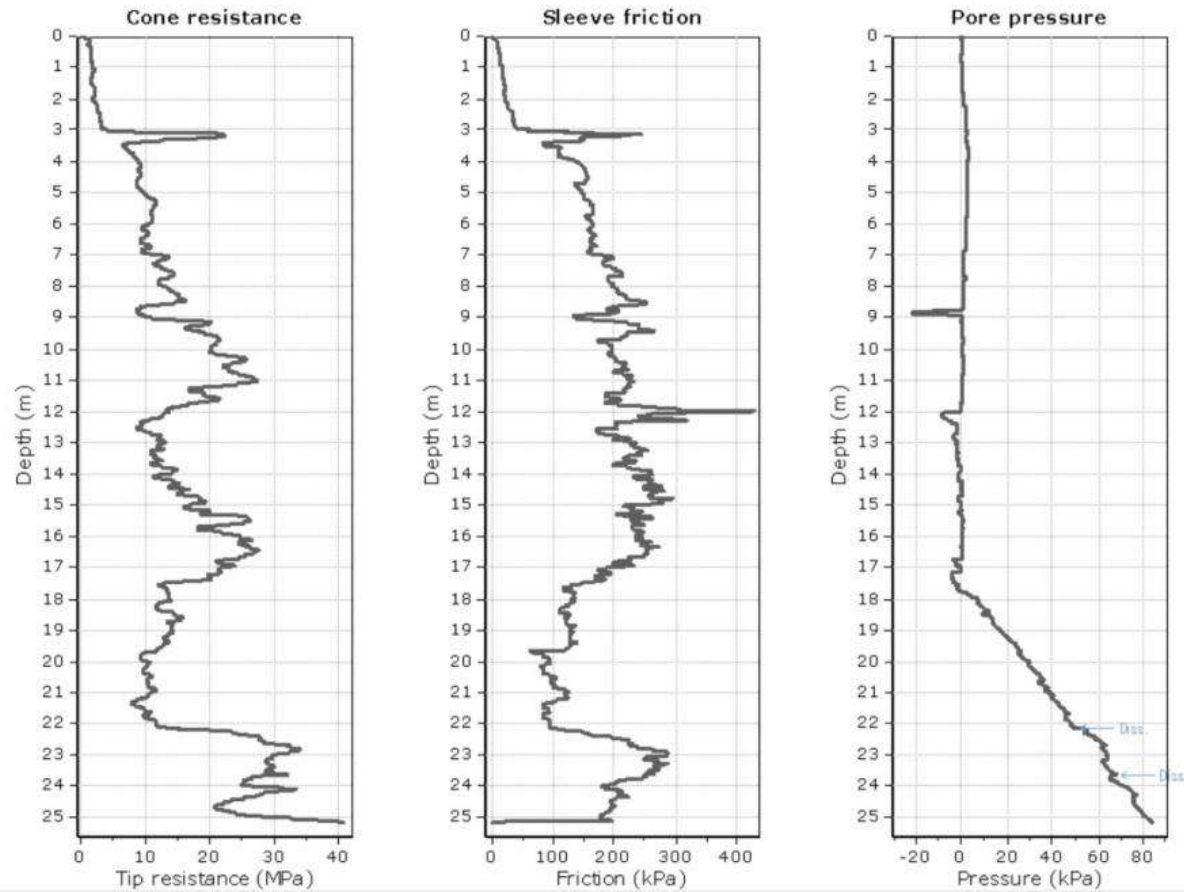
Damasco Penna
Engenharia Geotécnica
São Paulo, Brazil
<http://www.damascopenna.com.br/>

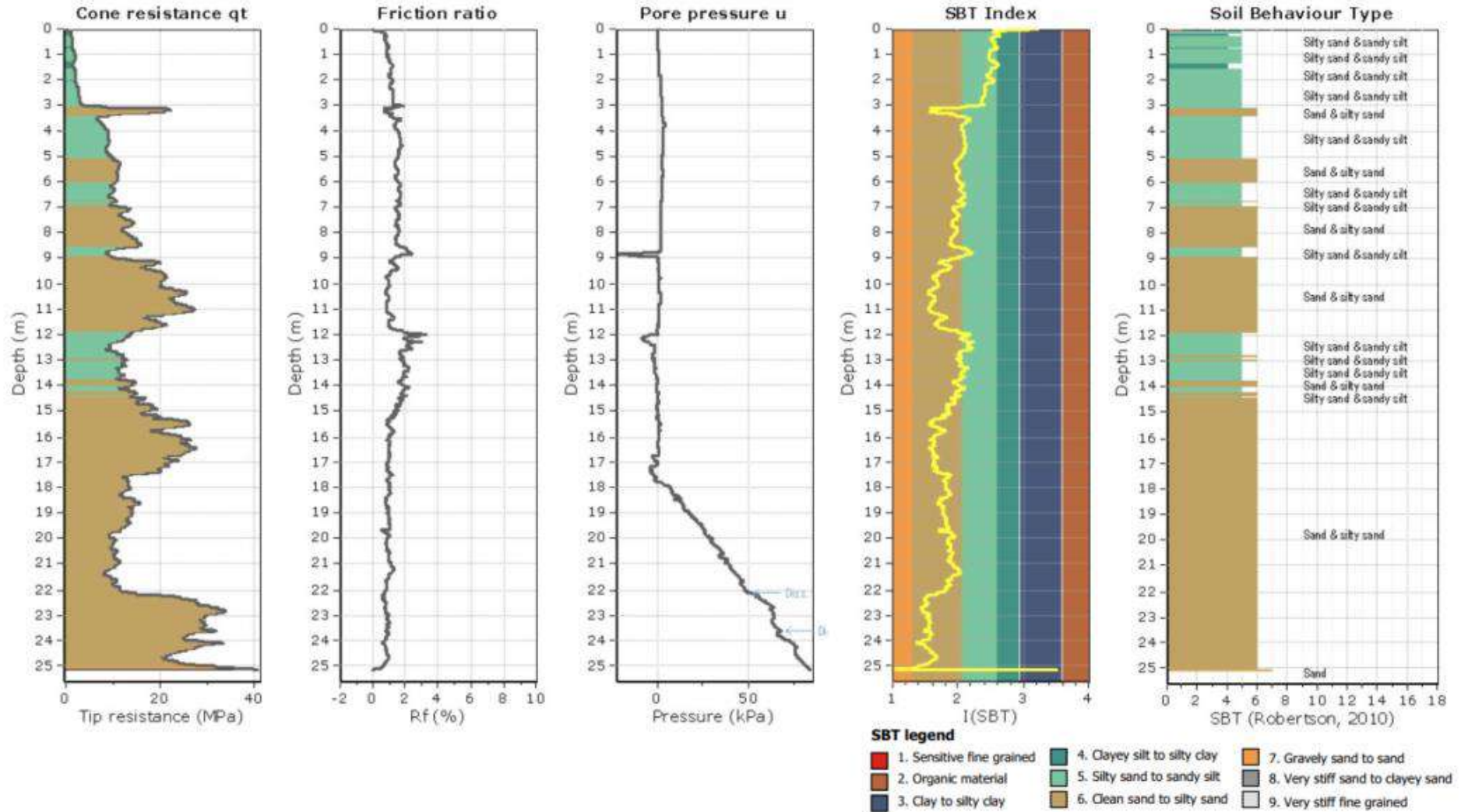
CPT: SCPTU-01A

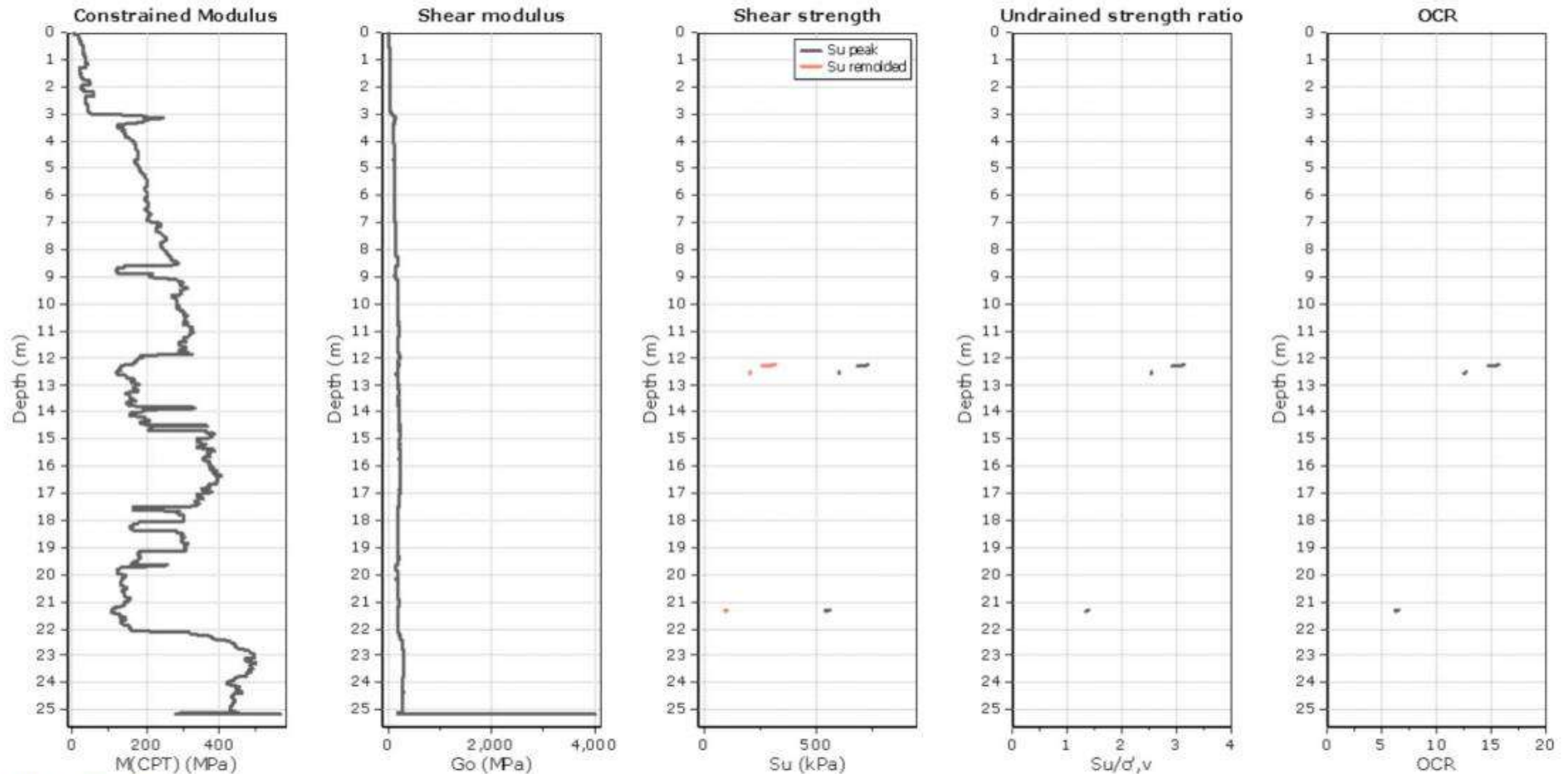
Total depth: 25.17 m, Date: 11/08/2020
Surface Elevation: 44.46 m
Coords: X:578891.41, Y:9700216.90
Cone Type: Geomil
Cone Operator: Antônio Daniel

Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: PORTO ALUMAR - Estreito dos Coqueiros /MA







Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable alpha using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

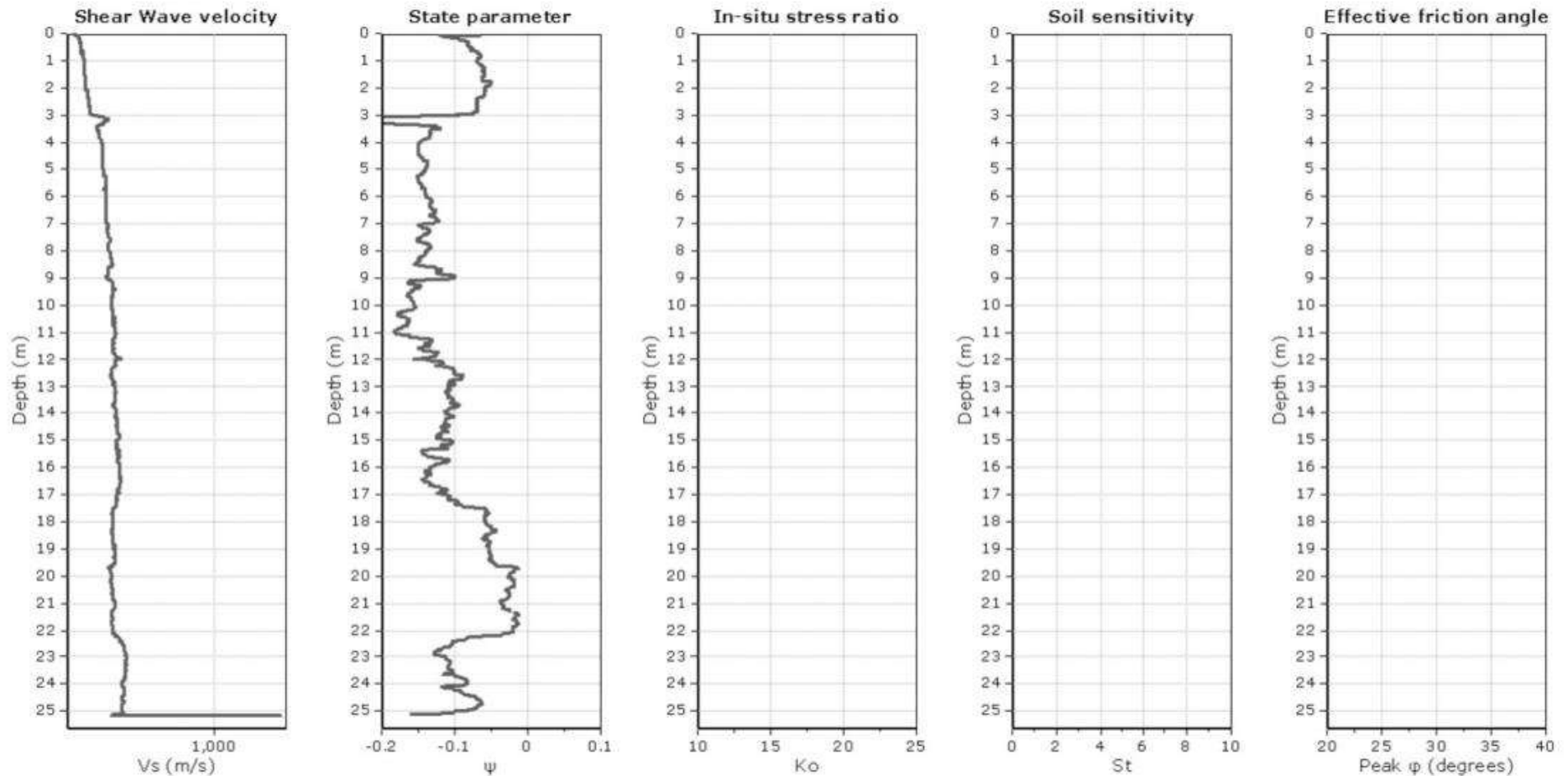
Go: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for days, N_{kt} : 14

OCR factor for days, N_{kt} : 0.33

● User defined estimation data

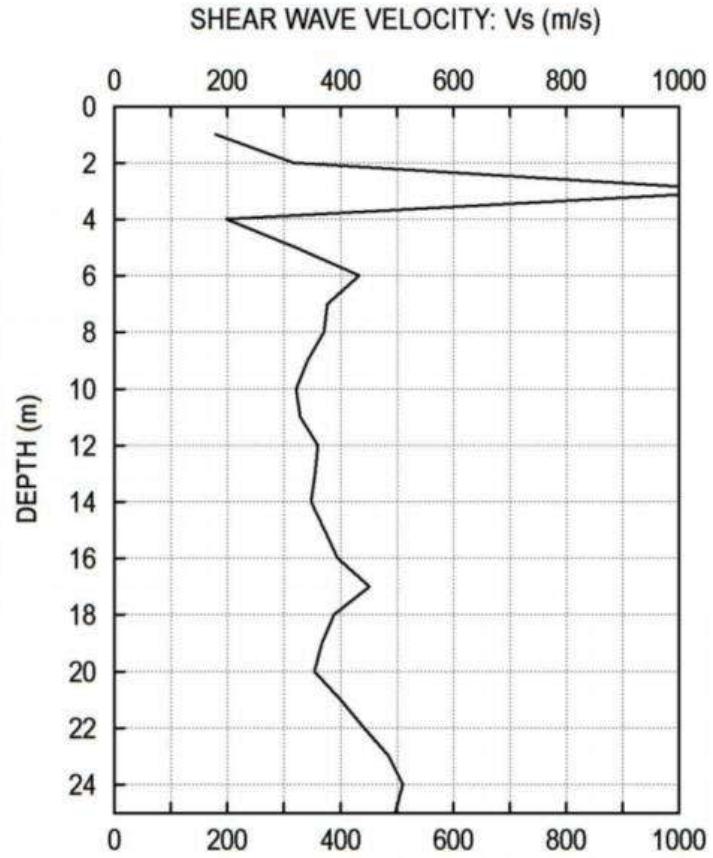
● Flat Dilatometer Test data



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 350.00

● — User defined estimation data



SCPTu 05- ARB 9



Damasco Penna
Engenharia Geotécnica
São Paulo, Brazil
<http://www.damascopenna.com.br/>

CPT: SCPTU-05

Total depth: 25.05 m, Date: 27/08/2020

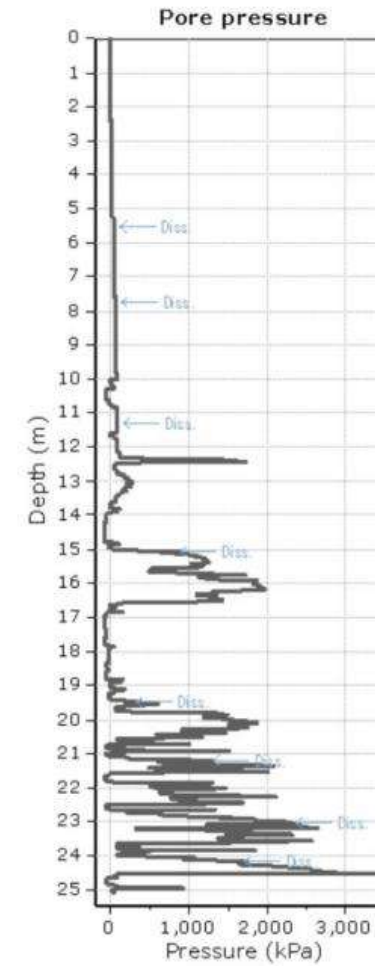
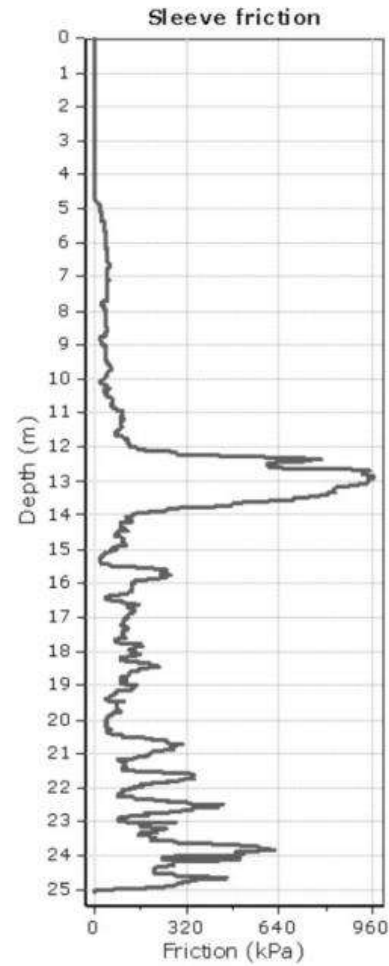
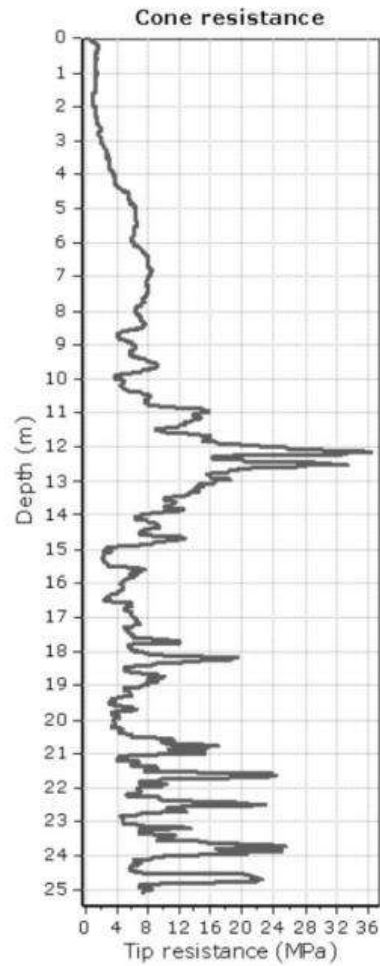
Surface Elevation: 27.20 m

Coords: X:579517.91, Y:9699667.76

Cone Type: Geomil

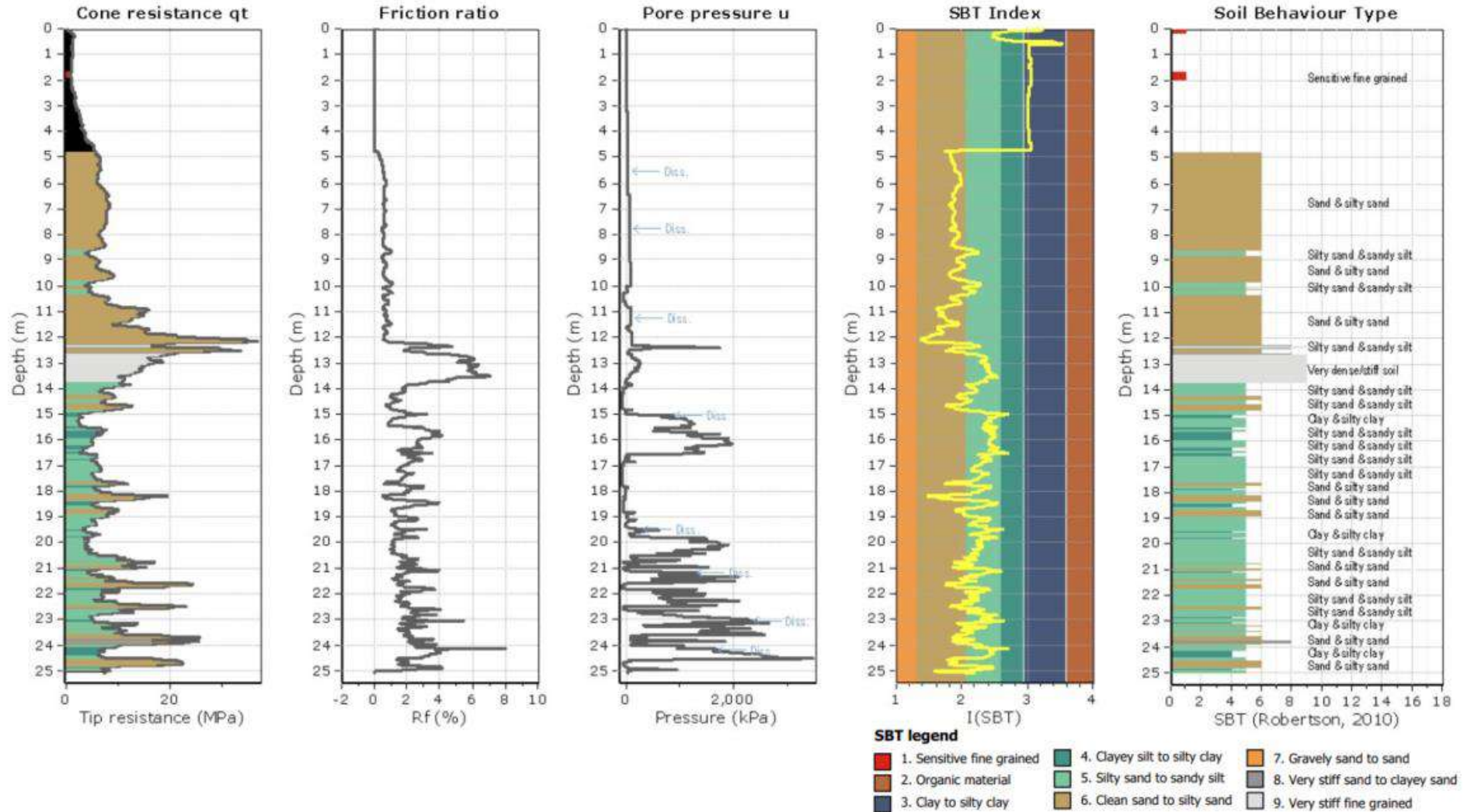
Cone Operator: Antônio Daniel

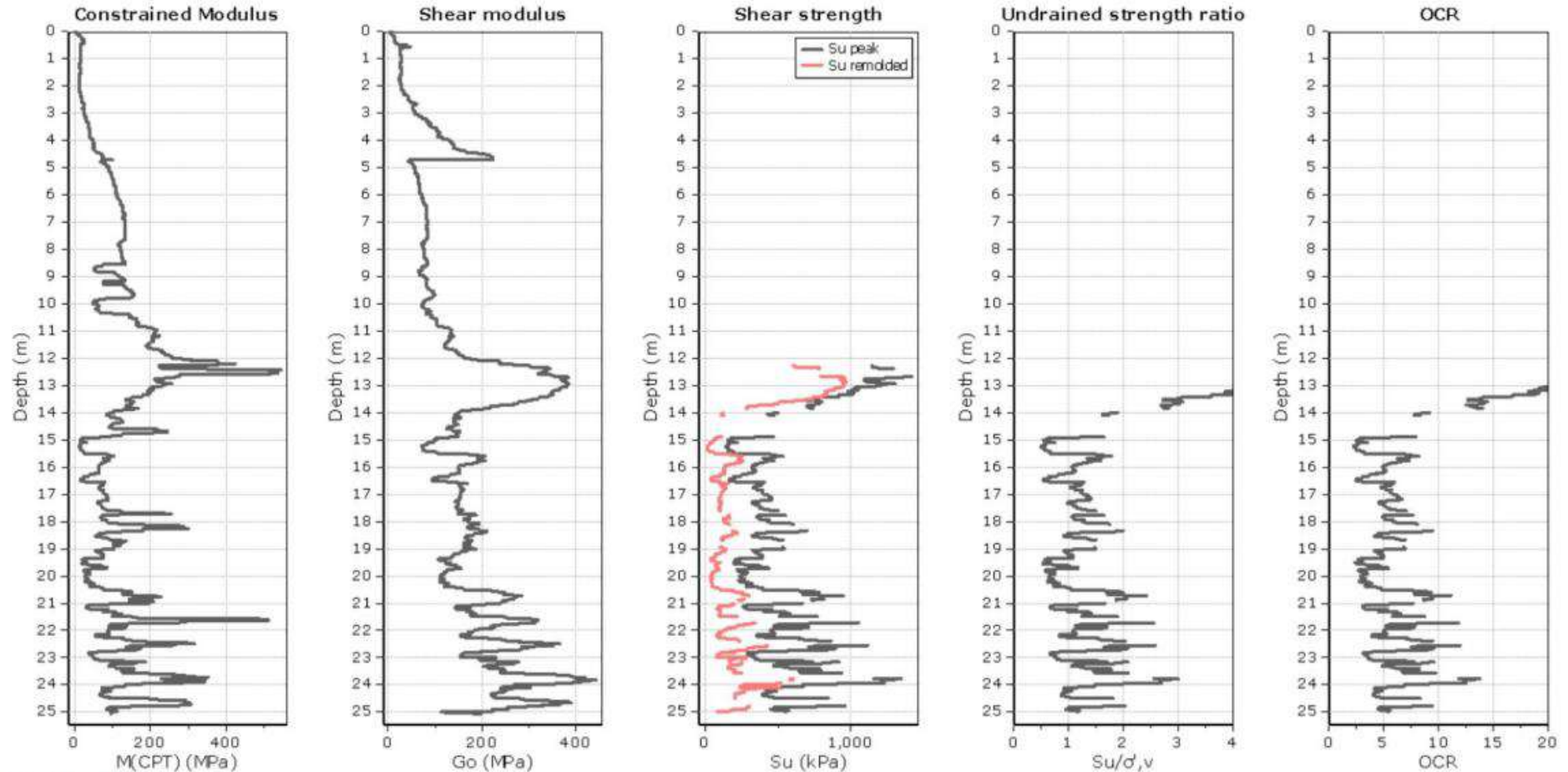
Project: CRISTAL ENGENHARIA
Location: PORTO ALUMAR - Estreito dos Coqueiros / MA



Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: PORTO ALUMAR - Estreito dos Coqueiros /MA





Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable alpha using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

Go: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for days, N_{kt} : 14

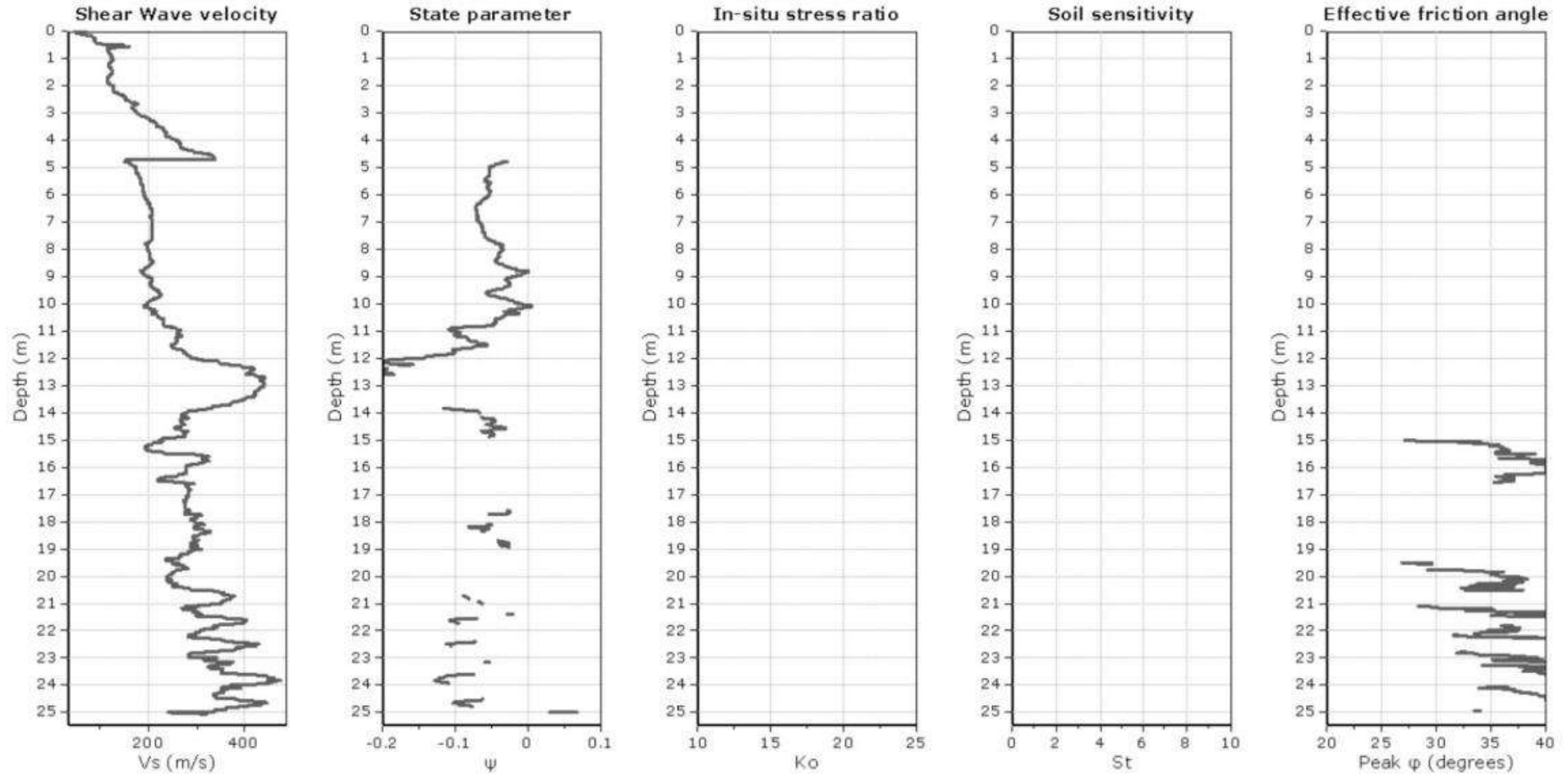
OCR factor for days, N_{kt} : 0.33

● User defined estimation data

● Flat Dilatometer Test data

Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: PORTO ALUMAR - Estreito dos Coqueiros /MA



Calculation parameters

Sol Sensivity factor, N_s : 350.00

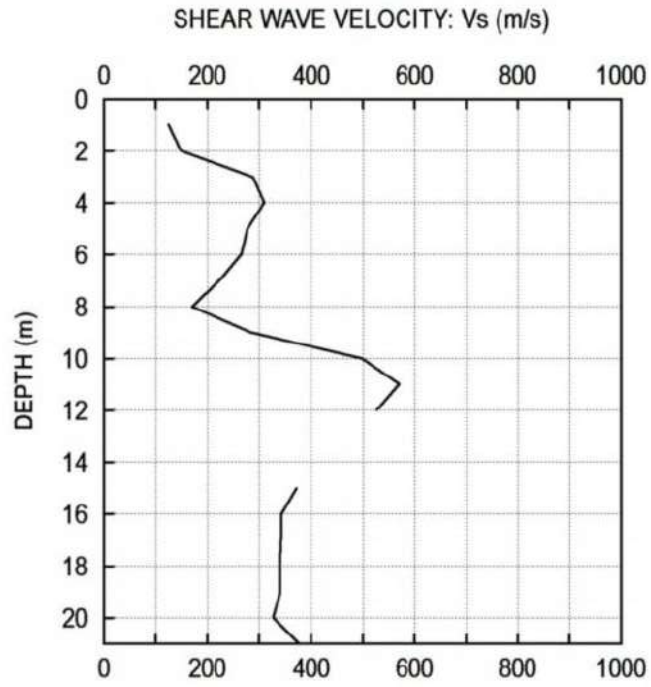
● — User defined estimation data

DAMASCO PENNA
ALUMAR-MA

CRISTAL
SÃO LUIS

TEST
SCPTU-05

29 AGO 2020



SCPTu 07- ARB 9

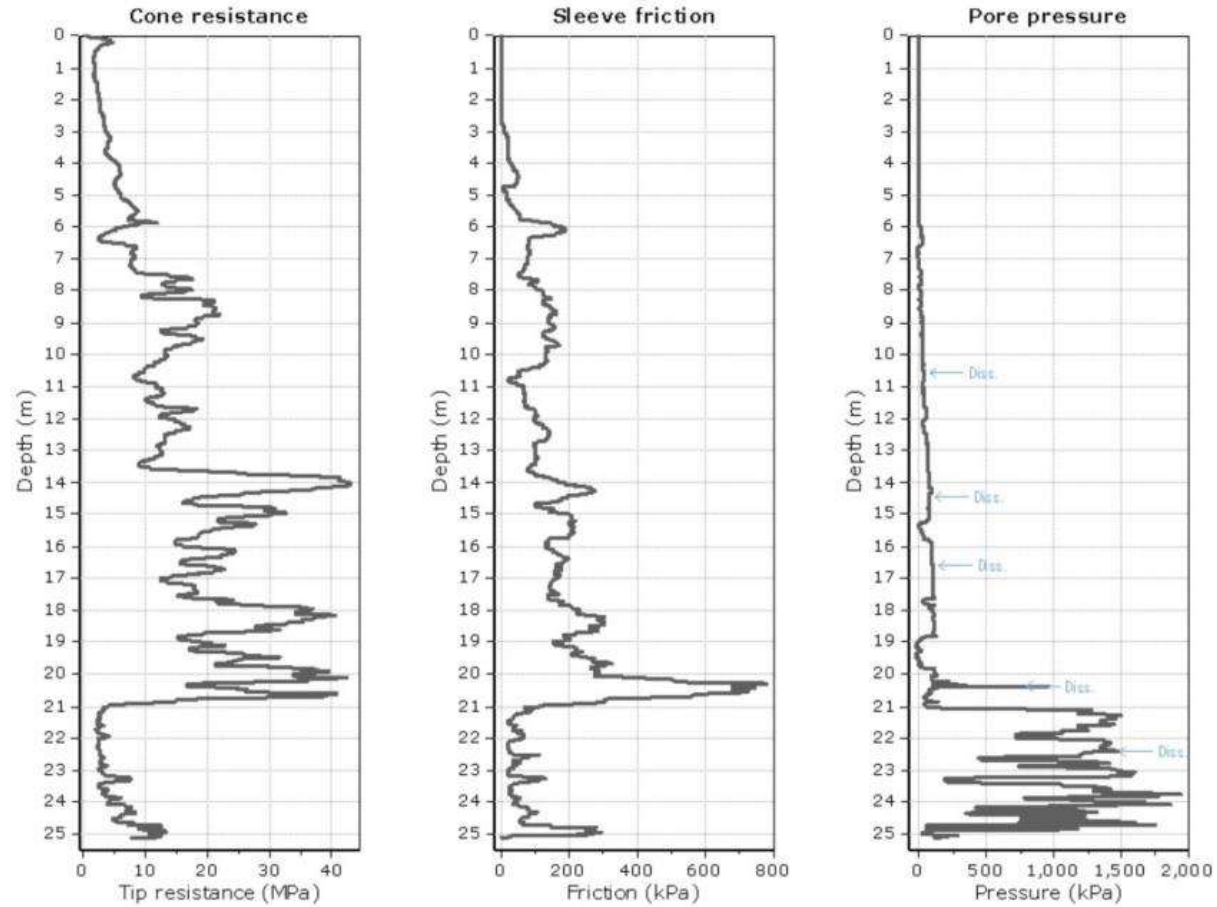


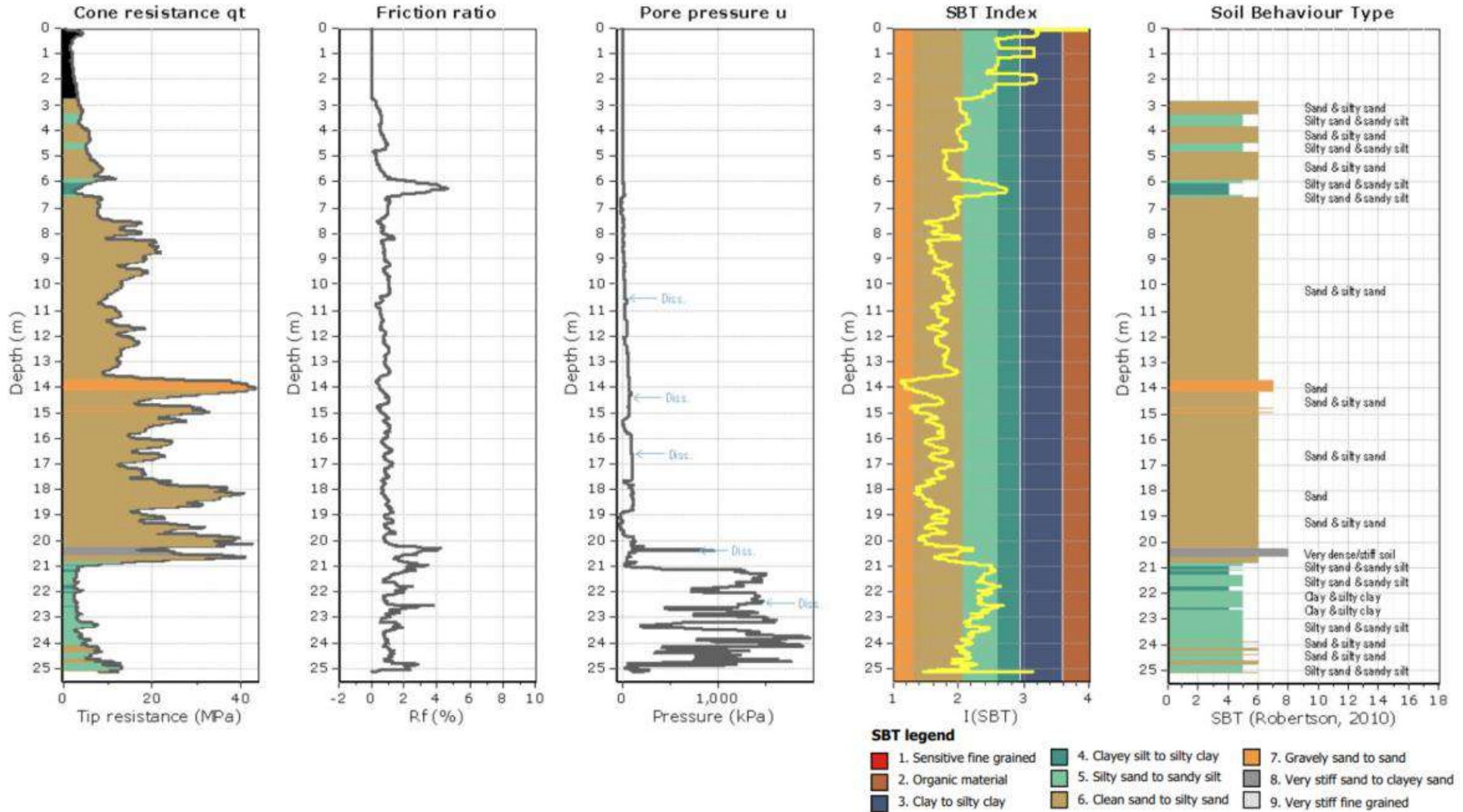
Damasco Penna
Engenharia Geotécnica
São Paulo, Brazil
<http://www.damascopenna.com.br/>

CPT: SCPTU-07

Total depth: 25.13 m, Date: 20/08/2020
Surface Elevation: 30.44 m
Coords: X:579354.39, Y:9699204.93
Cone Type: Geomil
Cone Operator: Antônio Daniel

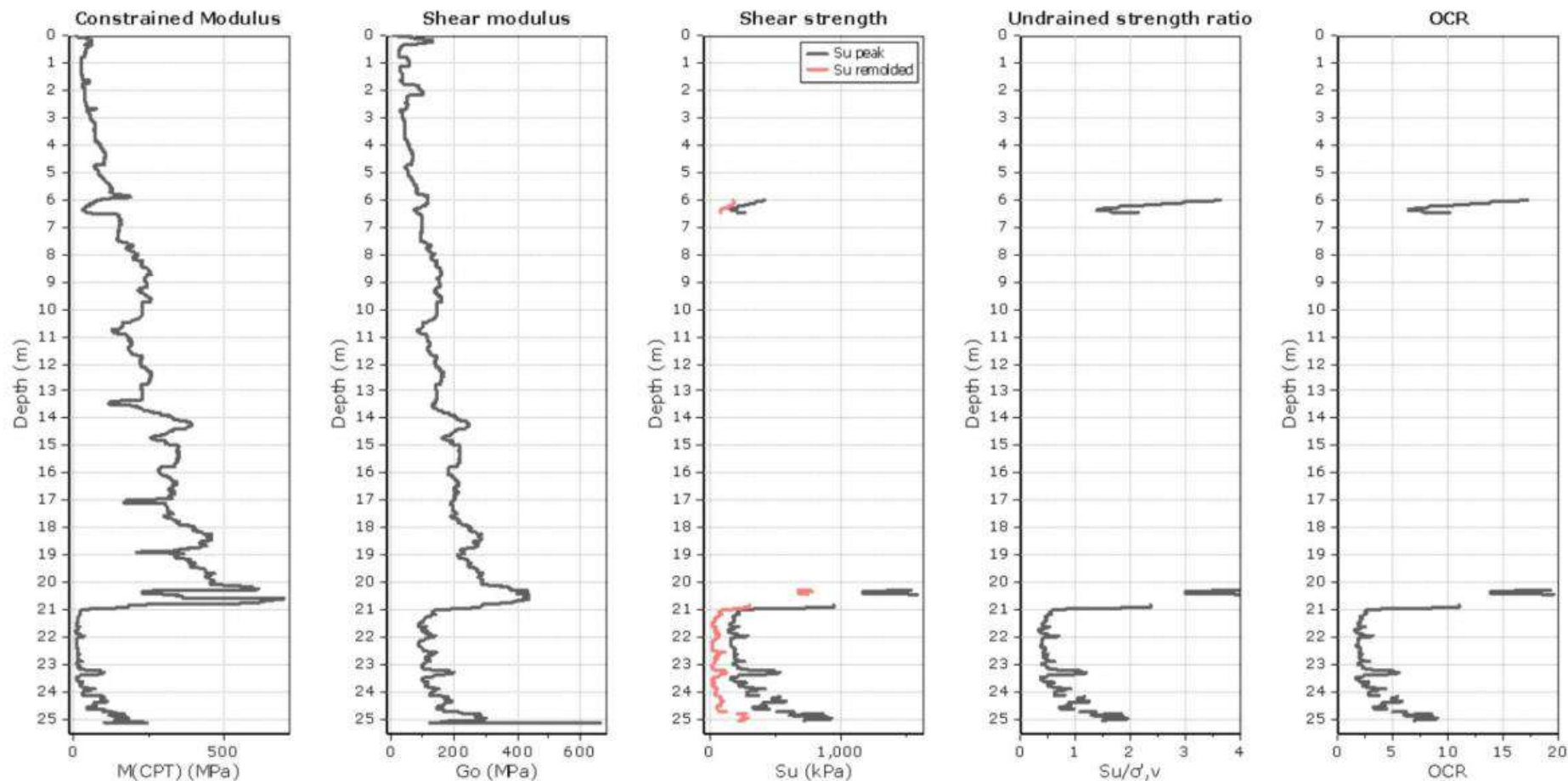
Project: CRISTAL ENGENHARIA
Location: PORTO ALUMAR - Estreito dos Coqueiros /MA





Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: PORTO ALUMAR - Estreito dos Coqueiros /MA



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable alpha using I_c and Q_{cm} (Robertson, 2009)

Go: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for days, N_k : 14

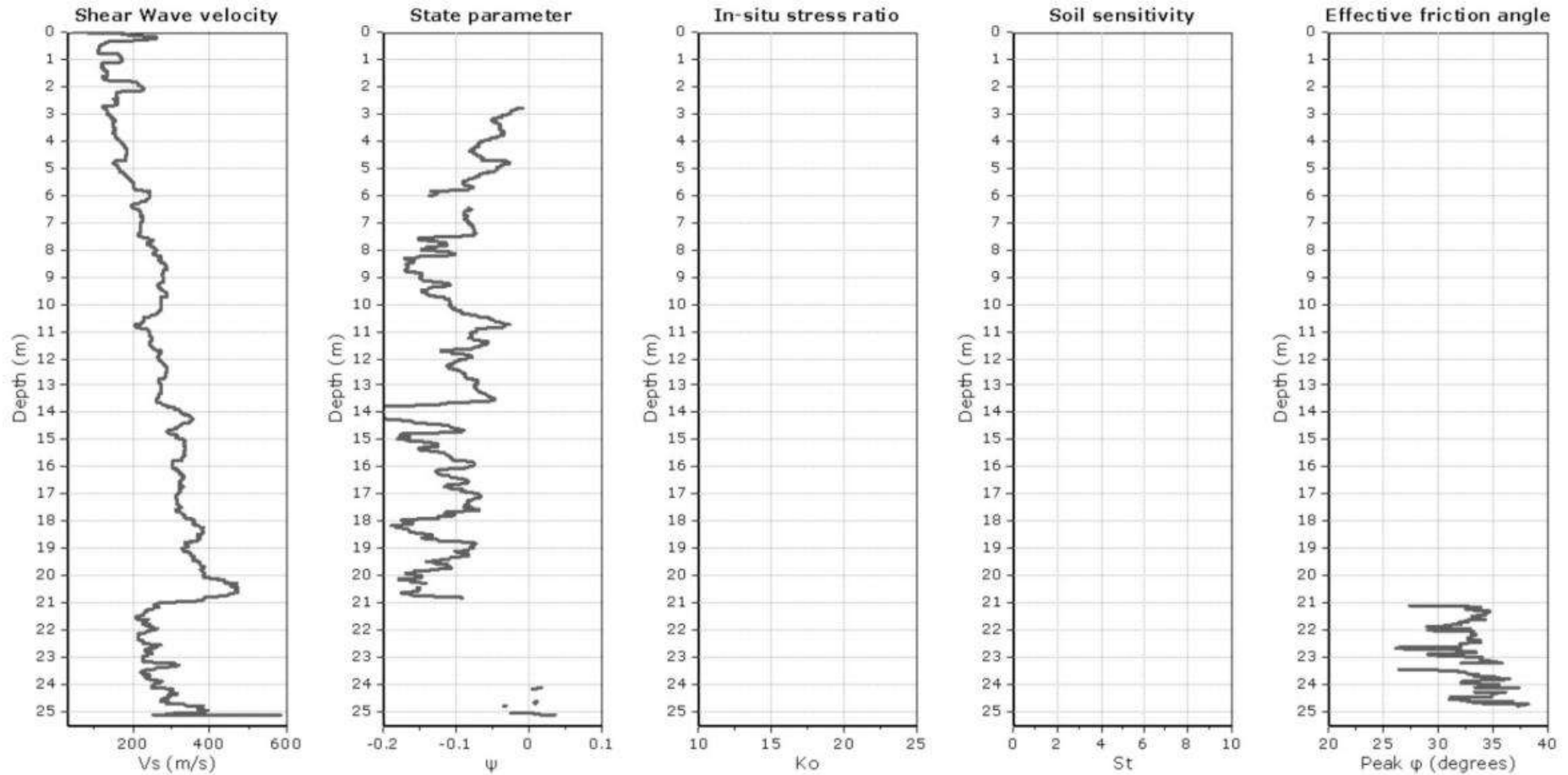
OCR factor for days, N_{kr} : 0.33

● User defined estimation data

● Flat Dilatometer Test data

Project: CRISTAL ENGENHARIA

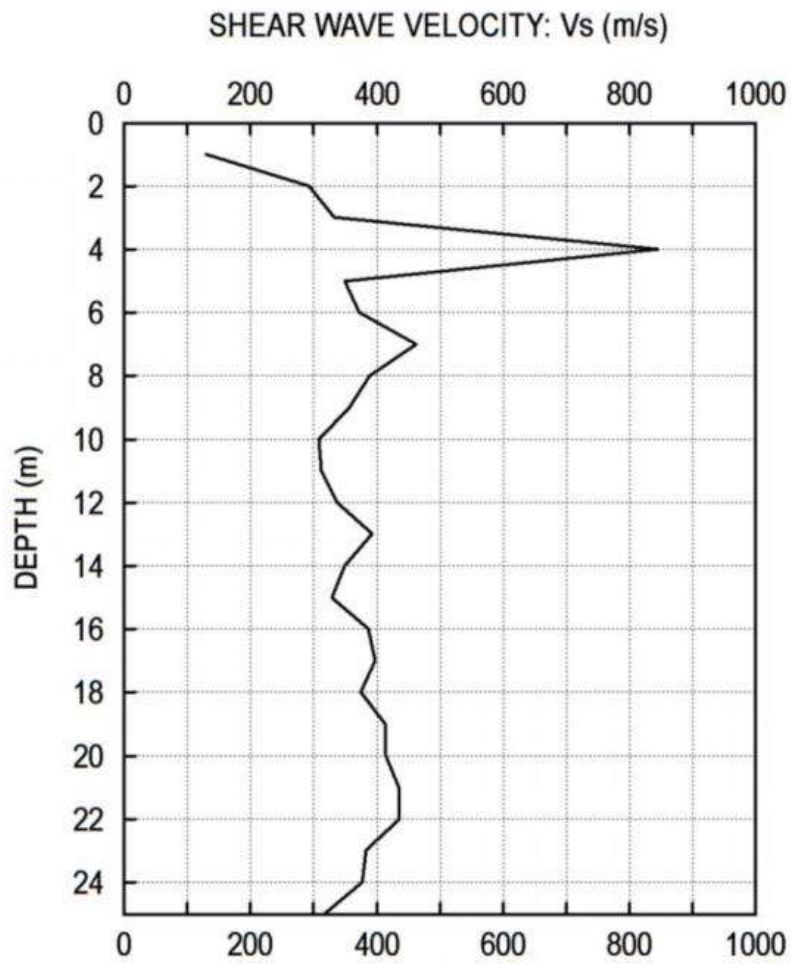
Location: PORTO ALUMAR - Estreito dos Coqueiros /MA



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 350.00

● — User defined estimation data



SCPTu 08- ARB 9

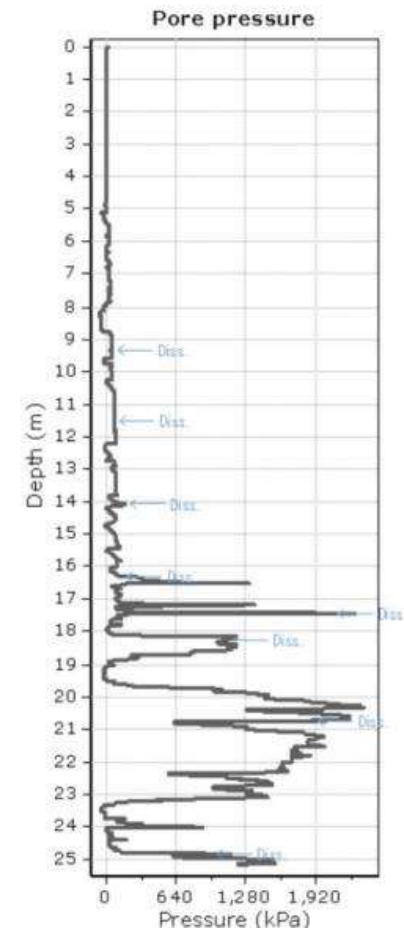
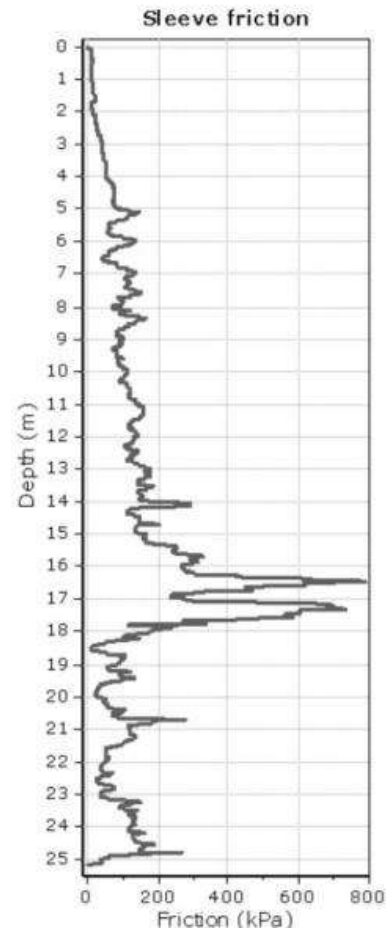
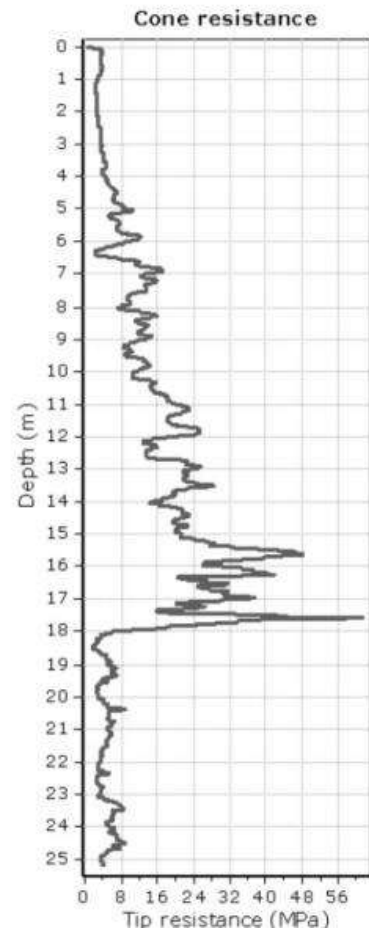


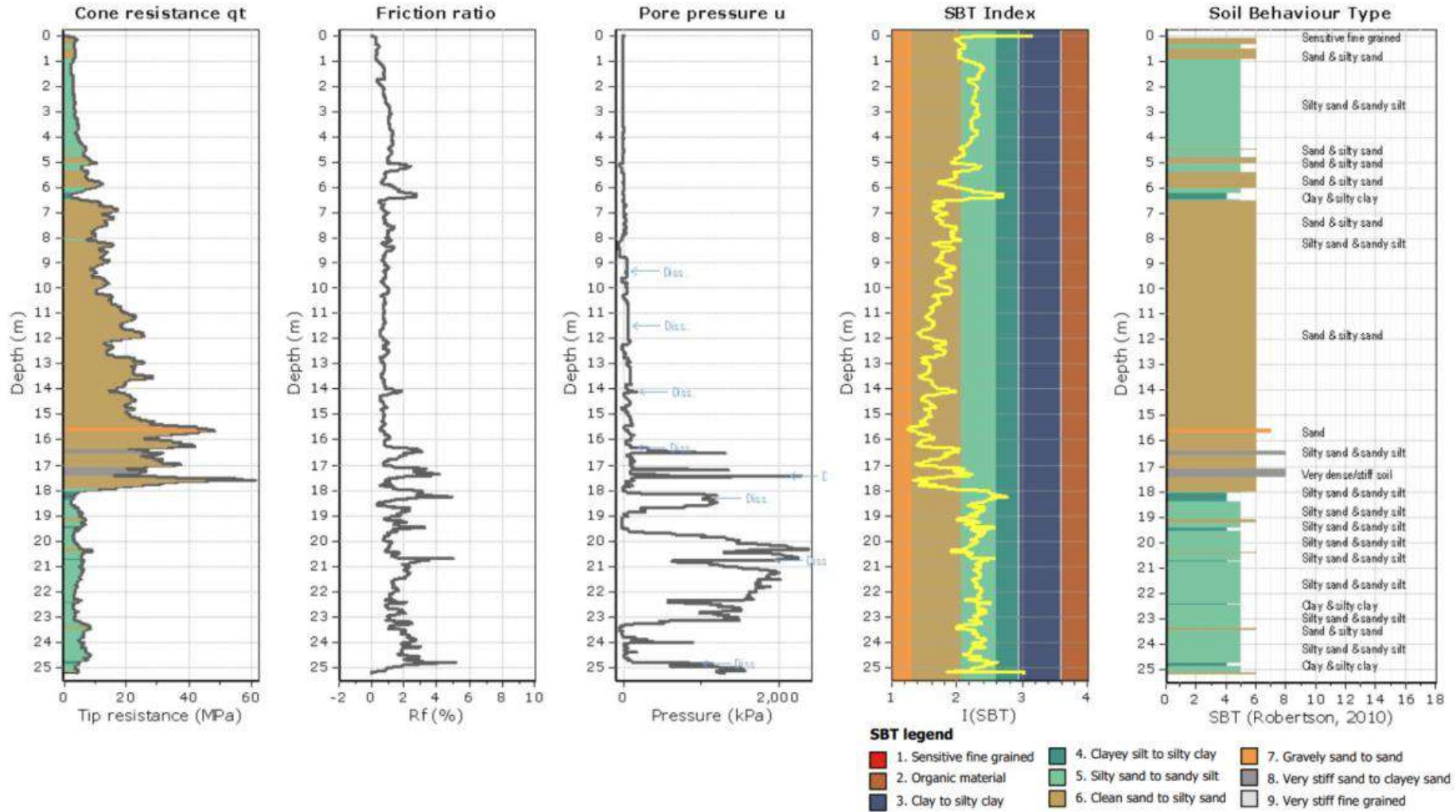
Damasco Penna
Engenharia Geotécnica
São Paulo, Brazil
<http://www.damascopenna.com.br/>

CPT: SCPTU-08

Total depth: 25.20 m, Date: 19/08/2020
Surface Elevation: 27.69 m
Coords: X:579416.52, Y:9699157.37
Cone Type: Geomil
Cone Operator: Antônio Daniel

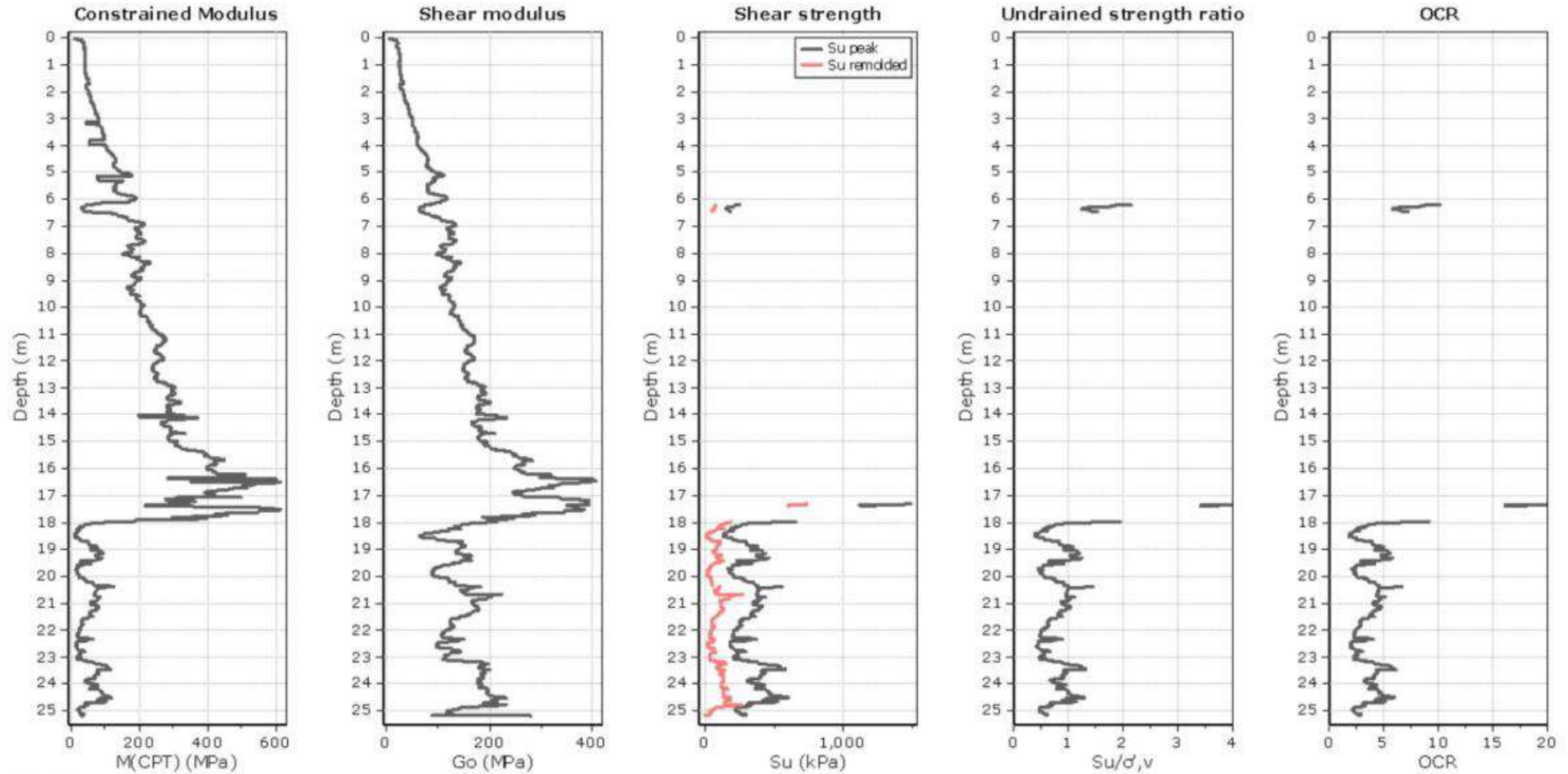
Project: CRISTAL ENGENHARIA
Location: PORTO ALUMAR - Estreito dos Coqueiros /MA





Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: PORTO ALUMAR - Estreito dos Coqueiros / MA



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable alpha using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

G_o : Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

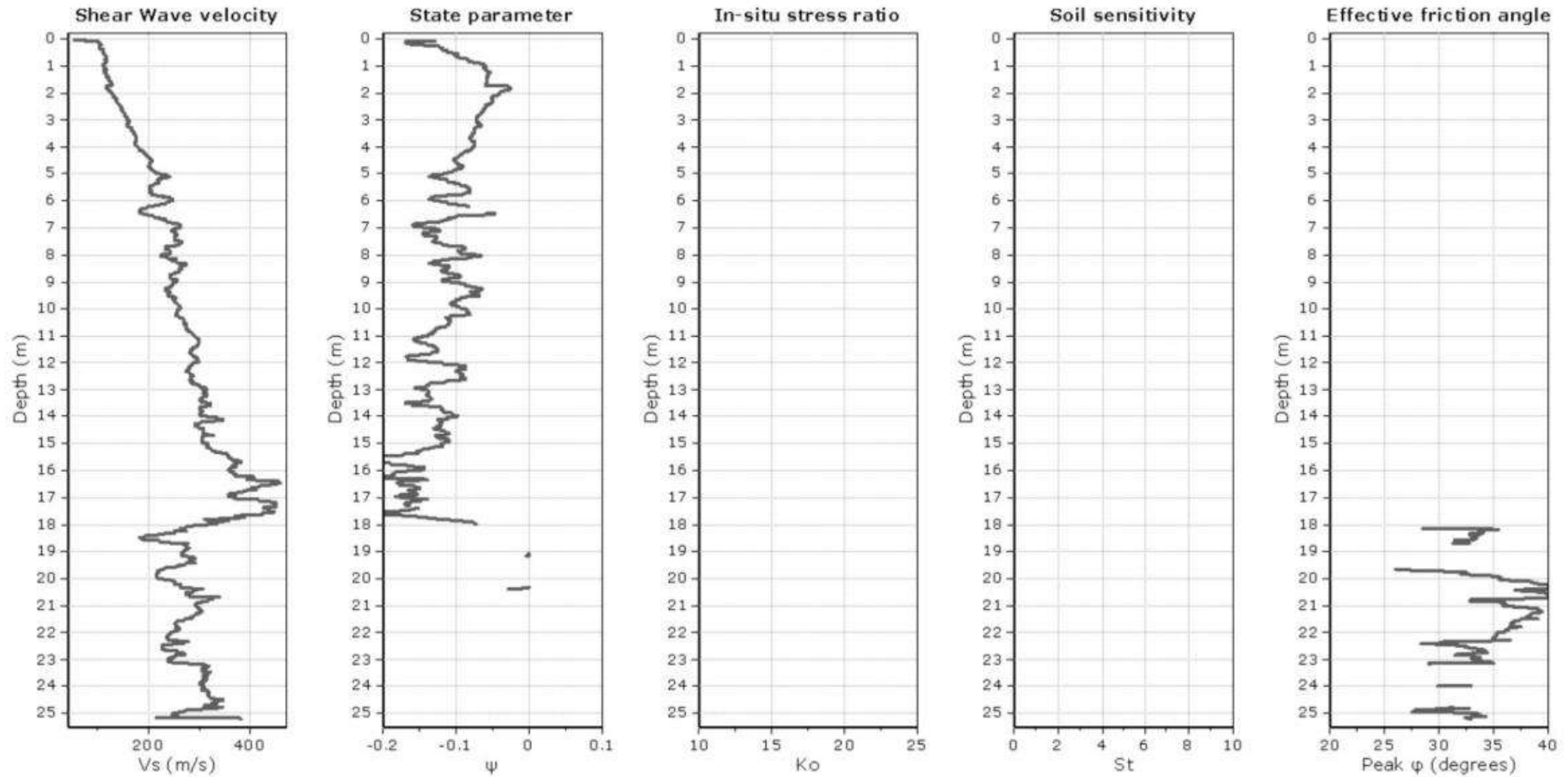
OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

● User defined estimation data

● Flat Dilatometer Test data

Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: PORTO ALUMAR - Estreito dos Coqueiros /MA



Calculation parameters

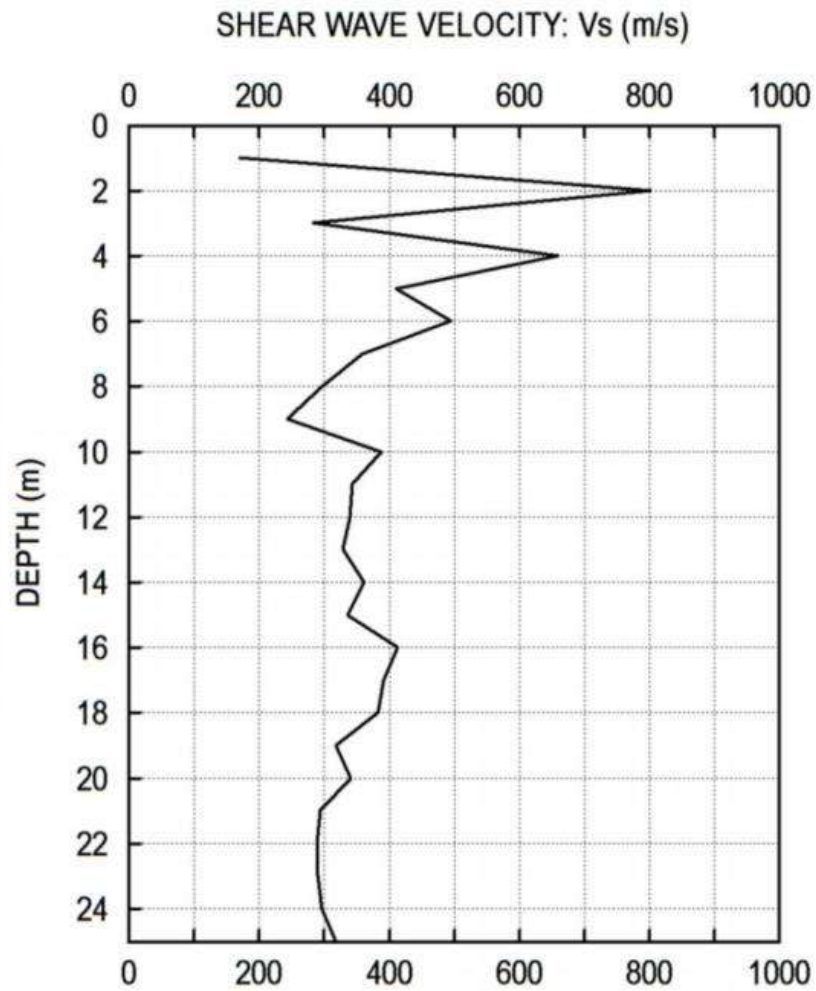
Sol Sensitivity factor, N_s : 350.00

● User defined estimation data

DAMASCO PENNA
ALUMAR-MA

CRISTAL
SÃO LUIS

TEST
SCPTU-08
2 SET 2020



SCPTu's da ARB 10

SCPTu 02- ARB 10



CRISTAL
ENGENHARIA

Cristal Engenharia
Maranhão, Brazil
Engenharia@cristalengenharia.com

Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: ALUMAR - Alumínio Maranhão - São Luis / MA

CPT: CPTU-02

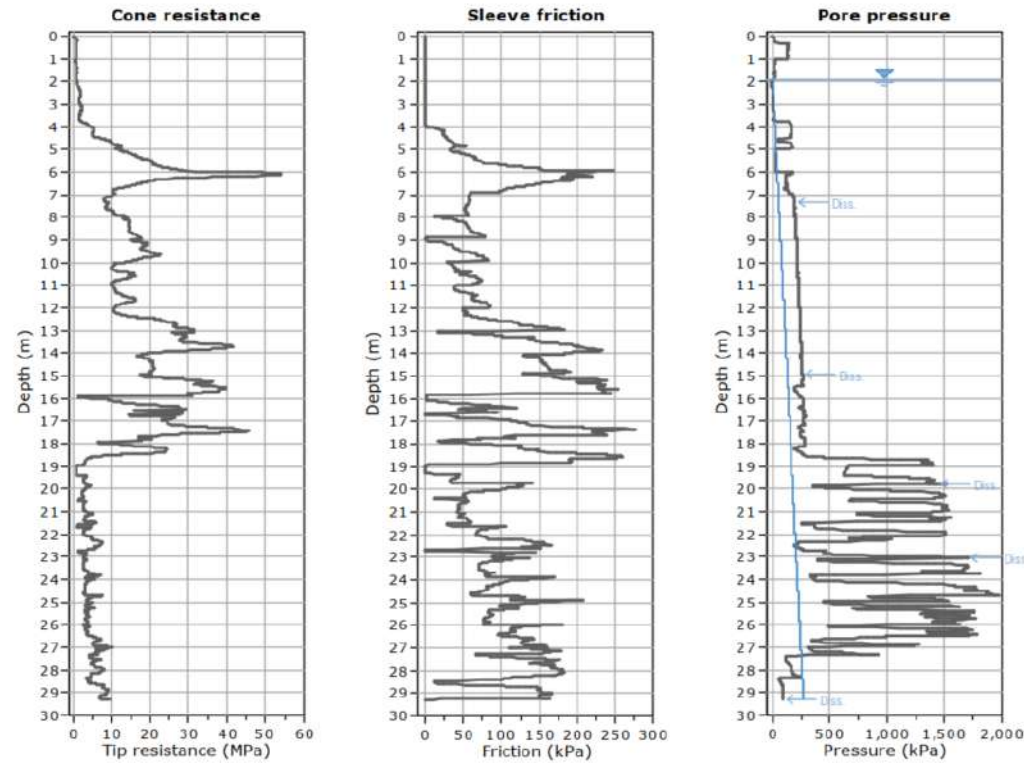
Total depth: 29.31 m, Date: 06/12/2022

Surface Elevation: 23.56 m

Coords: X:580000.94, Y:9699549.56

Cone Type: GEOMIL

Cone Operator: Raimundo Pereira





CRISTAL
ENGENHARIA

Cristal Engenharia
Maranhão, Brazil
Engenharia@crystalengenharia.com

CPT: CPTU-02

Total depth: 29.31 m, Date: 06/12/2022

Surface Elevation: 23.56 m

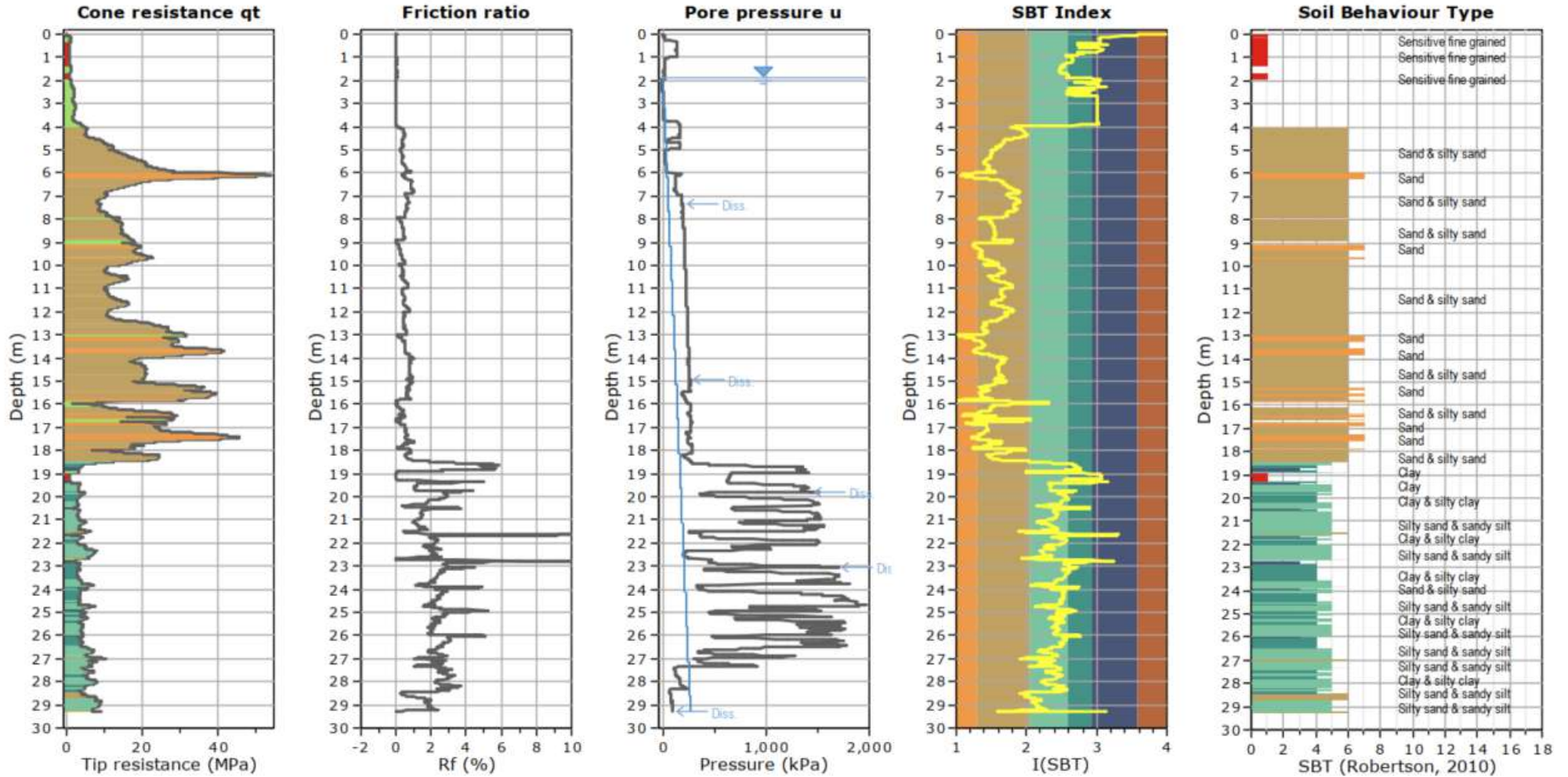
Coords: X:580000.94, Y:9699549.56

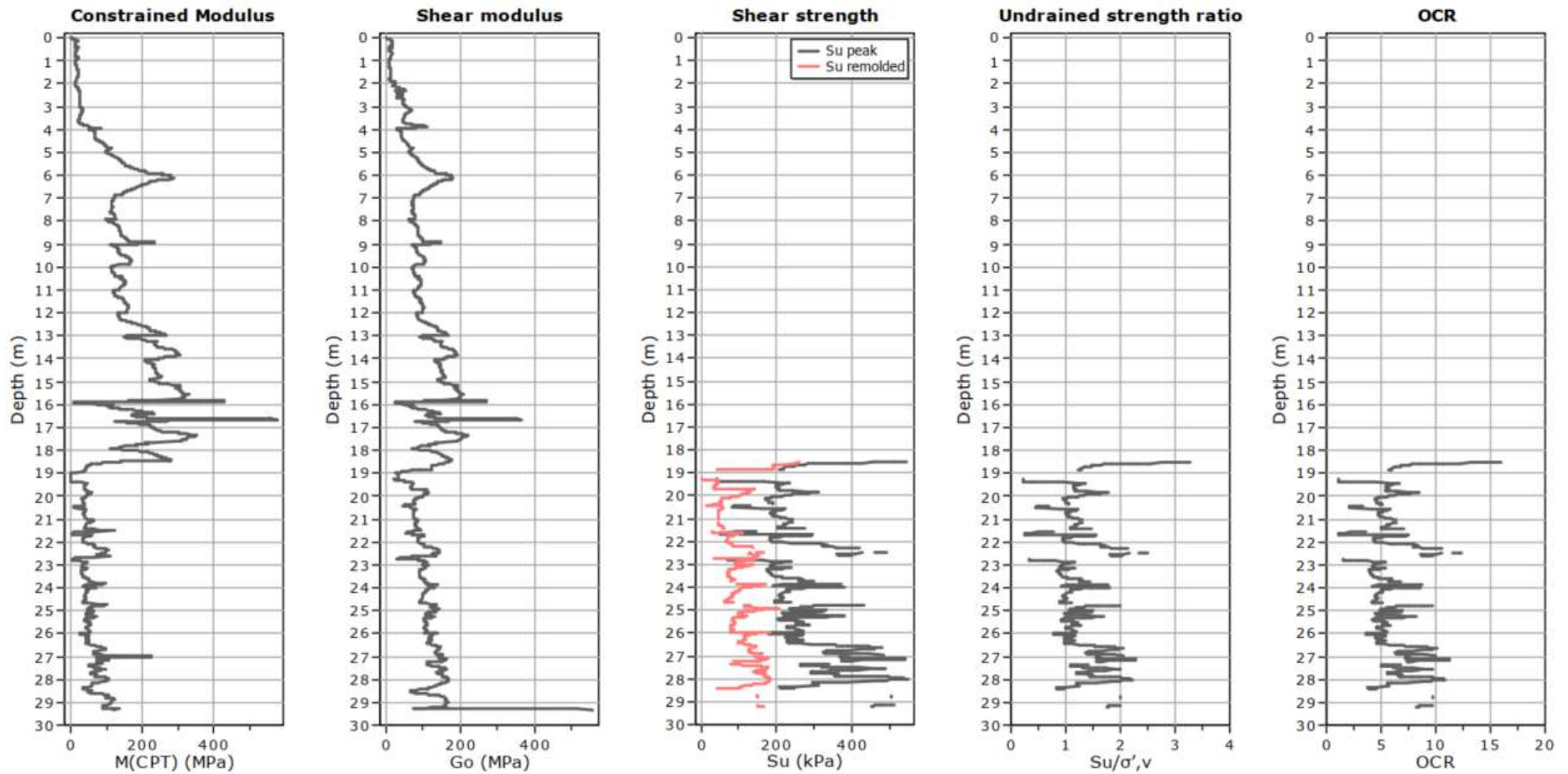
Cone Type: GEOMIL

Cone Operator: Raimundo Pereira

Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: ALUMAR - Alumínio Maranhão - São Luis / MA

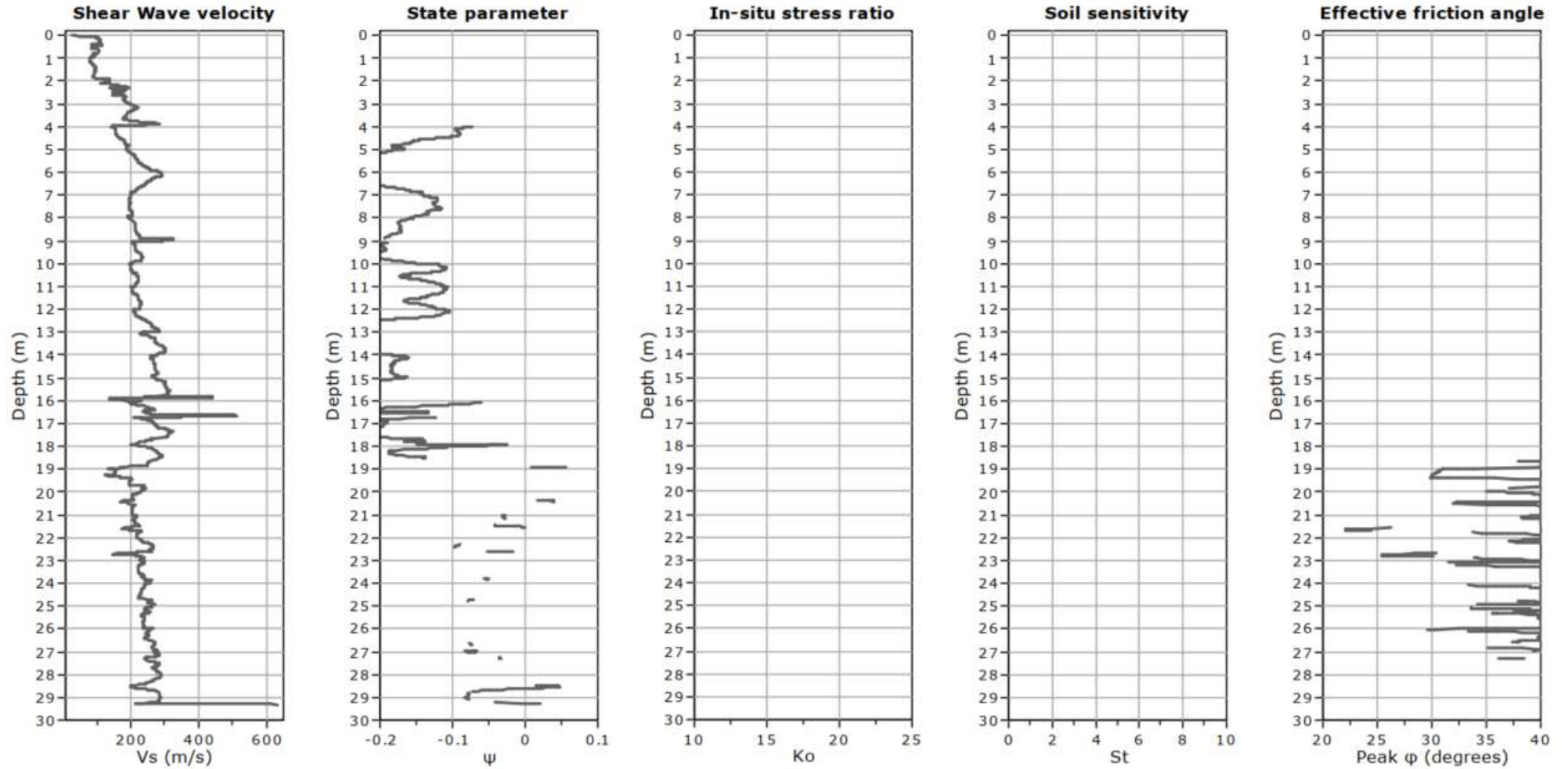


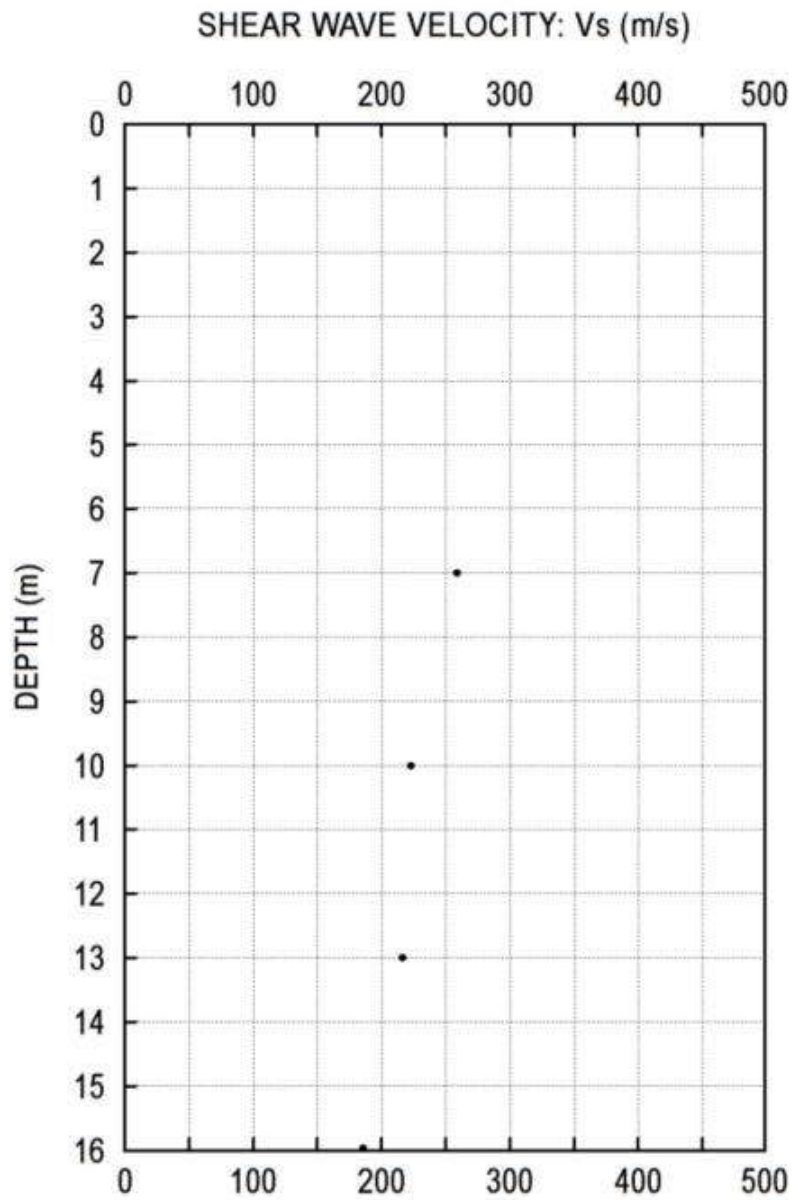




Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: ALUMAR - Alumínio Maranhão - São Luís / MA





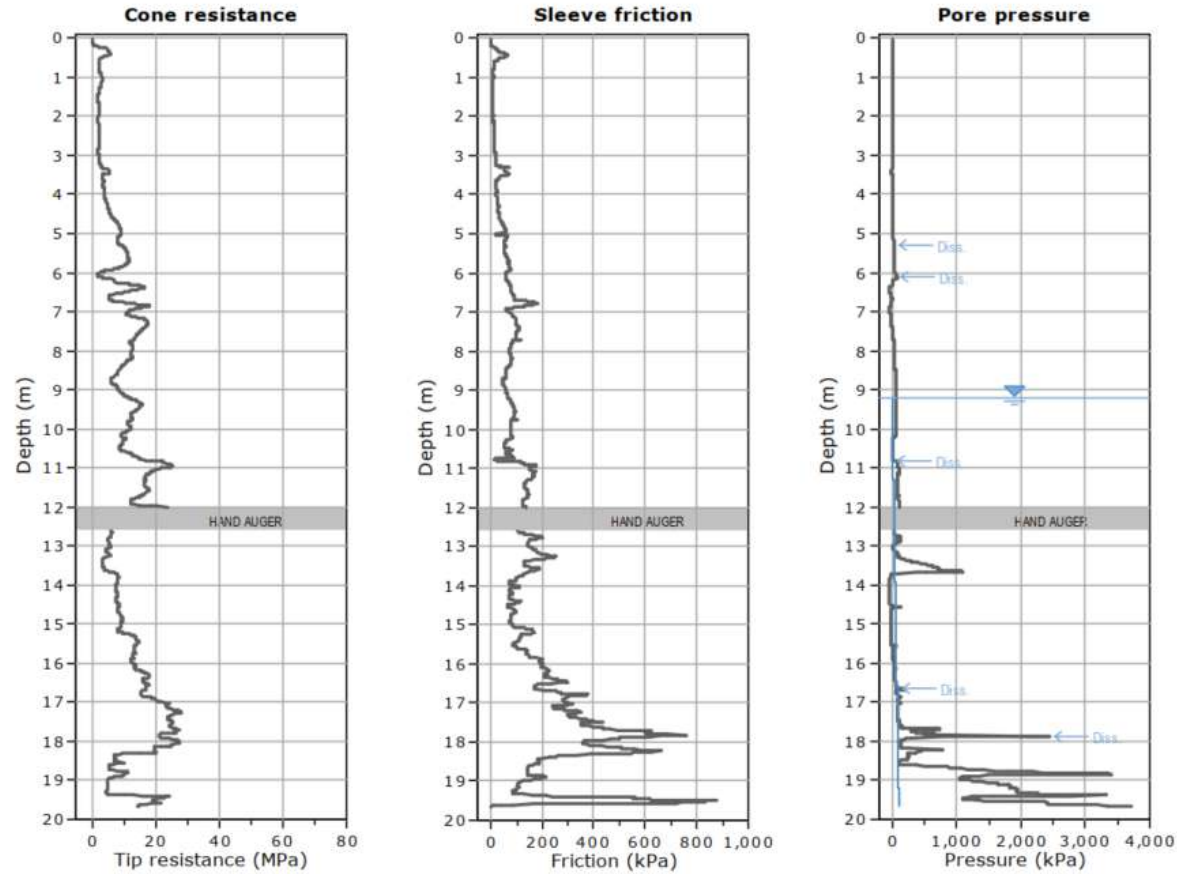
SCPTu 10- ARB 10

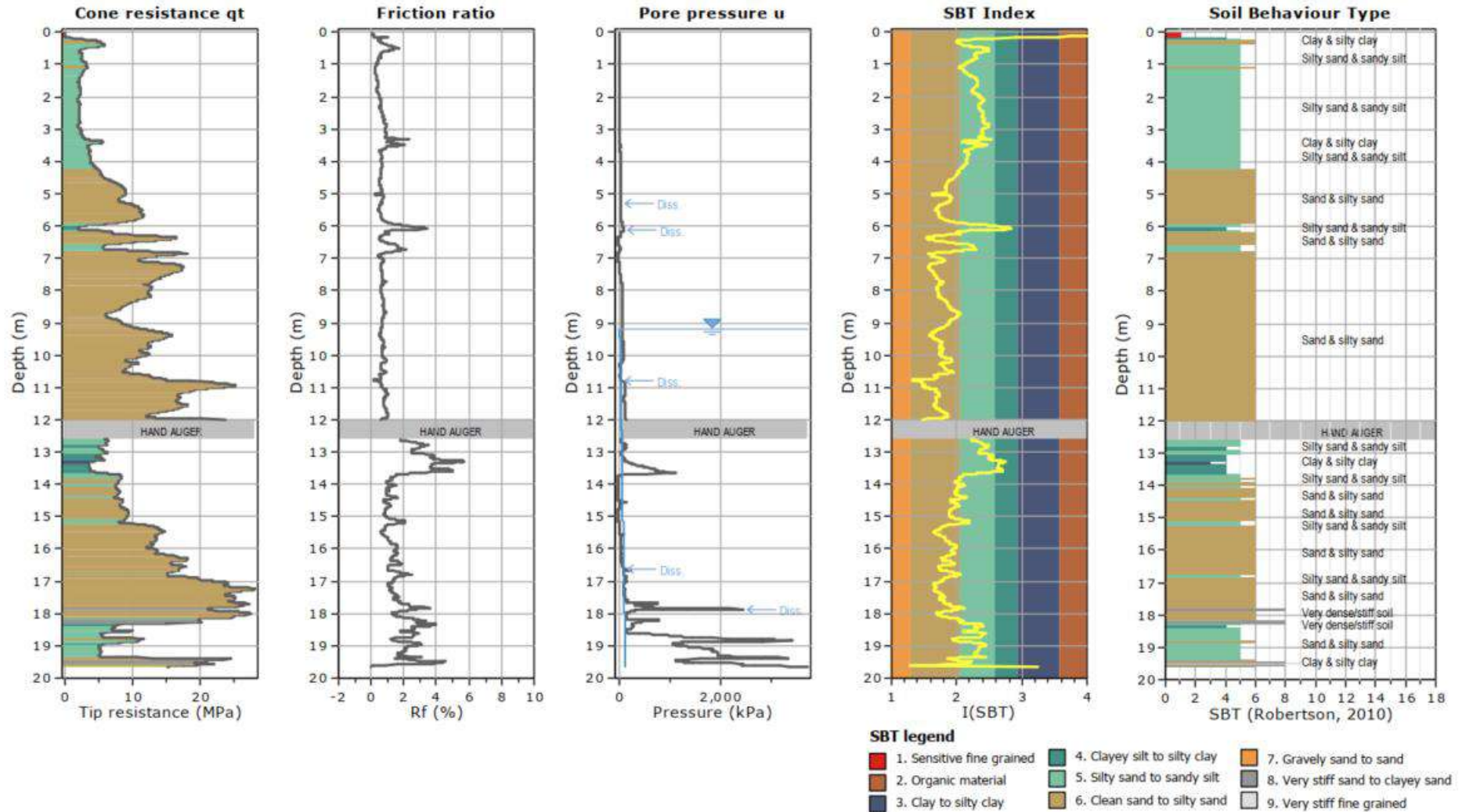


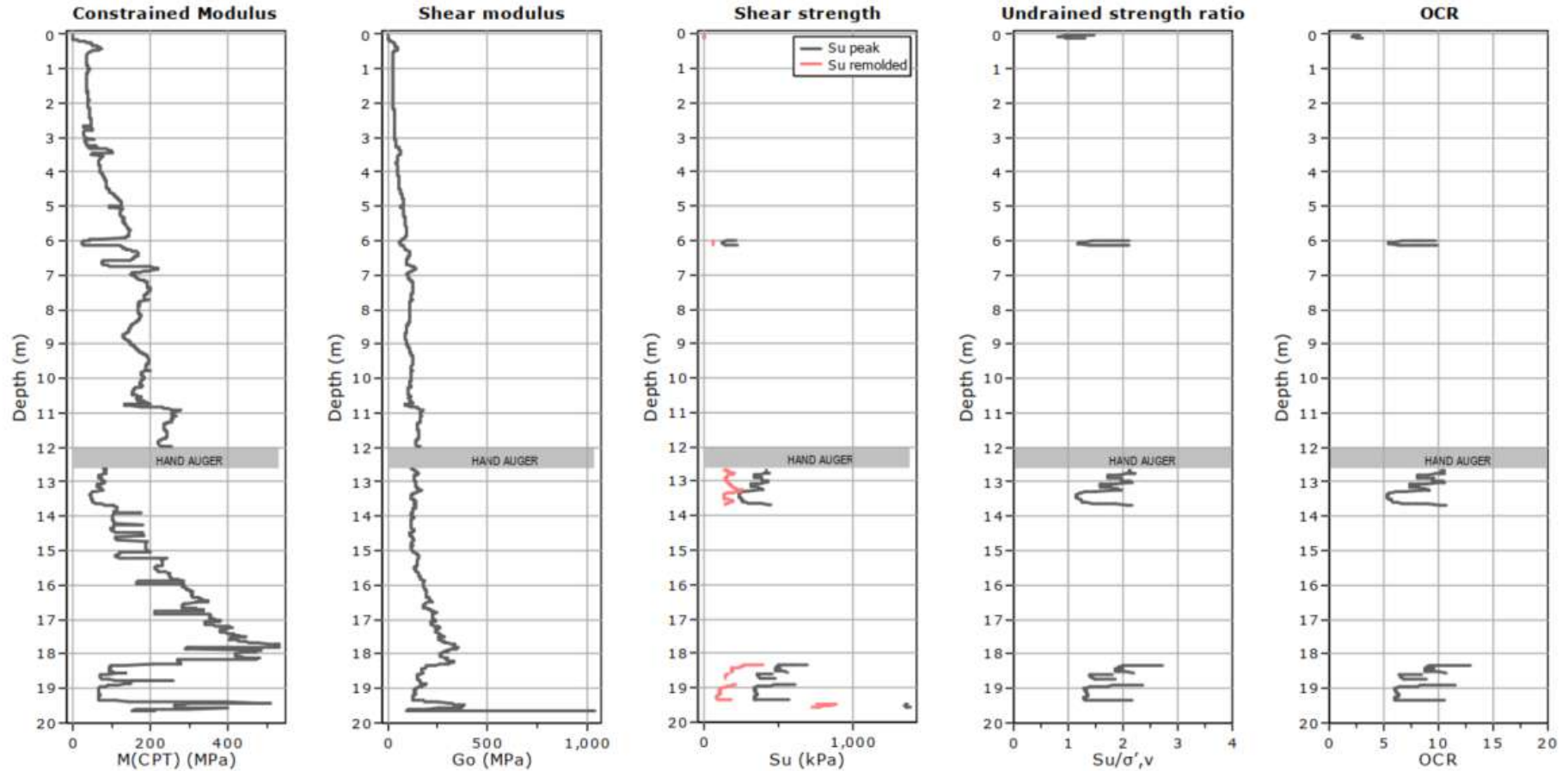
Damasco Penna
Engenharia Geotécnica
São Paulo, Brazil
<http://www.damascopenna.com.br/>

CPT: CPTU-10A
Total depth: 19.65 m, Date: 20/08/2022
Surface Elevation: 22.84 m
Coords: X:580409.78, Y:9700312.31
Cone Type: GEOMIL
Cone Operator: Raimundo Pereira

Project: CRISTIAL ENGENHARIA
Location: ALUMAR - Alumínio Maranhão - São Luis / MA







Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_{tm} (Robertson, 2009)

Go: Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

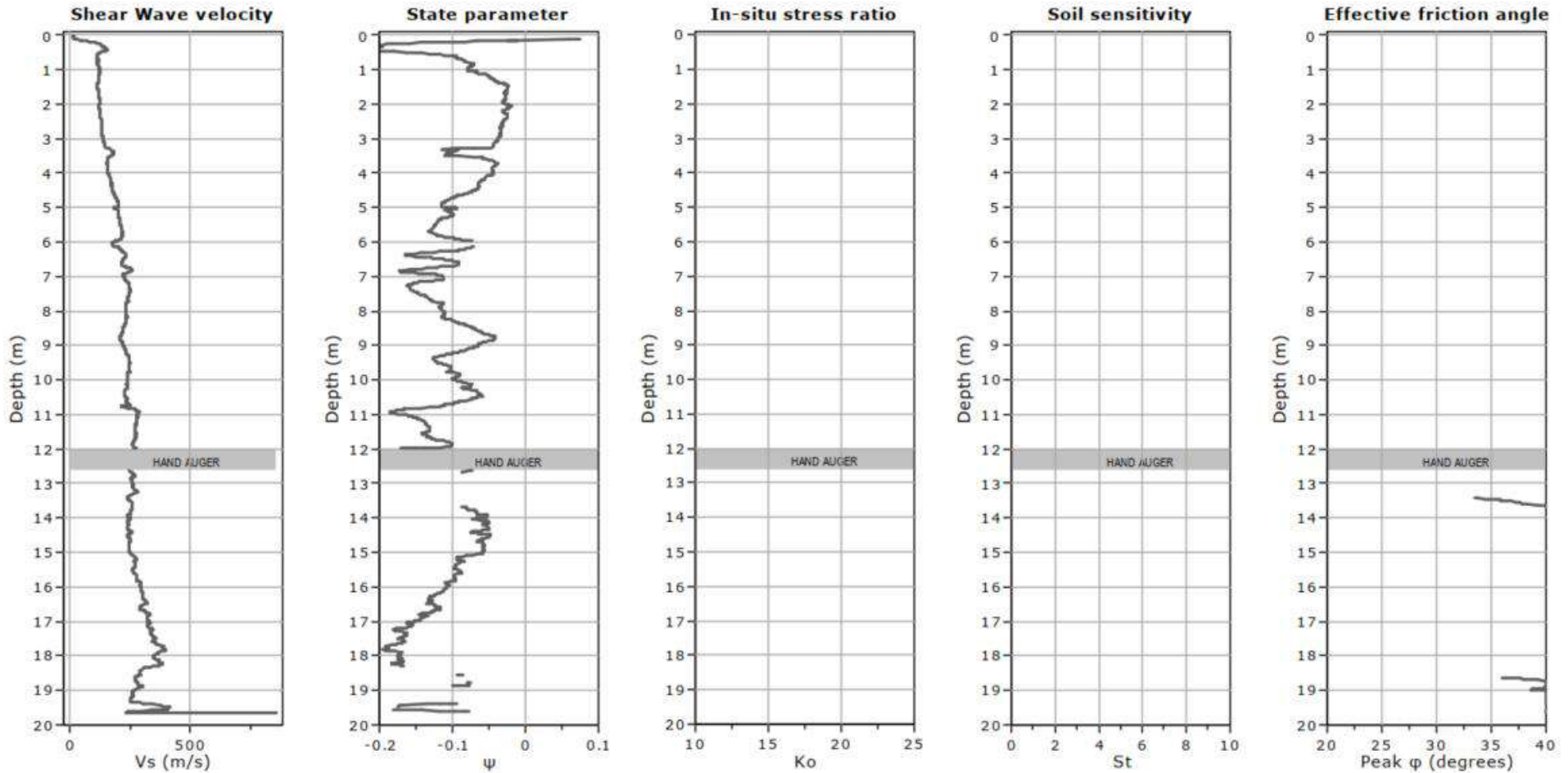
OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

● User defined estimation data

● Flat Dilatometer Test data

Project: CRISTIAL ENGENHARIA

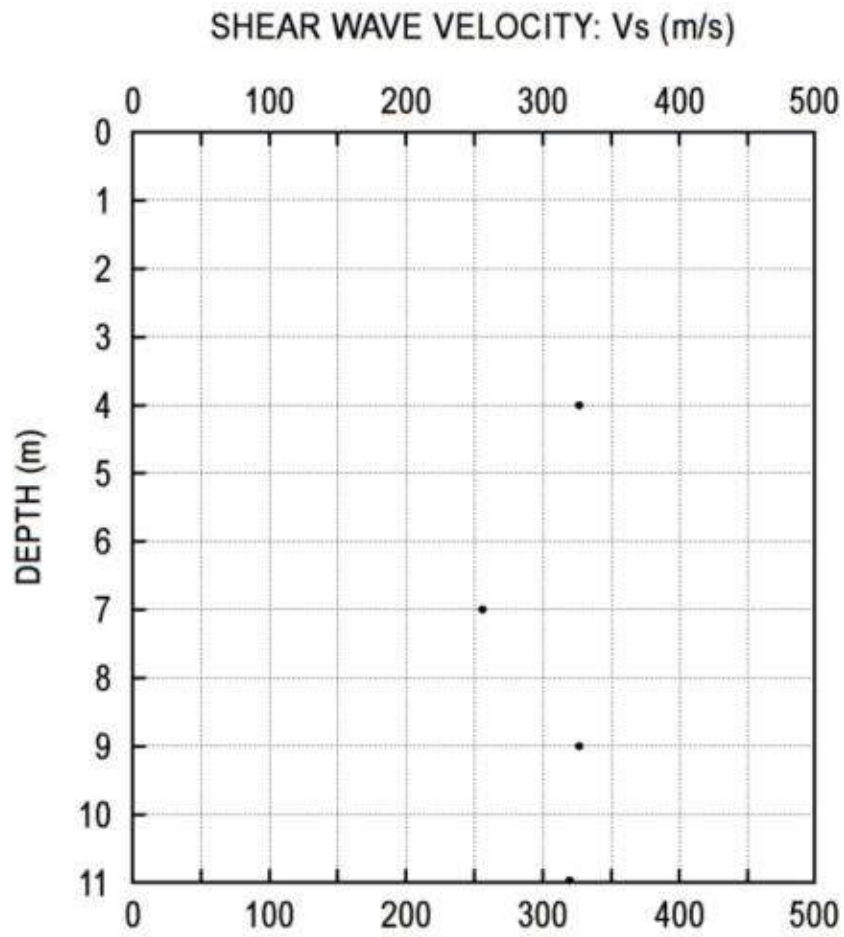
Location: ALUMAR - Alumínio Maranhão - São Luis / MA



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 350.00

● User defined estimation data



SCPTu 13- ARB 10



Damasco Penna
Engenharia Geotécnica
São Paulo, Brazil
<http://www.damascopenna.com.br/>

CPT: CPTU-13

Total depth: 20.01 m, Date: 12/08/2022

Surface Elevation: 27.50 m

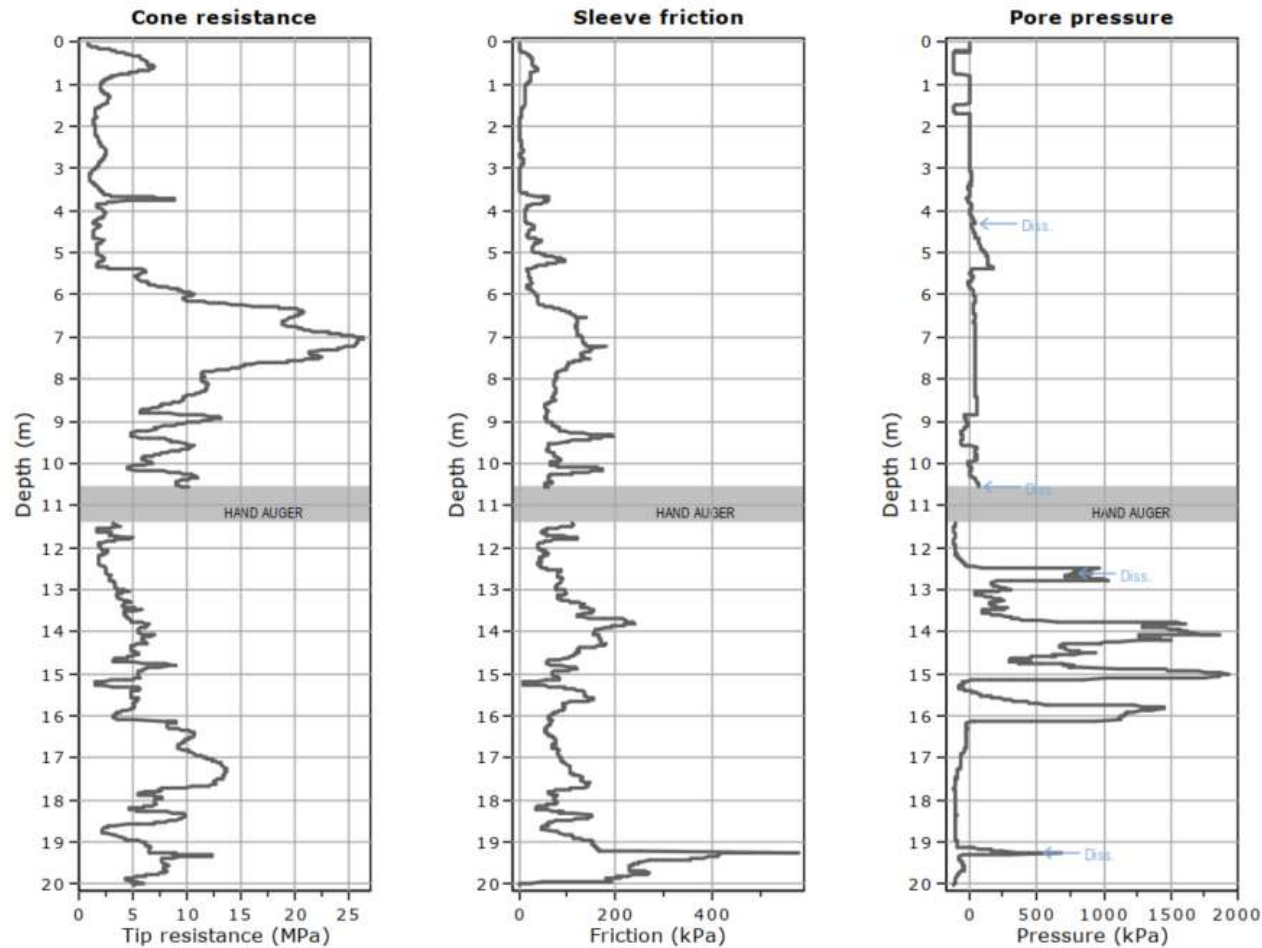
Coords: X:579995.62, Y:9700403.41

Cone Type: GEOMIL

Cone Operator: Raimundo Pereira

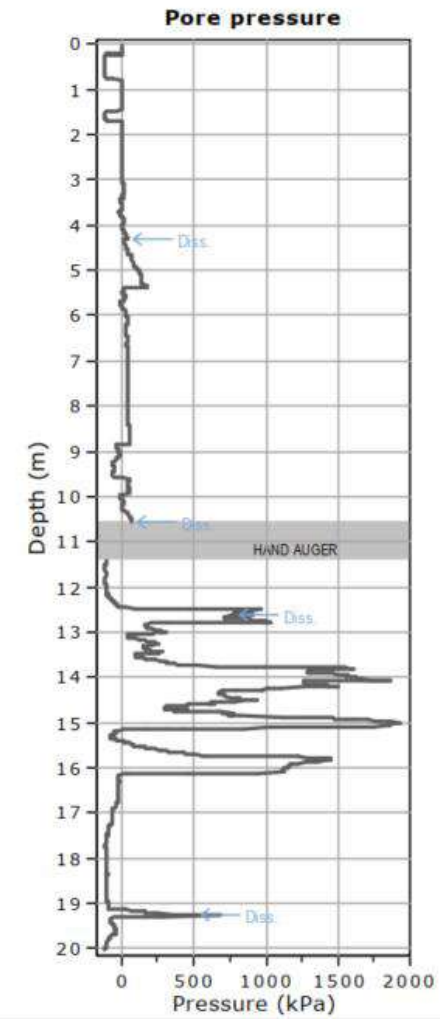
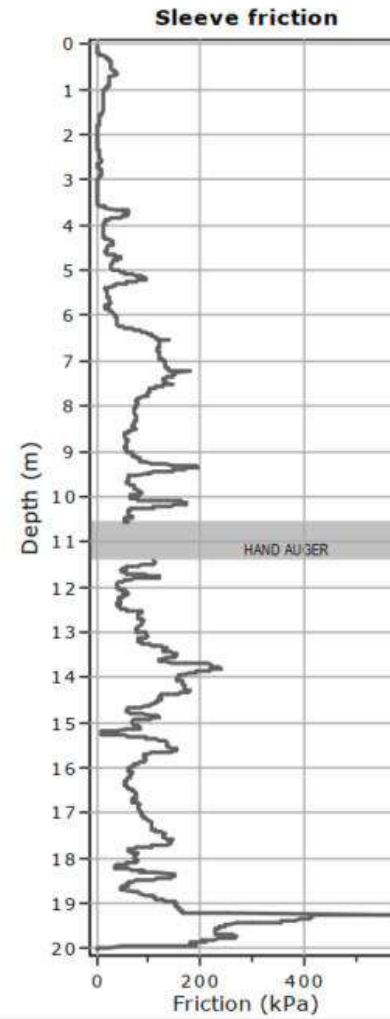
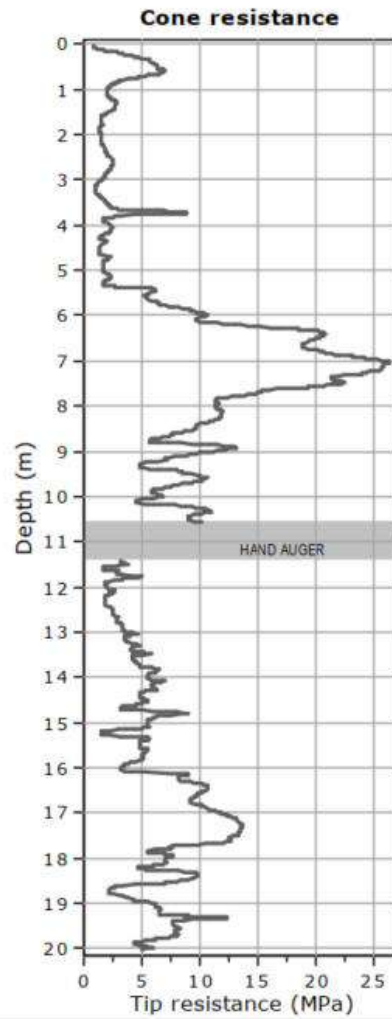
Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: ALUMAR - Alumínio Maranhão - São Luis/MA



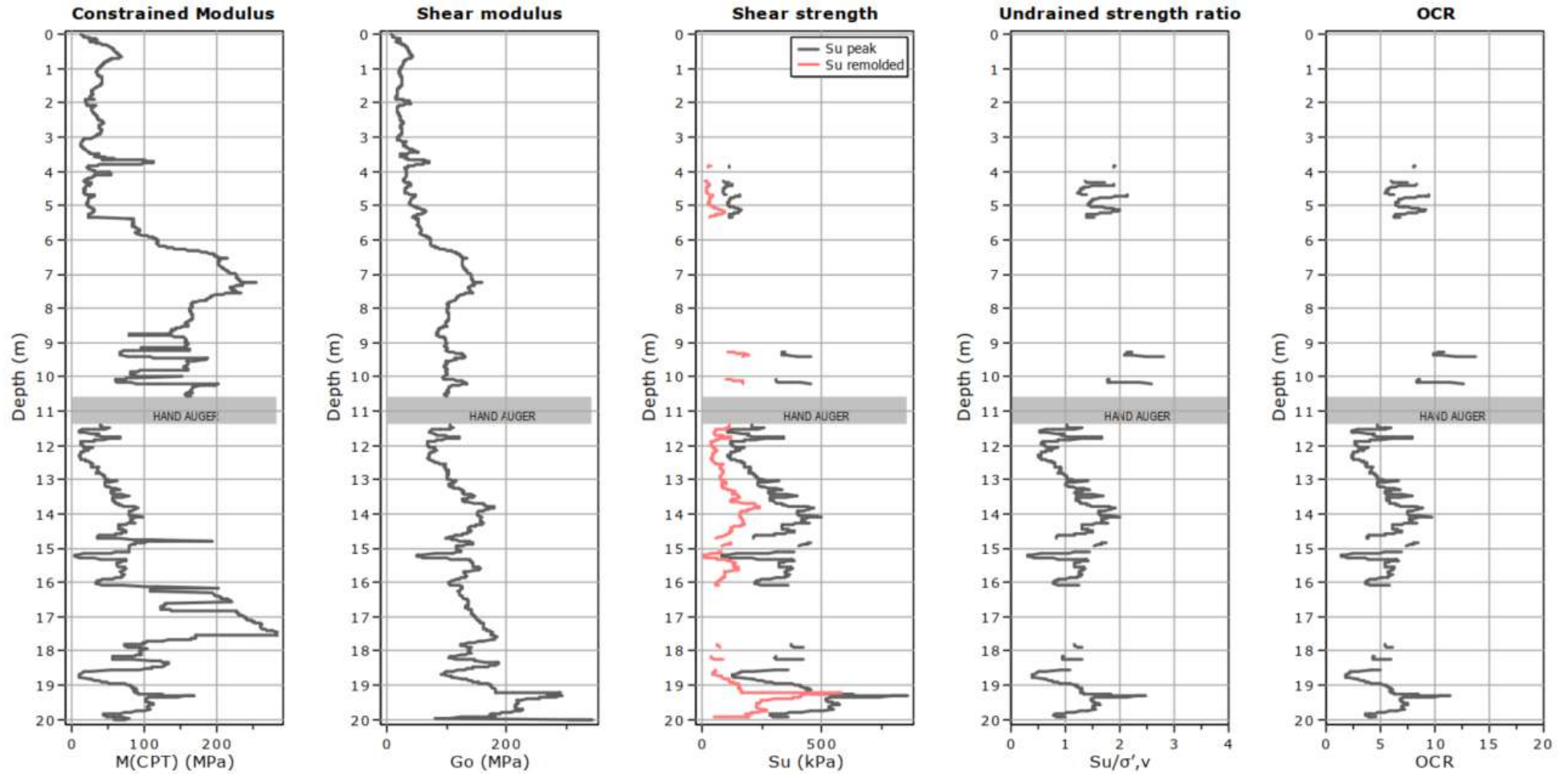
Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: ALUMAR - Alumínio Maranhão - São Luis/MA



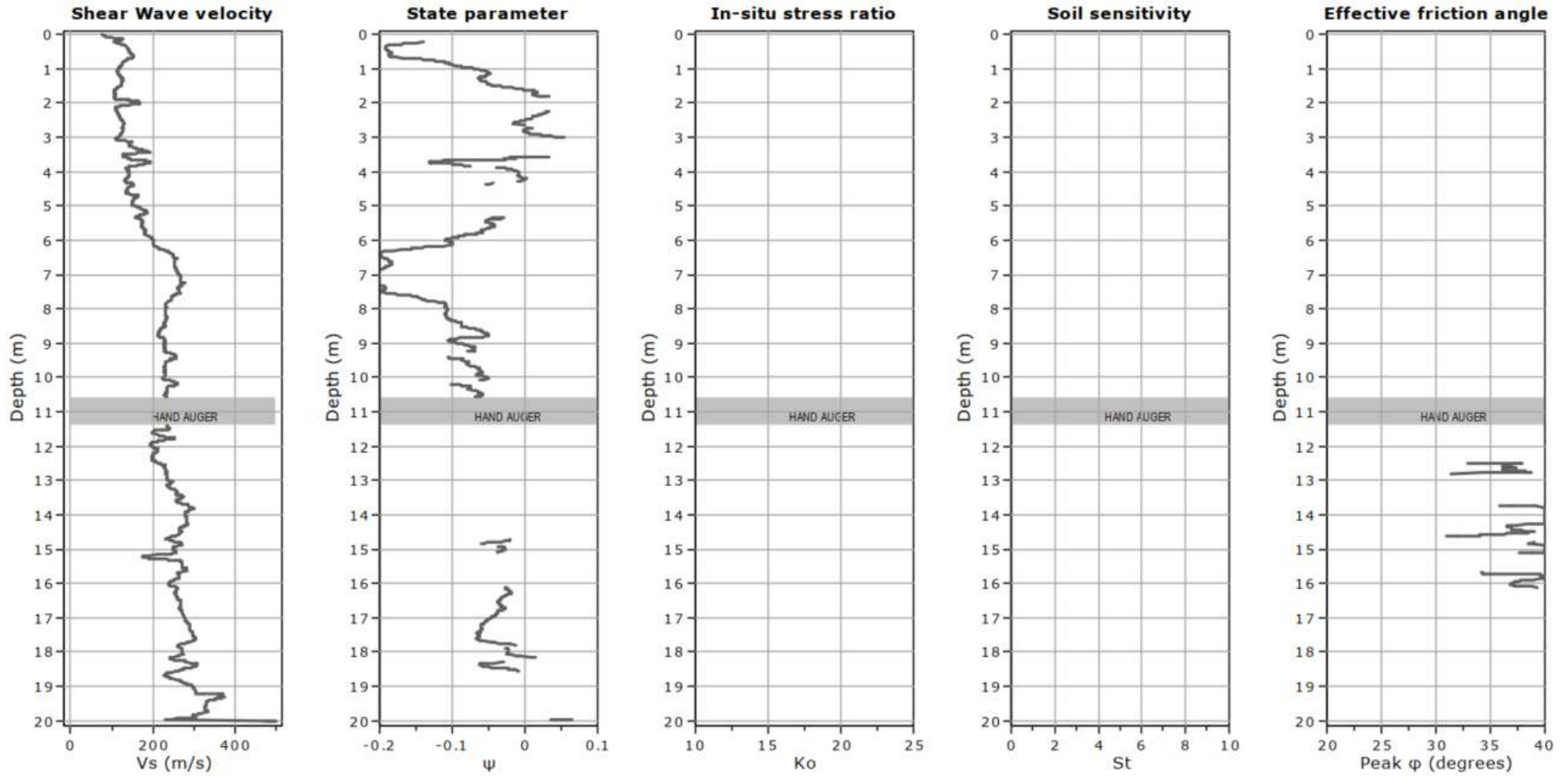
Project: CRISTAL ENGENHARIA

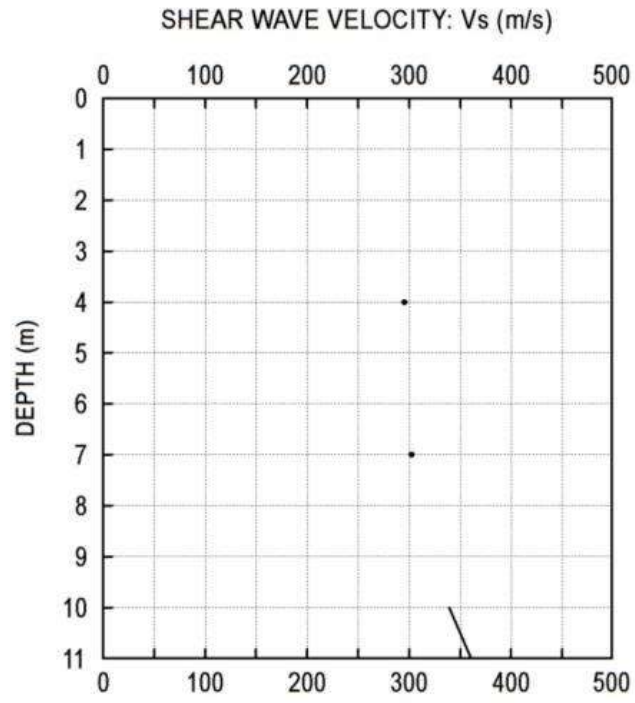
Location: ALUMAR - Alumínio Maranhão - São Luis/MA



Project: CRISTAL ENGENHARIA

Location: ALUMAR - Alumínio Maranhão - São Luis/MA





SCPTu 15- ARB 10

ENSAIO DE PIEZOCONE (CPTU)

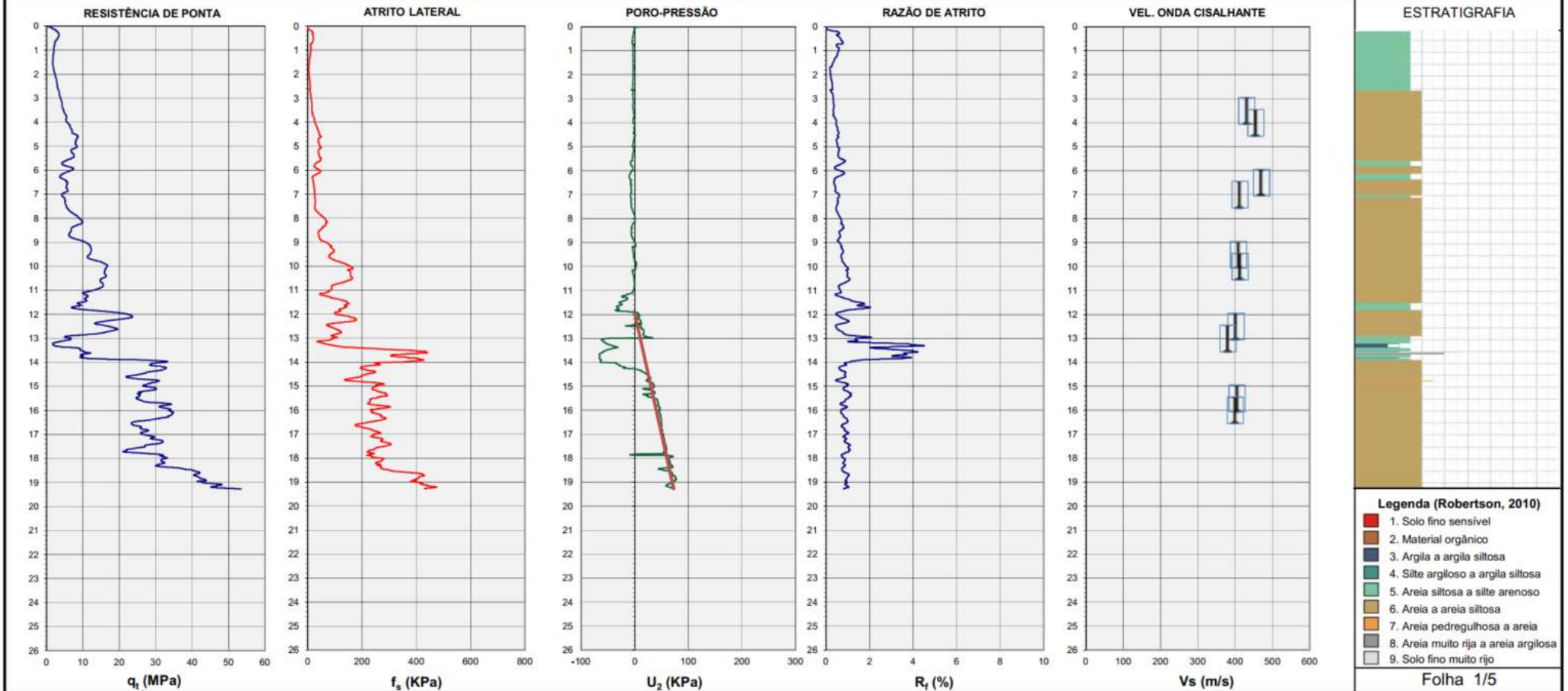


CLIENTE: ALUMAR (CONSORCIO DE ALUMÍNIO DO MARANHÃO S.A.)
 OBRA: ÁREA DE RESÍDUO DE BAUXITA (ARB 10)
 LOCAL: BR-135 - KM-18 - SÃO LUIZ - MARANHÃO

CPTU N° = CPTU-15
 DATA: 23/05/2022
 PROF. = 19,27 m

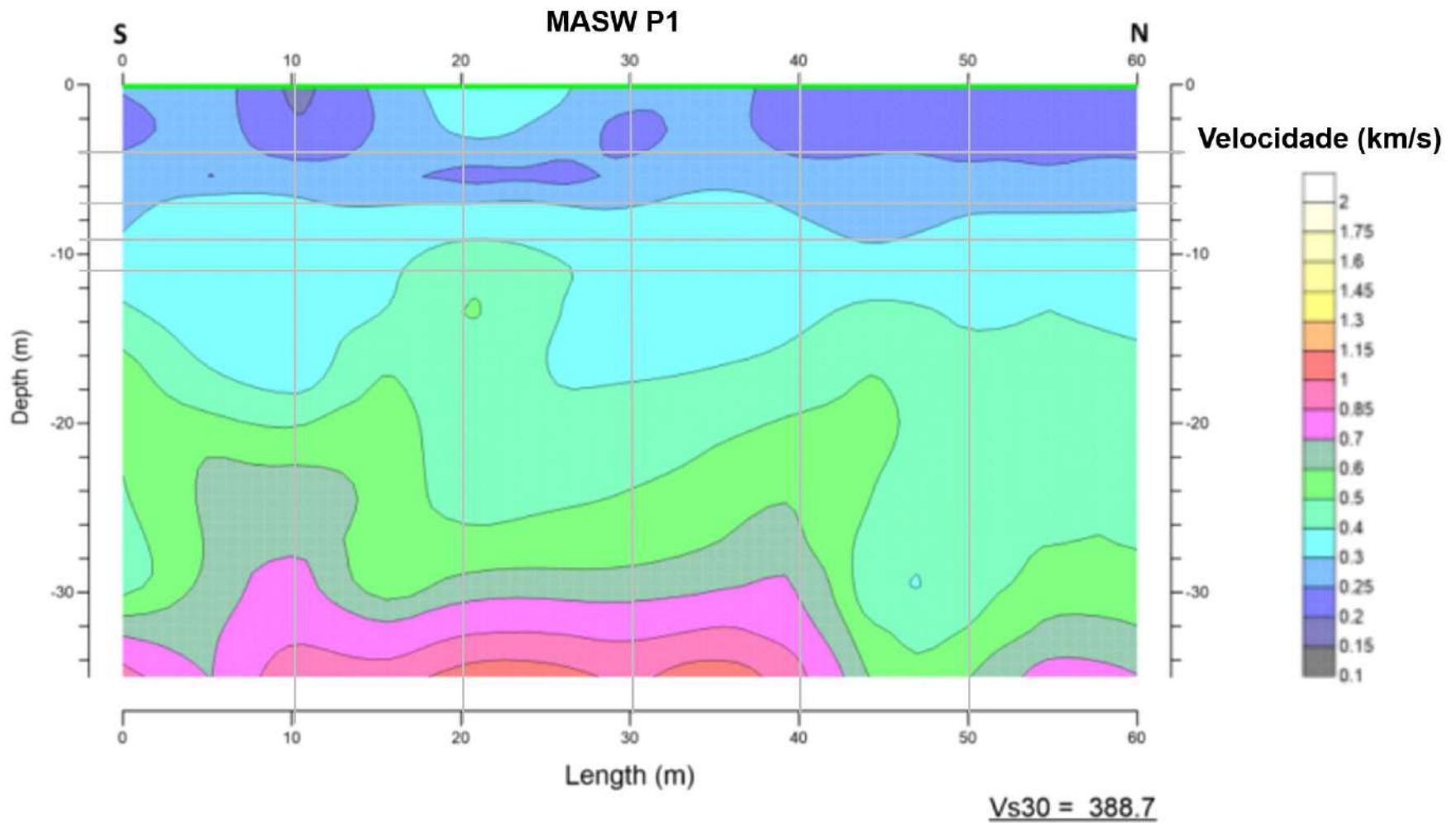
N.A Aproximado = 12,00 m
 N=9.700.374,136 E=579.509,10 - EL.37,641

Responsável técnico:
 Thiago P. Machado
 Crea : 100435-0

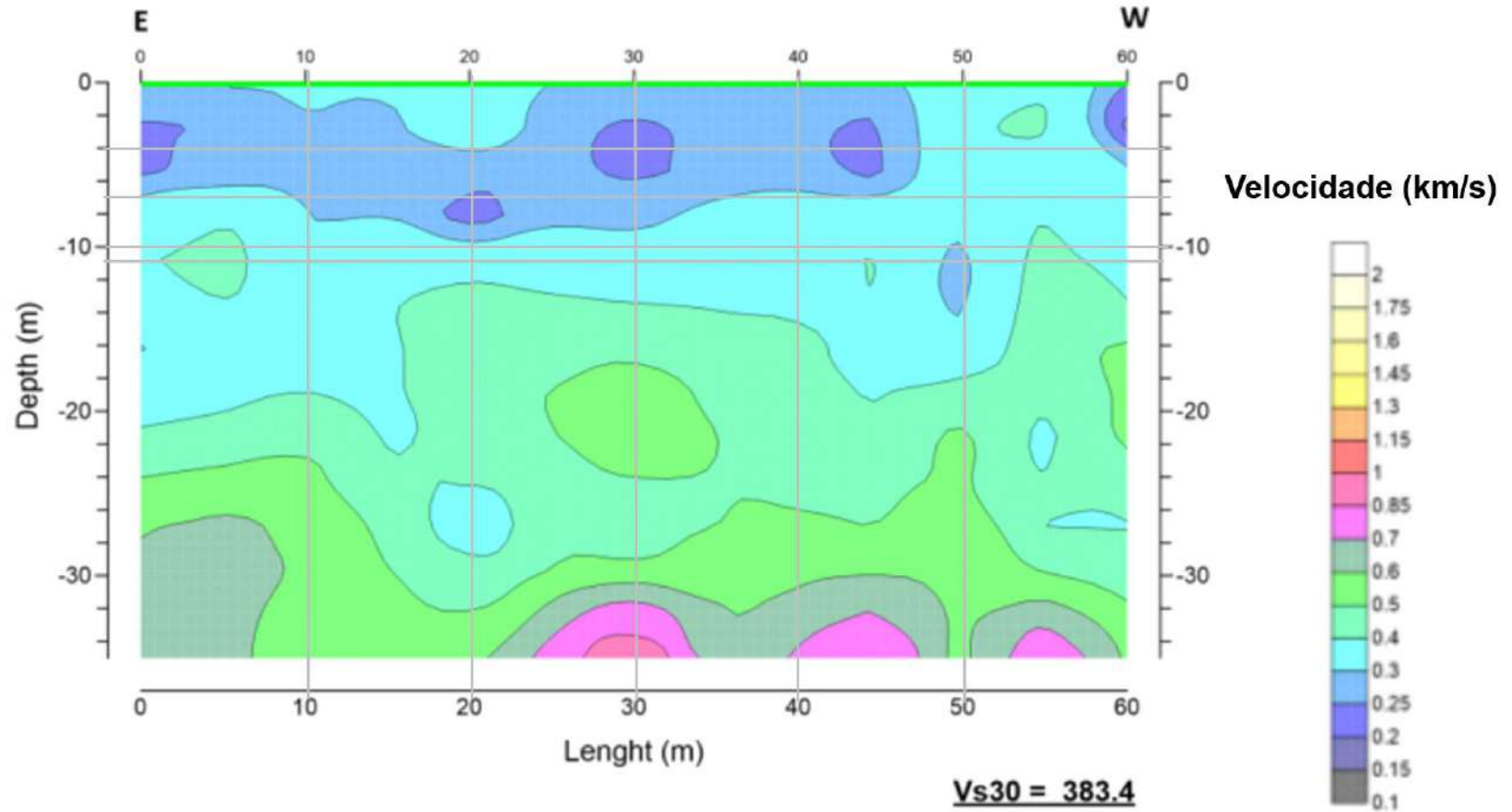


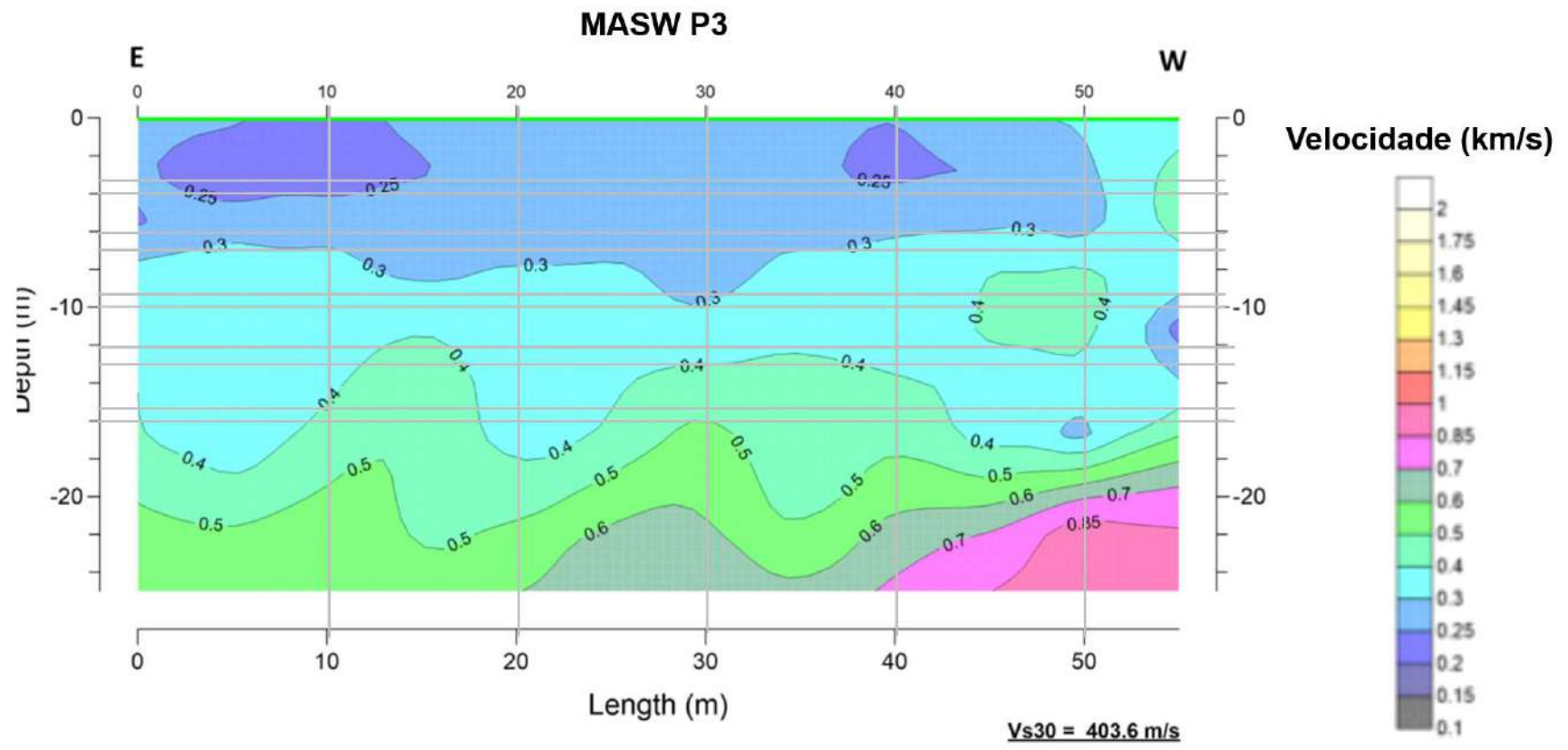
APÊNDICE E

MALHA DOS ENSAIOS MASW PARA OBTENÇÃO DE V_s PONTUAL

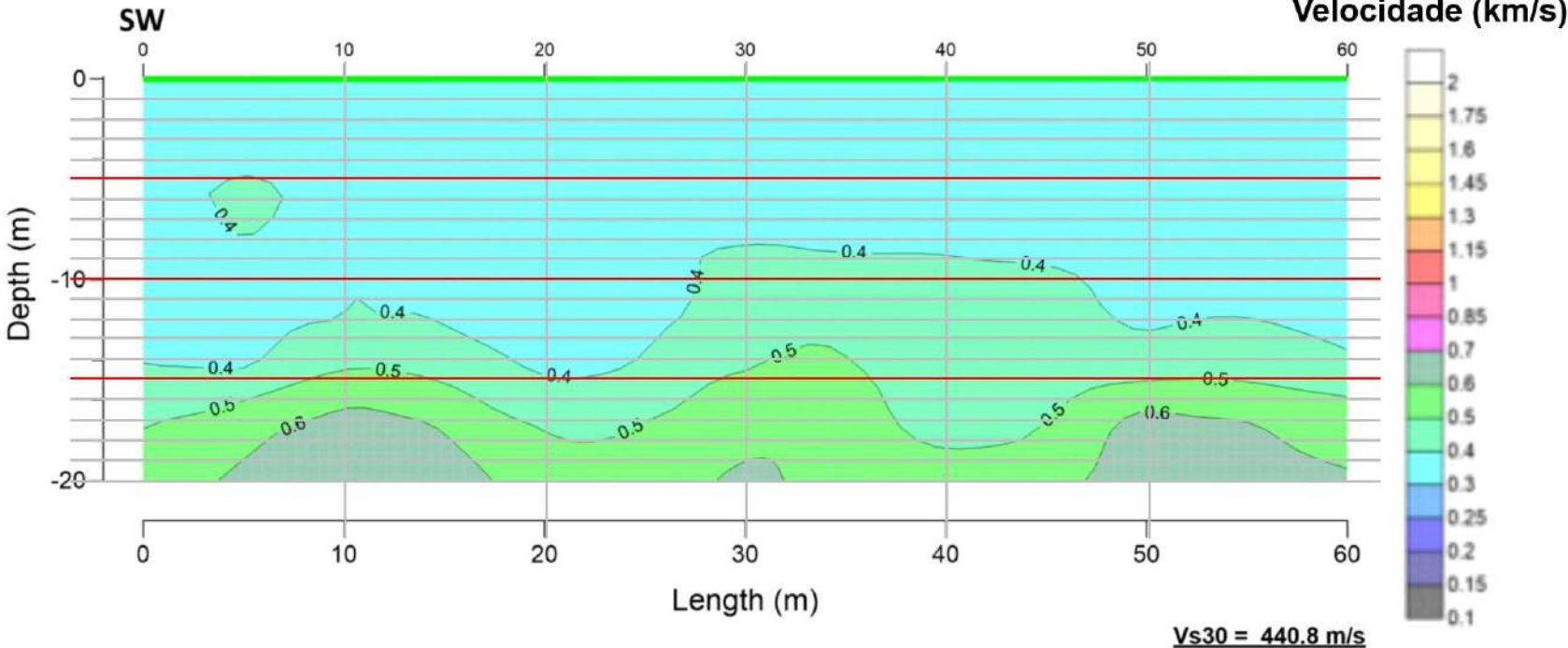


MASW P2

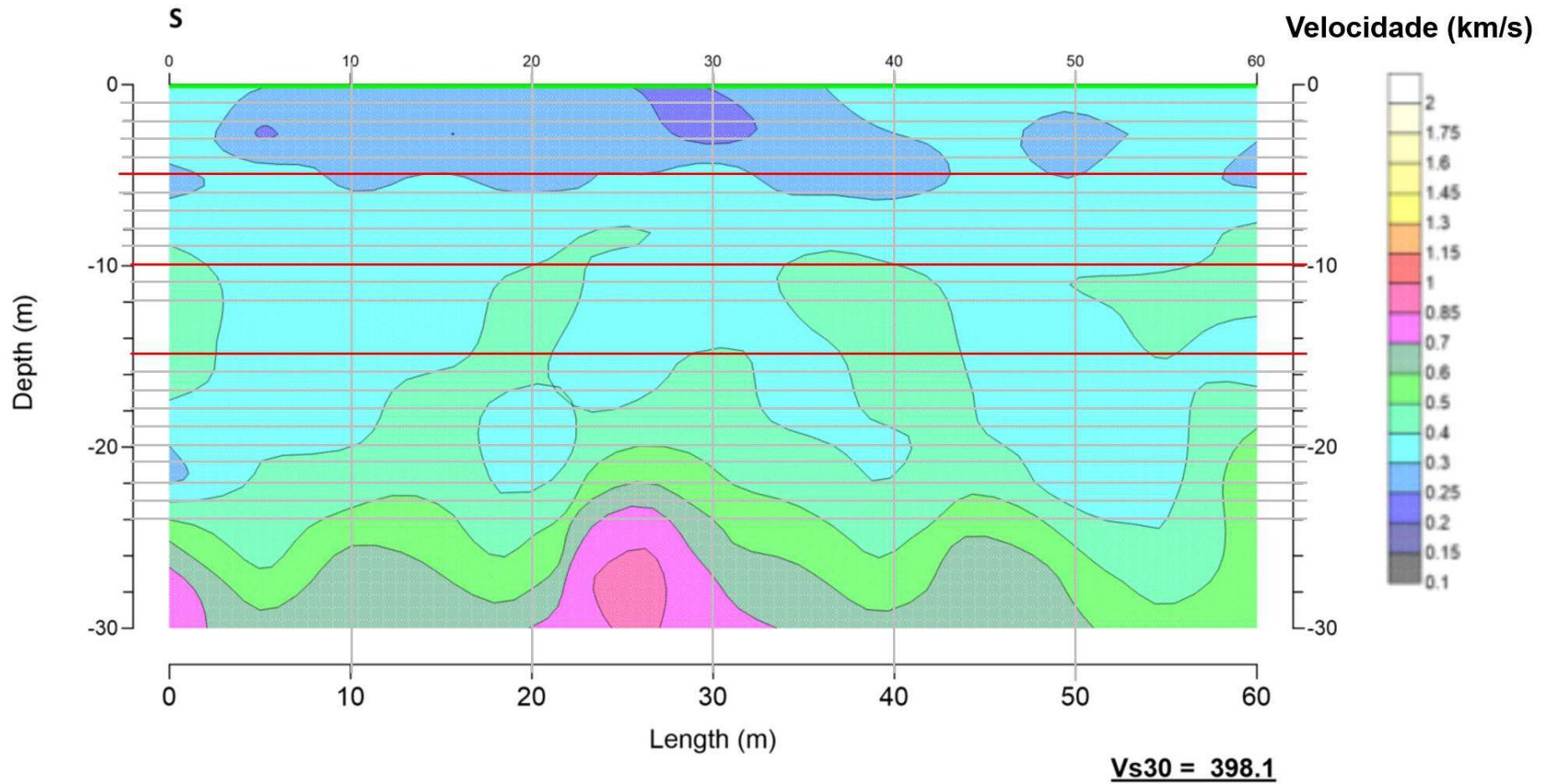




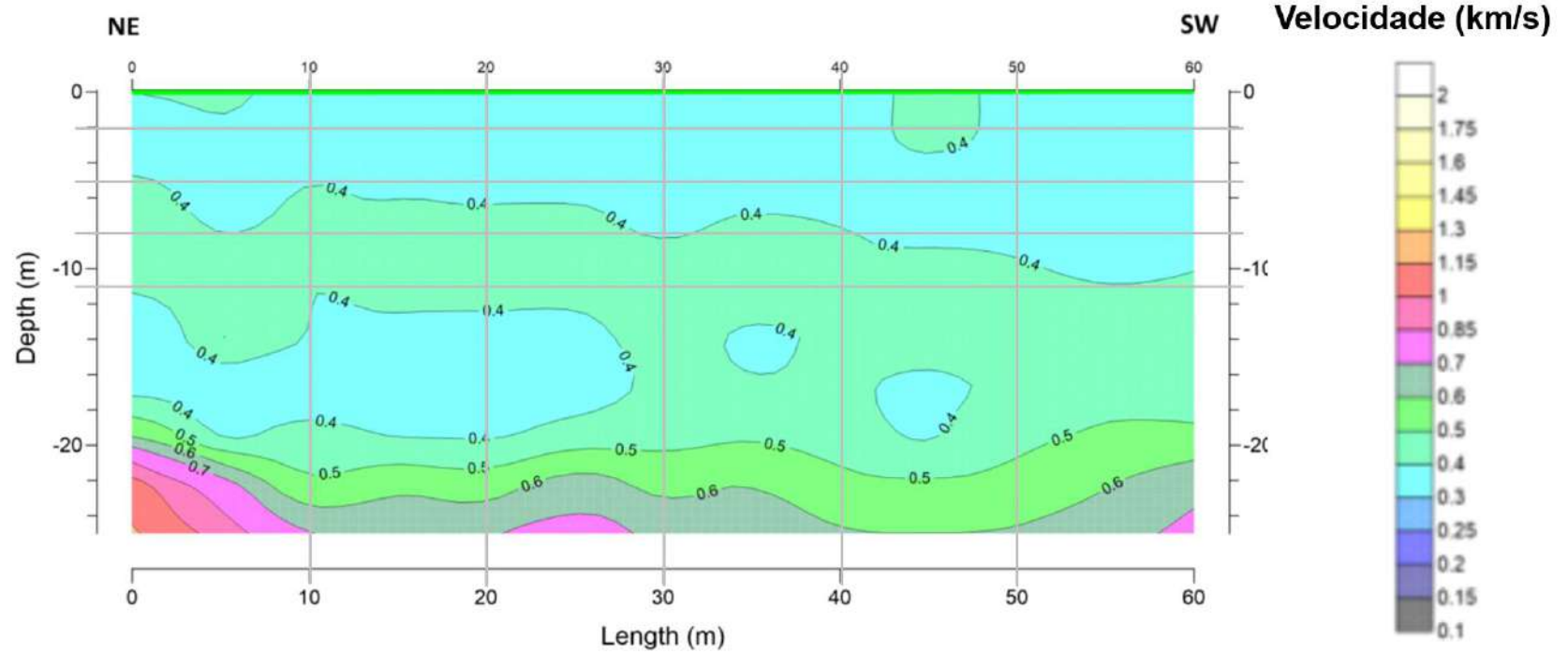
MASW P4



MASW P8

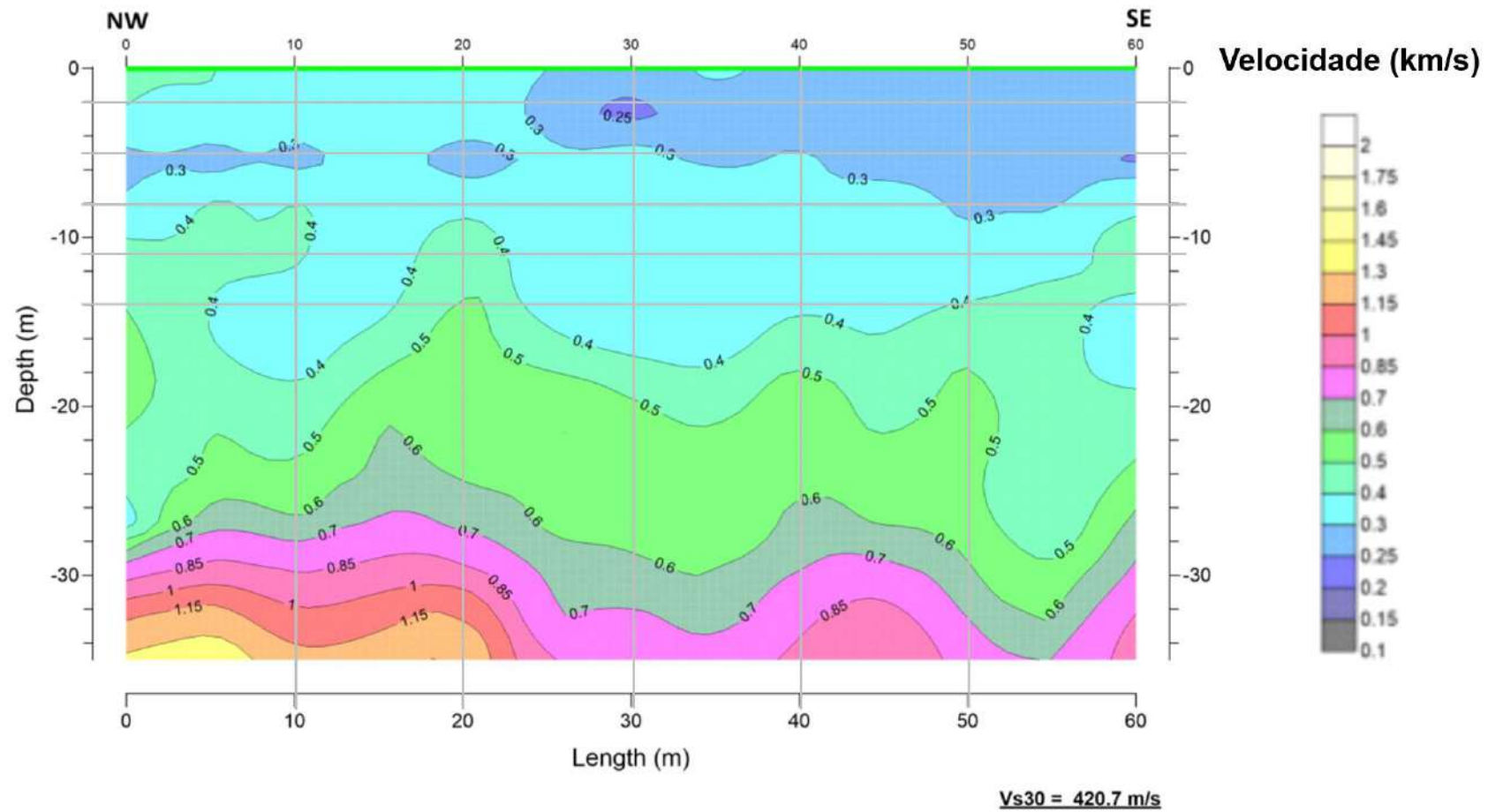


MASW P13

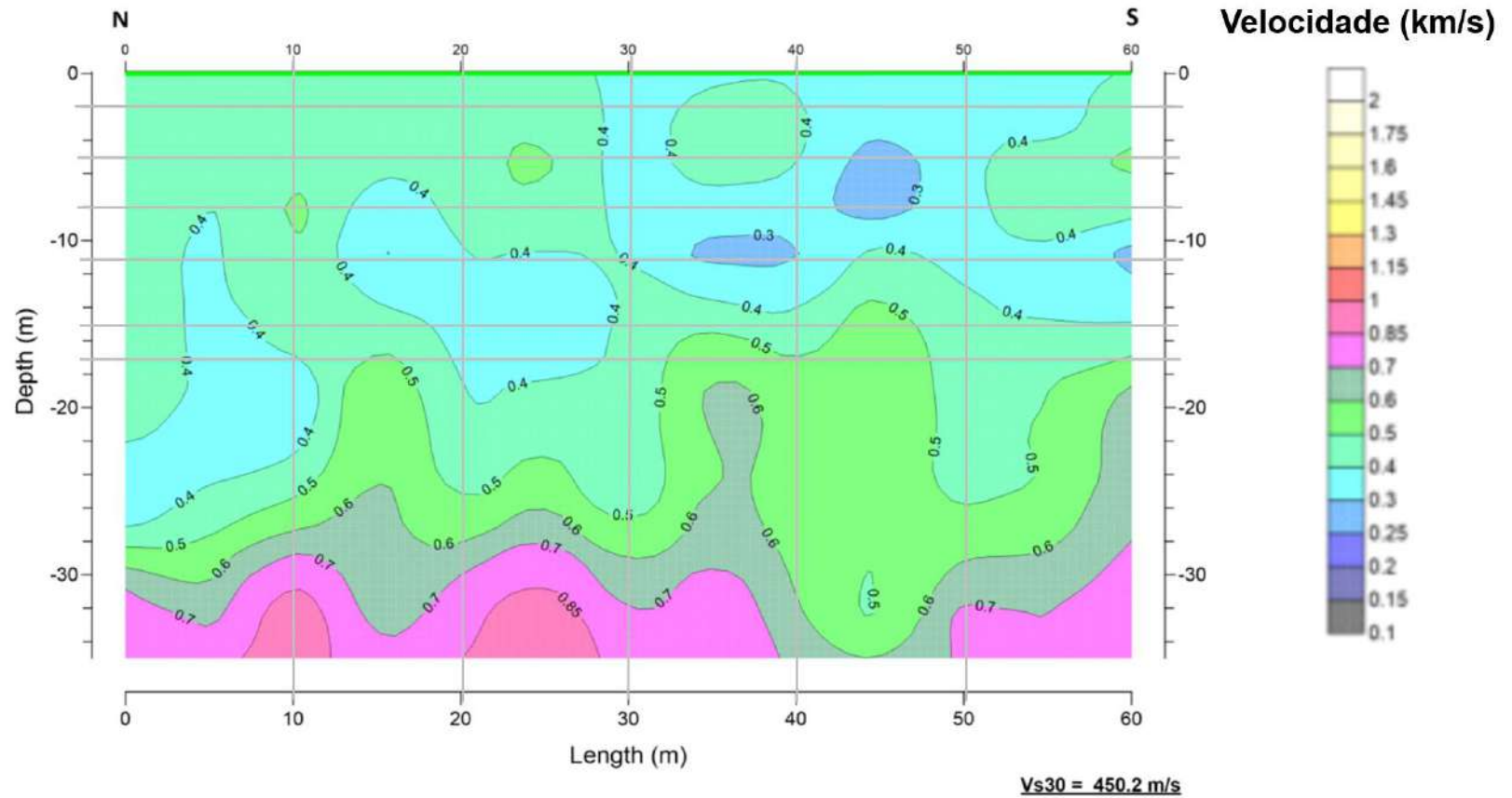


Vs30 = 456.1 m/s

MASW P15

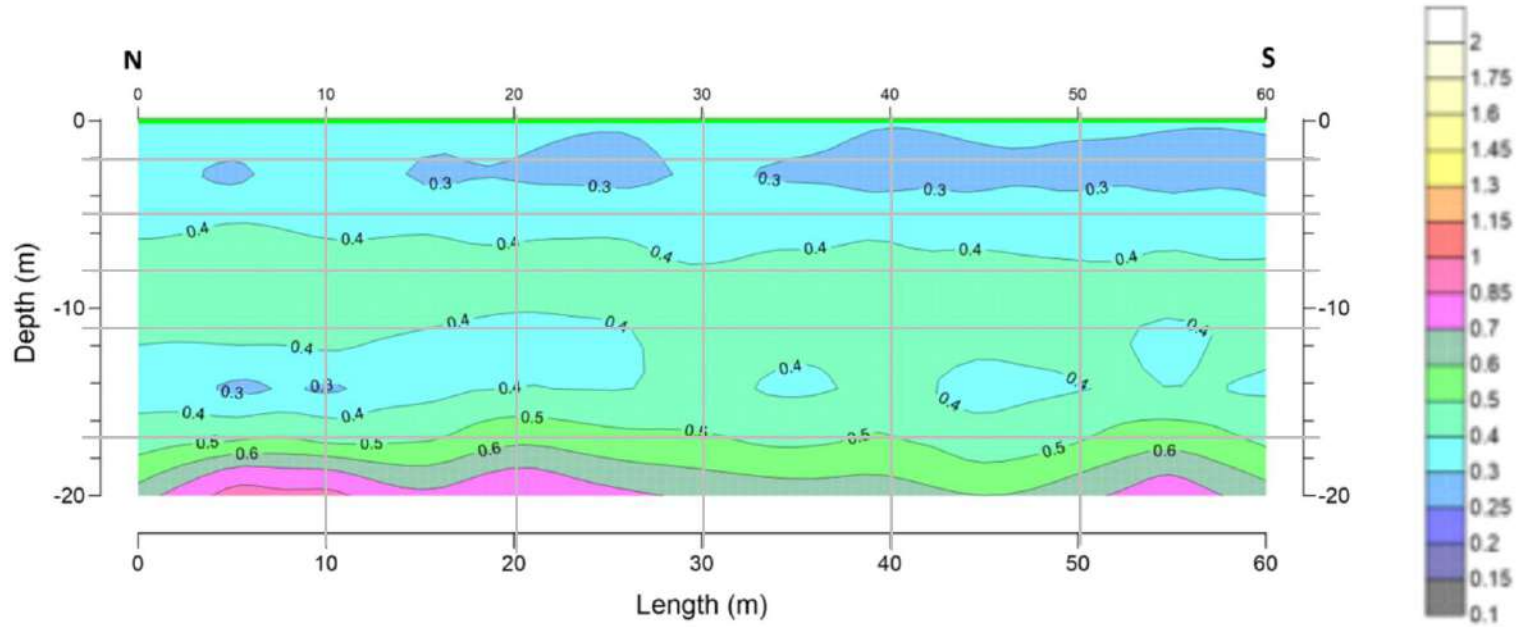


MASW P18



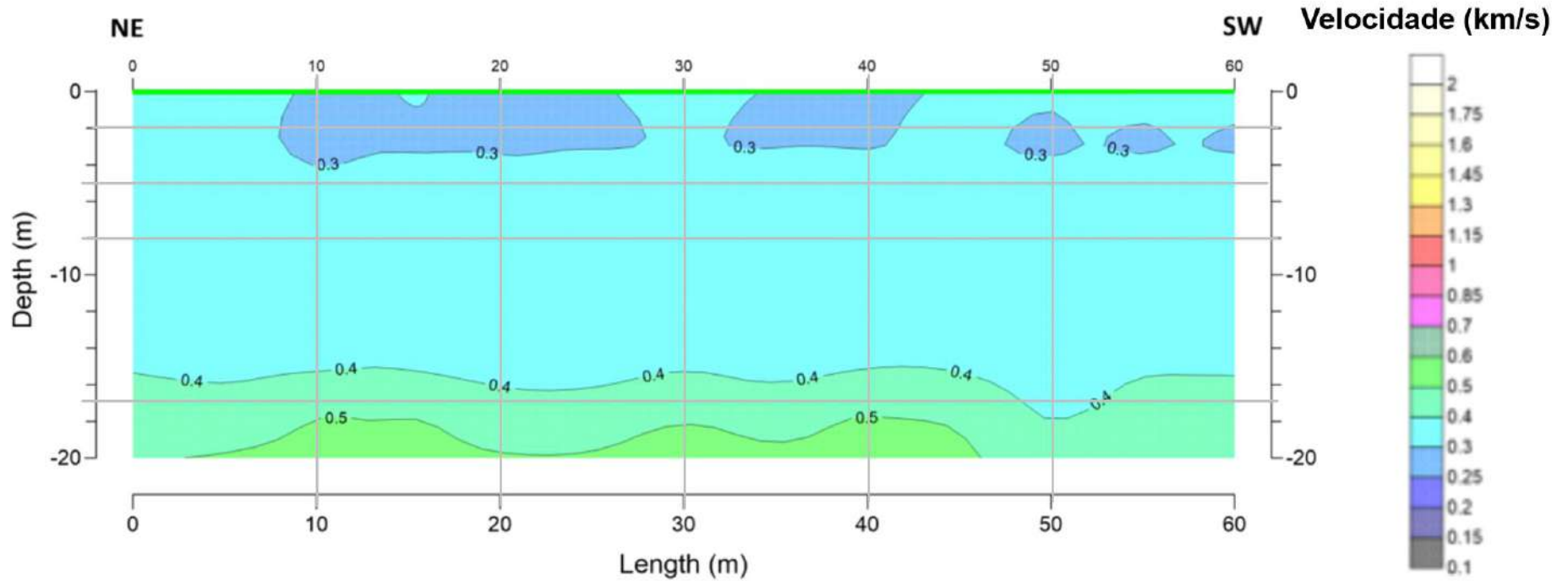
MASW P20

Velocidade (km/s)



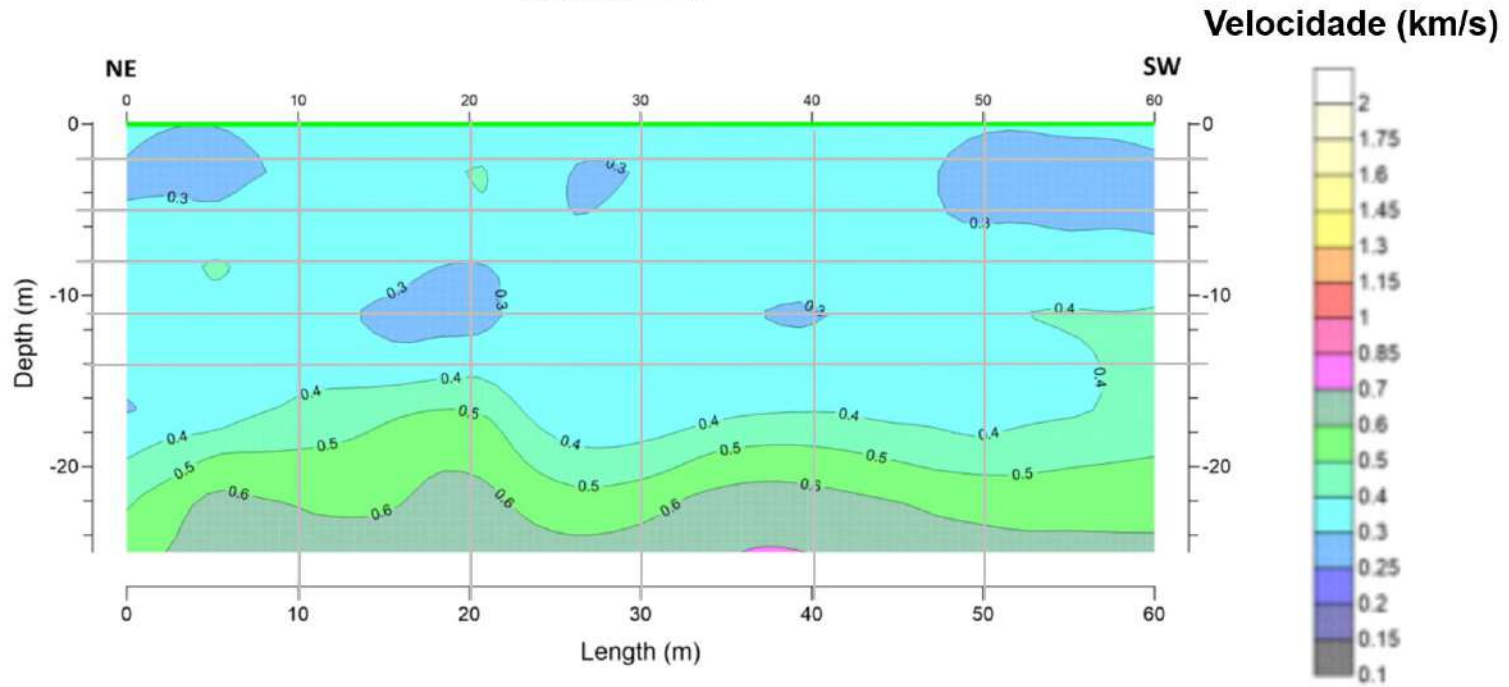
Vs30 = 469.3 m/s

MASW P22



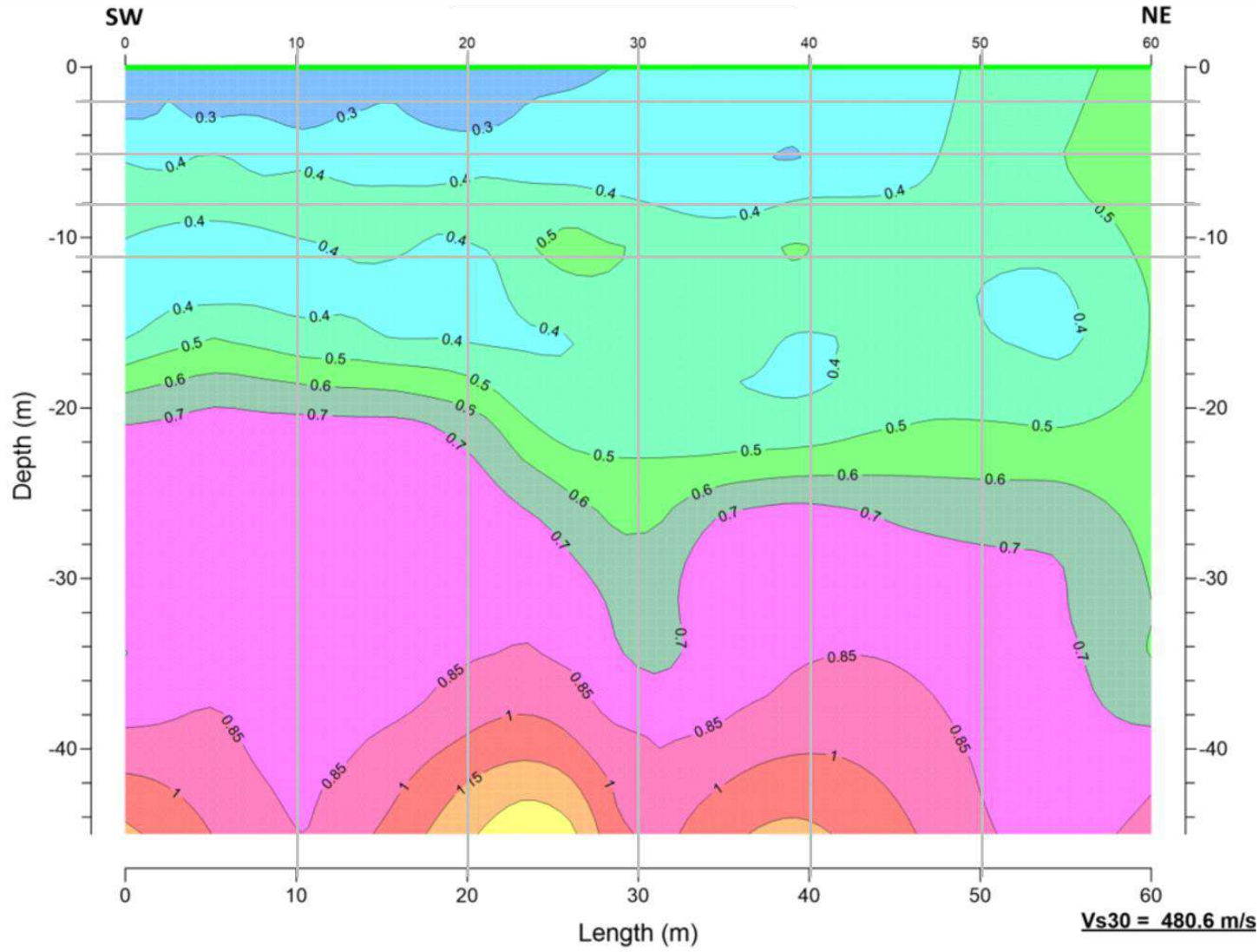
Vs30 = 384.5 m/s

MASW P23

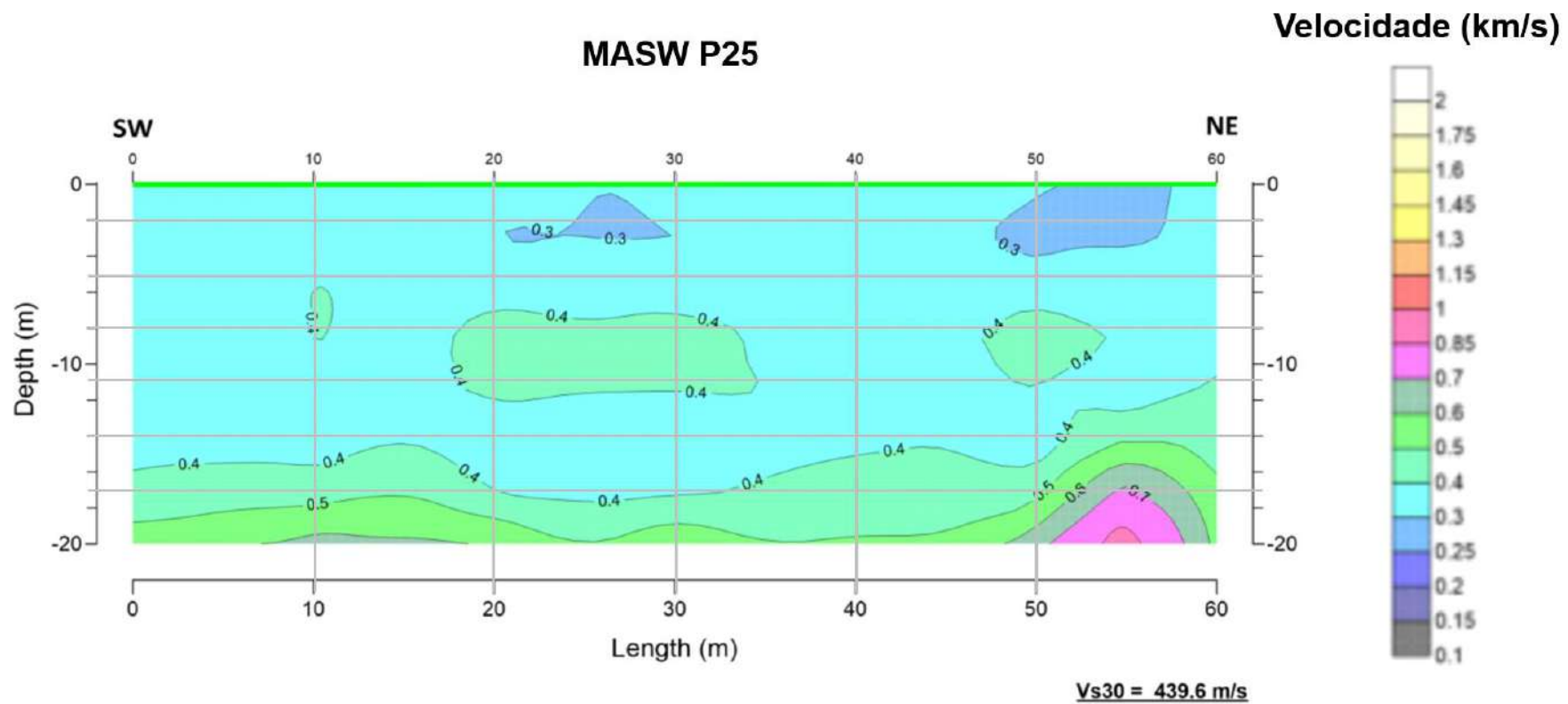


Vs30 = 405.5 m/s

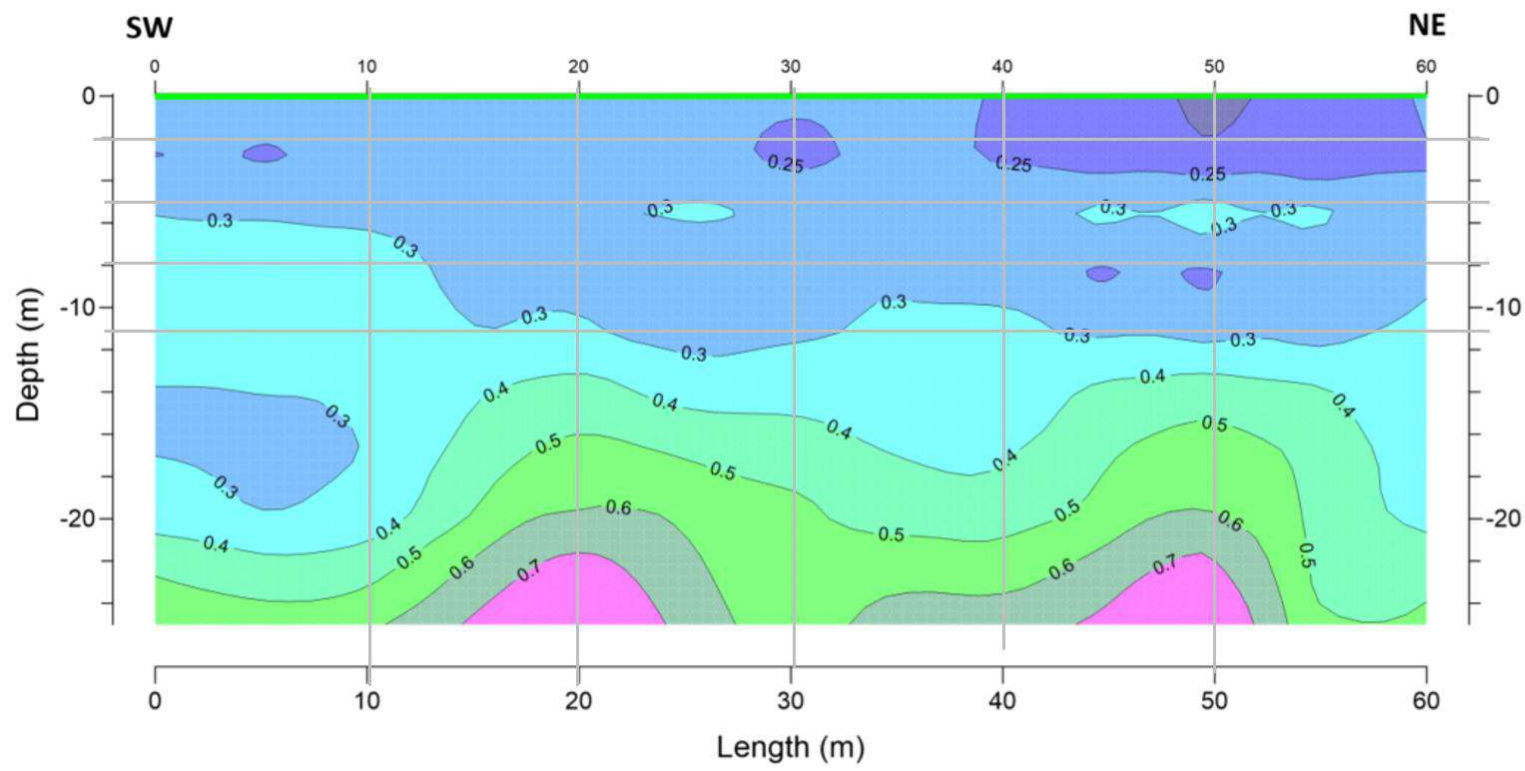
MASW P24



Velocidade (km/s)



MASW P26

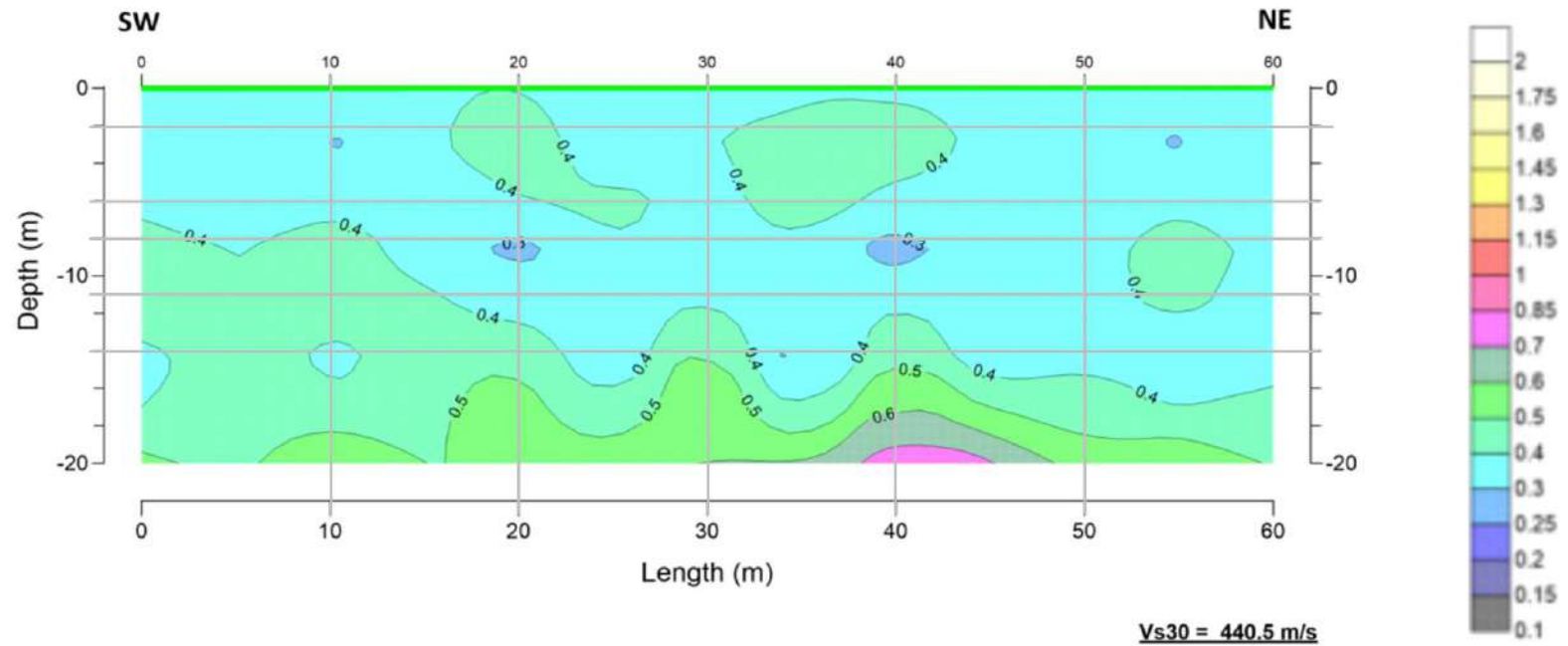


Velocidade (km/s)

Vs30 = 382.9 m/s

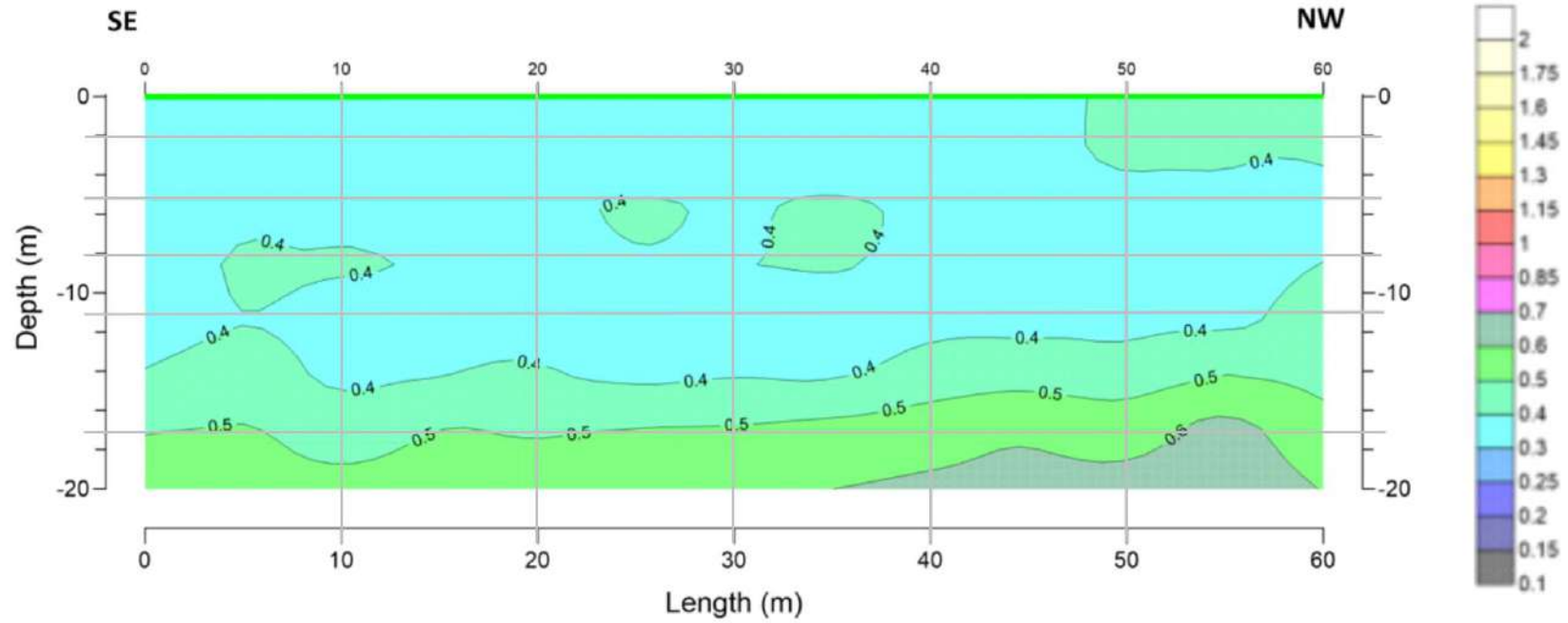
MASW P27

Velocidade (km/s)

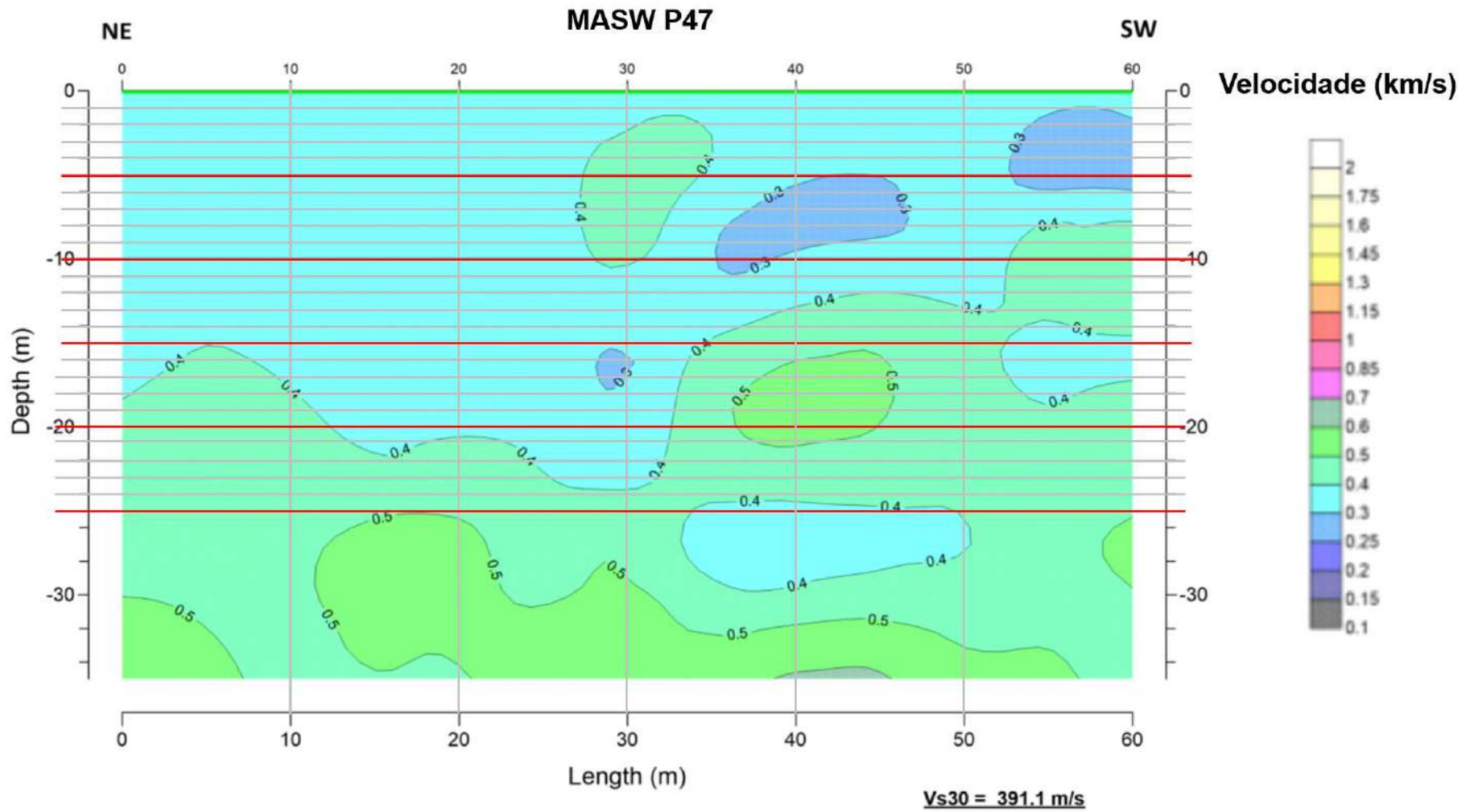


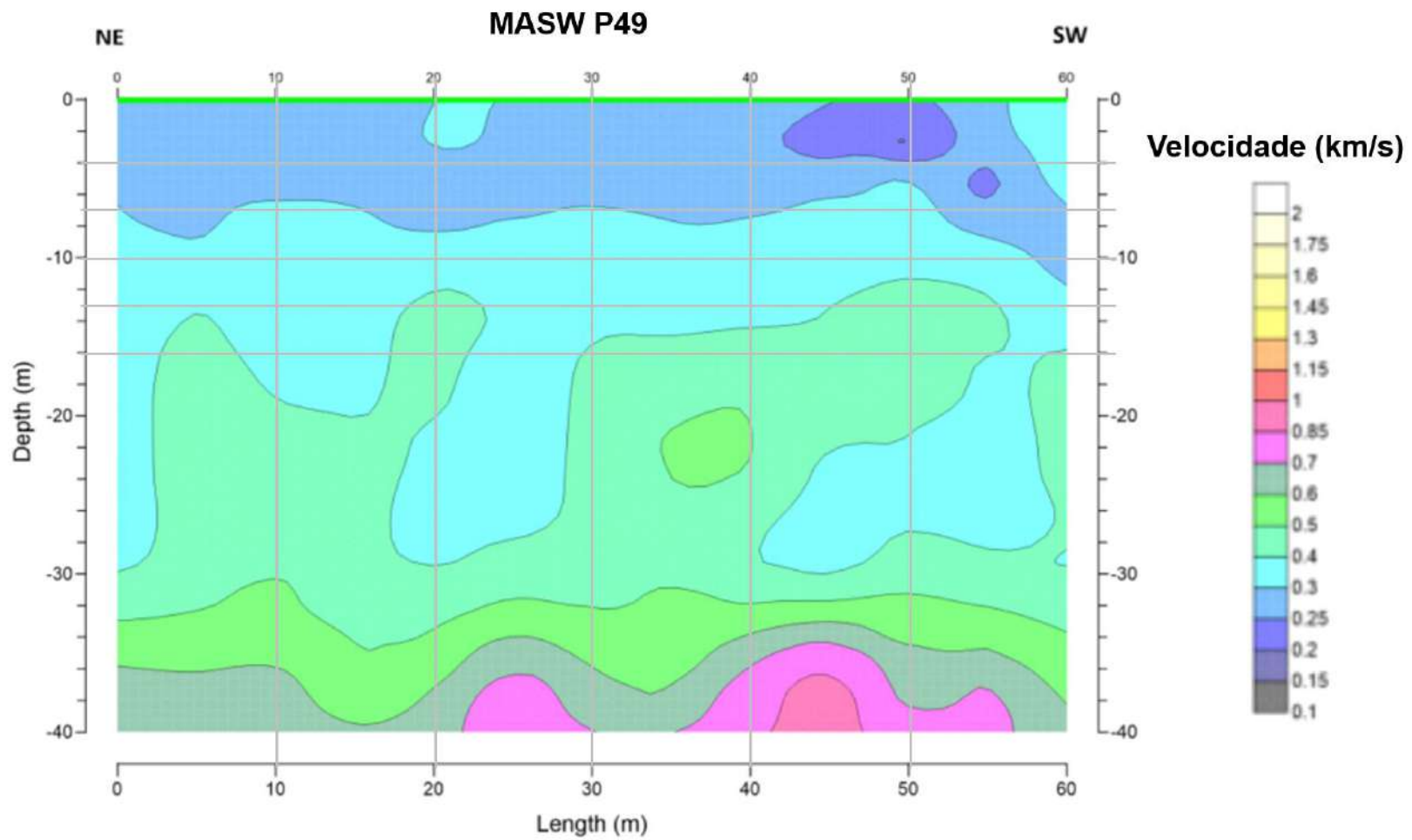
MASW P43

Velocidade (km/s)



Vs30 = 436.9 m/s





Vs30 = 361.2

APÊNDICE F

RESULTADOS DOS V_s E G_0 DAS RELAÇÕES R1 A R19

R1 – Relação 1

A relação R1, consiste na análise dos dados entre o ponto P25 do MASW e o SCPTu 02 da ARB4.

Tabela 43: Resultados compilados do SCPTu 02 da ARB4.

Resultados compilados do SCPTu 02			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	425	307,8	1,70
5	409	307,3	1,84
8	353	238,1	1,91
11	330	200,4	1,84
14	396	334,2	2,13
17	381	301,0	2,07
Média	MV _{S3} = 382,5	G ₀₅ = 281,5	ρ _{med} = 1,91

Tabela 44: Resultado das V_s pontuais do P25 do MASW.

MASW P25	V_s (m/s)								
	X (m)								MV_{S1}
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	350	350	350	350	350	275	350	339	
5	350	350	350	350	350	350	350	350	
8	350	400	450	450	350	450	350	400	
11	350	350	450	450	350	400	400	393	
14	350	350	350	350	350	350	450	364	
17	450	450	400	400	450	500	550	457	
Média	366,7	375,0	391,7	391,7	366,7	387,5	408,3	383,9	
	MV_{S2} = Média total pontual							383,9	
	MV_{S4} = Média geral MASW							439,6	

Tabela 45: Resultado dos G_o's pontuais do P25 do MASW.

MASW P25	G_o (MPa)								
	X (m)								Média G_o
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	G₀₄ = Média G_o em Z	Pela média V_s
2	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	128,7	208,5	197,1	195,9
5	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4

8	234,0	305,6	386,8	386,8	234,0	386,8	234,0	309,7	305,6
11	224,9	224,9	371,8	371,8	224,9	293,8	293,8	286,6	283,4
14	260,7	260,7	260,7	260,7	260,7	260,7	431,0	285,0	282,4
17	419,2	419,2	331,3	331,3	419,2	517,6	626,3	437,7	432,7
Média	262,1	274,1	297,4	297,4	262,1	302,2	336,5	290,3	$G_{02}=287,6$
	G_{03} = Média G total pontual						282,2		
	G_{06} = Média geral G pelo MASW						370,0		

R2 - Relação 2

A relação R2, consiste na análise dos dados entre o ponto P26 do MASW e o SCPTu 03 da ARB4.

Tabela 46: Resultados compilados do SCPTu 03 da ARB4.

Resultados compilados do SCPTu 03			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	305	162,2	1,75
5	618	734,5	1,92
8	474	485,6	2,16
11	402	350,2	2,16
Média	MV _{S3} = 449,8	G ₀₅ = 433,1	ρ _{med} = 2,00

Tabela 47: Resultado das V_s pontuais do P26 do MASW.

MASW P26	V_s (m/s)								
	X (m)							MV_{S1}	
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	275	275	275	225	225	250	250	254	
5	275	275	275	275	275	300	275	279	
8	350	350	275	275	275	250	275	293	
11	350	350	350	275	350	300	350	332	
Média	312,5	312,5	293,8	262,5	281,3	275,0	287,5	289,3	
	MV_{S2} = Média total pontual							289,3	
	MV_{S4} = Média geral MASW							382,9	

Tabela 48: Resultado dos G_o's pontuais do P26 do MASW

MASW P26	G_o (MPa)								
	X (m)							Média G_o	
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	G₀₄ = Média G_o em Z	Pela média V_s
2	132,1	132,1	132,1	88,5	88,5	109,2	109,2	113,1	112,3
5	145,4	145,4	145,4	145,4	145,4	173,0	145,4	149,3	149,2
8	264,6	264,6	163,4	163,4	163,4	135,0	163,4	188,2	185,3
11	265,1	265,1	265,1	163,7	265,1	194,8	265,1	240,6	238,7
Média	201,8	201,8	176,5	140,2	165,6	153,0	170,8	172,8	G ₀₂ = 171,4
	G₀₃ = Média G total pontual						167,2		

G_{06} = Média geral G pelo MASW

293,0

R3 - Relação 3

A relação R3, consiste na análise dos dados entre o ponto P27 do MASW e o SCPTu 04 da ARB4.

Tabela 49: Resultados compilados do SCPTu 04 da ARB4.

Resultados compilados do SCPTu 04			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	296	168,8	1,93
6	376	275,9	1,95
8	386	310,2	2,08
11	462	444,4	2,08
14	419,6	380,9	2,16
Média	MV _{S3} = 387,8	G _{o5} = 316,0	ρ _{med} = 2,04

Tabela 50: Resultado das V_s pontuais do P27 do MASW.

MASW P27	V_s (m/s)								
	X (m)							MV_{S1}	
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	350	350	450	350	450	350	350	379	
6	350	350	400	350	350	350	350	357	
8	450	450	300	350	300	350	350	364	
11	450	450	350	350	350	350	350	379	
14	350	350	450	450	450	350	350	393	
Média	390,0	390,0	390,0	370,0	380,0	350,0	350,0	374,3	
	MV_{S2} = Média total pontual							374,3	
	MV_{S4} = Média geral MASW							440,5	

Tabela 51: Resultado dos G_o's pontuais do P27 do MASW.

MASW P27	G_o (MPa)								
	X (m)							Média G_o	
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
2	236,3	236,3	390,5	236,3	390,5	236,3	236,3	280,3	276,4
6	239,2	239,2	312,4	239,2	239,2	239,2	239,2	249,7	249,1
8	421,8	421,8	187,5	255,2	187,5	255,2	255,2	283,4	276,4
11	421,8	421,8	255,1	255,1	255,1	255,1	255,1	302,8	298,5

14	265,0	265,0	438,1	438,1	438,1	265,0	265,0	339,2	333,9
Média	316,8	316,8	316,7	284,8	302,1	250,2	250,2	291,1	G ₀₂ =286,9
	G₀₃ = Média G total pontual						286,1		
	G₀₆ = Média geral G pelo MASW						396,3		

R4 - Relação 4

A relação R4, consiste na análise dos dados entre o ponto P18 do MASW e o SCPTu 14 da ARB5.

Tabela 52: Resultados compilados do SCPTu 14 da ARB5.

Resultados compilados do SCPTu 14			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	482	388,3	1,67
5	510	435,3	1,68
8	513	503,2	1,91
11	384	290,3	1,97
15	494	525,2	2,15
17	454	419,6	2,03
Média	MV _{S3} = 472,9	G ₀₅ = 427,0	ρ _{med} = 1,90

Tabela 53: Resultado das V_s pontuais do P18 do MASW.

MASW P18	V_s (m/s)								
	X (m)							MV_{S1}	
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	450	450	450	350	400	350	450	414	
5	450	450	450	350	400	350	550	429	
8	450	550	450	350	350	350	450	421	
11	450	450	400	400	300	350	275	375	
15	450	450	350	450	450	450	400	429	
17	450	400	350	450	500	450	500	443	
Média	450,0	458,3	408,3	391,7	400,0	383,3	437,5	418,5	
	MV_{S2} = Média total pontual							418,5	
	MV_{S4} = Média geral MASW							450,2	

Tabela 54: Resultado dos G_o's pontuais do P18 do MASW.

MASW P18	G_o (MPa)								
	X (m)							Média G_o	
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
2	338,1	338,1	338,1	204,5	267,2	204,5	338,1	289,8	286,6
5	339,3	339,3	339,3	205,2	268,1	205,2	506,8	307,7	314,7

8	386,9	577,9	386,9	234,0	234,0	234,0	386,9	339,3	348,7
11	399,2	399,2	315,4	315,4	177,4	241,5	149,1	277,2	285,3
15	435,1	435,1	263,2	435,1	435,1	435,1	343,8	394,6	397,5
17	412,1	325,6	249,3	412,1	508,7	412,1	508,7	399,1	404,1
Média	385,1	402,5	315,4	301,1	315,1	288,7	372,2	334,6	G ₀₂ =339,5
	G₀₃ = Média G total pontual						333,0		
	G₀₆ = Média geral G pelo MASW						385,4		

R5 - Relação 5

A relação R5, consiste na análise dos dados entre o ponto P20 do MASW e o SCPTu 10 da ARB5.

Tabela 55: Resultados compilados do SCPTu 10 da ARB5.

Resultados compilados do SCPTu 10			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	212	73,7	1,64
5	547	535,9	1,79
8	404	337,9	2,07
11	359	271,6	2,11
17	442	378,1	1,94
20	370	268,0	1,96
Média	MV _{S3} = 388,9	G ₀₅ = 310,9	ρ _{med} = 1,92

Tabela 56: Resultado das V_s pontuais do P20 do MASW.

MASW P20	V_s (m/s)								
	X (m)							MV_{S1}	
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	350	350	300	350	275	275	275	311	
5	350	350	350	350	350	350	350	350	
8	450	450	450	400	450	450	450	443	
11	450	450	350	450	450	450	450	436	
17	450	450	550	500	500	500	450	486	
20	650	775	775	650	650	650	650	686	
Média	450,0	470,8	462,5	450,0	445,8	445,8	437,5	451,8	
	MV_{S2} = Média total pontual							451,8	
	MV_{S4} = Média geral MASW							469,3	

Tabela 57: Resultado dos G_o's pontuais do P20 do MASW.

MASW P20	G_o (MPa)								
	X (m)							Média G_o	
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
2	200,5	200,5	147,3	200,5	123,8	123,8	123,8	160,0	158,0

5	219,5	219,5	219,5	219,5	219,5	219,5	219,5	219,5	219,5	219,5
8	419,2	419,2	419,2	331,2	419,2	419,2	419,2	419,2	406,0	406,6
11	427,8	427,8	258,8	427,8	427,8	427,8	427,8	427,8	401,1	403,7
17	392,1	392,1	585,8	484,1	484,1	484,1	392,1	456,9	459,2	
20	826,9	1175,6	1175,6	826,9	826,9	826,9	826,9	826,9	920,3	926,5
Média	414,3	472,4	467,7	415,0	416,9	416,9	401,6	427,3	G₀₂=428,9	
G₀₃ = Média G total pontual							391,4			
G₀₆ = Média geral G pelo MASW							422,3			

R6 - Relação 6

A relação R6, consiste na análise dos dados entre o ponto P22 do MASW e o SCPTu 06 da ARB5.

Tabela 58: Resultados compilados do SCPTu 06 da ARB5.

Resultados compilados do SCPTu 06			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	814	1382,8	2,09
5	307	187,3	1,99
8	392	277,3	1,81
17	278	158,8	2,05
20	246	122,4	2,02
Média	MV _{S3} = 407,6	G _{o5} = 425,7	ρ _{med} = 1,99

Tabela 59: Resultado das V_s pontuais do P22 do MASW.

MASW P22	V_s (m/s)							MV_{S1}	
	X (m)								
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	350	275	275	350	275	275	275	296	
5	350	350	350	350	350	350	350	350	
8	350	350	350	350	350	350	350	350	
17	450	450	450	450	450	350	450	436	
20	450	550	500	550	550	550	550	529	
Média	390,0	395,0	385,0	410,0	395,0	375,0	395,0	392,1	
	MV_{S2} = Média total pontual							392,1	
	MV_{S4} = Média geral MASW							384,5	

Tabela 60: Resultado dos G_o's pontuais do P22 do MASW.

MASW P22	G_o (MPa)							Média G_o	
	X (m)							G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	255,5	157,7	157,7	255,5	157,7	157,7	157,7	185,6	183,2
5	243,5	243,5	243,5	243,5	243,5	243,5	243,5	243,5	243,5
8	221,2	221,2	221,2	221,2	221,2	221,2	221,2	221,2	221,2
17	414,8	414,8	414,8	414,8	414,8	250,9	414,8	388,8	391,4

20	408,8	610,7	504,7	610,7	610,7	610,7	610,7	564,0	566,7
Média	308,8	329,6	308,4	349,1	329,6	296,8	329,6	320,6	G ₀₂ =321,2
	G₀₃ = Média G total pontual						305,9		
	G₀₆ = Média geral G pelo MASW						294,1		

R7 - Relação 7

A relação R7, consiste na análise dos dados entre o ponto P23 do MASW e o SCPTu 05 da ARB5.

Tabela 61: Resultados compilados do SCPTu 05 da ARB5.

Resultados compilados do SCPTu 05			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	299	227,9	2,55
5	386	367,5	2,47
8	386	333,6	2,24
11	300	165,6	2,48
14	446	364,5	2,56
Média	MV _{S3} = 363,3	G ₀₅ = 291,8	ρ _{med} = 2,46

Tabela 62: Resultado das V_s pontuais do P23 do MASW.

MASW P23	V_s (m/s)							MV_{S1}	
	X (m)								
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	300	350	350	350	350	275	275	321	
5	350	350	350	350	350	275	275	329	
8	350	350	300	350	350	350	350	343	
11	350	350	275	350	300	350	400	339	
14	350	350	350	350	350	350	450	364	
Média	340,0	350,0	325,0	350,0	340,0	320,0	350,0	339,3	
	MV_{S2} = Média total pontual							339,3	
	MV_{S4} = Média geral MASW							405,5	

Tabela 63: Resultado dos G_o's pontuais do P23 do MASW.

MASW P23	G_o (MPa)							Média G_o	
	X (m)							G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	229,1	311,8	311,8	311,8	311,8	192,5	192,5	265,9	263,0
5	302,6	302,6	302,6	302,6	302,6	186,8	186,8	266,7	269,5
8	274,8	274,8	201,9	274,8	274,8	274,8	274,8	263,7	264,4
11	303,5	303,5	187,4	303,5	223,0	303,5	396,5	285,2	288,7

14	314,0	314,0	314,0	314,0	314,0	314,0	519,0	340,1	343,3
Média	284,8	301,3	263,5	301,3	285,2	254,3	313,9	284,3	$G_{02}=285,8$
	G_{03} = Média G total pontual						283,2		
	G_{06} = Média geral G pelo MASW						404,5		

R8 - Relação 8

A relação R8, consiste na análise dos dados entre o ponto P24 do MASW e o SCPTu 03 da ARB5.

Tabela 64: Resultados compilados do SCPTu 03 da ARB5.

Resultados compilados do SCPTu 03			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	318	210,6	2,08
5	445	356,2	1,80
8	503	488,5	1,93
11	494	497,8	2,04
Média	MV _{S3} = 440,2	G ₀₅ = 388,3	ρ _{med} = 1,96

Tabela 65: Resultado das V_s pontuais do P24 do MASW.

MASW P24	V_s (m/s)								
	X (m)								MV_{S1}
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	275	275	275	350	350	450	550	361	
5	350	350	350	350	350	450	550	393	
8	450	450	450	400	400	450	550	450	
11	350	350	350	450	500	450	550	429	
Média	356,3	356,3	356,3	387,5	400,0	450,0	550,0	408,0	
	MV_{S2} = Média total pontual							416,7	
	MV_{S4} = Média geral MASW							480,6	

Tabela 66: Resultado dos G_o's pontuais do P24 do MASW.

MASW P24	G_o (MPa)								
	X (m)								Média G_o
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	G₀₄ = Média G_o em Z	Pela média V_s
2	157,1	157,1	157,1	254,4	254,4	420,6	628,3	289,8	270,2
5	219,9	219,9	219,9	219,9	219,9	363,5	543,1	277,1	286,6
8	391,2	391,2	391,2	309,1	309,1	391,2	584,4	391,2	395,3
11	250,0	250,0	250,0	413,2	510,1	413,2	617,3	374,8	386,3
Média	254,5	254,5	254,5	299,2	323,4	397,1	593,2	333,2	G ₀₂ = 334,6
	G₀₃ = Média G total pontual						340,5		

G_{06} = Média geral G pelo MASW

453,0

R9 - Relação 9

A relação R9, consiste na análise dos dados entre o ponto P13 do MASW e o SCPTu 05 da ARB6.

Tabela 67: Resultados compilados do SCPTu 05 da ARB6.

Resultados compilados do SCPTu 05			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	145	38,8	1,83
5	178	60,2	1,91
8	273	136,4	1,83
11	228	97,8	1,88
Média	MV _{S3} = 206,0	G _{o5} = 83,3	ρ _{med} = 1,86

Tabela 68: Resultado das V_s pontuais do P13 do MASW.

MASW P13	V_s (m/s)								
	X (m)								MV_{S1}
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	350	350	350	350	350	350	350	350	350
5	400	400	350	350	350	350	350	350	364
8	450	450	450	400	400	350	350	350	407
11	400	450	450	450	450	450	450	450	443
Média	400,0	412,5	400,0	387,5	387,5	375,0	375,0	375,0	391,1
	MV_{S2} = Média total pontual							391,1	
	MV_{S4} = Média geral MASW							456,1	

Tabela 69: Resultado dos G_o's pontuais do P13 do MASW.

MASW P13	G_o (MPa)								
	X (m)								Média G_o
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
2	224,8	224,8	224,8	224,8	224,8	224,8	224,8	224,8	224,8
5	305,5	305,5	233,9	233,9	233,9	233,9	233,9	253,4	254,4
8	371,6	371,6	371,6	293,6	293,6	224,8	224,8	304,2	307,3
11	300,1	379,8	379,8	379,8	379,8	379,8	379,8	367,8	368,4
Média	300,5	320,4	302,5	283,0	283,0	265,8	265,8	287,5	G _{o2} = 288,7
	G_{o3} = Média G total pontual						285,0		

G_{06} = Média geral G pelo MASW

387,7

R10 - Relação 10

A relação R10, consiste na análise dos dados entre o ponto P15 do MASW e o SCPTu 02 da ARB6.

Tabela 70: Resultados compilados do SCPTu 02 da ARB6.

Resultados compilados do SCPTu 02			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	239	116,1	2,03
5	341	199,7	1,72
8	316	181,9	1,82
11	375	269,1	1,92
14	384	299,7	2,04
Média	MV _{S3} = 330,8	G ₀₅ = 213,3	ρ _{med} = 1,91

Tabela 71: Resultado das V_s pontuais do P15 do MASW.

MASW P15	V_s (m/s)								
	X (m)							MV_{S1}	
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	400	350	350	250	275	275	275	311	
5	300	300	275	300	300	275	275	289	
8	350	400	350	350	350	275	350	346	
11	450	450	450	350	350	350	450	407	
14	450	350	500	350	350	400	350	393	
Média	390,0	370,0	385,0	320,0	325,0	315,0	340,0	349,3	
	MV_{S2} = Média total pontual							349,3	
	MV_{S4} = Média geral MASW							420,7	

Tabela 72: Resultado dos G_o's pontuais do P15 do MASW.

MASW P15	G_o (MPa)								
	X (m)							Média G_o	
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
2	325,1	248,9	248,9	127,0	153,7	153,7	153,7	201,6	196,2
5	154,7	154,7	130,0	154,7	154,7	130,0	130,0	143,9	144,1
8	223,0	291,2	223,0	223,0	223,0	137,6	223,0	218,4	220,5
11	388,6	388,6	388,6	235,1	235,1	235,1	388,6	318,1	322,8

14	412,3	249,4	509,0	249,4	249,4	325,8	249,4	314,2	320,7
Média	300,7	266,6	299,9	197,8	203,2	196,4	228,9	239,2	G ₀₂ =241,9
	G₀₃ = Média G total pontual						232,4		
	G₀₆ = Média geral G pelo MASW						337,2		

R11 - Relação 11

A relação R11, consiste na análise dos dados entre o ponto P43 do MASW e o SCPTu 07 da ARB6.

Tabela 73: Resultados compilados do SCPTu 07 da ARB6.

Resultados compilados do SCPTu 07			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
2	299	142,3	1,60
5	398	294,7	1,86
8	358	254,3	1,99
11	335	207,0	1,85
17	314	196,4	1,99
Média	MV _{S3} = 340,5	G _{o5} = 218,9	ρ _{med} = 1,86

Tabela 74: Resultado das V_s pontuais do P43 do MASW.

MASW P43	V_s (m/s)							MV_{S1}	
	X (m)								
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	350	350	350	350	350	450	450	379	
5	350	350	350	350	350	350	350	350	
8	350	400	350	350	350	350	350	357	
11	350	350	350	350	350	350	450	364	
17	450	450	500	500	550	550	550	507	
Média	370,0	380,0	380,0	380,0	390,0	410,0	430,0	391,4	
	MV_{S2} = Média total pontual							391,4	
	MV_{S4} = Média geral MASW							436,9	

Tabela 75: Resultado dos G_o's pontuais do P43 do MASW.

MASW P43	G_o (MPa)							Média G_o	
	X (m)							G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
2	195,7	195,7	195,7	195,7	195,7	323,5	323,5	232,2	228,9
5	228,5	228,5	228,5	228,5	228,5	228,5	228,5	228,5	228,5
8	243,5	318,0	243,5	243,5	243,5	243,5	243,5	253,5	254,1
11	226,5	226,5	226,5	226,5	226,5	226,5	374,4	245,4	247,6

17	403,1	403,1	497,6	497,6	602,1	602,1	602,1	512,0	515,4
Média	259,4	274,3	278,3	278,3	299,2	324,8	354,4	294,3	G ₀₂ =294,9
	G₀₃ = Média G total pontual						284,7		
	G₀₆ = Média geral G pelo MASW						354,6		

R12 - Relação 12

A relação R12, consiste na análise dos dados entre o ponto P4 do MASW e o SCPTu 01 da ARB9.

Tabela 76: Resultados compilados do SCPTu 01 da ARB9.

Resultados compilados do SCPTu 01			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
1	178	54,9	1,73
2	316	173	1,73
3	1118	2166	1,73
4	197	67,3	1,73
5	321	179	1,73
6	433	325	1,73
7	376	245	1,73
8	370	237	1,73
9	342	203	1,73
10	321	179	1,73
11	328	186	1,73
12	360	225	1,73
13	355	218	1,73
14	348	210	1,73
15	372	240	1,73
16	395	270	1,73
17	451	352	1,73
18	389	262	1,73
19	367	233	1,73
20	353	216	1,73
Média	MV_{S3} = 384,5	G₀₅ = 312,1	ρ_{med} = 1,73

Tabela 77: Resultado das V_s pontuais do P4 do MASW.

MASW P4	V_s (m/s)							MV_{S1}
	X (m)							
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	
1	350	350	350	350	350	350	350	350
2	350	350	350	350	350	350	350	350
3	350	350	350	350	350	350	350	350
4	350	350	350	350	350	350	350	350
5	350	350	350	350	350	350	350	350

6	350	350	350	350	350	350	350	350	
7	350	350	350	350	350	350	350	350	
8	350	350	350	350	350	350	350	350	
9	350	350	350	450	400	350	350	371	
10	350	350	350	450	450	350	350	379	
11	350	350	350	450	450	350	350	379	
12	350	450	350	450	450	350	350	393	
13	350	450	350	450	450	450	350	407	
14	350	450	350	450	450	450	450	421	
15	450	550	400	550	450	500	450	479	
16	450	550	450	550	450	550	500	500	
17	450	650	450	550	450	600	550	529	
18	550	650	500	550	450	650	550	557	
19	550	650	550	600	550	650	550	586	
20	550	650	550	650	550	650	600	600	
Média	395,0	445,0	390,0	447,5	417,5	435,0	410,0	420,0	
	MV_{s2} = Média total pontual							420,0	
	MV_{s4} = Média geral MASW							440,8	

Tabela 78: Resultado dos G_o 's pontuais do P4 do MASW.

MASW P4	G_o (MPa)								Média G_o	Pela média V_s
	X (m)									
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	$G_{o4} =$ Média G_o em Z		
1	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	
2	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	
3	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	
4	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	
5	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	
6	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	
7	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	
8	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	
9	211,9	211,9	211,9	350,3	276,8	211,9	211,9	238,7	241,0	
10	211,9	211,9	211,9	350,3	350,3	211,9	211,9	247,9	251,5	
11	211,9	211,9	211,9	350,3	350,3	211,9	211,9	247,9	251,5	
12	211,9	350,3	211,9	350,3	350,3	211,9	211,9	267,0	271,2	
13	211,9	350,3	211,9	350,3	350,3	350,3	211,9	286,8	291,0	
14	211,9	350,3	211,9	350,3	350,3	350,3	350,3	307,3	310,8	

15	350,3	523,3	276,8	523,3	350,3	432,5	350,3	396,2	401,0
16	350,3	523,3	350,3	523,3	350,3	523,3	432,5	432,5	436,2
17	350,3	730,9	350,3	523,3	350,3	622,8	523,3	483,3	493,1
18	523,3	730,9	432,5	523,3	350,3	730,9	523,3	537,0	545,0
19	523,3	730,9	523,3	622,8	523,3	730,9	523,3	593,5	596,9
20	523,3	730,9	523,3	730,9	523,3	730,9	622,8	622,8	626,5
Média	279,4	367,6	271,2	362,2	308,6	350,8	304,0	317,8	G ₀₂ =320,5
	G₀₃ = Média G total pontual							305,2	
	G₀₆ = Média geral G pelo MASW							336,1	

R13 - Relação 13

A relação R13, consiste na análise dos dados entre o ponto P8 do MASW e o SCPTu 05 da ARB9.

Tabela 79: Resultados compilados do SCPTu 05 da ARB9.

Resultados compilados do SCPTu 05			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
1	124	26,6	1,73
2	148	38	1,73
3	287	143	1,73
4	309	165	1,73
5	276	132	1,73
6	265	122	1,73
7	223	86,2	1,73
8	169	49,5	1,73
9	282	138	1,73
10	498	430	1,73
11	570	563	1,73
12	527	481	1,73
15	372	240	1,73
16	343	204	1,73
17	342	203	1,73
18	339	199	1,73
19	340	200	1,73
20	326	184	1,73
21	376	245	1,73
Média	MV_{S3} = 321,9	G₀₅ = 202,6	ρ_{med} = 1,7

Tabela 80: Resultado das V_s pontuais do P8 do MASW.

MASW P8	V_s (m/s)							MV_{S1}
	X (m)							
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	
1	350	275	275	225	350	350	350	311
2	350	275	275	225	350	275	350	300
3	350	275	275	225	300	275	300	286
4	350	275	275	275	275	275	275	286
5	275	275	275	350	275	300	275	289
6	275	300	300	350	275	350	300	307

7	350	350	350	350	350	350	350	350
8	350	350	350	350	350	350	400	357
9	400	350	350	350	350	350	450	371
10	450	350	400	350	400	350	450	393
11	450	350	450	350	450	400	450	414
12	450	350	450	350	450	350	450	407
15	450	350	450	450	450	350	350	407
16	450	350	450	450	450	350	350	407
17	450	350	350	450	450	350	400	400
18	350	350	350	450	450	350	450	393
19	350	350	350	450	400	350	500	393
20	300	400	350	450	350	350	550	393
21	275	450	350	500	400	350	550	411
Média	369,7	335,5	351,3	365,8	375,0	338,2	397,4	361,8
	MV_{S2} = Média total pontual						361,8	
	MV_{S4} = Média geral MASW						398,1	

Tabela 81: Resultado dos G_o's pontuais do P8 do MASW.

MASW P8	G _o (MPa)								Média G _o	Pela média V _s
	X (m)							G _{o4} = Média G _o em Z		
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60			
1	211,9	130,8	130,8	87,6	211,9	211,9	211,9	171,0	167,0	
2	211,9	130,8	130,8	87,6	211,9	130,8	211,9	155,7	159,4	
3	211,9	130,8	130,8	87,6	155,7	130,8	155,7	141,2	143,3	
4	211,9	130,8	130,8	130,8	130,8	130,8	130,8	141,2	142,4	
5	130,8	130,8	130,8	211,9	130,8	155,7	130,8	144,8	146,0	
6	130,8	155,7	155,7	211,9	130,8	211,9	155,7	163,2	164,7	
7	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	
8	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	276,8	220,7	221,2	
9	276,8	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	350,3	238,7	241,0	
10	350,3	211,9	276,8	211,9	276,8	211,9	350,3	267,0	270,0	
11	350,3	211,9	350,3	211,9	350,3	276,8	350,3	296,9	300,3	
12	350,3	211,9	350,3	211,9	350,3	211,9	350,3	286,8	291,0	
15	350,3	211,9	350,3	350,3	350,3	211,9	211,9	286,8	291,0	
16	350,3	211,9	350,3	350,3	350,3	211,9	211,9	286,8	291,0	
17	350,3	211,9	211,9	350,3	350,3	211,9	276,8	276,8	280,5	
18	211,9	211,9	211,9	350,3	350,3	211,9	350,3	267,0	271,2	

19	211,9	211,9	211,9	350,3	276,8	211,9	432,5	267,0	272,5
20	155,7	276,8	211,9	350,3	211,9	211,9	523,3	267,0	277,4
21	130,8	350,3	211,9	432,5	276,8	211,9	523,3	291,8	305,4
Média	243,3	198,3	220,2	243,3	250,1	199,6	285,1	230,6	G ₀₂ =234,1
G₀₃ = Média G total pontual							226,5		
G₀₆ = Média geral G pelo MASW							274,2		

R14 - Relação 14

A relação R14, consiste na análise dos dados entre o ponto P47 do MASW e o SCPTu 07da ARB9.

Tabela 82: Resultados compilados do SCPTu 07 da ARB9.

Resultados compilados do SCPTu 07			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
1	129	28,8	1,73
2	292	148	1,73
3	332	191	1,73
4	844	1234	1,73
5	349	211	1,73
6	372	240	1,73
7	462	370	1,73
8	389	262	1,73
9	356	220	1,73
10	308	164	1,73
11	312	169	1,73
12	337	197	1,73
13	392	266	1,73
14	349	211	1,73
15	328	186	1,73
16	386	258	1,73
17	397	273	1,73
18	374	242	1,73
19	413	296	1,73
20	414	297	1,73
21	434	326	1,73
22	435	328	1,73
23	383	254	1,73
24	376	245	1,73
25	316	173	1,73
Média	MV_{S3} = 379,2	G_{o5} = 271,59	ρ_{med} = 1,73

Tabela 83: Resultado das V_s pontuais do P47 do MASW.

MASW P47	V_s (m/s)							MV_{S1}
	X (m)							
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	

1	350	350	350	350	350	350	350	350	
2	350	350	350	350	350	350	300	343	
3	350	350	350	450	350	350	275	354	
4	350	350	350	450	350	350	275	354	
5	350	350	350	450	350	350	275	354	
6	350	350	350	450	300	350	300	350	
7	350	350	350	450	275	350	350	354	
8	350	350	350	450	275	350	400	361	
9	350	350	350	450	275	350	450	368	
10	350	350	350	450	350	350	450	379	
11	350	350	350	350	350	350	450	364	
12	350	350	350	350	350	350	450	364	
13	350	350	350	350	400	400	450	379	
14	350	350	350	350	450	450	450	393	
15	350	350	350	350	450	450	350	379	
16	350	350	350	300	500	450	350	379	
17	350	350	350	300	500	450	450	393	
18	350	400	350	350	550	450	450	414	
19	450	450	350	350	550	450	450	436	
20	450	450	350	350	550	450	450	436	
21	450	450	450	350	500	450	450	443	
22	450	450	450	350	450	450	450	436	
23	450	450	450	350	450	450	450	436	
24	450	450	450	450	450	450	450	450	
25	450	450	450	450	350	450	450	436	
Média	378,0	380,0	370,0	386,0	403,0	400,0	399,0	388,0	
	MV_{S2} = Média total pontual							388,0	
	MV_{S4} = Média geral MASW							391,1	

Tabela 84: Resultado dos G_o 's pontuais do P47 do MASW.

MASW P47	G_o (MPa)								Média G_o	Pela média V_s
	X (m)							$G_{o4} =$ Média G_o em Z		
	Z (m)	0	10	20	30	40	50			
1	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9
2	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	155,7	203,4	203,9
3	211,9	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	211,9	130,8	216,3	220,1
4	211,9	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	211,9	130,8	216,3	220,1

5	211,9	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	130,8	216,3	220,1
6	211,9	211,9	211,9	350,3	155,7	211,9	155,7	211,9	215,6
7	211,9	211,9	211,9	350,3	130,8	211,9	211,9	216,3	220,1
8	211,9	211,9	211,9	350,3	130,8	211,9	276,8	225,1	229,4
9	211,9	211,9	211,9	350,3	130,8	211,9	350,3	234,1	239,9
10	211,9	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	350,3	247,9	251,5
11	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	350,3	229,6	231,7
12	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	350,3	229,6	231,7
13	211,9	211,9	211,9	211,9	276,8	276,8	350,3	247,9	250,2
14	211,9	211,9	211,9	211,9	350,3	350,3	350,3	267,0	271,2
15	211,9	211,9	211,9	211,9	350,3	350,3	211,9	247,9	251,5
16	211,9	211,9	211,9	155,7	432,5	350,3	211,9	247,9	255,2
17	211,9	211,9	211,9	155,7	432,5	350,3	350,3	267,0	274,9
18	211,9	276,8	211,9	211,9	523,3	350,3	350,3	296,9	305,2
19	350,3	350,3	211,9	211,9	523,3	350,3	350,3	328,4	335,5
20	350,3	350,3	211,9	211,9	523,3	350,3	350,3	328,4	335,5
21	350,3	350,3	350,3	211,9	432,5	350,3	350,3	339,3	342,3
22	350,3	350,3	350,3	211,9	350,3	350,3	350,3	328,4	330,6
23	350,3	350,3	350,3	211,9	350,3	350,3	350,3	328,4	330,6
24	350,3	350,3	350,3	350,3	350,3	350,3	350,3	350,3	350,3
25	350,3	350,3	350,3	350,3	211,9	350,3	350,3	328,4	330,6
Média	250,7	253,3	239,6	262,8	294,1	281,0	283,3	262,6	G ₀₂ =266,4
	G₀₃ = Média G total pontual						260,4		
	G₀₆ = Média geral G pelo MASW						264,6		

R15 - Relação 15

A relação R15, consiste na análise dos dados entre o ponto P47 do MASW e o SCPTu 08 da ARB9.

Tabela 85: Resultados compilados do SCPTu 08 da ARB9.

Resultados compilados do SCPTu 08			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
1	169	49,5	1,73
2	801	1112	1,73
3	283	139	1,73
4	659	753	1,73
5	410	291	1,73
6	494	423	1,73
7	358	222	1,73
8	297	153	1,73
9	243	102	1,73
10	387	260	1,73
11	343	204	1,73
12	339	199	1,73
13	328	186	1,73
14	361	226	1,73
15	336	196	1,73
16	412	294	1,73
17	391	265	1,73
18	383	254	1,73
19	317	174	1,73
20	340	200	1,73
21	293	149	1,73
22	288	144	1,73
23	290	146	1,73
24	296	152	1,73
25	318	175	1,73
Média	MV_{S3} = 365,4	G_{o5} = 258,74	ρ_{med} = 1,73

Tabela 86: Resultado dos G_o's pontuais do P47 do MASW.

MASW P47	G_o (MPa)	
	X (m)	Média G_o

Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	G ₀₄ = Média G _o em Z	Pela média V _s
1	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9
2	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	155,7	203,4	203,9
3	211,9	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	130,8	216,3	220,1
4	211,9	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	130,8	216,3	220,1
5	211,9	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	130,8	216,3	220,1
6	211,9	211,9	211,9	350,3	155,7	211,9	155,7	211,9	215,6
7	211,9	211,9	211,9	350,3	130,8	211,9	211,9	216,3	220,1
8	211,9	211,9	211,9	350,3	130,8	211,9	276,8	225,1	229,4
9	211,9	211,9	211,9	350,3	130,8	211,9	350,3	234,1	239,9
10	211,9	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	350,3	247,9	251,5
11	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	350,3	229,6	231,7
12	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	350,3	229,6	231,7
13	211,9	211,9	211,9	211,9	276,8	276,8	350,3	247,9	250,2
14	211,9	211,9	211,9	211,9	350,3	350,3	350,3	267,0	271,2
15	211,9	211,9	211,9	211,9	350,3	350,3	211,9	247,9	251,5
16	211,9	211,9	211,9	155,7	432,5	350,3	211,9	247,9	255,2
17	211,9	211,9	211,9	155,7	432,5	350,3	350,3	267,0	274,9
18	211,9	276,8	211,9	211,9	523,3	350,3	350,3	296,9	305,2
19	350,3	350,3	211,9	211,9	523,3	350,3	350,3	328,4	335,5
20	350,3	350,3	211,9	211,9	523,3	350,3	350,3	328,4	335,5
21	350,3	350,3	350,3	211,9	432,5	350,3	350,3	339,3	342,3
22	350,3	350,3	350,3	211,9	350,3	350,3	350,3	328,4	330,6
23	350,3	350,3	350,3	211,9	350,3	350,3	350,3	328,4	330,6
24	350,3	350,3	350,3	350,3	350,3	350,3	350,3	350,3	350,3
25	350,3	350,3	350,3	350,3	211,9	350,3	350,3	328,4	330,6
Média	250,7	253,3	239,6	262,8	294,1	281,0	283,3	262,6	G ₀₂ =266,4
G₀₃ = Média G total pontual							260,4		
G₀₆ = Média geral G pelo MASW							264,6		

R16 - Relação 16

A relação R16, consiste na análise dos dados entre o ponto P1 do MASW e o SCPTu 10 da ARB10.

Tabela 87: Resultados compilados do SCPTu 10 da ARB10.

Resultados compilados do SCPTu 10			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
4	326	184	1,73
7	255	113	1,73
9	326	184	1,73
11	319	176	1,73
Média	MV _{S3} = 306,5	G _{o5} = 164,25	ρ _{med} = 1,73

Tabela 88: Resultado das V_s pontuais do P1 do MASW.

MASW P1	V_s (m/s)							
	X (m)							
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	MV_{S1}
4	250	225	275	250	225	225	225	239
7	275	350	350	275	275	275	275	296
9	350	350	450	350	350	350	350	364
11	350	350	450	350	350	350	350	364
Média	306,3	318,8	381,3	306,3	300,0	300,0	300,0	316,1
MV_{S2} = Média total pontual							316,1	
MV_{S4} = Média geral MASW							388,7	

Tabela 89: Resultado dos G_o's pontuais do P1 do MASW.

MASW P1	G_o (MPa)								
	X (m)								
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	Média G_o	
								G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
4	108,1	87,6	130,8	108,1	87,6	87,6	87,6	99,1	99,6
7	130,8	211,9	211,9	130,8	130,8	130,8	130,8	152,0	154,0
9	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	211,9	211,9	229,6	231,7
11	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	211,9	211,9	229,6	231,7
Média	165,7	180,8	260,9	165,7	160,6	160,6	160,6	177,6	G _{o2} = 179,3
G_{o3} = Média G total pontual							172,8		

G₀₆ = Média geral G pelo MASW

261,4

R17 - Relação 17

A relação R17, consiste na análise dos dados entre o ponto P2 do MASW e o SCPTu 13 da ARB10.

Tabela 90: Resultados compilados do SCPTu 13 da ARB10.

Resultados compilados do SCPTu 13			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
4	295	151	1,73
7	302	158	1,73
10	339	199	1,73
11	360	225	1,73
Média	MV _{S3} = 324,0	G _{o5} = 183,25	ρ _{med} = 1,73

Tabela 91: Resultado das V_s pontuais do P2 do MASW.

MASW P2	V_s (m/s)								
	X (m)								
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	MV_{S1}	
4	225	275	350	225	275	350	225	275	
7	300	275	225	275	350	350	350	304	
10	350	350	350	350	350	350	350	350	
11	350	350	350	350	350	275	350	339	
Média	306,3	312,5	318,8	300,0	331,3	331,3	318,8	317,0	
	MV_{S2} = Média total pontual							317,0	
	MV_{S4} = Média geral MASW							383,4	

Tabela 92: Resultado dos G_o's pontuais do P2 do MASW.

MASW P2	G_o (MPa)								
	X (m)								
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	Média G_o	
								G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
4	87,6	130,8	211,9	87,6	130,8	211,9	87,6	135,5	130,8
7	155,7	130,8	87,6	130,8	211,9	211,9	211,9	163,0	159,4
10	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9
11	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	130,8	211,9	200,3	199,1
Média	166,8	171,4	180,8	160,6	191,7	191,7	180,8	177,7	G _{o2} = 175,3
	G_{o3} = Média G total pontual						173,8		

G₀₆ = Média geral G pelo MASW

254,3

R18 - Relação 18

A relação R18, consiste na análise dos dados entre o ponto P3 do MASW e o SCPTu 15 da ARB10.

Tabela 93: Resultados compilados do SCPTu 15 da ARB10.

Resultados compilados do SCPTu 15			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
3,5	431	321	1,73
4	455	359	1,73
6,5	471	384	1,73
7	413	295	1,73
9,5	409	289	1,73
10	413	296	1,73
12,5	402	281	1,73
13	381	251	1,73
15,5	405	284	1,73
16	400	277	1,73
Média	MV_{S3} = 417,9	G_{o5} = 304	ρ_{med} = 1,73

Tabela 94: Resultado das V_s pontuais do P3 do MASW.

MASW P3	V_s (m/s)							MV_{S1}
	X (m)							
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60	
3,5	275	225	275	275	250	275	450	289
4,0	275	225	275	275	275	275	450	293
6,5	275	275	275	275	300	300	450	307
7,0	275	300	275	275	350	350	350	311
9,5	350	350	350	275	350	450	275	343
10,0	350	350	350	300	350	450	275	346
12,5	350	350	350	350	350	400	275	346
13,0	350	350	350	400	350	350	275	346
15,5	450	450	350	450	450	350	350	407
16,0	450	450	350	500	450	275	450	418
Média	340	333	320	338	348	348	360	340,7
	MV_{S2} = Média total pontual						340,7	
	MV_{S4} = Média geral MASW						403,6	

Tabela 95: Resultado dos G_o 's pontuais do P3 do MASW.

MASW P3	G_o (MPa)								Média G_o	
	X (m)								$G_{o4} =$ Média G_o em Z	Pela média V_s
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60			
3,5	130,8	87,6	130,8	130,8	108,1	130,8	350,3	152,8	144,8	
4,0	130,8	87,6	130,8	130,8	130,8	130,8	350,3	156,0	148,4	
6,5	130,8	130,8	130,8	130,8	155,7	155,7	350,3	169,3	163,2	
7,0	130,8	155,7	130,8	130,8	211,9	211,9	211,9	169,1	167,0	
9,5	211,9	211,9	211,9	130,8	211,9	350,3	130,8	208,5	203,4	
10,0	211,9	211,9	211,9	155,7	211,9	350,3	130,8	212,1	207,6	
12,5	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	276,8	130,8	209,6	207,6	
13,0	211,9	211,9	211,9	276,8	211,9	211,9	130,8	209,6	207,6	
15,5	350,3	350,3	211,9	350,3	350,3	211,9	211,9	291,0	286,8	
16,0	350,3	350,3	211,9	432,5	350,3	130,8	350,3	310,9	302,1	
Média	207,2	201,0	179,5	208,1	215,5	216,1	234,8	208,9	$G_{o2}=203,8$	
$G_{o3} =$ Média G total pontual							200,8			
$G_{o6} =$ Média geral G pelo MASW							281,8			

R19 - Relação 19

A relação R19, consiste na análise dos dados entre o ponto P49 do MASW e o SCPTu 02 da ARB10.

Tabela 96: Resultados compilados do SCPTu 02 da ARB10.

Resultados compilados do SCPTu 02			
Z (m)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	ρ (g/cm³)
4	1036	1860	1,73
7	258	115	1,73
10	222	85	1,73
13	216	81	1,73
16	185	59	1,73
Média	MV _{S3} = 383,4	G _{o5} = 440,12	ρ _{med} = 1,73

Tabela 97: Resultado das V_s pontuais do P49 do MASW.

MASW P49	V_s (m/s)							MV_{S1}	
	X (m)								
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
4	275	275	275	275	275	225	350	279	
7	350	350	275	350	275	350	275	318	
10	350	350	350	350	350	350	275	339	
13	350	350	450	350	350	450	350	379	
16	350	350	350	450	450	450	450	407	
Média V_s	335,0	335,0	340,0	355,0	340,0	365,0	340,0	344,3	
	MV_{S2} = Média total pontual							344,3	
	MV_{S4} = Média geral MASW							361,2	

Tabela 98: Resultado dos G_o's pontuais do P49 do MASW.

MASW P49	G_o (MPa)							Média G_o	
	X (m)							G_{o4} = Média G_o em Z	Pela média V_s
Z (m)	0	10	20	30	40	50	60		
4	130,8	130,8	130,8	130,8	130,8	87,6	211,9	136,2	134,3
7	211,9	211,9	130,8	211,9	130,8	211,9	130,8	177,2	174,8
10	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	211,9	130,8	200,3	199,1
13	211,9	211,9	350,3	211,9	211,9	350,3	211,9	251,5	247,9

16	211,9	211,9	211,9	350,3	350,3	350,3	350,3	291,0	286,8
Média	195,7	195,7	207,2	223,4	207,2	242,4	207,2	211,2	G ₀₂ =208,6
	G₀₃ = Média G total pontual						205,1		
	G₀₆ = Média geral G pelo MASW						225,7		

APÊNDICE G

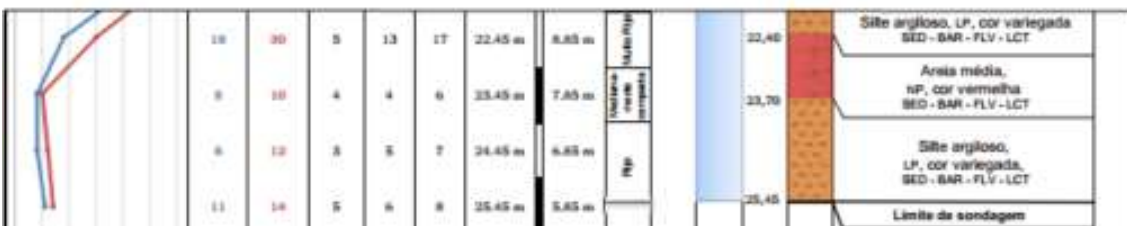
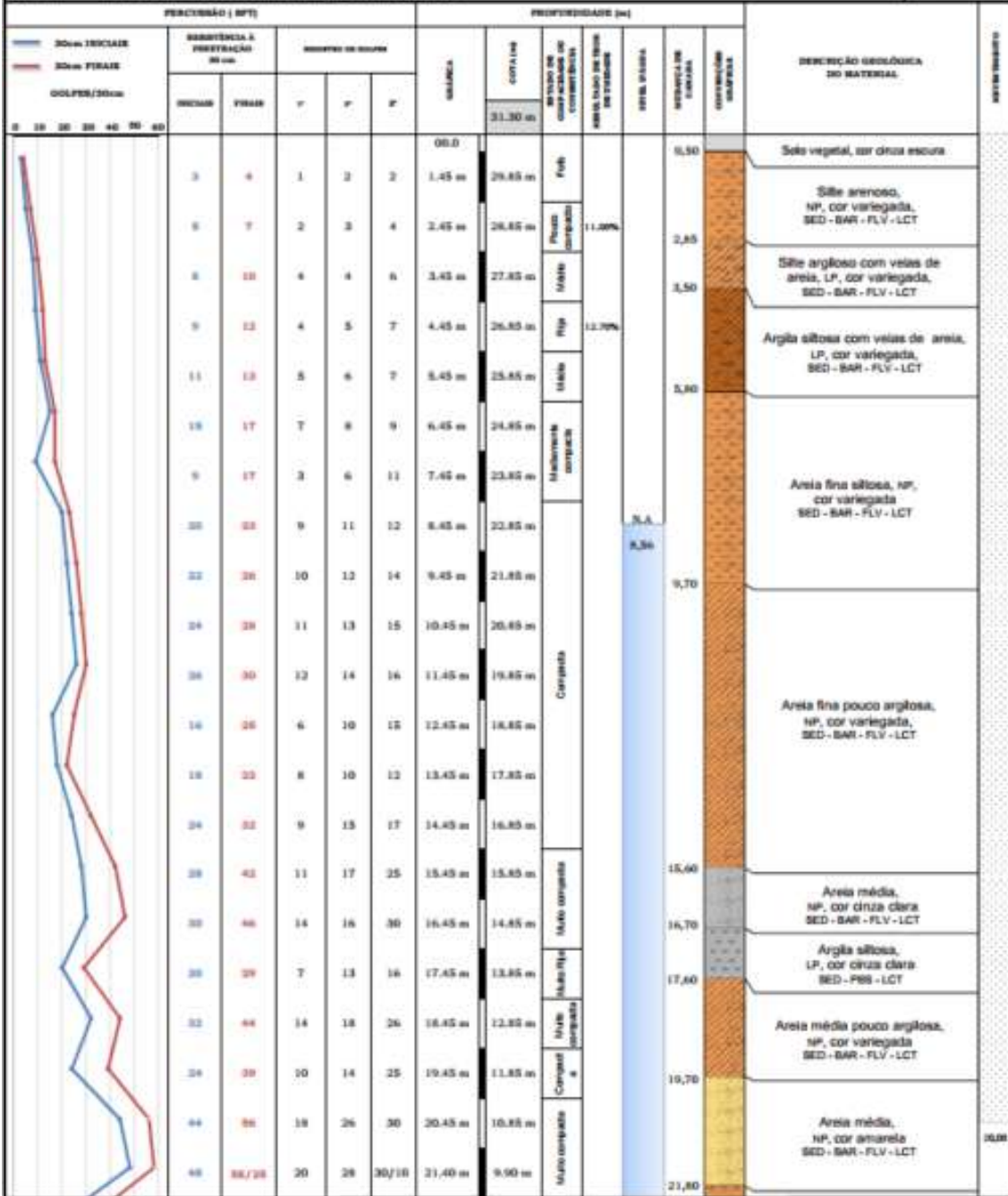
RESULTADO DOS ENSAIOS SPT DA ARB10

PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAEM À PERCUSSÃO - NBR 6484:2020

CLIENTE: ALLUMAR
 OBRA: SONDAEM ARRIO
 LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUXITA 10 - ARR 10 - ALLUMAR

INÍCIO: 16/05/2022
 TÉRMINO: 30/05/2022

FURO
 SP-02/E1

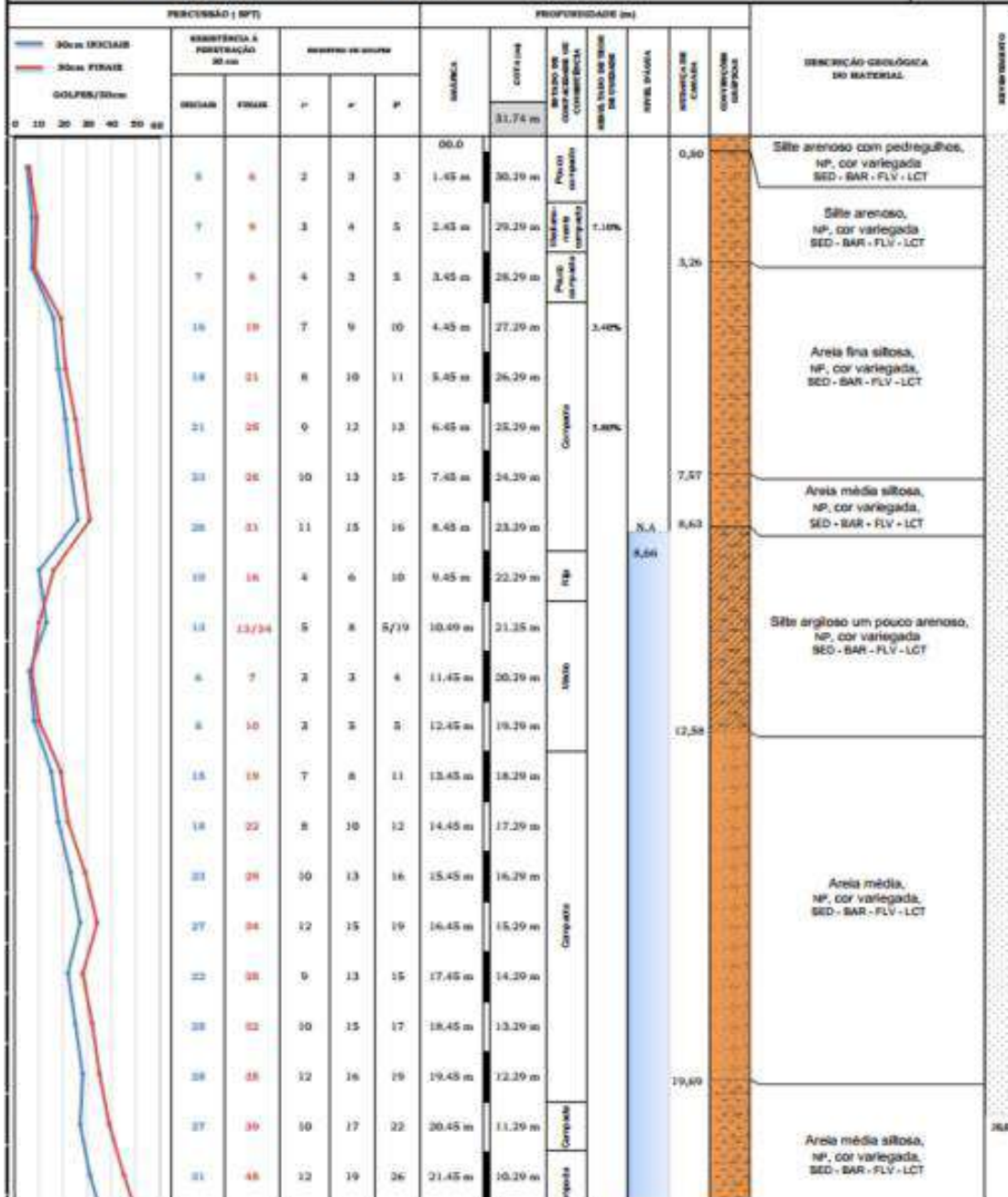


PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAÇÃO À PERCUSSÃO - NBR 6484:2018

CLIENTE: ALUMAR
 OBRA: SONDAÇÃO ARRIO
 LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUNITA 10 - ARR 10 - ALUMAR

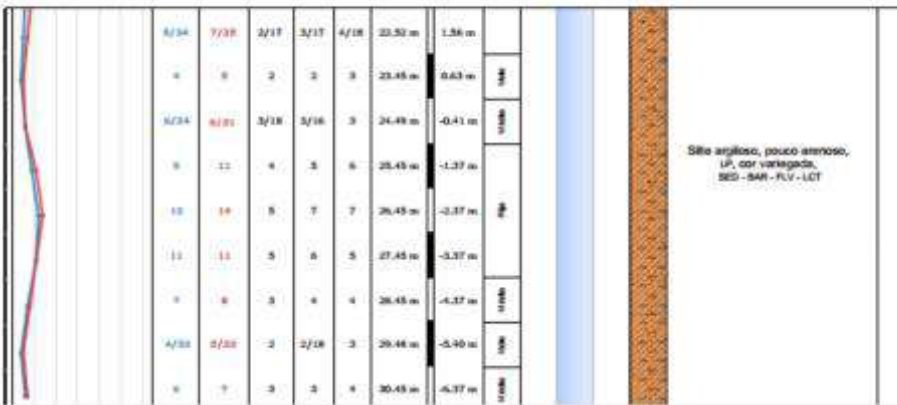
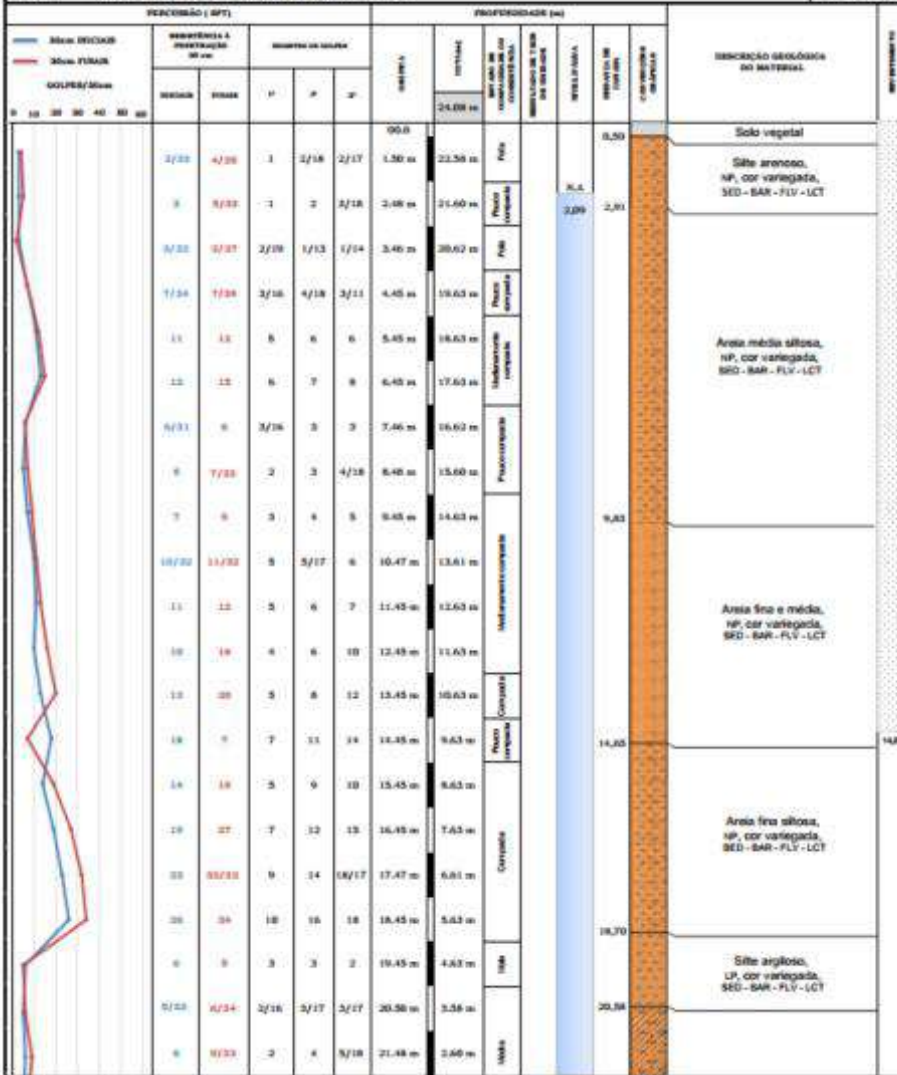
INÍCIO: 24/05/2022
 TÉRMINO: 27/05/2022

FURO
 SP-03/E1



PERFIL INDIVIDUAL DE SONDADEG A PERCUSSAO - NBR 6484-2024

CLIENTE:	ALUMAR	INICIO:	09/04/2022	FURO SP-05/E1
OBRA:	SONDAGEM ARBIO	TERMINO:	14/06/2022	
LOCAL:	ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUNTA 10 - ARR 10 - ALUMAR			

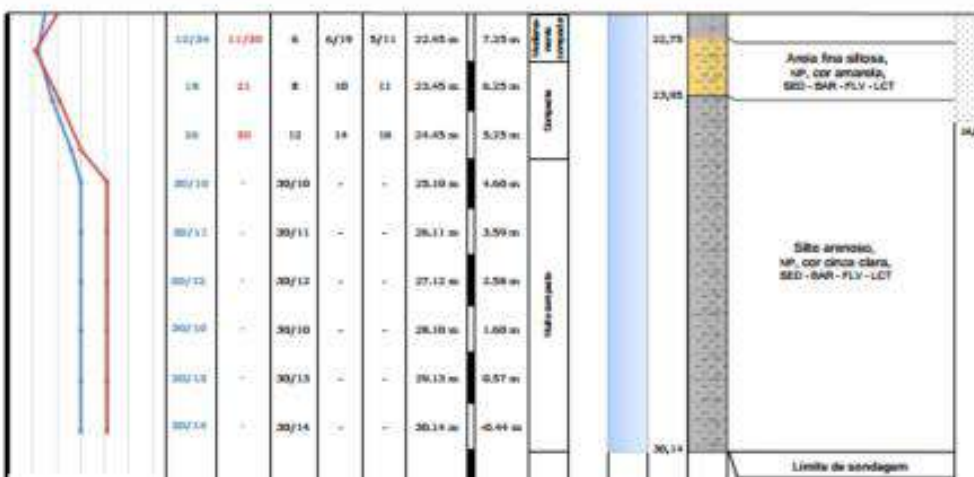
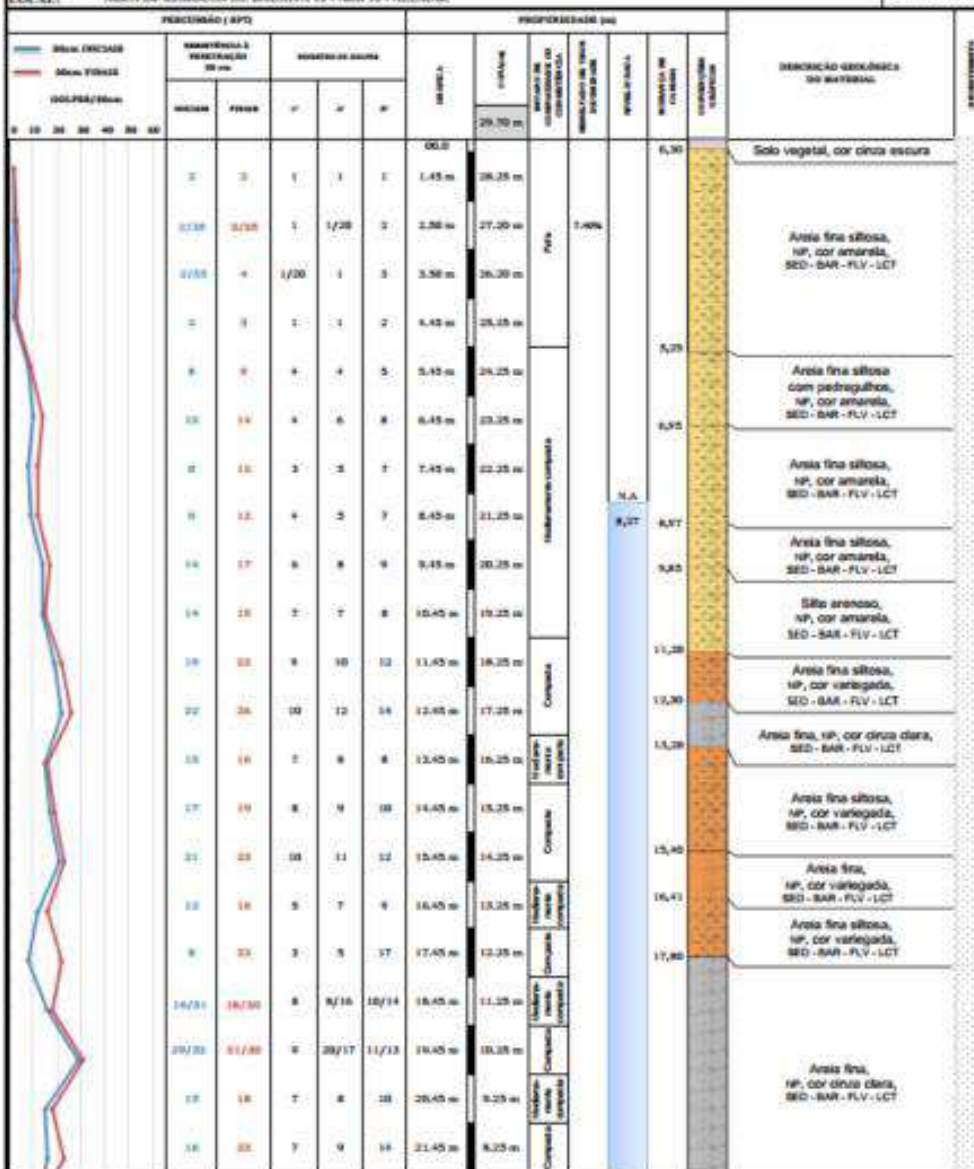


PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAÇÃO À PERCUSSÃO - NBR 6484:2024

CLIENTE: ALLUMAR
OBRA: SONDAÇÃO ARR10
LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BALDITA 09 - ARR 10 - ALLUMAR

INÍCIO: 11/05/2022
TÉRMINO: 04/06/2022

FURO
SP-07/E1

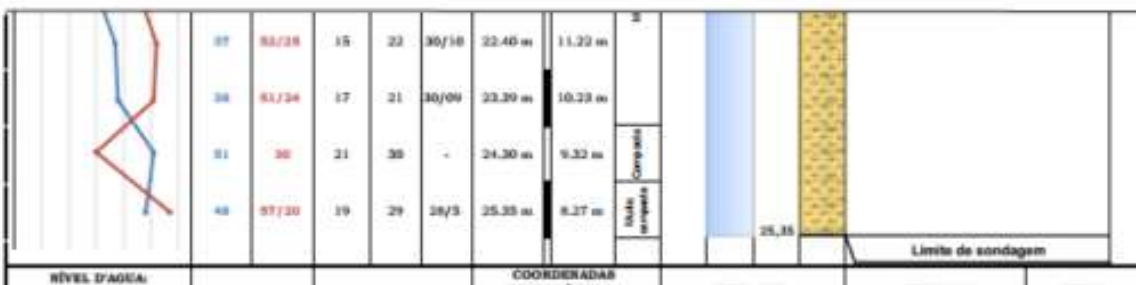
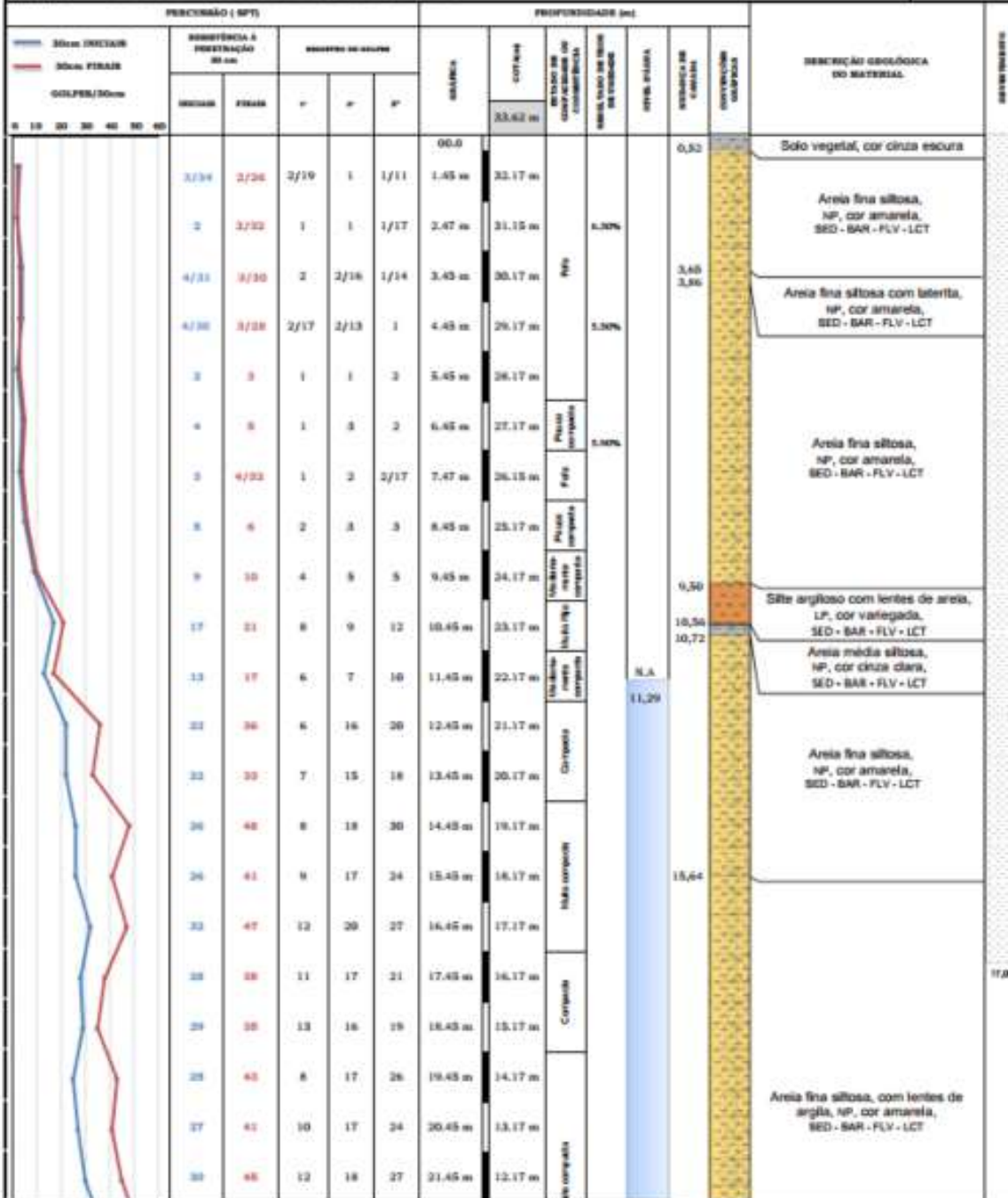


PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAGEM À PERCUSSÃO - NBR 6496:2020

CLIENTE: ALUMAR
 OBRA: SONDAGEM ARRIO
 LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUXITA 30 - ARR 10 - ALUMAR

INÍCIO: 30/05/2022
 TÉRMINO: 02/06/2022

FURO
 SP-09/E1



PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAGEM À PERCUSSÃO - NBR 6484:2020

CLIENTE: ALUMAR
 OBRA: SONDAGEM ARBIO
 LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUXITA 10 - ARB 10 - ALUMAR

INÍCIO: 20/06/2022
 TÉRMINO: 30/06/2022

FURO
 SP-10/E2

PERCUSSÃO (SPT)					PROFUNDIDADE (m)										DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO MATERIAL	SITIO DE SONDAGEM	
30cm TRIÇAS		RESISTÊNCIA À PERCUSSÃO 30 cm			AMOSTRAS DE SOLO			SOLTEIRO	COTAGEM	MÉDIA DE COMPACTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL	MÉDIA DE COMPACTAÇÃO DE TERRELO	MÉDIA DE COMPACTAÇÃO DE LATERITA	MÉDIA DE COMPACTAÇÃO DE AREIA	MÉDIA DE COMPACTAÇÃO DE ARGILA			MÉDIA DE COMPACTAÇÃO DE SILTE
INICIAL	FINAL	1'	2'	3'	DIÂMETRO	OTIMIZADO	OTIMIZADO										
GOLPES/30cm																	
0 10 20 30 40 50 60																	
2/26	3/28	1/18	2/18	1/20	1.46 m	37.08 m									0,75	Solo vegetal, cor cinza clara	
4/30	3/28	2/20	2/10	1/18	2.48 m	36.06 m									2,73	Areia fina silteosa, NP, cor amarela, SED - BAR - FLV - LCT	
3	5	1	2	3	3.45 m	35.09 m									2,90	Areia fina silteosa com laterita, NP, cor amarela, SED - BAR - FLV - LCT	
4/30	5/28	2/17	2/13	3	4.45 m	34.09 m										Areia fina silteosa, NP, cor amarela clara, SED - BAR - FLV - LCT	
4/20	5/29	2/16	2/14	3	5.45 m	33.09 m											
5	15	3	6	9	6.45 m	32.09 m											
9	17	3	6	11	7.45 m	31.09 m											
10	17	4	6	11	8.45 m	30.09 m											
9	18	3	6	12	9.45 m	29.09 m											
10	27	4	6	11	10.45 m	28.09 m											
14/30	23/29	6/16	8/14	14	11.45 m	27.09 m											
14	19	6	8	11	12.45 m	26.09 m											
14	21	3	9	12	13.45 m	25.09 m											
14	17	6	8	9	14.45 m	24.09 m											
17	21	7	10	21	15.45 m	23.09 m											
17	21	6	11	20	16.45 m	22.09 m											
19	24	7	11	23	17.45 m	21.09 m											
47/24	30/9	17	30/9	-	18.24 m	20.30 m											
33/28	30/10	22	30/10	-	19.25 m	19.29 m											
41	25/25	16	25	30/10	20.40 m	18.14 m											
N.A.																	
14,03																	
17,69																	
20,40																	
Limite de sondagem																	

NÍVEL D'ÁGUA:	15,17 m	DÍAMETRO DO REVESTIMENTO:	4"	REVESTIMENTO:	17,00 m	COORDENADAS TOPOGRÁFICAS - CÔRREGO ALEGRE:	N 9.699.840,931 / E 580.326,693	OPERADOR:	ANTONIO DELPORT	APROVADO:	BASELIANO BARROS	FOLHA:	10
APÓS 24h:	14,01 m											39	
APÓS 48h:	14,03 m												

CONDIÇÕES:

Legenda: LCT - Lacustre ITP - Rapecuru LP - Ugeiramento Plástico
 SED - Sedimentar FLV - Fluvio MAR - Marinho NP - Não plástico
 BAR - Barrerias PBS - Pirabas PL - Plástico

PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAGEM A PERCUSSÃO - NBR 6484-2020

CLIENTE: ALUMAR	INÍCIO: 04/07/2022	FURO SP-11/E2
OBRA: SONDAGEM ARB10	TÉRMINO: 11/07/2022	
LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUXITA 10 - ARB 10 - ALUMAR		

PERCURSO (RPT)					PROFUNDIDADE (m)										DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO MATERIAL	REVESTIMENTO		
SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm		MÉTODOS DE SONDAGEM			QUÍMICA	NITRÓGENO	SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm	SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm	SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm	SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm	SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm	SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm	SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm	SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm			SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm	SISTEMA DE PENETRAÇÃO 30 cm
INICIAIS	FINAL	1"	2"	3"														
0	10	20	30	40	50	60	70											
0,0	3/30	3/36	1/17	1/13	2/23	1,53 m	39,12 m											
	2/30	3/32	1/16	1/14	2/18	2,48 m	38,17 m											
	3/23	4/26	1	2/17	2/19	3,51 m	37,14 m											
	4	6	3	3	3	4,45 m	36,20 m											
	12	10	7	5	5	5,45 m	35,20 m											
	6/22	8/28	2/17	4	5/13	6,45 m	34,20 m											
	8/20	8/28	2/16	3/14	6	7,45 m	33,20 m											
	10	15	4	8	9	8,45 m	32,20 m											
	11	16	4	7	9	9,45 m	31,20 m											
	17	23	7	10	13	10,45 m	30,20 m											
	12	17	5	7	10	11,45 m	29,20 m											
	19	27	7	12	15	12,45 m	28,20 m											
	17	26	6	11	15	13,45 m	27,20 m											
	15	19	6	9	10	14,45 m	26,20 m											
	19	29	7	12	17	15,45 m	25,20 m											
	15	23	6	7	15	16,45 m	24,20 m											
	14	23	6	8	15	17,45 m	23,20 m											
	14	25	7	9	16	18,45 m	22,20 m											
	68/24	40/9	28	40/9	-	19,24 m	21,41 m											
	88/17	40/12	40	10/3	30/10	20,17 m	20,48 m											

NÍVEL D'ÁGUA:	COORDENADAS TOPOGRÁFICAS - CORREÇÃO ALGEBRE	OPERADOR:	APROVADO:	FOLHA
INÍCIO: 16,50 m	N 9.699.852,333/ E 580.353,53	ANTONIO BELFORT	BARBARO BARROS	11
APÓS 24H: 17,73 m				29
APÓS 48H: 17,72 m				

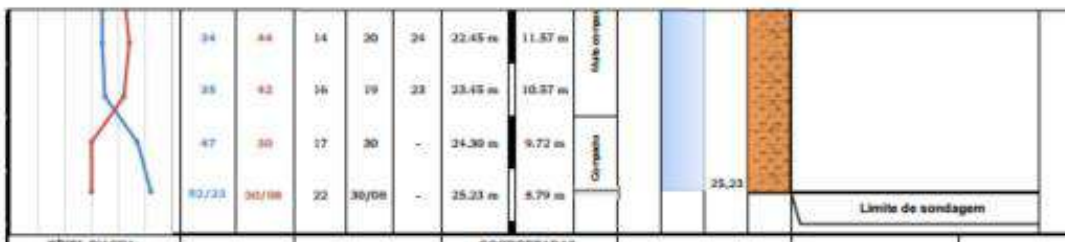
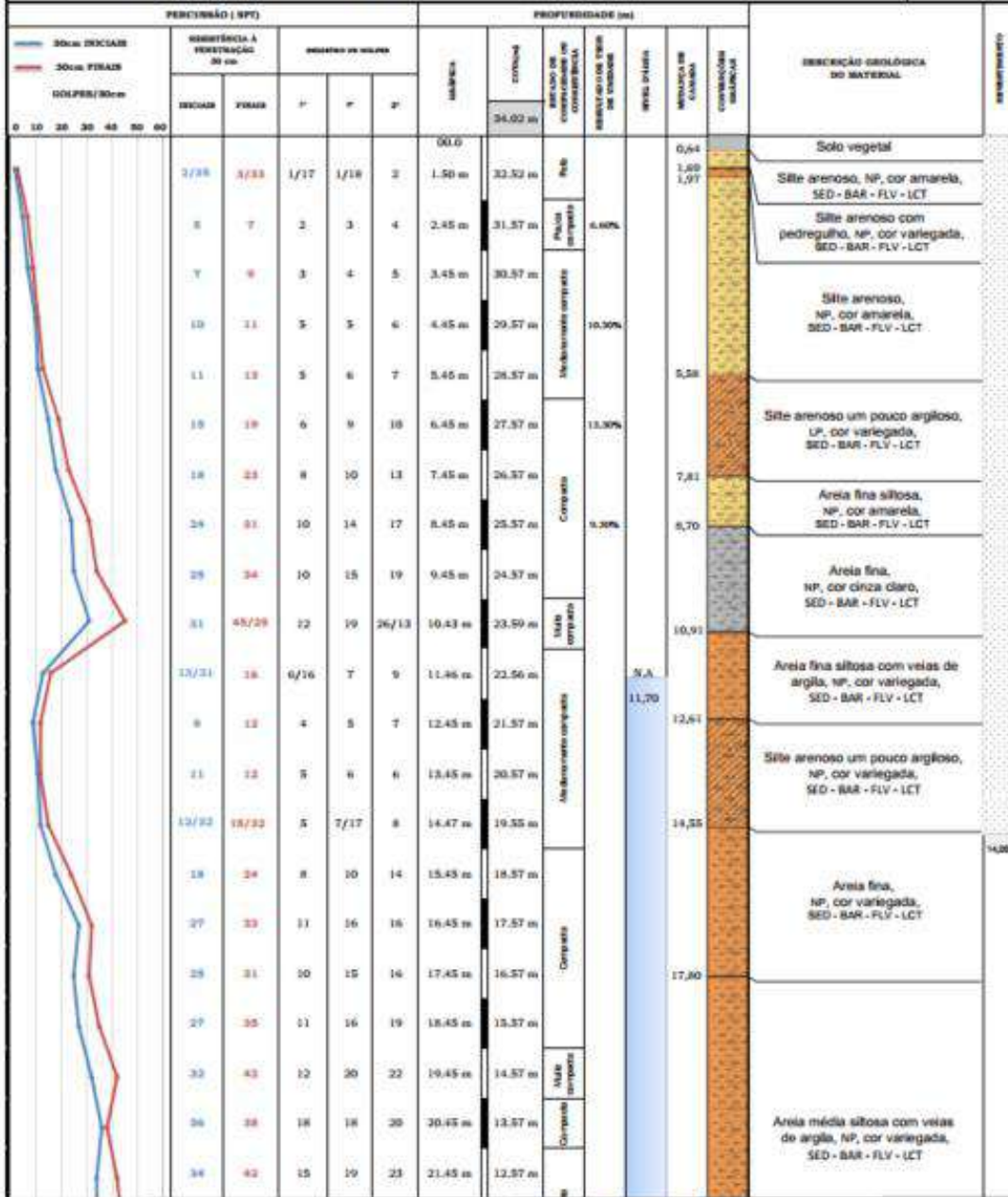
LEGENDA: SED - Sedimentar; BAR - Barreiras; LCT - Lacustre; FLV - Fluvio; MAR - Marinho; PL - Plástico; NP - Não plástico; LP - Lignante Plástico

PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAÇÃO À PERCUSSÃO - NBR 6484:2020

CLIENTE: ALUMAR
 OBRA: SONDAÇÃO ARB10
 LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUNITA 10 - ARB 10 - ALUMAR

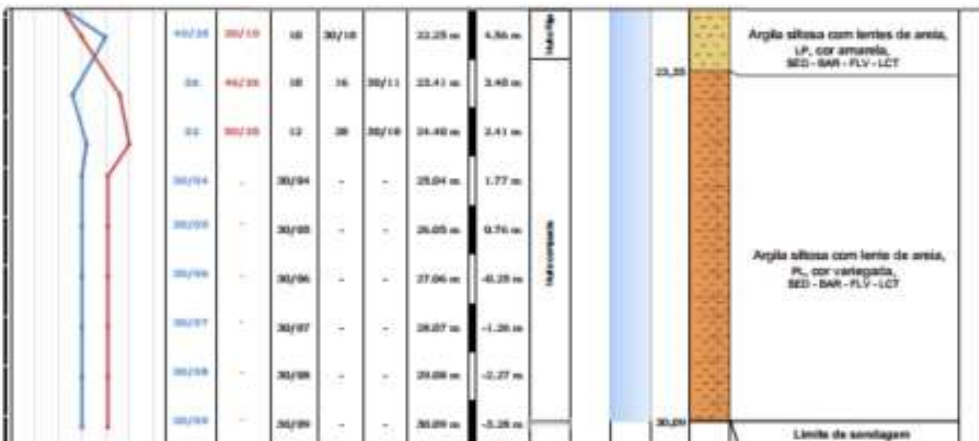
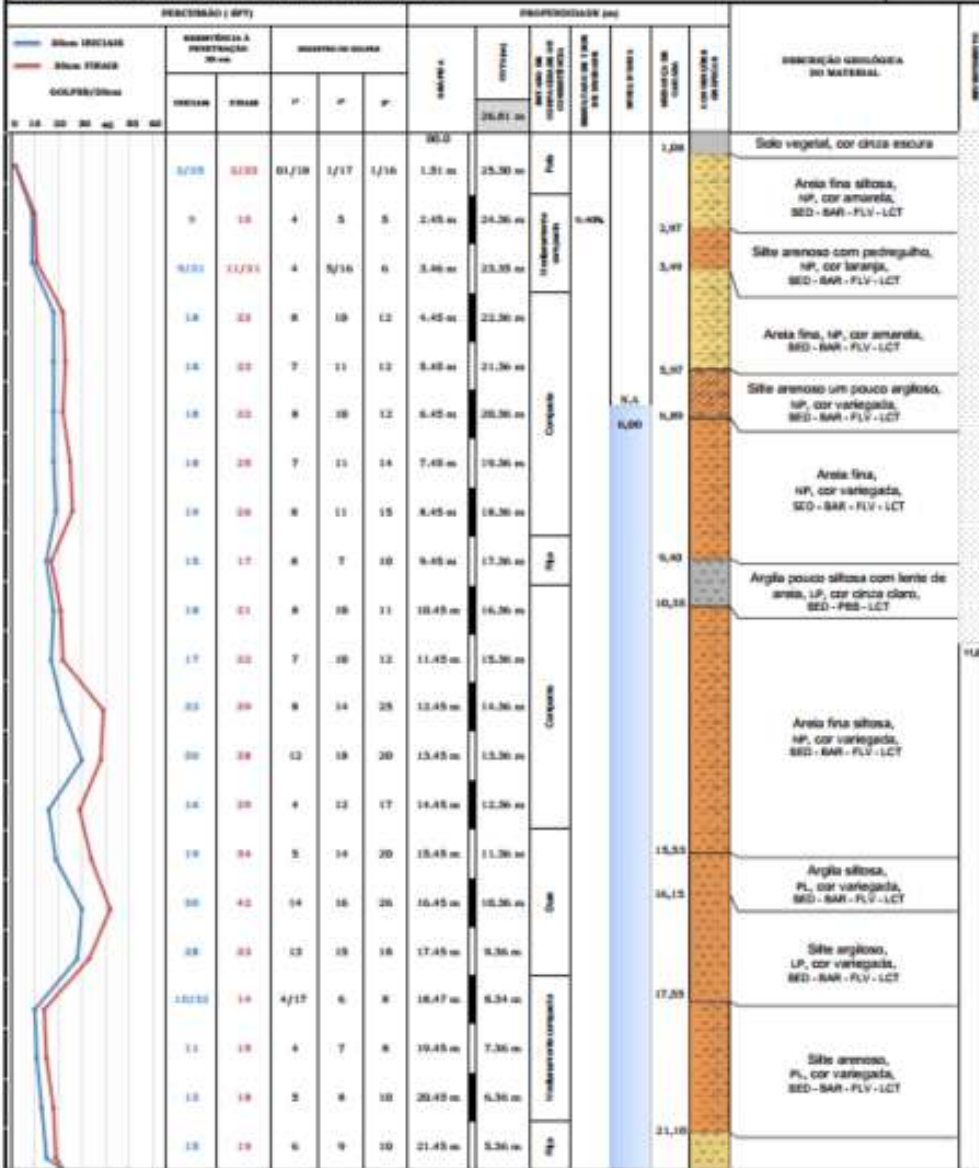
INÍCIO: 28/06/2022
 TÉRMINO: 04/07/2022

FURO
 SP-13/E2



PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAÇÃO A PERCUSSÃO - NBR 6484-2019

CLIENTE:	ALUMAR	INÍCIO:	21/07/2022	FURO SP-14/E3
OBRA:	SONDAGEM ARBIB	TÉRMINO:	27/07/2022	
LOCAL:	ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUSITA 10 - ARB 10 - ALUMAR			

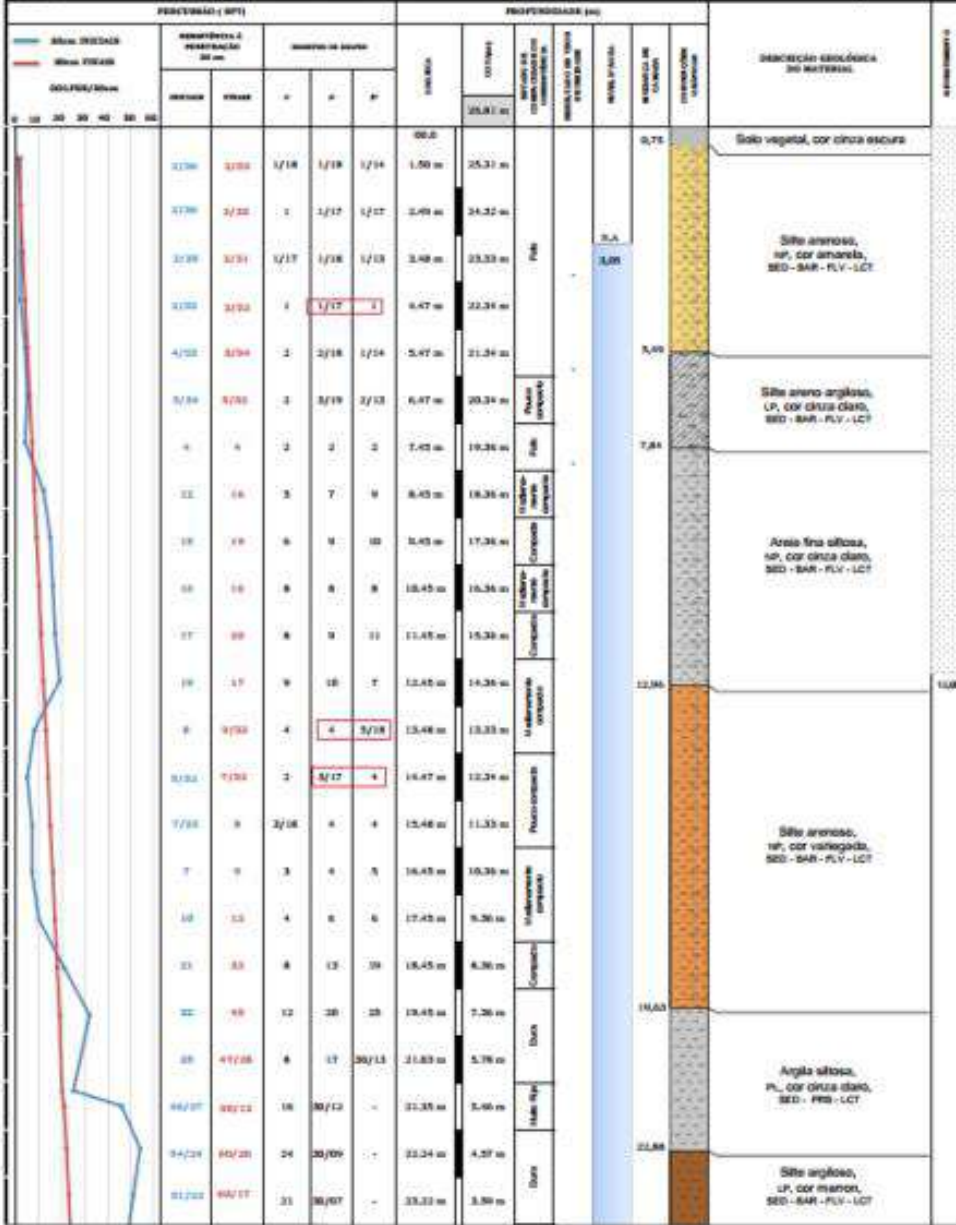


PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAÇÃO A PERCUSSÃO - NBR 6484:2020

CLIENTE: ALUMAR
 OBRA: SONDAÇÃO ABRIL
 LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUXITA 10 - ARR 10 - ALUMAR

INÍCIO: 01/07/2022
 TÉRMINO: 13/07/2022

FURO SP-15/E3

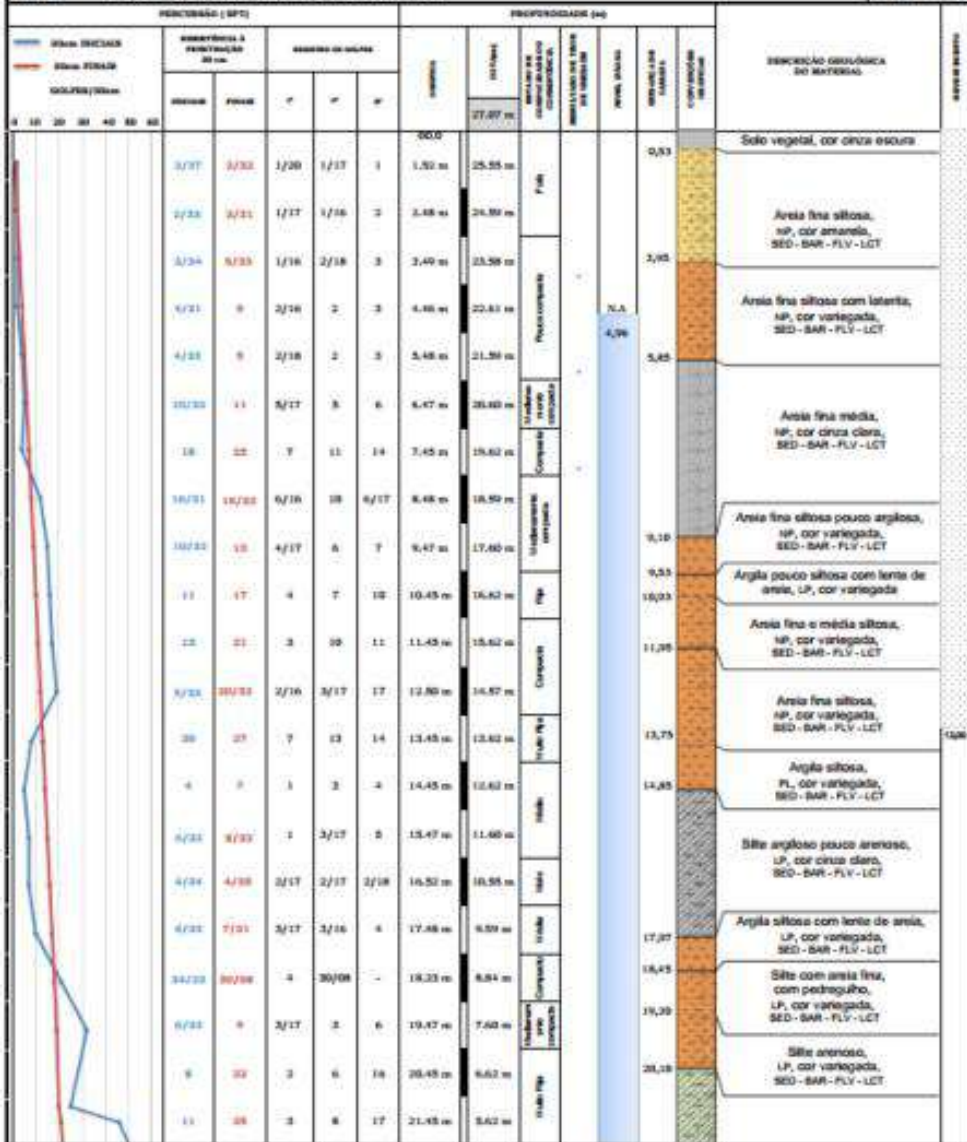


PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAÇÃO À PERCUSSÃO - NBR 6484:2020

CLIENTE: ALLUMAR
OBRA: SONDAÇÃO ARRIOB
LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAIXOTA 10 - ARR 10 - ALLUMAR

INÍCIO: 04/07/2022
TÉRMINO: 15/07/2022

FURO
SP-16/E3

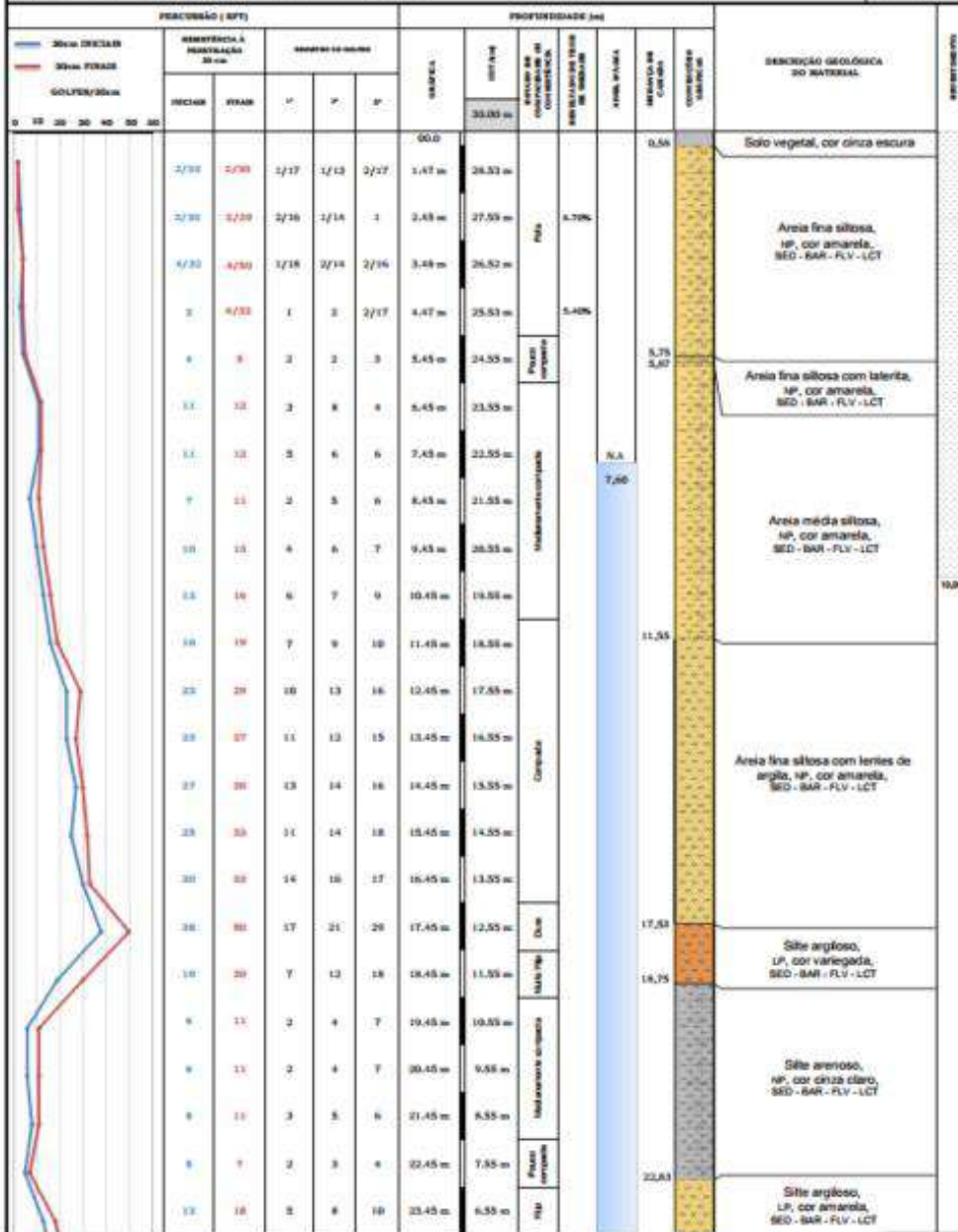


PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAGEM À PERCUSSÃO - NBR 6484:2020

CLIENTE: ALUMAR
 OBRA: SONDAGEM ARRIO
 LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUNTA 10 - ARR 10 - ALUMAR

INÍCIO: 14/07/2022
 TÉRMINO: 18/07/2022

FURO
 SP-18/E4



NÍVEL D'ÁGUA:		DIÂMETRO DO REVESTIMENTO:		REVESTIMENTO:		COORDENADAS TOPOGRÁFICAS - CÔRREGO ALEGRE:		OPERADOR:		APROVADO:		FOLHA:	
INÍCIO:	6,51 m												

PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAEM À PERCUSSÃO - NBR 6484:2020

CLIENTE: ALUMAR
 OBRA: SONDAEM ARRIO
 LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUNTA 10 - ARR 10 - ALUMAR

INÍCIO: 12/07/2022
 TÉRMINO: 16/07/2022

FURO
 SP-20/E5

PERCUSSÃO (SPT)					PROFUNDIDADE (m)										DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO MATERIAL	NBR 6484:2020
30cm TRIPLAS		REGISTRO À PENETRAÇÃO 30 cm		ANOTAÇÃO DE COLUNA			SOLICITA	CORTEJA	SITUAÇÃO DE COLUNA DE COMPACTAÇÃO	RESULTADO DE TESTES DE DUREZA	NBR 6484	RESISTÊNCIA CARATA	CONDIÇÃO COLUNA			
COLAR	PIRAM	1º	2º	3º	1	2								3		
0 10 20 30 40 50 60																
0,00	3,7/23	4,7/22	1/18	2/17	2	1,48 m	31,50 m	32,95 m	Felm				0,61		Solo vegetal	
4	8/23		2	2	3/17	3,47 m	30,51 m		Pouco compacta	6,70%		2,68		Site arenoso, NP, cor vermelho, SED - BAR - FLV - LCT		
21	22	9	12	10		3,45 m	29,53 m		Compacta			3,55		Site arenoso com pedregulho, NP, cor variegada, SED - BAR - FLV - LCT		
6	11	3	5	6		4,45 m	28,55 m		Notar areia compacta	4,70%				Site arenoso, NP, cor variegada, SED - BAR - FLV - LCT		
10	13/22	4	6	7/17		5,47 m	27,51 m		Notar areia compacta							
14	16	6	8	8		6,45 m	26,53 m					4,93				
19	24	7	12	13		7,45 m	25,53 m		Compacta	N.A						
24	20	6	10	10		8,45 m	24,53 m		Compacta	7,92				Areia média, NP, cor variegada, SED - BAR - FLV - LCT		
16	17	7	9	8		9,45 m	23,55 m		Indiferente areia							
14	18	6	8	10		10,43 m	22,55 m					10,78				
14	20/23	7	9	11/18		11,40 m	21,50 m									
20	27	8	12	15		12,45 m	20,53 m							Areia fina, NP, cor cinza claro, SED - BAR - FLV - LCT		
22	31	9	14	17		13,45 m	19,53 m		Compacta							
20	28	8	12	13		14,43 m	18,53 m									
16	20	6	10	10		15,45 m	17,53 m					15,90				
18	24	7	11	13		16,45 m	16,53 m		Muito fofa					Site argiloso um pouco arenoso, LP, cor variegada, SED - BAR - FLV - LCT		
22	28	9	13	15		17,45 m	15,53 m					17,54				
26	29	10	16	23		18,45 m	14,53 m		Compacta					Areia média um pouco silteosa, NP, cor vermelha, SED - BAR - FLV - LCT		
17	21	8	9	12		19,45 m	13,53 m									
19/22	22/23	9	10/17	12		20,47 m	12,51 m					20,64				
11	12	5	6	9		21,45 m	11,53 m		Muito mole compacta			21,70		Site arenoso um pouco argiloso, NP, cor variegada, SED - BAR - FLV - LCT		

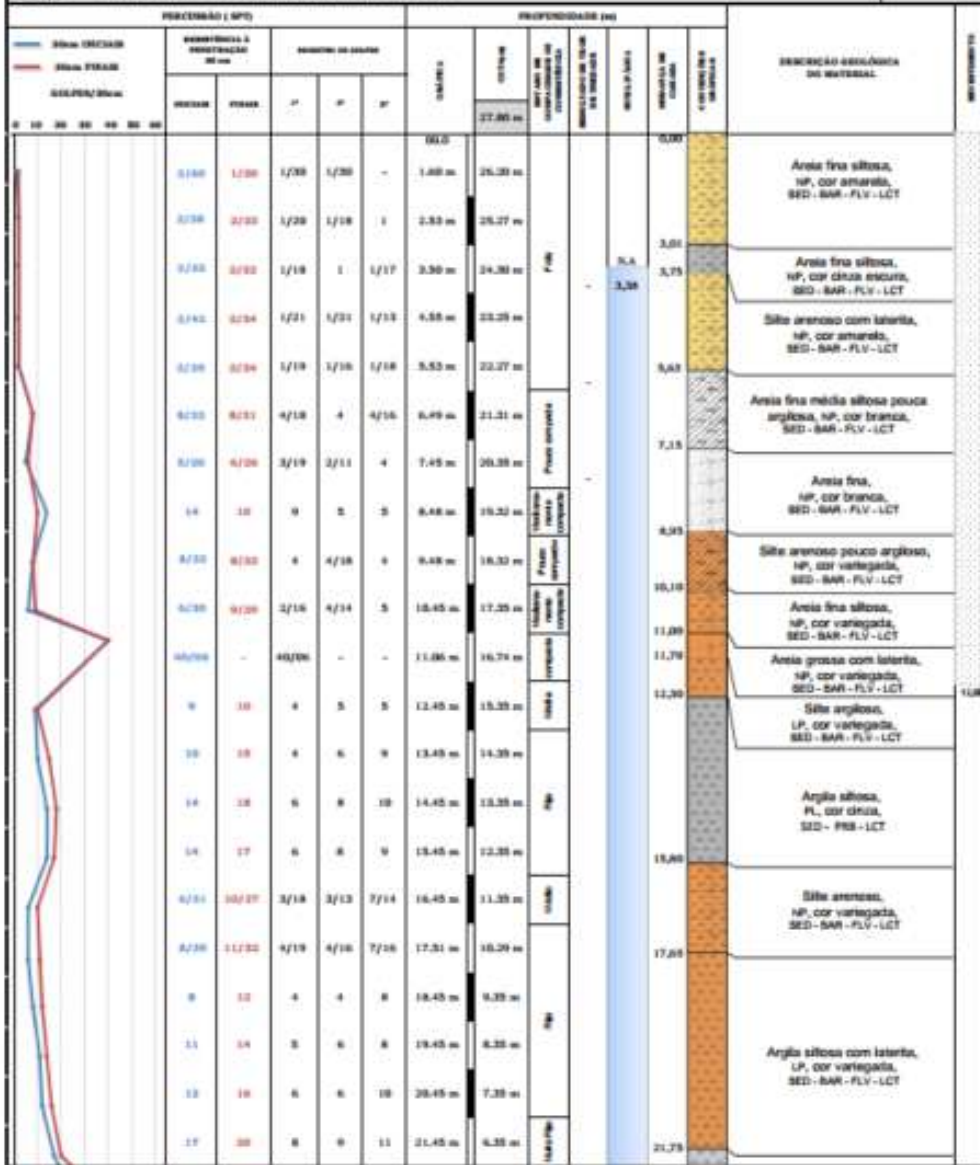
16	21	7	9	12		22,45 m	10,53 m		Muito fofa					
19	41	6	13	28		23,45 m	9,53 m		Dura					Site argiloso, LP, cor variegada, SED - BAR - FLV - LCT
21	49/28	12	19	30/10		24,40 m	8,58 m							
49/28	30/13	18	30/13	-		25,28 m	7,70 m		Muito fofa			25,28		

PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAGEM A PERCUSSÃO - NBR 6484:2010

CLIENTE: ALUMAR
 OBRA: SONDAGEM ABISB
 LOCAL: ÁREA DE REENCLAVAMENTO DE BAIXITA 10 - ARR 10 - ALUMAR

INICIO: 21/07/2012
 TÉRMINO: 27/07/2012

FLURO
 SP-21/E4

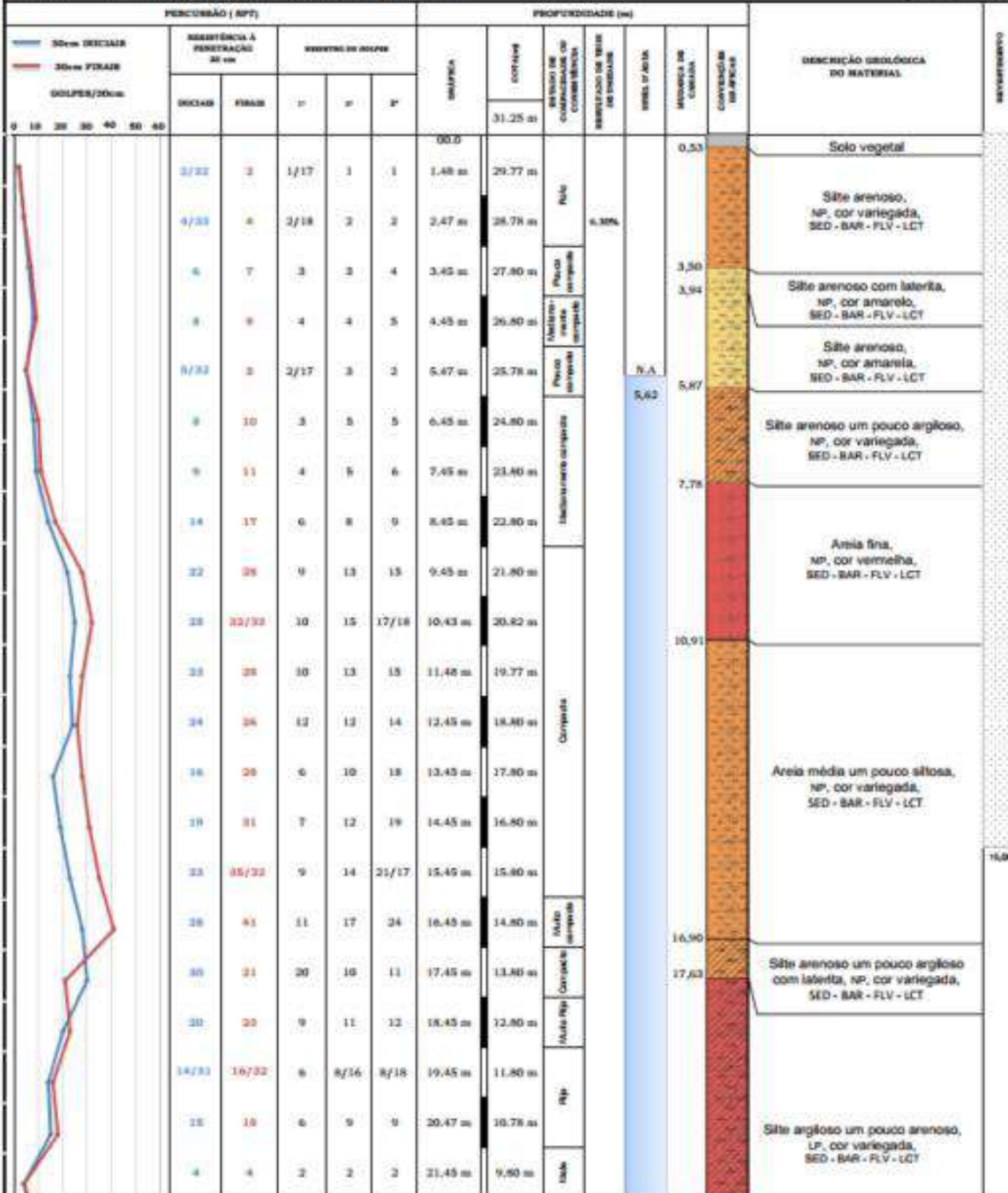


PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAAGEM À PERCUSSÃO - NBR 6484:2020

CLIENTE: ALUMAR
 OBRA: SONDAAGEM ARBIO
 LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUXITA 10 - ARB 10 - ALUMAR

INÍCIO: 23/07/2022
 TÉRMINO: 28/07/2022

FURO
 SP-22/E5



PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAGEM À PERCUSSÃO - NBR 6484:2020

CLIENTE: ALUMAR

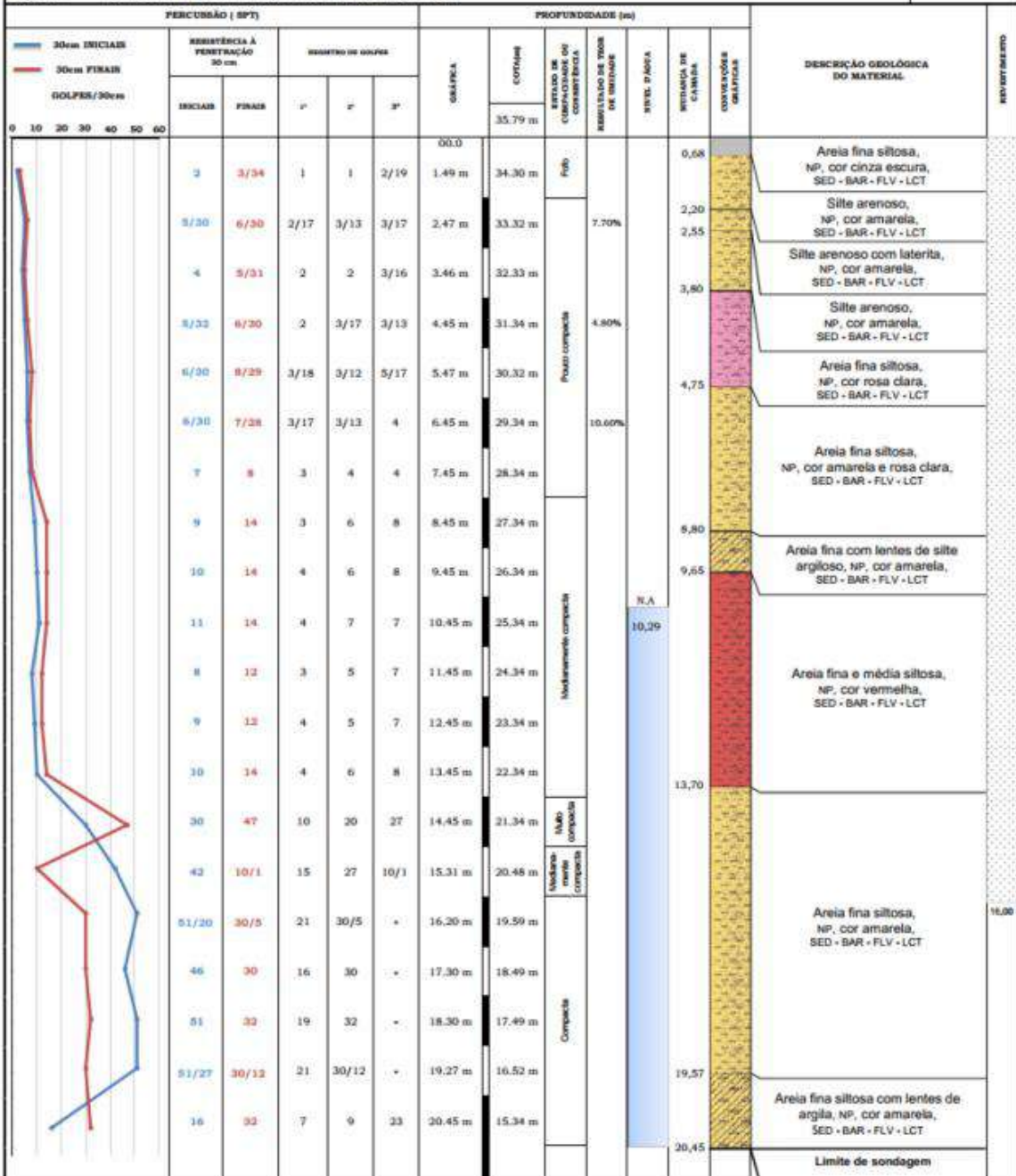
OBRA: SONDAGEM ARB10

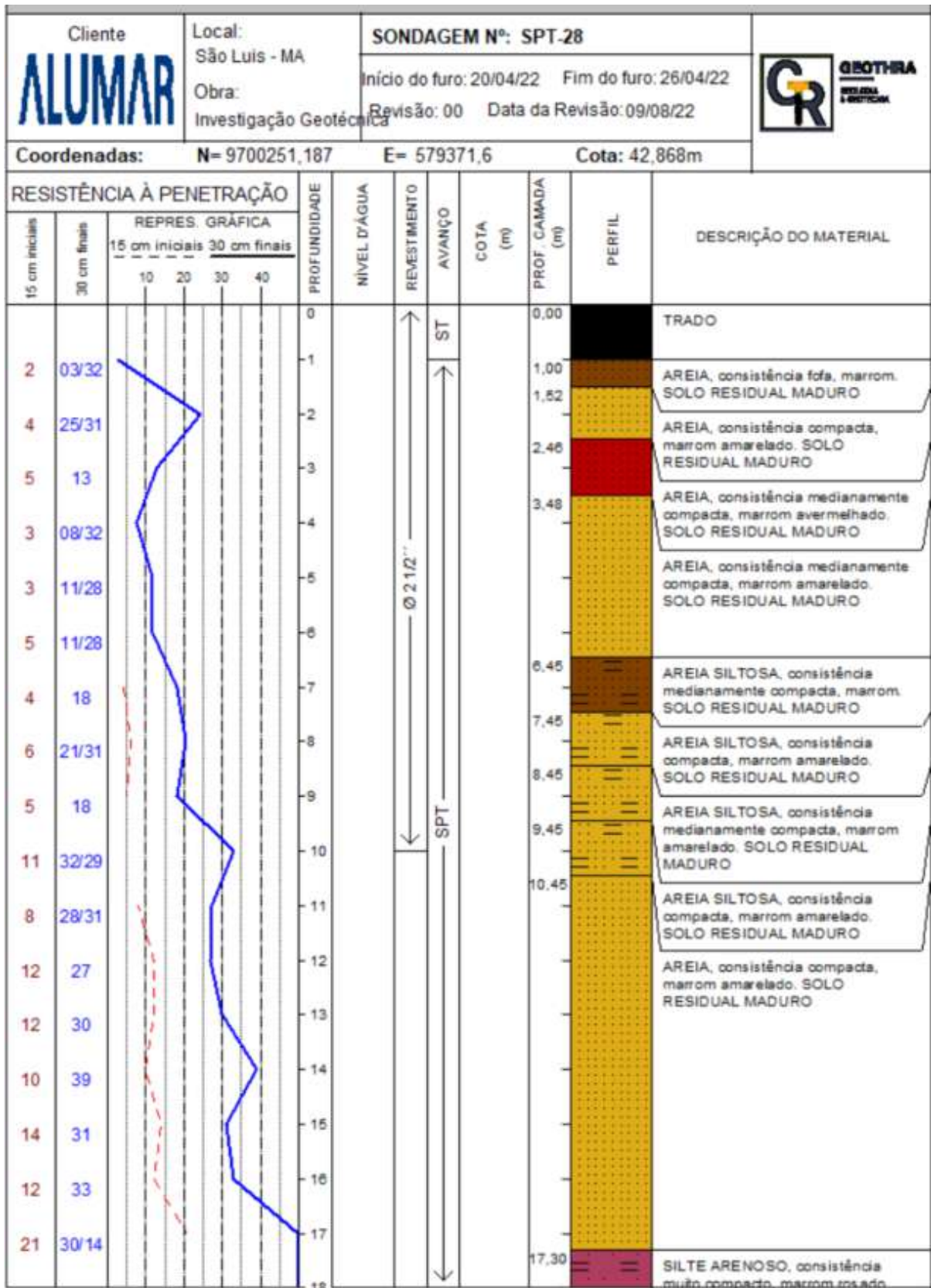
LOCAL: ÁREA DE RESÍDUOS DE BAUXITA 10 - ARB 10 - ALUMAR

INÍCIO: 05/08/2022

TÉRMINO: 30/08/2022

FURO
SP-23/E5

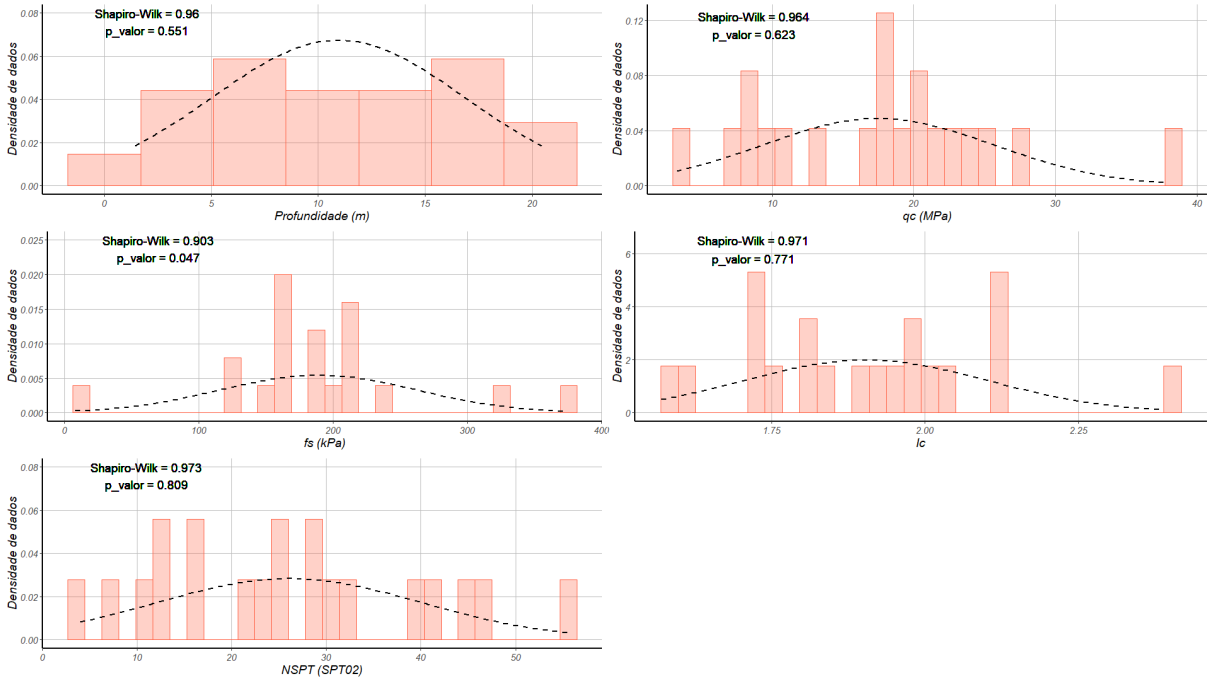




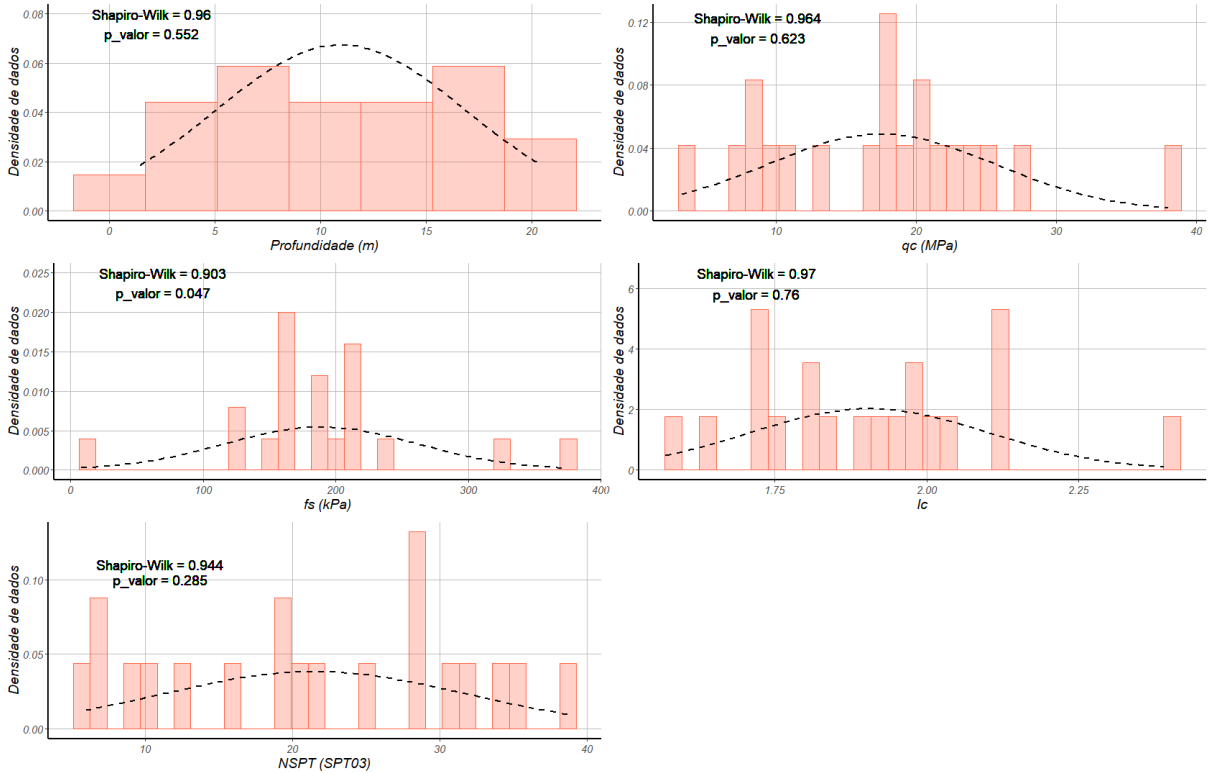
APÊNDICE H

RESULTADOS DAS ANÁLISES DE NORMALIDADE DOS DADOS q_c , f_s , N_{SPT} , IC e Z

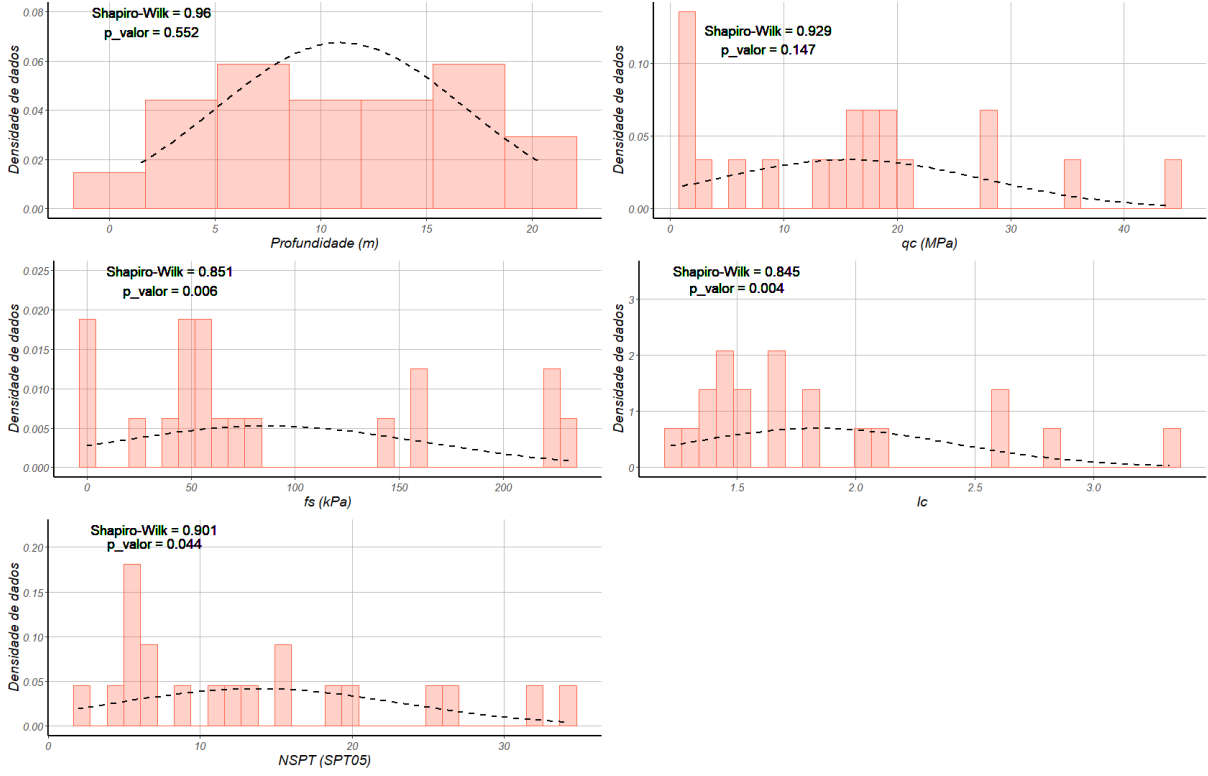
SCPTu 01 e SPT 02



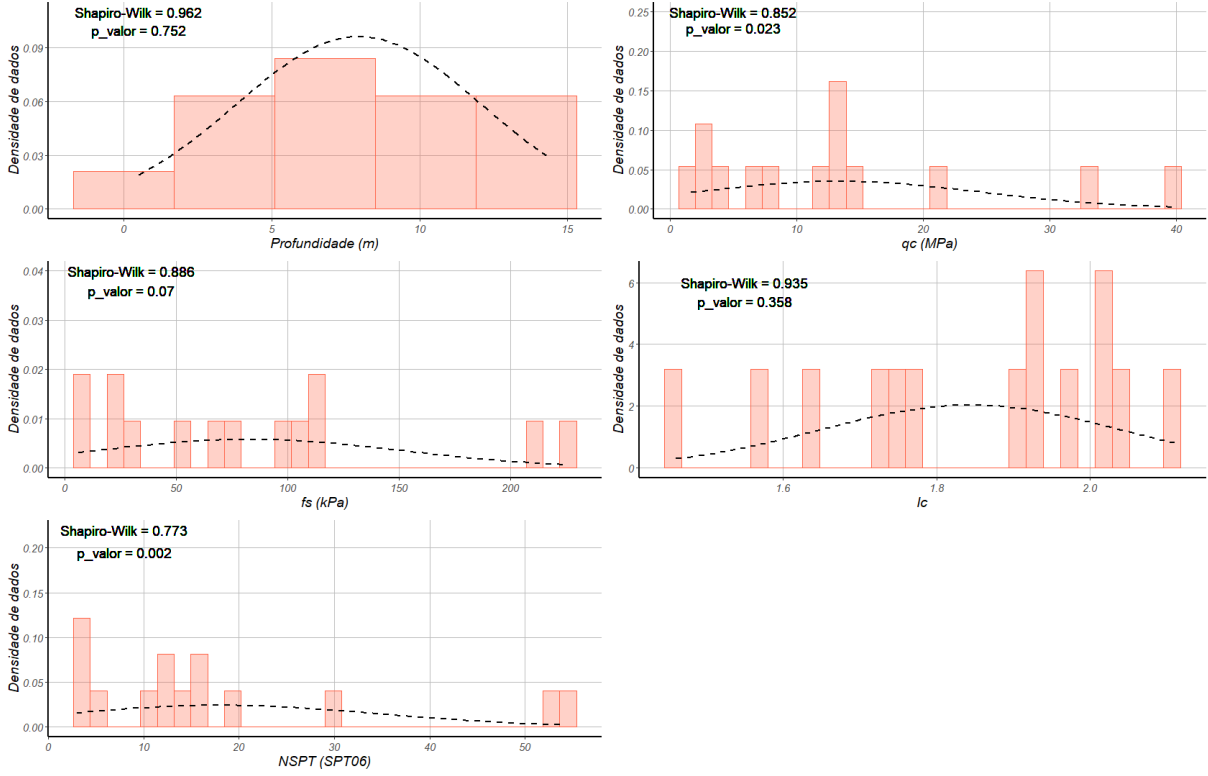
SCPTu 01 e SPT 03



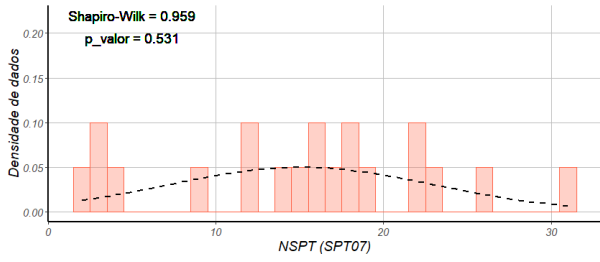
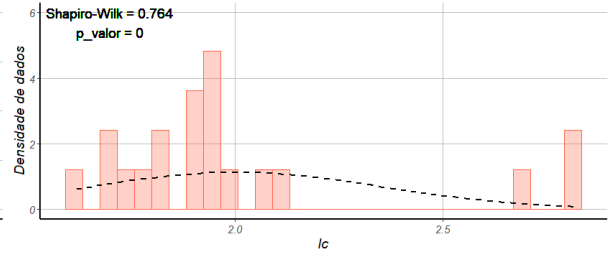
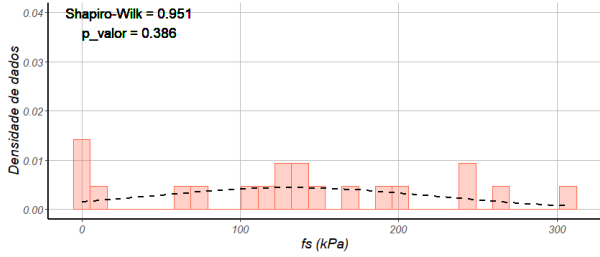
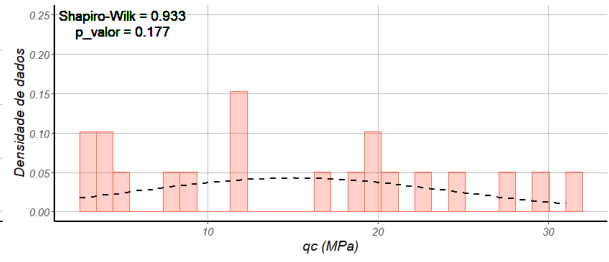
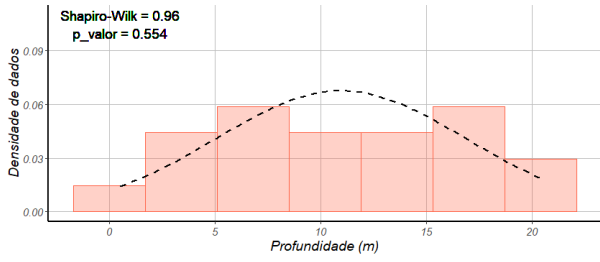
SCPTu 02 e SPT 05



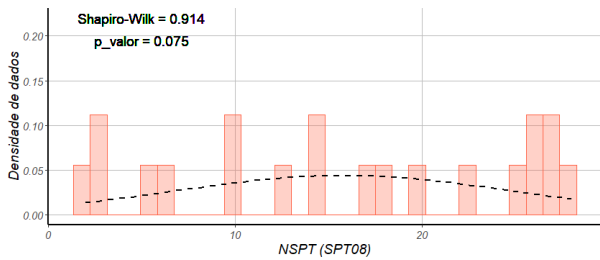
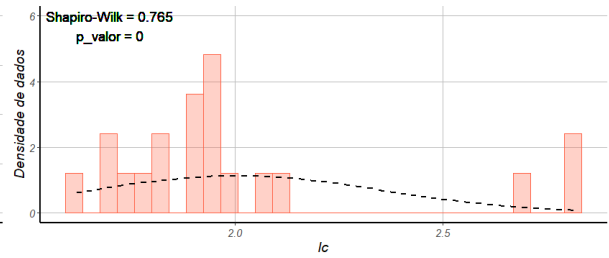
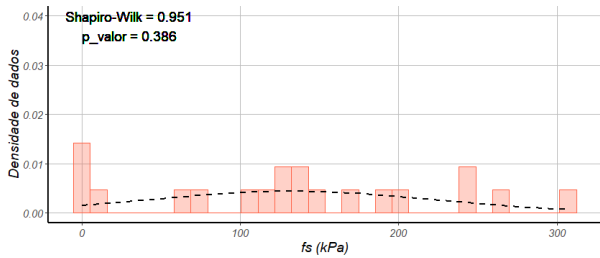
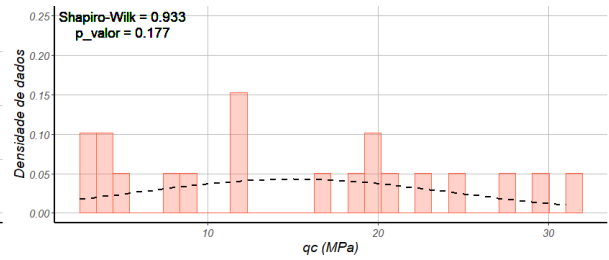
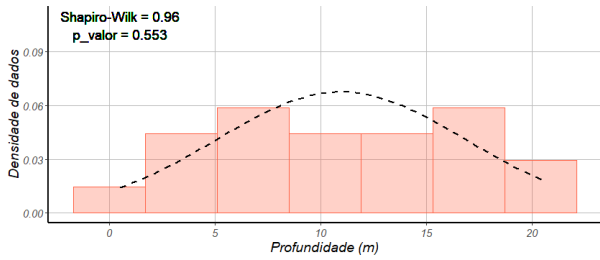
SCPTu 03 e SPT 06



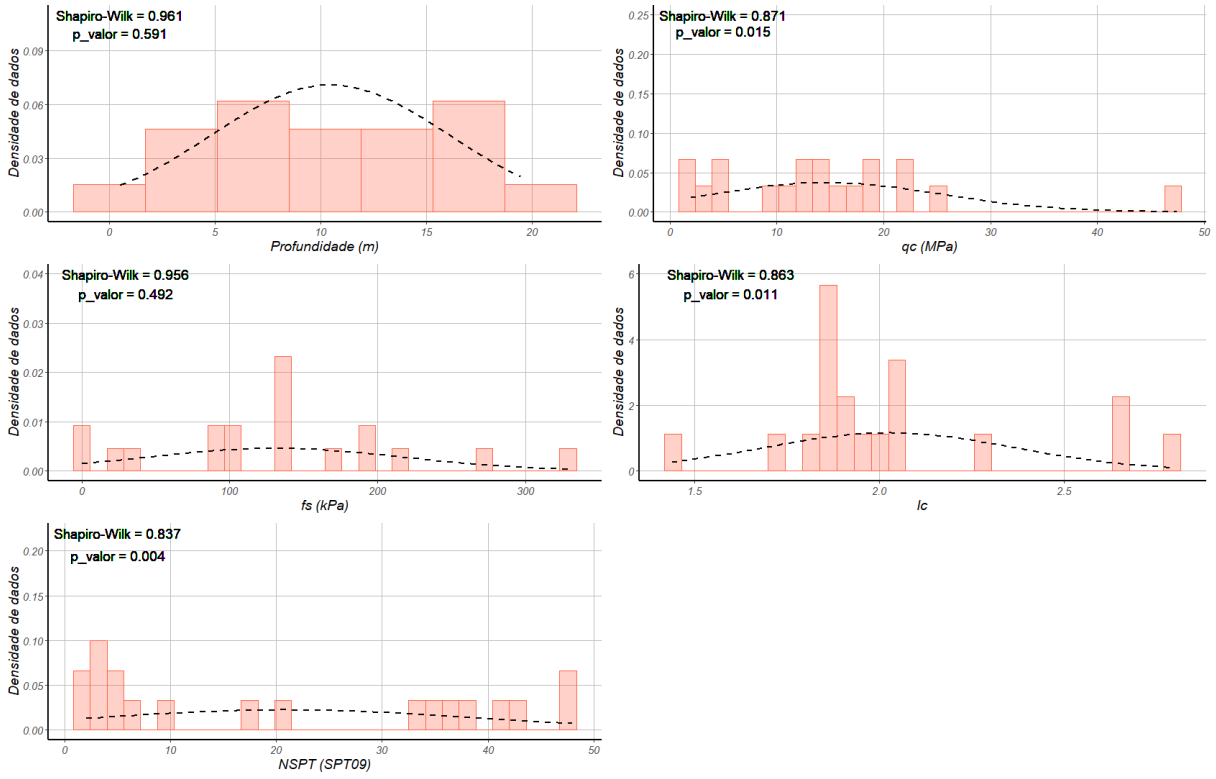
SCPTu 04 e SPT 07



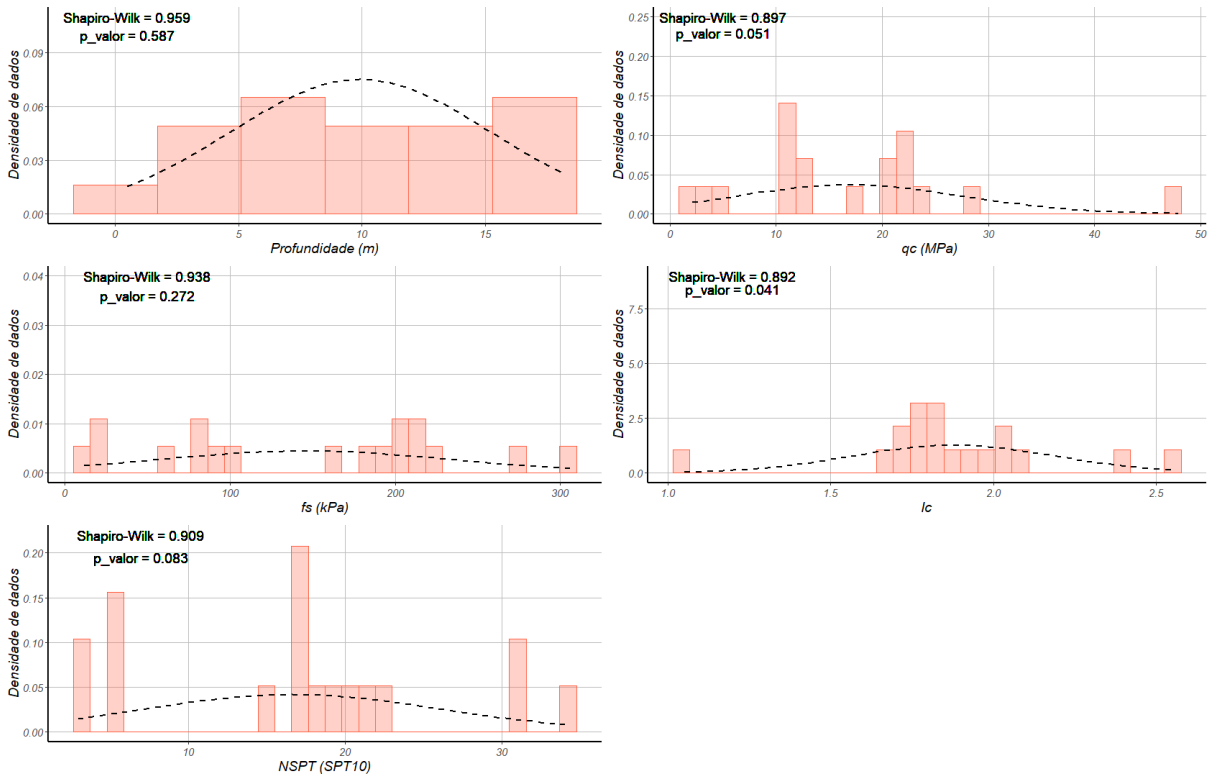
SCPTu 04 e SPT 08



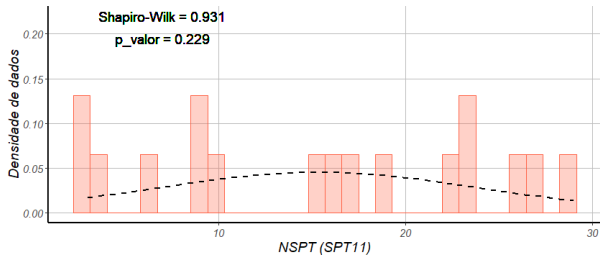
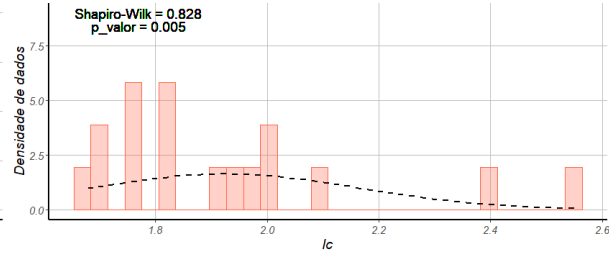
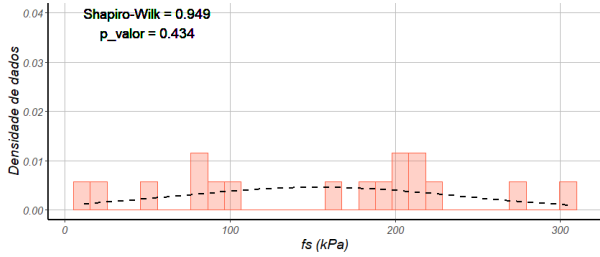
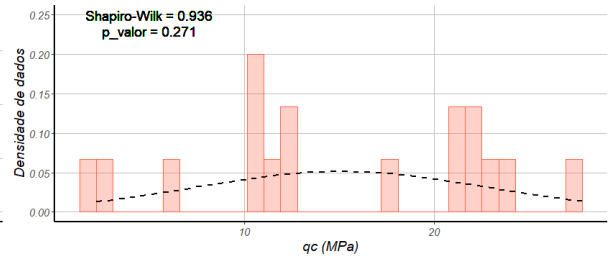
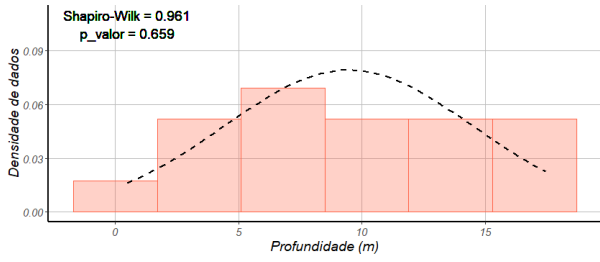
SCPTu 05 e SPT 09



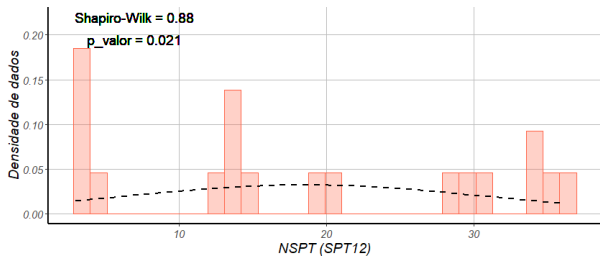
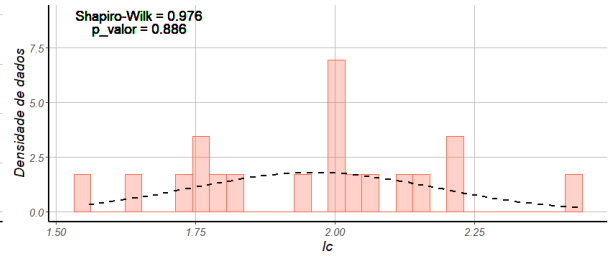
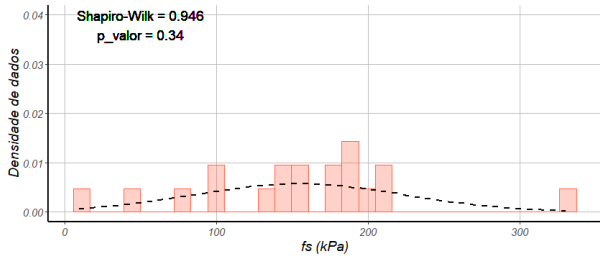
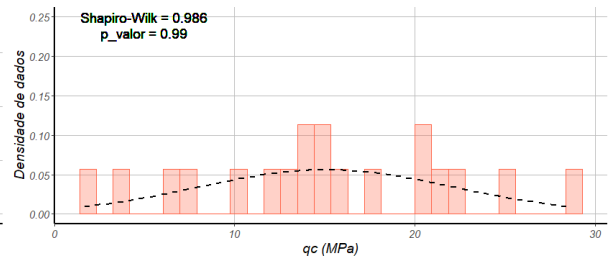
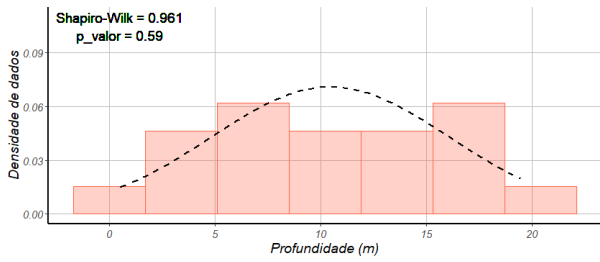
SCPTu 06 e SPT 10



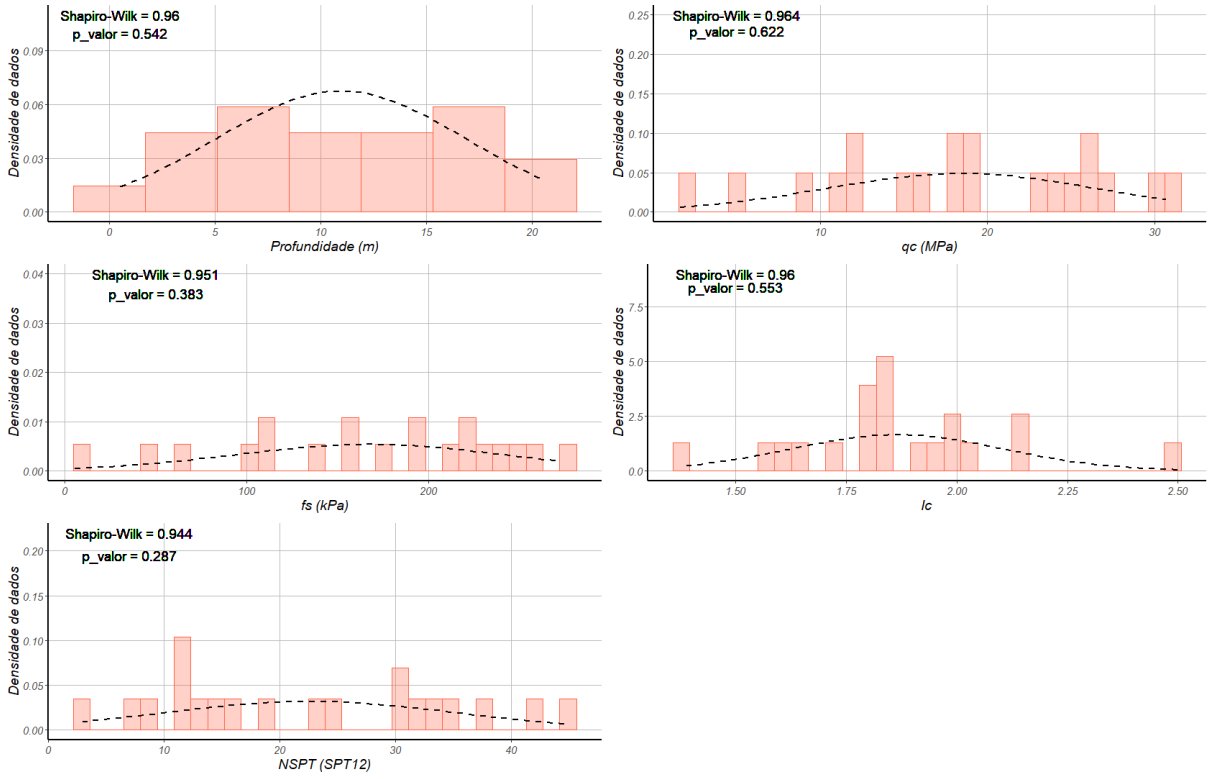
SCPTu 06 e SPT 11



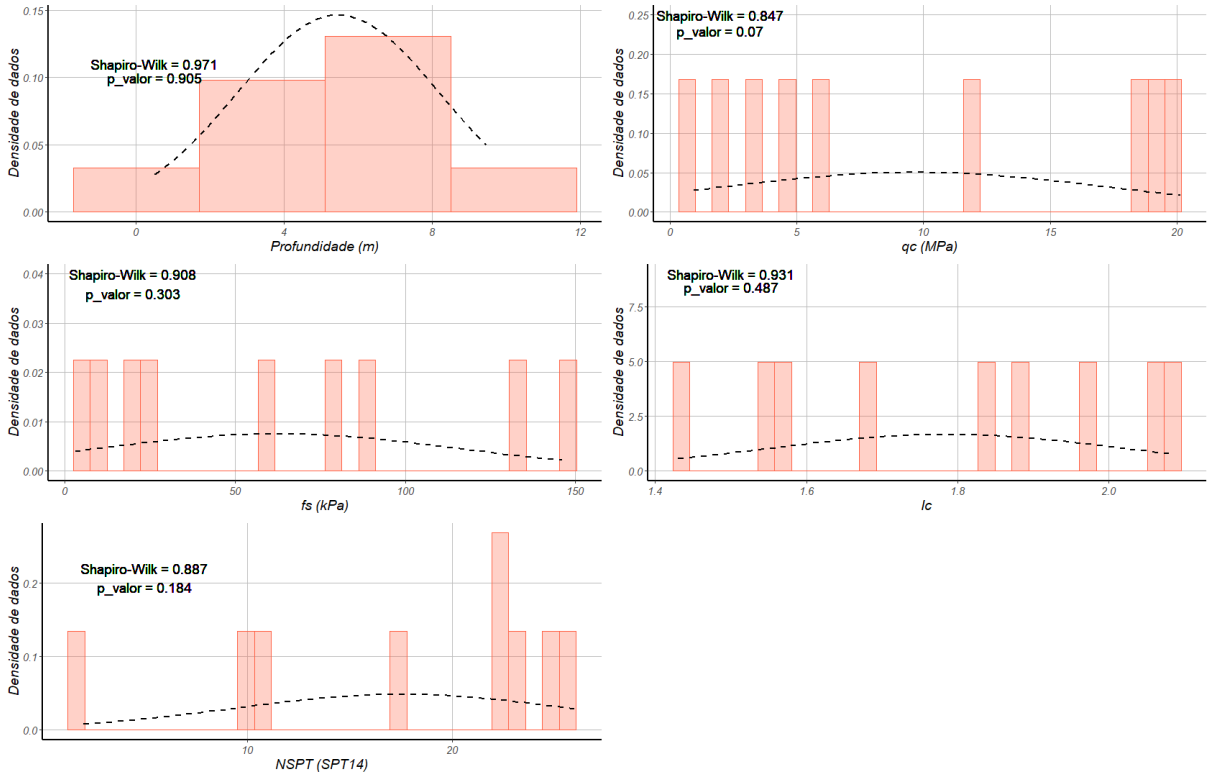
SCPTu 07 e SPT 12



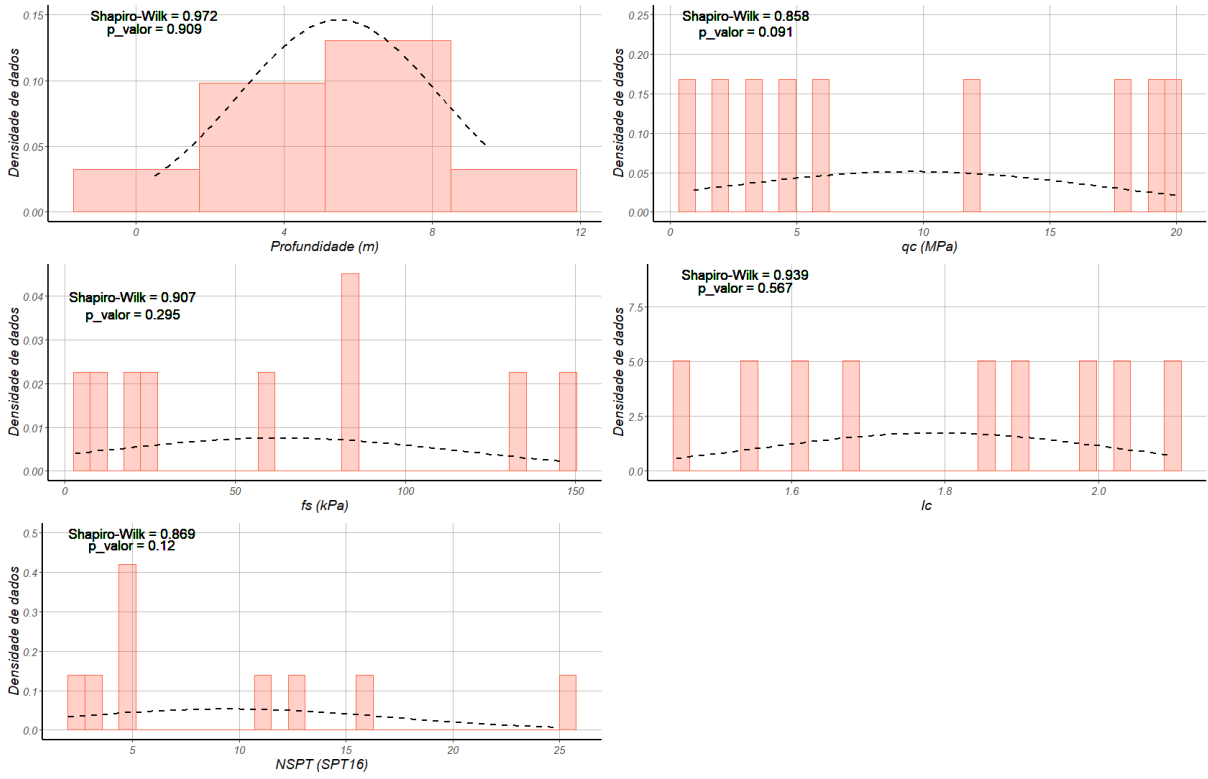
SCPTu 08 e SPT 13



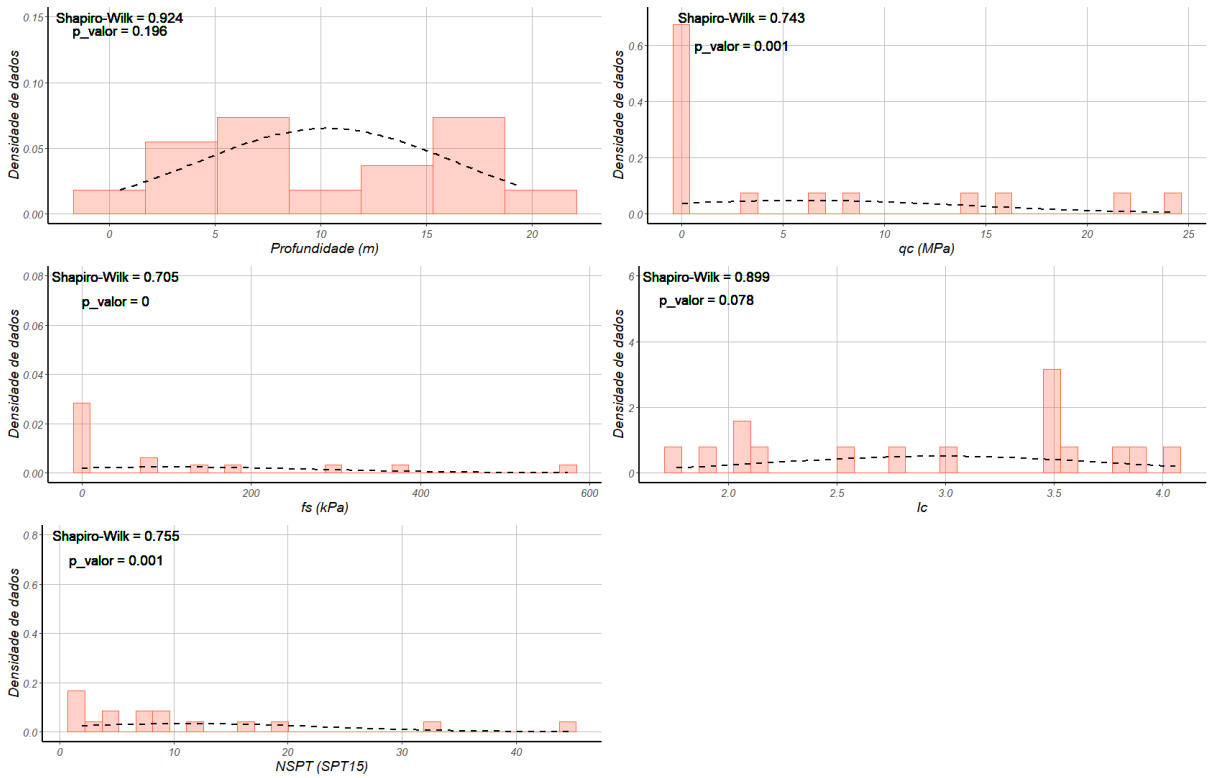
SCPTu 09 e SPT 14



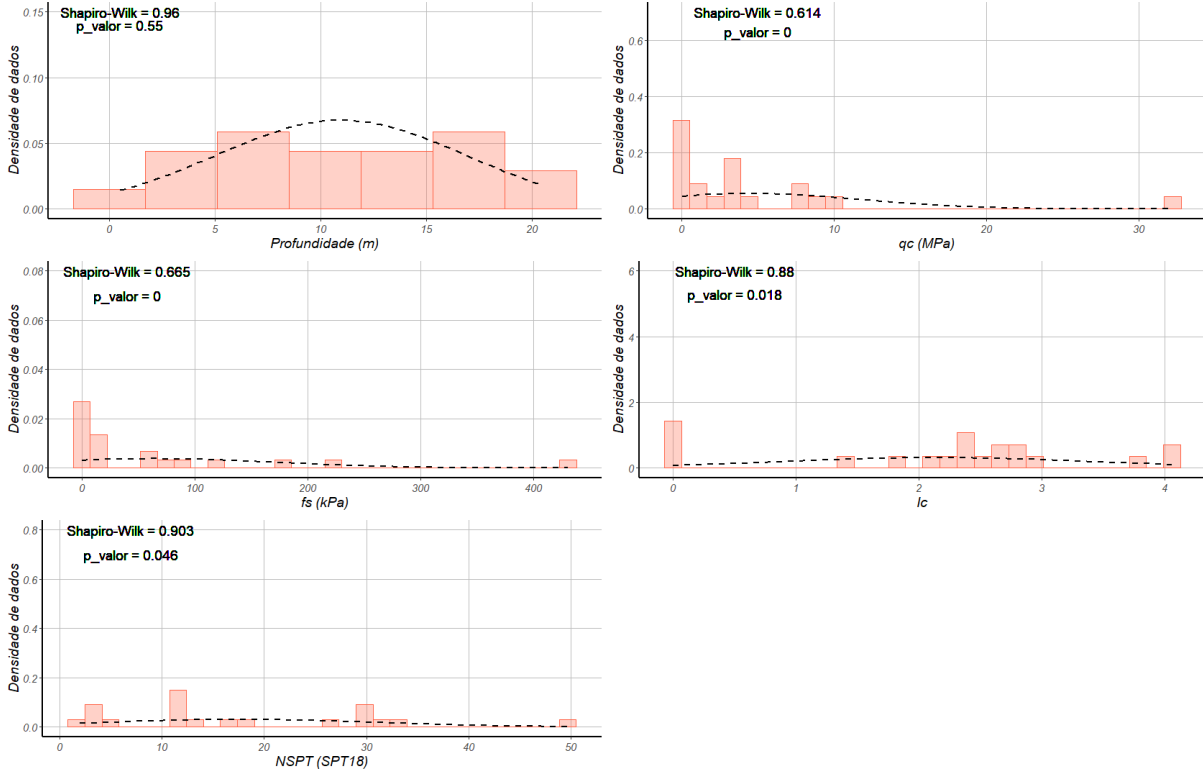
SCPTu 09 e SPT 16



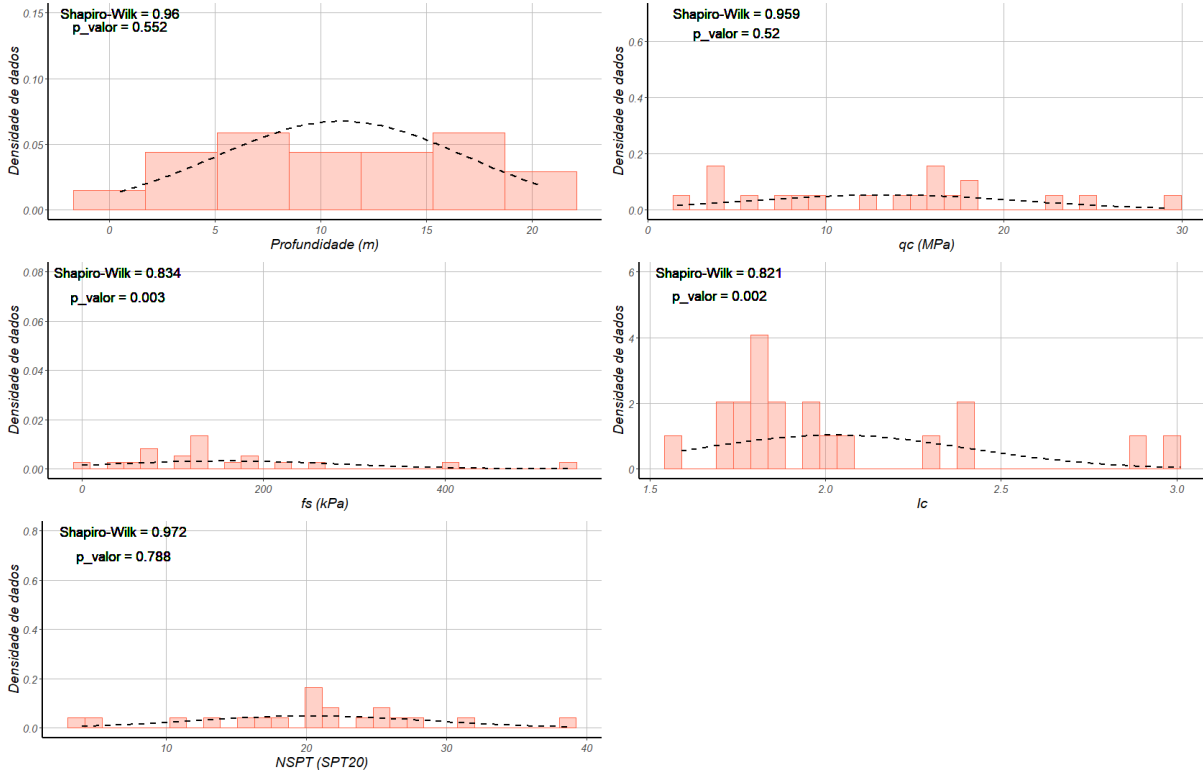
SCPTu 10 e SPT 15



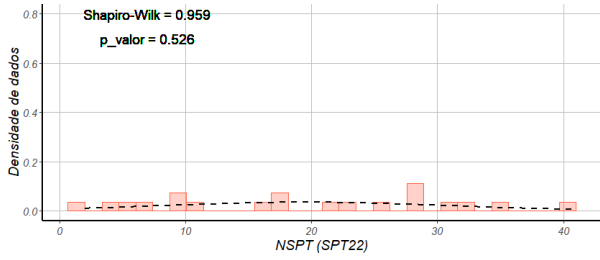
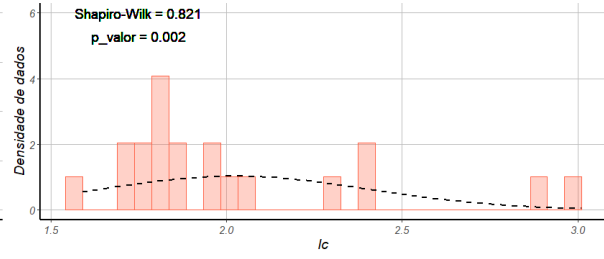
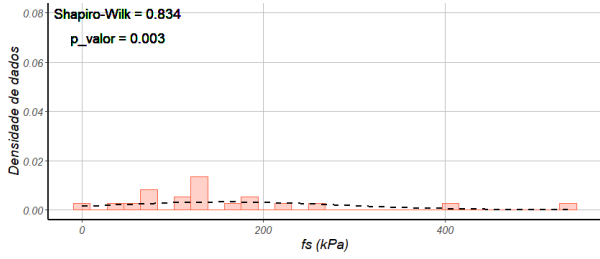
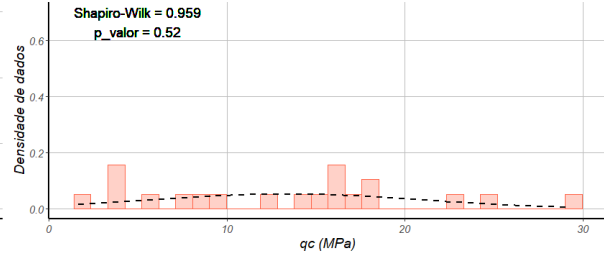
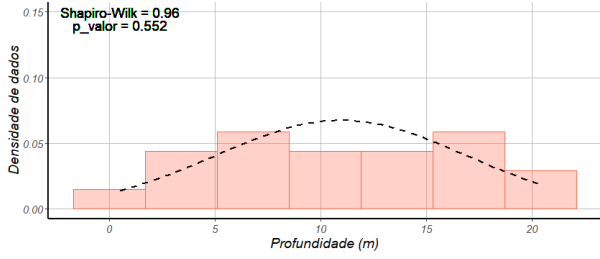
SCPTu 11 e SPT 18



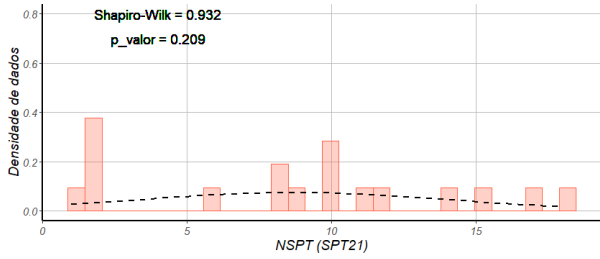
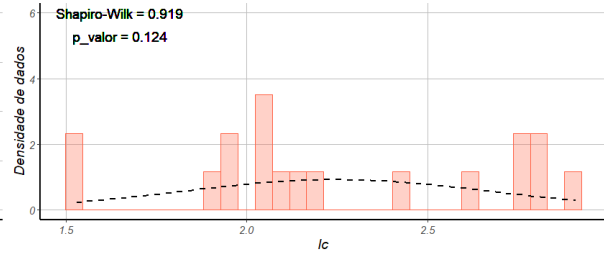
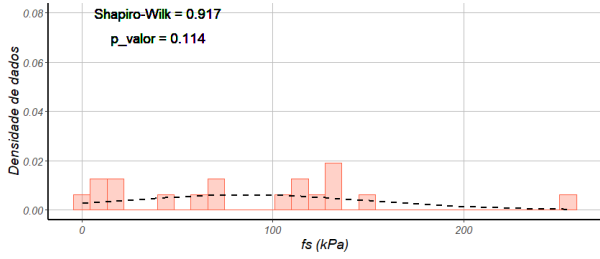
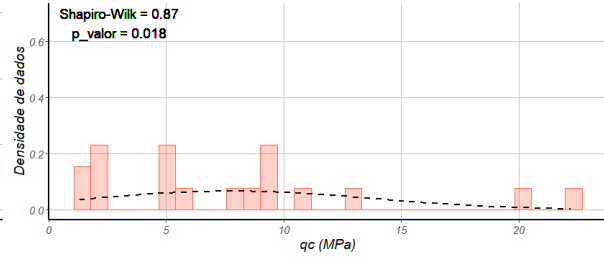
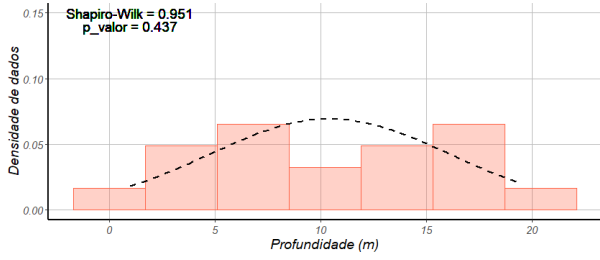
SCPTu 12 e SPT 20



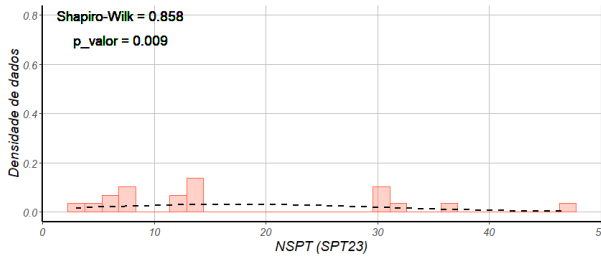
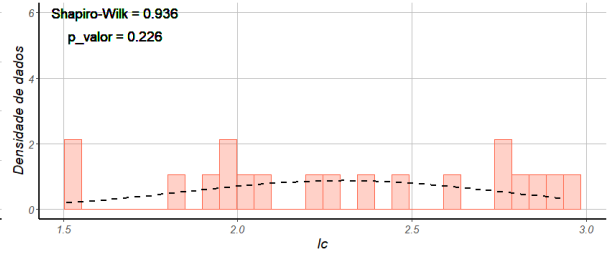
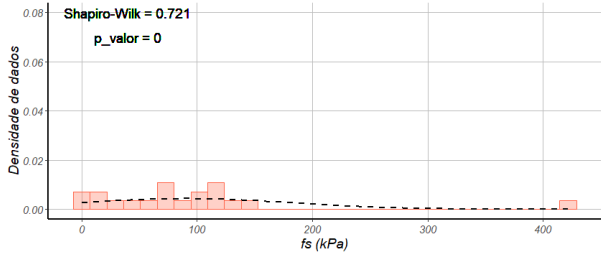
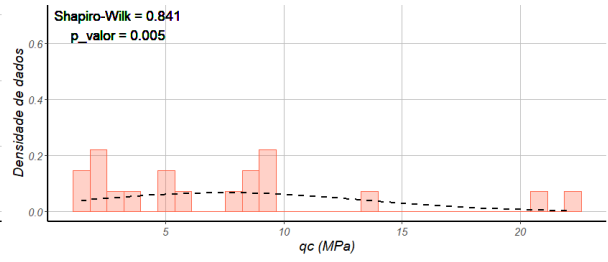
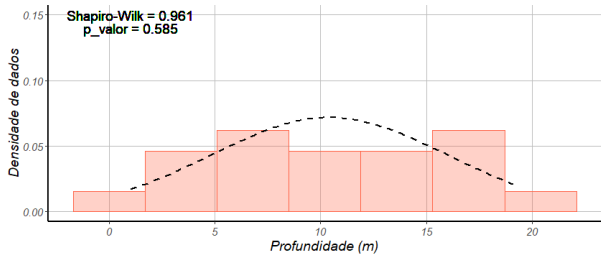
SCPTu 12 e SPT 22



SCPTu 13 e SPT 21



SCPTu 13e SPT 23

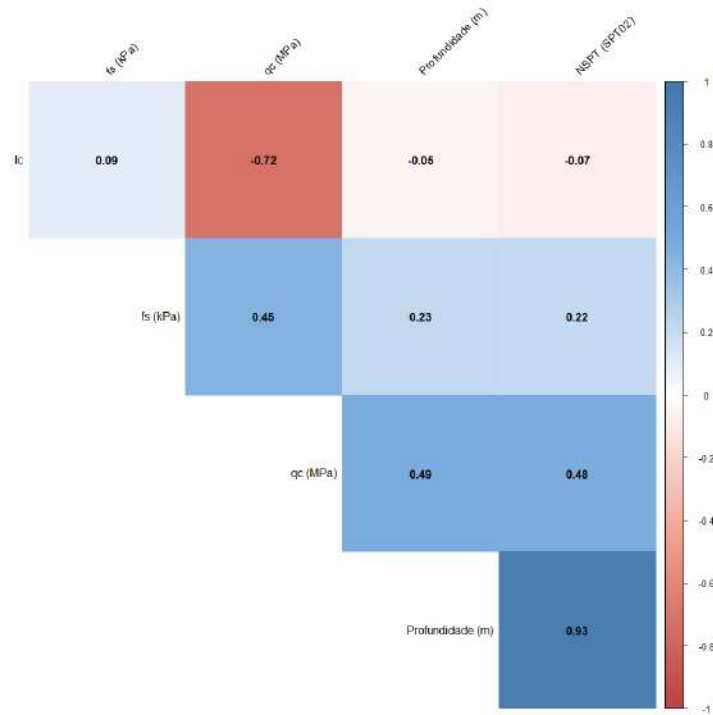


APÊNDICE I

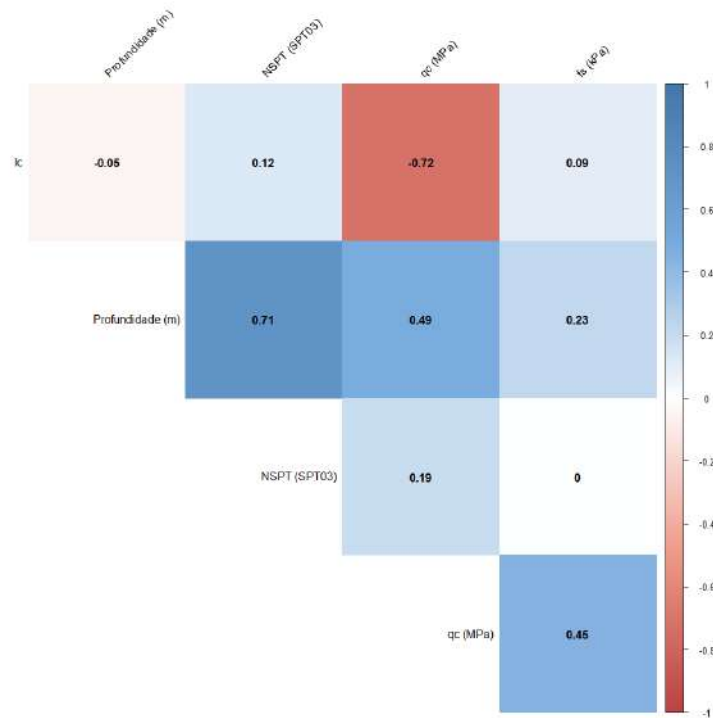
RESULTADOS DOS CORRELOGRAMAS DOS DADOS

q_c , f_s , N_{SPT} , IC e Z

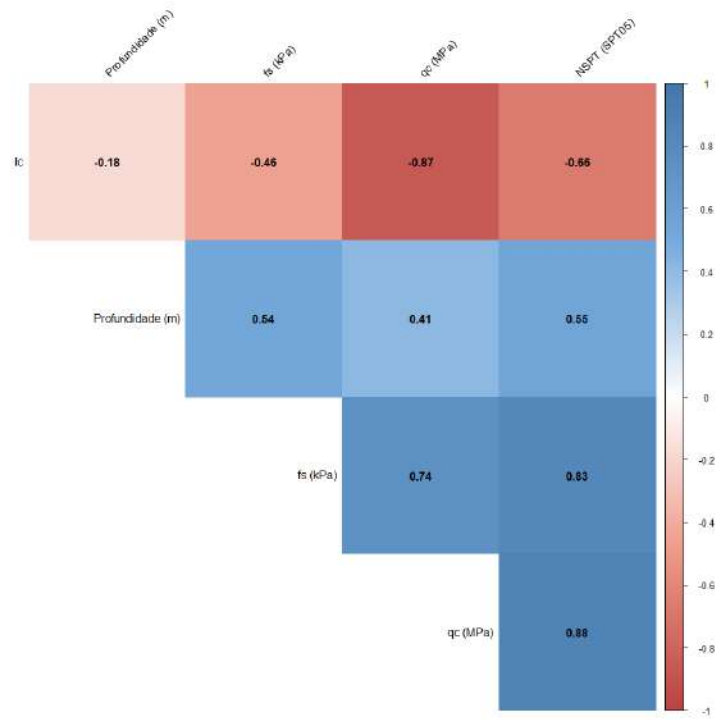
SCPTu 01 e SPT 02



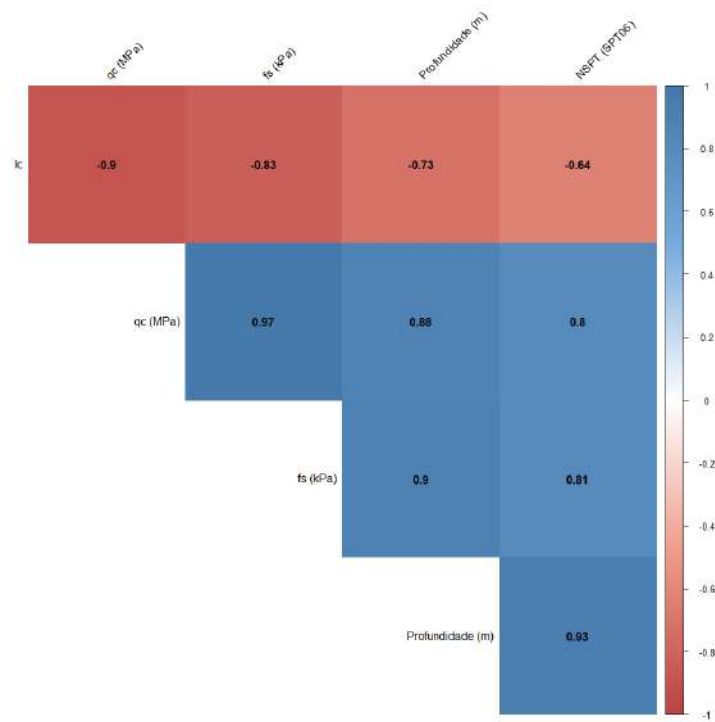
SCPTu 01 e SPT 03



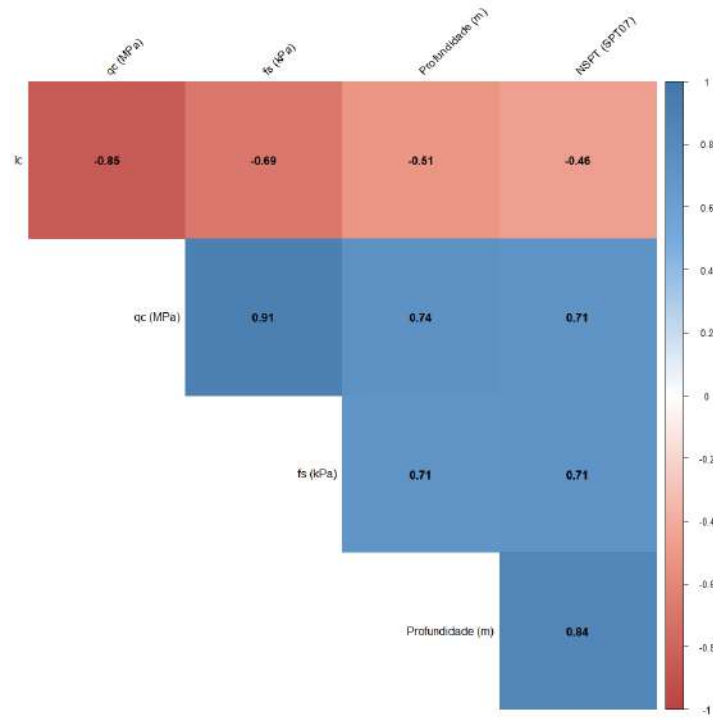
SCPTu 02 e SPT 05



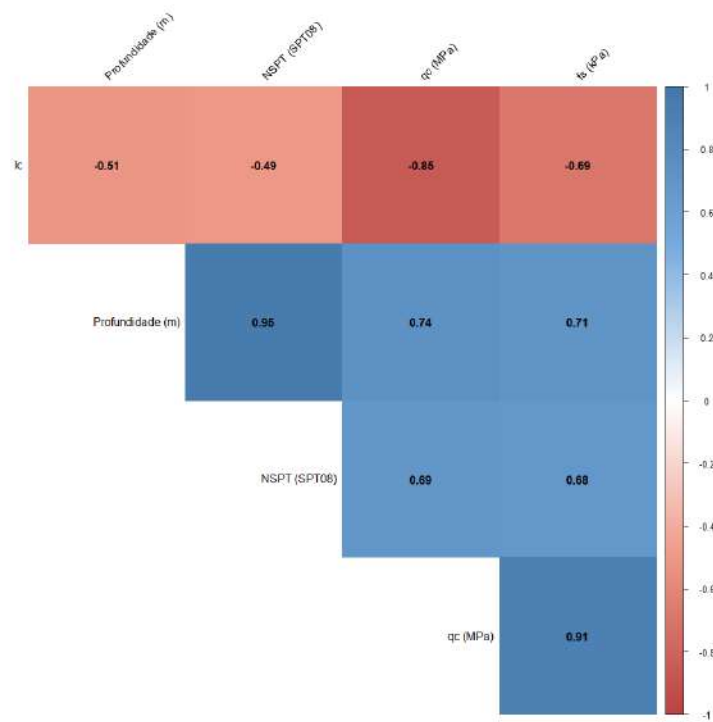
SCPTu 03 e SPT 06



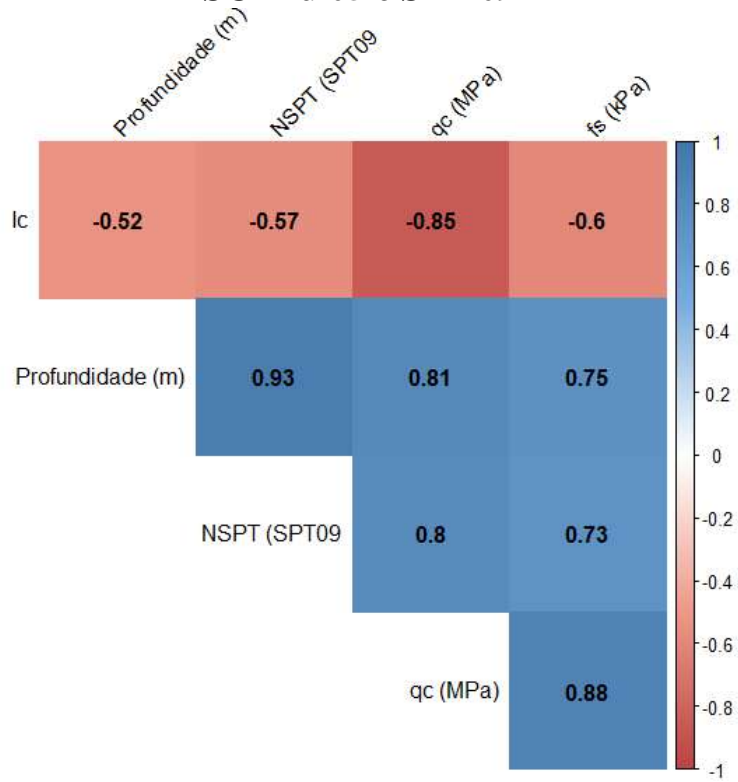
SCPTu 04 e SPT 07



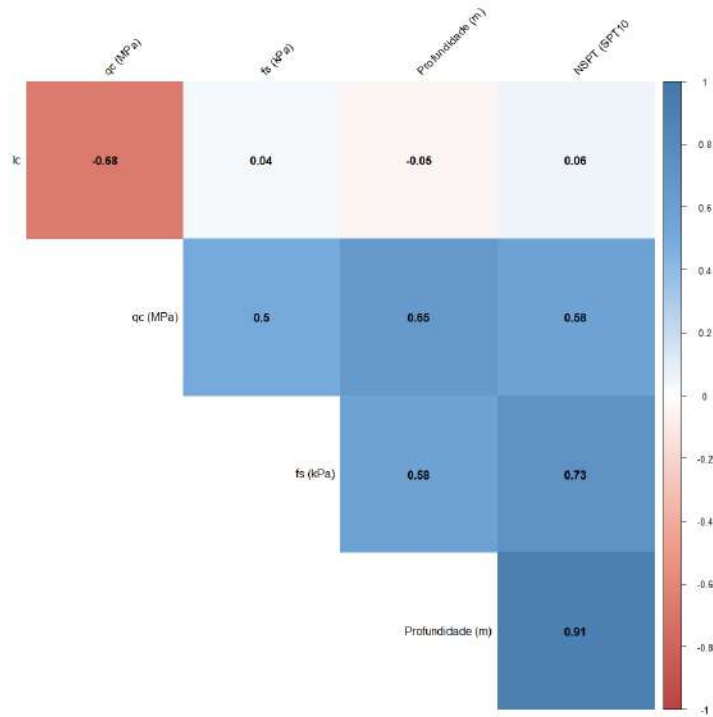
SCPTu 04 e SPT 08



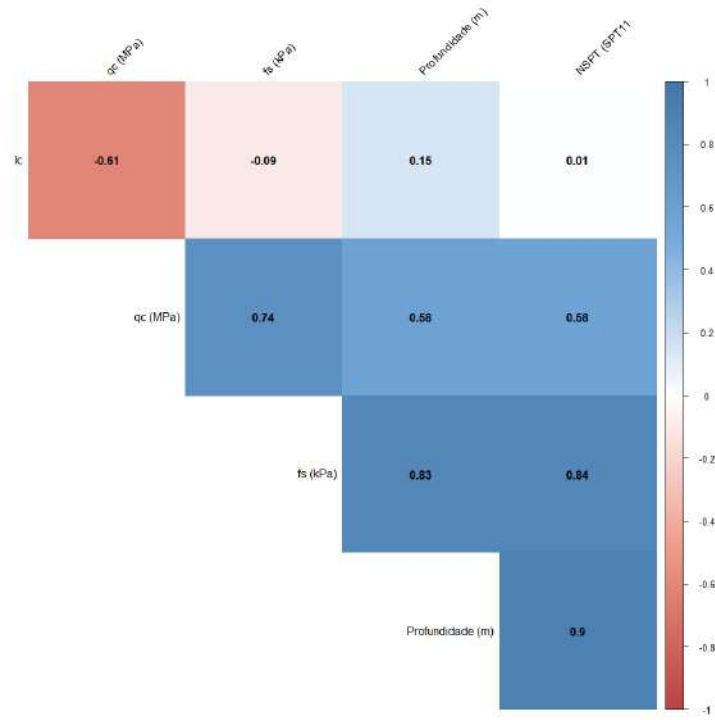
SCPTu 05 e SPT 09



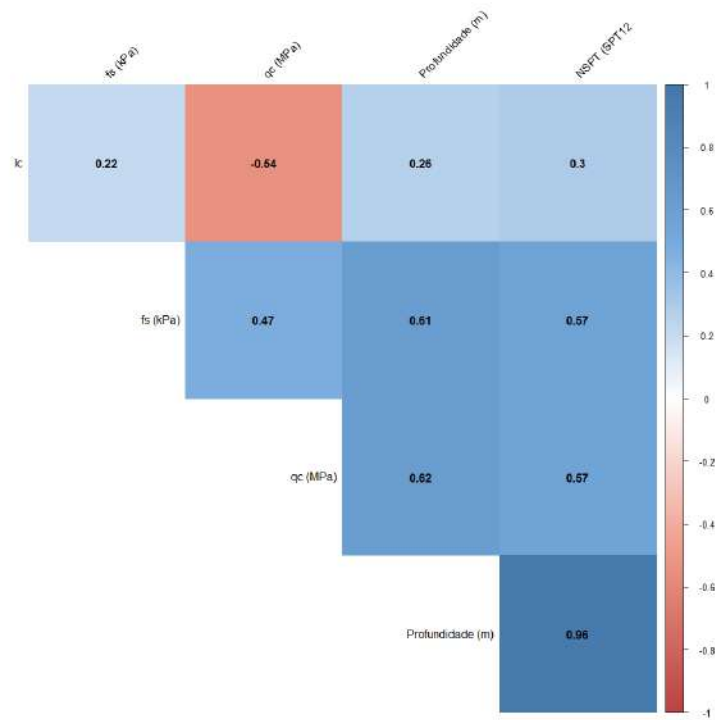
SCPTu 06 e SPT 10



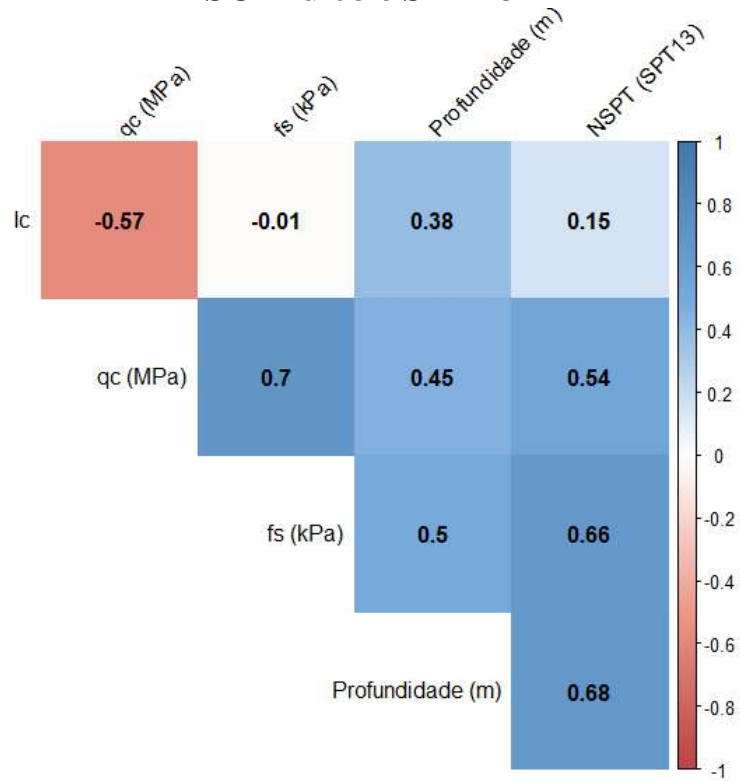
SCPTu 06 e SPT 11



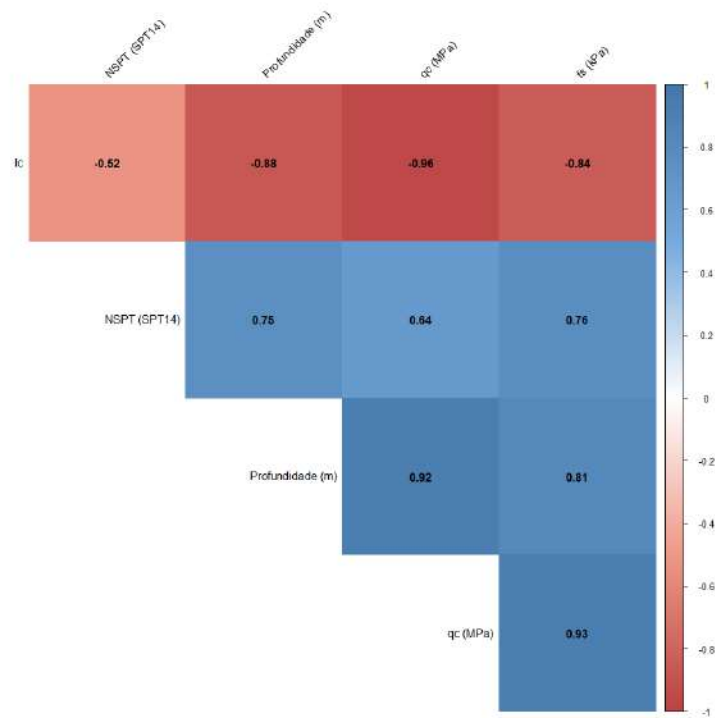
SCPTu 07 e SPT 12



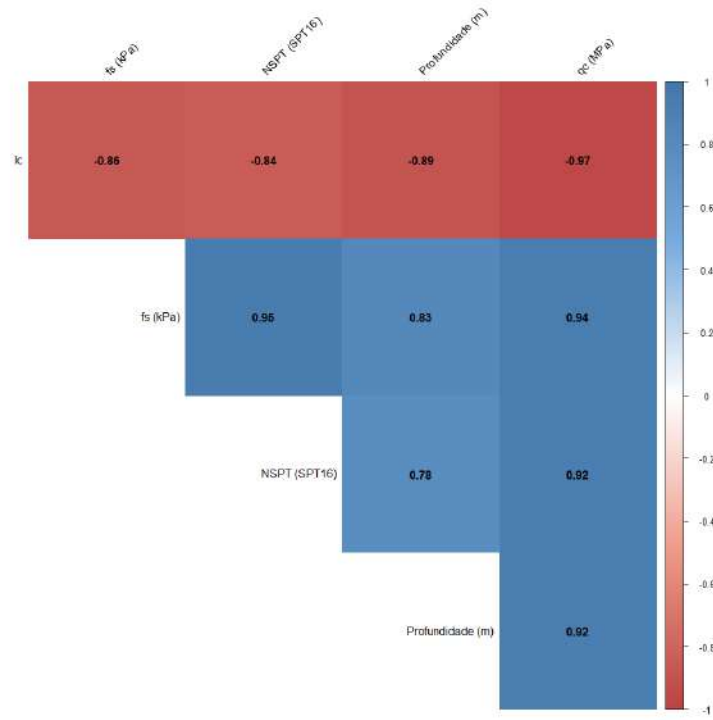
SCPTu 08 e SPT 13



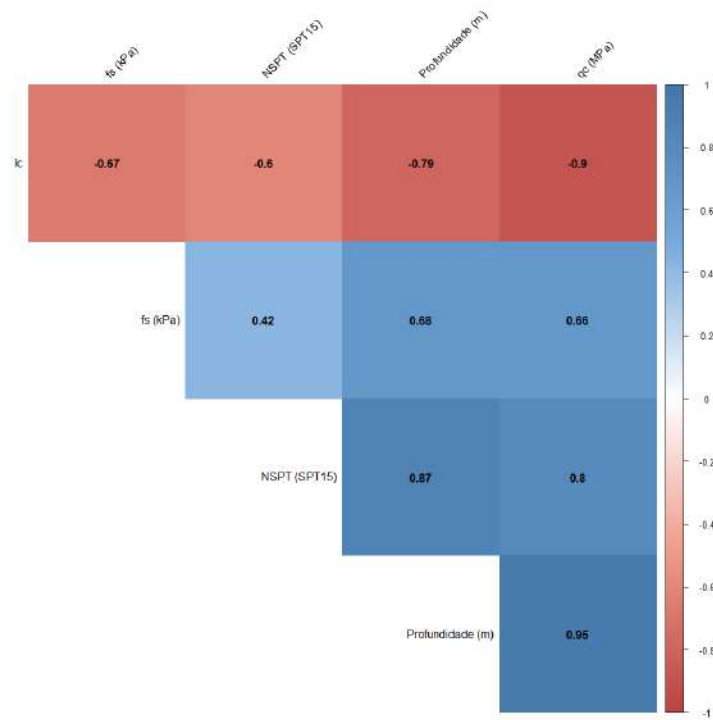
SCPTu 09 e SPT 14



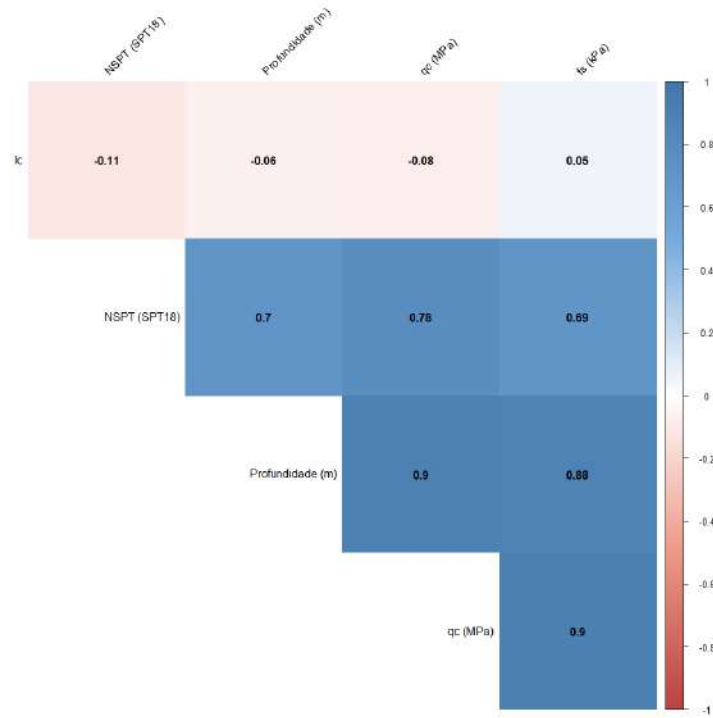
SCPTu 09 e SPT 16



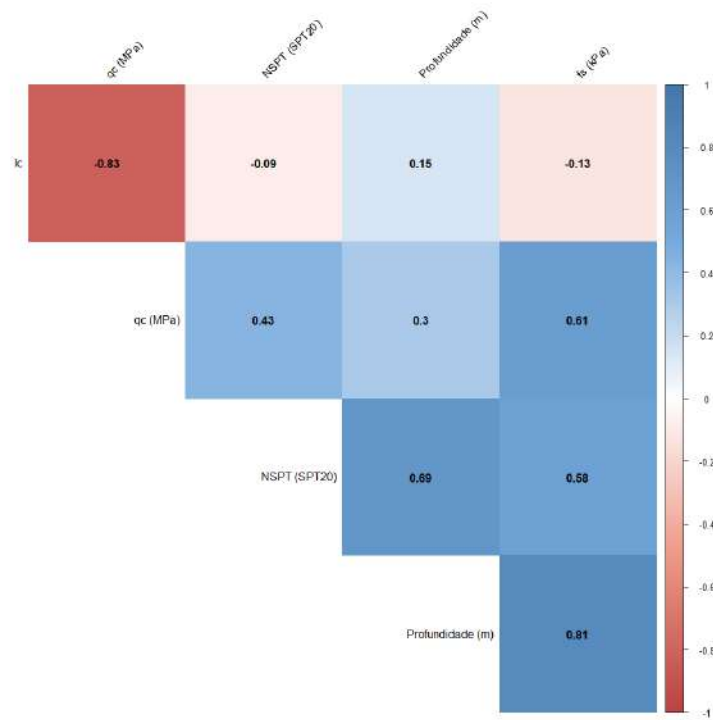
SCPTu 10 e SPT 15



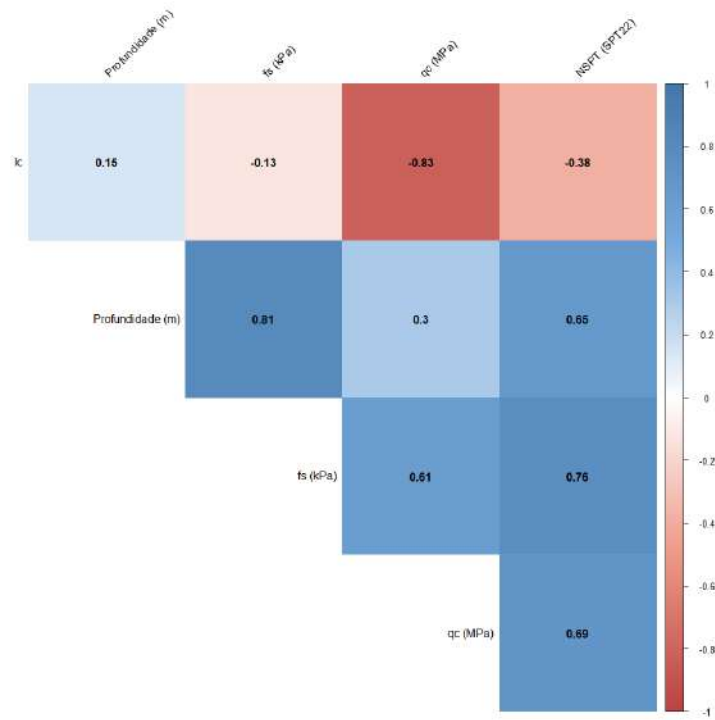
SCPTu 11 e SPT 18



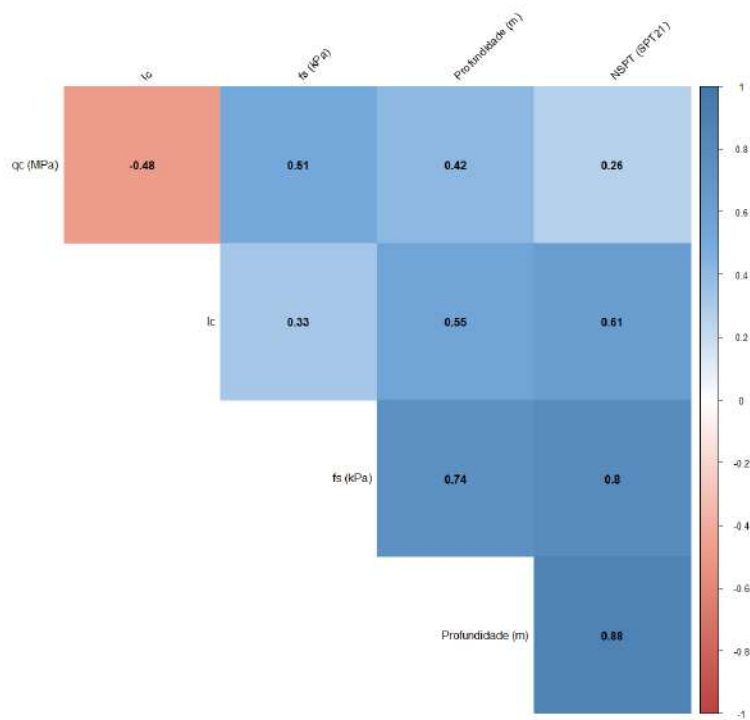
SCPTu 12 e SPT 20



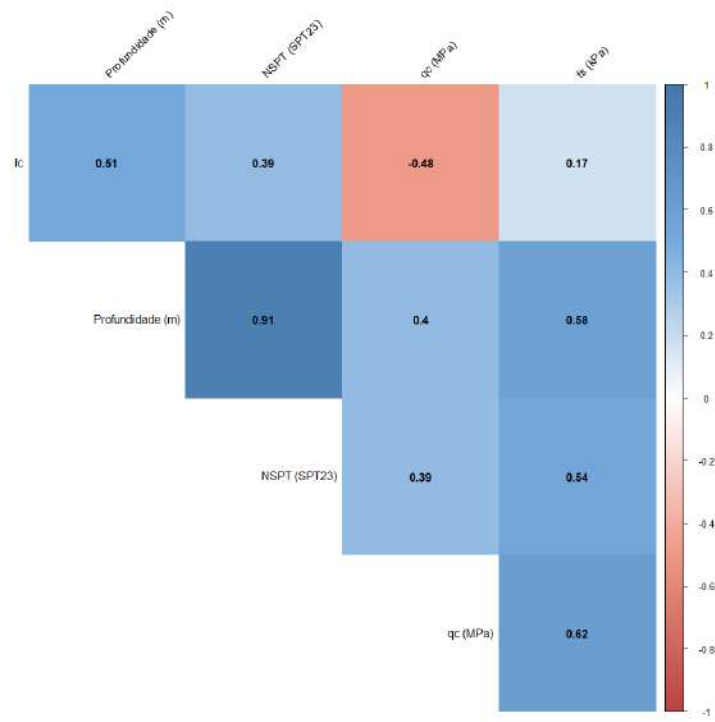
SCPTu 12 e SPT 22



SCPTu 13 e SPT 21



SCPTu 13e SPT 23



APÊNDICE J

DADOS COMPILADOS DE q_c , f_s , e V_s DOS SCPTu's DA ARB 10

SCPTu 01				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	377	246	7,41	134,04
7	366	232	22,86	153,61
10	345	206	36,39	287,95
13	363	228	23,37	184,38
16	323	181	17,80	153,28

SCPTu 02				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	1036	1860	4,66	2,65
7	258	115	10,35	57,48
10	222	85,4	10,92	31,90
13	216	80,9	31,45	43,73
16	185	59,3	5,43	0,95

SCPTu 03				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	355	218	3,21	23,76
7	462	370	6,95	67,40
10	276	132	9,38	67,16
13	308	164	19,99	108,98
16	402	280		

SCPTu 04				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	353	216	5,35	0,01
7	358	222	9,49	86,42
10	412	294	22,84	194,96
13	325	183	20,56	132,58
16	352	215	16,80	97,72

SCPTu 05				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	308	164	4,22	24,15
7	294	150	12,85	116,49
10	369	236	8,72	218,98
13	360	225	23,16	206,18
16	358	222	20,97	223,05

SCPTu 06				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	191	63,2	7,66	75,84
7	320	177	15,17	106,98
10	295	151	25,01	175,75
13	400	277	17,91	170,64
16	425	313	14,37	345,68

SCPTu 07				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	379	249	4,35	58,54
7	450	351	18,19	192,46
10	360	225	22,19	156,05
12,5	369	236	22,05	150,13

SCPTu 08				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	429	319	5,39	40,95
7	361	226	23,08	235,15
10	354	217	31,73	295,84

SCPTu 09				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	365	231	5,39	40,95
7	334	193	23,08	235,15
10	340	200	31,73	295,84
13	284	140	24,64	182,37
16	269	125	9,67	121,36

SCPTu 10				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	326	184	1,49	7,48
7	255	113	15,33	86,55
9	326	184	12,06	81,14
11	319	176	22,15	151,55

SCPTu 11				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	364	230	0,04	0,01
7	359	223	1,30	24,09
10	300	156	0,56	2,92
13	308	164	2,49	19,36
15	419	304	6,86	37,11

SCPTu 12				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	379	249	7,49	73,94
7	416	300	27,18	131,84
10	330	189	18,90	137,85
13	304	160	14,77	140,91
16	409	290	28,60	371,12

SCPTu 13				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
4	295	151	2,33	12,80
7	302	158	25,99	131,06
10	339	199	6,74	63,85
11	360	225		

SCPTu 14				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
3,5	418,83	303,5	3,71	20,34
4	428,59	317,8	4,24	21,08
6,5	456,84	361,1	9,32	76,01
7	479,26	397,4	9,90	89,78
9,5	408,01	288,0	14,95	143,32
10	347,79	209,3	12,36	110,86
12,5	409,29	289,8	9,81	127,82
13	443,60	340,4	15,69	566,87
15,5	389,89	263,0	18,77	212,49
16	381,37	251,6	25,26	199,56

SCPTu 15				
Z	V_s	G_o	q_c	f_s
[m]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[KPa]
3,5	430,60	320,8	4,68	15,53
4	455,26	358,6	5,63	26,36
6,5	470,82	383,5	5,73	20,81
7	412,73	294,7	4,23	25,58
9,5	408,64	288,9	11,80	83,35
10	413,33	295,6	16,65	156,28
12,5	402,43	280,2	17,27	77,70
13	380,64	250,7	6,76	94,48
15,5	405,17	284,0	24,64	251,47
16	399,80	276,5	33,79	232,59