

MODELAGEM FÍSICA DA CRAVAÇÃO DO TRADO DA ESTACA
HÉLICE CONTINUA EM MACIÇOS ARENOSOS UTILIZANDO
SOLO TRANSPARENTE

LUIA MUylaERT DE MENEZES PÓVOA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO – 2020

MODELAGEM FÍSICA DA CRAVAÇÃO DO TRADO DA ESTACA
HÉLICE CONTINUA EM MACIÇOS ARENOSOS UTILIZANDO
SOLO TRANSPARENTE

LUIA MUylaERT DE MENEZES PÓVOA

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.”

Orientador: Paulo César de Almeida Maia
Coorientador: Fernando Saboya Albuquerque Jr.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO – 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

MODELAGEM FÍSICA DA CRAVAÇÃO DO TRADO DA ESTACA
HÉLICE CONTINUA EM MACIÇOS ARENOSOS UTILIZANDO
SOLO TRANSPARENTE

LUISA MUylaERT DE MENEZES PÓVOA

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.”

Aprovada em 11 de Setembro de 2020

Comissão Examinadora:

Prof. Paulo César de Almeida Maia (Orientador, D.Sc., Engenharia Civil) – UENF

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Júnior (Coorientador, D.Sc., Engenharia Civil) – UENF

Prof. António Joaquim Pereira Viana Da Fonseca (D.Sc., Engenharia Civil) – Universidade do Porto (FEUP)

Prof. Gregório Luís Silva Araújo (D.Sc., Engenharia Civil) – UnB

Prof. Sérgio Tibana (D.Sc., Engenharia Civil) – UENF

Dedico este trabalho à minha mãe, Ercília.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar comigo em todos momentos, me acalmando e me dando forças. Acredito que a fé é o melhor presente que Deus pode dar em nossas vidas!

Aos meus pais que sempre me ensinaram o valor do estudo, me incentivaram e me apoiaram nos momentos de incertezas; as minhas avós que sempre torcem por mim e iluminam minha vida; a minha tia Regina por ser minha segunda mãe e ao meu tio Geraldo que é apaixonado pelo conhecimento.

A minha irmã Leticia, por ser exemplo de pessoa pura e por torcer pelas minhas conquistas.

Ao Pedro, agradeço por sempre querer o meu crescimento e fazer com que eu veja a vida no tamanho dos meus sonhos.

A todos os meus amigos que fizeram a minha caminhada mais leve e alegre.

Ao meu amigo Cleanto que possibilitou a realização de parte desse trabalho.

Ao Milton por ter me auxiliado nos ensaios e pela amizade.

Ao meu orientador Paulo Maia por ter me orientado e por querer sempre o melhor para seus alunos.

Ao meu coorientador Fernando Saboya por transmitir tanto conhecimento e paixão pela mecânica dos solos.

A todos os professores que acreditam que sendo um bom profissional contribuem para um Brasil mais justo e desenvolvido.

A minha querida UENF, que foi minha casa por muitos anos.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS	xxiii
RESUMO	xxvi
ABSTRACT.....	xxviii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Estrutura da Tese	4
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Estacas Hélice Contínua	5
2.1.1 Histórico	5
2.1.2 Método Executivo	8
2.1.3 Maciços de Fundações Favoráveis e Desfavoráveis para a instalação de estacas hélice contínua.....	11
2.1.4 Mecânica da Cravação do Trado da estaca hélice contínua	13
2.2 Efeitos da instalação das estacas no sistema estaca-solo	14
2.2.1 Alteração do estado de tensões do solo.....	14
2.2.2 Ação do concreto fresco	15
2.2.3 Tempo de espera para início da concretagem e interrupção da concretagem.....	16
2.2.4 Trabalhos sobre os efeitos da instalação das estacas no sistema estaca-solo	17
2.3 Modelagem Física	27
2.3.1 Processo de Execução de um Modelo Reduzido	28
2.3.2 Classificação	29
2.3.3 Trabalhos realizados de modelagem de estacas	30
2.4 Solos Transparentes	36

2.4.1	Definição	36
2.4.2	Famílias de Solos transparentes atualmente disponíveis.....	37
2.4.3	Teses de doutorado utilizando solos transparentes	53
2.4.4	Técnicas de Medição com o uso de Solos Transparentes	54
2.4.5	Técnicas de Processamento e Análise de Imagens	58
2.5	Tomografia Computadorizada na Engenharia Geotécnica	65
2.5.1	Princípios básicos da Tomografia Computadorizada	66
2.5.2	Aquisição das Imagens	66
2.5.3	Processamento digital de imagens	68
2.5.4	Utilização de métodos clássicos e da Tomografia Computadorizada de Raios-X para determinar o índice de vazios do solo	70
2.6	Conclusões com base na Revisão Bibliográfica.....	72
CAPÍTULO 3 - Mudança de densidade no entorno da estaca – caso obra		75
3.1	Caso de estudo.....	76
3.2	Procedimentos de ensaio para determinação do índice de vazios	78
3.2.1	Amostragem.....	78
3.2.2	Procedimentos de ensaio para os ensaios convencionais de laboratório.....	83
3.2.3	Tomografia computadorizada de Raio-X	83
3.2.4	Resinagem	86
3.3	Resultados obtidos	87
3.3.1	Granulometria e Textura obtida pela técnica de resinagem	87
3.3.2	Índice de vazios pelo método tradicional	89
3.3.3	Imagens da Tomografia Computadorizada de Raios-X.....	91
3.3.4	Variação do índice de vazios do solo na envolvente da estaca obtidos a partir da TC-RX.....	93
3.3.5	Comparação dos índices de vazios obtidos pela tomográfica computadorizada e a técnica convencional.....	96

CAPÍTULO 4 - Modelagem Física	99
4.1 Programação de ensaios.....	99
4.2 Dimensionamento do modelo	102
4.3 Montagem da Caixa de Ensaio com Solo transparente	103
4.3.1 Seleção do material granular	104
4.3.2 Seleção de poro fluidos nacionais	105
4.3.3 Definição da mistura adequada para a produção do solo transparente.....	107
4.3.4 Propriedades físicas do solo transparente.....	112
4.3.5 Ensaio de compressão confinada.....	112
4.3.6 Ensaio de cisalhamento direto.....	113
4.3.7 Ensaio de Permeabilidade	116
4.3.8 Caixa de Ensaio	116
4.3.9 Enchimento da caixa de ensaio	117
4.4 Sistemas de Cravação do Trado	121
4.4.1 Suporte para o Atuador.....	122
4.4.2 Controlando o motor de Passo com Arduino	122
4.4.3 Trado.....	128
4.4.4 Acoplador de eixo rígido	134
4.4.5 Guia.....	135
4.5 Sistema de aquisição de dados.....	136
4.5.1 <i>Interferometria speckle</i>	136
4.6 Configuração Experimental e Procedimento	139
CAPÍTULO 5 - Resultados e Discussões	142
5.1 Caracterização Física e Mecânica do Solo transparente	142
5.1.1 Propriedades físicas da sílica gel	142
5.1.2 Ensaio de Compressão Confinada	145

5.1.3	Esmagamento de Partículas	146
5.1.4	Ensaio de cisalhamento direto	148
5.1.5	Ensaio de permeabilidade	157
5.1.6	Função de transferência de modulação	157
5.1.7	Resumo das propriedades do solo transparente	159
5.2	Influência da Taxa de Cravação	159
5.3	Influência do Passo	171
5.4	Área de Influência	172
5.5	Análise da ação de transporte do solo entre as hélices do trado contínuo 172	
5.6	Determinação da Taxa de cravação ótima do trado	176
5.7	Comparação dos resultados dos ensaios realizados com as teorias CEM e SSPM	180
5.7.1	Comparação da solução CEM e os resultados dos ensaios existentes	180
5.7.2	Curva de elevação da superfície	184
5.7.3	Verificação da curva de elevação dos resultados dos ensaios utilizando o SSPM	185
5.8	Limitações da técnica de solos transparentes	187
5.9	Comparação dos resultados do caso de estudo e da modelagem física 188	
5.9.1	Metodologias	188
5.9.2	Variação dos índices de vazios	189
5.9.1	Taxa de cravação ótima	191
CAPÍTULO 6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros		192
6.1	Conclusões	192
6.1.1	Conclusões gerais	192
6.1.2	Sobre o caso de Obra	192

6.1.3	Sobre a caixa de cisalhamento desenvolvida.....	193
6.1.4	Sobre a modelagem física	193
6.1.5	Sobre o desenvolvimento da técnica de solos transparentes.....	194
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	194
REFERÊNCIAS		196
ANEXO A -	Imagens da Tomografia Computadorizada	215
ANEXO B -	Algoritmos para controlar a velocidade de rotação	227
ANEXO C -	Algoritmos para controlar a velocidade de subida e descida ...	230
ANEXO D -	Calibração da impressora 3D UP PLUS.....	234

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equipamento montado em guindaste com lança treliçada, Penna et al. (1999).....	6
Figura 2 - Aplicações de Estacas Hélice contínua.	8
Figura 3 – Ilustração esquemática do método executivo da estaca hélice contínua monitorada.	9
Figura 4 – Maciços de fundação desfavoráveis a instalação de estacas hélice contínua.	13
Figura 5- Ação do transporte de areia pelo trado.	14
Figura 6 – Dimensões do Trado.	18
Figura 7 - Esquemático da cravação do trado, BROWN <i>et al.</i> (2007).	21
Figura 8 – Esquema de cravação de estacas hélice contínua quando o solo está sendo deslocado para as laterais, modificado de SILVA (2011).	21
Figura 9 – Resultado de ensaio CPT executado aproximadamente no mesmo local antes e após a instalação de estaca hélice contínua (Van Weele, 1988).	23
Figura 10 – Gráfico de resistência lateral (f_s), Albuquerque (2001).	24
Figura 11 - Fotografias de secções centrais dos modelos dissecados.	26
Figura 12 – Modelo do trado utilizado na perfuração, HIRD <i>et al</i> (2011).	26
Figura 13 - Fluxograma da sequência de execução de um modelo físico.	29
Figura 14 – Modelo de Estaca Helicoidal Contínua feita por FRANGOULIDES (1999).	31
Figura 15 - Esquema da configuração do teste axissimétrico, HIRD <i>et al.</i> (2006).	32
Figura 16 – Modelo usado por HIRD <i>et al.</i> (2006).	32
Figura 17 - Modelo de perfuração de estacas helicoidais, JEFFREY (2012).	33
Figura 18 - Modelos realizados por JEFFREY (2012) para ajustar a forma mais adequada de simular a fase de concretagem do processo executivo de estacas.	34
Figura 19 – Tubos de alumínio simulando as estacas em escala reduzida: a) As meias-canas instrumentadas e b) Estacas com a rosca de vedação na extremidade inferior.	35
Figura 20 - Modelos reduzidos dos trados de hélice contínua e ômega, PESSANHA <i>et al.</i> (2014).	35

Figura 21 – Reflexão e refração da luz em meios com IR distintos.	36
Figura 22 - Pó de sílica amorfa (sílica micronizada).....	38
Figura 23 - Resposta mecânica da sílica em pó transparente típica (Flo-Gard SP) empregada para modelar argila, (a) compressão triaxial não drenada e (b) compressão triaxial drenada (adaptado de Sadek et al. 2003).	39
Figura 24 - A sílica gel angular.	40
Figura 25 – Resistência ao cisalhamento do gel de sílica denso e fofo, em condições secas e saturadas, a partir de ensaios de compressão triaxial, (adaptado de ISKANDER <i>et al.</i> , 2002).	41
Figura 26 – Propriedades de consolidação da sílica e sílica amorfa (Liu et al., 2003).....	42
Figura 27 – Tipos de Aquabeads.....	43
Figura 28 – Resultados de ensaios de palheta em Aquabeads (Tabe, 2009)...	44
Figura 29 – Quartzo fundido.	45
Figura 30 - Capa do livro “ Modelling with transparentsoils” do prof. Magued Iskander visto através de uma espessura de 5 cm de solo transparente feito com quartzo fundido e mistura de óleos minerais.	46
Figura 31 - Transparência obtida com o solo transparente com low color sucrose vista ao fundo com um alvo oftalmológico, GUZMAN <i>et al.</i> (2014).	48
Figura 32 - Logotipo do grupo de geotecnologia da NYU visto a 50 mm de espessura em um container com solo transparente composto de quartzo fundido e solução de água com iodeto de sódio tratado com thiosulfato de sódio, (CARVALHO, 2015).....	48
Figura 33 - Resposta mecânica do quartzo fundido em um ensaio de compressão triaxial, adaptado de ISKANDER <i>et al.</i> (2015).	49
Figura 34 – Ilustração da Laponita utilizada como solo transparente.	50
Figura 35- Pó de Gelita. (Hakhamaneshi <i>et al.</i> , 2016)	51
Figura 36 –Ensaio de palheta em temperatura ambiente de 20°C para concentrações de 5%, 10%, 15% e 20% de Gelita.	52
Figura 37 - Esquema da técnica de interferometria speckle em solos transparentes.....	55
Figura 38 – Padrão speckle de solo transparente	56
Figura 39- Corte ótico do modelo em solo transparente por meio do laser para aquisição de imagens, SADEK e ISKANDER (2010).	56

Figura 40 - Série de imagens interpretadas durante um ensaio de penetração de argamassa em solo transparente, LIU et al. (2015).	57
Figura 41 - Técnica da camada opaca, OMIDVAR et al. (2015).	57
Figura 42 - Resultado Típico de uma análise DIC (GUZMAN e ALFARO, 2016).	58
Figura 43 - Escala de cinza típica de 8 bits.	59
Figura 44 - Grade virtual sobre a imagem de referência e o campo de deslocamento nos pontos da grade.....	59
Figura 45 - Etapas da correlação digital de imagens (DIC).....	61
Figura 46- Fluxograma de um algoritmo avançado DIC, Fonte: manual do PIVTEC.....	62
Figura 47 – Ensaio realizado para o monitoramento de camadas de solo sendo compactado utilizando um scanner de mesa, BECKETT e AUGARDE (2011).	63
Figura 48 – Tipos de aquisição de dados	67
Figura 49 - O princípio da tomografia computadorizada é uma fonte de raios-X e uma unidade detectora rodando sincronizadamente em torno do paciente. Dados são obtidos continuamente durante a rotação.....	68
Figura 50 – Elementos que compõem a imagem	68
Figura 51 - Histogramas correspondentes a quatro tipos básicos de imagens.	70
Figura 52 – Ilustrações de imagens segmentadas de colunas de brita modeladas em centrífuga geotécnica, MANHÃES et al. 2016.....	72
Figura 53 – Localização do caso de estudo.	76
Figura 54 – Perfil estratigráfico com os respectivos índices de resistência a penetração (N_{spt}) e dados obtidos com monitoramento da estaca de estudo...	77
Figura 55 – Processo de amostragem.....	79
Figura 56 – Processo de Amostragem.	80
Figura 57 – Armazenamento para transporte dos testemunhos.	81
Figura 58 – Localização dos amostradores;.....	82
Figura 59 - Tomógrafo do tipo multislice de 64 canais Brilliance 40.	84
Figura 60 – Segmentação de Imagens.....	86
Figura 61 - Procedimento para resinar os testemunhos de solo.....	87
Figura 62 – Curva granulométrica do maciço de Fundação.....	88
Figura 63 – Imagens obtidas por meio do microscópio dos testemunhos resinados por meio da técnica desenvolvida para a tese.....	88

Figura 64 - Peso específico natural (γ_n), índices de vazios inicial (e_o) e porosidade (n) do solo para diferentes profundidades e localizada a aproximadamente 35 cm do centro de uma estaca.	89
Figura 65 – Variação do peso específico seco, índice de vazios e porosidade em diferentes distâncias radiais do centro da estaca. Nota: x é igual a distância em relação ao centro da estaca e R é igual ao raio da estaca.....	90
Figura 66 - Cortes longitudinais nas imagens tomográficas dos amostradores retirados radialmente no entorno da estaca, sendo x a distância em relação ao centro da estaca e R o raio da estaca.	92
Figura 67 – Índices de vazios determinados para os testemunhos s 1 a 6 (séries 1 e 2) em diferentes distâncias radiais em relação ao centro da estaca, sendo x a distância em relação ao centro da estaca e R a raio da estaca.....	93
Figura 68 - Histograma de frequência de índice de vazios dos testemunhos 1, 2, e 3.	94
Figura 69 - Histograma de frequência de índice de vazios dos testemunhos 4, 5 e 6.	94
Figura 70 – Índice de vazios médio para cada testemunho e desvio padrão....	95
Figura 71 – Índices de vazios determinados pelas diferentes técnicas em diferentes distancias radiais em relação ao centro da estaca, sendo x a distância em relação ao centro da estaca e R a raio da estaca.	96
Figura 72 – Modelos de trados utilizados para a simulação da cravação do trado (todas as dimensões em mm).....	100
Figura 73 – Tipos de sílicas gel testadas.	105
Figura 74 - Refratômetro portátil do laboratório de solos transparentes do LECIV	107
Figura 75 – Misturas realizadas para a produção do solo transparente.....	111
Figura 76 – Foto do símbolo da UENF visto por meio da caixa de ensaio de acrílico de 5 cm de espessura contido em seu interior o solo transparente feito de sílica gel com o poro fluido mineral “ <i>Garden Light</i> ”.	112
Figura 77 – Prensa utilizada para o ensaio de compressão confinada.	113
Figura 78 – Detalhes do projeto da parte superior da caixa de cisalhamento direto fabricada para a presente pesquisa. Obs. todas as medidas em mm.....	115
Figura 79 – Preparação da Sílica Gel seca na caixa de cisalhamento circular para iniciar a etapa de consolidação.	115

Figura 80 – Esquema da caixa ensaio de acrílico utilizada para a realização dos ensaios em solos transparentes. Obs. e = espessura das placas de acrílico; e todas as unidades estão em mm.	117
Figura 81 – Pluviador desenvolvido.....	118
Figura 82 – Sistema de sucção desenvolvido para a saturação da sílica gel com óleo de baixo para cima.....	119
Figura 83 - Preparação da amostra de solo transparente e enchimento do container	121
Figura 84 – Foto do aparato experimental.....	123
Figura 85 - Esquema de ligações entre as portas digitais do Arduino Uno, o motor de passo, o Módulo DRV 8825 e a fonte.....	123
Figura 86 - DRV8825 com a identificação dos pinos.....	124
Figura 87 – Procedimento para o ajuste de corrente.	124
Figura 88 – Ensaio de calibração do motor de passo controlador do giro do trado.	125
Figura 89- Aparato experimental do ensaio.....	126
Figura 90 - Foto dos aparatos experimentais.	127
Figura 91 – Curva de calibração para o motor de passo controlador da subida e descida do atuador.	127
Figura 92 – Suporte para apoio do motor controlador da velocidade de subida e descida do trado	128
Figura 93 – Modelos dos trados em programa gráfico.	129
Figura 94 – Modelo de Trado fabricado em resina líquida fotopolimerizável ..	130
Figura 95 - Fotos do ensaio utilizando o modelo de trado fabricado em resina líquida fotopolimerizável.....	130
Figura 96 – Projetos 3D dos três tipos de trado utilizados nos ensaios.....	131
Figura 97 – Processo de fabricação do trado na impressora 3D do Laboratório de Solos Transparentes da Uenf.	132
Figura 98 – Processo de fabricação do trado na impressora 3D do Laboratório de Solos Transparentes da Uenf	133
Figura 99 – Foto da pintura dos trados.....	134
Figura 100 – Foto do Acoplador Rígido.....	134
Figura 101 – Ilustração do primeiro guia idealizado.	135
Figura 102- Guia bipartido	136

Figura 103 - Imagens instantâneas do ensaio.....	136
Figura 104 - Foto dos Aparatos Experimentais.	137
Figura 105 – Análise de uma foto no Programa PIVVIEW2C/3C.....	139
Figura 106 - Foto do aparato experimental	140
Figura 107 – Configuração Experimental	141
Figura 108 - Granulometria da sílica gel utilizados nesta pesquisa e das areias mau graduadas de número 16 e 30 fornecidas pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT) também são apresentadas.....	144
Figura 109 – Compressibilidade de sílica gel, areia de Ottawa e areia calcária a partir dos ensaios de compressão confinada.	146
Figura 110 – Influência do ensaio de compressão confinada no esmagamento de partículas de sílica gel.	147
Figura 111 – Influência do ensaio de cisalhamento direto em amostras fofas no esmagamento de partículas de sílica gel.	147
Figura 112 – Influência do ensaio de cisalhamento em amostras densas no esmagamento de partículas de sílica gel.	148
Figura 113 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto da sílica gel no estado denso.	149
Figura 114 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto da sílica gel no estado denso saturada com água.	150
Figura 115 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto da sílica gel no estado fofo.	151
Figura 116 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto da sílica com água no estado fofo.	152
Figura 117 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico para a sílica gel do ensaio de cisalhamento direto para amostras densas.	154
Figura 118 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico para a sílica gel do ensaio de cisalhamento direto para amostras fofas.	154
Figura 119 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto da sílica gel no estado denso na caixa de cisalhamento circular	155
Figura 120 – Conceitos necessários para o entendimento da função de transferência de modulação.	157
Figura 121 - Sinal de modulação de uma imagem ideal Hakhamaneshi (2016).	158

Figura 122 – Contornos de deslocamento lateral normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 5R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4); (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1	160
Figura 123 - Contornos de deslocamento lateral normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 10R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4); (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1	160
Figura 124 - Contornos de deslocamento lateral normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 15R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4); (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1	160
Figura 125 – Contornos de deslocamento lateral normalizados para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4); (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1	161
Figura 126- Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 5R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4); (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1	161
Figura 127 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 10R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4); (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1	161
Figura 128 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 15R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4); (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1	162
Figura 129- Contornos de deslocamento vertical normalizados para trado tipo 1: (a) N1P8T0.4); (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1	162
Figura 130 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 5R$ para o trado tipo 2:(a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.	163
Figura 131 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 10R$ para o trado tipo 2:(a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.....	164
Figura 132 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 15R$ para o trado tipo 2:(a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.....	164
Figura 133 - Contornos de deslocamento lateral normalizados para trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.	164

Figura 134 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 5R$ para o trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.	165
Figura 135 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 10R$ para o trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.	165
Figura 136 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 15R$ para o trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.	165
Figura 137 - Contornos de deslocamento vertical normalizados para trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.	166
Figura 138 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 5R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c)N969T1.	167
Figura 139 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 10R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c)N969T1.....	167
Figura 140 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 15R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c)N969T1.....	168
Figura 141 - Contornos de deslocamento lateral normalizados para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c)N969T1.....	168
Figura 142 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 5R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c)N969T1.	168
Figura 143 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 10R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c)N969T1.	169
Figura 144 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z= 0R$ para $Z= 15R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c)N969T1.	169
Figura 145 - Contornos de deslocamento vertical normalizados para trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c)N969T1.....	169

Figura 146 - Esquemático mostrando o processo de cravação do trado de uma estaca hélice contínua com elevada velocidade de rotação em relação ao avanço vertical.....	170
Figura 147 - Efeito da configuração do trado no transporte do solo.....	171
Figura 148 - Contornos de deslocamento vertical normalizados para $x/R = 1$	174
Figura 149 - Variação do volume de solo transparente transportado para superfície com a taxa de cravação. Nota: v_0 representa o volume do furo e v representa o volume transportado para a superfície.	174
Figura 150 - Efeito da configuração do trado no transporte do solo.....	175
Figura 151 – Condição para cravação do trado de estacas	176
Figura 152 – Efeito da relação ρ/D do trado na taxa de cravação ótima ($v/n\rho$).	179
Figura 153 - Comparação entre a estimativa pelo método CEM e os dados experimentais.....	182
Figura 154 - Comparação entre a estimativa pelo método CEM e os dados experimentais.....	183
Figura 155 - Esquema do movimento vertical do solo e previsão do método SSPM.....	184
Figura 156 - Comparação de volume estimada pelo método SSPM e dados experimentais.....	186
Figura 157 – Considerações para o cálculo das deformações utilizando	189
Figura 158 – Comparação dos índices de vazios obtidos no campo e nos ensaios utilizando solo transparentes.	190
Figura 159 – Comparação dos índices de vazios obtidos no campo e nos ensaios utilizando solo transparentes.	190

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de modelos em problemas geotécnicos, Tavares (2012) modificado Gomes (1993).	30
Tabela 2 - Propriedades físicas dos solos transparentes atualmente disponíveis.	37
Tabela 3 - Aplicações do pó de sílica amorfa para modelagem.....	40
Tabela 4 - Aplicações da Sílica Gel para modelagem de areias	42
Tabela 5 – Aplicações do Hidrogel para modelagem de sedimentos de baixa resistência.....	44
Tabela 6- Propriedades dos líquidos a base de sacarose testados na pesquisa de GUZMAN e ISKANDER (2013).	47
Tabela 7 - Aplicações do Quartzo Fundido para modelagem de areias.....	49
Tabela 8 – Lista de teses de doutorado internacionais utilizando solos transparentes, Parte 1.	53
Tabela 9 –Relação e softwares de código aberto e comerciais disponíveis para a análise DIC, Parte 1.....	65
Tabela 10 – Técnicas para determinação dos índices de vazios	71
Tabela 11 - Quantidade de seções transversais após a reconstrução referente à cada testemunho analisado.	84
Tabela 12- Resumo das características adotadas para cada ensaio.....	100
Tabela 13 - Fatores de escala para o modelo reduzido sob campo gravitacional normal do problema analisado.	103
Tabela 14 - Materiais Testados para a produção do solo transparente.	105
Tabela 15 – Materiais utilizados e as misturas testadas para obtenção do solo transparente.....	107
Tabela 16 - Propriedades das misturas de óleos minerais com materiais utilizados para a fabricação de solos transparentes.....	110
Tabela 17 – Resumo dos procedimentos testados para o preenchimento da caixa de ensaio acordo com a densidade relativa desejada.....	120
Tabela 18 – Parâmetros utilizados para impressão	132
Tabela 19 – Propriedades físicas do solo transparente granular de sílica gel	144
Tabela 20 – Resumo dos ensaios de cisalhamento direto realizados com a sílica Gel.	153

Tabela 21 – Dimensões das caixas de cisalhamento. Nota: H é igual à altura da caixa; $D_{máx}$ é igual ao diâmetro máximo da partícula, D é igual ao diâmetro do corpo de prova na caixa modificada e W é igual ao lado da caixa do formato retangular.....	155
Tabela 22 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto usando a resistência residual.	156
Tabela 23- Resumo das propriedades do solo transparente constituído por sílica gel e óleo "Garden Light" utilizado nos ensaios.	159
Tabela 24 - Eficiências volumétricas dos trados, durante a cravação com taxa igual a 0,4.....	177

LISTA DE SÍMBOLOS

G_s : densidade real dos grãos

R_{eq} : raio da estaca de ponta fechada

S_z : deslocamento vertical da superfície do solo pelo método SSPM

ρ_{max} : densidade máxima seca, g/cm³

ρ_{min} : densidade máxima seca, g/cm³

$\rho_{sat\ max}$: densidade máxima saturada, g/cm³

$\rho_{sat\ min}$: densidade máxima saturada, g/cm³

C_c : Coeficiente de curvatura

CEM: método de expansão de cavidade

CFA: estacas hélice contínua

C_u : Coeficiente de uniformidade

D: diâmetro externo do trado

d: diâmetro interno do trado

D_{10} : Tamanho das partículas correspondente a 10% de finos acumulados na curva de distribuição

D_{30} : Tamanho das partículas correspondente a 30% de finos acumulados na curva de distribuição

D_{50} : Tamanho médio das partículas

D_{60} : Tamanho das partículas correspondente a 60% de finos acumulados na curva de distribuição

DIC: correlação digital de imagens

e : espessura da placa de acrílico

F : força de rotação da hélice

g : aceleração da gravidade

L : comprimento do furo

R : raio do trado

SSPM: método do caminho de deformação superficial

T : força oposta de F causada pela pressão lateral

u_x : deslocamento radial

u_z : deslocamento vertical

v : volume transportado para a superfície

V_a : absolute velocity of the soil particle.

V_L : velocidade de elevação

$V_{Lmáx}$: velocidade máxima de elevação

v_o : volume do furo

V_R : velocidade relativa da partícula de solo com a superfície da hélice

V_s : velocidade tangencial

V_t : velocidade de rotação

W : força peso do solo dentro do passo do trado

x : distância radial do centro da estaca

z : profundidade

α : ângulo de inclinação da hélice

δ : ângulo de atrito

$\lambda_{\text{máx}}$: ângulo máximo de movimentação da partícula

λ : ângulo que governa a movimentação da partícula

c : cohesión, kPa

k : coeficiente de permeabilidade, mm/s

n : velocidade de rotação do trado

t : taxa de cravação, $1/\text{rev}^{-1}$

Δv : volume medido de solo retirado de cada ensaio

θ : ângulo atrito interno, °

ρ : passo

$v/n\rho$: taxa de cravação, rev^{-1}

v : é a velocidade de descida do trado

RESUMO

Estacas do tipo hélice contínua estão sendo cada vez mais utilizadas para suportar diferentes estruturas em todo mundo. Isso se deve, principalmente, à adequação desse tipo de estaca para a maioria dos maciços de fundação em solo, execução rápida e fácil manutenção de máquinas. Em contrapartida, as estacas do tipo hélice contínua, executadas de maneira inadequada, podem modificar exageradamente a morfologia do solo nas imediações do fuste da estaca e, conseqüentemente, ocasionar diferentes problemas que afetam negativamente a capacidade de carga das estacas ou a integridade de estruturas adjacentes. Em parte destes problemas, a causa mais provável foi atribuída a uma taxa de cravação do trado inadequada. Neste sentido, o objetivo da tese é estudar o efeito da cravação do trado da estaca hélice contínua em maciços arenosos utilizando a técnica de solos transparentes. Para isso, analisa-se testemunhos de solo retirados nas imediações de uma estaca hélice contínua de um caso de obra, constituído por um maciço fundamentalmente arenoso. Das análises, do caso de obra, constata-se que existe a mudança do estado do solo no entorno da estaca. No entanto, essa comprovação em obra é bem localizada tanto no espaço quanto no tempo. No espaço por ser em pontos localizados e no tempo por ser uma análise apenas ao final de todo o processo executivo da estaca hélice. Dessa forma, fez-se necessário uma modelagem física, em níveis de tensões a 1g, simulando a etapa de cravação do trado das estacas hélice contínua em solo transparente. A técnica de solos transparentes é adequada, pois permite a medição do campo de deslocamento do maciço de solo durante simulação da etapa de cravação do trado. Além disso, a técnica de solos transparentes é nova no Brasil, portanto, foi necessário todo o desenvolvimento de aparatos experimentais e procedimentos para sua aplicação. Os resultados da modelagem física mostram: que o deslocamento do solo provocado pelo processo de cravação do trado é semelhante ao deslocamento provocado pelo processo executivo de estacas cravadas cilíndricas; que o uso de taxas de cravação menores que 0,4 merece atenção, e que a área afetada pela cravação do trado está localizada em uma zona com distância inferior a $6R$ do eixo da estaca e tem um formato cônico. Os resultados também mostraram que a ferramenta CEM tem uma concordância razoável para prever os deslocamentos

radiais do solo e a previsão do levantamento do solo superficial utilizando o método SSPM não se mostrou apropriada. Por fim, os resultados fornecem uma base para futuramente desenvolver previsões de mudanças de parâmetros do solo na envolvente da estaca hélice contínua.

Palavras chave: estaca hélice contínua, solo transparente, modelagem física 1g, cravação do trado.

ABSTRACT

Continuous flight auger piles are increasingly being used to support different structures around the world. This is mainly due to the suitability of this type of piles for most ground foundation massifs, fast execution, and easy maintenance of machines. In contrast, continuous flight auger piles, improperly executed, can exaggeratedly modify soil morphology in the vicinity of the pile stem and, consequently, cause different problems that negatively affect the load capacity of the piles or the integrity of adjacent structures. In part of these problems, the most likely cause has been attributed to inadequate penetration rate of the auger. In this sense, the objective of the thesis is to study the effect of the continuous flight auger piles executive process on sandy massifs. To this end, we analyze soil samples taken in the vicinity of a continuous flight auger pile of a construction case, consisting of a fundamentally sandy massif. The analysis of the case of work shows that there is a change in the state of the soil around the pile. However, this evidence on site is well located both in space and time. In space because it is located in points and in time because it is an analysis only at the end of the entire executive process of the continuous flight auger pile. Thus, it was necessary a physical modeling, at stress levels of 1g, simulating the stage of the auger of the continuous flight auger pile in transparent soil. The transparent soil technique is adequate since it allows the measurement of the displacement field of the soil massif during the auger pile stage simulation. In addition, the transparent soil technique is new in Brazil, so all the development of experimental devices and procedures for its application was necessary. The results of the physical modeling show: that the displacement of the soil caused by the auger driving process is similar to the displacement caused by the executive process of cylindrical pile driving; that the use of driving rates lower than 0.4 deserves attention, and that the area affected by auger driving is located in an area with a distance of less than $6R$ from the pile axis and has a conical shape. The results also showed that the CEM tool has a reasonable agreement to predict radial soil displacements and the prediction of topsoil survey using the SSPM method was not appropriate. Finally, the results provide a basis for developing future predictions of soil parameter changes close to continuous flight auger piles.

Keywords: continuous flight auger piles, transparent soil, physical modeling, penetration rate of the auge

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Estacas do tipo hélice continua estão sendo cada vez mais utilizadas para suportar diferentes estruturas em todo mundo (BRONS e KOOL, 1988; SLATTER E TCHEPAK, 2009; ABDRABBO e GAAVER, 2012). Isso se deve, principalmente, à adequação desse tipo de estaca para a maioria dos maciços de fundação em solo, execução rápida e fácil manutenção de máquinas (ABDRABBO e GAAVER, 2012).

Em contrapartida, as estacas do tipo hélice contínua, executadas de maneira inadequada, podem modificar exageradamente a morfologia do solo nas imediações do fuste da estaca e, conseqüentemente, ocasionar diferentes problemas que afetam negativamente a capacidade de carga das estacas ou a integridade de estruturas adjacentes (KENNY *et al.* 1997, BROWS 2005). THORBURN *et al.* (1993) descreveram diferentes casos em que o processo executivo de estacas do tipo hélice continua em solos arenosos resultaram em problemas de subsidência em edifícios vizinhos. Em parte destes casos, a causa mais provável dos problemas foi atribuída a uma taxa de cravação do trado inadequada. Posteriormente, HERITAGE (2007) também ressaltou a importância de se utilizar uma taxa de cravação do trado adequada para não perturbar fisicamente o maciço próximo à estaca. Diante disso, percebe-se que, para a estaca apresentar um bom desempenho é necessário uma taxa de cravação do trado correta, o que está diretamente associado à velocidade de avanço do trado, à taxa de rotação do trado e à geometria do trado.

Existem, na literatura técnica, diversos trabalhos com o objetivo de estudar os efeitos da instalação das estacas escavadas no sistema estaca-solo. Citam-se os trabalhos que estudaram o processo de transporte de solo entre as hélices do trado os seguintes autores: VIGGIANI (1993); VAN IMPE (1994); CANAKCI (1996); NELLY (1991); THORBURN *et al.* (1993); VIPULANANDAN (2007); FLEMING (1994; 1995); e MASSARSCH *et al.* (1988).

Acrescentam-se, os estudos das perturbações das tensões no maciço de fundação, durante e após a instalação de estacas, através de ensaios *in situ* antes, durante e após a execução da estaca; realizados por VAN IMPE (1988), VAN WEELE (1988), ALBUQUERQUE (2001), MANDOLINI *et al.* (2002), BUSTAMANTE (2003) e TIMOTHY *et al.* (2012).

Estudos do efeito do processo executivo em estacas hélice contínua, também, foram realizados utilizando modelos reduzidos, por: KENNY *et al.* (1997) e HIRD *et al.* (2006, 2011).

Verifica-se através desses estudos que ainda existem aspectos para serem discutidos a respeito do efeito do processo executivo de estacas hélice contínua, e nenhum estudo permitiu a medição do campo de deslocamento do maciço de solo, arenoso, durante a etapa de cravação do trado desse tipo de estaca.

Neste sentido, o objetivo geral da pesquisa é estudar o efeito da cravação do trado da estaca hélice contínua em maciços arenosos utilizando a técnica de solos transparentes. Para isso, analisa-se, por meio de ensaios clássicos de laboratório e tomografia computadorizada, testemunhos de solo retirados nas imediações de uma estaca hélice contínua de um caso de obra, constituído por um maciço fundamentalmente arenoso. Das análises, do caso de obra, constata-se que existe a mudança do estado do solo no entorno da estaca. No entanto, essa comprovação em obra é bem localizada tanto no espaço quanto no tempo. No espaço por ser em pontos localizados e no tempo por ser uma análise apenas ao final de todo o processo executivo da estaca hélice. Dessa forma, torna-se interessante a modelagem física, em níveis de tensões a 1g, simulando a etapa de cravação do trado das estacas hélice contínua em solo transparente. A técnica de solos transparentes é adequada, pois permite a medição do campo de deslocamento do maciço de solo durante simulação da etapa de cravação do trado sem a incorporação de sensores no maciço.

É importante mencionar que o efeito de modificação do estado do solo no entorno da estaca ocorre, preferencialmente, durante a cravação do trado. Considerando isso, admite-se fundamental entender como os parâmetros de cravação influenciam nessas modificações de estado do solo.

Assim sendo, com a intenção de alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- analisar a variação de índices de vazios do solo no entorno de uma estaca hélice contínua de um caso de obra;
- avaliar o potencial da utilização da tomografia computadorizada de raios-X para estudar as alterações de índices de vazios do solo na envolvente da estaca devido à instalação de estacas do tipo hélice contínua;
- visualizar, qualitativamente, em mesoescala, o deslocamento do solo, resultante da etapa de cravação do trado do processo executivo de estacas hélice contínua, por meio da modelagem física em solo transparente a níveis de tensões a 1g;
- analisar a influência da geometria do trado e a taxa de cravação do trado, no campo de deslocamento do solo transparente, resultante do processo de instalação de estacas hélice contínua;
- avaliar a possibilidade de densificar areiais fofas na envolvente da estaca por meio da escolha apropriada da taxa de cravação do trado e geometria do trado;
- avaliar a zona de influência resultante da etapa de cravação do trado do processo executivo de estacas hélice contínua, por meio da modelagem física em solo transparente a níveis de tensões a 1g;
- avaliar a possibilidade de associação do método de expansão de cavidade (CEM) e o método do caminho de deformação superficial (SSPM) para a previsão do deslocamento de areias fofas na etapa de cravação do trado executadas com uma determinada taxa de cravação e geometria do trado;
- demonstrar o potencial da utilização de solos sintéticos transparentes no estudo das alterações do estado do solo próximo a estaca devido à instalação de estacas do tipo hélice contínua;
- desenvolver a técnica de produção de solos sintéticos transparentes com fluidos à base de óleos minerais de origem nacional;
- associar a modelagem física à técnica de processamento digital de imagens para a observação do comportamento do solo na envolvente da estaca;

- avaliar as vantagens e desvantagens das técnicas não intrusivas utilizadas na presente tese para o estudo do processo executivo de estacas hélice contínua.

1.1 Estrutura da Tese

A presente tese está dividida em oito capítulos, iniciando-se com este capítulo introdutório, onde são apresentadas as considerações do estudo, justificativas, objetivos e estruturação, dando prosseguimento da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica que inclui os assuntos de grande relevância para o desenvolvimento da pesquisa. Nesse capítulo, são abordadas as principais considerações sobre as estacas hélice contínua; os efeitos da instalação das estacas no sistema estaca-solo; as principais famílias de solos transparentes atualmente disponíveis; os estudos de solos transparentes, as técnicas de medição para os solos transparentes; o processamento digital de imagens; a modelagem física; e a tomografia computadorizada.

O Capítulo 3 descreve um caso de obra e os procedimentos utilizados para determinação dos parâmetros geotécnicos do solo na envolvente da estaca. Nesse capítulo, ainda, é apresentado e discutido os resultados obtidos.

O Capítulo 4 expõe, minuciosamente, os materiais e os métodos necessários para a modelagem física da etapa de cravação do trado das estacas hélice contínua em solo transparente, associado à técnica de processamento digital de imagens.

O Capítulo 5, por sua vez, apresenta os resultados e as discussões referentes à modelagem física da etapa de cravação do trado das estacas hélice contínua em solo transparente associado a técnica de processamento digital de imagens. Além disso, exibe uma comparação dos resultados obtidos entre o caso de obra e a modelagem física em solo transparente.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as principais conclusões obtidas na pesquisa e exibe as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo expõe uma revisão bibliográfica sobre os temas necessários para compreensão desta pesquisa. Portanto, são abordados: as principais considerações sobre as estacas hélice contínua; os efeitos da instalação das estacas no sistema estaca-solo; os princípios para a realização de modelos físicos; as principais famílias de solos transparentes atualmente disponíveis; os estudos de solos transparentes, as técnicas de medição para os solos transparentes; técnicas sobre o processamento digital de imagens; e características gerais sobre a tomografia computadorizada.

2.1 Estacas Hélice Contínua

A norma brasileira, ABNT NBR 6122:2010, define estaca hélice contínua monitorada como uma estaca de concreto moldada *in loco*, executada com a introdução, por rotação, de um trado helicoidal contínuo no terreno, com injeção de concreto pela própria haste central do trado simultaneamente com a sua retirada, e introdução da armadura após a concretagem da estaca.

As estacas hélice contínua monitoradas são conhecidas internacionalmente por *Continuous flight auger – CFA pile, augeredcast-in-place piles, pressure – grouted piles e auger-cast piles*.

2.1.1 Histórico

O uso de estacas hélice contínua teve início nos Estados Unidos, na década de 50. Nessa época, os equipamentos eram de baixa potência com torques de 10 a 30kN.m e se executavam estacas com diâmetros de 27,5cm, 30cm e 40cm (Figura 1). No início da década de 70, na Alemanha, essa ideia de perfuração se expandiu por toda a Europa e, posteriormente, para o Japão (PENNA *et al.*, 1999).

As estacas hélice contínua tiveram um amplo desenvolvimento a partir de 1980 nos Estados Unidos, no Japão e na Europa, primeiramente com equipamentos adaptados à sua execução e, depois, com equipamentos específicos e

apropriados à execução deste tipo de estacas. Segundo BRONS e KOOL (1998), as vantagens da técnica, aliadas ao custo atraente, tornaram as estacas hélice contínua extremamente conhecidas na Europa.

Desde então, através dos estudos realizados em vários países da Europa, como: Grã-Bretanha, Áustria, Itália, Holanda, Alemanha, Bélgica e França, verificou-se uma tendência do decréscimo na execução das estacas cravadas, sendo substituídas pelas estacas hélice contínua (HARTIKAINEM E GAMBIN, 1991). Assim, a utilização destas estacas teve um amplo crescimento quantitativo.

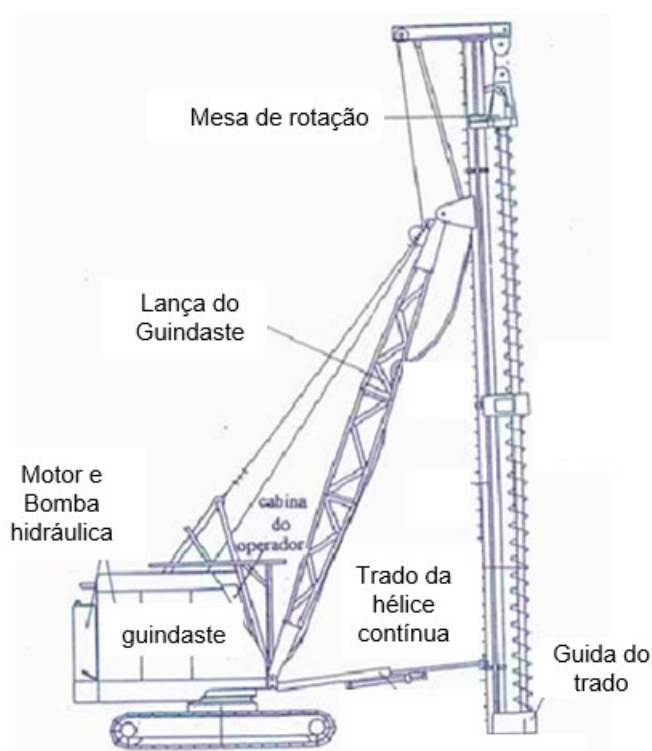


Figura 1 – Equipamento montado em guindaste com lança treliçada, Penna et al. (1999).

No Brasil, as estacas hélice contínua foram introduzidas no ano de 1987, no entanto, o primeiro trabalho técnico orientativo foi publicado em 1989, no Campus da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e divulgadas pela publicação intitulada como ABEF *Research on Foundation Engeneering*, durante o *XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engereering* (ABEF, 1989), no Rio de Janeiro.

No início, as estacas hélice contínua eram executadas com equipamentos desenvolvidos nacionalmente, montados sobre guindastes de esteiras, com

torque de 35kNm que permitem executar estacas de 275mm, 350mm e 425mm com até 15m de comprimento (ANTUNES; TAROZZO, 1998).

ALONSO (2000) relata que, naquela época, o controle de qualidade era precário, pois o método executivo não era completamente instrumentado. A baixa potência dos equipamentos limitava o diâmetro e o comprimento das estacas, porém, a partir de 1993, com a importação de equipamentos, principalmente da Itália, houve um crescimento da utilização dessas estacas no Brasil. Os equipamentos importados possuíam elevada capacidade de torque e de força de arranque, possibilitando a execução de estacas com diâmetro máximo igual a 1000mm e 24m de comprimento (ANTUNES; TAROZZO, 1998).

A partir de 1999 em diferentes Estados do Brasil, ocorreu um aumento expressivo da quantidade de empresas executoras de estacas hélice contínua, o que, conseqüentemente, ocasionou uma redução do custo da estaca hélice, transformando-a em uma opção de fundação economicamente competitiva.

As estacas hélice contínua são empregadas: em fundações de edifícios comerciais, residenciais e industriais, de galpões e pontes (Figura 2 a); em estruturas de contenção, constituindo cortinas contínuas justapostas (Figura 2 b) ou de estacas secantes (Figura 2 c); para melhoramento de solos (Figura 2 d); e em aterros estaqueados sobre solos moles, normalmente, associados com geossintéticos.

Segundo DIAS *et al.* (2014), as estacas hélice contínua têm apresentado ampla utilização e divulgação no segmento da construção civil. Observou-se o aumento do seu uso principalmente em grandes centros urbanos, devido às vantagens e às facilidades que seu processo construtivo oferece, especialmente a alta produtividade e ausência de ruído ou vibrações.

A utilização dessas estacas, em nível nacional e internacional, é comprovada pelos diversos artigos publicados nos congressos, revistas, seminários e simpósios.

VIANA DA FONSECA *et al.* (2004) afirmam que as estacas moldadas com recurso do trado contínuo são as mais utilizadas em solos residuais no norte de

Portugal. ANJOS (2006) descreve uma tendência na Áustria, Bélgica, França, Grã-Bretanha, Holanda, Alemanha e Itália de maior utilização de estacas tipo hélice contínua monitoradas em comparação com as estacas cravadas. Na Austrália as estacas hélice, também, estão sendo muito utilizadas. ERVIN *et al.* (2006) relatam a execução de estacas hélice contínua em um prédio de 92 andares, localizado em uma formação geológica complexa na cidade de Melbourne, Austrália. A eficácia dessa alternativa foi comprovada através de ensaios de prova de carga dinâmica.



(a) Fundações de edifícios



(b) Estacas justapostas



(c) Estacas secantes. Fonte: Stan Fundações e Contensões



(d) Melhoramento de solo no Porto de Sergipe. Fonte: Keller.

Figura 2 - Aplicações de Estacas Hélice contínua.

2.1.2 Método Executivo

A execução das estacas hélice contínua inclui três etapas, que são: cravação do trado, concretagem simultânea à extração do trado do terreno e colocação da armadura, como está esquematizado na Figura 3.

Primeiramente, ocorre o posicionamento da ponta do trado no local de cravação com auxílio de prumo de centro ou laser, e os sensores de prumo instalados no equipamento permitem controlar eletronicamente a verticalidade da torre.

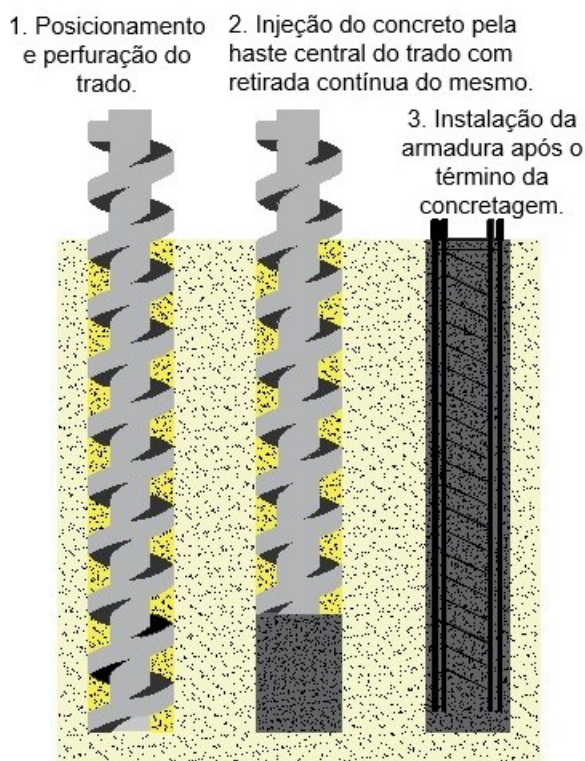


Figura 3 – Ilustração esquemática do método executivo da estaca hélice contínua monitorada.

Posteriormente, acontece a cravação do trado no terreno por meio da aplicação simultânea de torque e carga vertical para baixo. Na extremidade inferior da haste oca central do trado, é colocada uma tampa metálica com a finalidade de evitar a entrada de solo ou água no tubo central do trado durante a cravação. No decorrer da introdução do trado, o peso próprio do trado auxilia a cravação e é fundamental amenizar o eventual desconfinamento que pode ocorrer devido ao excesso de solo retirado pelas hélices do trado provocado pelo número exagerado de rotações do trado.

Para o controle da etapa de introdução do trado no maciço, o sistema de monitoramento registra, em tempo real, a profundidade, velocidade de rotação da hélice, velocidade de avanço e pressão dos sistemas hidráulicos, permitindo o pleno monitoramento da cravação. Tais parâmetros serão necessários para o cálculo do torque desenvolvido.

A cravação do trado no terreno ocorre até ser atingida a profundidade definida de acordo com o projeto. Depois de atingida a profundidade de projeto, levanta-se o trado cerca de 30 cm, permitindo a expulsão da tampa provisória e inicia-se a segunda etapa, que é a etapa de concretagem. Nessa etapa é realizada a extração do trado de forma lenta, contínua e sem girar, à medida que o concreto é bombeado.

O concreto a ser utilizado nas estacas hélice contínua deve ser dosado conforme prescreve a ABNT NBR 6122:2019 – Projeto e execução de fundações, de modo a permitir a correta trabalhabilidade e garantir o sucesso de execução dessas estacas.

Segundo CORRÊA (2013), problemas como: grandes exsudações, trabalhabilidade inadequada, baixa resistência no concreto, comprometem o resultado das operações de concretagem nas obras de fundações. Similarmente, as alterações no tempo de início de pega do concreto provocam entupimentos nas bombas e dificuldade no lançamento do concreto. Quando o concreto está fora das especificações, os problemas surgem instantaneamente. Podem acontecer: o entupimento dos tubos de lançamento e a perda da peça concretada, ou mesmo, o recebimento de obras com elementos concretados de resistência inferior a especificada em projeto.

Por fim, o processo de execução exige a introdução da armadura empurrada no concreto fresco. Para facilitar essa introdução, as barras longitudinais devem ser corretamente projetadas de modo a ter um peso e uma rigidez compatíveis com seu comprimento.

Segundo PAGLIACCI *et al.* (2003), um problema prático expressivo é ocasionado quando se necessitam instalar armaduras longas de 25 a 30 metros nas estacas hélice. No entanto, Alledi (2013) expõe que, em obras da região da Grande Vitória, tem sido possível a introdução de até 20 metros de comprimento de armaduras. Maiores detalhes podem ser encontrados na Eurocode 7, ASTM C 150; e NBR – 6122.

2.1.3 Maciços de Fundações Favoráveis e Desfavoráveis para a instalação de estacas hélice contínua

BROWN *et al.* (2007) publicaram, nos Estados Unidos, um manual prático de fundações onde descrevem os maciços de fundações favoráveis e desfavoráveis para a execução de estacas hélice contínua. Portanto, nesta seção será descrito o que os autores relatam.

2.1.3.1 *Condições geotécnicas favoráveis para a instalação de estacas hélice contínua*

Argila de consistência média a muito dura.

A principal vantagem dos solos coesivos para a construção de estacas hélice é que as argilas geralmente são estáveis durante a cravação do trado. Assim sendo, nesses solos é possível executar estacas hélice contínua com comprimento igual a 25 m.

Solos residuais

Em solos residuais, particularmente solos argilosos, são favoráveis para a instalação de estacas hélice, porque a instalação pode ser particularmente rápida e econômica.

Areias de densidade média a densa e areias bem graduadas.

Maciços constituído fundamentalmente por areias de densidade média a densa e areias bem graduada, mesmo quando contendo cascalho, são geralmente favoráveis. Especificamente, se o lençol freático estiver abaixo do comprimento da estaca.

Rocha sob depósitos rígidos ou cimentados

Nesses depósitos, as estacas hélice podem atingir uma significativa capacidade de carga, desde que os depósitos rígidos sobre a rocha sejam suficientemente resistentes para permitir a instalação na rocha sem sofrer com o excesso de rotação.

2.1.3.2 Condições geotécnicas desfavoráveis para a instalação de estacas hélice contínua

Solos muito moles

A instalação de estacas hélice, em solos moles, pode apresentar problemas de estabilidade do solo devido às condições do solo mole, que podem produzir estrangulamentos ou defeitos estruturais na estaca. Mesmo com o excesso de bombeamento de concreto, o resultado é um inchamento da estaca nas zonas muito moles. Sob essas condições, é difícil controlar, durante a retirada do trado, o volume de concreto por unidade de comprimento da estaca.

Areias fofas e areias uniformes

A instalação de estacas hélice contínua em areais fofas e areias uniformes são desfavoráveis, porque, nessas condições, o controle da taxa de cravação do trado durante a introdução e a concretagem é extremamente difícil.

Solo rígido sob camada de solo mole ou solo granular fofo

A instalação de estacas hélice contínua é tipicamente difícil em um perfil de solo no qual é necessário cravar o trado em uma camada de argila dura sob uma camada de solo mole ou solo granular fofo (Figura 4a). O problema ocorre quando a camada dura é encontrada e a taxa de cravação é reduzida devido à difícil cravação; portanto, a camada de solo mole ou solo granular fofo sofre com o excesso de rotação do trado. Conseqüentemente, são transportados para cima, entre as hélices do trado, um excesso de solo retirado das laterais do furo.

Maciço formado por areia fofa e argila rígida.

Quando uma camada de areia fofa está sob uma camada rígida de argila, a instalação da estaca pode ser difícil (Figura 4 b). Neste caso, a taxa de cravação mais lenta usada na argila pode causar perturbação da camada de areia abaixo quando essa camada é encontrada, e isso resulta em um transporte excessivo da areia entre as hélices do trado, para cima. A rotação excessiva ocorre quando o trado é girado demais em proporção à velocidade de avanço vertical do trado no solo, de modo que muito solo é transportado em direção à superfície. O

resultado é que a estaca não apresenta uma boa resistência de ponta, como previsto, mas depende exclusivamente da resistência lateral da estaca.

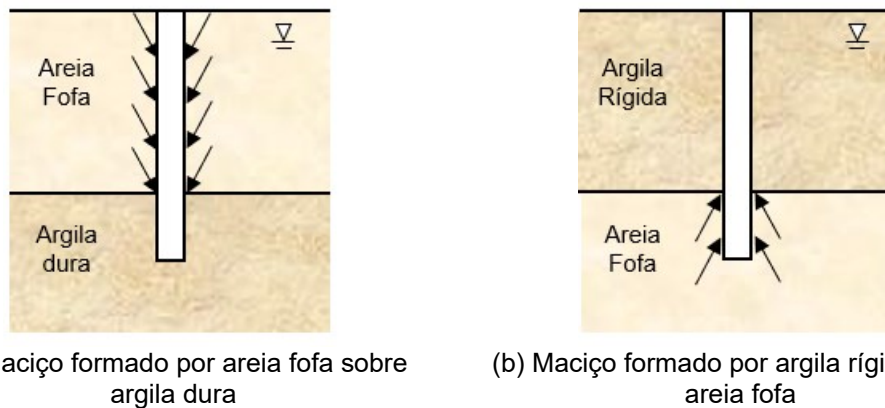


Figura 4 – Maciços de fundação desfavoráveis a instalação de estacas hélice contínua.

2.1.4 Mecânica da Cravação do Trado da estaca hélice contínua

Na etapa de cravação do trado, ocorre o transporte das partículas do solo pelas hélices do trado, semelhante ao procedimento utilizado para o processamento de materiais. Consequentemente, os diagramas de velocidade elaborados por ROBERTS (1995) fornecem um meio adequado de analisar o movimento das partículas de solo pelo trado.

As forças atuantes na areia dentro dos trados são mostradas na Figura 5a. A força W representa o peso do solo dentro da hélice; a força F se refere ao esforço resultante da rotação da hélice quando o trado empurra o solo lateral; e a força T representa uma força oposta a F causada por pressões de terra laterais que atuam na areia dentro do trado. Como a força T atua no mesmo sentido, mas em direção oposta ao movimento da partícula, o movimento da partícula é governado pela direção da força T , que atua em um ângulo λ em relação à horizontal.

O movimento da partícula de solo pode ser mais facilmente compreendido pelo diagrama de velocidade, exibido na Figura 5b., V_s é a velocidade tangencial; V_R é a velocidade relativa da partícula; V_A a velocidade absoluta da partícula; o ângulo λ define a direção da velocidade absoluta; e o ângulo α representa a inclinação da hélice do trado. A velocidade absoluta da partícula (V_A) pode ser decomposta em duas componentes, a velocidade de elevação V_L , e a velocidade de rotação V_t . Para uma hélice com ângulo de atrito de superfície δ , a velocidade

máxima de elevação ($V_{Lmáx}$) só poderia ser alcançada se a força de atrito (T) devido às pressões de terra laterais fosse significativamente alta, definindo, assim, o valor máximo de λ , que é representado como $\lambda_{máx}$.

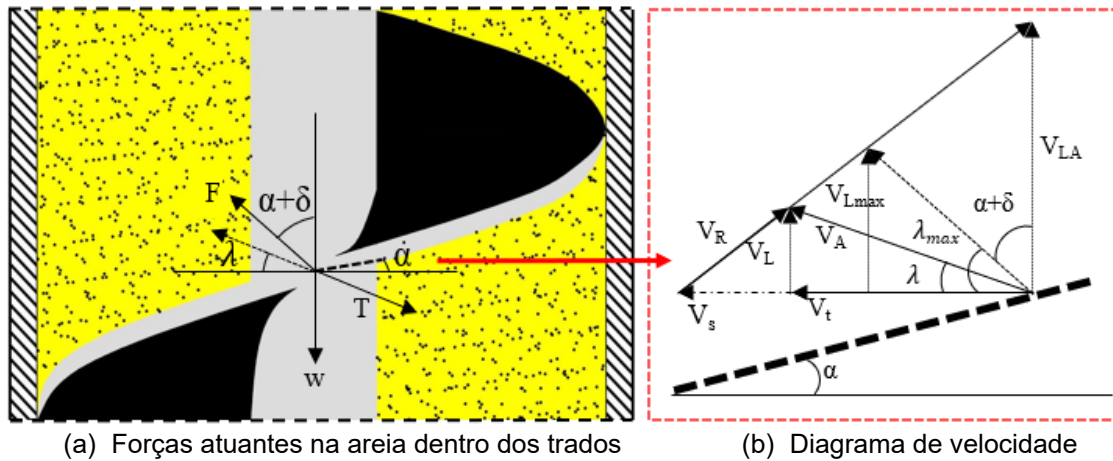


Figura 5- Ação do transporte de areia pelo trado.

2.2 Efeitos da instalação das estacas no sistema estaca-solo

No processo executivo de estacas do tipo hélice contínua, as propriedades do solo na envolvente da estaca sofrem modificações que interferem expressivamente no desempenho final da estaca. No entanto, quantificar estas variações é um processo difícil, porém necessário.

Os fundamentais fatores que influenciam na alteração das propriedades do solo, devido à instalação de uma estaca hélice contínua, são: variação do estado inicial de tensões devido a cravação do trado, ação do concreto fresco no restabelecimento de tensões; tempo de espera para início da concretagem e interrupção da concretagem.

2.2.1 Alteração do estado de tensões do solo

A alteração do estado de tensões do solo pode ser causada na primeira etapa do processo executivo da estaca hélice contínua, que é a etapa de cravação do trado no maciço e na segunda etapa que é a de concretagem da estaca. Nestas etapas, a alteração do estado de tensões é influenciada por fatores intrínsecos e extrínsecos ao maciço de fundação. Como fatores intrínsecos, pode-se citar: tipo de solo; densidade do solo; e presença de água. Como fatores extrínsecos,

pode-se mencionar: à velocidade de avanço do trado; à taxa de rotação do trado, à geometria do trado e a pressão de concretagem utilizada.

Segundo ALMEIDA NETO (2002), a alteração do estado de tensão será influenciada pelas características do maciço, como: solo arenoso ou argiloso; histórico de tensões e nível do lençol freático.

Em solos granulares, o maior desafio encontrado na instalação de estacas hélice contínua é o transporte de solo entre as hélices que constituem o trado. Se, na etapa de cravação do trado, as pás da hélice retirarem maior volume de solo do que o volume do trado inserido no maciço, ocorrerá o alívio de tensões na envolvente do fuste da estaca e, tal evento pode ocasionar patologias futuras nas construções.

Nos solos argilosos, em razão do processo de cravação e da forma da lâmina da hélice, as estacas hélices não causam uma modificação significativa na resistência das argilas, quer por acréscimos de poropressão quer por sensibilidade das argilas.

Posteriormente, GAAVER e ABDREBBO (2012) afirmam que uso de equipamentos impróprios e a falta de qualidade do operador podem conduzir alívios de tensões ocasionando problemas de qualidade e integridade das estacas.

Portanto, a alteração no estado de tensões do solo, estará diretamente associado ao tipo de solo que esta estaca está instalada e seu processo de execução.

2.2.2 Ação do concreto fresco

O desempenho da estaca em relação à capacidade de carga, por atrito lateral e de ponta, e os recalques mobilizados é, notoriamente, influenciado pelas tensões que o concreto fresco impõe às paredes do fuste e à base da estaca.

Estas tensões provocadas pelo concreto fresco, podem ser influenciadas pela pressão de injeção do concreto, tempo de concretagem, fator água-cimento e resistência do solo. Além disso, estas tensões podem contribuir com a variação

do diâmetro do fuste da estaca, e acontecendo estas alterações do diâmetro localizado da estaca, conseqüentemente pode alterar o desempenho da estaca.

O fenômeno de migração da água livre do concreto também é um fator que pode influenciar no restabelecimento de tensões do solo em torno da estaca e pode causar alteração nas propriedades do próprio concreto. Segundo ALMEIDA NETO (2002), o aumento do teor de umidade do solo adjacente à estaca tende a reduzir a resistência não drenada dos solos, o que interfere nas tensões do maciço. Além disso, a migração da água livre do concreto pode causar alteração nas propriedades do próprio concreto, que perde água para solo.

O estado de tensões inicial do solo pode não ser restabelecido pelo peso do concreto, em razão de alterações nas propriedades do concreto, em contato com o tubo e mangueira de concretagem, e posteriormente, com o solo e as modificações no próprio solo. Conseqüentemente, a magnitude de tensões aplicadas ao solo posteriormente à concretagem é de difícil cálculo, no entanto é o concreto que mantém as tensões da cavidade em equilíbrio.

2.2.3 Tempo de espera para início da concretagem e interrupção da concretagem

O tempo de espera para o início da concretagem em estacas escavadas pode gerar, principalmente, a expansão do solo adjacente, deflagrada pelo alívio de tensões causada pela escavação. Porém, em estacas hélice contínua, isto não acontece. Pois, as estacas hélice contínua são executadas em um espaço de tempo curto, e o furo está continuamente suportado pelas pás do trado e o material entre as pás.

O problema é na verdade se ocorrer a interrupção prolongada no abastecimento de concreto ao longo da concretagem. ALBUQUERQUE (2001) descreve, em seu trabalho, a execução de uma estaca hélice contínua, cuja concretagem, ficou paralisada por 1h30min, por problemas de provimento de concreto. Logo, a carga de ruptura atingida por esta estaca foi muito inferior em relação a outras duas estacas hélice contínua, instaladas em local próximo, com as mesmas características geométricas e com a cota igual a primeira. Segundo o autor, isto

poderia estar ligado à heterogeneidade do solo e a interrupção da concretagem da estaca.

2.2.4 Trabalhos sobre os efeitos da instalação das estacas no sistema estaca-solo

Existem, na literatura técnica, diversos trabalhos com o propósito de estudar os efeitos da instalação das estacas no sistema estaca-solo. Portanto, nesta seção será relatado os trabalhos mais relevantes sobre os estudos de transporte de solo entre as hélices do trado; e os estudos das perturbações no maciço de fundação devido ao processo executivos de estacas hélice contínua utilizando ensaios *in situ* e modelos reduzidos.

2.2.4.1 Trabalhos sobre o transporte de solo entre as hélices do trado

NELLY (1991) realizou um trabalho sobre o processo executivo de estacas hélice contínua. O autor relatou que a ação da introdução do trado da hélice pode provocar a descompressão do solo, e conseqüente ocorre uma alteração de rigidez do solo na envolvente da estaca. Assim, NELLY (1991), para controlar a descompressão do solo durante a introdução do trado no furo da estaca, sugeriu a realização da cravação do trado conforme a Equação 1:

$$t_{crit} = \frac{v}{n\rho} < 1 \quad (1)$$

sendo n a velocidade de rotação do trado; v a velocidade de avanço do trado e ρ o passo entre as hélices do trado.

Posteriormente, VIGGIANI (1993) propôs que o trado deve ser introduzido no maciço a uma taxa de cravação crítica, considerando que o solo transportado entre os passos da hélice depende da velocidade de cravação do trado. O autor baseou-se no princípio de Arquimedes, assumindo que o material transportado pela hélice é não coesivo e que não existe atrito entre o solo transportado, o helicóide e a parede da estaca. Porém, o comportamento tende a ser diferente, pois as forças de adesão e de atrito são geradas entre o solo escavado, o trado e a parede da estaca, ou puramente por estar, comumente, submerso, o material

pode se comportar como um líquido e seu transporte dependerá de sua viscosidade.

A taxa de cravação crítica do trado no solo, sugerida por VIGGIANI (1993), é em função da taxa de rotação, da velocidade de avanço do trado, do diâmetro externo do trado, do diâmetro interno do trado e do passo do trado, dada pela Equação 2:

$$t_{crít} = \frac{v_{crít}}{n\rho} = \left(1 - \frac{d_0^2}{d^2}\right) \quad (2)$$

onde $v_{crít}$ é a velocidade crítica de avanço do trado, n é a taxa de rotação, d é o diâmetro externo do trado, ρ é o passo do trado e d_0 é o diâmetro interno do diâmetro do trado. Na Figura 6 é possível identificar as dimensões do trado.

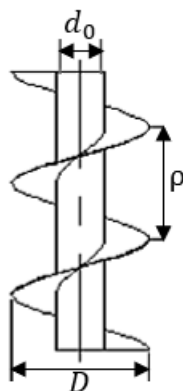


Figura 6 – Dimensões do Trado.

A equação sugerida por VIGGIANI (1993) mostra que se a taxa de cravação for maior que a taxa de cravação crítica, ocorre o efeito de compressão do solo, se ocorre o oposto ocorre a descompressão.

Um outro trabalho que sugeriu uma taxa de cravação do trado foi VIPULANANDAN *et al.* (2007). Os autores mostraram que a taxa crítica de penetração do trado é de cerca de 30 mm/s com uma velocidade de rotação do trado de 5 rpm. Se a velocidade de avanço for maior que a velocidade crítica, ocorre o efeito de compressão no solo que envolve o fuste da estaca. Por outro lado, a descompressão do solo em torno do fuste da estaca incidirá, se a velocidade de avanço for menor do que a velocidade crítica.

Percebe-se que, tanto a expressão relatada por VIGGIANI (1993) quanto a condição dada por VIPULANANDAN *et al.* (2007), são independentes do tipo e

das propriedades do solo. Logo, essas expressões, para serem aplicadas, requerem cuidados.

Posteriormente, THORBURN *et al.* (1993) apresentam uma descrição detalhada da ação de corte no processo de cravação do trado em areia. O trado quando introduzido no maciço induz tensões de cisalhamento na areia e pode resultar em mudança de volume. A mudança de volume da areia depende da sua compactidade. A areia densa tenderá se dilatar e desenvolver pressão negativa nos poros. A areia fofa tenderá a contrair durante o corte e a desenvolver a pressão positiva nos poros.

Areia fofa tende uma redução de volume de 5 a 10% durante o corte, enquanto se espera que a areia densa sofra um aumento de volume. A redução de volume esperado em areia fofa é compensada pelo volume do trado, que normalmente é de 10 a 15% do volume teórico do fuste de escavação. Em areias densas, a dilatação ajuda a manter os espaços entre as hélices do trado preenchidos.

THORBURN *et al.* (1993) relatam, também, sobre a eficiência de cravação do trado, que está associada ao preenchimento dos espaços entre as hélices do trado. Cravações mais eficientes exigem um maior volume de solo para manter o trado cheio do que a cravações menos eficientes. Se a taxa de avanço não for suficiente para preencher os passos entre hélices, então a ação de transporte do solo, entre as hélices do trado para a superfície, pode ser inibida. Isso pode fazer com que os lados da escavação se tornem instáveis, resultando no desmoronamento de areia da parte lateral do furo.

Em relação a estabilidade das escavações, cita-se TERZAGHI (1943). O autor mostrou que o efeito do arqueamento ocorre em perfurações verticais de pequeno diâmetro, devido ao restabelecimento de tensões laterais ao longo das paredes laterais. Portanto, o efeito de arqueamento ocorre para que exista a redução da tensão radial e mantenha a escavação ainda em equilíbrio. O contato entre as hélices do trado e o fuste da escavação fornece o suporte lateral intermitente durante a rotação e promove a estabilidade da escavação. No entanto, tensões cíclicas criadas pelo trado também podem inibir a desenvolvimento de arqueamento, especialmente em areia fofa.

Acrescenta-se também o trabalho de FLEMING (1994; 1995), que realizou um estudo sobre as formas de realizar o processo de cravação do trado para obter o bom desempenho da estaca hélice contínua em relação a capacidade de carga. FLEMING (1994; 1995) concluiu: que quanto mais inclinada são as hélices do trado menos solo é transportado através dos espaços entre as hélices do trado; que é mais provável a ocorrência de excesso de rotação no processo de cravação do trado em trado de grande diâmetro externo do que em trados de pequeno diâmetro externo; e que os efeitos causados por um processo de cravação do trado são mais prejudiciais em solos arenosos fofos.

Segundo BROWN *et al.* (2007), se a velocidade de rotação do trado for muito alta em relação à velocidade de avanço vertical do trado no solo, o trado transportará uma quantidade exagerada de solo entre as hélices para a superfície. Como ilustrado na Figura 7a, essa ação pode resultar em uma redução da tensão horizontal necessária para manter a estabilidade do furo. Conseqüentemente, o movimento lateral do solo em direção a escavação e a retirada de solo devido à escavação excessiva podem resultar em subsidência do solo na superfície e redução do confinamento das estacas instaladas nas proximidades.

Para manter o furo estável durante a cravação do trado, é necessário mover apenas o solo suficiente para compensar o volume trado e o volume de solo alterado devido ao corte. O controle da velocidade de avanço vertical do trado ajuda a evitar a descompressão lateral do solo dentro do furo, a perturbação do solo *in situ* ao redor do furo e a subsidência do solo adjacente à estaca. A velocidade adequada do avanço vertical do trado pode ser difícil de manter, se o equipamento de cravação não tiver o torque e a pressão adequados para rotacionar o trado. A Figura 7b representa um trado com velocidades de avanço vertical e rotação do trado, de modo que os espaços entre as hélices do trado sejam preenchidos pelo solo retirados da extremidade inferior da escavação sem retirar o solo lateralmente.

Posteriormente, SILVA (2011) em seu estudo, sobre energia e confiabilidade aplicadas aos estaqueamentos em estacas hélice contínua, relata que na cravação das estacas de pequenos diâmetros pode ocorrer do volume de solo

transportado para a superfície do helicóide ser inferior ao volume do trado, ou seja, parte do solo escavado está sendo compactado entre as hélices do trado, ou simplesmente, está sendo deslocado para as laterais, conforme a Figura 8.

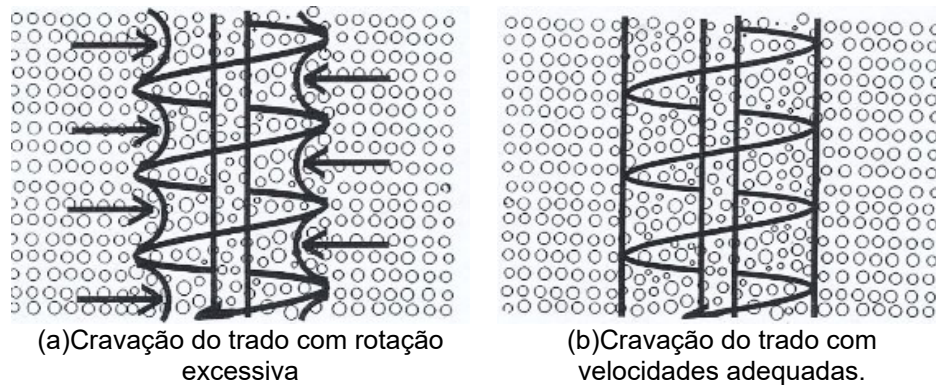


Figura 7 - Esquemático da cravação do trado, BROWN *et al.* (2007).

No primeiro caso, quando ocorre a compactação entre as hélices do trado, o comportamento do maciço praticamente não é afetado durante a fase de escavação. No entanto, quando ocorre esse deslocamento para as laterais ocorre a densificação ou adensamento do solo na envolvente do fuste da estaca, como em uma estaca cravada, possivelmente aumentando a capacidade de carga da estaca em maciços saprolíticos e desestruturando o maciço argiloso, diminuindo a capacidade de carga da estaca.

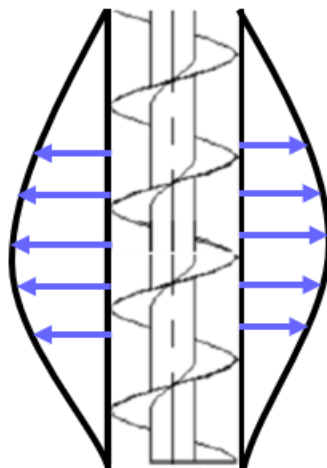


Figura 8 – Esquema de cravação de estacas hélice contínua quando o solo está sendo deslocado para as laterais, modificado de SILVA (2011).

Em relação à influência do tipo de solo, MASSARSCH *et al.* (1988) ressaltam que, dependendo do tipo de solo, tem-se uma cravação do trado mais adequada. Os autores também relatam que quanto maior o diâmetro do trado oco, maior a

força necessária para avançar o trado. No entanto, os trados de haste oca de grande diâmetro, segundo MASSARSCH *et al.* (1988), resultam em maior capacidade de carga da estaca porque um maior volume de solo na ponta da estaca é pré-carregado pela coluna de argamassa fluida do que é possível com os trados de menor diâmetro da haste oca.

2.2.4.2 Estudos sobre perturbações no maciço de fundação devido ao processo executivos de estacas hélice contínua utilizando ensaios *in situ*

Outra forma de estudar as perturbações das tensões, durante e após a instalação de estacas, é a realização de ensaios *in situ* antes, durante e após a execução da estaca. Normalmente, são realizados ensaios CPT antes e depois da execução das estacas. Citam-se trabalhos como: VAN IMPE (1988), VAN WEELE (1988), ALBUQUERQUE (2001), MANDOLINI *et al.* (2002), BUSTAMANTE (2003) E TIMOTHY *et al.* (2012).

VAN WEELE (1988) apresentou um ensaio de CPT executado antes e após instalação de uma estaca hélice contínua, propositalmente executada em terreno arenoso, com baixa velocidade de cravação, portanto, espera-se um significativo alívio de tensões. VAN WEELE (1988) verificou uma acentuada queda de resistência de ponta nas camadas de areia pura, causada pelo alívio de tensões gerado pela baixa velocidade de cravação, conforme é possível verificar na Figura 9.

VAN WEELE (1988) relata que os efeitos da execução de estacas hélice contínua são determinados, principalmente, por sua correta execução, como no caso de areias, em que a baixa velocidade de avanço vertical do trado na cravação, poderá implicar no alívio considerável de tensões no solo na envolvente da estaca.

Posteriormente, ALBUQUERQUE (2001) realizou um ensaio de penetração estática com uso do cone elétrico, a 25 cm de distância de uma estaca hélice contínua com 40 cm de diâmetro e 12 m de comprimento.

Através dos resultados apresentados na Figura 10 obtidos por ALBUQUERQUE (2001), o autor observou que a resistência lateral do cone (f_s) referente à estaca hélice contínua estava dentro do intervalo de variação para o solo em seu estado

natural, portanto, concluiu que as execuções dessas estacas não influenciam significativamente.

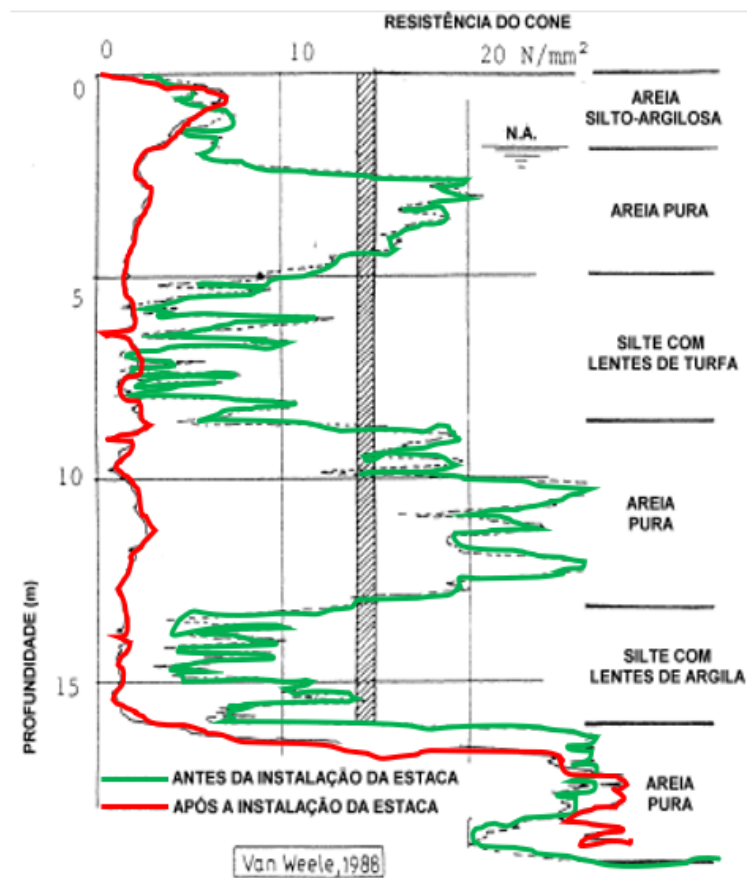


Figura 9 – Resultado de ensaio CPT executado aproximadamente no mesmo local antes e após a instalação de estaca hélice contínua (VAN WEELE, 1988).

MANDOLINI *et al.* (2002) realizaram um estudo utilizando provas de carga de três estacas escavadas em areia limpa. Os resultados sugerem que a capacidade de carga das estacas escavadas sob compressão axial é inferior as estacas cravadas. MANDOLINI *et al.* (2002) apresentam também uma expressão (Equação 3) para relacionar o diâmetro da estaca instalada com a taxa de concreto bombeado através da haste oca do trado e da taxa de recuperação do trado.

$$d_{av} = 1,13 \left(\frac{Q_c}{V_r} \right)^{0,5} \quad (3)$$

Onde: Q_c é a taxa de concreto bombeado através da haste oca do trado; V_r é a velocidade de recuperação do trado; V_c é o volume de concreto instalado na estaca; d_{av} é o diâmetro médio da estaca.

BUSTAMANTE (2003) realizou um estudo onde instalou uma estaca escavada em uma areia e argila intercaladas. Neste estudo, o autor relata a complexidade de realizar a etapa de cravação do trado, do processo executivo das estacas hélice contínua, de forma que não perturbe o solo. O excesso de rotação do trado, no momento da cravação, ocorre na prática frequentemente, principalmente para as estacas de grandes diâmetros (> 600 mm) que necessitam de maior potência do equipamento para a introdução do trado.

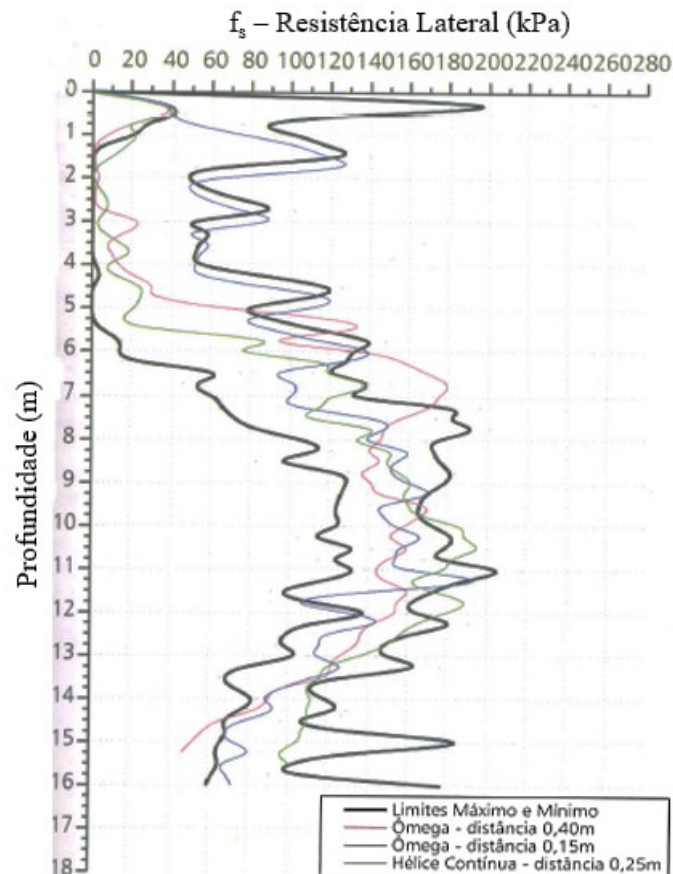


Figura 10 – Gráfico de resistência lateral do cone (f_s), ALBUQUERQUE (2001).

TIMOTHY *et al.* (2012) realizaram um estudo de estacas hélice contínua, em material arenoso, instaladas com diferentes velocidades de rotação na cravação do trado. Os autores concluíram, por meio de ensaios de CPT, que praticamente não ocorre perturbação do solo, devido ao processo executivo das estacas hélice contínua, a uma distância superior a 5 R do eixo da estaca. Portanto, pode-se concluir que não haverá interação entre estacas hélices, devido ao processo executivo, em estacas com espaçamentos superiores a 5R.

2.2.4.3 Estudos sobre perturbações no maciço de fundação devido ao processo executivos de estacas hélice contínua utilizando modelos reduzidos

Trabalhos utilizando modelos reduzidos também foram realizados, como: KENNY *et al.* (1997) e HIRD *et al.* (2006, 2011).

KENNY *et al.* (1997) avaliaram mudanças de densidade da areia na envolvente da estaca. Para isso, realizaram testes em modelo reduzido de trado simulando a cravação do trado da estaca hélice contínua e utilizaram medidas indiretas de condutividade térmica. Os resultados dos ensaios foram determinantes para calcular a taxa de cravação ótima do trado para uma dada eficiência, passo e taxa de rotação do trado.

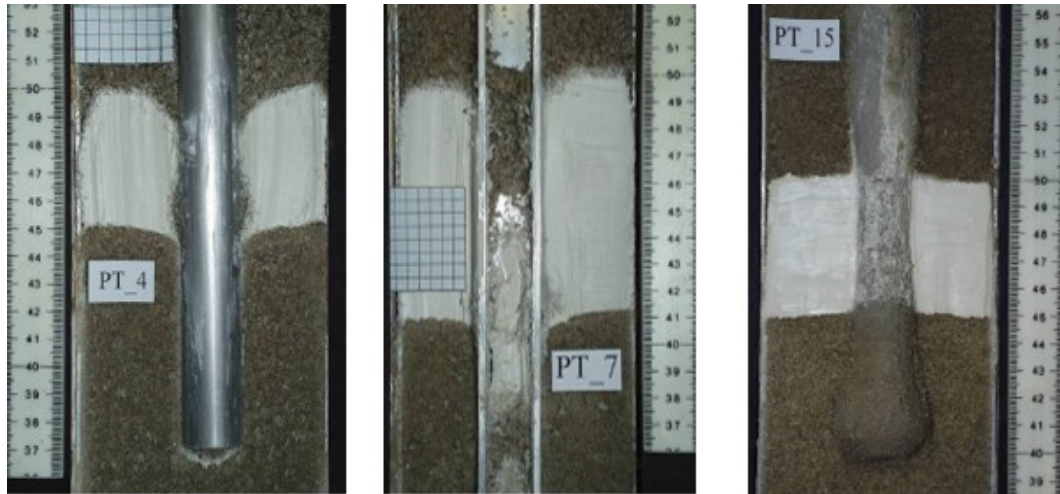
KENNY *et al.* (1997) concluíram que se a taxa de cravação do trado for inferior à taxa ótima calculada resultaria na descompressão da areia e da superfície. Uma taxa de cravação do trado maior do que a taxa ótima calculada resultaria em densificação da areia e elevação da superfície. Foi observado que a taxa de cravação ótima do trado aumentou para a areia fofa e que a taxa de cravação ótima do trado diminuiu para trados que possuem um menor diâmetro externo do trado em relação ao diâmetro interno do trado.

Posteriormente, HIRD *et al.* (2006) simularam, em modelo reduzido, o processo executivo de estacas cilíndricas, estacas cravadas com seção H e estacas hélice contínua. A modelagem executada apresentou alguns inconvenientes, tais como variação de diâmetro e penetração excessiva de cimento na camada de areia.

No entanto, as fotografias de seções centrais dos modelos dissecados mostram claramente que as deformações na envolvente do modelo da estaca hélice são relativamente pequenas em comparação com estacas cilíndricas e estacas com seção H, conforme apresenta a Figura 11.

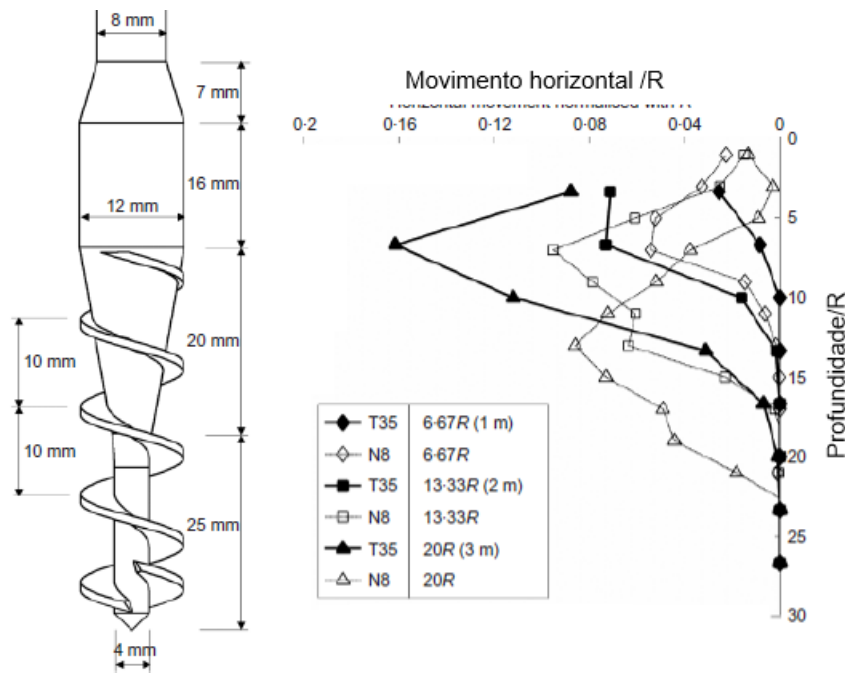
Em solos transparentes, HIRD *et al.* (2011) publicaram um trabalho em modelo reduzido simulando o avanço do trado ômega, (Figura 12a) em solo sintético transparente, representando argila. Foram realizados três ensaios, cada um com uma rotação diferente, porém, constantes em cada ensaio. Por fim, os resultados de deslocamento horizontal obtidos através dos modelos reduzidos foram

comparados com resultados de inclinômetros instalados próximos de estacas executadas em escala real (Figura 12 b).



(a) Estaca cilíndrica (b) Estaca com seção H (c) Estaca hélice contínua

Figura 11 - Fotografias de seções centrais dos modelos dissecados.



(a) Modelo reduzido do trado utilizado na perfuração

(b) Movimento Horizontal obtido nos ensaios dos modelos reduzidos (N8) comparados com os resultados obtidos em campo (T35)

Figura 12 – Modelo do trado utilizado na perfuração, HIRD *et al* (2011).

Os resultados obtidos por HIRD *et al.* (2011) apresentaram tendências semelhantes com as observadas em campo, conforme é possível verificar na (Figura 12 b).

Recentemente, LUTENEGGER (2018) afirmou que o distúrbio provocado pela instalação de estacas helicoidais pode ser importante em areias ou argilas sensíveis. Portanto, deduz-se que o efeito da instalação de estacas do tipo hélice continua também é importante em areias ou argilas sensíveis.

2.3 Modelagem Física

De uma forma mais ampla, a modelagem física pode ser idealizada como um dispositivo de previsão em que o fenômeno real é simulado numa escala menor RIBEIRO (2000). REINHORN (2008) define modelo reduzido como a redução de uma estrutura complexa, como um edifício, uma barragem ou uma ponte, conhecida como protótipo a uma estrutura relativamente mais simples, sem perder as características importantes do comportamento do protótipo.

A utilização de modelos em escala reduzida por arquitetos, engenheiros e construtores não é algo recente. Inicialmente, os modelos eram elaborados para auxiliar no planejamento e na construção de obras de engenharia complicadas, e não eram usados para estimar deformações, deslocamentos e forças em protótipos. No entanto, atualmente a utilização de modelos físicos como uma técnica prática no estudo comportamental de estruturas geotécnicas é amplamente utilizada para estudar mecanismos de interação solo-estrutura (KELLY, 2014; ISKANDER e LIU 2010), processos térmicos, fluxo de contaminantes deformações do solo devido a construção de túneis e testes em centrífugas.

Os modelos reduzidos têm mostrado grande sucesso na análise e previsão de fenômenos envolvendo problemas geotécnicos que ocorrem na natureza. Neste sentido, os modelos são capazes de gerar informações importantes para aperfeiçoar um projeto, aumentando, deste modo, seu desempenho e precisão.

Uma série de condições básicas devem ser atendidas para elaboração de um modelo e na adaptação de seu comportamento para o protótipo, de forma que garanta a perfeita similaridade física entre o modelo e o real.

Este conjunto de requisitos, ou leis de similitude, pode ser sistematizado por meio da análise dimensional, e a partir do Teorema de Buckingham-Vaschy, o qual estabelece que a solução de um dado fenômeno físico pode ser

demonstrada analiticamente em termos de uma relação envolvendo certo número de termos adimensionais e independentes entre si (TAVARES, 2012).

Especificamente no caso de estudos paramétricos, a análise dimensional exerce contribuição relevante na interpretação das análises, favorecendo o entendimento das relações de proporção existentes entre os diferentes parâmetros do problema e, conseqüentemente, colabora para uma melhor compreensão do fenômeno como um todo, minimizando a ocorrência de conclusões simplistas (DANTAS, 2004).

O artifício de empregar modelos físicos na previsão de comportamentos de fenômenos apresenta restrições inevitáveis. MOTTA (1972) afirma que, em algumas situações, apenas a diminuição das dimensões geométricas faz surgir forças que não se desenvolvem no sistema real cujo comportamento se almeja prever. Além disso, nas modelagens físicas, realizadas a 1g, é impossível obter similitude dos níveis de tensão efetiva do solo, o que interfere na interação solo-estrutura, conforme relatado por KITAZUME (2009).

TAVARES (2012) relata que não se pode, simplesmente, pensar em construir um modelo em escala reduzida sem reconhecer nitidamente as grandezas que influenciam no fenômeno físico que está sendo analisado.

2.3.1 Processo de Execução de um Modelo Reduzido

HARRIS e SABNIS (1999) afirmam que, para se ter sucesso no estudo de um modelo, é necessário ter um planejamento cuidadoso das diversas etapas do processo de elaboração do modelo. Um estudo experimental de um problema de engenharia não deixa de ser um pequeno projeto de engenharia, portanto, precisa de uma sequência lógica e criteriosa de eventos. O planejamento detalhado de um experimento é fundamental, porque o aprimoramento de um modelo em andamento é normalmente impraticável.

Para realizar um modelo físico, representativo do fenômeno estudado, é necessário:

- Definir o objetivo dos testes experimentais, como: resposta desejada e mecanismo de falha.

- Selecionar a escala do modelo, geralmente regida pelos recursos do laboratório, como: dispositivos de carregamento e espaço.
- Selecionar o tipo de material do modelo.
- Estabelecer o projeto do modelo e planejar a fabricação.
- Instalar sensores para medir a resposta da estrutura.
- Salvar e armazenar dados experimentais (aquisição de dados).
- Observar a resposta analisando os dados, e ter um diário de todas as atividades experimentais.

A Figura 13 apresenta um fluxograma da sequência de execução de um modelo físico.

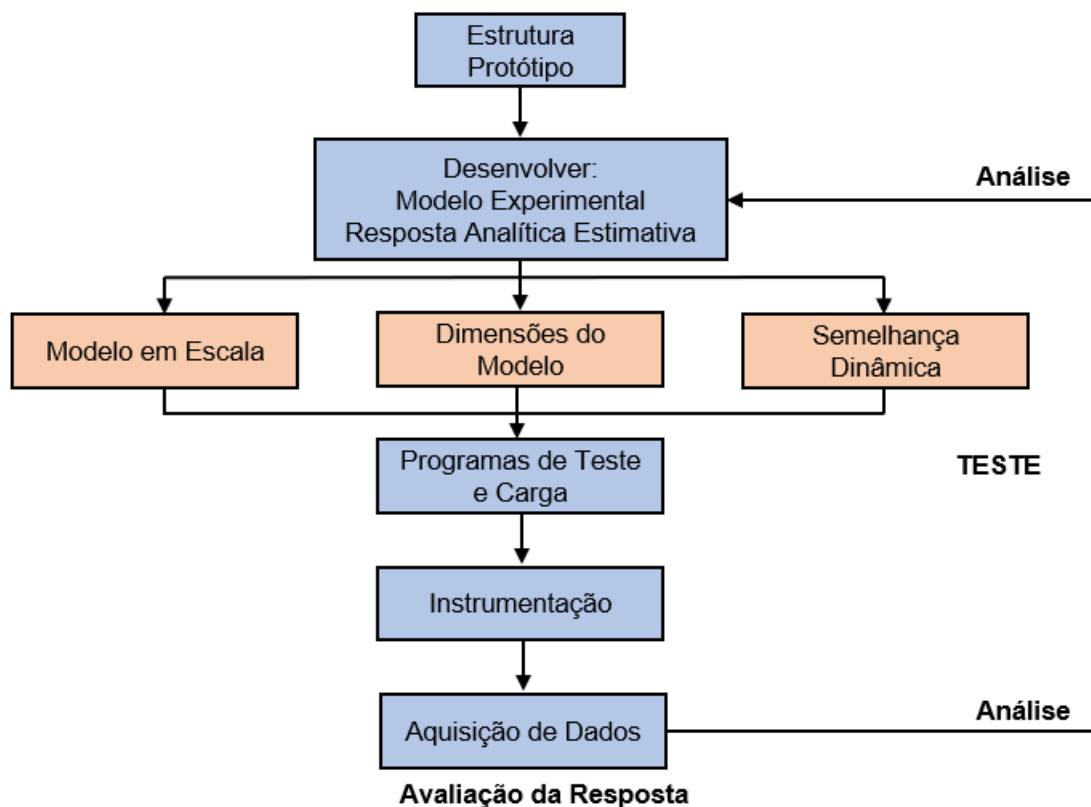


Figura 13 - Fluxograma da sequência de execução de um modelo físico.

2.3.2 Classificação

Segundo GOMES (1993), os modelos físicos aplicados a problemas geotécnicos podem ser classificados, em função da natureza das grandezas envolvidas, da finalidade visada e da infraestrutura disponível (Tabela 1).

Tabela 1 – Tipos de modelos em problemas geotécnicos, TAVARES (2012) modificado GOMES (1993).

Classe	Tipos de Modelos	Princípios Básicos
I	Modelos Absolutos ou de Similitude Completa.	Simulação plena de todas as grandezas intervenientes no fenômeno analisado
II		Simulação apenas das grandezas mais relevantes ao fenômeno analisado
II.A	Modelos Relativos ou de Similitude Restrita.	Mesmo material do protótipo e em condições similares (modelos de similitude imperfeita).
II.B		Mesmo material do protótipo e em diferentes estados iniciais.
II.C		Material equivalente ao usado no protótipo.
II.D		Simulação do campo gravitacional.
III	Modelos Distorcidos	Simulação obtida através da adoção de diferentes escalas para grandezas de mesma base dimensional
IV	Modelos Analógicos	Simulação obtida através da correção entre os fenômenos qualitativamente distintos, mas regidos por equações de mesma estrutura formal.

2.3.3 Trabalhos realizados de modelagem de estacas

Parte da presente pesquisa envolve a modelagem física, em escala reduzida, da etapa de cravação do trado do processo executivo de uma estaca hélice contínua. Portanto, esta seção irá descrever estudos utilizando modelos reduzidos de estacas, com intuito de auxiliar na construção do modelo da presente pesquisa.

FRANGOULIDES (1999) realizou a modelagem física de estacas helicoidais (CHD) replicando todo o processo de instalação das estacas helicoidais. A configuração do modelo consistiu em um trado oco, anexado a um motor que controlava o giro do trado, um sistema de polias que fornecia manualmente o movimento vertical do trado e uma bomba peristáltica que injetava argamassa no trado oco, conforme é apresentado na Figura 14.

Para simular a injeção de concreto, uma argamassa constituída por uma mistura de Cimento Portland de alta resistência inicial, areia fina, escória de alto-forno e água, foi utilizada. Assim, a argamassa era injetada no trado helicoidal através da utilização de uma bomba peristáltica, assegurando um fornecimento contínuo de argamassa durante a formação da estaca.

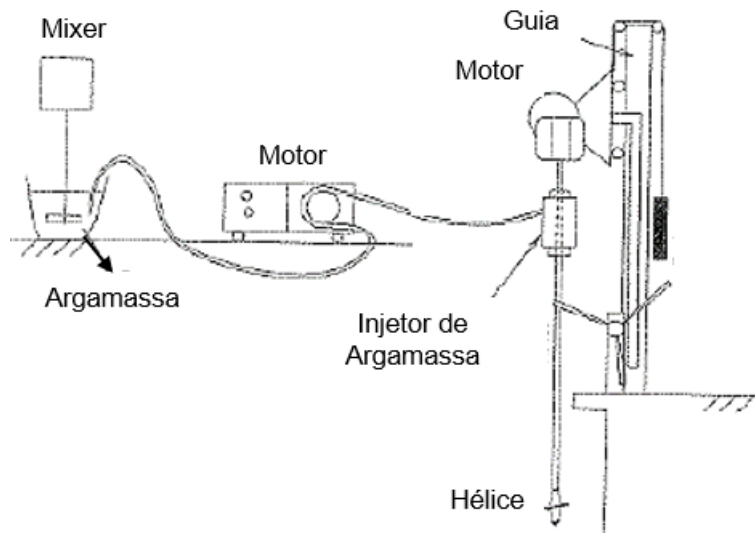


Figura 14 – Modelo de Estaca Helicoidal Contínua feita por FRANGOULIDES (1999)

O processo executivo das estacas foi simulado em um *container* preenchido com solo argiloso. No entanto, o movimento vertical da introdução do trado foi feito de maneira manual, causando imprecisões na relação entre a rotação da hélice e o movimento vertical, que são essenciais para a qualidade das estacas. O trabalho de FRANGOULIDES (1999) mostrou que controlar manualmente o movimento vertical, a uma taxa controlada para todos os testes, é difícil e pode ser uma fonte de erros para os resultados.

Após o trabalho de FRANGOULIDES (1999), as incertezas geradas pela operação manual foram eliminadas com a automatização do processo executivo das estacas simuladas, como verifica-se no trabalho de HIRD *et al.* (2006).

HIRD *et al.* (2006) executaram modelos físicos para investigar o comportamento de solos durante a instalação de estacas hélice contínua em argilas. Os modelos físicos foram realizados na câmara de ensaios de 250 mm de diâmetro, com controle de tensões verticais e horizontais para simular diferentes níveis de tensões *in situ* (Figura 15).

Para execução dos modelos de estacas hélice contínua, HIRD *et al.* (2006), utilizaram um equipamento de perfuração fabricado especialmente para a simulação (Figura 16).

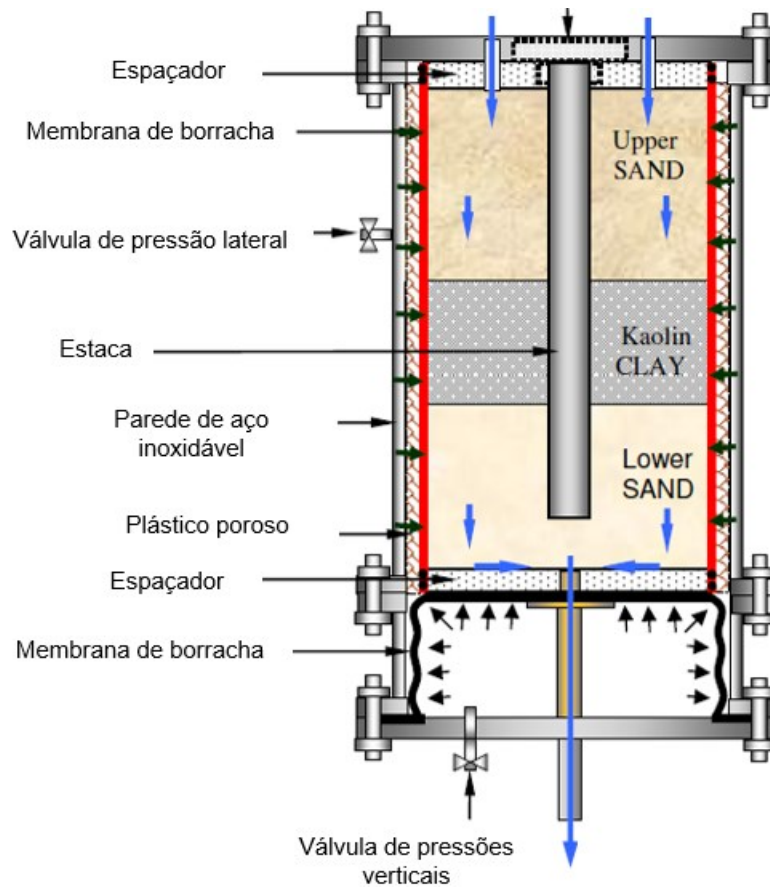


Figura 15 - Esquema da configuração do teste axissimétrico, HIRD *et al.* (2006).

O equipamento (Figura 16) é capaz de controlar a velocidade de descida e subida do trado, através de um sistema de êmbolo hidráulico, e é capaz de controlar a velocidade de giro do trado, através de um motor.

O equipamento ainda inclui: uma câmara de armazenamento de argamassa e um modelo reduzido de trado feito de aço inoxidável de 25 mm de diâmetro externo, de 12 mm de diâmetro interno e um passo de 14 mm.

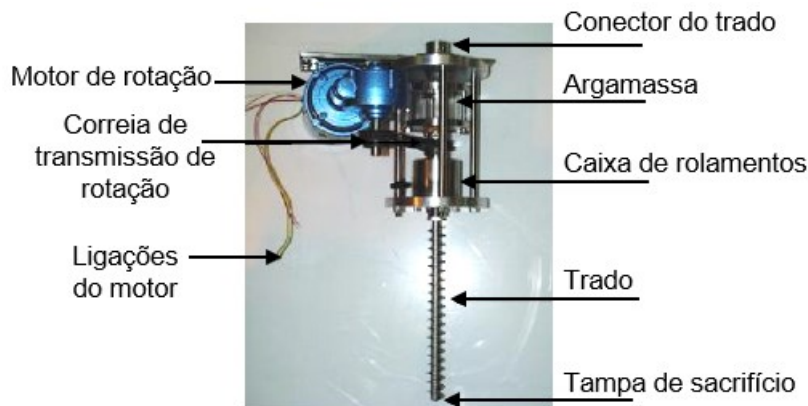


Figura 16 – Modelo usado por HIRD *et al.* (2006).

Durante a realização dos ensaios, a argamassa era injetada no trado oco, sob o peso próprio. Esse sistema de bombeamento de argamassa, para a instalação das estacas hélice contínua, é representativo, no entanto, para a instalação das estacas ômega é pouco provável que a pressão do peso próprio da argamassa na escala do modelo crie uma pressão suficiente para ser representativo.

Técnicas de controle similares foram implementadas por HIRD e STANIER (2010) durante a realização de ensaios em modelos reduzidos de estacas helicoidais, onde a velocidade vertical de instalação da estaca foi totalmente automática.

Posteriormente, JEFFREY (2012) criou modelos, sob estado de tensões na gravidade a 1 g, para simular o processo executivo de estacas tipo ômega e de estacas cravadas pré-moldadas de concreto, a fim de comparar os efeitos gerados pela instalação dessas estacas.

JEFFREY (2012) reproduziu todo o processo de instalação da estaca tipo ômega em um modelo de escala reduzida. Logo, foi preciso fazer a cravação do trado em uma caixa teste contendo areia e, posteriormente, realizar a concretagem durante a extração do trado. A cravação do trado foi por rotação controlável, através de um motor acionado por correia (Figura 17); e para a simulação do processo de concretagem foi necessário diferentes ajustes de rotação e dosagens da argamassa (Figura 18).

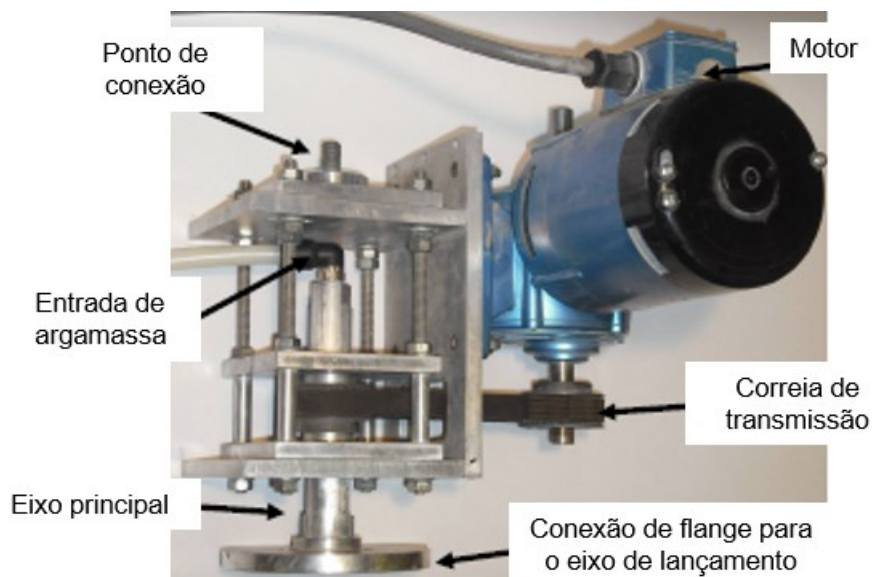


Figura 17 - Modelo de perfuração de estacas helicoidais, JEFFREY (2012).

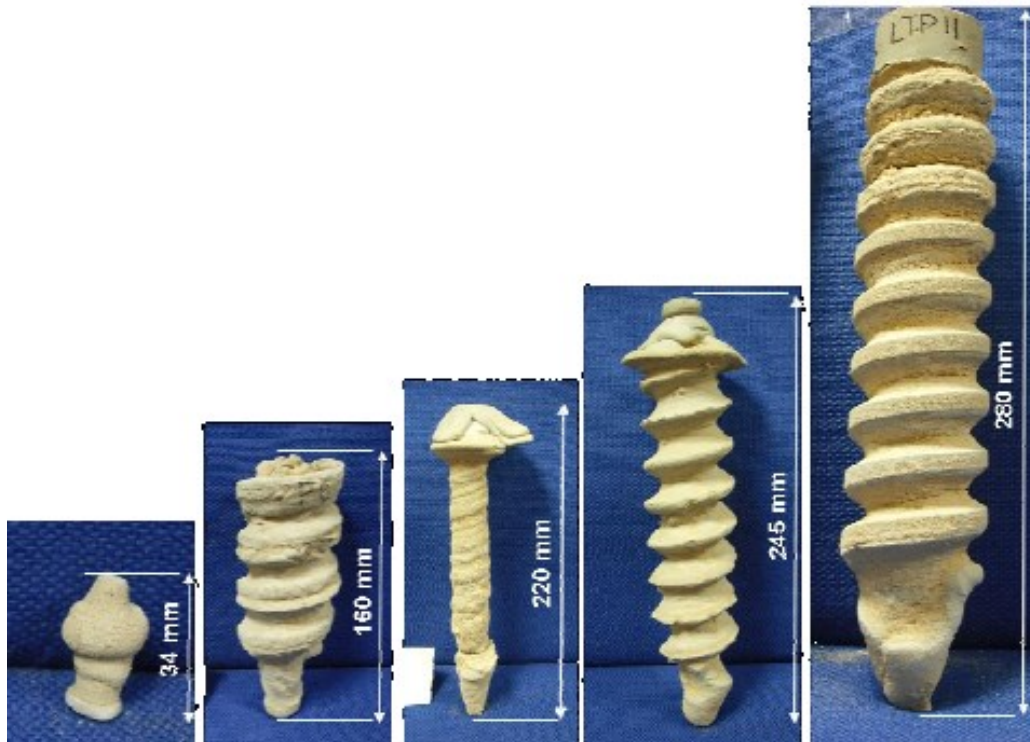


Figura 18 - Modelos realizados por JEFFREY (2012) para ajustar a forma mais adequada de simular a fase de concretagem do processo executivo de estacas.

Ressalta-se, que JEFFREY (2012) relatou que toda pesquisa utilizando modelos reduzidos deve considerar o tamanho da caixa de teste utilizada para armazenar o solo, a fim de limitar qualquer influência potencial que o recipiente pode ter sobre o comportamento do solo.

TAVARES (2012), buscando compreender melhor as fundações estaqueadas, utilizou a modelagem reduzida na gravidade a 1g, como ferramenta para uma análise qualitativa das características do comportamento mecânico de um *radier* estaqueado.

TAVARES (2012) empregou como solo uma areia seca pluviada em um tanque cilíndrico, e depois compactada de modo a garantir um nível de compactação de acordo com o requerido para a realização dos ensaios. O modelo da fundação era composto por placas metálicas retangulares, que simulavam os *radiers*, e tubos metálicos vazados, que simulavam as estacas (Figura 19). Os incrementos de carga no modelo reduzido foram efetuados com a utilização de um macaco hidráulico, instalado no cilindro de modelagem reduzida.

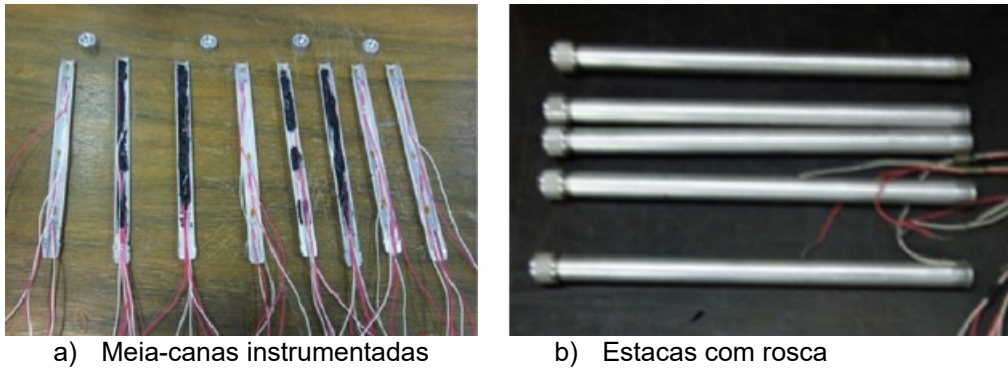


Figura 19 – Tubos de alumínio simulando as estacas em escala reduzida, TAVARES (2012).

Acrescenta-se, ainda, o trabalho realizado por PESSANHA *et al.* (2014), que avaliaram o efeito do processo executivo de estacas escavadas através de modelos reduzidos de laboratório com diferentes escalas (Figura 20). Os modelos foram submetidos a provas de carga estáticas em um tanque, onde foi possível simular maciços de fundação arenosos.

PESSANHA *et al.* (2014) concluíram que os resultados, obtidos por meio dos ensaios realizados nas escalas pequena e grande, foram mais representativos na capacidade de carga; já na comparação do recalque, a escala média teve resultados semelhantes entre a previsão e os ensaios de prova de carga.



Figura 20 - Modelos reduzidos dos trados de hélice contínua e ômega, PESSANHA *et al.* (2014).

WOOD (2004) relata que embora ensaios em modelos reduzidos de estacas ofereçam uma série de vantagens em relação aos ensaios em escala real, existe

uma série de fatores que devem ser cuidadosamente consideradas. Cita-se que é importante considerar que as tensões efetivas envolvidas nos modelos são tipicamente baixas, assim o comportamento do solo no modelo pode apresentar um comportamento diferente do protótipo.

2.4 Solos Transparentes

A presente pesquisa inclui a modelagem, da etapa de cravação do trado do processo executivo de estacas hélice contínua, utilizando solos transparentes associada a correlação digital de imagens. Portanto, faz-se necessário realizar uma revisão sobre: tipos de solos transparentes; técnicas de medição com uso de solos transparentes; e técnicas de processamento e análise de imagens

2.4.1 Definição

A construção de um solo transparente envolve a mistura de um fluido e um material granular com índices de refração similares. A transparência da mistura será tanto maior quanto mais próximos os índices de refração do fluido e do material granular. Pois, quando a luz passa de um meio para outro com índices de refração diferentes, uma parte da luz será refletida e a outra parte será absorvida no segundo meio (Figura 21). Quanto mais semelhantes os índices de refração entre os dois meios, menos reflexão irá ocorrer. Conseqüentemente, quando os índices de refração dos meios são próximos, a reflexão será minimizada e os dois meios serão visualizados homogêneos à luz.

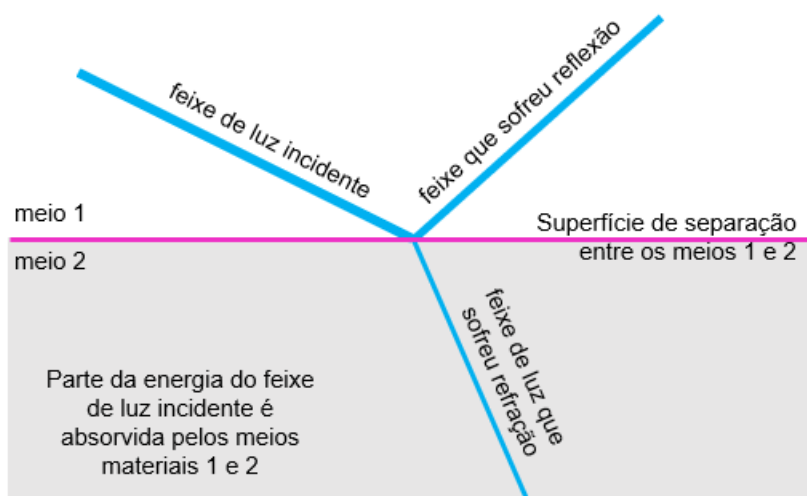


Figura 21 – Reflexão e refração da luz em meios com IR distintos.

Em solos não saturados, a transparência do meio é consideravelmente diminuída, pois microbolhas de ar tornam-se visíveis no interior do solo, prejudicando assim a homogeneidade da combinação meio granular e poro fluido (PETER *et al.* 2011).

2.4.2 Famílias de Solos transparentes atualmente disponíveis

Atualmente, a modelagem utilizando solos transparentes é classificada em seis famílias, que são: pó de sílica amorfa; sílica gel; hidrogel; quartzo fundido; laponita; e gelita.

As famílias são agrupadas de acordo com o índice de refração das partículas e propriedades físicas que compõem o solo e o fluido, conforme é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades físicas dos solos transparentes atualmente disponíveis.

Propriedades	Pó de sílica amorfa	Sílica gel	Hidrogel	Quartzo fundido	Laponita	Gelita
Índice de refração	1,442	1,442	1,333	1,458	1,333	
Aplicação	Simula argila	Simula areia	Fluxo de água / Simula depósitos marinhos fracos	Simula areia saturada e não saturada	Simula depósitos marinhos fracos	Argila
Peso específico saturado, kN/m ³	9 – 16	11 – 14	10	13– 16	10	9,8
Porosidade	Mistura de óleos minerais	Mistura de óleos minerais/ sucrose, ISTS*	Água	Mistura de óleos minerais	Água	Água
Viscosidade do fluido 23°C (Pa.s)	0,0050	0,0050	0,0009	0,2012	0,0009	
Coefficiente de permeabilidade (cm/s)	2,3x10 ⁻⁷ - 2,5x10 ⁻⁵	1,5x10 ⁻⁴ - 7x10 ⁻³	7x10 ⁻² - 2 x10 ⁻⁵	1,3x10 ⁻⁵ - 2,1x10 ⁻⁵	5,0x10 ⁻⁹ - 1,6x10 ⁻⁶	
Ângulo de atrito drenado	19°-36°	29°- 42°		44°-59°		
Coesão drenada	20 - 44 kPa	0		0		
Coesão não drenada	35-250 kPa	0	5-12kPa	0	0	
Referência	SADEK <i>et al.</i> (2003)	ISLANDER <i>et al.</i> (2002)	SERRANO <i>et al.</i> (2011); TABE (2009)	EZZEIN e BATHURST (2011)	WALLANCE e RUTHERFORD (2015)	HAKHMANESH I <i>et al.</i> (2016)

Nota: *ISTS – Iodeto de sódio tratado com thiosulfeto de sódio

2.4.2.1 *Pó de sílica amorfa para modelagem de argilas*

MANNHEIMER (1990) foi o pioneiro a pesquisar o pó de sílica amorfa hidratada misturada com um fluido de mesmo índice de refração da sílica para a modelagem de argilas. Esta sílica amorfa é um pó extremamente fino com diâmetros individuais das partículas na ordem de $0,02 \mu\text{m}$, conforme a Figura 22.



Figura 22 - Pó de sílica amorfa (sílica micronizada).

MANNHEIMER (1990) relatou duas principais vantagens da utilização da sílica gel em relação aos solos transparentes anteriormente desenvolvidos. A primeira é que o diâmetro das partículas de sílica é menor do que o comprimento de onda da luz visível e, portanto, não provoca dispersão de luz e distorção visual. A segunda é que as partículas de sílica são porosas e higroscópicas, assim, absorvem espontaneamente o poro fluido e dissipam o ar a partir da amostra sob vácuo.

Em relação as propriedades geotécnicas do pó de sílica simulando areia, CARVALHO (2015) descreve que a resistência ao cisalhamento do pó de sílica é maior se comparada com as argilas naturais normalmente adensadas e, ainda, apresenta menor plasticidade. No entanto, o comportamento sobreadensado desses materiais é bem similar, tanto em condições drenadas quanto em condições não drenadas, como apresenta a Figura 23. Segundo ISLANDER *et al.* (2002), o pó de sílica atende aos requisitos para representar as propriedades de resistência, permeabilidade e comportamento geotécnico de argilas de baixa plasticidade.

A sílica gel está sendo amplamente utilizada no meio acadêmico, especialmente por pesquisadores ingleses e australianos, e tem sido utilizada em uma ampla gama de problemas de fundações, interação solo estrutura, mecânica de grupo

de fundações e testes em centrífugas para modelar o comportamento do solo offshore. A Tabela 3 exibe diferentes trabalhos utilizando o pó de sílica amorfa para modelagem de problemas geotécnicos.

Destaca-se o trabalho de BLACK (2015) que foi realizado em ambiente de centrifuga. Black descreveu que os testes utilizando solos sintéticos transparentes são tipicamente conduzidos em modelos reduzidos a 1g, o que ocasiona preocupações sobre o impacto da escala e com o nível de tensão.

O autor reconhece essa limitação e apresenta o desenvolvimento de uma melhor metodologia de testes em que o solo transparente associado à técnica de correlação digital de imagens são introduzidos para ambiente de centrifuga.

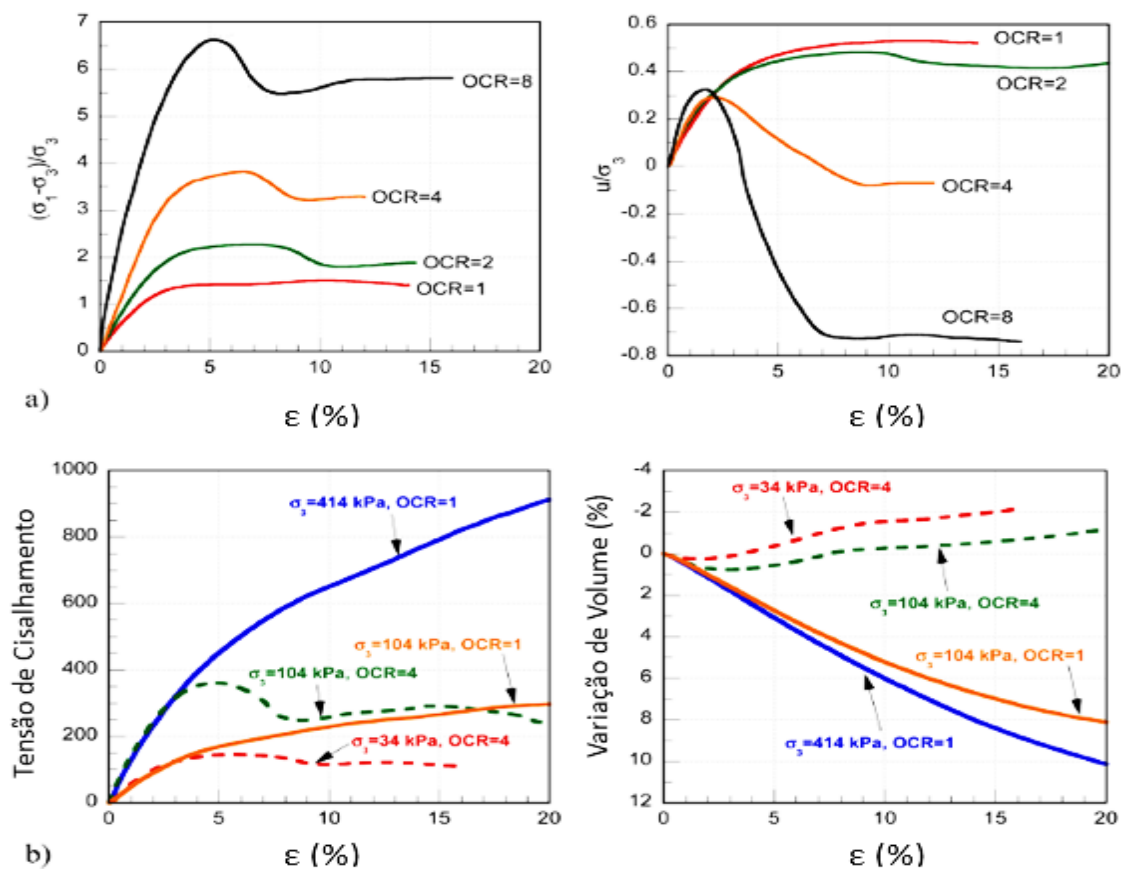


Figura 23 - Resposta mecânica da sílica em pó transparente típica (Flo-Gard SP) empregada para modelar argila, (a) compressão triaxial não drenada e (b) compressão triaxial drenada (adaptado de SADEK *et al.* 2003).

Tabela 3 - Aplicações do pó de sílica amorfa para modelagem

Aplicações	Referências
Cravação de estacas em argila	LEHANE e GILL (2004); NI <i>et al.</i> (2010); HIRD <i>et al.</i> (2011)
Deformações próxima a penetrômetros	SALGADO <i>et al.</i> (2012)
Âncoras helicoidais	STANIER <i>et al.</i> (2013)
Colunas de areia	MCKELVEY <i>et al.</i> (2004)
Interação solo estrutura e mecânica de grupo em fundações de coluna brita	KELLY (2014)
Testes em centrífugas para modelar o comportamento de fundações offshore	SONG <i>et al.</i> (2009); WANG <i>et al.</i> (2011); BLACK (2015)
Aterro sobre solo mole	GUZMAN e ALFARO (2016); GUZMAN e ALFARO (2018)
Cravação de tubos	HOVER <i>et al.</i> 2013

2.4.2.2 Sílica Gel para modelagem de areias

A segunda família é composta de grãos de sílica gel utilizados na modelagem de areias (SADEK *et al.* 2002). A sílica gel é um material inerte, poroso e encontrada em tamanhos que variam de 0,5 mm a 5 mm (Figura 24).



Figura 24 - A sílica gel angular.

O emprego da sílica gel para a produção de solos transparentes para a modelagem de problemas geotécnicos teve um amplo desenvolvimento no início dos anos 2000. Podem-se citar diversos estudos realizados, como: ISKANDER *et al.* (2002), LIU *et al.* (2003), ISKANDER e LIU (2010), AHMED e ISKANDER (2011a, 2011b), SUI e ZHENG (2017) e WANG *et al.* (2018).

ISKANDER *et al.* (2002) estudaram as propriedades mecânicas de diversos tipos de sílica amorfa hidratada. Neste estudo, ensaios triaxiais, drenados e não drenados em sílica gel foram realizados, e assim confirmam que as partículas

granulares de sílica gel podem ser representativas de alguns solos naturais (Figura 25).

Do estudo de ISKANDER *et al.* (2002) e LIU *et al.* (2003), conclui-se que a sílica gel tem um comportamento estático semelhante ao das areias naturais. Porém, para a produção de solos transparentes sintéticos empregando sílica gel e sílica em pó apresentam os seguintes inconvenientes:

- As partículas se deformam plasticamente ainda sob baixas pressões de confinamento (ISKANDER 1998; ISKANDER *et al.* 2003; ZHAO e GE 2007; EZZEIN e BATHURST, 2011);
- A deaeração dos poros internos das partículas de sílica gel é complexa e pouco prática para testes de maior escala.
- Existe a possibilidade de alguns processos químicos ocasionarem alterações na cor e, portanto, reduzem a transparência da amostra com o tempo (ISKANDER, 2010);
- As partículas de sílica gel são higroscópicas e, portanto, podem ser afetadas pelo fluido de saturação, fazendo com que as partículas se quebrem e tornem-se amareladas;
- A transparência do solo constituído por sílica e um fluido de saturação é limitada em espessuras a partir de aproximadamente 50mm.

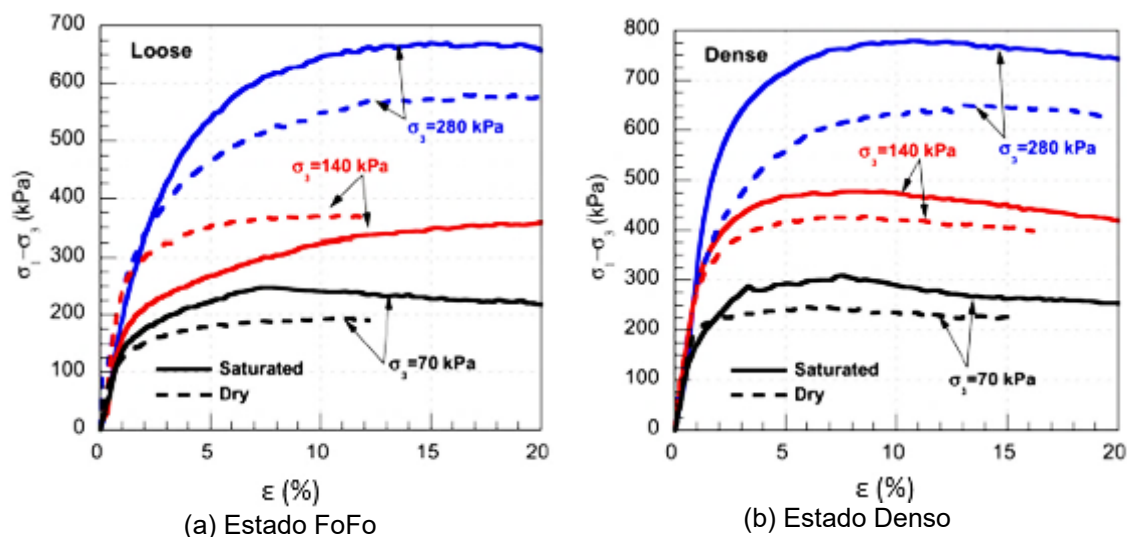


Figura 25 – Resistência ao cisalhamento do gel de sílica denso e fofo, em condições secas e saturadas, a partir de ensaios de compressão triaxial, (adaptado de ISKANDER *et al.*, 2002).

Segundo LI *et al.* (2003), o principal inconveniente da sílica gel é que as partículas são propensas ao esmagamento por serem relativamente moles,

conforme verifica-se por meio dos resultados de ensaios de compressão uniaxial, mostrados na Figura 26. No entanto, o esmagamento não é necessariamente prejudicial, uma vez que pode ser usado para simular esmagamento dos grãos em ensaios de escala reduzida de níveis de tensões a 1g.

Enfatiza-se que os estudos anteriores focaram nas propriedades estáticas da sílica gel, porém ZHAO e GE (2014) focaram nas propriedades dinâmicas, como módulo de cisalhamento dinâmico e a razão de amortecimento. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que o comportamento dinâmico da sílica gel também é semelhante aos dos solos naturais.

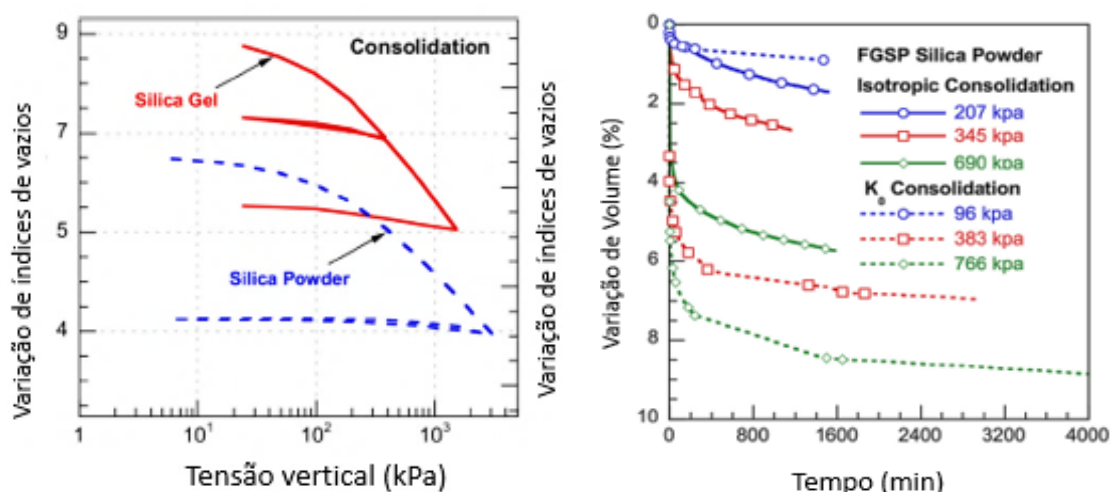


Figura 26 – Propriedades de consolidação da sílica e sílica amorfa (LIU et al., 2003).

Atualmente, a gel de sílica tem sido aplicada para modelagem de areias em diferentes problemas de geotecnia, conforme resumido na Tabela 4.

Tabela 4 - Aplicações da Sílica Gel para modelagem de areias

Aplicações	Referências
Modelar a penetração estacas	ISKANDER e LIU (2010); ZHOU <i>et al.</i> (2017);
Fundações rasas	ISKANDER e LIU 2010
Investigar deformações do solo devido a construção de túneis	AHMED e ISKANDER (2011)
Estabilidade de Taludes	SUI e ZHENG (2017)
Cut-off	WANG <i>et al.</i> (2018)
Propriedades dinâmicas do solo	ZHAO e GE (2014)

2.4.2.3 Hidrogel para modelagem de sedimentos de baixa resistência

A terceira família de solo transparente, nomeado de *Aquabeads* (hidrogel), é a base de água, feito com um polímero capaz de absorver 200 vezes o seu próprio peso em água (Figura 27). O hidrogel apresenta algumas vantagens em relação às outras famílias de solo transparente. Podem-se citar: boa estabilidade sob diferentes temperaturas e significativa durabilidade contra o calor (TABE, 2009).

Além disso, o *Aquabeads* tem o mesmo índice de refração (IR) da água, o que o torna ideal para o estudo de fluxo em solo usando água como fluido correspondente (LO *et al.*, 2008).

Resultados de testes de condutividade hidráulica realizados, revelam que os solos com uma ampla variação de condutividade hidráulica podem ser simulados usando este material. Isso pode ser alcançado, pois as partículas de *Aquabeads* podem ser facilmente esmagadas, permitindo a formação de variadas distribuições granulométricas (FERNANDEZ SERRANO *et al.* 2011).

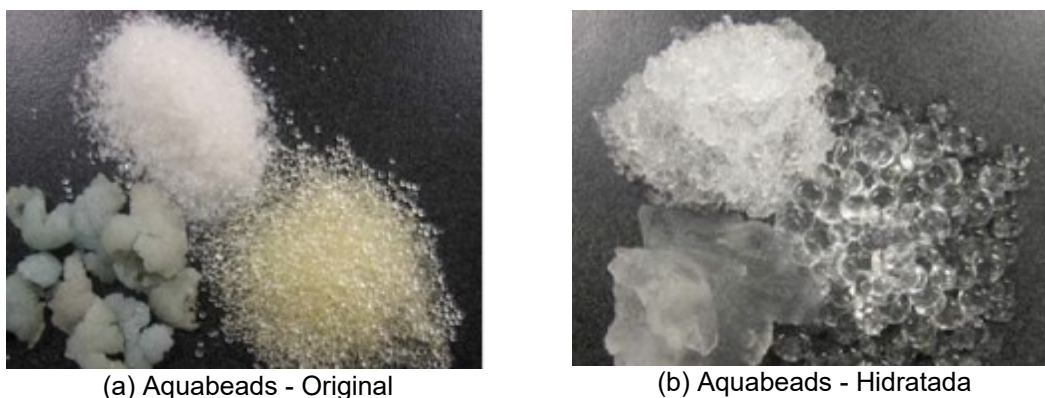


Figura 27 – Tipos de Aquabeads, LO *et al.* (2008)

As propriedades mecânicas do *Aquabeads* foram testadas por meio de ensaios de palheta, como apresentado na Figura 28. Conseqüentemente, o *Aquabeads* só pode simular maciços de baixa resistência em estudos de deformação.

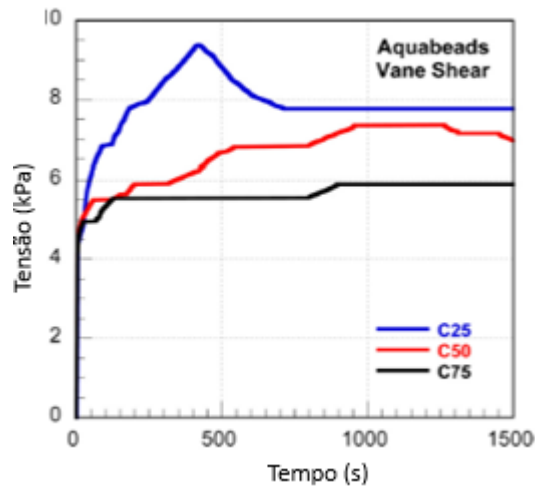


Figura 28 – Resultados de ensaios de palheta em Aquabeads (TABE, 2009).

A Tabela 5 apresenta as aplicações dos Aquabeads para simulações de problemas geotécnicos.

Tabela 5 – Aplicações do Hidrogel para modelagem de sedimentos de baixa resistência

Aplicações	Referências
Simular sedimentos muito fraco em estudos de deformação.	FERNANDEZ SERRANO <i>et al.</i> 2011
Fluxo multifásico	LO <i>et al.</i> (2008)
Atividades de Ensino	SUESCUN <i>et al.</i> (2013)

2.4.2.4 Quartzo Fundido para modelagem de areias

A produção de solos transparentes, constituídos por sílica gel e pó de sílica amorfa, apresenta limitações quanto a alguns aspectos dos fluidos testados, como: instabilidade, toxicidade, inflamabilidade e degradação das membranas de látex durante ensaios triaxiais. Estes aspectos incentivaram a busca de substitutos para as partículas granulares que permitem o uso de fluidos mais estáveis. Outro fator que contribuiu para a necessidade de uma nova família de solos transparentes é que os grãos de gel de sílica contêm uma vasta rede de poros interligados o que reduz a sua rigidez e a resistência em relação à areia natural.

Assim, surgiu a quarta família de solos transparentes, que é constituída de quartzo fundido (Figura 29). O quartzo fundido é uma forma não cristalina de dióxido de silício e é, frequentemente, um subproduto de processos de

fabricação de semicondutores, placas solares, lentes de microscópio, e equipamentos de telecomunicações.



Figura 29 – Quartzo fundido, ISKANDER (2010)

Vários fornecedores fabricam o material em diferentes especificações de tamanho de partícula. Independentemente da fonte, o material tem o formato angular e possui a composição química semelhante à do silicato natural areia, conforme a Figura 29.

EZZEIN e BATHURST (2011) foram os pioneiros a demonstrar que o quartzo fundido misturado com dois óleos minerais pode ser usado como um solo transparente. Na literatura técnica nota-se que o solo transparente constituído por quartzo apresenta vantagens em relação aos demais solos transparentes, principalmente em relação as areias fabricadas com sílica gel.

Algumas das principais vantagens incluem o seguinte:

- as partículas não se quebram e não se deformam plasticamente sob carga;
- as partículas de quartzo fundido não contêm microbolhas internas o que facilita o processo de deaeração, sendo muitas vezes desnecessário seu uso;
- as partículas não reagem quimicamente com o fluido de saturação;
- as partículas não absorvem o fluido de saturação;
- o índice de refração e a transparência do óleo incolor são estáveis com o tempo;

- o fluido de saturação é inodoro, não tóxico, possui volatilidade baixa e alta temperatura de ignição, o que o tornam um fluido ideal para um ambiente de laboratório;
- há uma profundidade de transparência igual a 120 mm quando colocado em um recipiente feito de acrílico com espessura igual a 25 mm;
- o quartzo fundido e os óleos minerais apresentam baixo custo.

Percebe-se que o quartzo apresenta inúmeras vantagens, porém, uma desvantagem do quartzo fundido grosso é que são fornecidos pelos fabricantes com partículas de formato acentuadamente angular.

Em vista dessa desvantagem, uma possibilidade para que as partículas fiquem com o formato adequado, para simular areias naturais, é utilizar moinhos para suavizar as arestas das partículas.

A Figura 30 exibe um modelo de solo transparente resultante da mistura do quartzo fundido e os óleos minerais.



Figura 30 - Capa do livro “ Modelling with transparentsoils” do prof. Magued Iskander visto através de uma espessura de 5 cm de solo transparente feito com quartzo fundido e mistura de óleos minerais.

Atualmente, existem diferentes fluidos de saturação para tornar o quartzo fundido transparente. GUZMAN e ISKANDER (2013) identificaram uma solução de sacarose pré-fabricada como um líquido adequado para ser utilizado no lugar

dos óleos minerais. Os óleos minerais e a sacarose, que são imiscíveis, podem ser combinados no mesmo modelo.

A Tabela 6 apresenta uma síntese dos os produtos à base de sacarose testados na pesquisa administrada por GUSMAN *et al.* (2014). O material que obteve o melhor desempenho foi o *Low Color Sucro*eda. Este material foi selecionado por possuir uma baixa coloração amarelada e uma possibilidade de adaptação do índice de refração em uma faixa de 1,33 -1,503, proporcionando, assim, modelos transparentes, conforme se observa na Figura 31. As principais características deste estudo são listadas a seguir:

- O índice de refração da mistura aquosa com sacarose não sofre alteração expressiva com uma pequena variação da temperatura;
- A densidade seca variou entre 1,134 – 1,356 kg/m³;
- O ângulo de atrito de pico do solo transparente ficou na faixa de 46° a 57°;
- O poro fluido de sacarose pode ser misturado com óleo mineral;
- O solo transparente composto por quartzo fundido e uma solução aquosa de sucrose é inerte e não tóxica o que facilita seu uso para fins educacionais;
- Apesar de ser feito à base de sacarose, não propicia o surgimento de seres biológicos indesejáveis com o passar do tempo.

Tabela 6- Propriedades dos líquidos a base de sacarose testados na pesquisa de GUZMAN e ISKANDER (2013).

Produto	Faixa de Índice de refração	Concentração (g/100 ml de água)	Observações
Sucralose	1,333-1,426	75	Sucralose
<i>Saccharin</i> (Sacarina)	1,333-1,452	100	Alta concentração leva a perda de transparência
Stevia (sweetener)	1,333-1,400	125	Alta concentração leva a precipitação do soluto
Açúcar de Cana	1,333-1,4664	205	Alta concentração leva a precipitação do açúcar
Sucrose	1,333-1,503	198,5	O índice de refração do produto como fornecido é de IR=1,458
<i>Low Color Sucrose</i>	1,333-1,503	-	O índice de refração do produto como fornecido é de IR=1,458

A utilização de solo transparente à base de sacarose possui vantagens, porém, apresenta a limitação de ter alta viscosidade, inibindo seu uso em vários problemas geotécnicos.

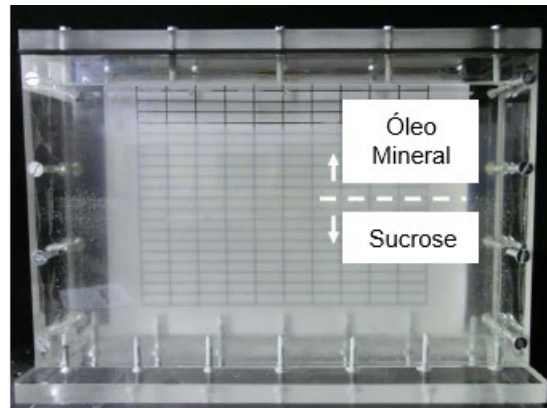


Figura 31 - Transparência obtida com o solo transparente com low color sucrose vista ao fundo com um alvo oftalmológico, GUZMAN *et al.* (2014).

Recentemente, CARVALHO *et al.* (2015) propuseram um terceiro poro fluido à base de água e iodeto de sódio tratado com tiosulfeto de sódio. A Figura 32 apresenta uma amostra deste tipo de solo transparente composto por quartzo fundido e iodeto de sódio, dentro de um container com uma profundidade de 50mm.



Figura 32 - Logotipo do grupo de geotecnologia da NYU visto a 50 mm de espessura em um container com solo transparente composto de quartzo fundido e solução de água com iodeto de sódio tratado com tiosulfato de sódio, (CARVALHO, 2015).

As propriedades estáticas e dinâmicas dos solos transparentes, constituídos por quartzo fundido, são semelhantes à areia angular natural (GUZMAN *et al.*, 2014, CAO *et al.* 2011). A Figura 33 mostra a resposta mecânica do quartzo fundido em um ensaio de compressão triaxial.

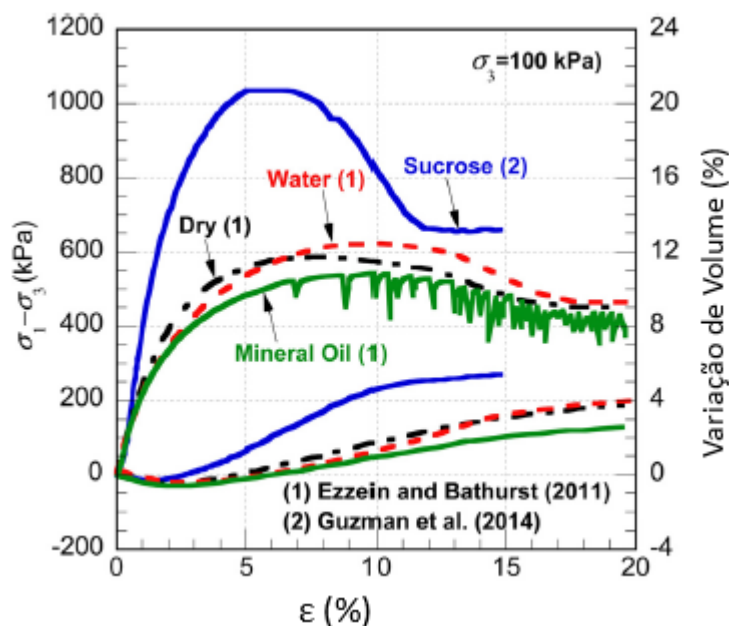


Figura 33 - Resposta mecânica do quartzo fundido em um ensaio de compressão triaxial, adaptado de ISKANDER *et al.* (2015).

Além disso, o quartzo fundido tem composição química, estrutura, forma e características semelhantes às das areias naturais. Diversos estudos recentes utilizaram solos transparentes de quartzo fundido para avaliar a resposta do solo e de rochas em modelos reduzidos de problemas geotécnicos, conforme exibido na Tabela 7.

Tabela 7 - Aplicações do Quartzo Fundido para modelagem de areias

Aplicações	Referências
Arrancamento de estacas	KONG <i>et al.</i> (2015)
Penetração rápida de projétil em meios granulares	CHEN <i>et al.</i> (2014); OMIDVAR <i>et al.</i> (2015); OMIDVAR <i>et al.</i> (2017)
Interações solo-geogrelha	EZZEIN e BATHURST (2014); BATHURST e EZZEIN (2015); FERREIRA e ZORNBERG (2015); PENG e ZORNBERG (2017)
Propagação de argamassa	SUI <i>et al.</i> (2015)
Metodologia para imagem ótica de distribuição NAPL 3D em Mídia Porosa Transparente	KASHUK <i>et al.</i> (2015)
Caracterização do solo transparente utilizado em experimentos de transporte de calor	SIEMENS <i>et al.</i> (2015)
Solos não saturados	SIEMENS E BEDDOE (2017)
Módulo de cisalhamento	KONG <i>et al.</i> (2016)
Areia movediça	GAO e SUI (2017)
Método experimental para modelagem física geotécnica	QI <i>et al.</i> (2018)
Processo executivo de estacas	YIN <i>et al.</i> (2017)

2.4.2.5 Laponita

A quinta família de solo transparente é constituída de Laponite que conta com propriedades semelhantes aos hidrogéis, como descrito por WALLANCE e RUTHERFORD (2015). A Laponita é recomendada para a modelagem de argilas marinhas e é mostrada na Figura 34.

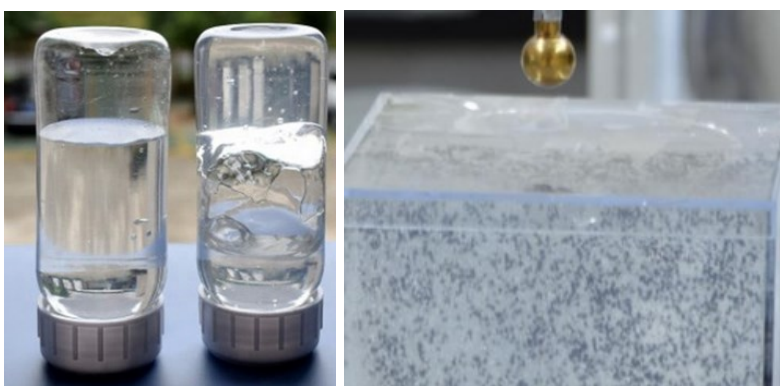


Figura 34 – Ilustração da Laponita utilizada como solo transparente, (Fonte: NYU.EDU, 2020).

Acrescenta-se, que existem poucos trabalhos utilizando a Laponita quando comparada com os outros materiais usados na fabricação de solos transparentes. Cita-se os estudos realizados por WALLANCE e RUTHERFORD (2015) e JATAV e JOSHI (2014), que investigaram as propriedades geotécnicas da Laponita, e o trabalho de CHINI *et al.* 2015, que investigou as superfícies de ruptura produzidas por quatro dispositivos de medição *in situ* de resistência ao cisalhamento.

2.4.2.6 Gelita transparente

A sexta família de solos transparentes é composta pela Gelita. Segundo HAKHAMANESHI *et al.* (2016), a Gelita tem sido amplamente aplicada na área médica, para simular o tecido humano, e no campo da mecânica, para testes balísticos. Na engenharia Geotécnica a Gelita pode ser utilizada para modelar o solo de grão fino (HAKHAMANESHI *et al.* 2016),

A Gelita é constituída principalmente colágeno e, quando misturada com água ocorre a formação de moléculas de proteínas e hidrogênios. Portanto, a Gelita para simular argila é misturada com água, tornando a técnica mais fácil de ser usada, menos custosa e mais sustentável. Porém, as ligações proteicas da

Gelita podem sofrer alterações na sua estrutura, devido a fatores externos como carga, calor e adição de ácidos, bases e solventes. É válido ressaltar que as propriedades e a transparência da Gelita dependem do seu índice de mistura com a água. A Figura 35 exibe a Gelita seca.



Figura 35- Pó de Gelita. (Hakhamaneshi *et al.*, 2016)

HAKHAMANESHI e BLACK (2016) estudaram a possibilidade de utilizar a Gelita como um meio transparente para modelar solos argilosos. Para tal, realizou-se uma série de ensaios de palheta para caracterizar a resistência ao cisalhamento da Gelita Transparente. Prepararam-se amostras de diferentes concentrações de Gelita (5% a 20%) em água e os ensaios foram realizados em diferentes profundidades para estudar o efeito da sobrecarga na a resistência ao cisalhamento.

Os resultados, mostrados na Figura 36, apresentam a resistência ao cisalhamento de pico, definida no primeiro ensaio de palheta, e a resistência residual, determinada em ensaios secundários de palheta. Além da resistência ao cisalhamento, apresenta a sensibilidade da Gelita, definida como a relação entre a resistência de pico e a resistência residual.

Observa-se que as amostras, praticamente, não mostram degradação da resistência ao cisalhamento até 5 dias à temperatura ambiente. Posteriormente, as amostras sofrem degradação sendo mais acentuada em amostras de concentrações de 10 a 15% de Gelita em água. Com exceção da amostra com 20% de concentração de Gelita em água, o pico de resistência ao cisalhamento medido a 90 mm e 50 mm de profundidade são praticamente idênticos. Em relação à sensibilidade, as amostras diminuem a sensibilidade com o aumento da concentração de Gelita na mistura.

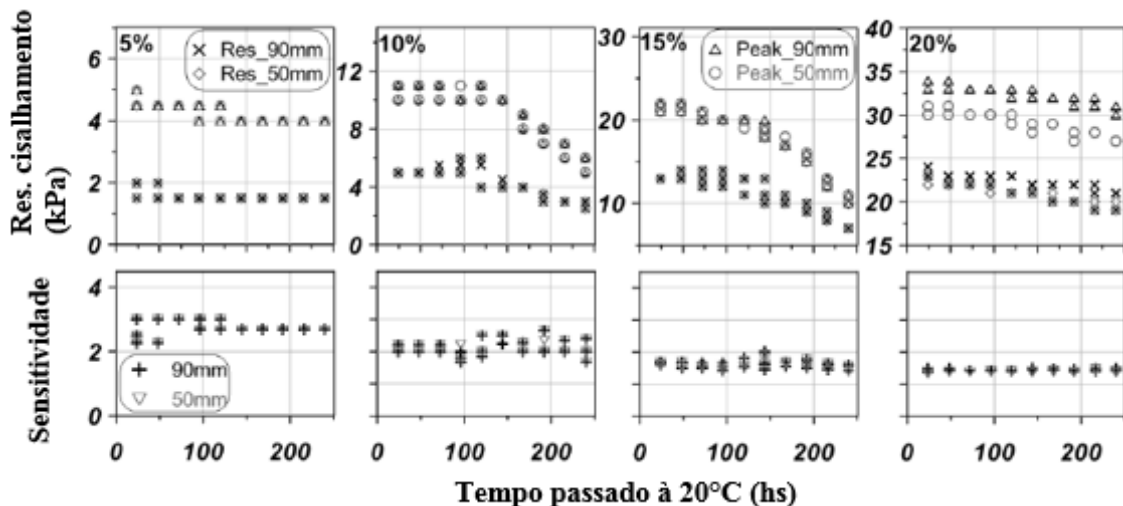


Figura 36 –Ensaio de palheta em temperatura ambiente de 20°C para concentrações de 5%, 10%, 15% e 20% de Gelita, HAKHAMANESHI *et al.* (2016).

A resistência ao cisalhamento obtida pelos ensaios com palhetas de mão é representativa de solos argilosos naturais, que apresentam baixa resistência ao cisalhamento para amostras de concentração igual a 10% e média para concentrações iguais a 15% a 20% de Gelita em água.

Os autores também realizaram ensaios de cisalhamento direto para completar os ensaios de palhetas. Nestes testes os efeitos do confinamento, OCR, concentrações das misturas, velocidade de carregamento da amostra e remoldagem das amostras foram estudadas. Os resultados mostraram que as amostras de maior concentração de Gelita na mistura, sob confinamentos semelhantes, exibem maior resistência ao cisalhamento e se dilatam mais. Em geral, este comportamento observado na Gelita é um padrão semelhante ao esperado no solo; amostras com maior concentração de Gelitia (densas) sofrem dilatação e apresentam maior resistência ao cisalhamento, enquanto, que amostras fofas sofrem contração e exibem uma menor resistência ao cisalhamento.

Em relação ao efeito da velocidade de carregamento na amostra, os resultados indicam que, quanto mais rápido é o carregamento mais elevada é a resistência ao cisalhamento. Isto pode estar associado às forças externas necessárias para quebrar as ligações a taxas de carregamento mais elevadas.

Quanto ao efeito do histórico de carregamento (OCR), verificou-se que, amostras sem carregamento prévio apresentaram uma maior resistência ao cisalhamento. Este comportamento pode estar associado ao fato de que o carregamento externo pode levar à desnaturação das ligações proteicas induzindo a uma menor resistência durante o carregamento. Os resultados para reutilização das amostras de Gelita mostram que, à medida que as amostras de derretem e sofrem desnaturação, perdem força sendo mais acentuada em amostras de maior concentração de Gelita.

Destaca-se que a Gelita utilizada como solo transparente é recente, e ainda não se tem registros de aplicações da Gelita em modelos físicos de problemas geotécnicos. Portanto, para enfatizar o potencial do material para simulações de argila, detalhou-se o trabalho de HAKHAMANESHI *et al.* (2016), que investigou se as propriedades da Gelita são similares dos solos de grão fino.

2.4.3 Teses de doutorado utilizando solos transparentes

Nota-se que a técnica de solos transparentes vem experimentando grande aceitação para modelagem física geotécnica. Um amplo número de teses de doutorado sobre solos transparentes e suas aplicações foram realizadas. Portanto, através das teses de doutorado, listadas na Tabela 8, é possível obter maiores detalhes sobre as diferentes famílias de solos transparentes e sobre todo aparato experimental necessário para a aplicação da técnica.

Tabela 8 – Lista de teses de doutorado internacionais utilizando solos transparentes, Parte 1.

Ano	Autor	Universidade	Assunto
1998	WELKER, A.	Univ. do Texas em Austin	Remediação de solos contaminados
1999	GILL, D.	Univ. de Dublin	Investigações experimentais e teóricas da instalação de estacas em argila
2000	SADEK, S.	Univ. de Nova York	Interação estrutura solo em solos transparentes usando DIC
2002	MCKELVEY	Queen's Univ. Belfast	Desempenho das fundações reforçadas com colunas de brita em solo mole
2003	LIU, J.	Univ. de Nova York	Visualização de deformações em 3D utilizando modelos de solo transparente
2007	ZHAO, H.	Univ. Missouri-Rolla	Desenvolvimento e avaliação de solo transparente utilizando o PIV em interação dinâmica solo-estrutura
2008	SONG, Z.	Univ. Curtin	Comportamento no arrancamento de âncoras de placa de sucção embutidas em argila

Tabela 8 – Lista de teses de doutorado internacionais utilizando solos transparentes, Parte 2.

Ano	Autor	Universidade	Assunto
2009	TABE, K.	Univ. de Nova York	Aquabeads para modelar o comportamento geotécnico de solos naturais
2011	AHMED, M.	Univ. de Nova York	Investigação da estabilidade da face do túnel e dos movimentos do solo utilizando modelos de solo transparente
2011	STANIER, S.	Univ. Sheffield	Modelando o comportamento de estacas de helicoidais
2011	XU, G.	China Univ. of Mining & Technology	Pesquisa sobre o mecanismo e a lei de evolução da deformação e fraturas de rochas em torno de túneis profundos
2013	FERREIRA, J.	Univ. do Texas em Austin	Avaliação da interação solo-geogrelha em utilizando testes de arrancamento e solo transparente
2014	GUZMAN, I.	Univ. de Nova York	Desenvolvimento de um solo transparente para simulação de penetração de projéteis em materiais granulares
2014	KASHUK, S.	Univ. de Nova York.	Espaço de cor ideal para a reconstrução do transporte de contaminantes em solos transparentes
2014	LIN, Z.	China Univ. of Mining & Tech.	Estudo sobre os mecanismos de deformação-fratura da massa rochosa profunda
2014	EZZEIN, F.	Cólegio Militar do Canadá	Investigação da interação solo-geogrelha utilizando um novo aparelho de teste de arrancamento e solo granular transparente
2014	KELLY, P.	Univ. Sheffield	Interação da estrutura do solo e mecânica de grupos de fundações vibrantes de colunas de pedra
2015	CARVALHO, T.	Univ. Est. do Norte Fluminense UENF	Propriedades dos solos transparentes e técnicas de correlação digital de imagens para aplicação em modelagem física geotécnica.
2015	OMIDVAR, M.	New York Univ. NYU	Investigação de Penetração Rápida de Projétil em meios granulares.
2016	CHEN, Z.	New York Univ. NYU	Técnicas de imagem avançada para o estudo de problemas de interação solo estrutura.

2.4.4 Técnicas de Medição com o uso de Solos Transparentes

A grande vantagem da utilização da técnica de solos transparentes é a possibilidade da visualização do deslocamento do solo no interior do modelo físico reduzido sem a necessidade de incorporação de sensores.

Como será exposto nos próximos itens, existem duas principais técnicas não intrusivas que podem ser empregadas para visualização do campo de deslocamento em modelos reduzidos quando se utilizam solos transparentes. As técnicas são a *interferometria Speckle* e a técnica da camada opaca.

2.4.4.1 Interferometria Speckle

A técnica de *interferometria speckle* consiste em uma metodologia de alta precisão para as medições de deformação.

O aparato experimental da metodologia compreende uma câmera para aquisição das imagens, um *laser* com capacidade suficiente de cortar óticamente o modelo, uma lente cilíndrica utilizada para transformar o feixe de *laser* em um plano de *laser* e um computador para o processamento das imagens. Ao longo dos ensaios, o corte ótico gera o efeito *speckle* na seção de interesse, as imagens são capturadas com o auxílio de uma câmera e, posteriormente são processadas, como esquematizado na Figura 37.

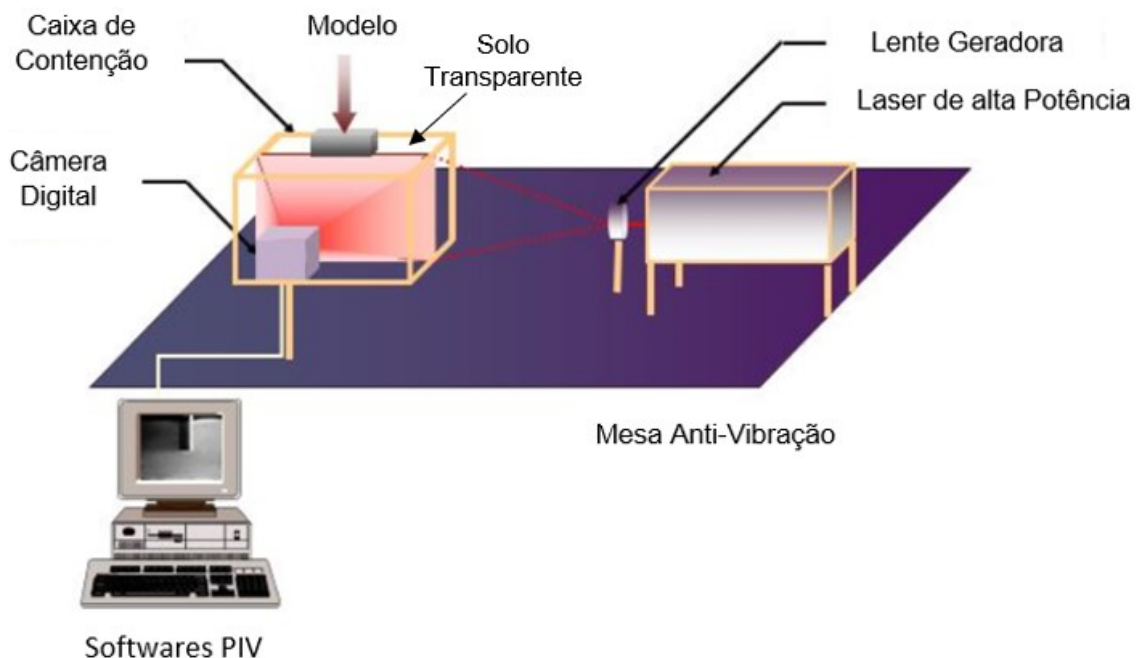
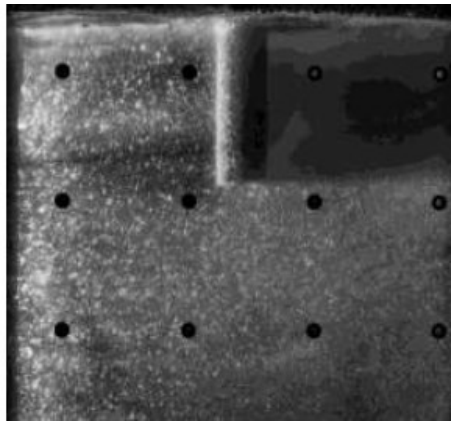


Figura 37 - Esquema da técnica de interferometria speckle em solos transparentes.

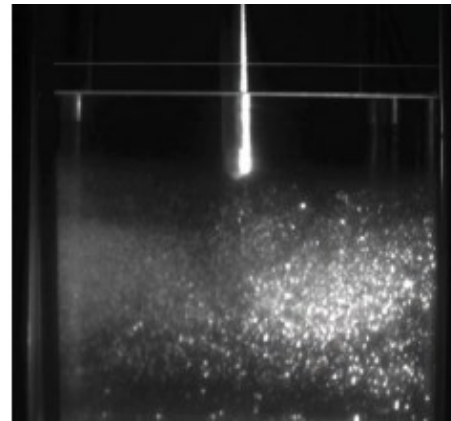
O efeito *speckle* é a interação entre o material granular do solo transparente, impurezas, ar aprisionado e o laser, conforme é mostrado no modelo da Figura 38.

O modelo apresentado na Figura 38 a é constituído por um solo transparente de pó de sílica amorfa misturado com óleos de mesmo índice de refração da sílica amorfa. E, o modelo apresentado da Figura 38b é composto por sílica granular e óleos.

Segundo ISKANDER *et al.* (2002a), as propriedades do *speckle*, geralmente, dependem tanto da rugosidade, quanto da refletividade das superfícies da caixa teste.



(a) Sílica Amorfa (KELLY, 2014)



(b) Sílica granular (ZHOU *et al.*, 2017)

Figura 38 – Padrão speckle de solo transparente

Na Figura 39 é possível visualizar o momento que o feixe de luz *laser* corta óticamente o modelo para serem capturadas as fotos pela câmera digital.

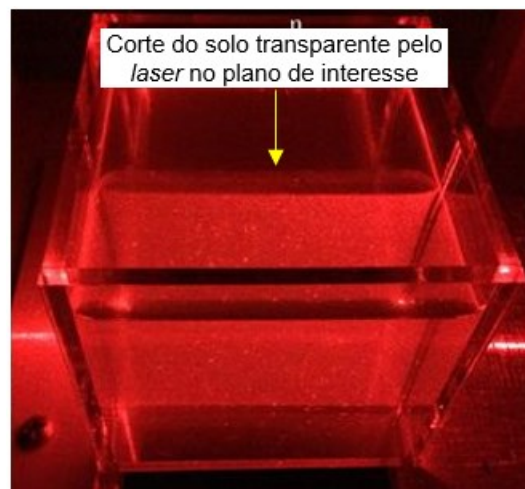


Figura 39- Corte ótico do modelo em solo transparente por meio do laser para aquisição de imagens, SADEK e ISKANDER (2010).

A técnica vem sendo utilizada sistematicamente em modelos reduzidos com solos transparente. LIU e ISKANDER (2010) aplicaram a técnica de interferometria em modelos reduzidos de sapatas para analisar as deformações do solo transparente, constituído de sílica gel. Os autores puderam concluir que os campos de deslocamento em 2D obtidos do solo transparente são consistentes com a literatura e que a técnica de interferometria se mostra adequada para modelar problema de engenharia geotécnica. Posteriormente,

LIU *et al.* (2015) também utilizaram a técnica de interferometria para visualização da deformação do maciço devido a penetração da argamassa no solo transparente, conforme apresenta a Figura 40. O solo transparente usado, por LIU *et al.* (2015), foi feito de sílica fundida e uma solução de brometo de cálcio com o mesmo índice de refração.

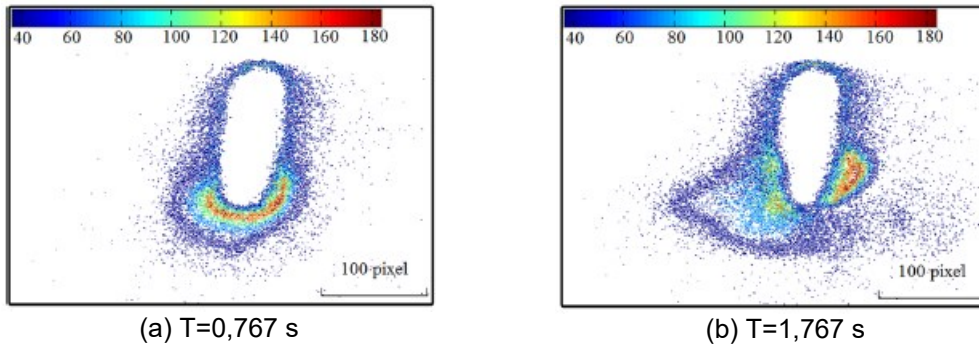


Figura 40 - Série de imagens interpretadas durante um ensaio de penetração de argamassa em solo transparente, LIU *et al.* (2015).

2.4.4.2 Técnica da camada opaca (embedded plane)

A técnica de medição de deformações com o uso de solos transparentes até então descrita consiste em cortar opticamente o modelo utilizando um plano de luz *laser*. Uma outra técnica utilizada, normalmente empregada em fenômenos geotécnicos dinâmicos, como por exemplo a penetração de projéteis em meio granular, é denominada técnica da camada opaca.

Essa técnica foi introduzida por OMIDVAR *et al.* (2015) e consiste em incorporar fisicamente um plano no interior da amostra de solo transparente constituído de partículas quartzo fundido tingidas com tinta negra não metálica para evitar qualquer tipo de refletância (Figura 41).

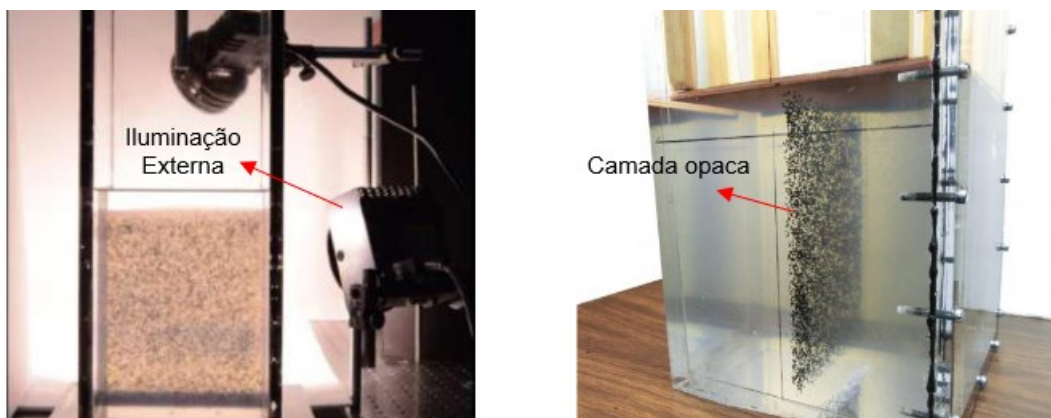


Figura 41 - Técnica da camada opaca, OMIDVAR *et al.* (2015).

Nesta metodologia utiliza-se uma fonte de luz de tungstênio para iluminar a amostra, e assim facilitar a detecção do deslocamento das partículas de quartzo fundido tingidas com tinta negra. Segundo OMIDVAR *et al.* (2015) múltiplos fatores influenciam o planejamento do sistema, como por exemplo: eliminação de vibrações; a necessidade de grande quantidade e uniformidade de luz, e a sensibilidade à temperatura de solos transparentes.

2.4.5 Técnicas de Processamento e Análise de Imagens

Na modelagem física de problemas geotécnicos utilizando solos transparentes é necessário a aquisição de imagens ao longo do ensaio, e por fim faz-se a análise das imagens. A interpretação das imagens, normalmente, é realizada por técnicas de comparação de imagens (por exemplo, ISKANDER e LIU 2010, NI *et al.*, 2010; STANIER *et al.* 2012). A ferramenta mais comum utilizada é a correlação digital de imagens (DIC).

Na mecânica de fluidos, as técnicas de correlação digital de imagens são conhecidas como velocimetria de imagem de partículas (PIV), pois a técnica é normalmente empregada para medir a velocidade das partículas no modelo. Na mecânica dos sólidos é referida como análise de deslocamento de superfície (DAS). O DIC é utilizado em diversos campos da engenharia geotécnica, por exemplo, para estudar o comportamento de um aterro ferroviário utilizando solo transparente, conforme mostrado na Figura 42 (GUZMAN e ALFARO, 2016).

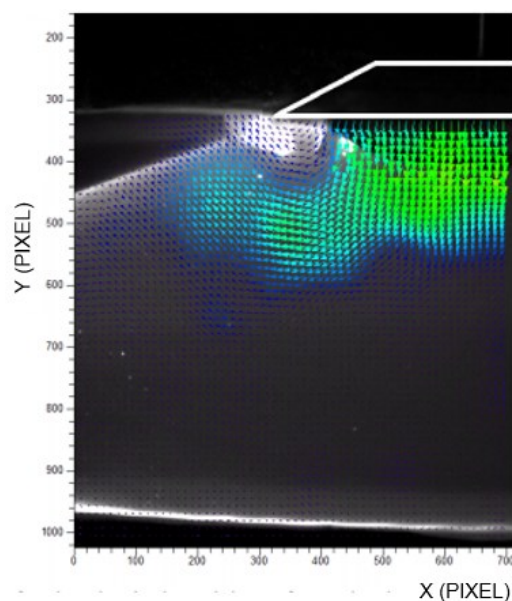


Figura 42 - Resultado Típico de uma análise DIC (GUZMAN e ALFARO, 2016).

Antes de descrever os passos de uma análise DIC é fundamental definir o que é *pixel*. *Pixel* é um elemento individual que compõem uma imagem digital. O valor numérico de cada *pixel* representa a sua intensidade de cor em uma escala de tons de cinza, conforme a Figura 43. Isto é distribuído da seguinte maneira: para *pixels* cujo valor equivale ao preto o nível de cinza é zero e para *pixels* cujo valor equivale ao branco o nível de cinza é 255. Dessa forma, o conjunto de *pixels* da imagem compõem uma matriz numérica.



Figura 43 - Escala de cinza típica de 8 bits.

Neste sentido, para aplicação da técnica DIC, de modo geral, o primeiro passo é especificar a região de interesse na imagem de referência e dividir por uma grade virtual (Figura 44). Posteriormente, é realizado o rastreamento dos *pixels* entre as duas imagens, uma registrada antes e outra após a deformação. Para definir o deslocamento de um ponto P da grade virtual, um subconjunto de referência quadrada de pixels centrada no ponto $P(x_0, y_0)$ a partir da imagem de referência é escolhido (região quadrada em azul na Figura 44) e usado para rastrear sua localização correspondente na imagem deformada.

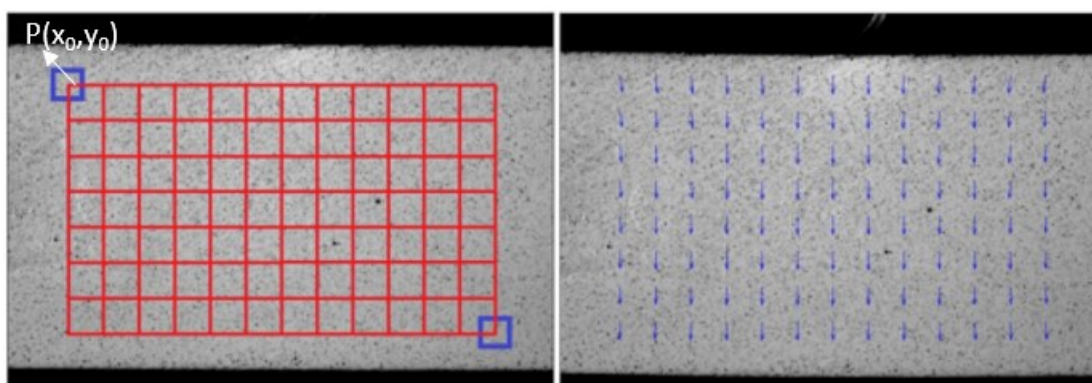


Figura 44 - Grade virtual sobre a imagem de referência e o campo de deslocamento nos pontos da grade.

A escolha de um subconjunto quadrado de pixels, ao invés de um pixel individual, para obter a correlação entre as imagens, se deve ao fato de que o subconjunto apresenta uma maior variação nos níveis de cinza, podendo ser identificado de

outros subgrupos com maior facilidade. Por fim, os campos de deslocamento são calculados comparando esses subconjuntos das imagens.

O processo matemático para determinar os campos de deslocamento desses subconjuntos da imagem abrange a escolha de um critério de correlação. Assim, a correlação digital de imagem básica utiliza como critério: a correlação cruzada discreta (DCC), diferente da correlação digital de imagens avançadas que utiliza outros critérios de função de correlação: *zero-mean normalized cross correlation (ZNCC)*; *zero-mean normalized sum of squared difference (ZNSSD)* e *symmetric phase-only cross correlation (SPOCC)*.

A seguir é exposto o conceito da correlação digital de imagens básica e da correlação digital de imagens avançada.

2.4.5.1 Correlação Digital de Imagens Básica

A correlação digital de imagens básica utiliza como critério a correlação cruzada discreta (DCC) que é a função de correlação pioneira desenvolvida, sendo utilizada em alguns softwares e tem características importantes, por exemplo: o tamanho da janela de interrogação fixa. Esta função é considerada de primeira geração e pode ocasionar erros significativos na estimativa de deslocamento entre duas imagens. A função de correlação é apresentada na Equação (4):

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n)g(m + \Delta x, n + \Delta y) \quad (4)$$

onde, M e N são as dimensões da imagem de interrogação, m e n são duas variáveis e f e g são as intensidades de cinza de duas imagens que estão sendo analisadas. A função de correlação é aplicada repetidamente, enquanto as imagens são registradas após umas series de movimentos de Δx na direção x e Δy na direção y .

A Figura 45 ilustra esquematicamente os passos necessários para alcançar uma análise por meio da técnica de Correlação Digital de Imagens Básica (DIC).

Observa-se no esquema (Figura 45) que o primeiro passo é seleccionar duas imagens, uma registrada antes (Imagem A da Figura 45) e outra após a

deformação (Imagem B da Figura 45) e subdividir as imagens em janelas de interrogação.

Posteriormente, as imagens são analisadas para a localização do pico da função de correlação que determina a localização da melhor correspondência entre as duas imagens. Assim, através do pico da função é obtido a magnitude e à direção do movimento sendo representado por um vetor de deslocamento em cada subjanela.

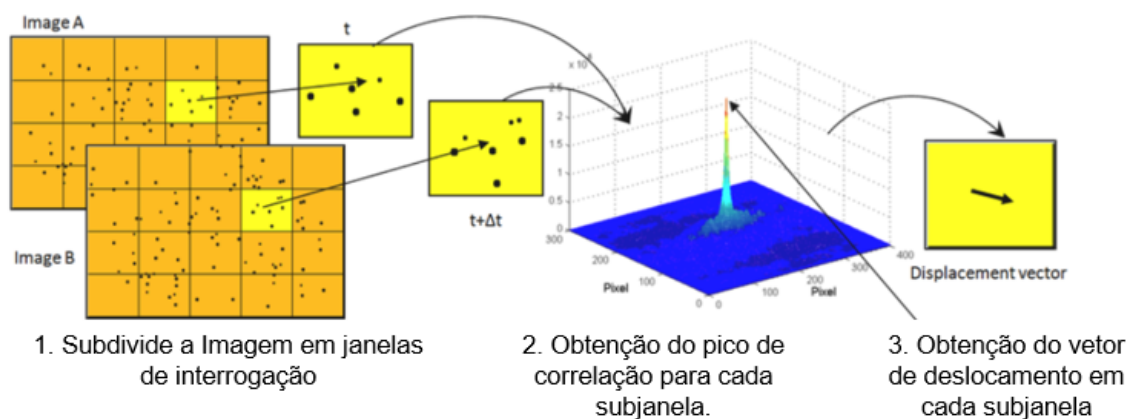


Figura 45 - Etapas da correlação digital de imagens (DIC).

As etapas principais do DIC são ilustradas na Figura 45, onde a obtenção do pico de correlação é feita utilizando a função de correlação expressa na Equação 4. O pico da função de correlação cruzada representa o movimento comparativo entre as duas imagens. O deslocamento sucessivo pode ser encontrado correlacionando imagens sucessivas e localizando os picos. Se toda a área da imagem for dividida em muitas pequenas janelas de interrogação, todo o campo de deslocamento poderá ser obtido calculando o deslocamento em cada janela de interrogação.

2.4.5.2 Correção Digital de Imagens Avançadas

Os erros de correlação do método DIC básico crescem significativamente quando o deslocamento entre duas imagens é relativamente grande. Assim sendo, para aprimorar a acurácia do processo de correlação do método DIC, foi desenvolvido a correlação digital de imagens avançadas. A Figura 46 ilustra um fluxograma de um algoritmo avançado DIC.

A correção digital de imagens avançada utiliza o processo iterativo com *multi grid*, ou seja, as janelas de busca são redimensionadas a cada *step* da iteração, com objetivo de correlacionar pequenos deslocamentos na comparação entre duas imagens com tamanho de janelas variáveis a cada passo da análise. Esta melhoria aumenta, substancialmente, a precisão da análise (CARVALHO, 2015).

Outro artifício da correção digital de imagens avançada é a possibilidade de escolher uma função de correlação entre as várias alternativas existentes. No método DIC básico, utiliza-se, exclusivamente, a função de correlação cruzada (DCC).

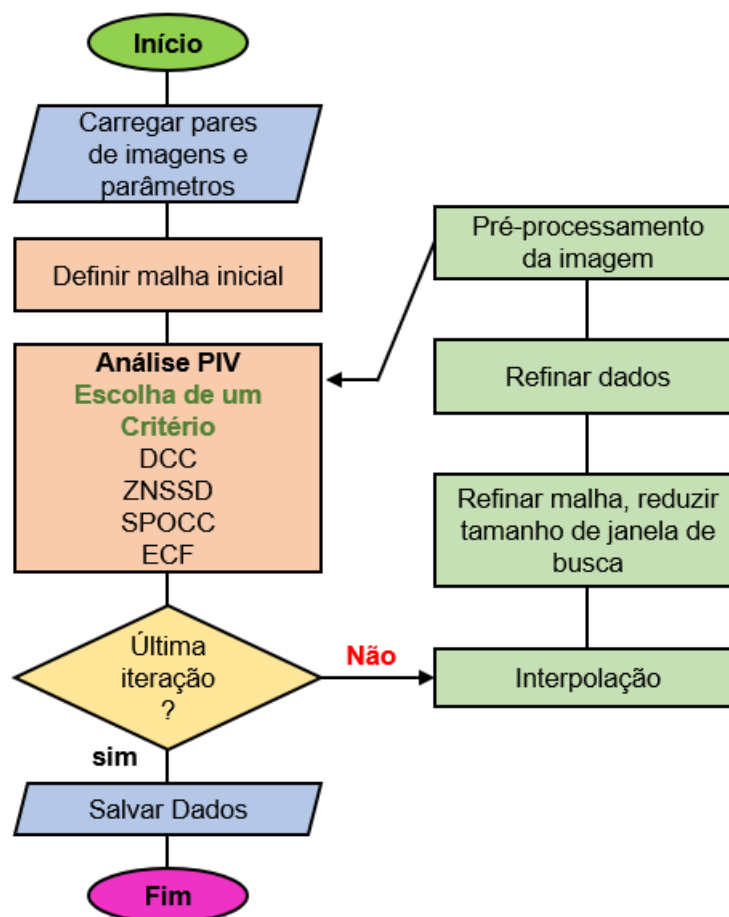


Figura 46- Fluxograma de um algoritmo avançado DIC.

2.4.5.3 Passos Básicos de uma análise DIC

Nesta seção será exposto, resumidamente, os passos necessários para execução da correlação digital de imagens básica e avançada. Ambas possuem praticamente os mesmos passos, diferenciando apenas nos critérios de correlação utilizados e os tamanhos da janela de interrogação.

Registro de imagens

A primeira etapa de uma análise com a técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC) consiste em registrar a sequência de fotos digitais do ensaio. Estas fotos podem ser obtidas tanto por câmeras comerciais clássicas como por câmeras de alta velocidade, que podem atingir 50.000 fotos em apenas um segundo. Na verdade, é possível empregar qualquer ferramenta capaz de obter fotos com a velocidade compatível com a do problema estudado, como, por exemplo, os digitalizadores de imagens (*scanners*) para obter imagens de ensaios.

BECKETT e AUGARDE (2011) realizaram um ensaio para o monitoramento de camadas de solo sendo compactadas, onde um *scanner* de mesa é usado para capturar imagens do material deformado (Figura 47). A velocimetria de partículas de imagem (PIV) é usada para rastrear os movimentos de grupos de partículas no solo.

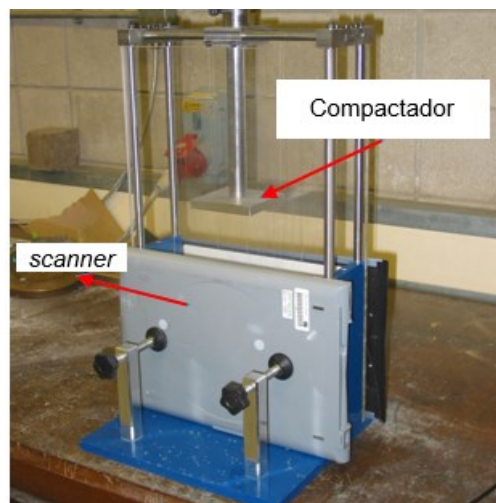


Figura 47 – Ensaio realizado para o monitoramento de camadas de solo sendo compactado utilizando um scanner de mesa, BECKETT e AUGARDE (2011).

Processamento das Imagens

Após a aquisição das imagens, alguns parâmetros necessitam ser previamente determinados. O primeiro parâmetro é o formato da foto registrada. Dos formatos de arquivos de imagens conhecidos, podem-se citar cinco largamente utilizados, os BMP, os TIFF, NEF, RAW e os JPEG. Os formatos BMP, TIFF, NEF e RAW são formatos recomendados, pois as imagens não sofrem nenhuma distorção. Já o formato JPEG, conhecido como formato comprimido, pode alterar

ligeiramente as características de uma imagem. O formato TIFF é o mais aconselhável para que o processamento possa ocorrer da melhor maneira possível.

Depois da definição do formato das imagens, é preciso efetuar procedimentos de tratamento de imagens para reconhecer as partículas e, então, mapear os deslocamentos.

Ao longo do processo de reconhecimento das partículas, cada imagem é melhorada por meio de algoritmos que realizam transformações na matriz numérica que são compostas por um conjunto de *pixels*. Normalmente, são utilizadas rotinas de intensificação do contraste e redução de ruídos, com o objetivo de evitar que imperfeições da imagem sejam erroneamente avaliadas como partículas.

As partículas geralmente apresentam-se como pontos luminosos em meio a um fundo escuro da imagem, portanto, depois do tratamento inicial, é aplicada uma rotina que detecta essa diferença de tonalidade: a binarização. Por fim, os pares de imagens capturadas com um tempo de separação Δt são submetidos a um critério de correlação para a execução da análise.

A escolha do critério de correlação ótima é uma fase importante antes da realização das interpretações dos dados, pois o critério interfere na estimativa dos deslocamentos entre imagens.

Atualmente, existe uma gama de códigos abertos (livres) e comerciais disponíveis para a realização das análises DIC. Para análises de ensaios em solos transparentes, geralmente, se utilizam *softwares* adaptados que visualizam fluxo empregando a velocimetria de partículas por imagens (PIV).

A Tabela 9 mostra uma relação de *softwares* de código aberto e comerciais acessíveis para a análise DIC.

Tabela 9 –Relação e softwares de código aberto e comerciais disponíveis para a análise DIC, Parte 1.

Nome	Código Aberto	Funções Adicionais / Notas	Uso primário
OPEN PIV (TAYLOR <i>et al.</i> 2010)	Sim	Sucessor do URAPIV (Primeiro software usado em análises DIC para solos transparentes)	Dinâmica de fluidos
Geo PIV (WHITE <i>et al.</i> 2003)	Sim	Cálculo de deformações, módulo de calibração de imagens incluso	Mecânica dos solos
GeoMAGIC (ISKANDER <i>et al.</i> 2015)	Sim	Dinâmica em microescala, rastreamento de partículas, DIC Lagrangiano, cálculo de deformações, linguagem MATLAB	Mecânica dos solos
PIV VIEW 2D e 3D (PIVTec)	Não	PIV Avançado (Multi-Grid), ferramentas de processamento de imagens incorporada, calibração de imagens, processamento em lotes de imagens	Dinâmica de fluidos
ProVISION (IDT)	Não	PIV Avançado (Multi-Grid), processamento de imagens incorporada, processamento em lotes de imagens	Mecânica dos solos
MATPIV	Sim	Processamento em lotes de imagens, linguagem MATLAB	Dinâmica de fluidos
Flow Master e Strain Master (LaVisio)	Não	PIV Avançado (Multi-Grid), processamento em lotes de imagens	Dinâmica de fluidos

2.5 Tomografia Computadorizada na Engenharia Geotécnica

A presente pesquisa utiliza a técnica da tomografia computadorizada em testemunhos de solo retirados nas imediações de uma estaca hélice contínua de um caso de obra. Portanto, fez-se necessário uma revisão sobre a técnica.

A tomografia computadorizada de raios-X é uma técnica de investigação não destrutiva que reduz a possibilidade de danificação do solo durante o processo de amostragem, permitindo estudos da estrutura do solo com alta representatividade.

Atualmente, a tomografia computadorizada de raios-X está sendo amplamente utilizada em diferentes aplicações na mecânica dos solos. Entre as aplicações, podem-se citar:

- monitoramento de erosão (DUMBERRY *et al.* 2017);
- avaliação de colunas de brita modeladas em centrifuga geotécnica (MANHÃES *et al.* 2016)

- análise de grão (IKEDA *et al.* 2004; MASAD *et al.* 2005; JERRAM *et al.* 2009; MANAHILOH e MUHUNTHAN 2012; WILLSON *et al.* 2012);
- distribuição 3D de poros (ALSHIBLI *et al.*, 2000a; BRUNKE *et al.* 2007; MANAHILOH *et al.* 2012; SOK *et al.* 2010; WEINEKOETTER 2008);
- comportamento de retenção de água (KHADDOUR *et al.* 2018; MANAHILOH E MEEHAN 2017);
- análise de fluxo (CHEN *et al.* 2009; DANN *et al.* 2011; MANAHILOH 2013; PETCHSINGTO e KARPYN 2009; YU, 2010; WILDENSCHILD e SHEPPARD 2012);
- estudo da deformação sob carregamentos triaxiais (DESRUES *et al.*, 1996; ALSHIBLI *et al.*, 2000b; CHANG *et al.* 2003; HIGO *et al.* 2013);
- monitorar processos químicos (VIGGIANI *et al.* 2014).

2.5.1 Princípios básicos da Tomografia Computadorizada

A tomografia computadorizada emprega os mesmos princípios da radiografia convencional com a finalidade de indicar uma representação anatômica fundamentada na quantidade de atenuação sofrida pela radiação incidente.

Além disso, o nome Tomografia Computadorizada deve-se ao fato dessa técnica ser altamente dependente de computadores para processar todas as informações coletadas durante a realização de ensaios tomográficos.

2.5.2 Aquisição das Imagens

O processo de geração da imagem em tomografia pode ser dividido em três etapas: aquisição de dados, reconstrução e apresentação de imagem (KALENDER, 2006). No processo de aquisição, são coletados, de forma sistemática, dados do material para a produção da imagem. Atualmente, existem dois métodos de aquisição de dados, que são: aquisição axial e aquisição volumétrica (Figura 48).

Na aquisição axial, o tubo de raios X gira ao redor do material a ser tomografado e os dados do primeiro corte são adquiridos. Posteriormente, o movimento do tubo é interrompido e a mesa é arrastada para a posição do corte seguinte. O

segundo corte é obtido. Este é um processo contínuo até que toda a região de interesse seja irradiada.

Na aquisição volumétrica, é empregada raios X com uma geometria helicoidal ou espiral. O tubo de raios X gira de maneira contínua simultaneamente com o deslocamento da mesa (BRINK, 1994). Este método que forma uma imagem por rotação do tubo é conhecido tomografia espiral/helicoidal de corte único. No entanto, para aumentar o volume de cobertura, foi adaptada a tecnologia de cortes múltiplos, onde vários cortes simultâneos são alcançados para cada rotação do tubo de raios X.

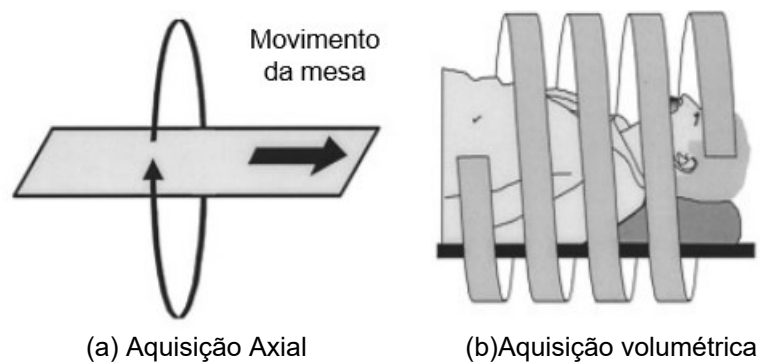


Figura 48 – Tipos de aquisição de dados

Após os fótons atravessarem o material que está localizado no centro de varredura, eles alcançam um conjunto de detectores diametralmente opostos ao tubo de raios X. Os detectores recebem, particularmente, a projeção da seção em um determinado ângulo.

A leitura do detector é proporcional à intensidade do raio, portanto, o sinal gerado no detector é uma medida de atenuação do feixe ao longo do caminho percorrido por ele (Figura 49).

Após obter o conjunto de atenuação em diferentes ângulos de projeção, obtém-se a projeção da imagem. Os dados da projeção são armazenados no computador e a imagem é reconstruída.

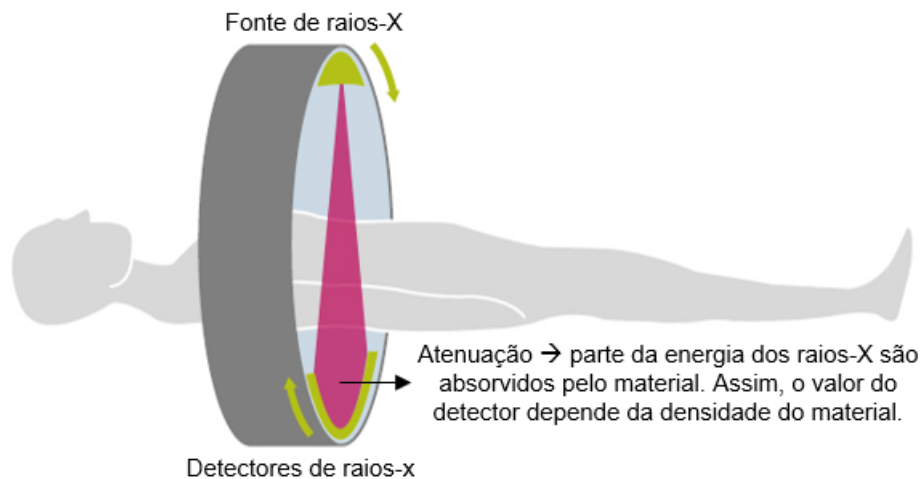


Figura 49 - O princípio da tomografia computadorizada é uma fonte de raios-X e uma unidade detetora rodando sincronizadamente em torno do paciente. Dados são obtidos continuamente durante a rotação.

Segundo HSIEH (2003), quando se visualiza uma imagem de tomografia computadorizada, observa-se vários elementos de volume (*voxels*) da fatia de corte reconstruída. Cada *voxel* é representado pelo menor elemento da imagem (*pixel*), sendo que a altura do *voxel* é a própria espessura de corte. A Figura 50 exibe uma representação dos elementos que compõem uma imagem.

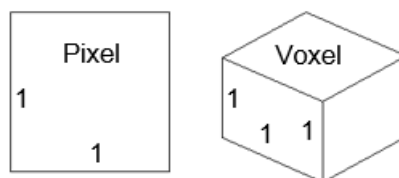


Figura 50 – Elementos que compõem a imagem

2.5.3 Processamento digital de imagens

Após a aquisição das imagens, é necessário partir para a etapa do processamento digital de imagens para obtenção dos resultados. A etapa do processamento digital de imagens inclui os seguintes processos: tratamento das imagens, ajustes do histograma e segmentação.

O tratamento das imagens consiste em um pré-processamento que serve para melhorar a imagem, corrigindo algum defeito proveniente de sua aquisição e/ou realçando detalhes importantes para as próximas etapas sejam bem-sucedidas (GOMES, 2001).

Os ajustes do histograma equivalem em fazer alterações nos histogramas para que ele tenha condições ideais de contraste e brilho. O histograma consiste na intensidade dos *pixels* para 256 tons no eixo horizontal e, no eixo vertical, a probabilidade de ocorrência dos tons de cinza na imagem (GONZALEZ e WOODS, 2002).

A Figura 51 apresenta quatro tipos básicos de imagens em tons de cinza. A Figura 51a, corresponde a uma imagem com características predominantemente escuras, pois os níveis de cinza estão concentrados em direção à extremidade escura do histograma.

Por sua vez, a imagem da Figura 51b exibe um histograma que corresponde a uma imagem com muito brilho, pois contém pixels concentrados na região de níveis com maiores intensidades. O histograma da Figura 51c corresponde a uma imagem de baixo contraste, pois o histograma é estreito.

Por fim, a Figura 51d ilustra um histograma de melhor interpretação, pois revela um espalhamento significativo, causado por condições de contraste e brilho ideais.

O histograma tem papel importante na etapa de segmentação, visto que os picos de intensidade correspondem às fases presentes, permitindo a separação e/ou quantificação de cada uma delas (IGLESIAS, 2008).

A segmentação consiste em decompor o domínio da imagem, segundo um critério, em regiões distintas para ser possível realizar um estudo numérico ou quantificar informações obtidas nas imagens. Segundo, FARIA (2010) a segmentação de imagem tem um papel crucial na extração de informação e atributos da imagem.

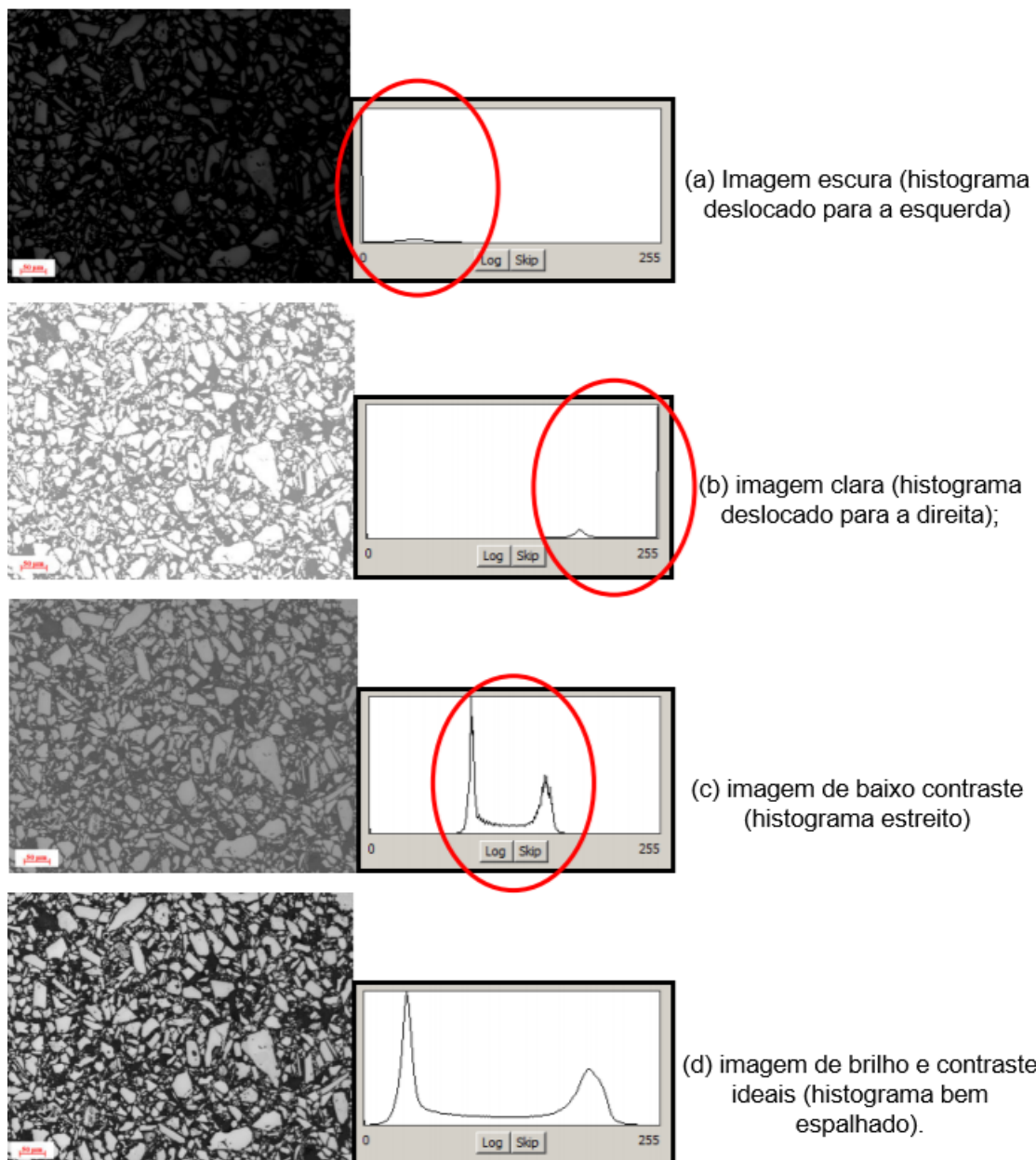


Figura 51 - Histogramas correspondentes a quatro tipos básicos de imagens.

2.5.4 Utilização de métodos clássicos e da Tomografia Computadorizada de Raios-X para determinar o índice de vazios do solo

O solo é um sistema de partículas, ou seja, é inerentemente "multifásico" contendo três fases: sólido, líquido e gás e uma das relações importantes, relacionando os volumes dessas fases, é o índice de vazios (LAMBE e WHITMAN, 1969). Atualmente, existem diferentes técnicas de determinar a variação de índice de vazios no solo, conforme é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Técnicas para determinação dos índices de vazios

Técnica	Observações	Aplicações na Engenharia Geotécnica
Correlações com peso específico real dos grãos e peso específico seco	<p>Pode-se determinar os índices de vazios através da seguinte equação:</p> $e = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d}\right) - 1$ <p>sendo o peso específico dos grãos (γ_s) determinado através da NBR 6508; o peso específico seco (γ_d) determinado através do teor de umidade (NBR 6457) e peso específico natural (NBR 09813). Esse método é conhecido como método convencional</p>	<p>Aplicada constantemente na engenharia: ensaios de caracterização; adensamento; compactação.</p>
Correlações com N_{spt}	<p>Pode-se determinar o índice de vazios através da seguinte equação:</p> $DR = \frac{e_{max} - e_i}{e_{max} - e_{min}}$ <p>sendo a densidade relativa (DR) determinada através de correlação do N_{spt} do solo, e os índices de vazios máximo (e_{max}) e mínimo (e_{min}) determinados conforme a NBR 12051 e NBR 12004, respectivamente.</p>	<p>Aplicado raramente para determinar índices de vazios dos solos. Geralmente, utiliza-se as correlações com N_{spt} para determinar a densidade relativa do solo, por ser um parâmetro determinante para o comportamento do solo no cisalhamento.</p>
Tomografia Computadorizada de Raios-X	<p>Para a interpretação utiliza-se o processamento digital de imagens</p>	<p>Normalmente, utilizada para análises de solos de difícil amostragem e em ambientes laboratoriais de pesquisa.</p>

2.5.4.1 Índice de vazios Detectável nas Imagens da Tomografia Computadorizada

A tomografia computadorizada tem sido adaptada para a quantificação da estrutura do solo. O método baseia-se no diferencial de atenuação que muda de acordo com a composição do solo. Assim, os resultados da tomografia fornecem informações sobre a distribuição espacial dos componentes (sólido e vazios ou poros) e sua variabilidade dentro da amostra de solo sob investigação (TAINÁ *et al.* 2013).

A tomografia computadorizada gera dados sobre poros interligados e isolados, forma de distribuição espacial deles e quantificação de porosidade (FARBER *et al.* 2003; VAN GEET *et al.* 2003).

Para a quantificação da porosidade detectável da imagem, faz-se o tratamento das imagens e os ajustes do histograma, quando necessários. Posteriormente, necessita-se fazer a segmentação da imagem, de maneira que seja possível separar a porcentagem sólida e a porcentagem de vazios baseados nas diferenças de atenuação ditas anteriormente (Figura 52). A função “*Analyze Particles*”, do *software Imagej*, quantifica objetos de imagens binárias, gerando dados quantitativos do tamanho, forma e orientação dos vazios (poros) em cada fatia (DOWUONA *et al.* 2009; TAINA *et al.* 2013).

O procedimento de segmentação com a finalidade de identificar os vazios do solo é importante. Pois, na fase de segmentação é possível diminuir ou adicionar o espaço poroso e descaracterizar ou inventar uma associação entre eles. Ou seja, as propriedades da imagem segmentada resultante são sensíveis as modificações nos parâmetros de segmentação (TAUD, *et al.*, 2005).



Figura 52 – Ilustrações de imagens segmentadas de colunas de brita modeladas em centrífuga geotécnica, MANHÃES *et al.* 2016.

Destaca-se que os resultados da tomográfica computadorizada estão acoplados aos parâmetros instrumentais que influenciam a resolução espectral e radiométrica dos dados, bem como sobre a interpretação e os parâmetros utilizados ao longo das fases de processamento. Desta maneira, os poros e os sólidos da imagem segmentada podem ser considerados como representações da amostra de solo. Às vezes, não são incluídos nos valores da porosidade total vazios menores do que o tamanho de *voxel* da imagem final (DOWUONA *et al.* 2009).

2.6 Considerações com base na Revisão Bibliográfica

A partir da revisão bibliográfica, é possível destacar as seguintes conclusões:

- i. Estacas do tipo hélice contínua estão sendo cada vez mais utilizadas para suportar diferentes estruturas em todo mundo.
- ii. O estudo na engenharia de fundações em estacas hélice contínua é geralmente utilizado como metodologia casos de obras, interpretação de provas de carga e instrumentação de estacas ao longo do seu comprimento.
- iii. Vários estudos já foram realizados sobre a criação de modelos de estacas em escala reduzida e, sob o prisma qualitativo, são considerados estudos representativos do comportamento de fundações.
- iv. Os estudos anteriores utilizando modelos físicos de estacas hélice contínua não realizaram a medição do deslocamento dentro do maciço de fundação durante a simulação da cravação do trado.
- v. A tomografia computadorizada se mostrou adequada para quantificar a distribuição espacial dos componentes (sólido e vazios) em testemunhos de solo. Dessa forma, torna-se uma ferramenta potencial para o estudo de variação de índices de vazios do solo na envolvente de estacas hélice contínua.
- vi. Para a elaboração de um modelo em escala reduzido é fundamental ter um planejamento cuidadoso das diversas etapas do fenômeno estudado.
- vii. Para a modelagem da etapa de cravação do trado do processo executivo de uma estaca hélice contínua é necessário que a cravação ocorra de maneira automática, pois o controle manual do movimento vertical e do giro do trado é difícil, e pode ser uma fonte de erros.
- viii. Normalmente, os estudos do comportamento de fundações utilizando solos transparentes ocorrem sob a ação da gravidade normal, via modelagem reduzida, e são classificados, segundo o critério de Gomes (1993), como Classe 2. Portanto, apresenta diferentes limitações que impossibilitam a extrapolação dos resultados de ensaio para fundações reais. Fundamentalmente estas restrições se devem ao pequeno nível de tensões impostas nos modelos, e as próprias dimensões do modelo.
- ix. Os resultados gerados por meio de modelos reduzidos em solos transparentes associados a técnicas de processamento digital de imagens fornecem informações importantes sobre o comportamento do

solo e são ferramentas que ajudam nos estudos de vários problemas geotécnicos da atualidade.

- x. A técnica de modelagem física utilizando solos transparentes é nova no Brasil.
- xi. Uma série de fatores estão envolvidos na qualidade de instalação das estacas hélice contínua como: a velocidade de rotação do trado, a velocidade de avanço do trado, o passo do trado, o diâmetro interno da haste oca e o torque imposto ao sistema.
- xii. A etapa mais crítica identificada do processo executivo de estacas do tipo hélice contínua é a etapa de cravação do trado, especialmente em solos sem coesão (THORBURN et al., 1993).
- xiii. O processo de instalação das estacas hélice contínua pode alterar os parâmetros do solo próximo da estaca, como, por exemplo, a densidade na envolvente da estaca, o que pode influenciar significativamente no desempenho final desta.
- xiv. Os trabalhos sobre o transporte de solo entre as hélices do trado, praticamente, não consideram a influência do estado de tensão do solo na ação de corte no processo de cravação do trado em areias. Logo, as conclusões dos trabalhos para serem aplicadas requerem cuidados.

CAPÍTULO 3 - MUDANÇA DE DENSIDADE NO ENTORNO DA ESTACA – CASO OBRA

O processo executivo de estacas do tipo hélice contínua monitorada modifica a morfologia do solo nas imediações do fuste e, conseqüentemente, influencia no mecanismo de interação estaca-solo, o que pode interferir na capacidade de carga final da estaca.

Destaca-se que BORGES *et al.* (2018) afirmam que a mobilização do atrito lateral do fuste da estaca é significativamente influenciada pela variação da morfologia, particularmente, relacionada pelos autores à variação do índice de vazios.

De fato, para maciços arenosos, o parâmetro de interesse, cuja variação pode melhor definir como o processo de interação solo estrutura irá ocorrer, é o índice de vazios, que definirá a densidade relativa.

Determinar a variação do índice de vazios devido ao processo executivo na envolvente da estaca é, portanto, de grande valia para o entendimento dos mecanismos de interação solo estrutura, determinação da capacidade de carga e previsão de recalques.

Para medir como ocorre a variação do índice de vazios no entorno de uma estaca optou-se, inicialmente, nesse trabalho, por se utilizar um caso de obra. Nessa obra são determinadas propriedades do solo tanto nas imediações do fuste quanto nas regiões mais afastadas, que não sofreram interferência da execução da estaca. Posteriormente, os resultados, que são possíveis de serem confrontados com a modelagem física, são discutidos na seção 5.9, na qual discute-se sobre: as vantagens e desvantagens das metodologias utilizadas, a variação do índice de vazios do solo no entorno da estaca e a taxa de cravação ótima.

Portanto, neste capítulo apresenta-se a descrição de um caso de obra e dos procedimentos utilizados para determinação dos parâmetros geotécnicos do solo na envolvente da estaca. Particularmente, para determinação do índice de

vazios, além da técnica convencional, utilizou-se a técnica de tomografia computadorizada de Raios-X. Especificamente, para observação da estrutura granular será apresentada a técnica de resinação do testemunho.

Neste capítulo, ainda, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos. Ressalta-se que a análise dos resultados inclui uma apreciação estatística para facilitar a interpretação dos dados

3.1 Caso de estudo

A obra de estudo está localizada na cidade de Campos dos Goytacazes, RJ, conforme é apresentado na Figura 53. A obra consiste na construção de um edifício, composto por um subsolo possuindo contenções em cortinas com estacas do tipo hélice contínua justapostas. No térreo, encontra-se a garagem, sendo esta estendida também aos dois pavimentos seguintes. Logo acima, localiza-se o pavimento de uso comum e, na sequência, 15 pavimentos tipo. Na última laje está a caixa d'água.

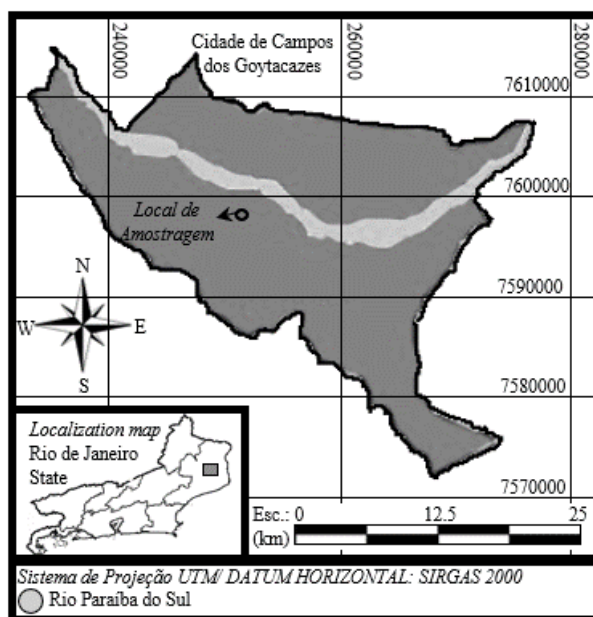


Figura 53 – Localização do caso de estudo.

O edifício possui 52 pilares, partindo das fundações que são constituídas em estacas hélice contínua com diâmetros iguais a 60 mm, 50 mm e 40 mm, comprimento igual a 17 metros. O processo executivo tanto da cravação do trado quanto da concretagem foi monitorado, propiciando, em tempo real, o acompanhamento da introdução do trado e concretagem das estacas. O

monitoramento fornece dados como velocidade de perfuração, profundidade, pressão hidráulica e velocidade de avanço do trado. Com os dados obtidos através de um computador, é possível gerar um perfil estimado de cada estaca executada.

O maciço de fundação do edifício é constituído, fundamentalmente, por solo arenoso o que foi determinado a partir de furos de sondagem à percussão (SPT). A Figura 54 apresenta o perfil estratigráfico com os respectivos índices de resistência a penetração (N_{SPT}) e os dados obtidos com monitoramento da estaca de estudo.

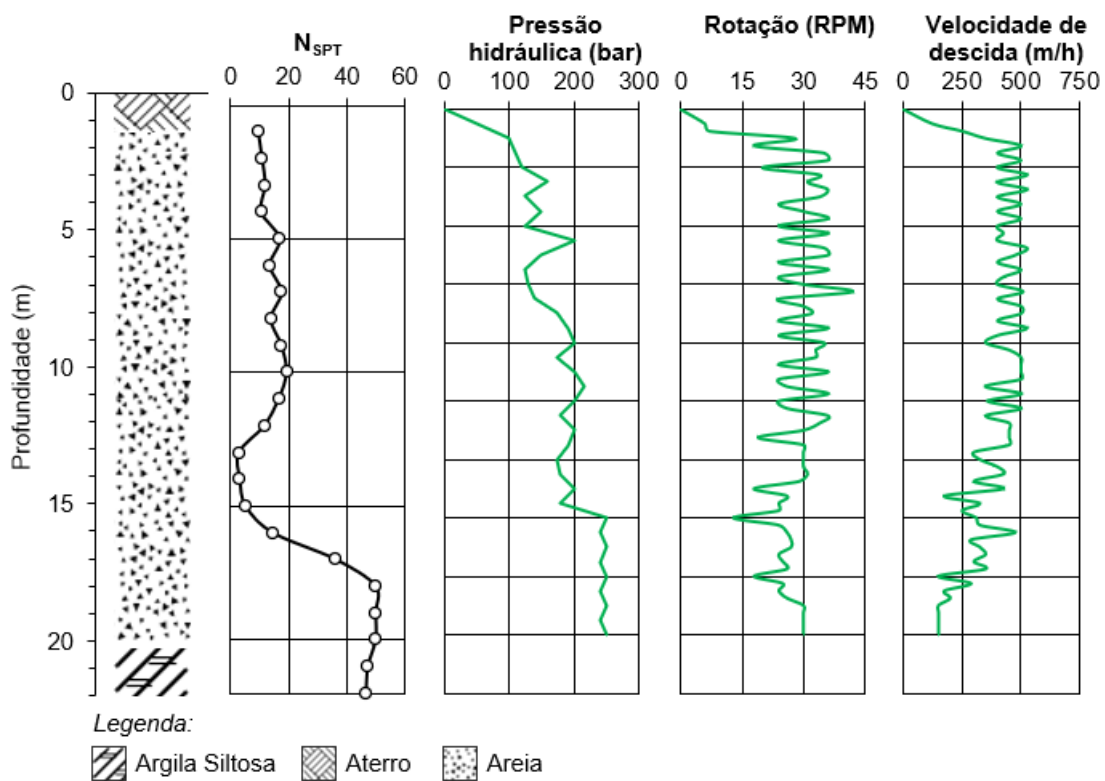


Figura 54 – Perfil estratigráfico com os respectivos índices de resistência a penetração (N_{SPT}) e dados obtidos com monitoramento da estaca de estudo.

A área de amostragem é constituída, resumidamente, por Formação da Bacia Sedimentar (Fanerozóico). Segundo FERRARI *et al.* (1981) e FONSECA *et al.* (1998), a geologia do Fanerozóico foi definida por meio das seguintes unidades: Sedimentos Flúvio-Lagunares, Sedimentos Litorâneos e Sedimentos Terciários.

Os Sedimentos Flúvio-Lagunares são compostos por argilas e siltes de planície de inundação. Englobam, também, as areias quartzosas dos depósitos de canais

fluviais, bem como as areias e os conglomerados quartzosos com matriz argilosa, dos depósitos aluvionares.

Os Sedimentos Litorâneos são constituídos de areias quartzosas litorâneas, de coloração esbranquiçada, por vezes amarelada e acastanhada.

Os Sedimentos Terciários são constituídos de sedimentos continentais arenosos e areno-argilosos a argilosos, constituídos principalmente de grãos de quartzo subangular abundante e grãos de feldspato caulinizado.

3.2 Procedimentos de ensaio para determinação do índice de vazios

3.2.1 Amostragem

No intuito de verificar a variação espacial do índice de vazios no maciço de fundação do caso de estudo, foi realizada a amostragem, por meio de retirada de testemunhos de solo indeformado. O momento da amostragem coincidiu com o final das escavações do subsolo, com cota aproximadamente igual a 3,0m em relação ao terreno natural. A amostragem ocorreu em três condições, que se descreve a seguir.

3.2.1.1 Ao longo de uma vertical próxima de uma estaca

A retirada dos testemunhos de solo ao longo de uma vertical próxima de uma estaca consistiu em cravar pequenos amostradores em diferentes profundidades próximo a uma estaca do tipo hélice contínua. Os amostradores utilizados são de pontas biseladas de comprimento igual a 2cm e diâmetro externo igual a 50mm e diâmetro interno igual a 4,79mm (Figura 55). Depois, os testemunhos foram armazenados para transporte envoltos com filme de PVC.

A retirada dos testemunhos na vertical foi facilitada tendo em vista que o subsolo da obra é constituído por uma cortina de contenção em estacas do tipo hélice contínua.

A distância do centro da estaca até o ponto de amostragem foi igual a 35cm aproximadamente. As profundidades em relação ao terreno natural da obra foram iguais 2,2 metros, 2,3 metros, 3 metros, 3,5 metros e 3,8 metros.



Figura 55 – Processo de amostragem.

3.2.1.2 Em maciço não afetado pela execução das estacas

No canteiro de obras foi selecionado uma região afastada das estacas da obra onde se retiraram 3 testemunhos. A profundidade de amostragem variou entre 3,0 e 3,2 metros de profundidade em relação ao terreno natural.

O procedimento de retirada dos testemunhos é análogo ao descrito no item 3.2.1.1 .

3.2.1.3 Amostragem ao longo de uma horizontal próxima de uma estaca

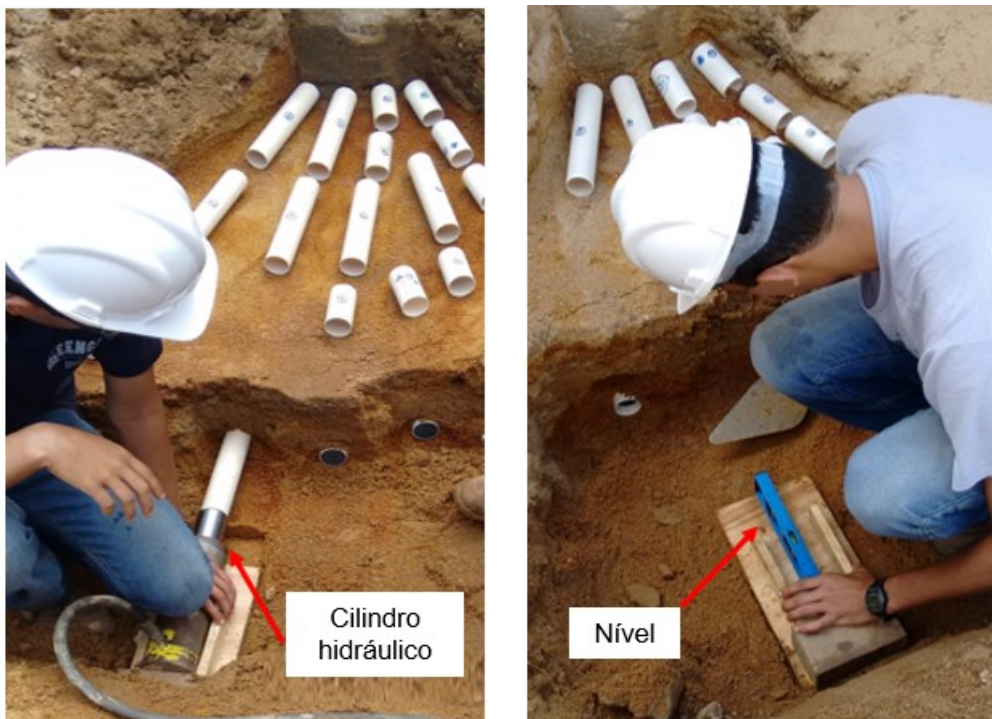
Nesse caso, os testemunhos foram destinados aos ensaios de Tomografia Computadorizada de Raios-X, aos ensaios convencionais de laboratório e para a resinagem.

Para a tomografia

Para a retirada dos testemunhos de solo, desenvolveu-se uma metodologia para minimizar as perturbações. Para tanto, utilizou-se um tubo amostrador de PVC, de parede fina, com pontas biseladas e, em seu interior, adaptou-se um disco de borracha com área igual à área interna do tubo e com espessura de 10mm. A adaptação tem o intuito de a borracha funcionar como um suporte à medida que ocorre a cravação do tubo, reduzindo, assim, o efeito do amolgamento do testemunho. Foram utilizados dois tamanhos de amostradores de PVC, um com comprimento igual a 10cm e outro, com 25cm. Ambos com diâmetro externo igual a 50mm e diâmetro interno igual a 4,79mm.

A metodologia de amostragem foi realizada basicamente em quatro etapas distintas: a montagem, a cravação do tubo, a retirada dos amostradores do maciço de solo e a proteção do testemunho para o transporte. Agora será detalhado como foi realizada essas etapas.

Primeiramente, com auxílio de um nível, posicionava-se um suporte de madeira cujo objetivo é dar assistência ao cilindro de cravação e garantir a horizontalidade dos tubos na cravação. Posteriormente, o tubo era posicionado horizontalmente, com a extremidade biselada e com a borracha voltada para o solo e a outra extremidade em contato com cilindro hidráulico. Com a montagem pronta, o tubo era cravado à carga constante, por meio de um sistema constituído por um cilindro hidráulico adaptado a uma bomba manual. Assim, à medida que o tubo era cravado, a borracha deslizava para a outra extremidade. Para reduzir qualquer atrito entre a disco de borracha e o tubo amostrador, passava-se sempre um pouco de vaselina. A Figura 56 ilustra o processo de amostragem.



(a) Nivelamento do suporte do cilindro.

(b) Cravação dos amostradores com o sistema idealizado.

Figura 56 – Processo de Amostragem.

A cravação dos tubos foi feita da direita para a esquerda e sempre em linhas horizontais. Após a cravação dos tubos amostradores de cada linha, era feita a escavação no entorno deles para retirá-los. Quando a escavação do solo no

entorno do amostrador era suficiente para a remoção cuidadosa, era então introduzida uma superfície plana na base, em seguida, outro disco era colocado em sua base e, por último, o conjunto era todo envolto com filme de PVC.

Finalmente, os testemunhos eram armazenados em uma caixa plástica, contendo pó de serra umedecido envolvendo cada testemunho, com o intuito dos testemunhos não entrarem em contato entre si e nem com as paredes da caixa. A Figura 57 mostra como foi feito o armazenamento dos testemunhos para o transporte.



Figura 57 – Armazenamento para transporte dos testemunhos.

Considerando que os índices de vazios do solo na envolvente da estaca podem variar, faz-se necessário adequar o número e a quantidade de testemunhos para analisar suas relações e distribuições. Dessa forma, o tamanho, a orientação e a quantidade de testemunhos têm que ser adequados para uma avaliação confiável.

Para isso, baseou-se no trabalho realizado por TIMOTHY *et al.* (2012). Neste trabalho, foi realizado um estudo de estacas hélice contínua, em material arenoso, e concluíram por meio de ensaios de CPT, que praticamente não ocorre perturbação do solo, devido ao processo executivo das estacas hélice contínua, a uma distância superior a aproximadamente $5R$ do eixo da estaca.

Dessa forma, considera-se adequada a amostragem em torno da estaca nesta área de influência, aproximadamente igual a $5R$ do eixo da estaca. Foram retirados 8 tubos amostradores com comprimento igual a 25cm e 14 tubos

amostradores com comprimento igual a 10cm, distribuídos conforme mostra a Figura 58.

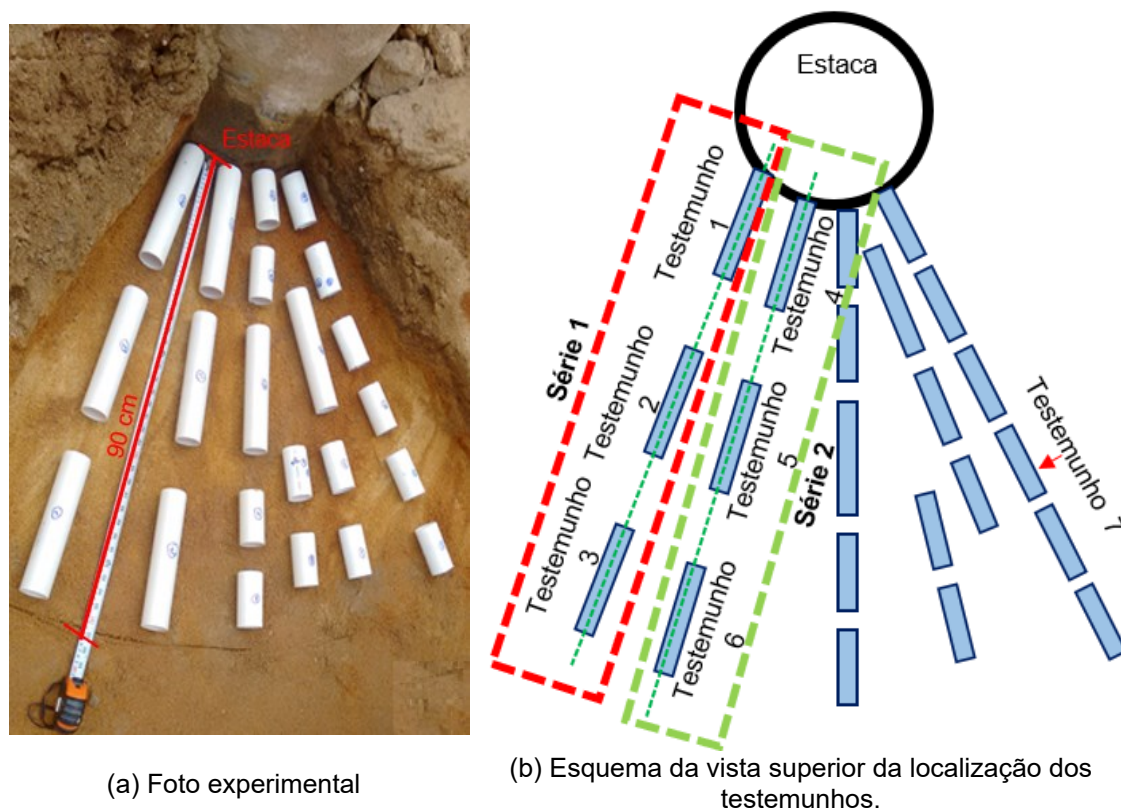


Figura 58 – Localização dos amostradores;

Observa-se, na Figura 58, que a série um é constituída pelos testemunhos um, dois e três e a série dois é constituída pelos testemunhos quatro, cinco e seis. Ambos os testemunhos foram levados para o tomógrafo. Os demais tubos amostradores foram reservados para a técnica de resinagem. No entanto, apenas o testemunho 7 foi utilizado, devido às limitações que a técnica apresenta, que será descrita no item 3.3.1.

Para ensaios convencionais de laboratório

Nas proximidades dos testemunhos levados para a tomografia computadorizada também foram retirados testemunhos para serem ensaiados pelas técnicas convencionais de laboratório, especificamente ao lado dos testemunhos da série 2 (Figura 58).

Para a retirada desses testemunhos, cravaram-se pequenos amostradores em diferentes distâncias radiais. Os amostradores que foram utilizados são de pontas biseladas de comprimento igual a 1cm e diâmetro externo igual a 50mm e

diâmetro interno igual a 4,79mm. Posteriormente, os testemunhos foram armazenados para transporte envoltos com filme de PVC.

Para resinagem

A amostragem para os procedimentos de resinagem foi análoga ao procedimento adotado de amostragem para ensaios de tomografia computadorizada de Raios-X. Nesse caso, foi destinado o testemunho 7 (Figura 58).

3.2.2 Procedimentos de ensaio para os ensaios convencionais de laboratório

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos do LECIV/UENF, e seguiram as especificações prescritas pelas seguintes normas da ABNT:

- NBR – 7181/88: Análise Granulométrica;
- NBR – 6508-84: Peso específico dos grãos;
- NBR 6457: Teor de umidade;
- NBR 09813: Peso específico natural.

Para obtenção da porosidade (n) e índices de vazios (e) utilizou-se as correlações clássicas da mecânica dos solos.

3.2.3 Tomografia computadorizada de Raio-X

A tomografia computadorizada é realizada em duas etapas: aquisição das imagens e processamento das imagens

3.2.3.1 Aquisição das imagens

A aquisição das imagens foi realizada no tomógrafo pertencente ao departamento de radiologia do Hospital Universitário Pedro Ernesto, localizado no Rio de Janeiro, Brasil. O tomógrafo é do tipo *multislice* de 64 canais Brilliance 40, conforme a Figura 59. As aquisições foram realizadas com os testemunhos posicionados horizontalmente, utilizando-se como parâmetros técnicos: 120 kV e 181 mAs. Após a aquisição das imagens, foi realizada a reconstrução com alta resolução, com matriz de 512×512 , utilizando-se algoritmo de alta frequência,

largura de janela de 1200 UH e nível médio de centro de - 800 UH. O número de seções transversais para cada testemunho está sintetizado na Tabela 11.

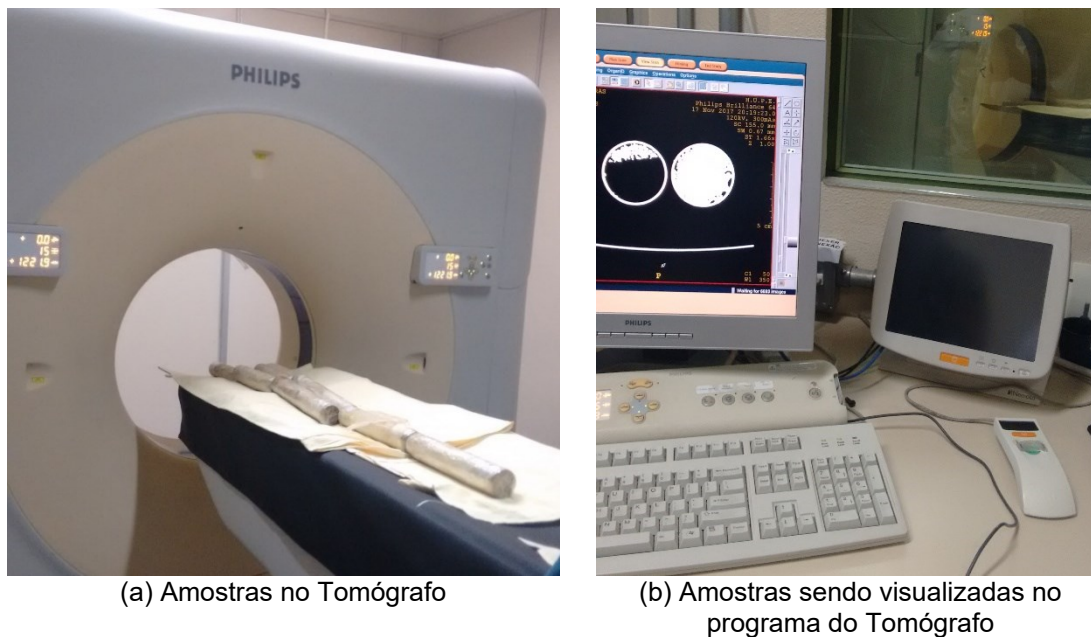


Figura 59 - Tomógrafo do tipo multislice de 64 canais Brilliance 40.

Tabela 11 - Quantidade de seções transversais após a reconstrução referente à cada testemunho analisado.

Testemunho	Quantidade de fatias
1	818
2	818
3	819
4	818
5	820
6	819

3.2.3.2 *Processamento digital de imagens para o cálculo do índice de vazios*

Após a aquisição das imagens, é necessário partir para a etapa do processamento digital de imagens para obtenção dos resultados. A técnica de processamento digital de imagens consiste em modificar parâmetros através de algoritmos para o aperfeiçoamento nas imagens do contraste, da nitidez, da diminuição de ruído, da segmentação das cores e, assim, ser possível realizar diferentes análises quantitativas e qualitativas. A técnica do processamento digital de imagens está em constante crescimento e vem sendo aplicada em diferentes áreas como, por exemplo, na medicina (BOWMAN *et al.* 2013), no estudo da microestrutura de materiais de construção (RAMASWAMY e

SANTHANAM, 2017; CHOTARD *et al.*, 2003; LU *et al.*, 2006; GALLUCCI *et al.*, 2007; DIAMANTE e LANDIS, 2007; STOCK, 2008; PROMENTILLA *et al.*, 2009, PROMENTILLA, 2011; PROVIS *et al.*, 2012; CESEN *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2014), na agricultura (AYDEMIR *et al.* 2004), na engenharia e em outros estudos tecnológicos. Na engenharia geotécnica, as imagens digitais podem ser utilizadas para estudar fluxo (YU 2010), deformação (HIGO *et al.* 2013), força (ODA *et al.*, 2004), e morfologia das partículas (FONSECA *et al.*, 2012; ZHOU e WANG, 2015; ZHOU *et al.*, 2015).

Como já foi descrito na seção 2.5.3, o processamento digital de imagens pode incluir os seguintes processos: tratamento das imagens, ajustes do histograma e segmentação. Portanto, para o cálculo do índice de vazios, fizeram-se inicialmente uns ajustes dos histogramas, e depois partiu-se para a fase de segmentação.

O processo geral de segmentação seguido neste estudo é uma técnica simples de implementação, denominada *Thresholding*. Esta segmentação consiste em transformar uma imagem de cinzentos numa imagem binária, ou seja, a conversão da imagem monocromática ou policromática em uma imagem binária, na qual aparecem apenas dois valores de intensidade de luz, preto e branco.

A binarização consiste em separar os *pixels* em dois grupos os com valor acima do limite transformados em 255 (branco) e os abaixo transformados em 0 (preto). No presente estudo, definiram-se duas regiões de interesse, dividindo o histograma em 2 regiões no *ImageJ*. A menos densa, representando os vazios e a região com densidade maior, representando os grãos de areia. O valor limite inferior do histograma para os vazios foi igual a zero e o limite superior do histograma foi igual a 100 e para a parte sólida variou de 100 a 255.

A Figura 60 permite visualizar a imagem bruta e a imagem segmentada, destacando apenas a fase sólida. Observa-se, na Figura 60, que a segmentação consiste, basicamente, na diferenciação entre os sólidos e o ar, conforme relatado por ZUBELDIA *et al.* (2015).

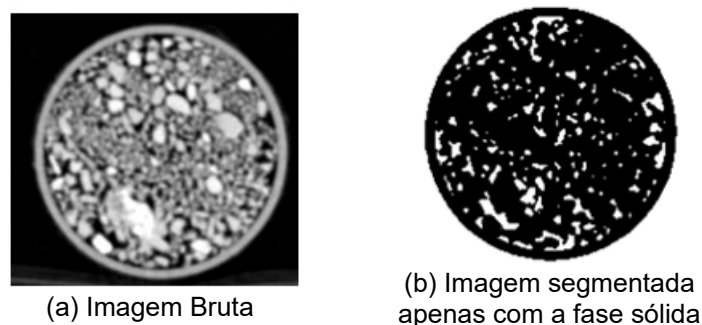


Figura 60 – Segmentação de Imagens.

Posteriormente, o índice de vazios resultante é expresso relacionando a área de vazios e a área da fase sólida, ambos calculados através das imagens segmentadas no *software ImageJ*. Portanto, para uma fatia de espessura uniforme, o volume de vazios e de sólidos, que seriam utilizados para definir o índice de vazios (Equação 5) correspondente da fatia, são substituídos pelas áreas correspondentes, conforme a Equação 6.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (5)$$

$$e = \frac{A_v}{A_s} \quad (6)$$

Destaca-se que a caracterização quantitativa do índice de vazios é permitida pelo forte contraste na atenuação de raios-X de vazio e fases sólidas (TAINÁ *et al.* 2008).

3.2.4 Resinagem

A técnica de resinagem dos testemunhos de solo foi aplicada com o objetivo de se obter uma imagem direta da estrutura granular do solo próximo à estaca. A técnica consiste em preencher os vazios do solo com resina, utilizando o sistema ilustrado na Figura 61. Com o endurecimento da resina preserva-se a estrutura original do solo.

Para a realização das resinagens, inicialmente, posiciona-se o testemunho de solo, ainda dentro do amostrador, em local elevado. Na parte inferior do amostrador é introduzida uma mangueira flexível que é adaptada em sua outra extremidade a tampa do reservatório intermediário. Na tampa, também desse reservatório, conecta-se uma mangueira flexível à bomba de vácuo.

Depois, liga-se a bomba de vácuo e é colocado a resina no topo do testemunho indeformado. Com a aplicação do vácuo gera-se sucção no tubo amostrador, forçando penetração da resina pelos vazios do solo. Após a saturação com resina, sela-se a saída inferior e aguarda-se o endurecimento da resina. Após o endurecimento da resina, o testemunho de solo é retirado do amostrador.

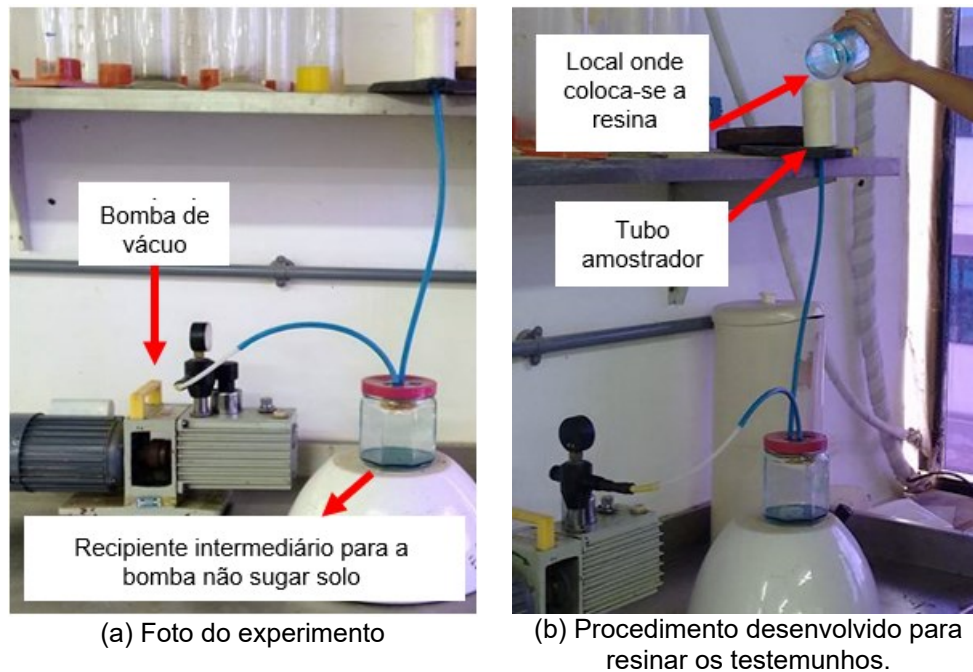


Figura 61 - Procedimento para resinar os testemunhos de solo.

A visualização da estrutura do solo resinado foi feita por meio de microscópio. O equipamento utilizado para isso foi o LEXT OLS4000 3D Measuring Laser Microscope, pertencente ao LAMAV-UENF. O equipamento permite ampliações de 108 a 17280 vezes com microscópio óptico e a laser, o que torna capaz de se obter imagens do solo a nível nanométrico.

3.3 Resultados obtidos

3.3.1 Granulometria e Textura obtida pela técnica de resinação

A Figura 62 apresenta a curva granulométrica do solo obtida das amostras coletadas na obra. A análise granulométrica revela um solo com partículas de areias pedregulhosas sem finos.

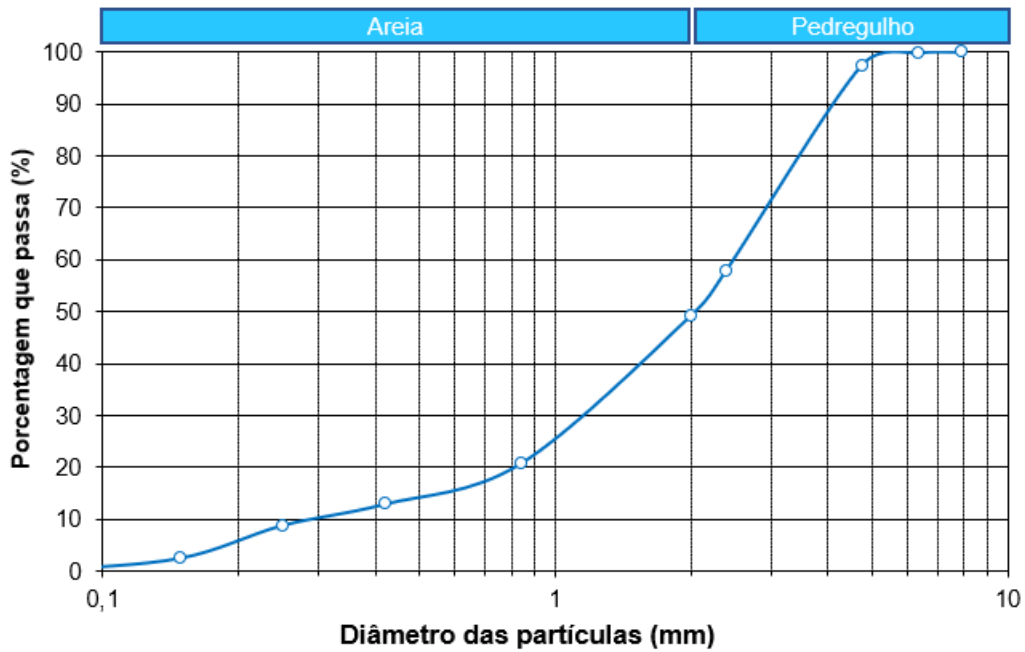


Figura 62 – Curva granulométrica do maciço de Fundação.

A Figura 63 apresenta as imagens obtidas por meio do microscópio dos testemunhos resinados por meio da técnica desenvolvida para a tese.

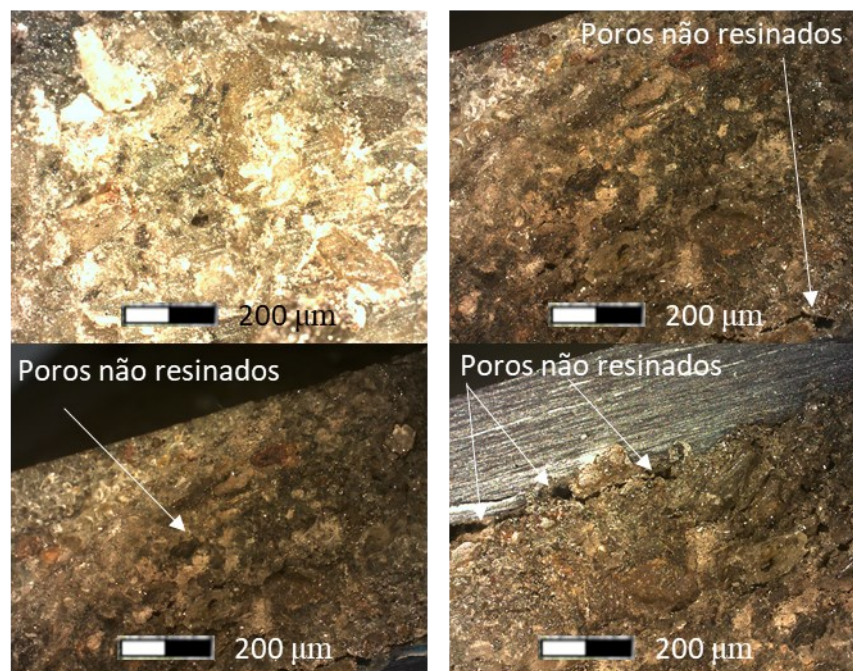


Figura 63 – Imagens obtidas por meio do microscópio dos testemunhos resinados por meio da técnica desenvolvida para a tese.

A partir das análises dos testemunhos resinados observa-se um solo de textura predominantemente arenosa, corroborando com a análise granulométrica.

Observa-se também que diferentes poros não foram totalmente saturados pela resina, sugerindo que a resina testada se apresentou muito viscosa para saturar completamente o tubo amostrador, logo a quantificação do índice de vazios por meio do processamento digital, conforme apresentado na seção 2.5.4.1, torna-se impossível. Uma outra limitação da técnica foi que, no momento da aplicação da sucção, observava-se que a estrutura do solo é alterada.

Portanto, devido às limitações apresentadas pela técnica, sugere-se um aperfeiçoamento dela para obter resultados representativos dos macroporos, da estrutura do solo e do índice de vazios por meio do processamento digital de imagens.

3.3.2 Índice de vazios pelo método tradicional

A Figura 64 exhibe os índices físicos determinados ao longo de uma vertical localizada a aproximadamente 35cm do centro de uma estaca. Observa-se que a variação do índice de vazios é de 0,5 a 0,62, aproximadamente.

Os resultados obtidos da amostragem em região não afetada pela execução das estacas indicam um índice de vazios médio da ordem de 0,71.

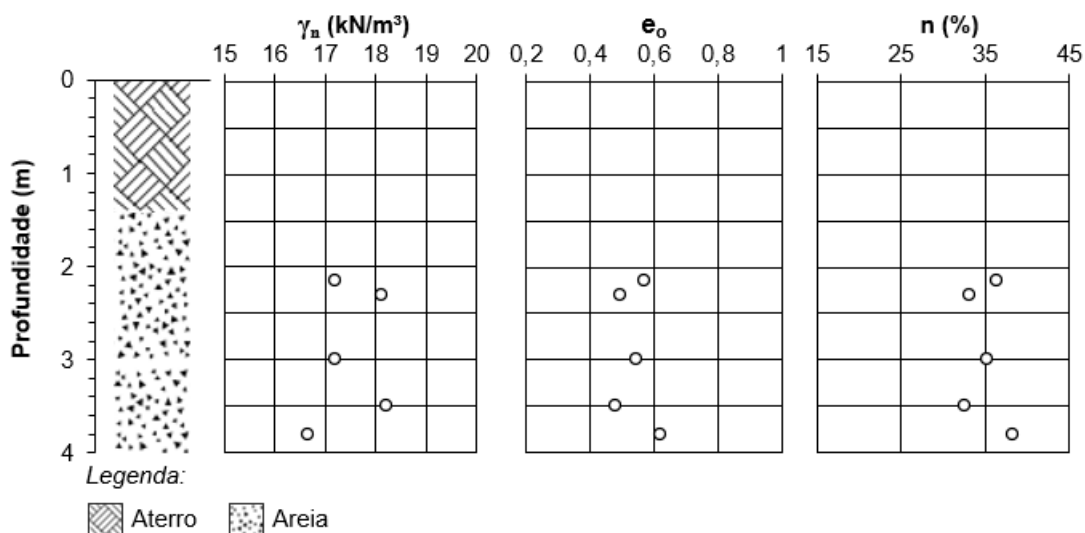


Figura 64 - Peso específico natural (γ_n), índices de vazios inicial (e_0) e porosidade (n) do solo para diferentes profundidades e localizada a aproximadamente 35 cm do centro de uma estaca.

Os índices físicos determinados pela técnica convencional, para os testemunhos retirados em diferentes distâncias em relação ao eixo da estaca, estão mostrados na Figura 65.

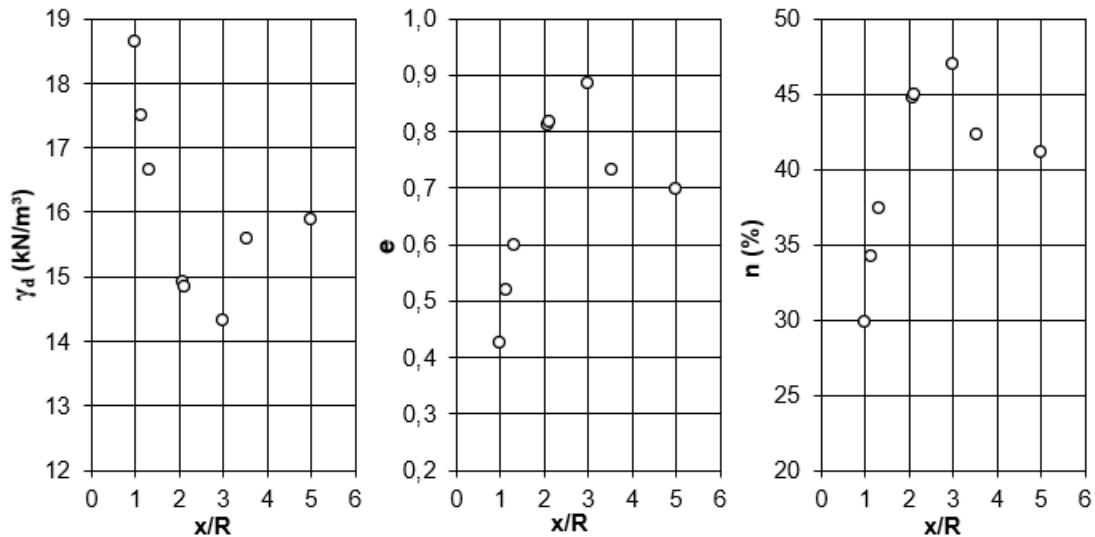


Figura 65 – Variação do peso específico seco, índice de vazios e porosidade em diferentes distâncias radiais do centro da estaca. Nota: x é igual a distância em relação ao centro da estaca e R é igual ao raio da estaca.

Nota-se na Figura 65 que, no fuste da estaca, foi determinado o maior peso específico do solo e os menores valores de índice de vazios e porosidade, apresentando um solo de característica mais densa em relação ao solo mais afastado da estaca.

Nota-se, que não existe uma relação linear entre o índice de vazios do solo e a distância radial em relação ao centro da estaca. Essa característica apresentada indica a heterogeneidade do solo, o que também é observado por meio da análise morfológica descrita posteriormente no item 3.3.3.

Comparando os índices de vazios definidos para o solo de diferentes distâncias radiais do centro da estaca com o índice de vazios médio determinado para o solo na região não afetada pela execução das estacas, observa-se uma densificação evidente do maciço em torno de 2R. Essa densificação provavelmente é consequência do processo executivo das estacas hélice contínua.

A densificação do solo próxima à estaca, também, é observada comparando os índices físicos determinados ao longo de uma vertical com o índice de vazios médio determinado para a região não afetada pela execução das estacas. Da comparação, verifica-se que a variação do índice de vazios na vertical é de 0,5 a 0,62, valores inferiores a 0,71, determinados para a região não afetada pelo processo executivo das estacas.

3.3.3 Imagens da Tomografia Computadorizada de Raios-X

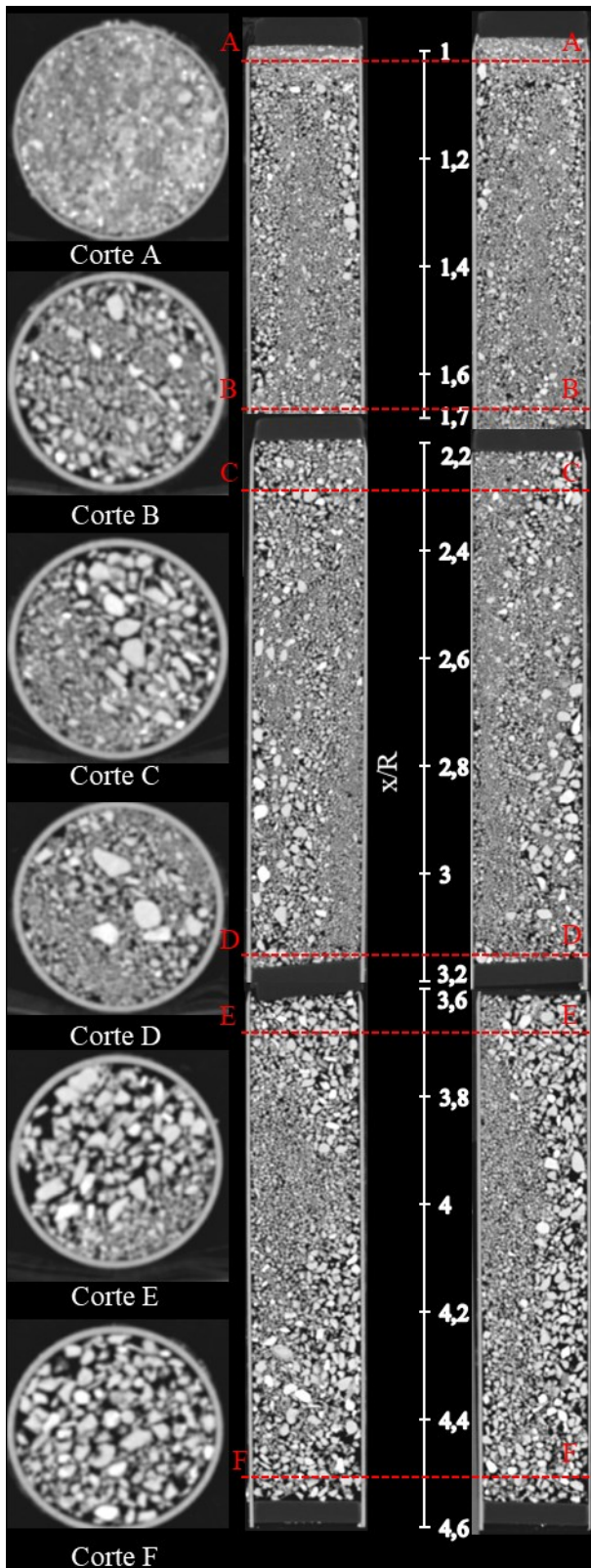
A Figura 66, mostra as imagens geradas por meio da tomografia dos testemunhos das séries 1 e 2 (Figura 58). Importante mencionar, inicialmente, que as imagens obtidas a partir da tomografia computadorizada de raios-X possuem forte contraste na atenuação de raios-X, o que é considerado satisfatório para as interpretações realizadas, na presente pesquisa.

Na Figura 66, também, são representados os cortes longitudinais e transversais resultados do processamento das imagens da Tomografia. Destaca-se que as seções transversais apresentadas são apenas para exemplificação, tendo em vista que foram geradas aproximadamente 4800 imagens no total. Uma seleção dessas imagens é apresentada no Anexo A.

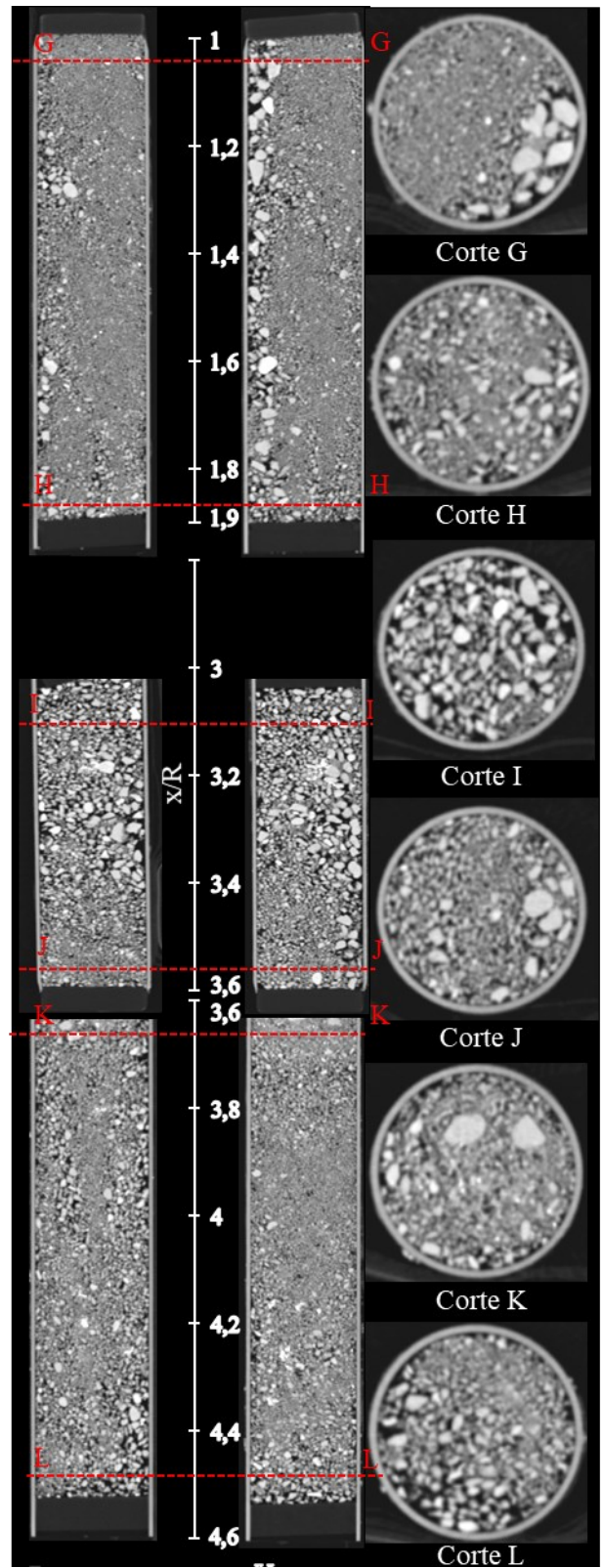
Dos resultados obtidos, observa-se que na região intermediária da série 2 (Figura 66 b) há uma descontinuidade da amostragem o que foi ocasionado pela impossibilidade de cravação do amostrador, por completo, no solo (testemunho 5 - Figura 58).

Nota-se, ainda, que existe uma predominância de textura das frações areia e pedregulho, corroborando com o que se obteve da análise granulométrica (Figura 62). No entanto, observa-se que a concentração de material mais grosseiro, que representa a fração pedregulho, ocorre de forma não localizada, dando aspecto não homogêneo do solo dentro dos testemunhos. Tal aspecto, mostra que a técnica de tomografia, que apresenta uma imagem ampla do solo, certamente vai ilustrar a variabilidade do índice de vazios de forma mais detalhada e representativa que amostragens pontuais, como é feito no caso da medição de índices de vazios no campo pelo método convencional.

Por fim, nota-se que não há uma variação de densidade, clara, ao longo das dos testemunhos à medida que se afasta da estaca.



(a) Cortes longitudinais e transversais da série 1



(b) Cortes longitudinais e transversais da série 2

Figura 66 - Cortes longitudinais e transversais nas imagens tomográficas dos amostradores retirados radialmente no entorno da estaca, sendo x a distância em relação ao centro da estaca e R o raio da estaca.

3.3.4 Variação do índice de vazios do solo na envolvente da estaca obtidos a partir da TC-RX

A Figura 67 apresenta a variação do índice de vazios em relação a distância radial do eixo da estaca obtida a partir dos resultados da TC-RX. É possível observar que o menor índice de vazios (testemunho 1) é determinado para a região mais próxima à estaca, indicando uma possível densificação nessa região. Esta densificação próxima à estaca hélice contínua também foi relatada por HIRD *et al.* (2006), SIEGEL (2012), ADEJUMO e BOIKO (2013), ARAB *et al.* (2018) e KENNY *et al.* (1997).

KENNY *et al.* (1997) realizaram ensaios simulando o processo de cravação do trado preparados em caixas de areia seca e, para minimizar a perturbação do solo, utilizaram um nível relativamente alto de taxa de cravação ($v/n\rho$) igual a 0,9. Os resultados mostraram que índice de vazios reduziu 9 -12%, em média, em relação ao índice de vazios inicial.

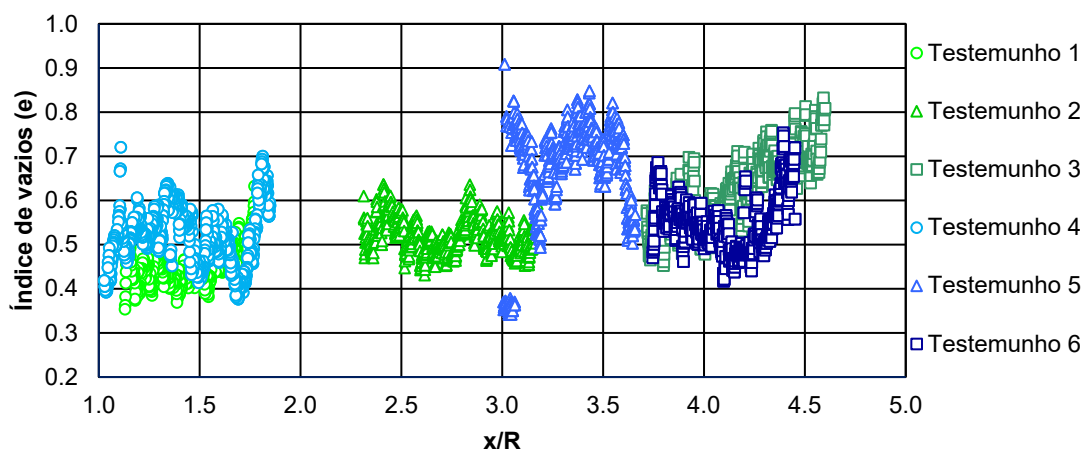


Figura 67 – Índices de vazios determinados para os testemunhos s 1 a 6 (séries 1 e 2) em diferentes distâncias radiais em relação ao centro da estaca, sendo x a distância em relação ao centro da estaca e R a raio da estaca.

Para facilitar a interpretação dos dados foi realizada a distribuição de frequência do índice de vazios. A distribuição de frequência é um método de se agruparem intervalos de índices de vazios, de modo a fornecer a quantidade de vezes que determinado índice de vazios calculado em cada fatia da tomografia apresenta em diferentes intervalos. Com isso, pode-se resumir e visualizar um conjunto de índices, sem considerar os índices de vazios individuais.

As figuras 68 e 69 mostram o histograma de frequência realizado a partir dos resultados da variação de índice de vazios apresentados na Figura 67. Nota-se, na Figura 68, que o testemunho mais próximo à envolvente da estaca indicou os menores índices de vazios repetidas vezes, e o testemunho mais afastado apresentou os maiores índices de vazios com maiores frequências.

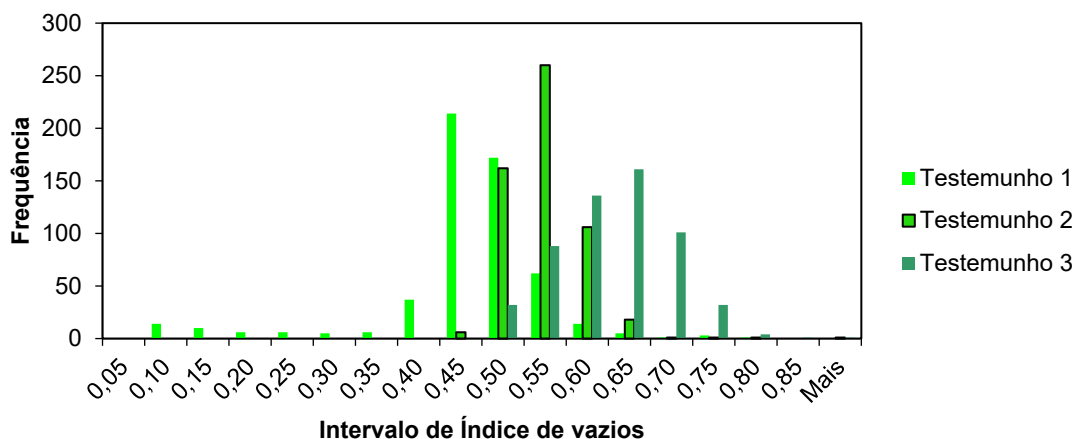


Figura 68 - Histograma de frequência de índice de vazios dos testemunhos 1, 2, e 3.

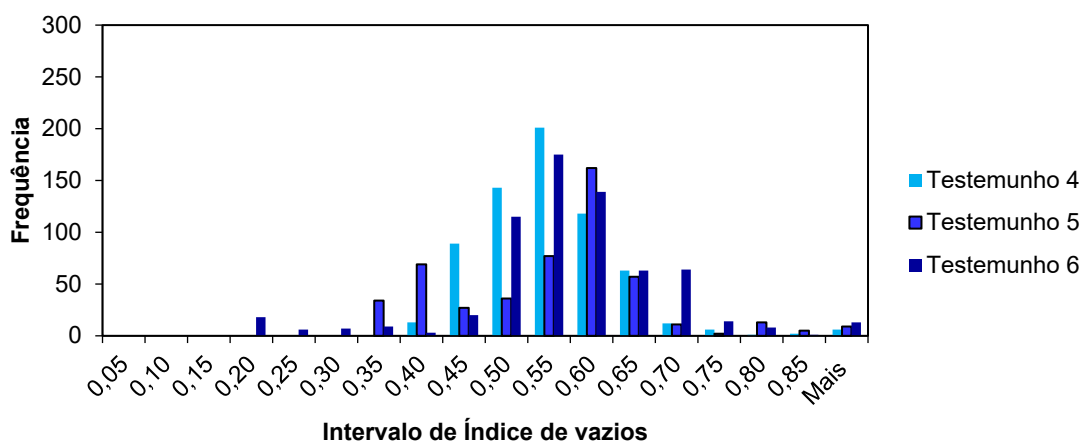


Figura 69 - Histograma de frequência de índice de vazios dos testemunhos 4, 5 e 6.

No histograma da Figura 69, não se observa, com tanta clareza, os menores índices de vazios próximos à estaca, porém, têm-se alguns aspectos indicando uma maior densidade na envolvente da estaca. Primeiramente, os testemunhos mais afastados (testemunho 6) apresentam maiores valores de frequência para intervalos de índices de vazios superiores a 0,7 em relação aos demais testemunhos. Além disso, o testemunho mais próximo da estaca (testemunho 4) indica maior frequência de valores de índices de vazios na faixa de 0,45 e 0,55 em relação aos demais testemunhos, o que são valores baixos indicando uma

densificação. Em relação ao testemunho intermediário, verifica-se a maior frequência de índice de vazios igual a 0,6, o que é um valor intermediário.

Um outro tratamento estatístico realizado foi a utilização das médias dos índices de vazios para cada testemunho e o desvios-padrão, exibidos na Figura 70.

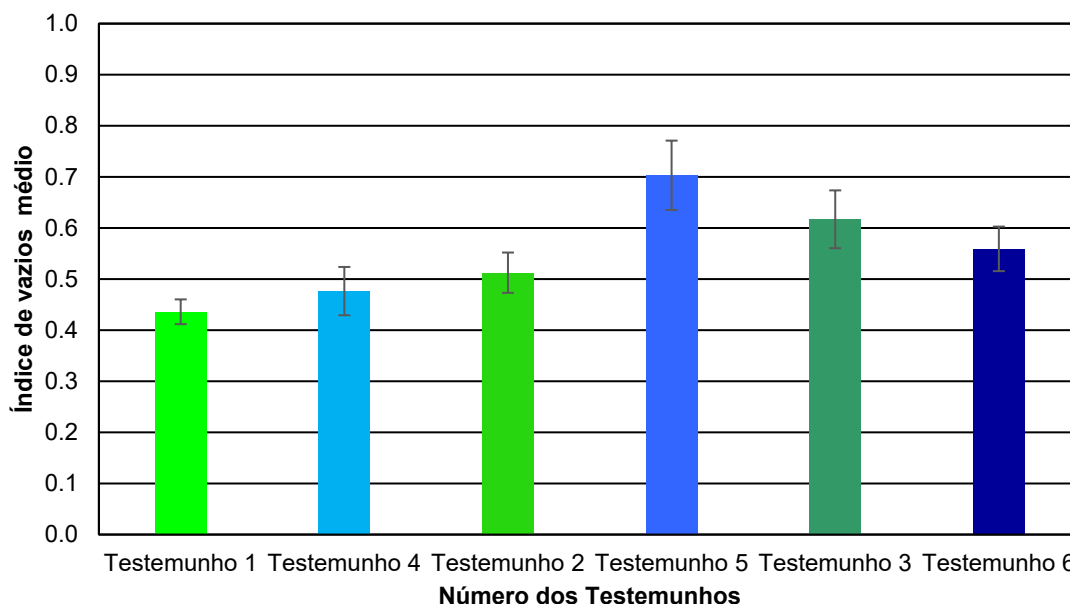


Figura 70 – Índice de vazios médio para cada testemunho e desvio padrão.

Nota-se, na Figura 70, que os testemunhos (1, 2 e 3) da série 1, indicam que a medida que o solo se afasta do eixo da estaca, o índice de vazios médio aumentou, o que indica uma densificação.

Para os testemunhos (4,5, e 6) da série 2, a densificação não fica tão evidente, devido ao índice de vazios médio para o testemunho 4 apresentar um grande desvio padrão. No entanto, observa-se que o testemunho 4 apresenta o menor índices de vazios médio em relação ao testemunho 6, o que também indica uma densificação do solo próximo à estaca. Além disso, nota-se que o testemunho 1 exibe um menor índice de vazios em comparação ao testemunho 6, o que também aponta uma densificação do solo na envolvente do fuste.

Verifica-se também que os desvios padrão das amostras, principalmente aos da série 2 (4 e 5) são elevados, o que mostra novamente a heterogeneidade do solo.

Observa-se, ainda, que o índice de vazios médio para todos os testemunhos é menor que 0,71 que é o índice de vazios médio determinado para a região não

afetada pelo processo executivo da estaca, portanto indicando a densificação do maciço devido a execução da estaca.

3.3.5 Comparação dos índices de vazios obtidos pela tomográfica computadorizada e a técnica convencional

A Figura 71 apresenta os índices de vazios do solo, em diferentes distâncias em relação ao centro da estaca, determinados pelas análises da tomografia computadorizada de raios-x e pela técnica convencional.

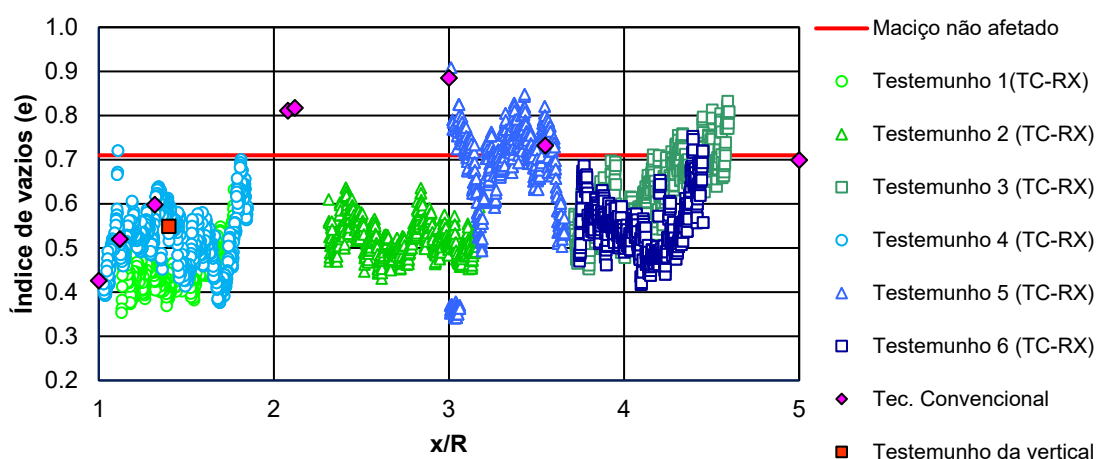


Figura 71 – Índices de vazios determinados pelas diferentes técnicas em diferentes distancias radiais em relação ao centro da estaca, sendo x a distância em relação ao centro da estaca e R a raio da estaca.

Nota-se na Figura 71 que à magnitude dos valores dos índices de vazios, determinados no laboratório, são valores muito próximos aos estimados, por meio das imagens obtidas pela tomografia computadorizada, variando, no geral, de 0,4 a 0,8. Comprovando o potencial da determinação do índice de vazios do solo pela tomografia computadorizada de raios-x.

Por meio da Figura 71 também é possível avaliar a magnitude da variação do índice de vazios antes (e_i) e depois (e_f) da instalação das estacas hélice contínua. Considera-se o índice de vazios inicial (e_i), os determinados no maciço na região não afetada pela execução das estacas, e o índice de vazios final (e_f), os determinados para o solo mais próximo à estaca.

Assim sendo, determinou-se um índice de vazios inicial igual 0,71, para o maciço na região não afetada pela execução das estacas (linha vermelha da Figura 71), conforme descrito na seção 3.3.2.

Comparando o índice de vazios inicial com os índices de vazios após a instalação, percebem-se evidências claras de que há uma notável densificação do solo dentro de uma faixa igual a 3 R em relação ao centro da estaca de estudo, e uma densificação mais sensível em uma faixa igual a 5 R.

Sugere-se que a densificação do solo no entorno da estaca está associada ao processo executivo de instalação da estaca, porém a forma e magnitude da densificação também é influenciada pela distribuição granulométrica do solo. Portanto, a forma com que ocorre a densificação da areia próxima à estaca está associada principalmente a dois fatores: a resposta tensão-deformação da areia e ao processo executivo da estaca. O primeiro fator conforme SHIVAPRAKASH e DINESH (2017) depende das variáveis de estado do solo, incluindo: densidade relativa, estado de tensão efetiva e outros fatores relacionados com a natureza da areia, como: forma da partícula, distribuição do tamanho das partículas, características da superfície das partículas e mineralogia. O segundo fator está ligado à ação do concreto fresco no restabelecimento de tensões e à taxa de cravação do trado.

Destaca-se também que os índices de vazios, definidos para o testemunho 5, e os índices de vazios determinados por meio da técnica convencional nas distâncias entre 2R e 3R do eixo da estaca, não apresentam valores de índices de vazios indicando uma densificação, evidentemente por apresentarem um formato de grãos mais angulares e maiores tamanhos de diâmetro, como é possível observar na Figura 66 uma heterogeneidade do solo. Portanto, não sendo possível avaliar especificamente a influência de cada fator.

Um outro ponto a observar é que, em uma distância igual a 5R do eixo da estaca, o valor do índice de vazios determinado, pela técnica convencional, é igual a 0,69, valor próximo ao determinado para o índice de vazios inicial, antes da instalação das estacas. Dessas observações, sugere-se que a área de influência do processo executivo é próxima de 5R, concordando a área de influência encontrada por SIEGEL (2012) em um estudo com quatro estacas instaladas com diferentes rotações de trado e, em seguida, avaliada a perturbação do solo por meio de ensaios de penetração de cone (CPT). Esta zona afetada também concorda com outros métodos de instalação relatados por trabalhos

experimentais de LUNDBERG *et al.* (2013), VESIC (1977), SALGADO (2014) e SULEIMAN *et al.* (2014) e resultados analíticos propostos por DIJKSTRA *et al.* (2011).

CAPÍTULO 4 - MODELAGEM FÍSICA

Conforme descrito no Capítulo 3, consta-se no caso de obra que existem alterações do estado do solo no entorno da estaca. No entanto, essa comprovação em obra é bem localizada tanto no espaço quanto no tempo. No espaço por ser em pontos localizados e no tempo por ser uma análise apenas ao final de todo o processo executivo da estaca hélice contínua. Dessa forma, torna-se interessante a execução de ensaios em modelos reduzidos, em níveis de tensões a 1g, simulando a etapa de cravação do trado das estacas hélice contínua em solo transparente. A modelagem física, diferente do caso de obra, permite avaliar a influência do passo e da taxa de cravação no campo de deslocamento resultante do processo de cravação do trado. Para a realização de forma eficiente desses ensaios, foram necessários: a programação dos ensaios a serem realizados, o dimensionamento do modelo, a criação de aparatos experimentais e o desenvolvimento de procedimentos de ensaio, o que consumiu tempo e exigiu esforço.

Assim sendo, neste capítulo será descrito o planejamento dos ensaios; o dimensionamento do modelo; a montagem da caixa de ensaio com solo transparente; o sistema de cravação do trado; o sistema de aquisição de dados e a configuração experimental e procedimentos de ensaio utilizados.

Detalha-se, ainda, todas as novas ferramentas de laboratório desenvolvidas para modelagem do processo de cravação do trado de uma estaca hélice contínua em solo transparente, cita-se: caixa de ensaio, suporte para o atuador, sistemas para controle de velocidade de rotação do trado, suporte de apoio para o motor de giro; suporte para apoio do motor controlador da velocidade de descida e subida; suporte para o laser; suporte para a lente; trados reduzidos; acoplador de eixo rígido; guia para o trado e painel preto.

4.1 Programação de ensaios

Com o intuito de atingir os objetivos foi montado um programa de testes de laboratório com diferentes geometrias de trados e taxas de cravação (Tabela 12).

Tabela 12- Resumo das características adotadas para cada ensaio.

Ensaio	Modelo do Trado	ρ (mm)	Velocidade de Rotação (rev/s)	Taxa de Cravação $v/n\rho$ (rev ⁻¹)
N1P8T0,4	Trado 1	8	0,224	0,4
N2P8T0,8	Trado 1	8	0,112	0,8
N3P8T1	Trado 1	8	0,087	1,0
N4P9T0,4	Trado 2	9,6	0,187	0,4
N5P9T0,8	Trado 2	9,6	0,093	0,8
N6P9T1	Trado 2	9,6	0,073	1,0
N7P6T0,4	Trado 3	6,4	0,280	0,4
N8P6T0,8	Trado 3	6,4	0,140	0,8
N9P6T1	Trado 3	6,4	0,109	1,0

Os três tipos de trado utilizados são mostrados na Figura 72. O trado 1 é considerado o trado de referência por ter sido projetado dividindo as dimensões do protótipo por um fator de escala igual a 40 ($\lambda=40$). Já o trado 2 e o trado 3 se diferenciam do trado 1 por possuírem o passo (ρ) 20% maior e 20% menor em relação ao trado 1, respectivamente. A dimensão do diâmetro interno dos trados (d) é igual a 4 mm, e a dimensão do diâmetro externo (D) dos trados é igual a 12,5 mm.

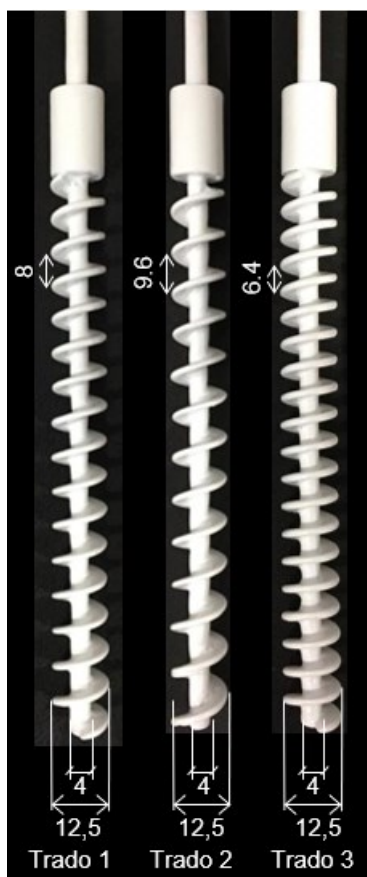


Figura 72 – Modelos de trados utilizados para a simulação da cravação do trado (todas as dimensões em mm)

A taxa de cravação é definida pela seguinte Equação (7):

$$t = \frac{v}{n\rho} \quad (7)$$

Onde v é a velocidade de descida do trado (mm/s), n é a velocidade de rotação do trado (rev/s) e ρ é o passo do trado.

Assim sendo, as taxas de cravação do trado foram estabelecidas para investigar a validade dos conceitos estabelecidos por MASSASH *et al.* (1988) e por THOURBURN *et al.* (1993).

MASSASH *et al.* (1988) relatam que se a introdução do trado ocorrer com uma taxa de cravação igual a 1 ($v/n\rho = 1$), o trado irá densificar ou comprimir o solo circundante da estaca, obviamente se tiver capacidade de torque suficiente para evitar a paralisação. No entanto, THOURBURN *et al.* (1993) descrevem que, na taxa de cravação igual a 0,5 ($v/n\rho = 0,5$), distúrbios no solo podem ocorrer e na taxa de cravação do trado igual a 1 ($v/n\rho = 1$), o trado não produz mudanças nas propriedades do solo próximo à estaca, sendo considerada a taxa neutra.

Portanto, utiliza-se a taxa de cravação igual a 1 ($v/n\rho = 1$), valor apontado por MASSASH *et al.* (1988) como adequado, e neutro para THOURBURN *et al.* (1993); a taxa de cravação igual a 0,4 ($v/n\rho = 0,4$), valor considerado crítico por THOURBURN *et al.* (1993); e por fim a taxa de cravação igual a 0,8 ($v/n\rho = 0,8$), considerada como intermediária.

As velocidades de rotação escolhidas são em função da velocidade de descida do trado, das taxas de cravação e dos passos dos trados já definidos, conforme a Equação (7).

Para a execução dos ensaios, utiliza-se a densidade relativa do solo igual a 30%, simulando um maciço de fundação arenoso de compacidade fofa. Este estado de compacidade do solo foi definido por justamente o maciço fofo ser considerado o mais difícil de realizar a etapa de cravação do trado sem aliviar o nível de tensões (THOURBURN *et al.*, 1993 e ALMEIDA NETO, 2002).

4.2 Dimensionamento do modelo

Um modelo físico, em escala reduzida, de uma estrutura geotécnica deve ser projetado com dimensões geométricas e propriedades dos materiais que reflitam a condição do protótipo. No entanto, a semelhança completa entre todos os parâmetros, que governam a resposta do protótipo frente as solicitações, é inatingível em modelos a 1 gravidade, sendo as propriedades dos materiais e as condições de confinamento correspondentes os pontos críticos da modelagem. É possível fornecer ao modelo níveis de tensão similares aos do protótipo utilizando uma centrífuga geotécnica, mas esta abordagem não é o intuito deste trabalho.

As amostras de solos preparadas em laboratório a 1g revelam um perfil de tensão ao longo da profundidade quase uniforme, o que resulta em uma resistência do solo relativamente uniforme com a profundidade. Assim, o principal inconveniente associado a esta técnica de modelagem com solos transparentes é que não é possível obter similaridade entre os perfis de tensão do modelo e o protótipo. Isso significa que os resultados deste estudo em escala reduzida não podem ser simplesmente extrapolados e comparados com medidas de campo, porém são úteis para análises qualitativas e comparativas.

Por essa razão, um artifício muito utilizado para realizar modelagens a níveis de tensões a 1 gravidade destacado por LAUDER e BROWN (2014) é o de selecionar os parâmetros que sejam relevantes para baixas tensões efetivas. Para a presente pesquisa, com base na revisão bibliográfica e no estudo da qualidade da ação do trado em areia feito por THORBURN *et al.* (1993), selecionaram-se as grandezas, que governam o processo de cravação do trado de estacas hélice contínua, que são: a geometria do trado, a taxa de cravação da hélice e as propriedades do solo.

Após a seleção das grandezas, seguiu-se para o dimensionamento do modelo. Os parâmetros adimensionais, (ρ/D) , (d/D) , $(v/n\rho)$, o coeficiente de Poisson do solo e os parâmetros do solo, como a densidade, peso específico, índice de vazios e o ângulo de atrito, por leis de escala de modelação física são escalados em 1:1.

Os parâmetros geométricos do modelo são obtidos reduzindo as dimensões do protótipo por um fator de escala igual a λ que, no caso, foi, aproximadamente, igual a 40. Matematicamente o fator de escala geométrico é obtido pela Equação (8):

$$\lambda = \frac{\lambda_p}{\lambda_m} \quad (8)$$

sendo: λ_p o comprimento do protótipo e λ_m o comprimento do modelo.

Em relação à magnitude do intercepto coesivo, não é necessário escalar, por se tratar de um solo sem coesão. A Tabela 13 apresenta um resumo das relações de proporção entre protótipo e modelo utilizadas no presente estudo.

Tabela 13 - Fatores de escala para o modelo reduzido sob campo gravitacional normal do problema analisado.

Grandeza	Fator de escala (protótipo/modelo)
Aceleração	1
Comprimento	λ
Área	λ^2
Volume	λ^3
Densidade	1
Peso específico	1
Ângulo de atrito	1
Intercepto coesivo	λ
Índice de vazios	1
Taxa de Cravação ($v/n\rho$)	1

4.3 Montagem da Caixa de Ensaio com Solo transparente

Para aplicação da técnica de solos transparentes na modelagem física realizada, no presente estudo, é fundamental ter o solo transparente. A grande vantagem da utilização da técnica de solos transparentes é a possibilidade da visualização do deslocamento do solo no interior do modelo físico reduzido sem a necessidade de incorporação de sensores. Portanto, nesta seção será mostrado a procura de materiais para compor o solo transparente com propriedades geotécnicas suficientes para a representação do comportamento do solo, e com transparência adequada para aplicação da técnica.

Destaca-se que para avaliar o comportamento do solo transparente desenvolvido é elaborado um programa experimental de caracterização. O

programa experimental, inclui: ensaios de caracterização física, ensaios de cisalhamento direto, ensaios de compressão confinada e ensaios de permeabilidade.

4.3.1 Seleção do material granular

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa de materiais granulares para investigar os possíveis candidatos a serem utilizados na fabricação de solos transparentes do trabalho. A princípio, afastou-se a possibilidade de utilizar o quartzo fundido, por não ter sido encontrado nenhum fabricante com elevada transparência do material no Brasil. O quartzo fundido é originado de rejeitos de outros processos de transformação, principalmente na indústria de lentes óticas, o que implica na ausência de cuidado por parte dos fabricantes com a transparência e a pureza do material.

Depois, analisou-se a possibilidade da utilização da sílica gel dessecante fornecida pela a empresa *Saraguagi Ind. e Com. LTDA*. Este tipo de sílica é muito aplicado: preservação de materiais de exportação em containers; agentes de fluidez para alimentos e medicamentos; proteção de peças e componentes eletroeletrônicos; armazenagem e aparelhos auditivos. A empresa comercializa, basicamente, as seguintes formas na cor branca: sílica gel perolada, sílica gel *semibead* e granulada angular, sendo a primeira semelhante a uma esfera; a segunda, um tipo intermediário que é uma sílica esférica quebrada ao meio e a terceira, semelhante ao formato de “sal grosso”, conforme a Figura 73.

Para finalizar, com o objetivo de avançar com os tipos de solos transparentes produzidos no Brasil, utilizou-se a sílica micronizada da *Grace Davison* para a modelagem de argilas. Geralmente, a sílica em pó é aplicada nas áreas relacionadas às tintas e aos vernizes industriais.

A Tabela 14 mostra os materiais testados na presente pesquisa com o respectivo tamanho médio das partículas, os respectivos fornecedores e o índice de refração a 25°C, segundo informações dos próprios fabricantes.

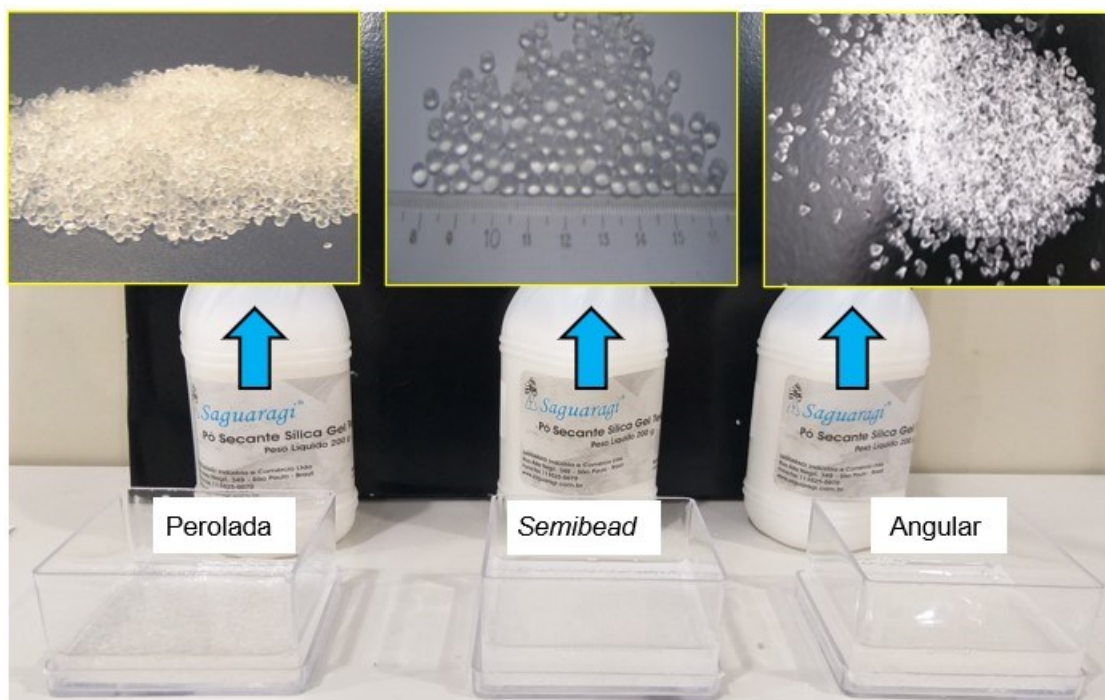


Figura 73 – Tipos de sílicas gel testadas.

Tabela 14 - Materiais Testados para a produção do solo transparente.

Material	Tamanho médio das Partículas	Fabricante	Índice de Refração (25°C)
Sílica gel angular	0,5 – 1,5 mm	<i>Saraguagi</i>	1,44
Sílica gel <i>semibead</i>	1 - 3 mm	<i>Saraguagi</i>	1,44
Sílica gel perolada	1 - 3 mm	<i>Saraguagi</i>	1,44
Sílica em pó	0,02 μ m	<i>Grace Davison</i>	1,44
Sílica gel reutilizada	0,5 – 1,5 mm	<i>Saraguagi</i>	1,44
Quartzo fundido reutilizado	1 - 3 mm	-	1,458

Vale ressaltar, que a sílica gel *semibead*, sílica gel perolada e a sílica em pó foram apenas testadas em termos de transparência e não foram avaliadas se apresentam as características geotécnicas adequadas para simular o comportamento do solo. Pois, como o objetivo do trabalho inclui a simulação de uma maciço arenoso, o material que apresenta o formato mais similar das areias naturais é a sílica gel angular.

4.3.2 Seleção de poro fluidos nacionais

O solo transparente consiste na saturação de um material granular por um poro fluido de mesmo índice de refração, ou seja, além da seleção de um material granular, é necessário escolher um poro fluido. Para a escolha do poro fluido, foi

necessário adotar uma série de critérios que o líquido não pode possuir, listados a seguir:

- volatilidade exagerada, pois gera mudanças na composição e mudanças no índice de refração com o tempo;
- alta viscosidade; pois pode alterar as propriedades geotécnicas necessárias para a representação do comportamento do solo;
- alto custo; pois gera inviabilidade econômica;
- risco potencial à saúde, devido à possibilidade de inalação de fumos tóxicos inflamáveis não compatíveis com os níveis de segurança para ambientes de laboratório;

4.3.2.1 Procedimentos para a seleção do poro fluido

O procedimento para a seleção do poro fluido consiste em medir o índice de refração do líquido, com auxílio de um refratômetro portátil do laboratório de solos transparentes da UENF, em condições normais de pressão e temperatura. E, depois comparar o valor do índice de refração do fluido com o índice de refração da sílica gel e do pó de sílica amorfa. Se o índice de refração medido do líquido for igual ao da sílica, conclui-se que este é o poro fluido ideal. Se não, faz-se necessário, para atingir os índices de refração desejáveis, trocar o fluido testado ou utilizar uma mistura de mais de um poro fluido.

As misturas para compor o solo transparente foram realizadas por tentativa e erro. Misturavam-se os óleos e media-se, com o auxílio do refratômetro, o IR da mistura. O processo era repetido até alcançar o IR desejado. Por fim, a relação de volume dos óleos utilizados era então registrada. Porém, quando não era obtido o índice de refração adequado trocava-se o fluido testado.

A determinação do índice de refração dos fluidos foi realizada com auxílio de um refratômetro portátil digital da marca QUISMIS, modelo Q7476 do LECIV/UENF, como mostrado na Figura 74. O refratômetro opera a leitura na faixa do sódio D com comprimento de onda de 587,3 nm.

Além disso, pode medir uma ampla gama de índices de refração que compreende a faixa de 1,3300 a 1,5600 com uma precisão de +- 0,0001 nD.

Destaca-se que todos os ensaios foram realizados em temperatura controlada de 25 °C.



Figura 74 - Refratômetro portátil do laboratório de solos transparentes do LECIV, Fonte: CARVALHO (2015).

4.3.3 Definição da mistura adequada para a produção do solo transparente

Na construção do solo transparente fez-se necessário a obtenção da mistura entre o grão sólido e o poro-fluido com transparência adequada. Os materiais utilizados nos testes de misturas são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Materiais utilizados e as misturas testadas para obtenção do solo transparente.

	Sílica gel reutilizada	Quartzo fundido	Sílica gel perolada	Sílica gel angular	Sílica <i>semibead</i>
Óleo para tochas "Garden Light")	x	x	x	x	x
Glicerina (Reagel)	x		x	x	x
Óleo mineral USP			x	x	x

Destaca-se, inclusive, que foram feitos testes com o intuito de verificar a reutilização de materiais disponíveis no laboratório.

A seguir descrevem-se os testes de misturas e os resultados obtidos:

- i. Primeiro teste: misturou-se a sílica gel angular, reutilizada de testes antigos realizados Laboratório de Solos Transparentes da Uenf, com o

- óleo de tocha "*Garden Light*". Verifica-se, nesta mistura, uma cor bem amarelada e a presença de bolha de ar (Figura 75 a).
- ii. Segundo teste: foi baseado no trabalho de Carvalho (2015) que propôs a produção de solos transparentes feito de sílica gel e uma mistura de dois poros fluidos – o óleo "*Garden Light*" e a glicerina na proporção de 67:33% em volume. Observa-se, neste ensaio, um solo mediamente opaco e a presença de bolhas de ar (Figura 75 b). Ressalta-se que a sílica também era reutilizada.
 - iii. Terceiro teste: misturou-se o quartzo fundido com óleo para tochas "*Garden Light*". O quartzo fundido estava disponível no Laboratório de solos transparentes da UENF, mas em pequena quantidade. Esse material foi utilizado por Carvalho (2015). Verifica-se, desta mistura, um material opaco e ausente de bolhas (Figura 75 c).
 - iv. Quarto teste: o quarto experimento, também baseado na proposta de Carvalho (2015), consistiu na combinação de sílica gel perolada com uma mistura constituída por 67% em volume de óleo "*Garden Light*" e 33% em volume de glicerina, da marca *Farmax*. O solo obtido possui média transparência e a presença de poucas bolhas (Figura 75 d).
 - v. Quinto teste: foi realizado misturando o óleo para tochas "*Garden Light*" e a glicerina "*Reagel*", na proporção 67% em volume de óleo para tochas "*Garden Light*" e 33% em volume de óleo glicerina "*Reagel*". Ao misturar os fluidos, foi constatada a segregação entre os óleos, além de se notar opacidade do material. Assim, ao acrescentar a sílica angular, os resultados mostram uma separação entre os fluidos e uma mistura não transparente (Figura 75 e).
 - vi. Sexto teste: consistiu na fusão de sílica gel angular com uma mistura constituída por 67% em volume de óleo mineral da USP e 33% em volume de óleo "*Garden Light*". A mistura mostrou uma imediata transparência, conforme a Figura 75 f, porém se torna acentuadamente amarelada com o tempo.
 - vii. Sétimo teste: esse teste foi feito com o intuito de analisar se a mistura anterior ficou amarelada devido à mistura dos óleos ou devido à volatilidade do óleo mineral da USP, misturou-se a sílica gel angular com apenas o óleo mineral da USP, o que resultou em uma mistura

medianamente transparente (Figura 75 g) e com um amarelado excessivo ao longo do tempo. Dessa maneira, descartou-se a possibilidade de utilizar o óleo mineral da USP, pois apresenta alterações no índice de refração com o tempo, indicando que é significativamente volátil.

- viii. Oitavo teste: foi feito misturando da sílica gel angular da *Saraguagi* com o óleo de tocha "*Garden Light*", obtendo uma mistura com boa transparência e, inicialmente, com bolhas de ar. As bolhas desaparecem após, aproximadamente, 24 horas (Figura 75 h). Esse resultado também é obtido para a sílica *semibead* e a sílica perolada.
- ix. Nono teste: nesse teste foi utilizado o pó de sílica, buscando a modelagem de argilas. Misturou-se a sílica em pó com uma parte em volume de óleo para tochas "*Garden Light*" e duas partes em volume de glicerina fornecida pela empresa "*Reage*". Observa-se uma mistura altamente opaca e uma segregação entre os óleos, em razão dos óleos apresentarem diferentes densidades.
- x. Décimo teste: seguindo o teste anterior, combinou-se apenas o óleo para tochas "*Garden Light*" e a sílica em pó, verificando-se uma mistura de boa transparência, presença de bolhas e uma dificuldade em regularizar superfície (Figura 75 i). Nota-se, na Figura 75, que para compor o solo transparente não é adequado:
 - reaproveitar os materiais já existentes no laboratório do LECIV;
 - utilizar como fluido a mistura óleo para tochas "*Garden Light*" com glicerina "*Reage*" por apresentar segregação entre os óleos e uma mistura com característica opaca; e
 - utilizar como fluido o óleo mineral da USP.

Observa-se, também, que a mistura composta por sílica gel com óleo para tochas e a outra mistura composta por sílica pó mais óleo para tochas demonstram, em termos de transparência, que são adequadas para compor o solo transparente, sendo que a primeira simula o comportamento das areias e a segunda, o comportamento das argilas.

A Tabela 16 resume os testes realizados e as principais observações.

Tabela 16 - Propriedades das misturas de óleos minerais com materiais utilizados para a fabricação de solos transparentes.

Teste	Óleo (s) minerais	(%) por volume	Proporção da Mistura	Índice de Refração da mistura	Material Sólido testado	Observações
1	Óleo para tochas "Garden Light"	100%	1	1,445	Sílica gel reaproveitada	Opaco médio/ Poucas Bolhas de ar
2	Óleo para tochas "Garden Light" + Glicerina "Farmax"	67% 33%	1:2	1,439	Sílica gel reaproveitada	Opaco médio/ Poucas bolhas de ar
3	Óleo para tochas "Garden Light"	100%	1	1,443	Quartzo fundido	Opaco / Sem Bolhas
4	Óleo para tochas "Garden Light" + Glicerina "Farmax"	67% 33%	1:2	1,445	Sílica gel perolada	Média transparência/ Poucas bolhas
5	Óleo para tochas "Garden Light") + Glicerina "Reage!"	67% 33%	1:2	1,439	Sílica gel angular	Opaco/ Poucas Bolhas/ Não foi registrado fotos
6	Óleo mineral USP + Óleo para tochas "Garden Light"	67% 33%	1:2	1,452	Sílica gel angular	Boa Transparência/ Volatilidade excessiva ficando amarelado com o tempo
7	Óleo mineral USP	100%	1	1,439	Sílica gel angular	Média Transparência/ Volatilidade excessiva ficando amarelado com o tempo
8	Óleo para tochas "Garden Light"	100%	1	1,443	Sílica gel angular	Melhor transparência / Poucas Bolhas
9	Óleo para tochas "Garden Light" + Glicerina "Reage!"	67% 33%	1:2	1,439	Sílica em pó	Altamente opaco/ Observou-se segregação entre os óleos
10	Óleo para tochas "Garden Light"	100 %	1	1,443	Sílica em pó	Boa Transparência/ Presença de bolhas /Difícil de regularizar superfície

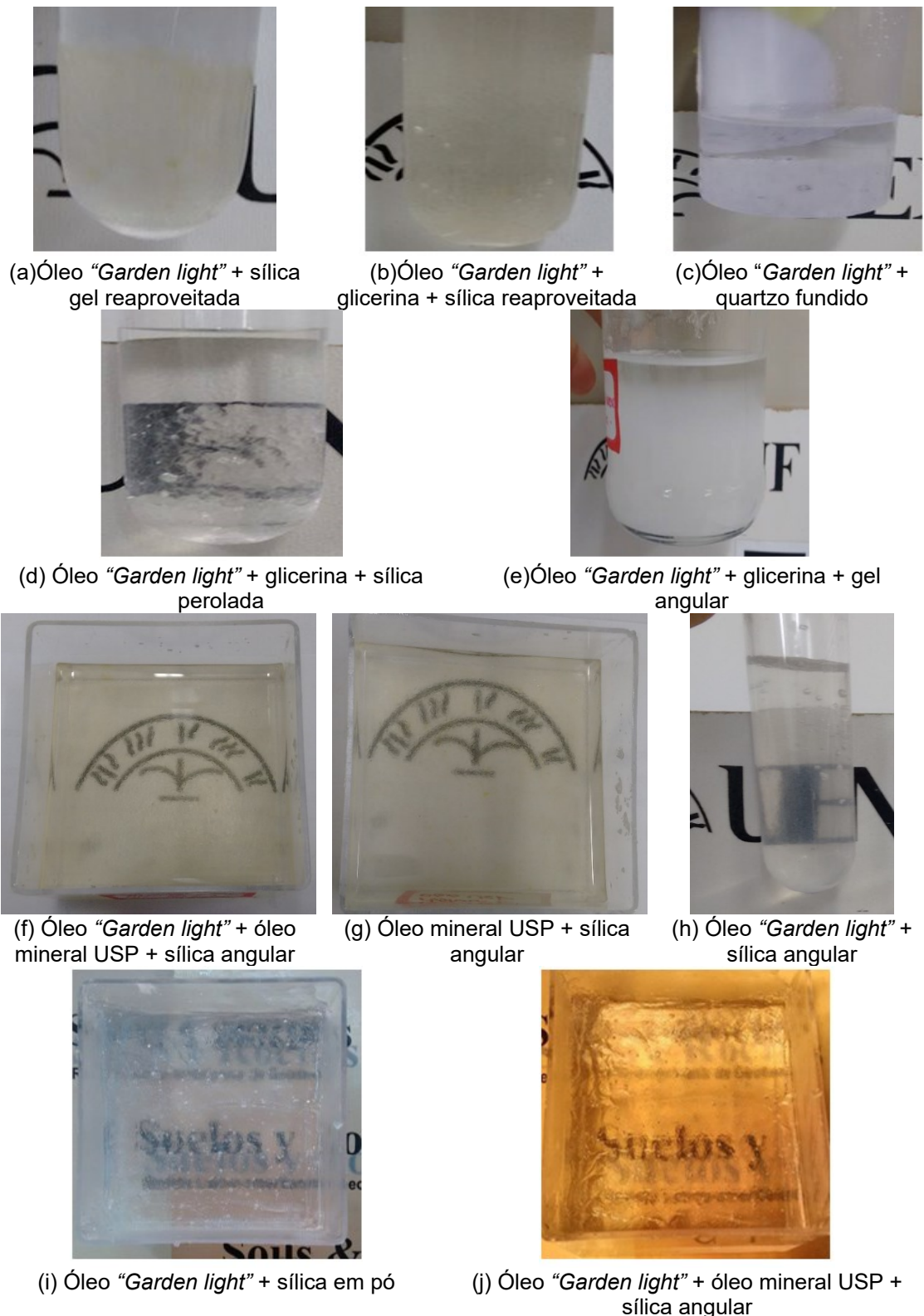


Figura 75 – Misturas realizadas para a produção do solo transparente.

Assim, com base nos dezessete fluidos para compor o solo transparente utilizado por CARVALHO (2015) e análises realizadas no presente trabalho, o óleo para tochas "Garden Light" misturado com a sílica gel foi escolhido para compor o solo transparente (Figura 76).

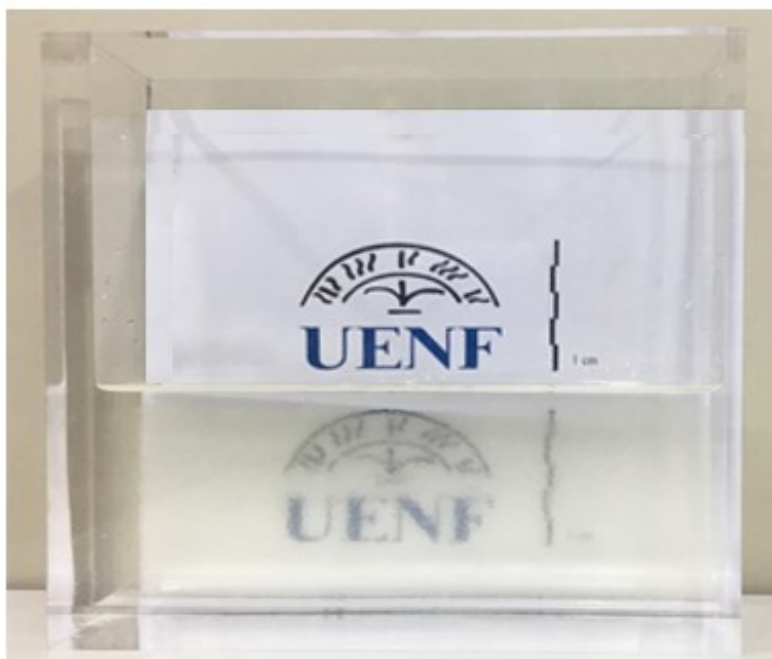


Figura 76 – Foto do símbolo da UENF visto por meio da caixa de ensaio de acrílico de 5 cm de espessura contido em seu interior o solo transparente feito de sílica gel com o poro fluido mineral “*Garden Light*”.

4.3.4 Propriedades físicas do solo transparente

Os parâmetros de caracterização física dos solos foram determinados a partir de amostras de sílica gel angular adquiridos pelo LECIV. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos do LECIV/UENF, e seguiram as especificações prescritas pelas seguintes normas da ABNT:

- NBR – 7181/88: Análise Granulométrica
- NBR – 6508-84: Peso específico dos grãos
- NBR 12004: Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos.
- NBR 12051: Solo: Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos.

4.3.5 Ensaio de compressão confinada

Os ensaios de compressão confinada foram executados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense nas prensas da marca Wykeham Farrance, modelo 2425. Nessas prensas, a carga axial é transmitida ao corpo de prova por pesos previamente calibrados, por meio de um braço de alavanca. As variações de altura do corpo de prova são registradas por

meio de um extensômetro com precisão de 0,01mm. A Figura 77 exhibe o equipamento utilizado.

Nos ensaios, os carregamentos são aplicados de forma incremental com tensão normal máxima de 1600 kPa. A drenagem é permitida nos limites superior e inferior e foi empregado papel filtro para impedir a colmatção da pedra porosa.

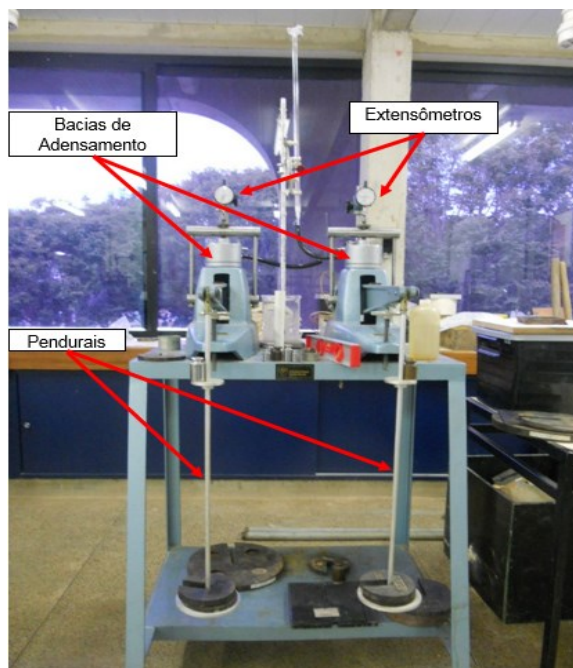


Figura 77 – Prensa utilizada para o ensaio de compressão confinada.

4.3.5.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados utilizando a sílica seca, saturadas com água e com óleo mineral. Para os ensaios saturados com óleo mineral e com água, os grãos de sílica gel foram saturados em um recipiente externo por 24 horas. Posteriormente, a sílica era colocada na bacia de adensamento e depois de 2 horas, com a saída do ar aprisionado, a mistura fica totalmente transparente (100% saturação).

4.3.6 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é muito utilizado em diferentes aplicações da engenharia geotécnica devido à sua simplicidade e sua repetibilidade. Normalmente, empregam-se os ensaios de cisalhamento direto nas areias para determinar o ângulo de atrito e a resistência ao cisalhamento das areias. E,

atualmente, existe uma gama de tamanhos de caixa de cisalhamento nos laboratórios geotécnicos.

Na presente tese, foram realizados ensaios de cisalhamento direto seguindo a metodologia da ASTM D3080 e utilizou-se o equipamento de ensaio de cisalhamento direto do Laboratório de Engenharia Civil da UENF com a caixa tradicional e com uma caixa modificada, que é capaz de preparar corpos de prova de formato circular.

A caixa de cisalhamento tradicional possui um formato quadrado com as dimensões iguais a 100x100x50mm (comprimento x largura x altura) e a caixa modificada possui as dimensões internas iguais a 50x50mm (diâmetro x altura). A caixa modificada, assim como a original, é dividida horizontalmente em duas metades, porém a caixa ainda sofreu algumas alterações. A caixa tem pequenos relevos a fim de evitar qualquer tipo de atrito durante a etapa de cisalhamento do ensaio que pudesse modificar os resultados. A Figura 78 apresenta detalhes da peça superior e inferior da caixa.

A caixa modificada foi fabricada, especificamente, para a presente pesquisa. A grande vantagem do formato do corpo de prova circular é sua menor dimensão, que agiliza a saturação dos corpos de prova com óleo e economiza material para a produção do solo transparente.

Nos ensaios realizados na caixa modifica, utilizaram-se corpos de prova, no estado denso, sob diferentes tensões normais iniciais: 50, 100 e 200 kPa. Tais corpos de prova foram preparados com a sílica seca, e saturadas com óleo mineral. Nos ensaios realizados na caixa tradicional, utilizaram-se corpos de prova, no estado denso e fofo, e preparadas com a sílica seca, saturadas com água e óleo.

A velocidade de deslocamento cisalhante utilizada foi igual a 0,5mm/min e foi aplicada na parte inferior da caixa, provocando o aparecimento de uma força tangencial na parte superior, mantida imóvel durante o ensaio. Esta velocidade foi determinada seguindo as recomendações de Gibson e Henkel (1954), de modo a garantir uma condição totalmente drenada durante a fase de cisalhamento.

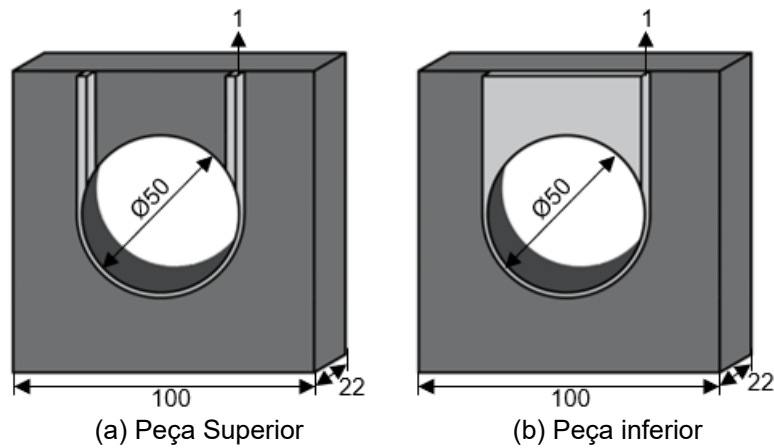


Figura 78 – Detalhes do projeto da parte superior da caixa de cisalhamento direto fabricada para a presente pesquisa. Obs. todas as medidas em mm.

Ressalta-se, que inicialmente a intenção era realizar os ensaios apenas na caixa modificada, porém identificou-se uma possível influência do tamanho das amostras nos resultados. Portanto, os ensaios foram repetidos na caixa capaz de moldar os corpos de prova no formato quadrado.

4.3.6.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados similarmente aos descritos para os ensaios de compressão confinada. A Figura 79 ilustra a sílica gel seca na caixa de cisalhamento circular preparada para iniciar a etapa de consolidação.



Figura 79 – Preparação da Sílica Gel seca na caixa de cisalhamento circular para iniciar a etapa de consolidação.

4.3.7 Ensaio de Permeabilidade

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade, foi realizado o ensaio de permeabilidade de carga constante com as amostras saturadas em água. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 13292 (1995), no laboratório de Engenharia Civil da Uenf.

4.3.8 Caixa de Ensaio

Para a realização dos ensaios é necessário um caixa de ensaio, onde o solo transparente é inserido. As dimensões da caixa foram escolhidas de tal forma que o tamanho do recipiente não influenciasse, significativamente, no comportamento do solo.

Para isso, consideraram-se alguns trabalhos: HIRD *et al.* (2011) realizaram a modelagem física de estacas helicoidais em argilas transparentes com o diâmetro de, aproximadamente, 12 mm, e o recipiente de ensaio utilizado possuía as seguintes dimensões: 100 x 50 x 180 (comprimento; largura; altura; mm). Os autores relatam que a largura do recipiente igual a 4D são dimensões menores do que gostariam, no entanto, a técnica tem esta limitação.

Em relação à altura da caixa de ensaio, KELLY (2014) relatou que, para colunas de brita de 18 mm de diâmetro, uma profundidade final de instalação de 220 mm ($> 12D$) foi considerada adequada para evitar efeitos de contorno na base, ou seja, a altura de projeto da caixa deve ter a altura maior que 12 vezes o diâmetro da estaca.

Portanto, para os modelos de trado de 12,5 mm de diâmetro externo (D), utilizados no presente estudo, adotou-se as dimensões internas da caixa de ensaio iguais a 200 (16D) x 50(4D) x 180(14,4D) (comprimento; largura; altura; mm), conforme a Figura 80. As dimensões são consideradas razoáveis para garantir que a fronteira tenha pouca influência sobre os resultados dos ensaios com as baixas tensões de confinamento. Além disso, a medida da largura do recipiente igual a 50 mm, assegura que o solo transparente ao ser colocado na caixa ensaio não perderá a transparência necessária no plano de maior dimensão da caixa, que é o plano de interesse conforme será descrito na seção 4.6.

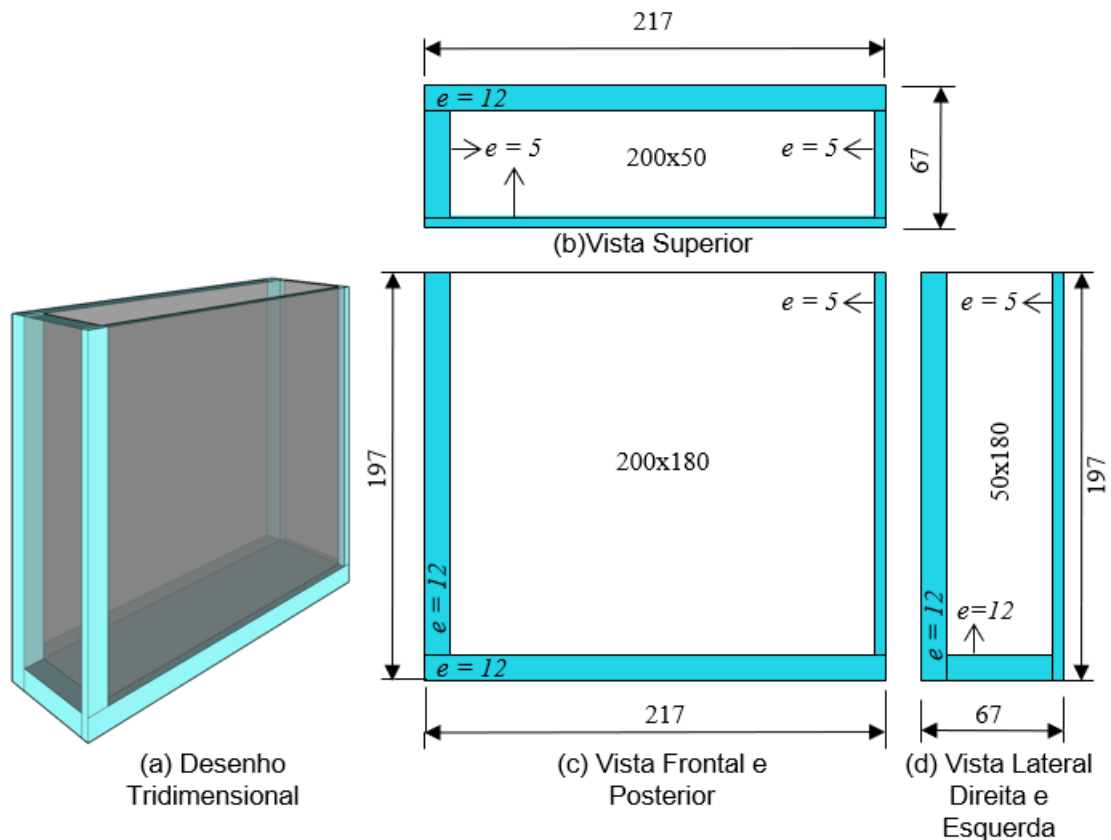


Figura 80 – Esquema da caixa ensaio de acrílico utilizada para a realização dos ensaios em solos transparentes. Obs. e = espessura das placas de acrílico; e todas as unidades estão em mm.

Verifica-se, na Figura 80, que a espessura das paredes lateral e frontal é reduzida para amenizar qualquer tipo de interferência, tanto onde o laser incide na caixa, na parede lateral, quanto na captura das imagens, na parede frontal.

Quanto ao material utilizado para fabricação da caixa, adotou-se o acrílico, que detém o índice de refração similar ao do solo transparente. Descartou-se a utilização do vidro temperado pois, segundo EZZEIN e BATHURST (2011), a qualidade das imagens do solo transparente depositado na caixa de vidro é reduzida.

4.3.9 Enchimento da caixa de ensaio

A metodologia mais utilizada para alcançar as densidades relativas desejadas consiste na pluviação de areias. O método baseia-se em lançar areia, em queda livre, com uma certa altura controlada. Santos (2009) relata que menores fluxos de areia com maiores alturas de queda resultam em densidades relativas

maiores, enquanto maiores fluxos de areia com menores alturas de queda resultam em densidades relativas menores.

Partindo desses conceitos, o enchimento da caixa de ensaio com a densidade relativa desejada passou por diferentes tentativas, devido à natureza do material transparente. O primeiro procedimento elaborado para o controle de densidade relativa dos ensaios, baseia-se em realizar a pluviação da sílica gel totalmente seca, controlando a altura de queda por meio de um pluviador e, em seguida, saturar a sílica por sucção em fluxo ascendente. Para isso, primeiramente utilizou-se um pluviador composto por um funil de alimentação do material ligado a um cano rígido, por onde o material granular descia por gravidade Figura 81.



Figura 81 – Pluviador desenvolvido

Posteriormente, para a saturação da sílica utilizou-se um sistema de sucção desenvolvido, apresentado na Figura 82. O sistema é composto por uma bomba de sucção adaptada a um recipiente intermediário, para que a bomba não succione nenhum material. Por sua vez, o recipiente intermediário é adaptado a caixa de ensaio, que é vedada por meio de uma tampa. Por fim, a parte inferior da caixa de ensaio, é ligada a um recipiente que armazena o óleo a ser succionado.

O sistema funcionou de maneira correta: a bomba de sucção é capaz de succionar o óleo da parte inferior até a parte superior da sílica gel depositada na caixa, porém esta metodologia não foi suficiente para a mistura se tornar transparente. Notou-se um excesso de bolhas de ar e que, mesmo mantendo a amostra sob vácuo por cerca de 12 horas, não ocorreu nenhuma redução de ar na amostra.

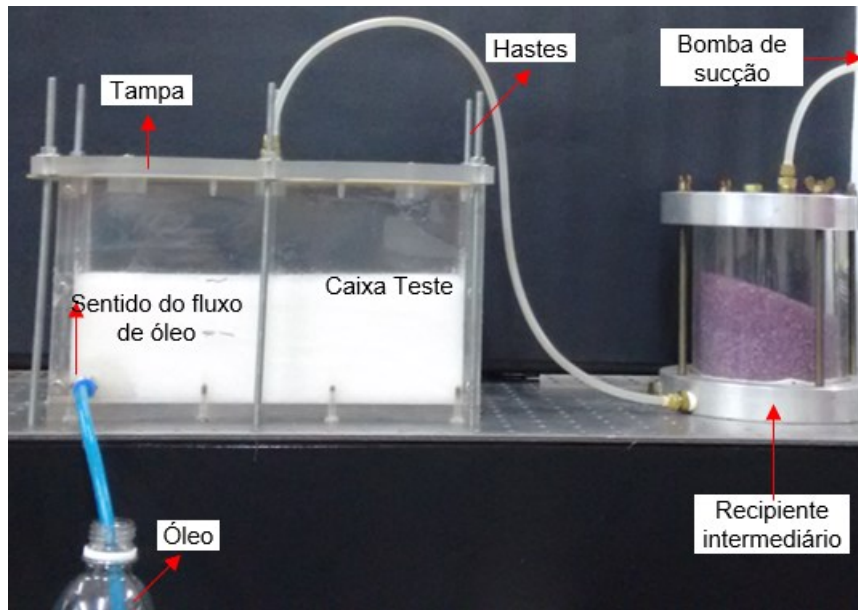


Figura 82 – Sistema de sucção desenvolvido para a saturação da sílica gel com óleo de baixo para cima.

Como não se obteve a saturação satisfatória foi alterado o procedimento de pluviação. A pluviação passou a ser feita com a amostra de sílica gel já saturada previamente por imersão no óleo, e não com a sílica seca. E posteriormente, fazia-se a saturação entre os grãos realizando o mesmo processo descrito anteriormente. Verificou-se, novamente, um excesso significativo de bolhas de ar. E que, mesmo mantendo-se a amostra sob vácuo, não foi possível tornar a amostra transparente.

Partiu-se, então, para outro procedimento, que consiste em realizar a pluviação da sílica gel já saturada com o pluviador (Figura 81) em pequenas camadas de óleo, porém, novamente, não se alcançou a saturação desejada. Observou-se, igualmente, um excesso significativo de bolhas de ar.

Portanto, conclui-se que as metodologias testadas não são satisfatórias; e ainda que o grande problema para a amostra não se tornar transparente é a altura de queda, que gera um impacto no óleo formando muitas bolhas de ar. A Tabela 17 apresenta um resumo dos procedimentos testados descritos.

Assim, depois dos diferentes procedimentos testados para a preparação do solo transparente na caixa de ensaio com a densidade relativa desejada, alcançou-se a metodologia mais adequada, que será descrita a seguir.

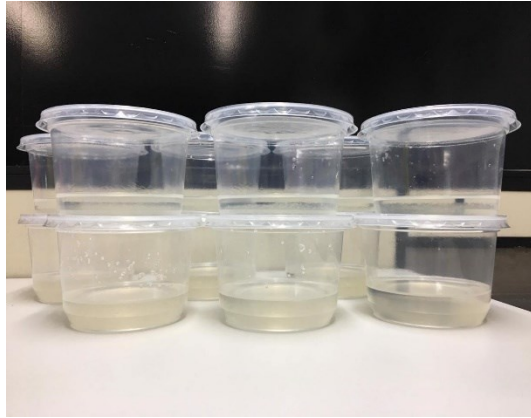
Tabela 17 – Resumo dos procedimentos testados para o preenchimento da caixa de ensaio acordo com a densidade relativa desejada.

Testes	Instrumento	Pluviação		Saturação	Resultado
		Amostra seca ou saturada previamente	Número de Camadas		
1	Pluviador desenvolvido	Seca	Camada única	sucção	Muitas bolhas de ar
2	Pluviador desenvolvido	Saturada previamente por imersão	Camada única	sucção	Muitas bolhas de ar
3	Pluviador desenvolvido	Saturada previamente por imersão	10 camadas de 1 cm de espessura	sucção por camada	Muitas bolhas de ar

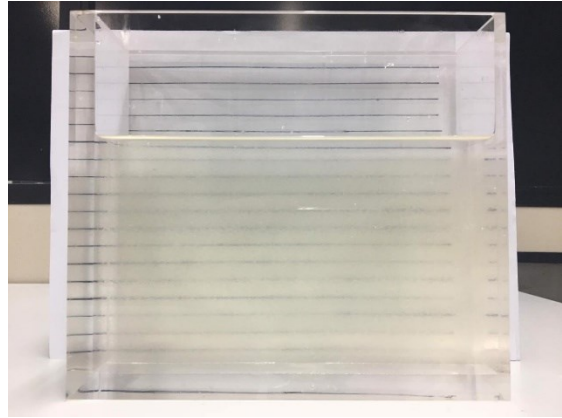
A preparação do solo transparente na caixa de ensaio inclui as seguintes etapas: primeiramente, faz-se a marcação da caixa de acrílico em 16 camadas de 1 cm de altura, por meio de um gabarito colocado atrás da caixa (Figura 83b). Posteriormente, pesa-se a sílica gel seca de acordo com o volume de cada camada e com a densidade relativa desejada; e coloca-se em recipientes separados (Figura 83a). Depois satura-se as amostras com o óleo por 24 horas; e por fim o solo transparente é cuidadosamente depositado na caixa com altura controlada.

Ao longo do enchimento da caixa, verificava-se se cada porção de material pesado está preenchendo cada uma das camadas do gabarito colocado atrás da caixa (Figura 83b). Além disso, durante o processo de preenchimento da caixa, surgiam bolhas de ar dentro no material que eram retiradas utilizando uma pipeta graduada. Essa retirada das bolhas de ar é extremamente laboriosa e essencial para o sucesso dos ensaios, pois a permanência delas, pode causar interferência na transmissividade do laser dentro do modelo.

Destaca-se, que os procedimentos descritos para a preparação do solo transparente na caixa são similares aos utilizados por FERREIRA e ZORNBERG (2015).



(a) Separação do material em recipientes



(b) Enchimento da caixa de ensaio com a guia

Figura 83 - Preparação da amostra de solo transparente e enchimento do container

No final dos ensaios, é possível fazer o reaproveitamento da sílica gel e do poro fluido. O reaproveitamento é válido, pois os materiais têm alto custo. Além disso, é ecologicamente correto, visto que, o óleo e a sílica gel, quando descartados de forma inadequada, podem contaminar o meio ambiente.

Para a reutilização, o material é peneirado para retirada do excesso de óleo e todo o procedimento de preparação do solo transparente e de enchimento da caixa de ensaio é repetido. Porém, utiliza-se como base para o cálculo da massa necessária para cada camada o peso específico saturado do solo transparente. Para os ensaios realizados, o solo é utilizado, no máximo, duas vezes para não ter maiores possibilidade de contaminação e, assim, não afetar transmissividade do laser dentro do modelo. Tal contaminação, pode ocorrer devido a sensibilidade do solo a variação de temperatura e impurezas que inevitavelmente entram em contato com solo transparente ao longo de sua deposição na caixa.

4.4 Sistemas de Cravação do Trado

Nesta seção será detalhada os instrumentos desenvolvidos para constituir o sistema de cravação utilizado na modelagem. Cita-se: suporte para o atuador; sistema para o controle de velocidade de rotação do trado; sistema para o controle de velocidade de subida e descida do trado; acoplador rígido, trado e guia.

4.4.1 Suporte para o Atuador

O suporte para o atuador, que é responsável para o controle da velocidade de descida e subida do trado, é constituído por uma base quadrada inferior, com comprimento igual a 50 cm, largura igual a 50 cm e espessura igual a 6 cm, e uma base superior de mesmo tamanho, conforme observa-se na Figura 106. A base inferior possui, ainda, uma abertura central que permite a passagem do atuador linear.

As bases são conectadas por meio de quatro hastes rosqueáveis, que ficam localizadas na quina da base inferior até os cantos da base superior. As hastes permitem controlar exatamente a altura da base superior em relação à inferior.

4.4.2 Controlando o motor de Passo com Arduino

Para a simulação do processo executivo das estacas do tipo hélice contínua, é imprescindível o controle de velocidade do avanço do trado, do giro do trado e da velocidade da retirada do trado. Para isso, foram desenvolvidos dois sistemas independentes.

O primeiro sistema tem como objetivo controlar a velocidade de giro do trado e é composto por uma fonte, um Arduino Nano, um Driver DRV8825 e um motor de passo. O segundo sistema tem como finalidade controlar a velocidade de descida e de subida do trado e é constituído por uma fonte, um Arduino Uno, um Driver DRV8825, um motor de passo e um computador.

Esses tipos de sistemas são muito utilizados para projetos de impressoras 3D e equipamentos para automação. Nas seções 4.4.2.1 e 4.4.2.2 serão descritos como é realizada a montagem dos dois sistemas desenvolvidos.

4.4.2.1 Sistema para o controle de velocidade de rotação do trado

O primeiro sistema, ilustrado na Figura 84, é constituído por uma fonte, um Arduino Nano, um Driver DRV8825, um motor de passo NEMA 17 e um computador. De forma esquemática, a Figura 85 apresenta um diagrama com todas as ligações.

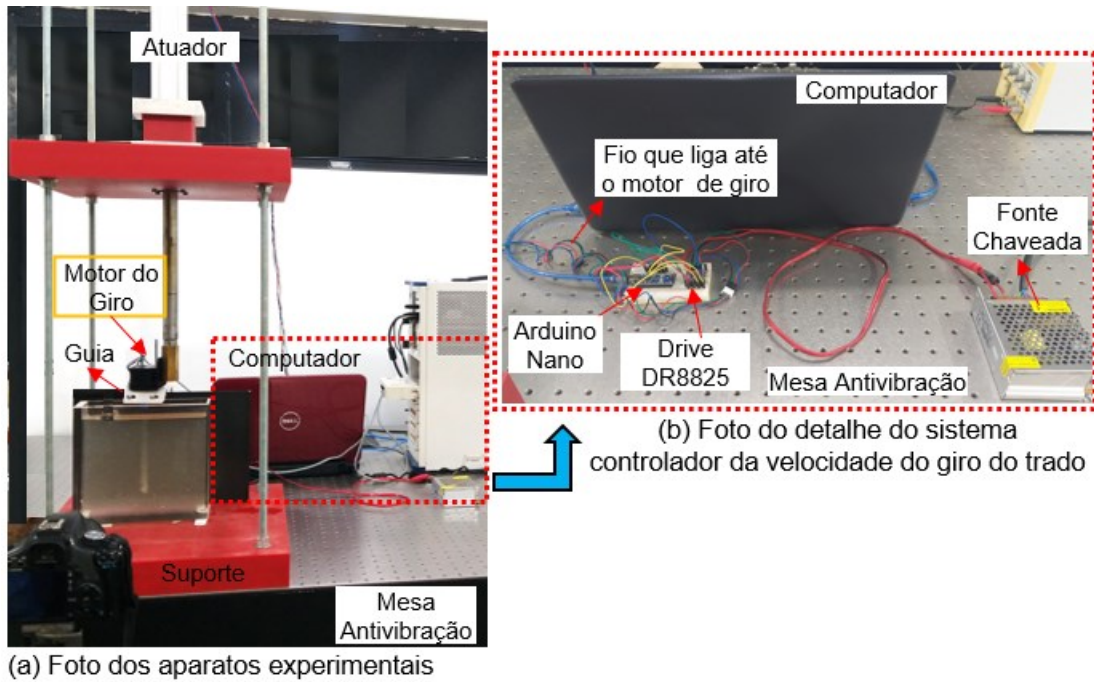


Figura 84 – Foto do aparato experimental

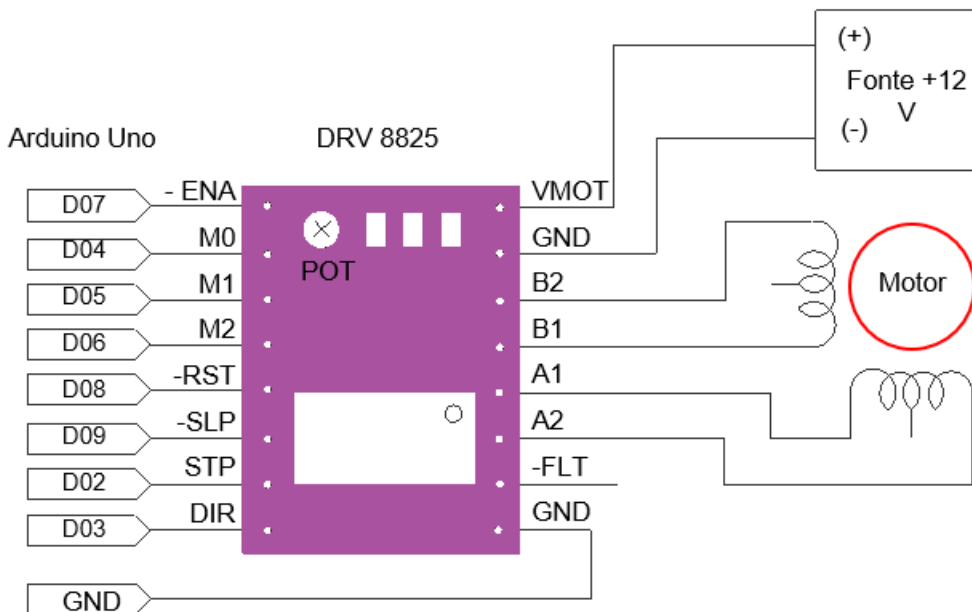


Figura 85 - Esquema de ligações entre as portas digitais do Arduino Uno, o motor de passo, o Módulo DRV 8825 e a fonte.

A fonte utilizada é do tipo regulável de corrente e com voltagem variando de 0 a 30 volts. A fonte é responsável por fornecer a alimentação para o sistema e é ligada ao drive DRV 8825.

O drive DRV8825, ilustrado na Figura 86, é fabricado pela *Texas Instruments* e usa uma tecnologia bem avançada. O driver suporta correntes de até 2,5 Amperes, com dissipador de calor, e pode ser usado apenas com motores de

passo bipolares. Além disso, o módulo driver DRV8825 permite diferentes modos de micropassos e ainda possui um potenciômetro de ajuste de corrente máxima. Se a corrente exceder o limite, o chip é desativado para proteção dos circuitos.

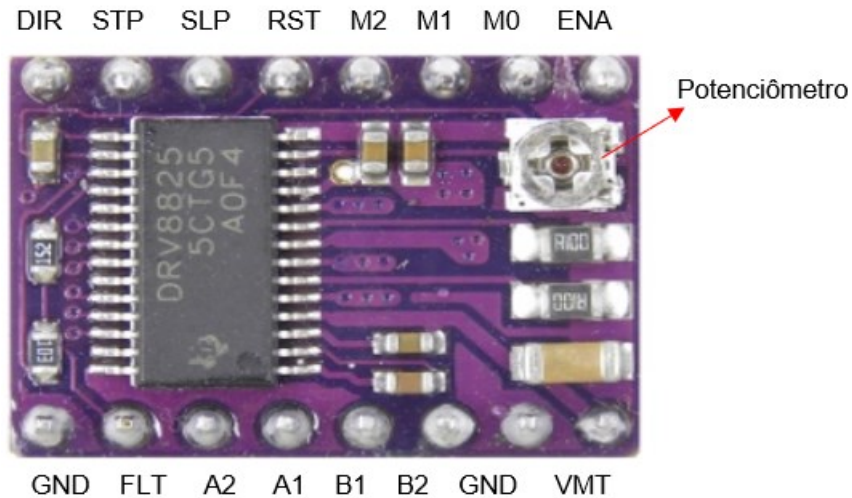


Figura 86 - DRV8825 com a identificação dos pinos.

Antes de fazer os testes no Módulo DRV8825, faz-se o ajuste de corrente para se adequar ao motor de passo, cuja corrente ideal é igual a 1 ampere. O ajuste de corrente é feito através do potenciômetro (Figura 86) e utiliza-se a Equação (9) para calcular a corrente do driver (TEXAS INSTRUMENTS, 2014):

$$I = VREF / 5 \times R \text{ Sense} \quad (9)$$

onde I é a corrente, $R \text{ Sense}$ tem valor de $0,10 \Omega$ para o DRV8825 e $VREF$ é a voltagem de referência que pode variar entre 0 e 3,3 volts.

O $VREF$ determina a corrente no motor, portanto aplica-se uma tensão de 0,5 V por meio de um ajuste no potenciômetro e obtém-se a corrente de 1 ampere, desejada. Os ajustes no potenciômetro são realizados com instrumentos de precisão e com cuidado, conforme ilustrado na Figura 87.

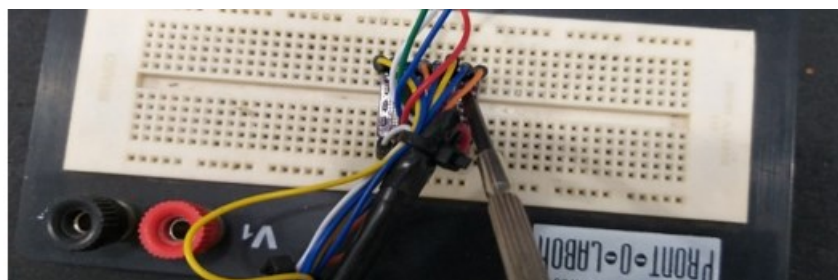


Figura 87 – Procedimento para o ajuste de corrente.

Após o ajuste de corrente, faz-se a ligação do DRV 8825 ao Arduino Nano e ao motor de passo NEMA 17. A tensão do motor utilizada foi de 12 volts e a corrente, de 1 ampere. Cada passo tem 1,8°, portanto, para dar uma volta, são necessários 200 passos. O motor com quatro fios ou mais poderia ser utilizado desde que no modo bipolar série ou bipolar paralelo, respeitando a corrente máxima do motor.

Para validar a funcionalidade do sistema desenvolvido, é imprescindível realizar um ensaio, apresentado na Figura 88. Observando-se a Figura 88, percebe-se que o programa desenvolvido oferece uma boa acurácia da frequência de rotação do motor, portanto o sistema é eficiente para o controle da velocidade de rotação do processo de cravação simulada.

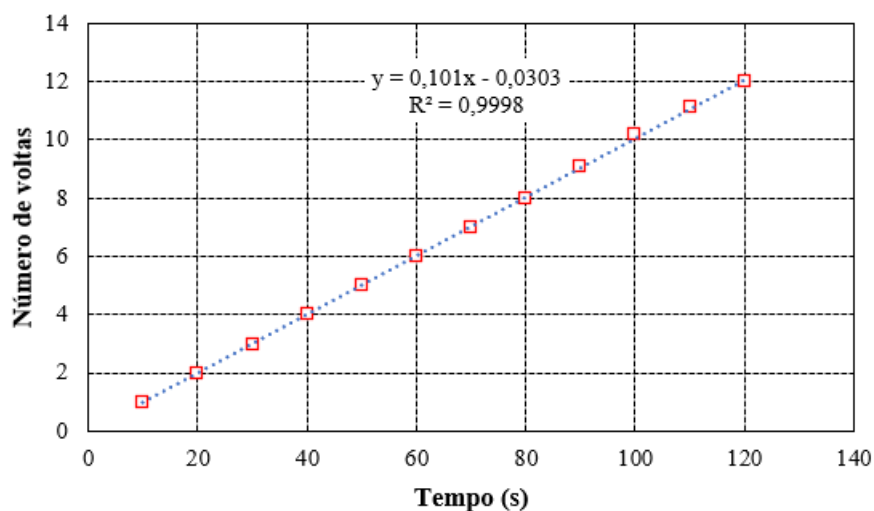


Figura 88 – Ensaio de calibração do motor de passo controlador do giro do trado.

Suporte para apoio do motor de giro

Para a fixação confiável do motor controlador do giro do trado, adaptou-se um suporte em L, conforme é apresentado na Figura 89. Fixa-se o motor no suporte com parafusos, arruelas e porcas e, para a fixação na ponta do atuador abre-se um furo, no suporte em L, para ser possível passar um parafuso que enrosca na extremidade do atuador (Figura 89).

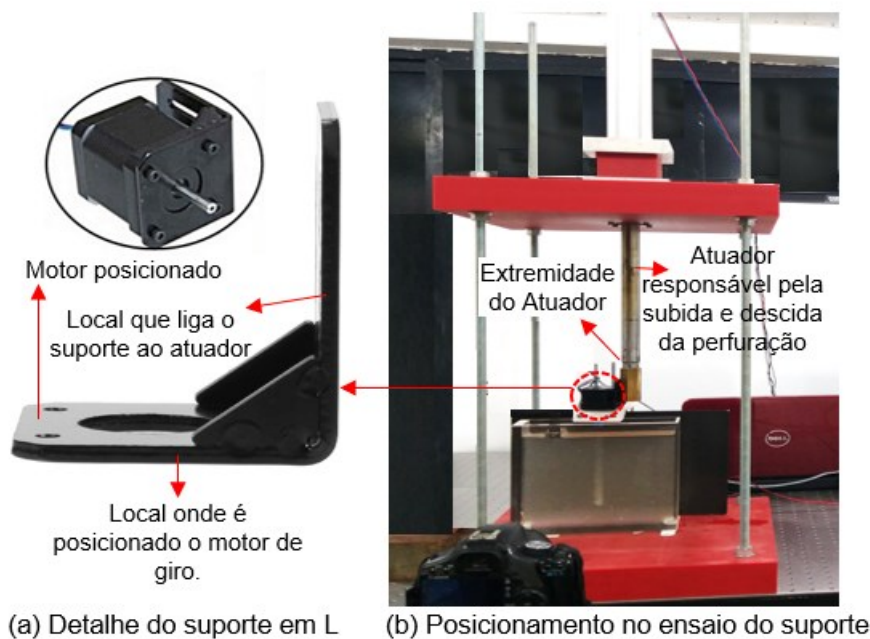


Figura 89- Aparato experimental do ensaio.

4.4.2.2 Sistema para o controle de velocidade de subida e descida do trado

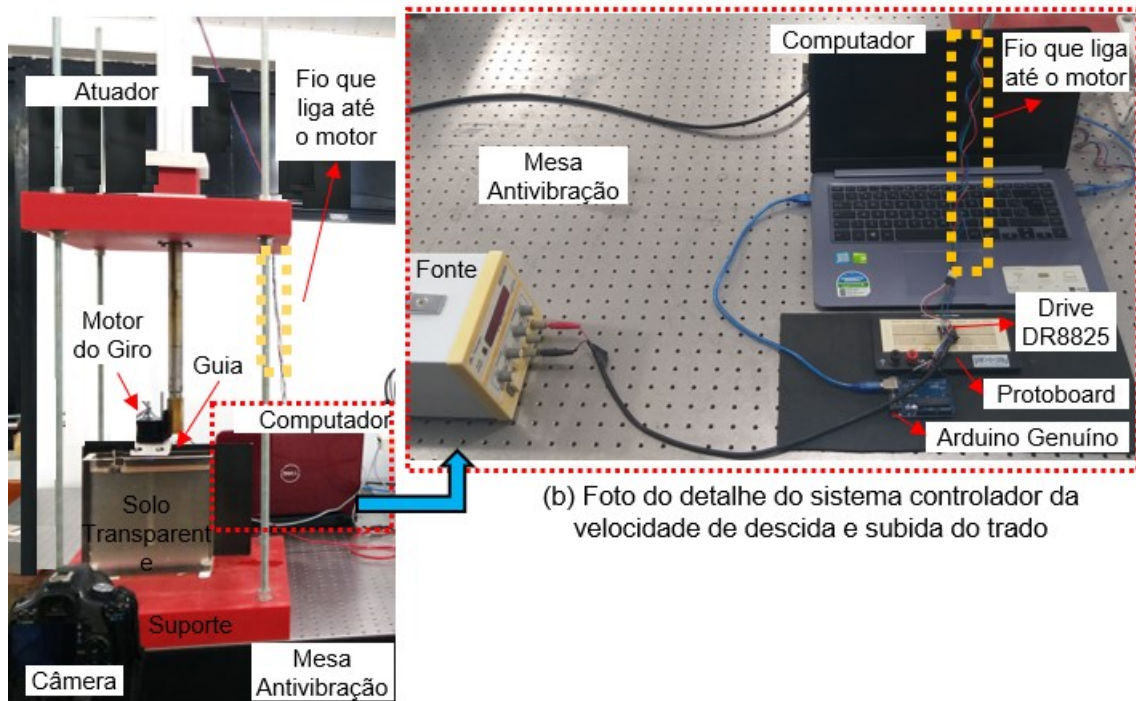
O segundo sistema montado visa controlar a velocidade de descida e de subida do trado e é diferente do primeiro por utilizar uma fonte chaveada do tipo colmeia ao invés da fonte regulável e um Arduino Uno ao invés do Arduino Nano, conforme é apresentado na Figura 90.

A fonte chaveada é preferida por apresentar baixo custo e o Arduino Uno é utilizado neste sistema, devido ao laboratório já possuir a ferramenta. Portanto, as diferenças entre os sistemas desenvolvidos foram motivadas apenas por questões econômicas, no entanto ambas as ferramentas utilizadas apresentam funcionalidades e eficiências adequadas com suas respectivas aplicações.

Para validar a funcionalidade do programa desenvolvido é necessário realizar um ensaio, conforme é apresentado na Figura 91. Observando-se a Figura 91, verifica-se que o programa apresenta com acurácia a distância percorrida de acordo com o intervalo de tempo.

Os Anexos B e C apresentam os programas carregados nos Arduinos, para o sistema um e dois, respectivamente. Os programas permitem a escolha da frequência dos pulsos, da quantidade de passos, do tempo de rotação e da velocidade de rotação. Os programas são muito similares, porém o código para

o sistema dois, que controla a subida e descida do atuador, possibilita habilitar o motor tanto para o sentido horário quanto o sentido anti-horário.



(a) Foto dos aparatos experimentais

(b) Foto do detalhe do sistema controlador da velocidade de descida e subida do trado

Figura 90 - Foto dos aparatos experimentais.

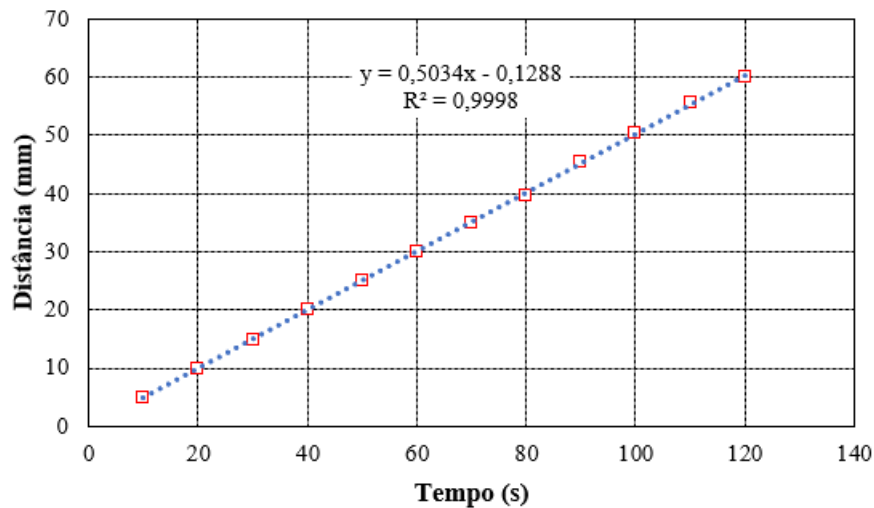


Figura 91 – Curva de calibração para o motor de passo controlador da subida e descida do atuador.

Suporte para apoio do motor controlador da velocidade de subida e descida do trado

Para a fixação segura do motor controlador da velocidade de subida e de descida do atuador, foi preciso produzir uma peça de fixação com as mesmas dimensões

da cabeça do atuador, conforme a Figura 92. A peça é, basicamente, uma placa de PVC fina onde o motor é fixado por parafusos de baixo para cima na placa de PVC e para fixar a placa no atuador utiliza-se parafusos de cima para baixo, conforme a Figura 92.

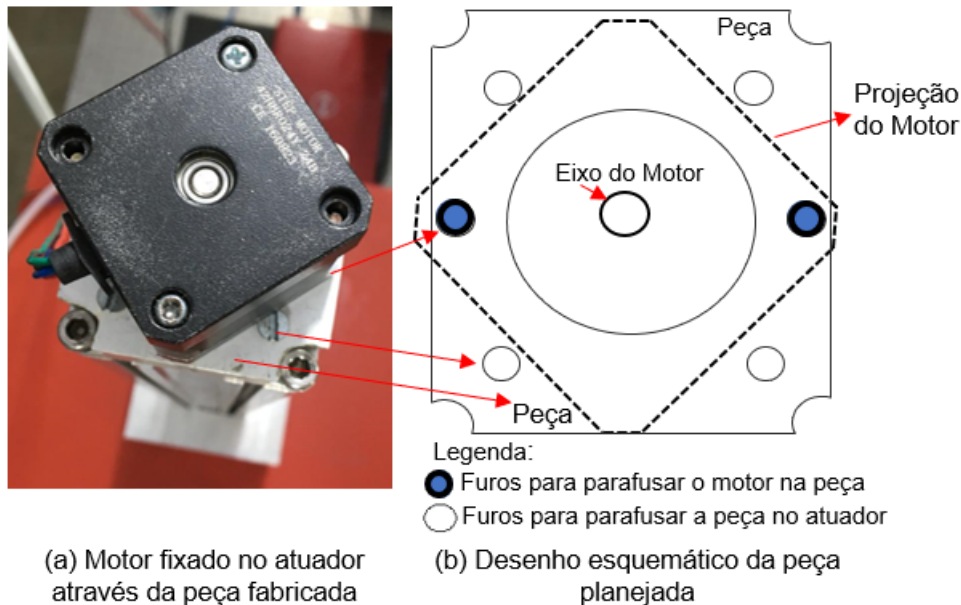


Figura 92 – Suporte para apoio do motor controlador da velocidade de subida e descida do trado

4.4.3 Trado

A fabricação do trado para gerar resultados representativos e confiáveis passou por uma série de tentativas, citadas a seguir:

- Impressão 3D utilizando a técnica de stereolitografia.
- Impressão 3D do trado oco e introdução de uma haste maciça de metal no diâmetro interno do trado;
- Impressão 3D do trado oco e introdução de vareta maciça em fibra carbono no diâmetro interno do trado;

Para as duas últimas alternativas listadas, os processos de construção foram divididos nas seguintes etapas: projeto dos trados; impressão 3D, montagem, introdução do elemento rígido e acabamento. Assim sendo, a única etapa diferenciada, para os dois últimos métodos construtivos citados, é a etapa de

introdução do elemento rígido. A seguir será descrito cada uma dessas etapas e a técnica de impressão 3D utilizando stereolitografia.

4.4.3.1 Impressão 3D utilizando a técnica de stereolitografia.

Uma das técnicas testadas para a fabricação dos trados foi a utilização da tecnologia de impressão 3D stereolitografia. A técnica produz objetos por meio de uma resina líquida fotopolimerizável que é solidificada em regiões pré-determinadas pelo software, camada a camada, empregando um laser UV ou luz UV projetada. Essa tecnologia produz peças com grande nível de detalhes, indicado para produção de joias, protótipos de próteses odontológicas, moldes, esculturas e peças com necessidade de grande nível de detalhes com o melhor custo/benefício. As peças são altamente precisas e com acabamento liso e podem ser produzidas em resinas de alta resistência, grande rigidez, translúcidas ou calcináveis para fundição.

O primeiro passo para aplicação da técnica foi fazer o projeto das peças, no caso os modelos do trado, em um programa gráfico, conforme a Figura 93. Depois, procurou-se no mercado um fabricante da técnica. Por fim, realizou-se a fabricação do trado, conforme é exibido na Figura 94.

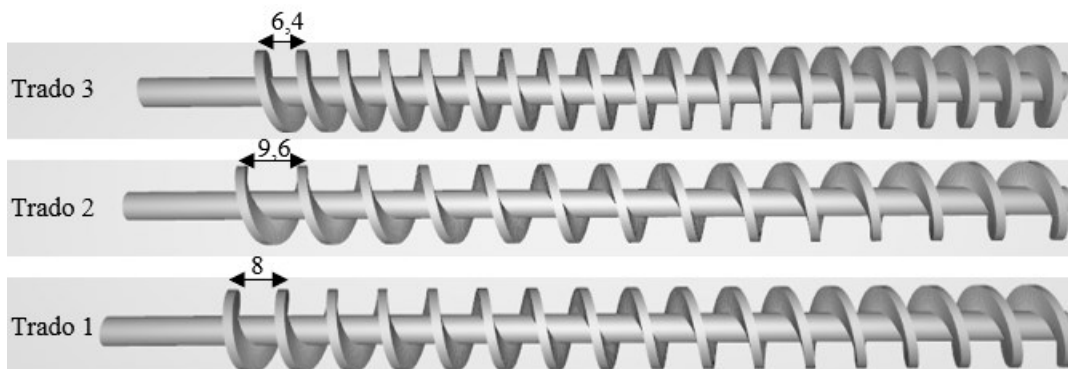


Figura 93 – Modelos dos trados em programa gráfico.

Após a fabricação, iniciaram-se os ensaios preliminares e verificou-se que o trado, em uma determinada profundidade da cravação, começava a fletir, indicando que o material utilizado não foi suficiente para dar a rigidez necessária para os ensaios (Figura 95). Portanto, descartou-se a utilização dessa técnica e utilizou-se as técnicas que serão descritas posteriormente.

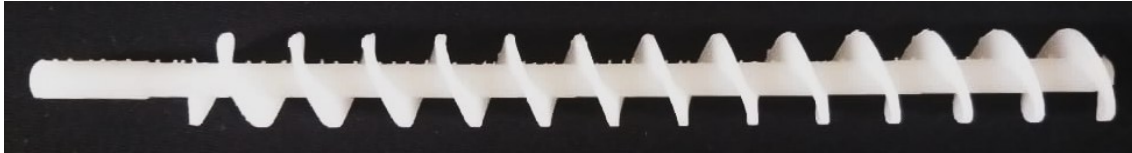


Figura 94 – Modelo de Trado fabricado em resina líquida fotopolimerizável

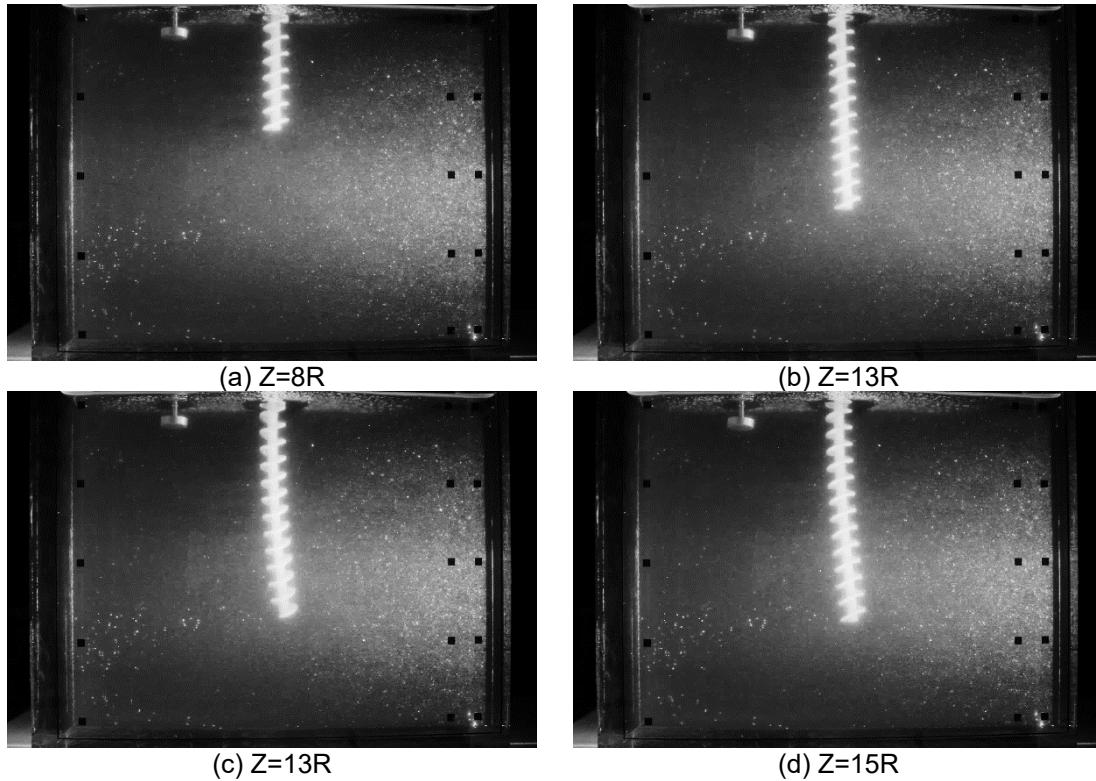


Figura 95 - Fotos do ensaio utilizando o modelo de trado fabricado em resina líquida fotopolimerizável.

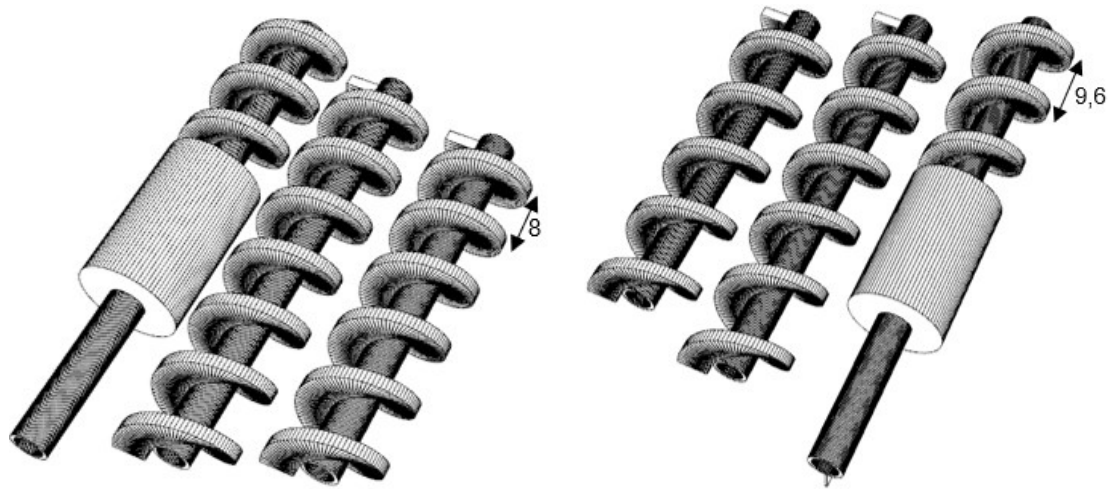
4.4.3.2 Impressão 3D do trado oco e introdução de uma haste maciça de metal /ou vareta de carbono no diâmetro interno do trado

Nesta seção, é descrito os processos de construção dos trados reforçador por um elemento rígido que foram divididos nas seguintes etapas: projeto dos trados; impressão 3D, montagem, introdução do elemento rígido e acabamento.

Projetos dos Trados

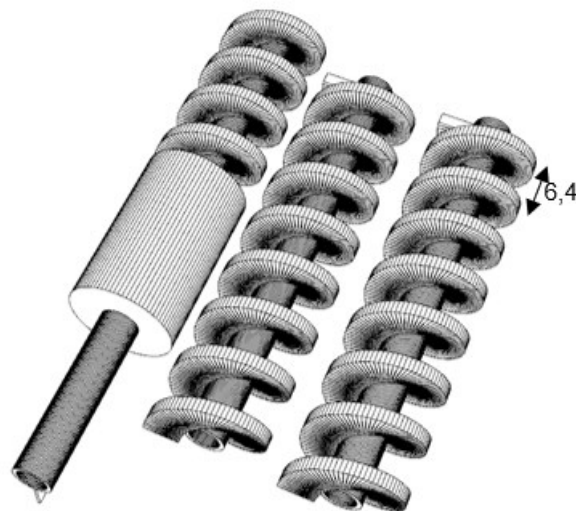
Para ser possível a impressão do trado, o primeiro passo foi realizar o projeto do desenho do trado no *SketchUp*, na versão livre, observando os parâmetros do programa para que o processo de impressão fosse facilitado. No *SketchUP*, foram realizados 3 tipos de projetos de trado diferentes, conforme descrito na seção 4.1 e mostrado na Figura 96. Ressalta-se que os trados são ocos, para posteriormente a impressão, ser possível introduzir um elemento central para

enrijecer a peça impressa, e assim ser capaz de suportar os esforços durante os ensaios.



a) Projeto 3D do trado tipo 1

(b) Projeto 3D do trado tipo 2



(c) Projeto 3D do trado tipo 3

Figura 96 – Projetos 3D dos três tipos de trado utilizados nos ensaios.

Após a realização dos projetos no *SketchUp*, foi preciso instalar a extensão *SketchUp* STL, pois a impressão exige que o arquivo esteja em formato STL. O formato de arquivo STL é o mais comum usado na comunidade de impressão em 3D e facilita o compartilhamento, a impressão e a edição dos projetos.

Impressão 3D

A segunda etapa para a produção dos trados consiste nas impressões. Para isso, procedeu-se à calibração dos pontos da impressora 3D, conforme o Anexo

D. Posteriormente, foram definidos os parâmetros de impressão, conforme é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros utilizados para impressão

Parâmetro	Valor
Espessura de cada camada impressa	0,15 mm
Intervalo de geração de suporte densa	30°
Camadas no início da impressão	6 Layers
Camadas serão criadas para a geração de apoio	6 Layers
Superfície de apoio	3 mm ²
Modo	Shell

A impressora 3D utilizada é do tipo Akad.3D (Impressora 3D UP); que possui volume de construção (mm) igual a 140L X 140L X 135P; espessura de camadas (mm) igual a 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35 e 0,4; e tecnologia de suporte inteligente, ou seja, estrutura de suporte gerada automaticamente e de fácil remoção. O material utilizado é um filamento de 1,75 mm ABS branco, o que gera uma impressão compacta e de alta qualidade. A Figura 97 ilustra as etapas do processo de impressão.

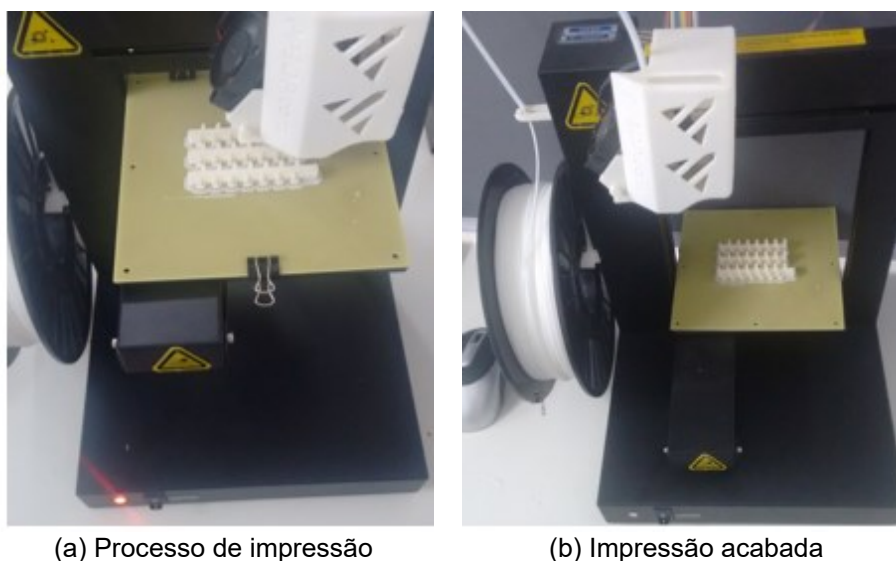


Figura 97 – Processo de fabricação do trado na impressora 3D do Laboratório de Solos Transparentes da Uenf.

Montagem

Após a impressão, destacava-se as impressões do suporte e retirava-se as hastes que a impressora cria de suporte. Então, as três partes de cada trado foram coladas com Araldite em uma haste oca de metal que passava no diâmetro

interno dos trados impressos. A Figura 98 ilustra a impressão acaba e o trado montado.

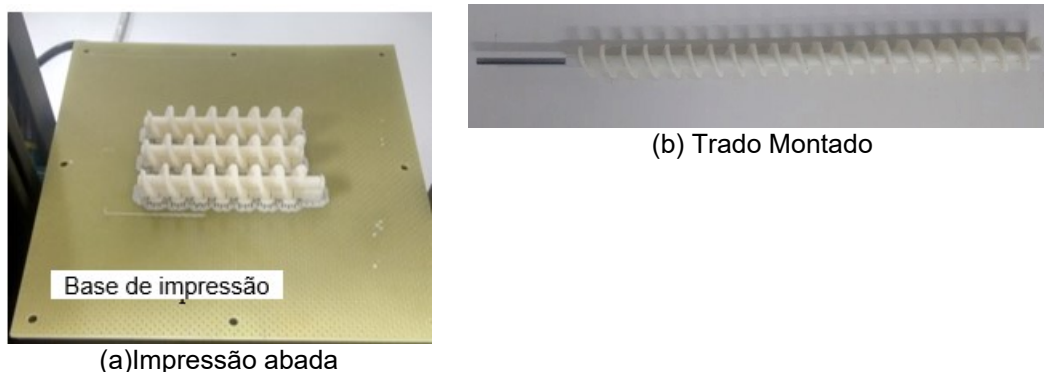


Figura 98 – Processo de fabricação do trado na impressora 3D do Laboratório de Solos Transparentes da Uenf

Introdução do elemento rígido

Em ensaios preliminares, observou-se, uma rotação do trado significativa fora do eixo, o que pode alterar a eficiência da cravação do trado e o campo de deslocamento do solo. Portanto, fez-se necessário a introdução de um elemento rígido na haste oca de metal do trado.

A primeira alternativa escolhida foi inserir uma haste maciça de metal na haste oca de metal do trado montado, para aumentar a rigidez e a massa do trado. No entanto, com ensaios testes no solo transparente, ainda se constatou uma rotação significativa fora do eixo.

Diante disso, partiu-se para uma outra opção que foi colocar uma vareta maciça em fibra carbono de 3 mm na haste oca do trado ao invés de uma haste de aço, conforme feito anteriormente. A vareta de fibra carbono foi escolhida por ser um material rígido, ou seja, é um material que se deforma muito pouco antes de se romper. Portanto, depois da montagem do trado reforçado com a vareta de carbono, foram feitos ensaios testes para avaliar a verticalidade do trado e, se o giro dele permanece no eixo central. Assim sendo, conclui-se que a técnica é apropriada para a realização dos ensaios.

Acabamento

Ao final das montagens dos trados e dos ensaios testes, os trados reforçados com a vareta de carbono, passaram por um bom acabamento. O acabamento foi

feito lixando os trados, com lixas finas e mais grossas, e por fim, fez-se uma pintura na cor bronze e depois na cor branca; conforme é apresentado na Figura 99.

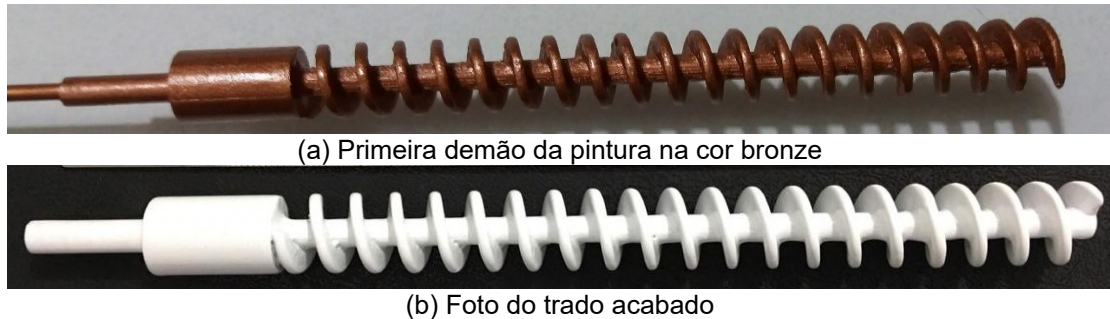


Figura 99 – Foto da pintura dos trados.

4.4.4 Acoplador de eixo rígido

Para o acoplamento dos diferentes trados no eixo do motor de passo, que controla a velocidade de giro, utiliza-se um acoplador rígido de alumínio, ideal para motores de alto torque e diferentes velocidades de rotação (Figura 100).

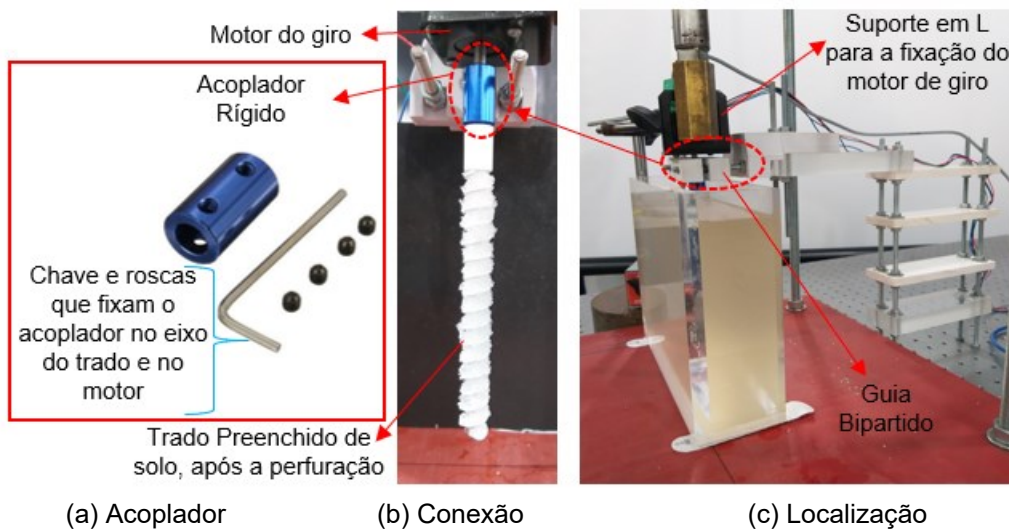


Figura 100 – Foto do Acoplador Rígido

O acoplamento rígido consiste em um cilindro oco com aberturas na extremidade de 5 mm. Assim, um furo encaixa no motor de passo e o outro furo encaixa na extremidade do trado. Destaca-se que cada eixo é fixado no furo por meio de dois pequenos parafusos laterais, que regulam a fixação dos eixos no acoplador.

4.4.5 Guia

Para garantir o posicionamento inicial do trado nos ensaios, decidiu-se produzir um guia. O primeiro guia desenvolvido consistiu em cortar, com precisão, uma espuma de densidade alta, cuja dimensão lateral se encaixava de forma apertada na lateral da abertura da caixa. Na parte central da espuma, inseriu-se uma peça fabricada na impressora 3D com diâmetro interno de dimensão 10% mais larga que o diâmetro externo do trado (Figura 101).

A peça não permitiria, portanto, na descida do trado ou na sua subida, que o trado saísse do eixo. Verificou-se, no entanto, que a guia projetada dessa maneira, não foi suficiente para manter o alinhamento do trado durante o processo de cravação do trado.

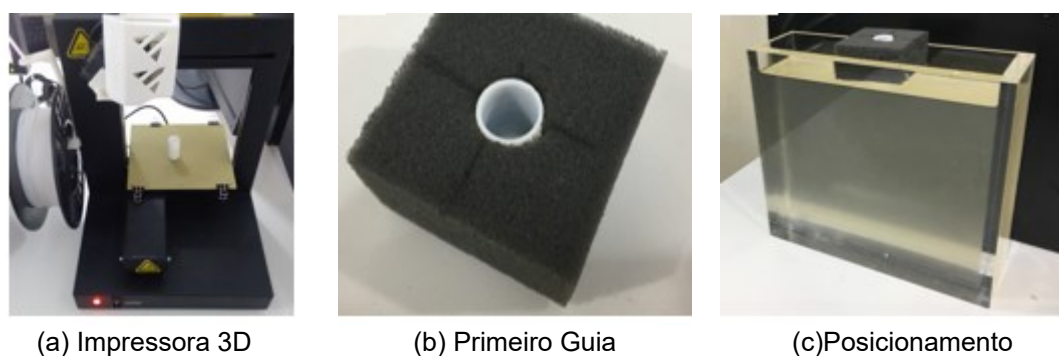


Figura 101 – Ilustração do primeiro guia idealizado.

Fez-se necessário a construção de um guia bipartido rígido, ilustrado na Figura 102. Para esse fim, o primeiro passo foi realizar o projeto do guia no *SketchUp*, e depois foi imprimir o guia na impressora 3D do Laboratório de Solos Transparentes da Uenf.

Para apoiar o guia bipartido na parte superior central da caixa, foi feito um suporte que consistiu em placas de PVC rígidas fixadas, espaçadamente, por hastes rosqueáveis e porcas, que passavam por todas as placas, mais precisamente nos quatro cantos de cada uma, e a base do suporte foi fixada, pelas hastes, na mesa de Antivibração, que tem entradas rosqueáveis.

Na Figura 103 é possível visualizar a verticalidade do trado nas fotos capturadas durante a realização do ensaio N4P9T1. Ressalta-se que o ensaio é realizado utilizando o trado reforçado com fibra carbono e com guia bipartido.

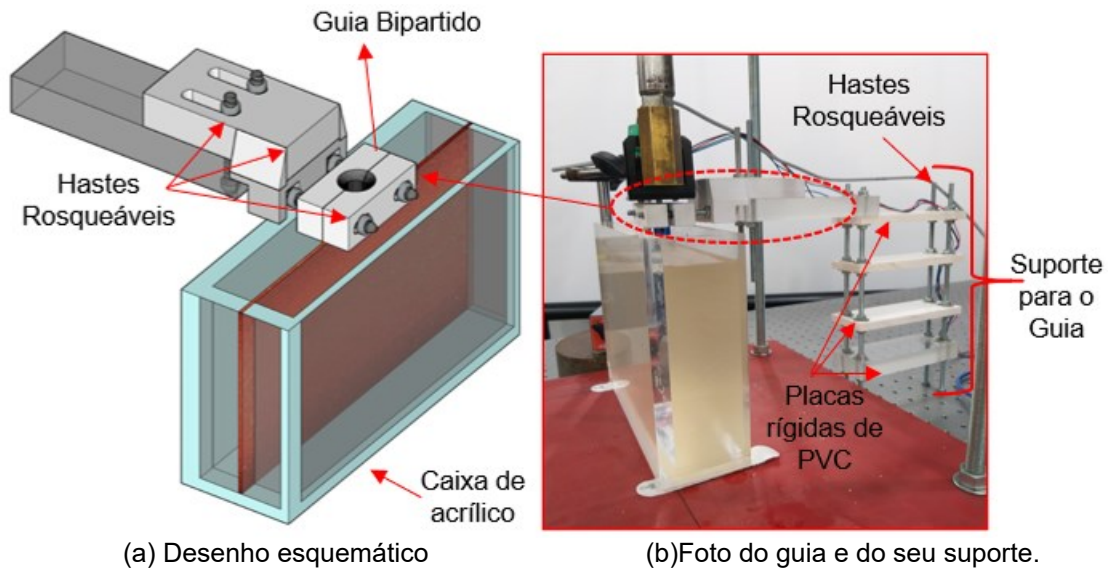


Figura 102- Guia bipartido

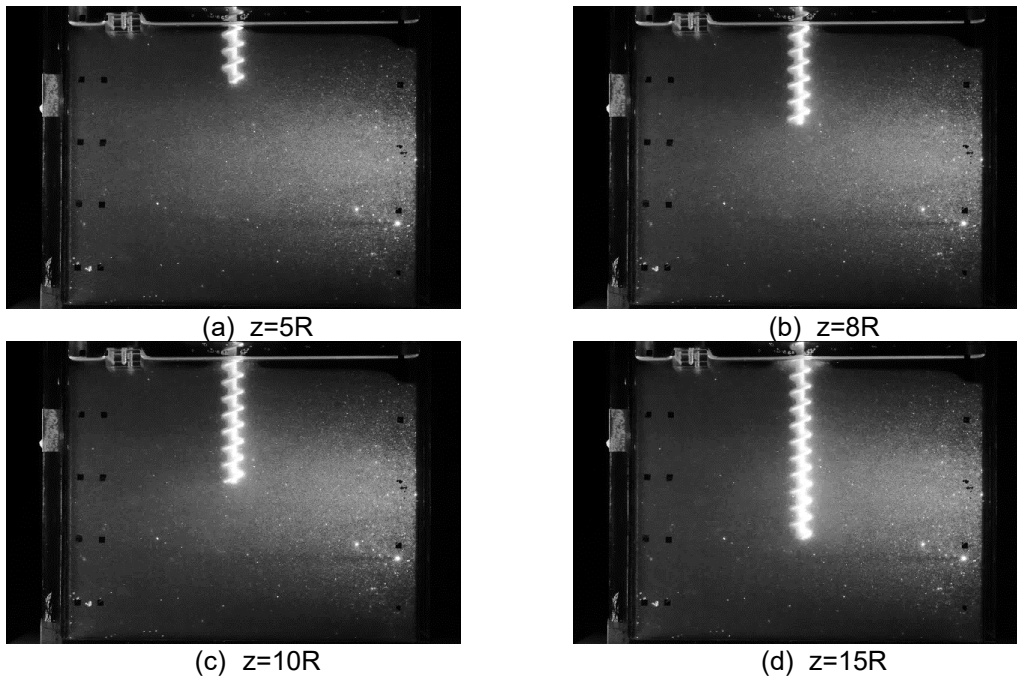


Figura 103 - Imagens instantâneas do ensaio.

4.5 Sistema de aquisição de dados

Nesta seção será descrito os equipamentos, técnicas e parâmetros empregados para a medição e visualização do campo de deslocamentos do solo transparente nos ensaios realizados.

4.5.1 *Interferometria speckle*

Para medir o deslocamento do solo transparente, ao longo de todos os ensaios foi empregada a técnica *interferometria speckle*, conforme descrito na seção

2.4.4.1. Para tal, utiliza-se uma lente cilíndrica, localizada na frente da fonte de luz laser, que transforma o feixe de laser em um plano de laser. Por sua vez, o plano fino de luz laser gerado corta o modelo exatamente no eixo do trado e no plano de maior dimensão da caixa (Figura 107), que é o plano de interesse.

O laser utilizado é do modelo *31425 Helium – Neon red* do fabricante *Research Electro – Opticos, Inc.* com nível de potência igual a 35 mW, comprimento de onda igual a 633 nm e de diâmetro suficientemente pequeno (Figura 104). A lente cilíndrica utilizada é do tipo CKX 10 – C (Lens CVL 12,5 mm DIA X 12,5 FL) da *Newport* e de comprimento focal igual a 200 mm.

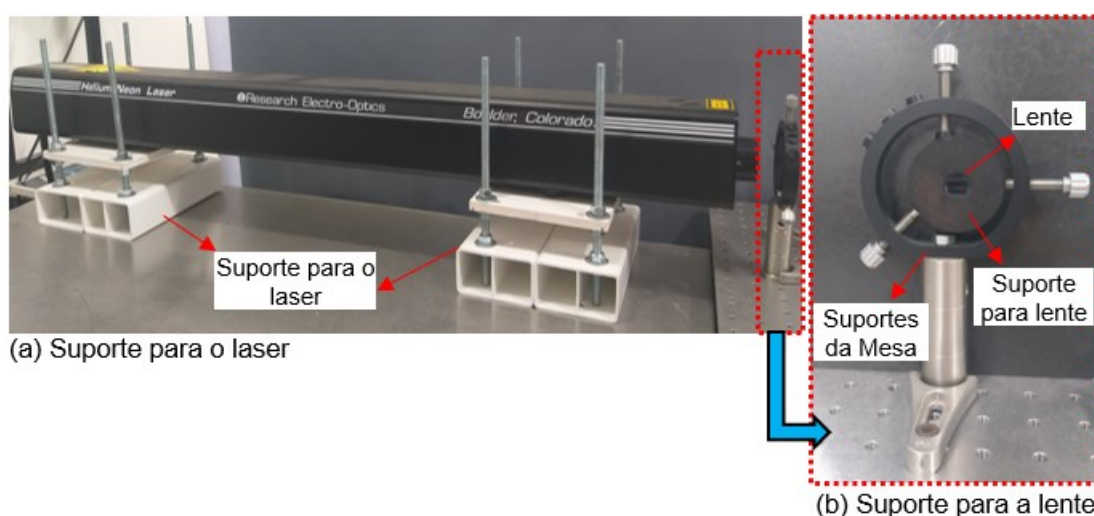


Figura 104 - Foto dos Aparatos Experimentais.

Destaca-se, que é fundamental o alinhamento entre o laser e a lente cilíndrica. Para isso, foi construído um suporte para o laser e outro, para a lente cilíndrica (Figura 104). O primeiro permite a regulação da altura do laser e o segundo possibilita o controle da altura da lente, conforme a Figura 104. O suporte da lente é constituído por uma borracha densa de 5 cm de diâmetro e 1 cm de espessura que se encaixa nos próprios suportes móveis da Mesa-antivibração.

4.5.1.1 Aquisição de imagens

A aquisição das imagens é feita através de uma câmera *Canon EOS Rebel Tli* com resolução de 15 *megapixel*, que capturava, inicialmente, uma imagem de referência, antes do processo de cravação iniciar e, em seguida, uma sequência de fotos no decorrer do ensaio. Para a padronização das imagens utilizou-se o *software DigiCamControl*.

Em relação ao ajuste do foco, tentou-se usar o foco automático da camera fotográfica, porém, como os ensaios necessariamente são realizados no escuro, o foco automático não se mostrou adequado. Portanto, testes foram realizados na procura da configuração ideal da câmera fotográfica. Entre as configurações testadas, as que melhor se ajustaram às necessidades dos ensaios foram: ISO 800, Foco 4,5 e velocidade do obturador 1/30.

4.5.1.2 Correlação Digital de Imagens

Posteriormente aos registros das fotos, as imagens são tratadas e processadas com o auxílio de um *software* específico. Nesse trabalho, para o processamento digital das imagens utilizou-se o *PIVVIEW2C/3C*.

O algoritmo de correlação utilizado no *PIVVIEW2C/3C*, para as análises DIC das imagens registradas durante os experimentos neste estudo, foi o *Minimum squared differences*, que é um algoritmo avançado segundo a seção 2.4.5.2.

Destaca-se que a introdução do trado, por ser um elemento sólido, obstrui a passagem do feixe de luz que atua na lateral da caixa. Desse modo, apesar das imagens capturadas no ensaio registrarem toda a face frontal da caixa, só é possível visualizar a incidência de luz laser até o trado e em uma região abaixo do trado (Figura 105). Conseqüentemente, o processamento digital das imagens, somente, é possível na lateral que o feixe de luz atua. No entanto, esta limitação não foi prejudicial, visto que o processo estudado é simétrico.

O método de interrogação *multi-grade* empregado no algoritmo, inicia-se com uma janela de amostra igual a 128×128 *pixels*, resultando em um tamanho final da janela de 32×32 *pixels*. Maiores detalhes sobre o processo iterativo com *multi grid*, foram descritos no item 2.4.5.2.

A interpolação *B-Spline* foi usada nas opções de interpolação de imagem e não foi utilizado ajuste de *subpixel* de pico. A aplicação de interpolação *B-Spline* na correlação de imagem digital resulta em um campo de deformações e de deslocamentos de forma eficiente e precisa, conforme relatado por Cheng *et al.* (2002).

A qualidade de uma análise DIC é influenciada por diferentes fatores: qualidade do algoritmo utilizado para correlação de imagens; precisão do método de interpolação de deformação; sistema de aquisição de imagens. Diferentes pesquisadores estudaram os efeitos de diferentes configurações, tais como: dimensão da janela de interrogação, contraste entre as partículas do solo e características visuais, na precisão dos resultados das análises DIC (Chupin *et al.*, 2012; Liu e Iskander, 2004; Sadek *et al.*, 2003; White *et al.*, 2003). Para maiores detalhes da técnica de correlação digital de imagens em solo transparente pode-se recorrer a Liu (2003).

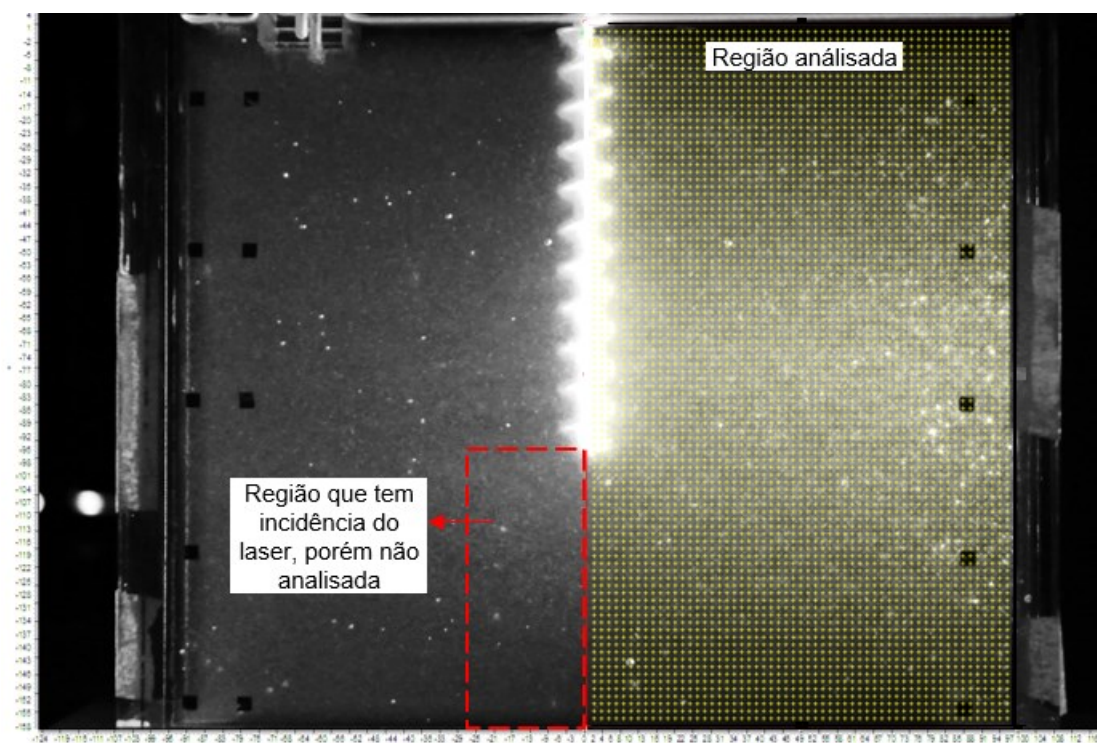


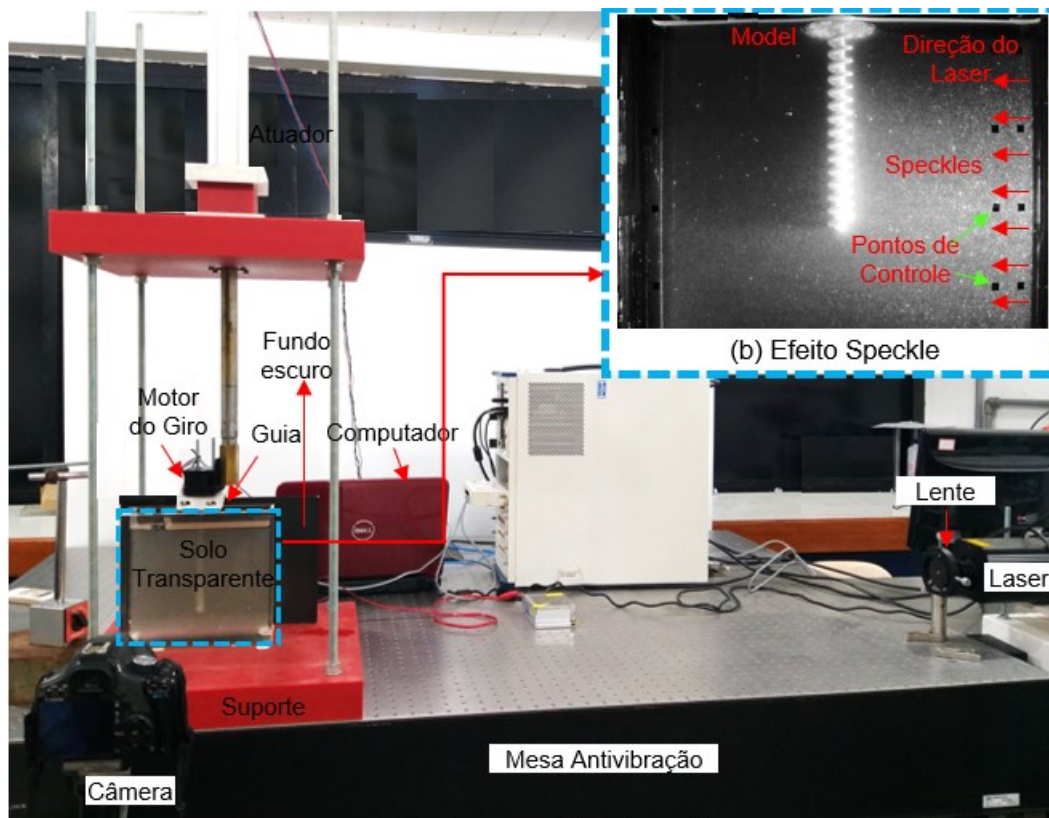
Figura 105 – Análise de uma foto no Programa PIVVIEW2C/3C

4.6 Configuração Experimental e Procedimento

Para a realização dos ensaios o primeiro passo é a preparação do solo transparente na caixa ensaio, conforme descrito na seção 4.3.9. Posteriormente, é feito o posicionamento: do laser, da lente geradora do plano, da caixa de ensaio, do guia, do sistema controlador da velocidade de descida e subida do trado, do sistema controlador do giro do trado e do trado acoplado ao motor de giro, ilustrado na Figura 106.

Todos esses elementos, excluído o laser, são posicionados em uma mesa anti-vibração do fabricante *NewPort Corporation (USA)*, que tem como função possibilitar alta estabilidade e captura de imagens com qualidade, permitindo assim, o mínimo de interferência externa ao sistema.

Posteriormente, é iniciado a cravação do trado no solo transparente exatamente no centro da caixa de ensaio com velocidade de avanço e giro constantes, e verticalidade controlada. As velocidades são mantidas constantes por meio dos sistemas controladores e a verticalidade do trado é controlada por meio de um guia bipartido que fica localizado na parte superior central da caixa de ensaio, conforme exposto na Figura 107.



(a) Configuração Experimental

Figura 106 - Foto do aparato experimental

A aquisição das imagens é feita através da câmera durante todo processo de cravação do trado. Nesse estudo foi considerada a frequência de uma foto por segundo (fps). Posteriormente, as imagens são tratadas e processadas com o auxílio do software *PIVVIEW2C/3C*. Vale ressaltar, que para ser possível obter a equivalência das coordenadas em *pixel* para coordenadas geométricas, é preciso conceder ao *software* distâncias conhecidas. Para tal, foram impressos,

em uma folha de papel transparente, pontos de controle. A transparência, com os pontos de controle, é posicionada na face frontal da caixa de ensaio (Figura 106b).

Ao longo dos ensaios a temperatura da sala é mantida constante, pois o índice de refração do óleo varia com a temperatura (SUI et al. 2015; e CARVALHO et al. 2015); e a sala é mantida no escuro. Além disso, na realização dos ensaios, coloca-se um fundo totalmente escuro, atrás da caixa de ensaio, para impedir a reflexão da luz que também impacta negativamente nas leituras (Figura 106). A utilização de fundos escuros foi abordada por SADEK et al. (2003) que se mostrou satisfatória em ensaios utilizando solos transparentes. O fundo escuro foi produzido fixando um papel adesivo preto em uma placa retangular de madeira.

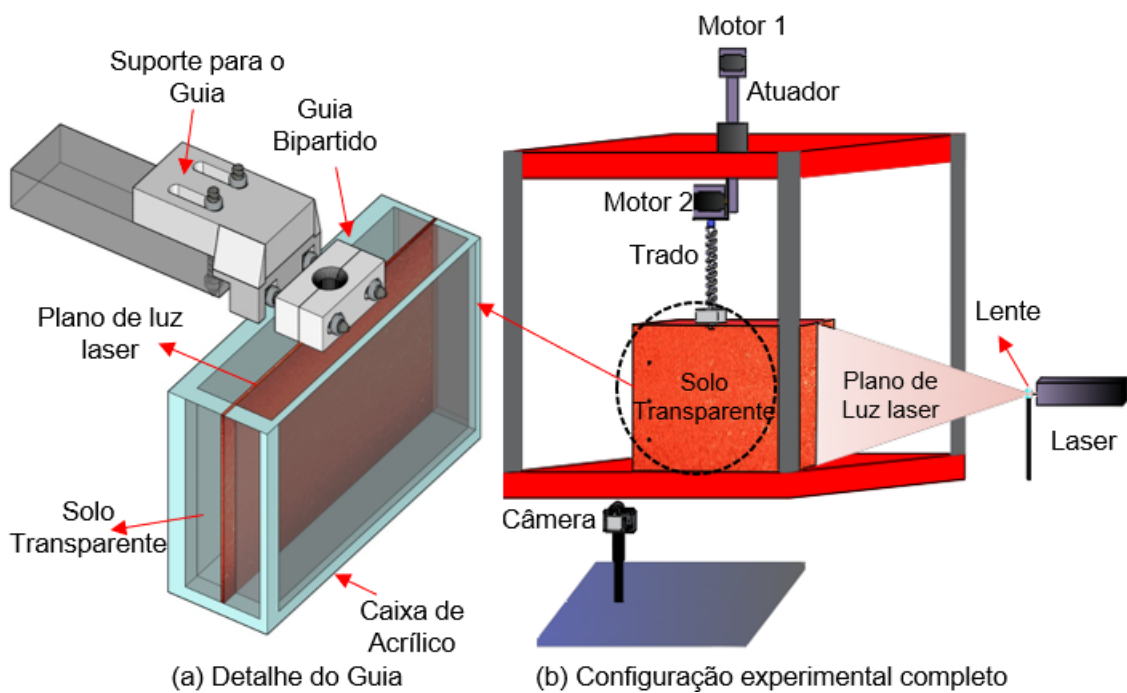


Figura 107 – Configuração Experimental

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme descrito no Capítulo 4, foram realizados ensaios em modelos reduzidos, em níveis de tensões a 1g, simulando a etapa de cravação do trado das estacas hélice contínua em solo transparente. Assim sendo, o presente Capítulo apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do solo transparente desenvolvido e os resultados e as discussões referentes à modelagem física realizada.

As discussões dos resultados da modelagem física incluem: análise da influência da taxa de cravação e do passo no campo de deslocamento do solo próximo a cravação; análise da zona de influência; estudo da ação de transporte do solo entre as hélices do trado; determinação da taxa de cravação ótima do trado; comparação dos resultados dos ensaios realizados com o método de expansão de cavidade (CEM) e o método do caminho de deformação superficial (SSPM); e apresentação das limitações da técnica de solos transparentes.

Por fim, o capítulo apresenta uma discussão das análises resultantes do caso de estudo com as análises obtidas por meio da modelagem física utilizando o solo transparente.

5.1 Caracterização Física e Mecânica do Solo transparente

Nesta seção, serão apresentados os resultados do programa experimental elaborado para conhecer detalhadamente o comportamento geotécnico do solo transparente desenvolvido. O programa experimental, incluiu: ensaios de caracterização física, ensaios de cisalhamento direto, ensaios de compressão confinada e ensaios de permeabilidade. Descreve-se ainda uma análise realizada do esmagamento das partículas e da função de transferência de modulação.

5.1.1 Propriedades físicas da sílica gel

Os tamanhos máximo e mínimo das partículas de sílica gel, que são normalmente fornecidas pelos fabricantes, variam de 0,5 a 5mm. As formas mais

comuns encontradas são grãos arredondados e partículas angulares. No presente trabalho, utiliza-se a sílica gel angular no tamanho mais fino possível de 0,5 a 1,5mm. O resultado da distribuição granulométrica da sílica gel angular está exposto na Figura 108 e, para efeito comparativo, a distribuição granulométrica do solo do caso de obra e das areias mal graduadas de número 16 e 30, fornecidas pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), também são apresentadas.

As propriedades físicas da sílica gel e das areias fornecidas pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica são elencadas na Tabela 19. A sílica gel possui tamanho médio dos grãos D_{50} igual a 0,99mm, tamanho efetivo D_{10} igual a 0,65mm, coeficiente de uniformidade C_u igual a 1,1 e um coeficiente de curvatura C_c igual a 1,6. Observa-se que esse tipo de sílica apresenta características granulométricas similares à da areia, e quanto à classificação, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solo (USCS), é uma areia mal graduada (SP).

O peso específico seco mínimo e máximo da sílica gel é, aproximadamente, igual a 6,35 kN/m³ e 8,21 kN/m³. O peso específico saturado unitário depende do poro fluido utilizado no presente trabalho e variou de 1,15 a 1,39 kN/m³. A densidade baixa do material é considerada uma desvantagem, principalmente, em testes em centrífugas, como afirmam ISKANDER *et al.* (2002).

A densidade específica da sílica gel angular é igual a 2,16 o que, segundo WEAST (1986), é, aproximadamente, 80% da densidade específica das areias silicatas naturais. Em relação ao valor de índice de vazios máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$), foram iguais a 2,4 e 1,63 respectivamente. Estes valores são superiores aos valores normalmente atribuídos às areias naturais. Isso se justifica pela elevada porosidade interna dos grãos de sílica. No entanto, esta característica é problemática apenas para aplicações de problemas geotécnicos dinâmicos, como relatado por GUZMAN *et al.* (2013).

Determina-se que a razão $e_{máx}/e_{mín}$ da sílica gel é igual a 1,47, similar ao valor empírico de 1,54 encontrado para as areias mal graduadas (IPT) e o valor de 1,62, sugerido por MIURA *et al.* (1997), para as areias naturais.

Acrescenta-se, nas propriedades físicas da sílica gel, o índice de refração da sílica determinado por GUZMAN *et al.* (2013) igual a 1,442 a 25°C.

Tabela 19 – Propriedades físicas do solo transparente granular de sílica gel

Característica	Símbolo	Unidade	Sílica Gel	Areia IPT. N 16	Areia IPT. N 30
Tamanho da Partícula	D ₆₀	mm	1,34	1,71	0,88
	D ₅₀	mm	0,99	1,60	0,84
	D ₃₀	mm	0,86	1,39	0,75
	D ₁₀	mm	0,65	1,17	0,65
Coefficiente de curvatura	C _c	-----	1,6	1,46	0,98
Coefficiente de uniformidade	C _u	-----	1,1	0,97	1,35
Densidade Real dos Grãos	G _s	----	2,16	2,65	2,65
Densidade Máxima seca	ρ _{max}	kN.m ³	8,21	15,60	15,62
Densidade Mínima seca	ρ _{min}	kN.m ³	6,35	12,66	12,33
Densidade Máxima saturada	ρ _{satmax}	kN.m ³	13,9		
Densidade Mínima saturada	ρ _{satmin}	kN.m ³	11,5		
Índice de vazios máximo	e _{max}	-----	2,4	1,13	1,14
Índice de vazios mínimo	e _{min}	-----	1,63	0,73	0,72
Tipo da partícula	-	-----	Angular	-----	-----
USCS Classificação	USCS	-----	SP	SP	SP

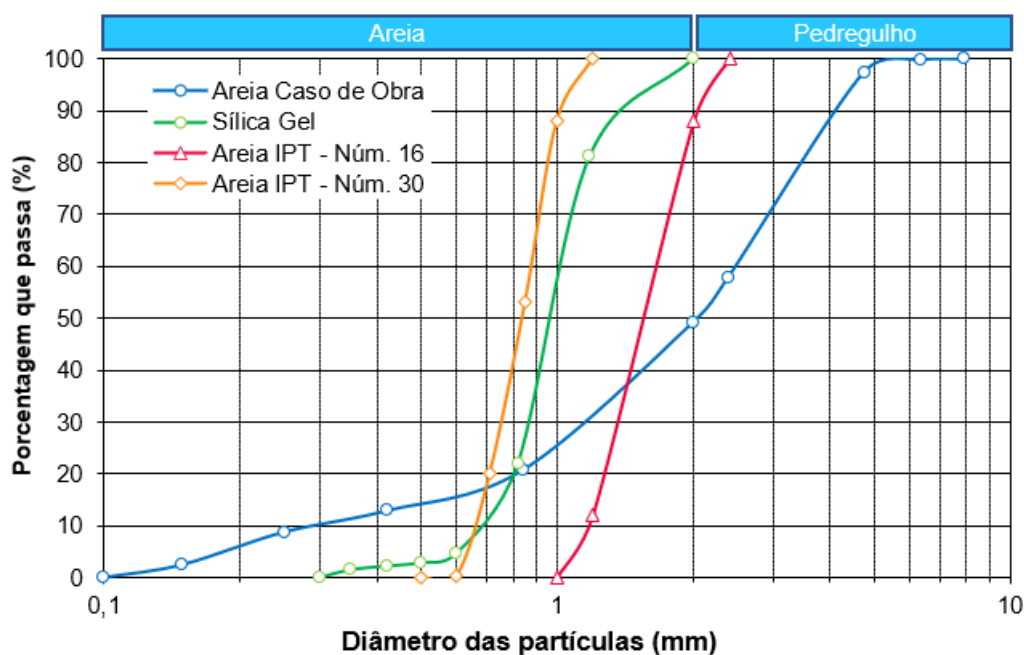


Figura 108 - Granulometria da sílica gel utilizados nesta pesquisa e das areias mau graduadas de número 16 e 30 fornecidas pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT) também são apresentadas.

5.1.2 Ensaio de Compressão Confinada

Os resultados dos ensaios de compressão confinada, em amostras densas e fofas na condição seca, saturada com água e com óleo, são apresentados na Figura 109, simultaneamente com os dados de LAMB e WHITMAN (1969) para areia de Ottawa e para areias calcárias.

Observa-se, na Figura 109, que a compressibilidade da areia de Ottawa é significativamente menor que a sílica gel e a areia calcária. A sílica gel apresenta grande compressibilidade, possivelmente, devido à quebra de partículas.

A quebra de grãos de areia gera ruídos durante a realização dos ensaios de compressão unidimensional sob diferentes pressões normais, conforme relatado por LEE (1965). Durante os ensaios de compressão confinada, a quebra de partículas nas amostras secas e saturadas com óleo e água é audível a, aproximadamente, 250 kPa, compatível com o relatado por SADEK *et al.* (2002) para amostras de sílica gel finas e grossas.

Observa-se, também, por meio dos ensaios de compressão confinada, que a variação de deformação axial em relação a tensão efetiva, revela um comportamento consistente com a maioria das areias relatados por HENDRON (1963).

Percebe-se, também, que a sílica gel se deforma mais quando preparada com óleo do que quando está seca ou com a água, resultado semelhante ao obtido por EZZEIN e BATHUST (2011). Segundo ZHANG *et al.* (2017), o óleo mineral atua como um lubrificante, reduzindo a fricção entre as partículas de areia, tornando as partículas mais propensas ao deslize, levando ao aumento da compressibilidade da amostra.

Além disso, como esperado, amostras densas são menos compressíveis que fofas. Em relação ao índice de compressibilidade (C_c) para a sílica gel seca e saturada com óleo, sob uma faixa de tensão vertical de 200 a 800 kPa, varia de 0,1 – 0,2. Estes valores para o índice de compressibilidade são um pouco inferiores ao descrito por MESRI e VARDHANABHUTI para a areia de quartzo.

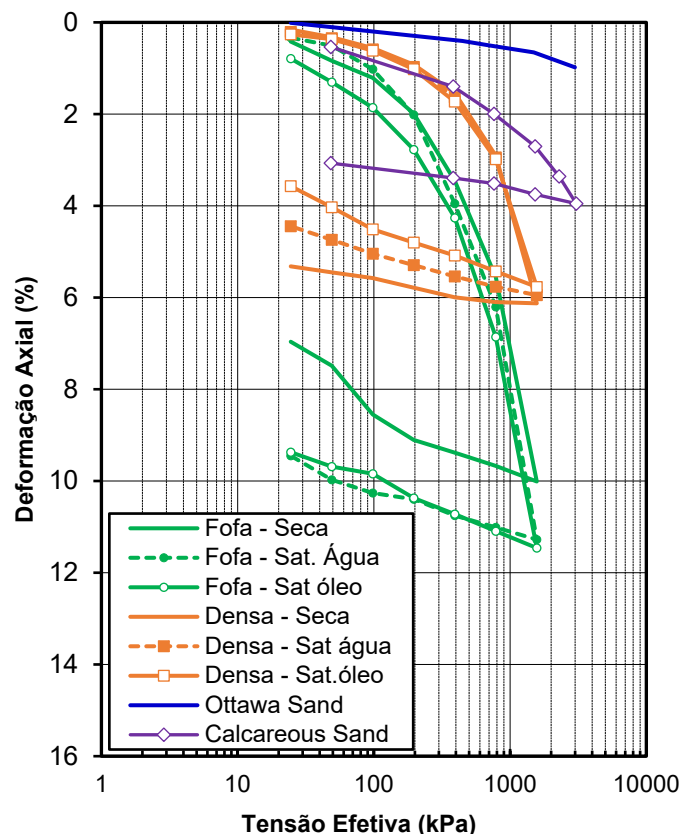


Figura 109 – Compressibilidade de sílica gel, areia de Ottawa e areia calcária a partir dos ensaios de compressão confinada.

5.1.3 Esmagamento de Partículas

A literatura discute vários aspectos que influenciam na intensidade de quebra de partículas, incluindo índice de vazios, dureza, angulosidade e diâmetro das partículas. Tem-se os seguintes trabalhos: ROBERTS e SOUZA 1958; YAMAMURO e LADE 1996; KARATZA *et al.* 2017, ROSCOE *et al.*, 1958; BOLTON, 1986; COLLIAT *et al.*, 1988; NAKATA *et al.*, 2001; COOP *et al.*, 2004 e ARSLAN *et al.*, 2009. À face do exposto nos trabalhos, analisa-se a quebra de partículas no presente trabalho. Para isso, realizaram-se ensaios de granulometria antes e após os ensaios efetivados.

As figuras 110 a 112 exibem os resultados de ensaios de granulometria realizados após os ensaios de compressão confinada e ensaios de cisalhamento direto realizados com a sílica gel seca.

Para o teste de compressão confinada, levado para uma tensão normal de 1600 kPa, o D_{50} das partículas de sílica gel é reduzido em cerca de 25% (Figura 110).

A redução nos tamanhos de partículas, para os ensaios de cisalhamento direto para as amostras fofas, é de, aproximadamente, 8% e, para as amostras densas, é de, aproximadamente, 5%. Os resultados são semelhantes aos encontrados por EZZEIN e BATHURST (2016) para as partículas grosseiras de quartzo fundido.

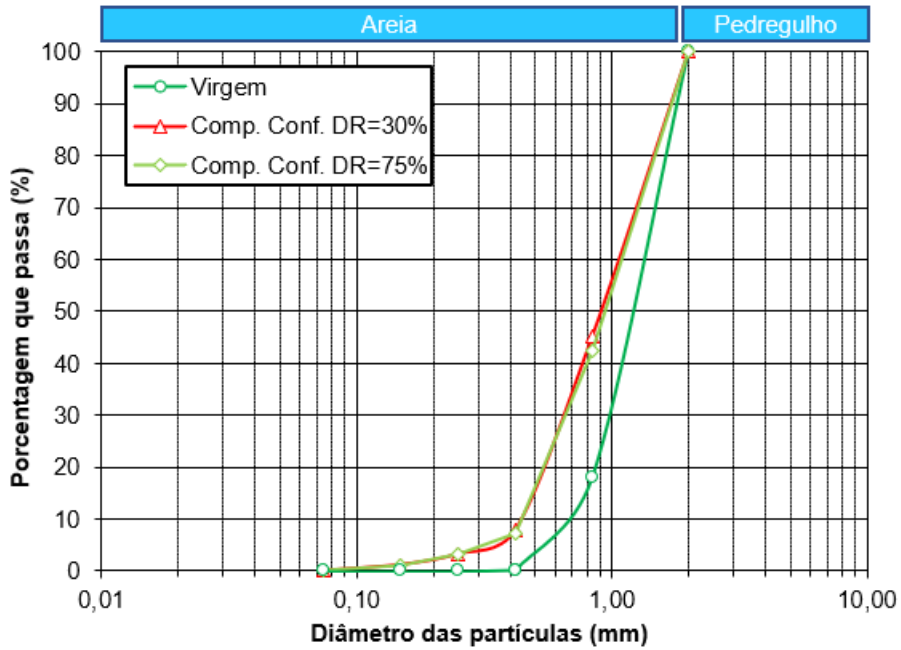


Figura 110 – Influência do ensaio de compressão confinada no esmagamento de partículas de sílica gel.

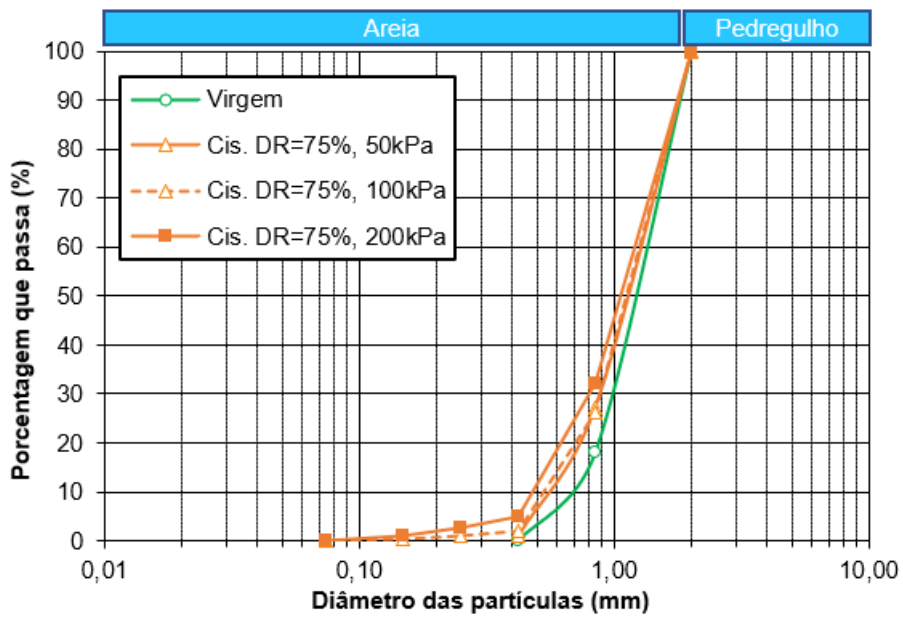


Figura 111 – Influência do ensaio de cisalhamento direto em amostras fofas no esmagamento de partículas de sílica gel.

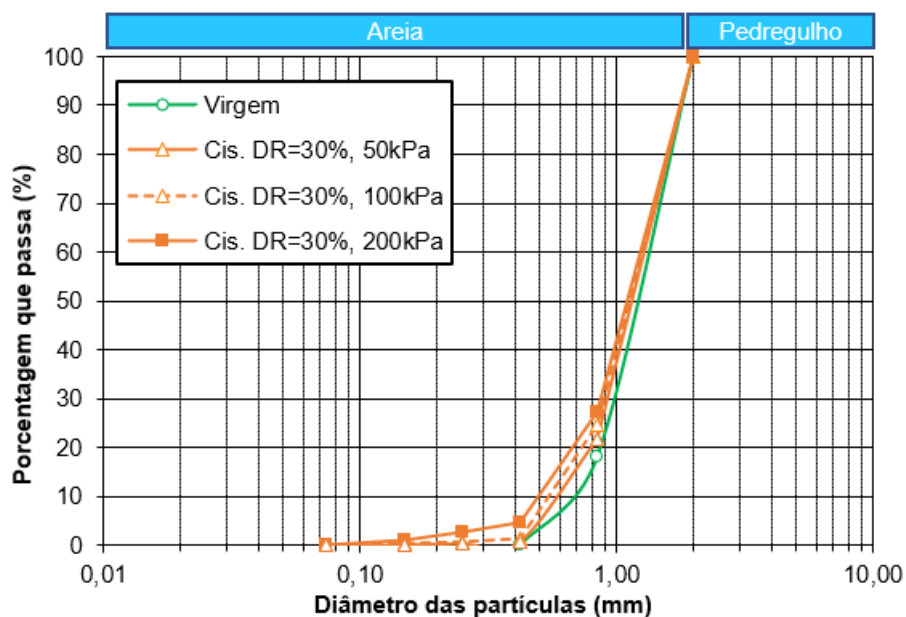


Figura 112 – Influência do ensaio de cisalhamento em amostras densas no esmagamento de partículas de sílica gel.

A quebra de partículas para o presente estudo não é considerada uma preocupação, pois verificou-se por meio de ensaios de granulometria, após os ensaios, que não se tem quebra de partículas da sílica. Provavelmente, devido ao modo de preparar o solo transparente na caixa de ensaio e por se tratar de ensaios com níveis de tensões baixos.

Segundo ZHAO *et al.* (2015), especialmente em altos níveis de tensão, a quebra de partículas desempenha um papel importante na determinação do comportamento constitutivo e características de deformação dos materiais granulares.

5.1.4 Ensaio de cisalhamento direto

No presente estudo, conforme descrito na seção 4.3.6, realizam-se ensaios de cisalhamento direto na caixa quadrada e na caixa modificada capaz de moldar corpos de prova circulares. Inicialmente, o intuito foi realizar os ensaios apenas na caixa modificada, porém identificou-se uma possível influência da forma e tamanho do corpo de prova nos resultados. Portanto, primeiramente, serão mostrados os ensaios realizados na caixa de cisalhamento quadrada, e depois os resultados serão comparados com os resultados gerados dos ensaios da caixa de cisalhamento modificada.

5.1.4.1 Cisalhamento direto – Caixa de Cisalhamento com Corpo de Prova quadrado

Os resultados dos ensaios para as amostras densas e fofas de sílica gel seca, saturada com água e saturado com óleo, são apresentados nas figuras 113 a 116.

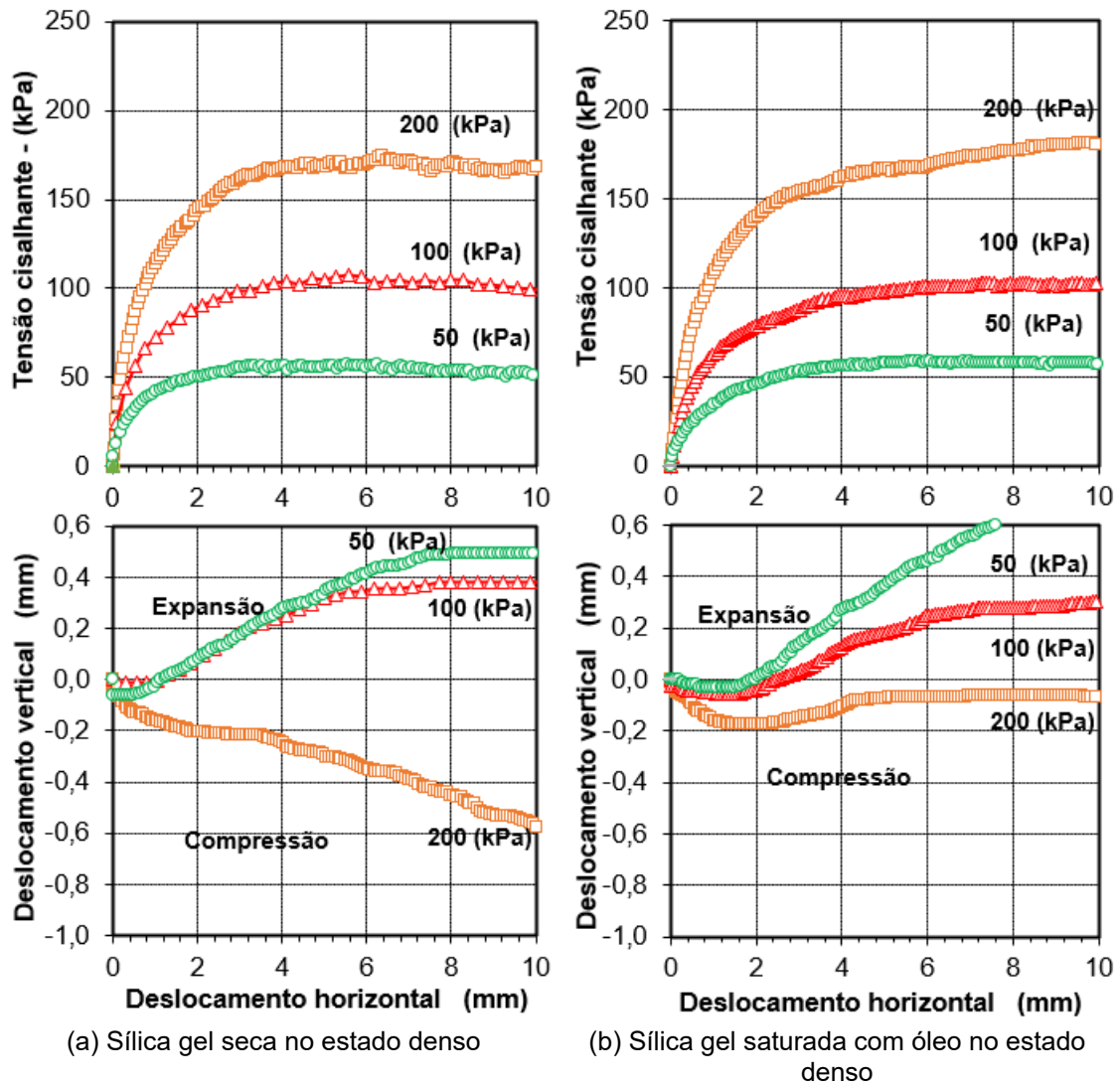


Figura 113 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto da sílica gel no estado denso.

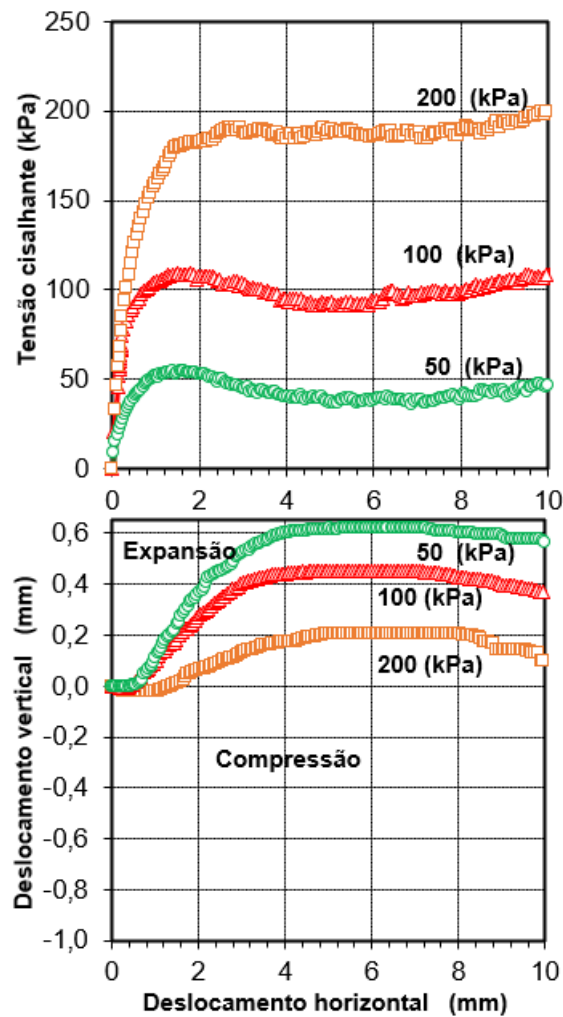


Figura 114 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto da sílica gel no estado denso saturada com água.

Observa-se na variação da tensão cisalhante com a deformação dos corpos de prova da sílica gel no estado denso, saturados com água (Figura 114), as três fases que caracterizam os comportamentos de areias no cisalhamento, conforme relatado por Zhang *et al.* (2017):

- no início do ensaio, a deformação por cisalhamento sob diferentes tensões normais são basicamente as mesmas;
- com o aumento do deslocamento horizontal, a tensão cisalhante começa a aumentar;
- com o aumento da tensão normal, o deslocamento horizontal correspondente ao pico de tensão de cisalhamento aumenta.

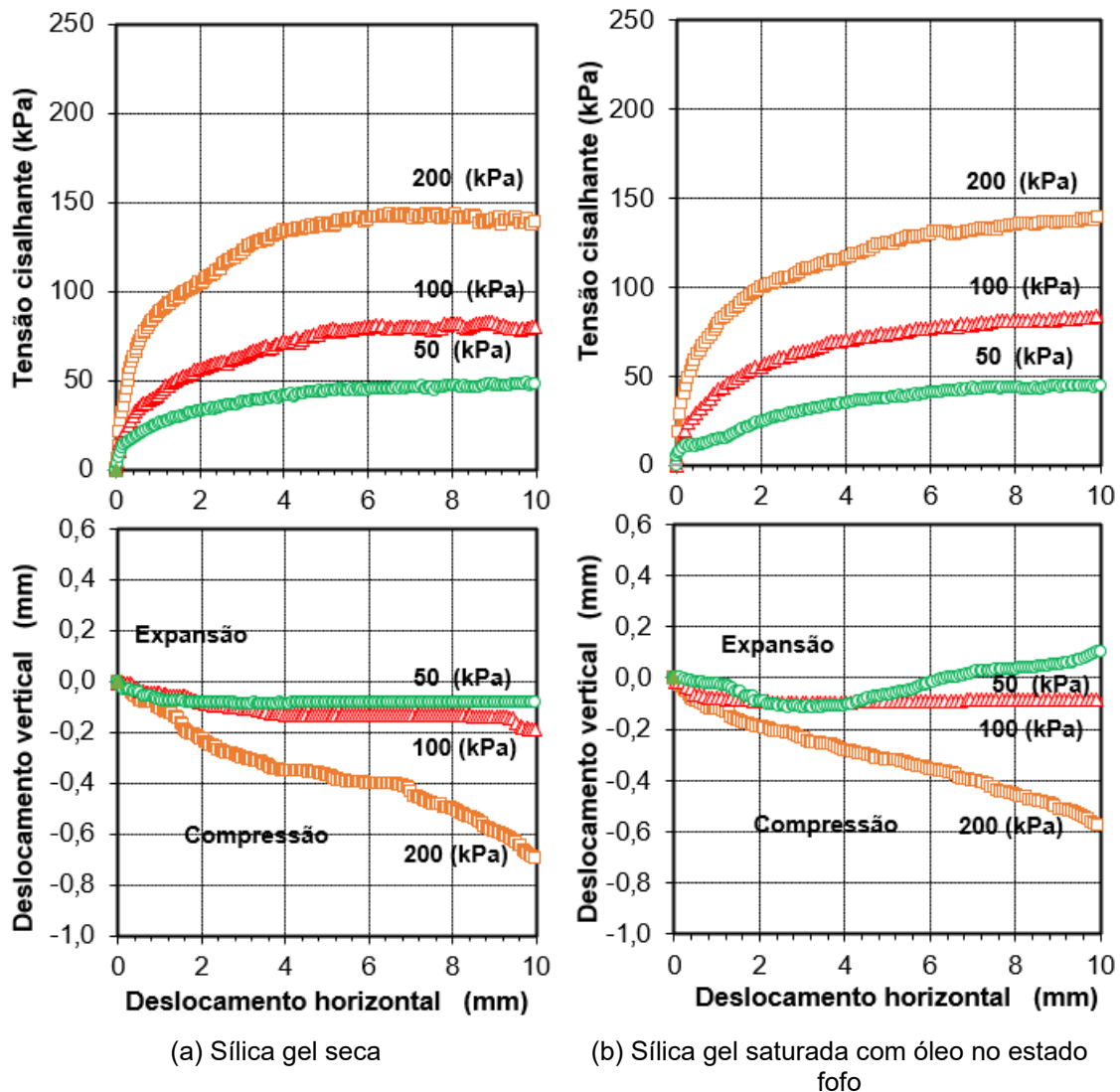


Figura 115 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto da sílica gel no estado fofo.

Verifica-se, também, que a variação do deslocamento vertical com o deslocamento horizontal da sílica gel, seca ou saturada, no estado denso, exibe, para baixas tensões de confinamento, tendência a compressão antes da expansão, como ocorre em areias naturais (Figura 113). Porém, com o aumento da tensão confinante a variação de volume da amostra também passa de dilatante para a contração volumétrica (Figura 113). Esta influência do nível de tensão normal observado na sílica concorda com o comportamento das areias naturais relatadas por LEE (1965) e HOLTZ e KOVACS (1981).

Verifica-se, da variação da tensão cisalhante com o deslocamento horizontal das amostras da sílica gel no estado fofo (Figura 115), que a tensão desviadora cresce lentamente com a deformação, atingindo valor máximo aproximadamente estável para deformações relativamente altas, não apresentando picos. Em

relação à variação da tensão com o deslocamento horizontal, do estado fofo, observa-se contração da sílica.

Comparando a variação da tensão com a deformação das amostras de sílica no estado denso e fofo, percebe-se que a resistência residual da amostra densa se aproxima da resistência de pico da sílica fofo, a mesma pressão normal, confirmando, assim como define a teoria do índice de vazios crítico (CASAGRANDE, 1936, 1975) para a sílica gel.

Conclui-se que o comportamento mecânico da sílica gel, para ambas as condições densa e fofo, é consistente com o comportamento típico de areias descrito por TAYLOR (1948), ROWE (1969); SCHOFIELD e WROTH (1968), JOSSELIN (1976), LEE e SEED (1967), ROSCOE (1970), BOLTON (1986) e NEGUSSEY *et al.* (1988).

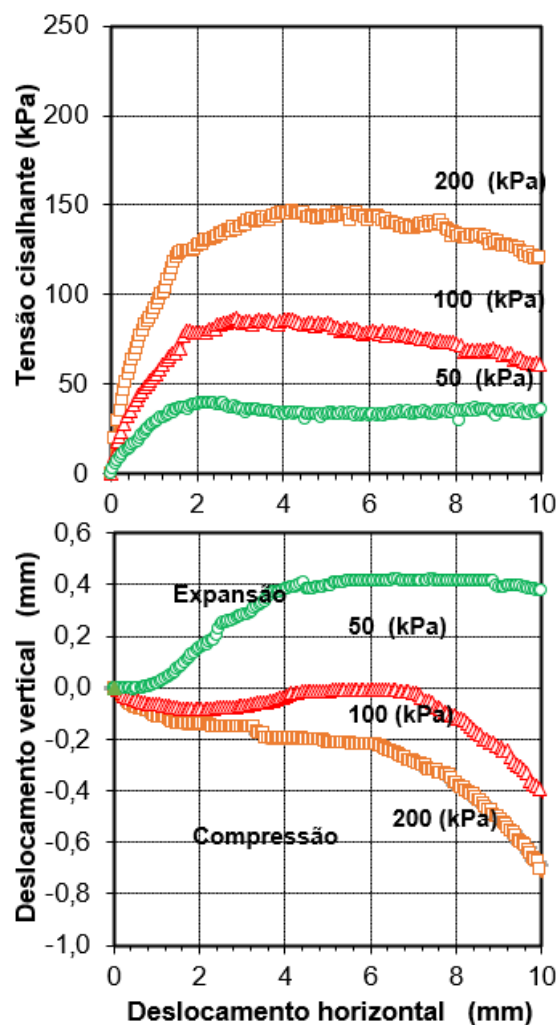


Figura 116 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto da sílica com água no estado fofo.

Ângulo de atrito

Os ângulos de atrito interno para a sílica gel, calculados para cada ensaio, assumindo que não há coesão, estão na faixa entre 33° a 43° (Tabela 20), o que é similar aos ângulos de atrito obtidos para areias de Ottawa ensaiadas por CERATO e LUTENEGGER (2006).

Em relação aos ângulos de atrito internos, calculados considerando o conjunto de ruptura de pico, os ângulos de atrito variaram entre 36° a 43°. Os resultados obtidos são consistentes com os ângulos de atrito normalmente encontrados para areias grossas para as mesmas compacidades (BUZON *et al.*2016; DAS, 2016; VELLOSO e LOPES, 2010).

Tabela 20 – Resumo dos ensaios de cisalhamento direto realizados com a sílica Gel.

Condições do Ensaio	Pressão de Confinamento (kPa)	DR (%)	ϕ (°) a*	ϕ (°) b*
Denso /Seco	50	75	42	
Denso /Seco	100	75	42	38
Denso /Seco	200	75	39	
Denso/ Saturado com água	50	75	41	
Denso/ Saturado com água	100	75	43	43
Denso/ Saturado com água	200	75	43	
Denso/ Saturado com óleo	50	75	43	
Denso/ Saturado com óleo	100	75	39	36
Denso/ Saturado com óleo	200	75	35	
Fofo /Seco	50	30	44	
Fofo /Seco	100	30	39	36
Fofo /Seco	200	30	35	
Fofo/ Saturado com água	50	30	33	
Fofo/ Saturado com água	100	30	38	36
Fofo/ Saturado com água	200	30	36	
Fofo/ Saturado com óleo	50	30	41	
Fofo/ Saturado com óleo	100	30	38	36
Fofo/ Saturado com óleo	200	30	35	

a* = Envoltória de ruptura única forçada pela origem.

b*= Envoltória de ruptura de pico da origem para cada conjunto de dado.

As figuras 117 e 118 mostram as envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico para a sílica gel no estado de compacidade denso e fofo, respectivamente. Observa-se que os ângulos de atrito obtidos não foram influenciados

significativamente em relação ao tipo de fluido de saturação e que o ângulo de atrito da amostra densa é superior ao da amostra fofa, como era esperado.

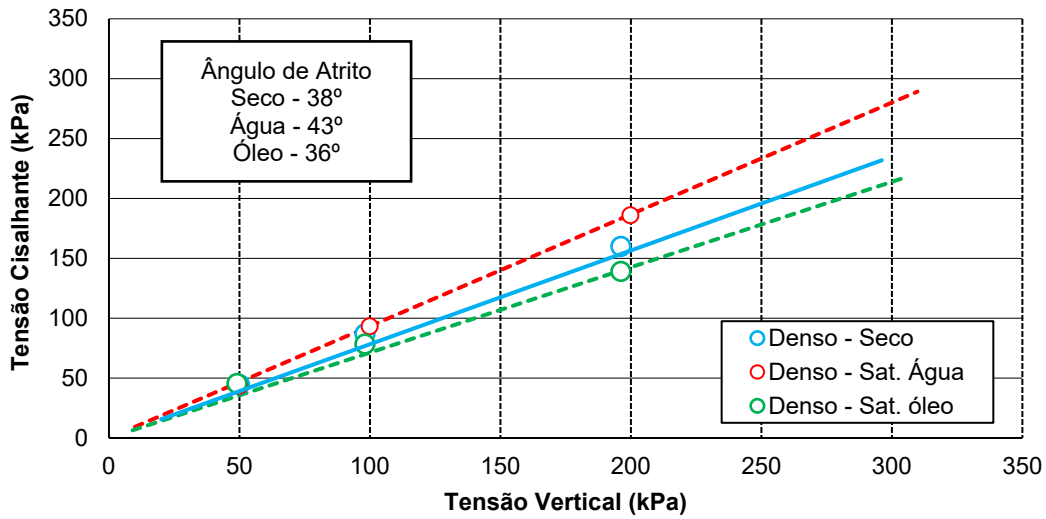


Figura 117 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico para a sílica gel do ensaio de cisalhamento direto para amostras densas.

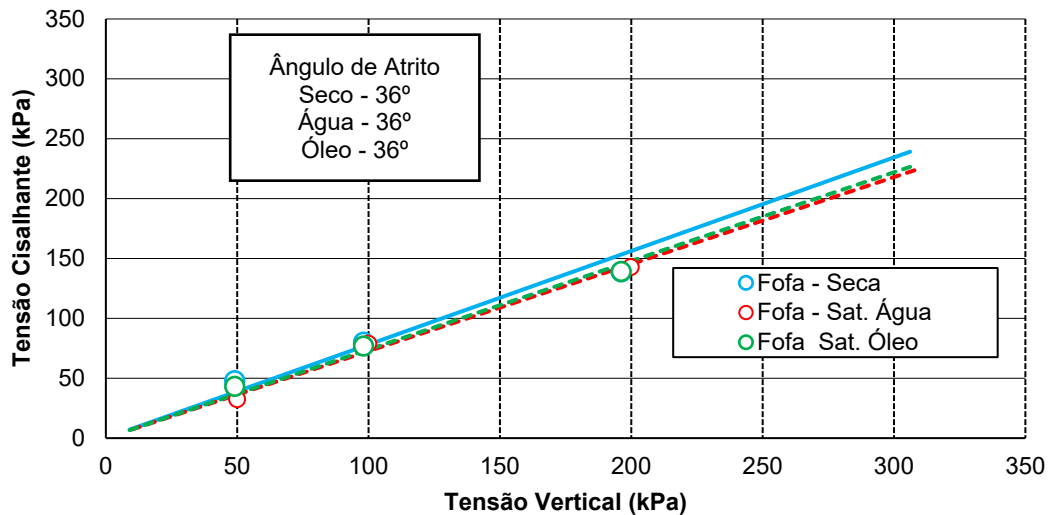


Figura 118 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico para a sílica gel do ensaio de cisalhamento direto para amostras fofas.

5.1.4.2 Cisalhamento direto – Caixa Modificada com Corpo de prova circular

Na presente tese, desenvolveu-se uma caixa de cisalhamento para corpo de prova circular, conforme é detalhado na seção 4.3.6. A caixa desenvolvida foi dimensionada de acordo com a ASTM D 3080-90, que recomenda que o corpo de prova tenha largura mínima não inferior a dez vezes o diâmetro máximo das partículas e a espessura inicial do corpo de prova não deve ser inferior a seis vezes diâmetro máximo de partícula. Portanto, com o intuito de avaliar o

potencial da influência do tamanho caixa, compara-se os resultados dos ensaios de cisalhamento direto da sílica gel realizadas na caixa de formato quadrado com os resultados dos ensaios realizados na caixa desenvolvida na presente tese. A Tabela 21 apresenta as dimensões das caixas de cisalhamento em relação ao tamanho máximo do grão testado e a Figura 119 exibe os resultados dos ensaios na caixa de cisalhamento desenvolvida para as amostras densas de sílica gel seca e saturada com óleo.

Tabela 21 – Dimensões das caixas de cisalhamento. Nota: H é igual à altura da caixa; $D_{máx}$ é igual ao diâmetro máximo da partícula, D é igual ao diâmetro do corpo de prova na caixa modificada e W é igual ao lado da caixa do formato retangular.

Síllica Gel	Amostra circular			Amostra Quadrada	
	$D_{máx}$ (mm)	$H/D_{máx}$	$D/D_{máx}$	$H/D_{máx}$	$W/D_{máx}$
Síllica Gel	1,5	16	33	16	66

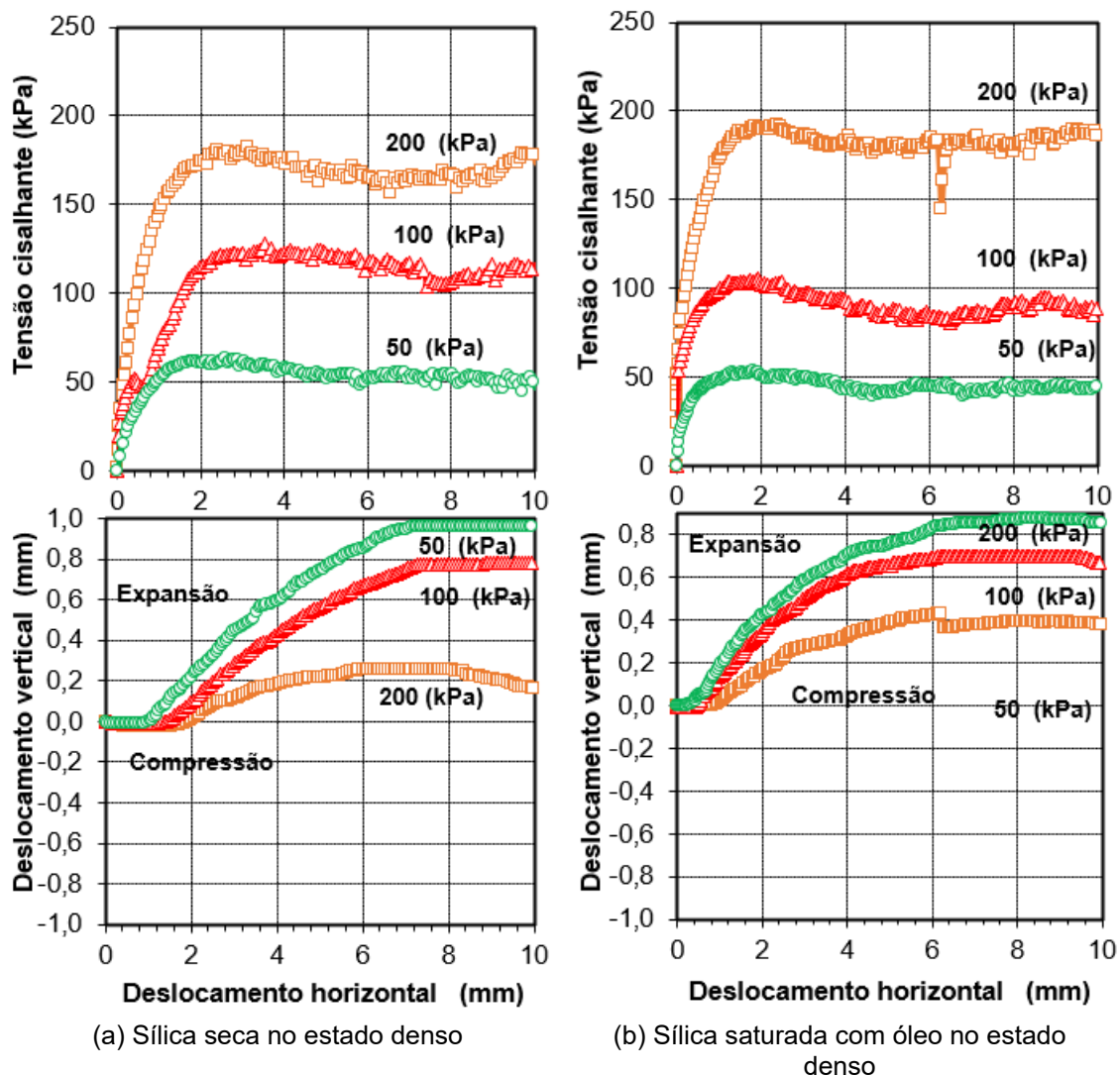


Figura 119 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto da sílica gel no estado denso na caixa de cisalhamento circular

Verifica-se na Figura 119 as três fases que caracterizam os comportamentos de areias no cisalhamento relatadas por ZHANG *et al.* (2017), concordando com os resultados gerados pelos ensaios em corpos de prova de seção transversal quadrada.

Em relação aos resultados obtidos para o ângulo de atrito, a Tabela 22 mostra os ângulos de atrito de pico para a sílica gel definidos nas duas caixas de cisalhamento.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto usando a resistência residual.

Condição do ensaio	Peso específico seco inicial (kN/m ³)	Caixa circular D = 50 mm $\phi(^{\circ})$	Caixa Quadrada W = 100 mm $\phi(^{\circ})$
Densa - Seca	7,6	42,1	38,1
Densa – Saturada com óleo	7,6	42	36

Observa-se que, com a diminuição e alteração da forma da caixa, ocorreu o aumento do ângulo de atrito. No entanto, esse aumento foi superior à dispersão esperada para esse parâmetro nesse tipo de ensaio ($\pm 2^{\circ}$). Esse aumento mostra que o comportamento do material é afetado pelo tamanho e forma do corpo de prova. Acredita-se que o ângulo de atrito tenha dado diferente em consequência dos campos de tensões horizontais induzidos no cisalhamento para a caixa quadrada e para a caixa modificada serem diferentes. Para o corpo de prova circular da caixa modificada, o campo de tensão gerado no cisalhamento ocorre de forma mais distribuída do que o campo de tensão gerado no corpo de prova quadrado. Conseqüentemente, mobiliza-se mais resistência no corpo de prova circular.

Além disso, o baixo peso específico do grão do solo transparente pode permitir as rotações dentro do corpo de prova de forma mais acentuada no corpo de prova quadrado, onde o campo de tensão gerado não é uniforme. Assim, o solo deforma mais na caixa quadrada e a superfície de ruptura é induzida ocorre de forma mais facilitada.

Portanto, a partir dos resultados deste trabalho, acredita-se que, em condições de ensaios drenados, é aconselhável analisar os limites de $D/D_{m\acute{a}x}$ e $w/D_{m\acute{a}x}$. Deve-se considerar diferentes trabalhos na literatura que avaliam o

tamanho e as formas das caixas de cisalhamento. JEWELL e WROTH (1987) sugerem uma relação entre o comprimento da caixa e a média do tamanho de partícula na faixa de 50 a 300.

5.1.5 Ensaios de permeabilidade

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade, é realizado o ensaio de permeabilidade de carga constante com os corpos de prova saturados com água. O coeficiente de permeabilidade determinado é de $9,3 \times 10^{-2}$ cm/s, concordando com os coeficientes de permeabilidades determinados por CAPUTO (1981) para areias grossas.

5.1.6 Função de transferência de modulação

Um método adequado de avaliar a transparência do solo transparente desenvolvido é por meio da determinação da função de transferência de modulação (MTF). Em termos simples, a função de transferência de modulação é o contraste de um “objeto” em uma imagem atual (modelo transparente) pelo contraste do “objeto” em uma imagem ideal, conforme é mostrado na Figura 120.

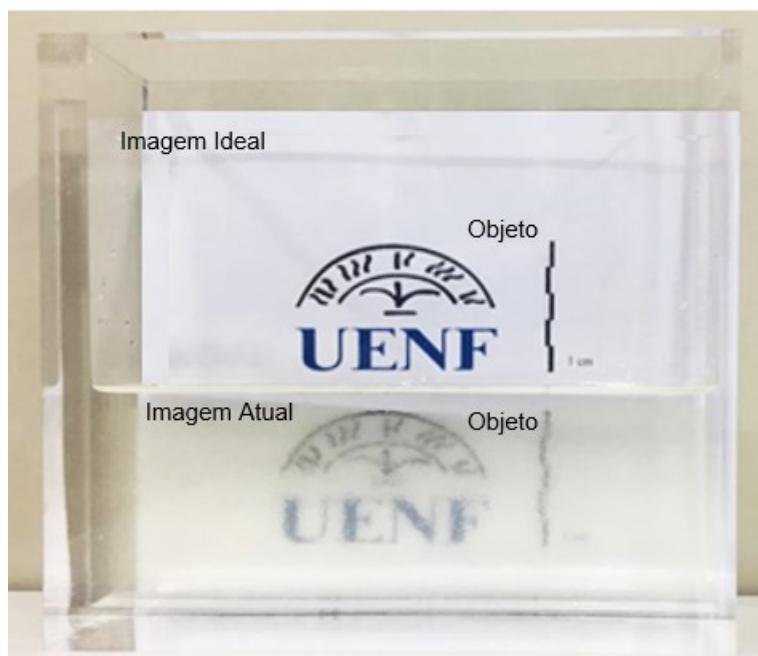


Figura 120 – Conceitos necessários para o entendimento da função de transferência de modulação.

Assim sendo, o MTF compara a transparência de uma imagem atual (solo transparente) com a de um cenário ideal, no caso, a caixa vazia ou cheia de

água. Matematicamente, o MTF pode ser definido como apresentado na Equação 10 (Black e Take, 2015):

$$MTF = \frac{(I_{max-I} - I_{min-I}) / (I_{máx-I} + I_{min-I})}{(I_{max-o} - I_{min-o}) / (I_{máx-o} + I_{min-o})} \quad (10)$$

onde I_{max-I} e I_{min-I} são os valores máximo e mínimo de intensidade do “objeto” em uma imagem atual, respectivamente, e I_{max-o} e I_{min-o} representam, portanto, o valor máximo e mínimo de intensidade do “objeto” em um meio ideal. Por exemplo, o MTF de uma imagem com baixa frequência espacial é próximo de um, e com uma maior frequência espacial, o MTF converge para zero. A Figura 121 traça o sinal de modulação de uma imagem ideal (a), e a imagem real (b). O I_{max-o} e I_{min-o} (contraste máximo e mínimo) são 255 (branco) e 0 (preto) respectivamente.

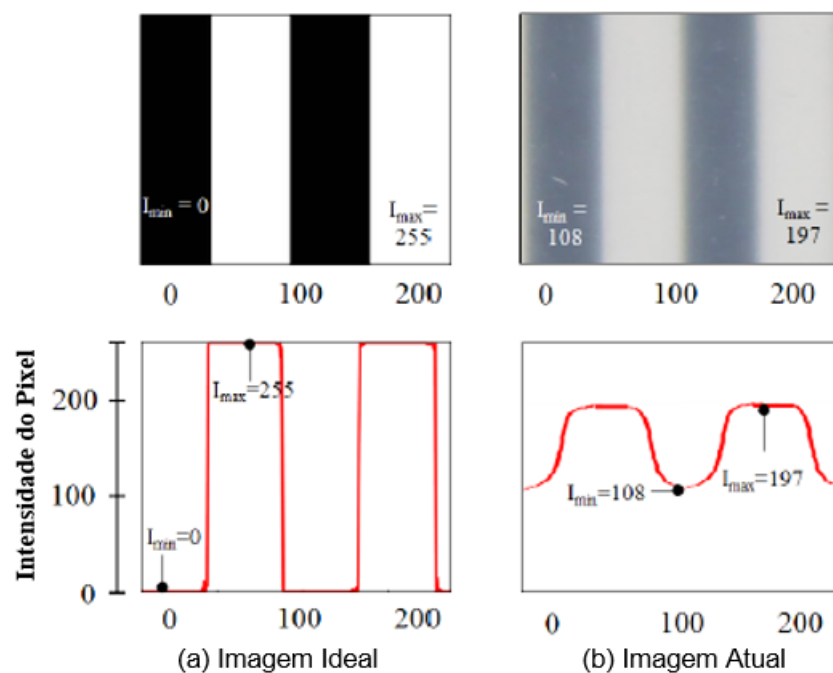


Figura 121 - Sinal de modulação de uma imagem ideal Hakhamaneshi (2016).

Para o solo transparente desenvolvido, constituído por sílica gel e óleo para tochas “Garden Light”, o I_{max-I} e I_{min-I} da imagem real calculados são iguais a 211 e 120, respectivamente. O MTF pode então ser calculado como mostra a Equação 11, abaixo:

$$MTF = \frac{(211 - 120)/(211 + 120)}{(255 - 0)/(255 + 0)} = 0,27 \quad (11)$$

O MTF determinado é igual a 0,27, valor considerado satisfatório para análises DIC e similar ao encontrado por HAKHAMANESHI *et al.* (2016) para o solo transparente constituído por Gelita.

5.1.7 Resumo das propriedades do solo transparente

Os resultados da caracterização do solo transparente revelam-se satisfatórios do ponto de vista de transparência e de comportamento do conjunto sílica misturada com o óleo e, estão resumidos na Tabela 23.

Tabela 23- Resumo das propriedades do solo transparente constituído por sílica gel e óleo "Garden Light" utilizado nos ensaios.

Propriedades	Valores
D ₁₀ (mm)	0,66
D ₃₀ (mm)	0,86
D ₅₀ (mm)	0,99
D ₆₀ (mm)	1,05
C _u	1,6
C _c	1,1
Densidade real dos grãos (G_s)	2,16
Coesão, kPa (c)	0
Ângulo atrito interno, ° (ϕ)	36° - 43°
Densidade Máxima seca, g/cm ³ (ρ_{max})	0,82
Densidade Mínima, g/cm ³ (ρ_{min})	0,63
Densidade Máxima saturada, g/cm ³ ($\rho_{sat max}$)	1,4
Densidade Mínima saturada, g/cm ³ ($\rho_{sat min}$)	1,1
Coefficiente de permeabilidade, mm/s (k)	9,3 x 10 ⁻²
Modulação de transferência de função	0,27

5.2 Influência da Taxa de Cravação

Os contornos de deslocamentos horizontal e vertical, u_x e u_z , incrementais de $z = 0R$ para $5R$; de $z = 0R$ para $10R$; $z = 0R$ para $15R$ e acumulados para os ensaios utilizando o Trado tipo 1 (N1P8T0.4; N2P8T0.8; N3P8T1), Trado tipo 2 (N4P9T0.4; N5P9T0.8; N6P9T1) e Trado tipo 3 (N7P6T0.4; N8P6T0.8; N9P6T1) são apresentados das figuras 122 a 145. Nota-se que, nos deslocamentos u_x e u_z , a distância horizontal e a profundidade, x e z , são normalizadas por R , que é o raio do trado. Os movimentos, para direita e para cima, são denominados como movimentos positivos e, para esquerda e para baixo, como negativos.

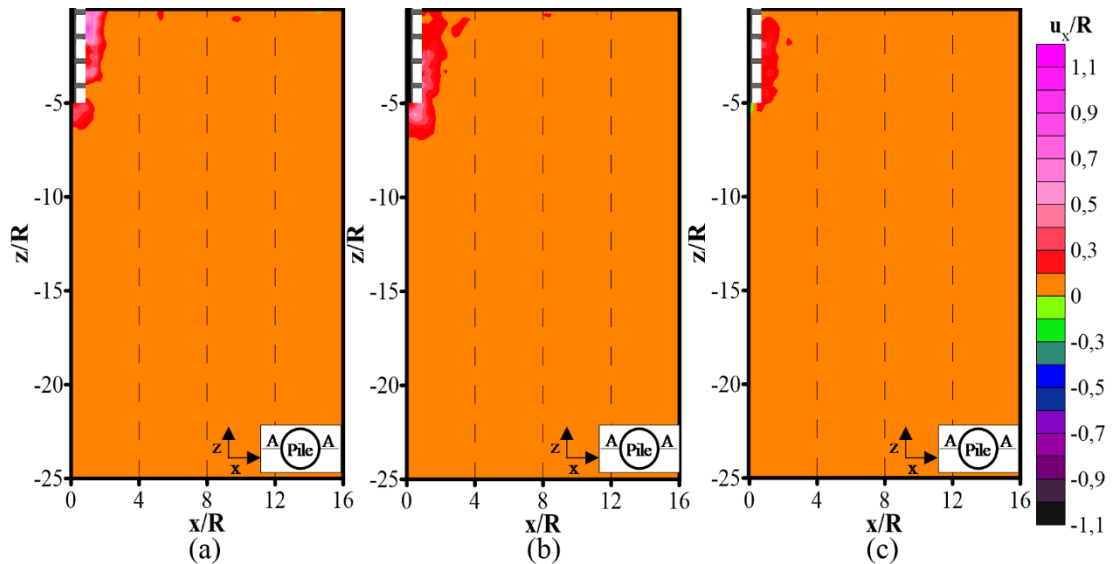


Figura 122 – Contornos de deslocamento lateral normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 5R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4; (b) N2P8T0.8 (c) N3P8T1

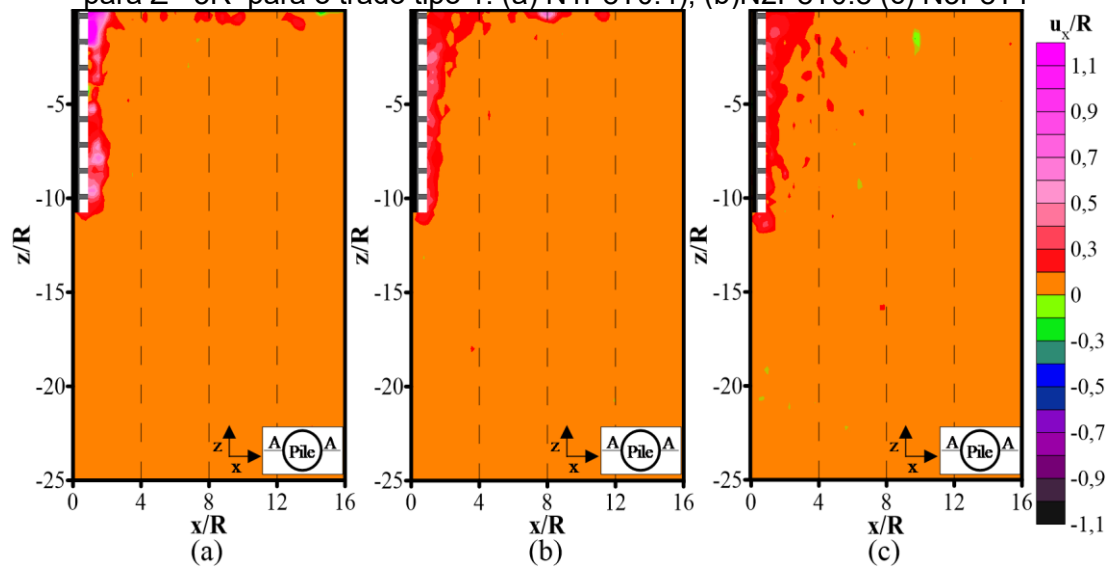


Figura 123 - Contornos de deslocamento lateral normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 10R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4; (b) N2P8T0.8 (c) N3P8T1

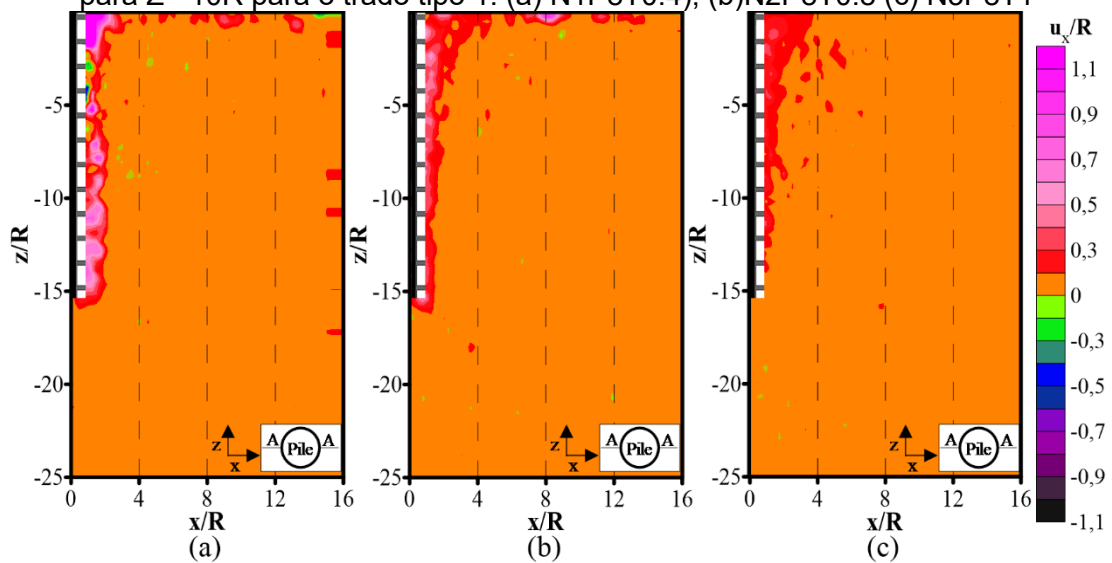


Figura 124 - Contornos de deslocamento lateral normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 15R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4; (b) N2P8T0.8 (c) N3P8T1

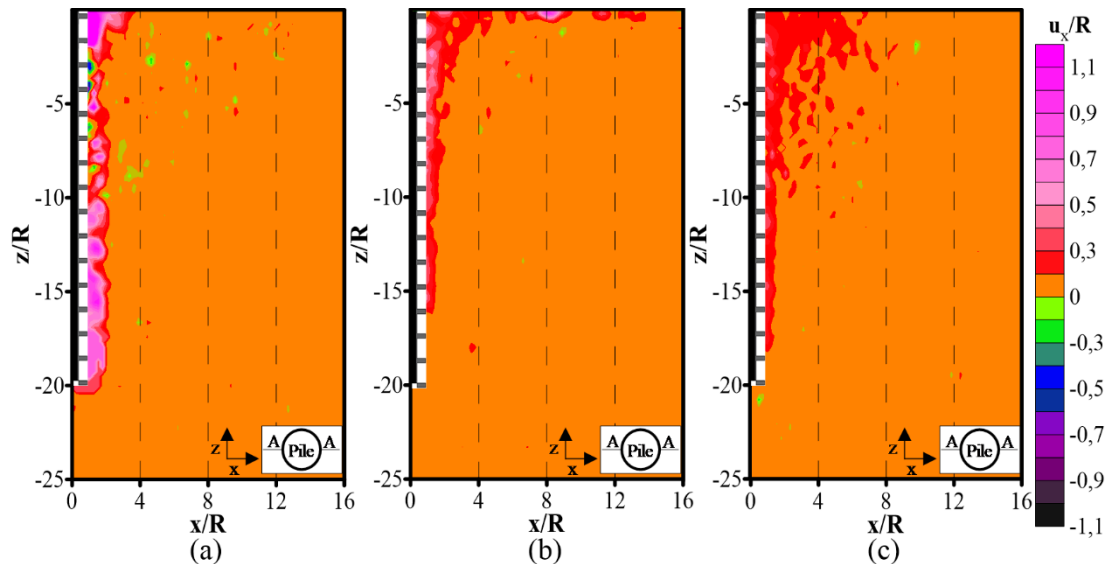


Figura 125 – Contornos de deslocamento lateral normalizados para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4; (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1

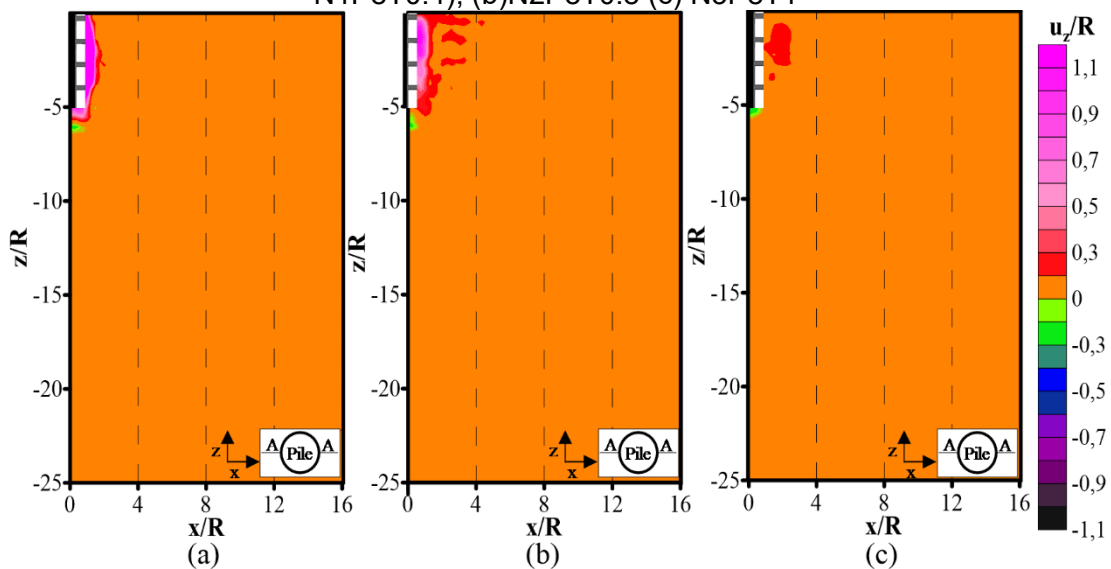


Figura 126- Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z=0R$ para $Z=5R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4; (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1

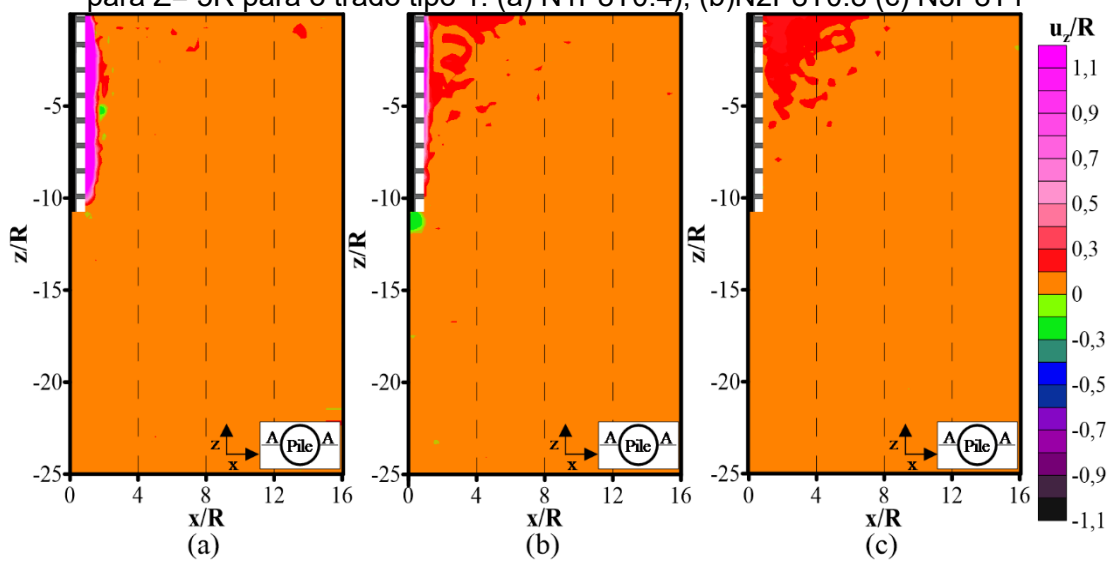


Figura 127 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z=0R$ para $Z=10R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4; (b)N2P8T0.8 (c) N3P8T1

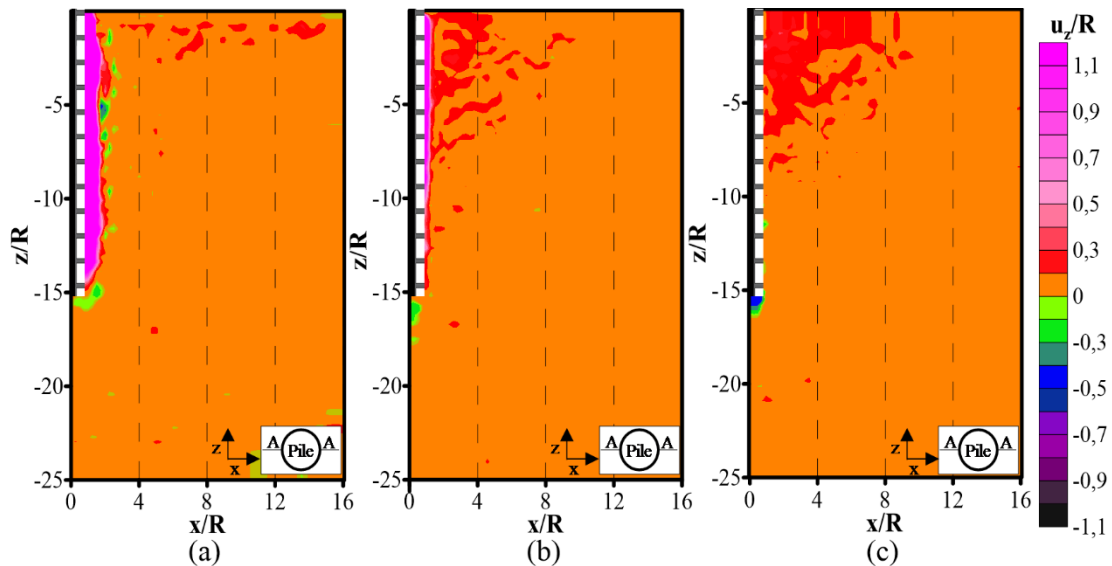


Figura 128 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z=0R$ para $Z=15R$ para o trado tipo 1: (a) N1P8T0.4; (b) N2P8T0.8 (c) N3P8T1

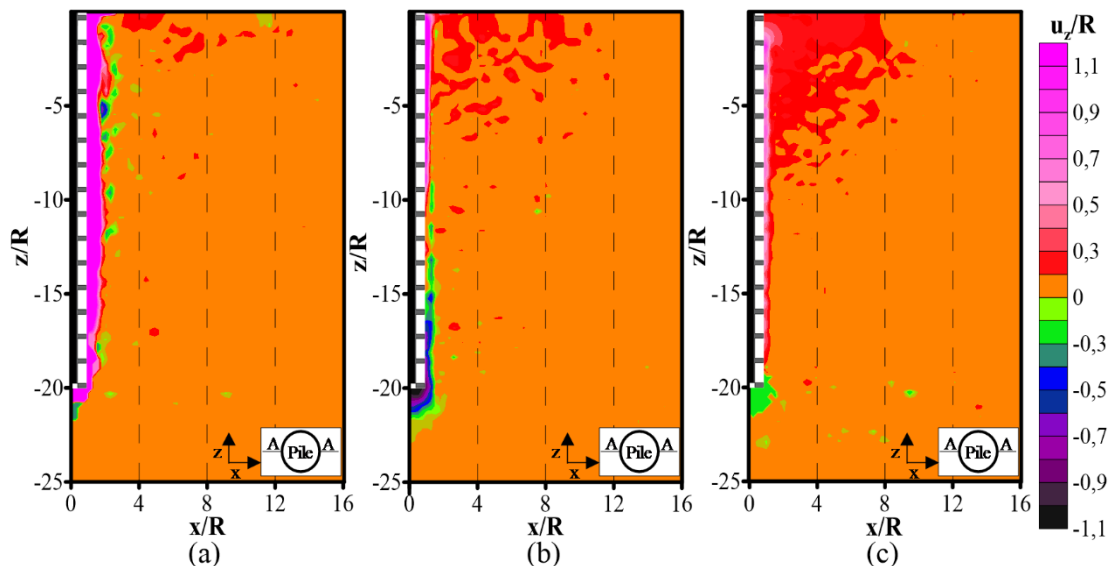


Figura 129- Contornos de deslocamento vertical normalizados para trado tipo 1: (a) N1P8T0.4; (b) N2P8T0.8 (c) N3P8T1

Em relação aos contornos de deslocamento lateral normalizados (Figura 125), verifica-se que, à medida que a taxa de cravação aumentou ($v/n\rho = 0,4$ para $v/n\rho = 1$), aumentou a área de influência do solo afetada devido à etapa de cravação do trado. Esse comportamento pode ser compreendido pelo fato de que, nas menores taxas de cravação, tem-se a maior velocidade de rotação, portanto, a cravação do trado é facilitada pelo desconfinamento gerado pelo excesso de rotação, consequentemente o deslocamento do solo da envolvente da estaca na cravação afeta uma menor área.

Nota-se, ainda nos contornos de deslocamentos horizontal incrementais dos ensaios N2P8T0.8 e N3P8T1 que os maiores deslocamentos são ao final do processo de cravação de $z = 15R$ para $z = 20R$ (Figura 125). Esse comportamento possivelmente é decorrente do maior confinamento nas maiores profundidades, conseqüentemente, necessita-se de uma maior força de cravação, assim deformando mais o maciço na superfície.

Observa-se, por meio dos contornos de deslocamento vertical acumulado (Figura 129), que o solo superficial é empurrado para cima e o solo abaixo do trado é forçado a sair da base do trado e é empurrado para baixo em um comportamento semelhante ao que ocorre para uma estaca cravada. Além disso, percebe-se que à medida que a taxa de cravação ($v/n\rho = 0,4$ para $v/n\rho = 1$), aumenta, a tendência do levantamento superficial aumentou. Isso pode ser explicado pelo fato de que, nas maiores taxas de cravação, tem-se a menor velocidade de rotação, portanto, para a taxa de cravação igual a um ($v/n\rho = 1$) (N3P8T1), o efeito de densificação predomina, no processo de introdução do trado, e não a descompressão do solo que pode ser produzida por excessos de rotações.

Além disso, nota-se que, na velocidade de rotação intermediária (N2P8T0.8), ocorre o maior movimento descendente localizado abaixo da ponta do trado, no entanto, na velocidade de rotação superior (N1P8T0.4), este comportamento não é evidente e o movimento para baixo da ponta do trado é praticamente zero.

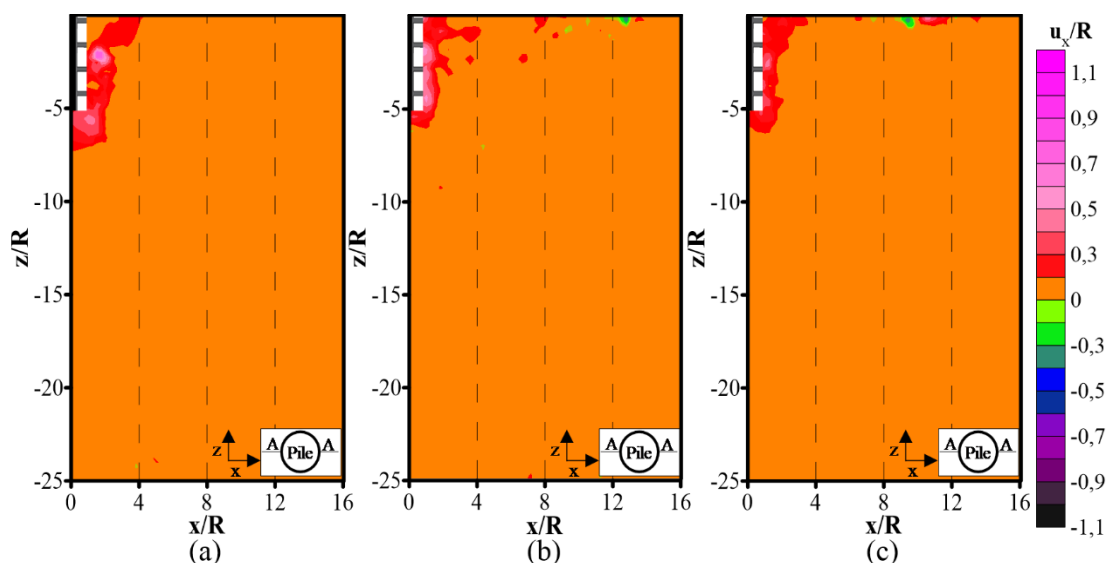


Figura 130 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 5R$ para o trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c) N6P9T1.

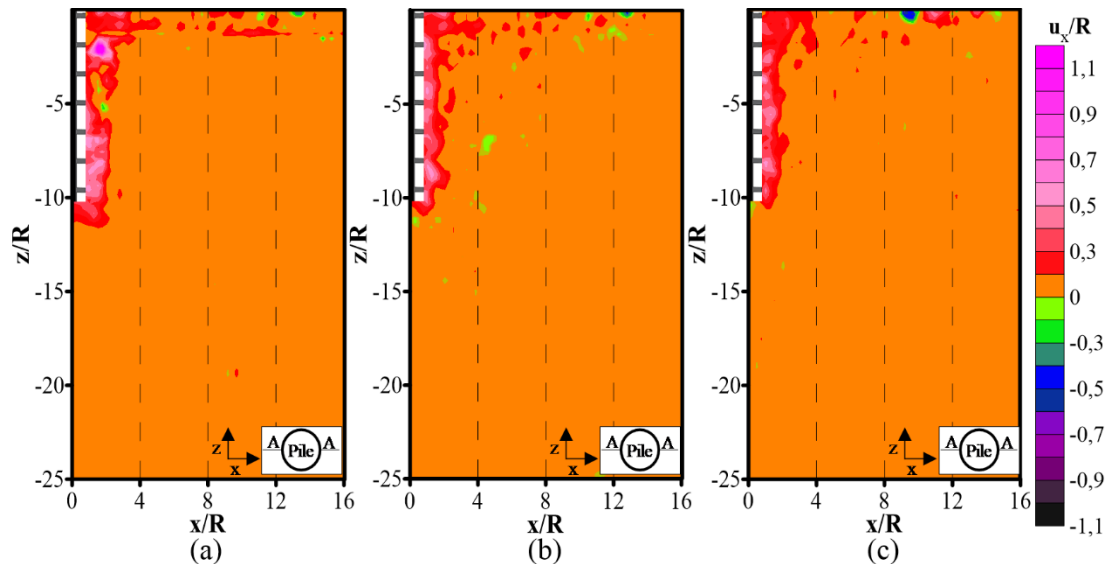


Figura 131 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z=0R$ para $Z=10R$ para o trado tipo 2:(a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.

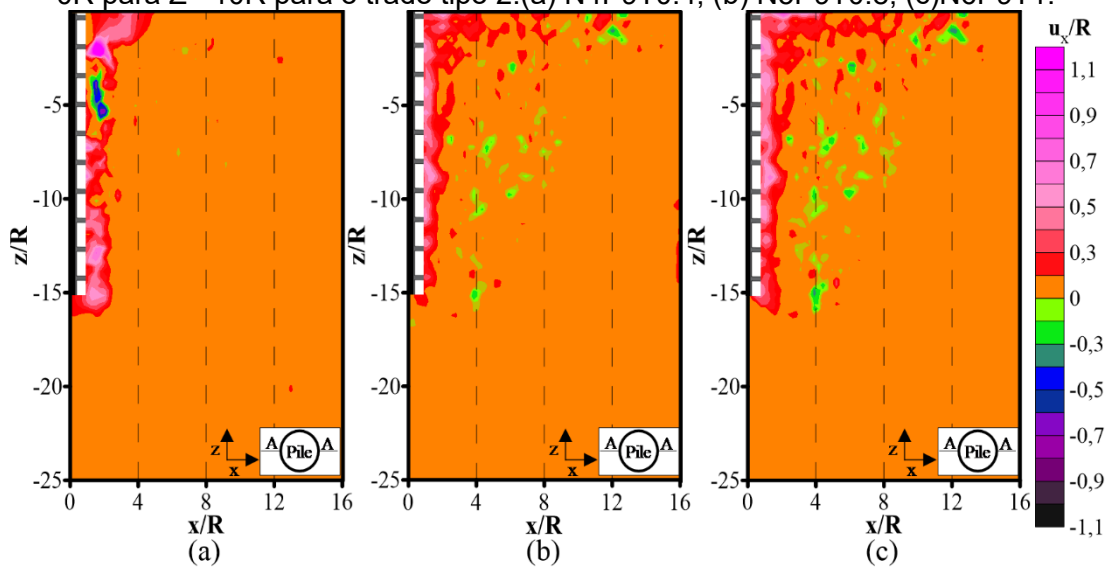


Figura 132 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z=0R$ para $Z=15R$ para o trado tipo 2:(a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.

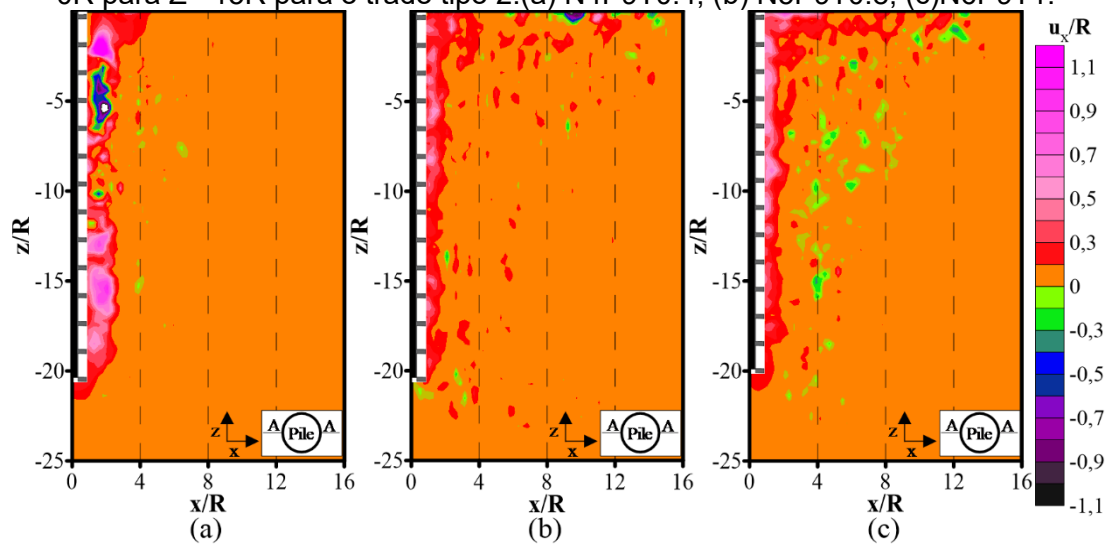


Figura 133 - Contornos de deslocamento lateral normalizados para trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c)N6P9T1.

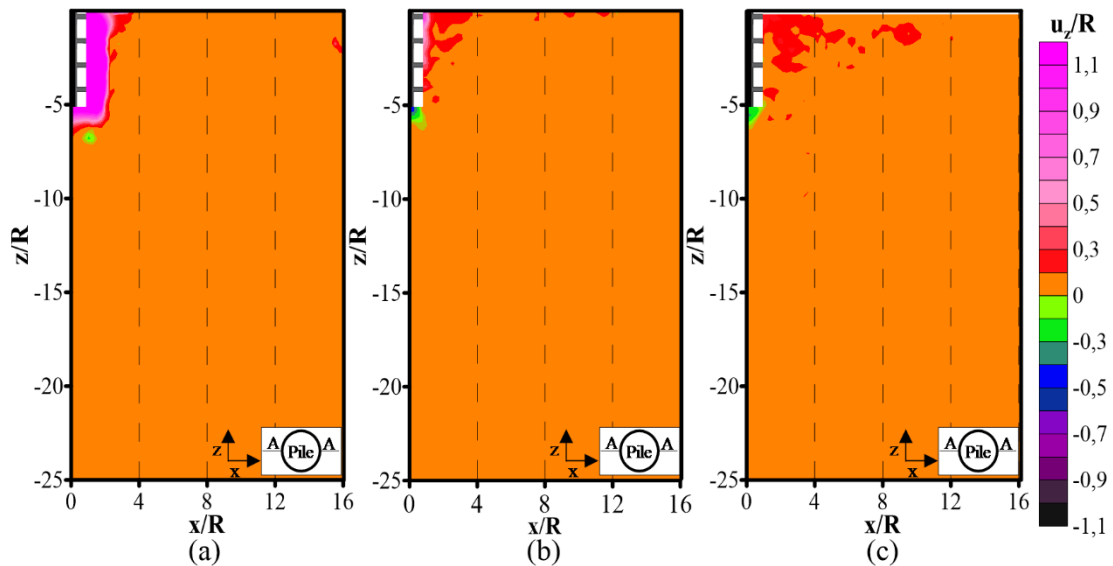


Figura 134 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 5R$ para o trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c) N6P9T1.

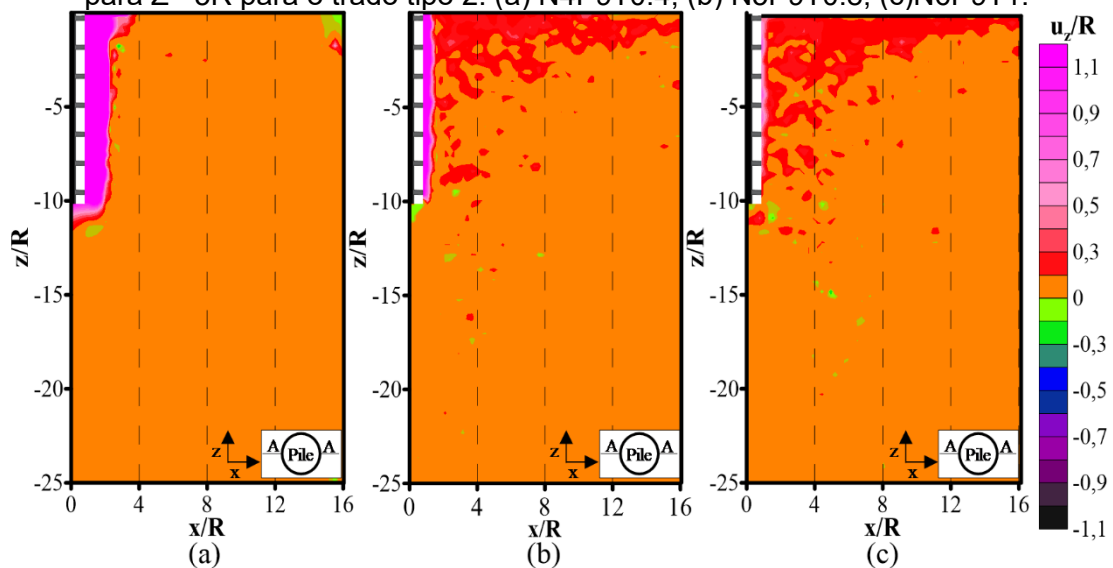


Figura 135 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 10R$ para o trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c) N6P9T1.

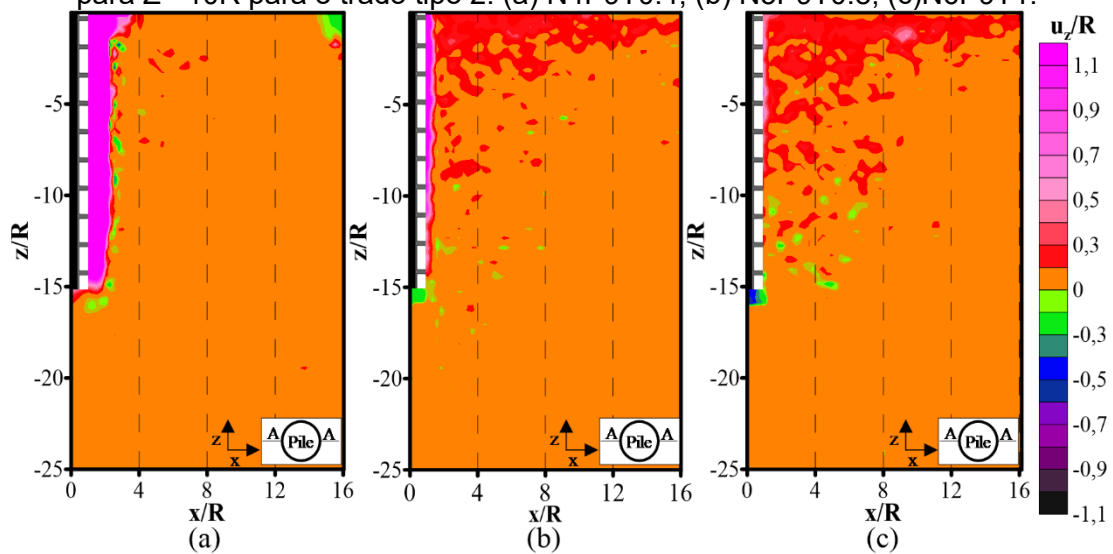


Figura 136 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 15R$ para o trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c) N6P9T1.

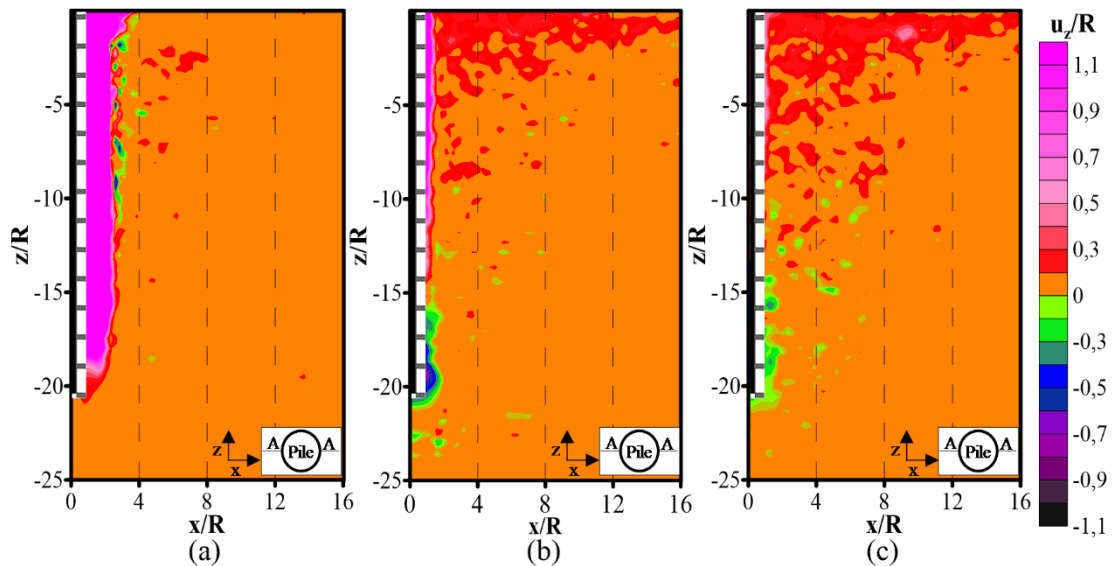


Figura 137 - Contornos de deslocamento vertical normalizados para trado tipo 2: (a) N4P9T0.4; (b) N5P9T0.8; (c) N6P9T1.

Dos resultados dos ensaios realizados com o trado tipo 2, é possível avaliar, por meio dos contornos de deslocamento vertical acumulado (Figura 137), que, novamente, o solo superficial tende a ser empurrado para cima e o solo abaixo do trado é forçado a sair da base do trado, sendo empurrado para baixo. Além disso, verifica-se que, com a redução da taxa de cravação ($v/n\rho = 1$ para $v/n\rho = 0,4$), reduz-se, significativamente, o levantamento superficial do solo. Esse comportamento pode ser explicado, pelo fato de que nas taxas de cravação menores ($v/n\rho = 0,4$) têm-se as maiores velocidades de rotações, conseqüentemente, o excesso de rotação no maciço induz a descompressão do maciço e não ocorre o levantamento superficial do solo.

Em relação ao deslocamento do solo na base do trado (Figura 137), nota-se que, no ensaio realizado com a menor taxa de cravação ($v/n\rho = 0,4$), que é quando a rotação é superior (N4P9T0.4), o movimento descendente localizado abaixo da ponta do trado é praticamente nulo. Esse comportamento também foi descrito para os ensaios realizados com o trado tipo 1 que possui o passo igual a 8mm.

Em relação aos contornos de deslocamento lateral normalizados (Figura 133), observa-se, novamente, o comportamento bem similar aos descritos para os resultados utilizando o trado 1. Pode ser visto que, para o ensaio da taxa de cravação menor ($v/n\rho = 0,4$) não ocorre praticamente deslocamento nenhum do solo a partir de 3R do eixo da estaca, ou seja, não ocorre alteração da densidade

do solo, localizado em distâncias superiores a 3R do eixo da estaca, devido ao processo de cravação do trado.

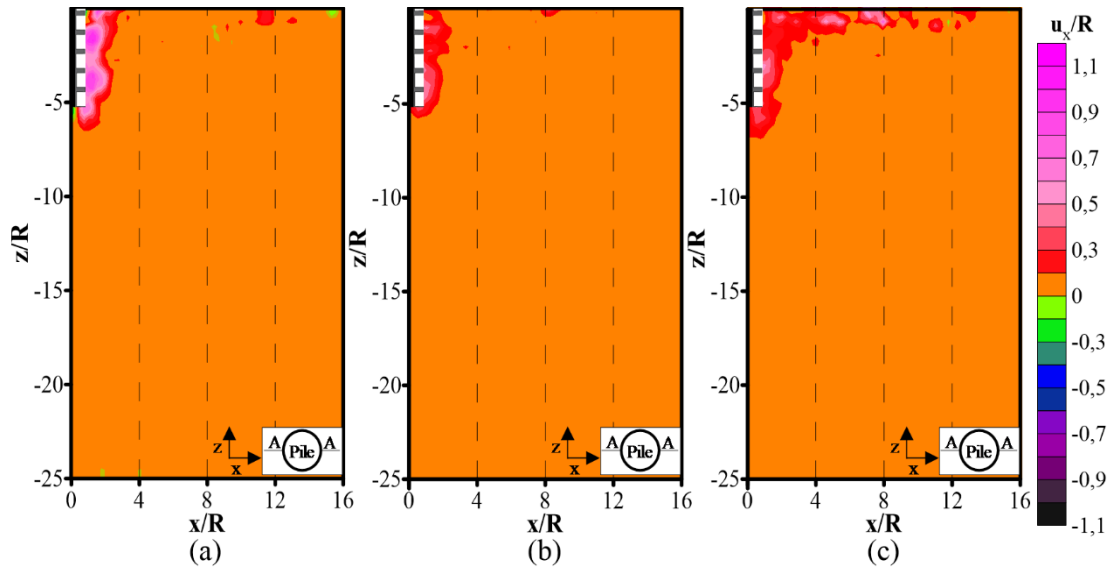


Figura 138 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z=0R$ para $Z=5R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c) N969T1.

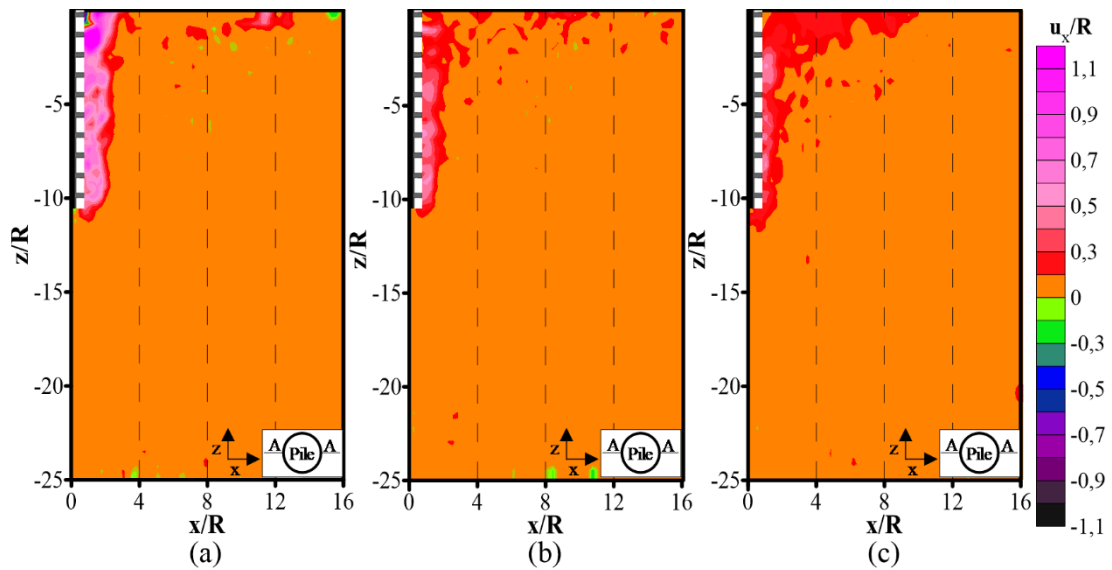


Figura 139 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z=0R$ para $Z=10R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c) N969T1.

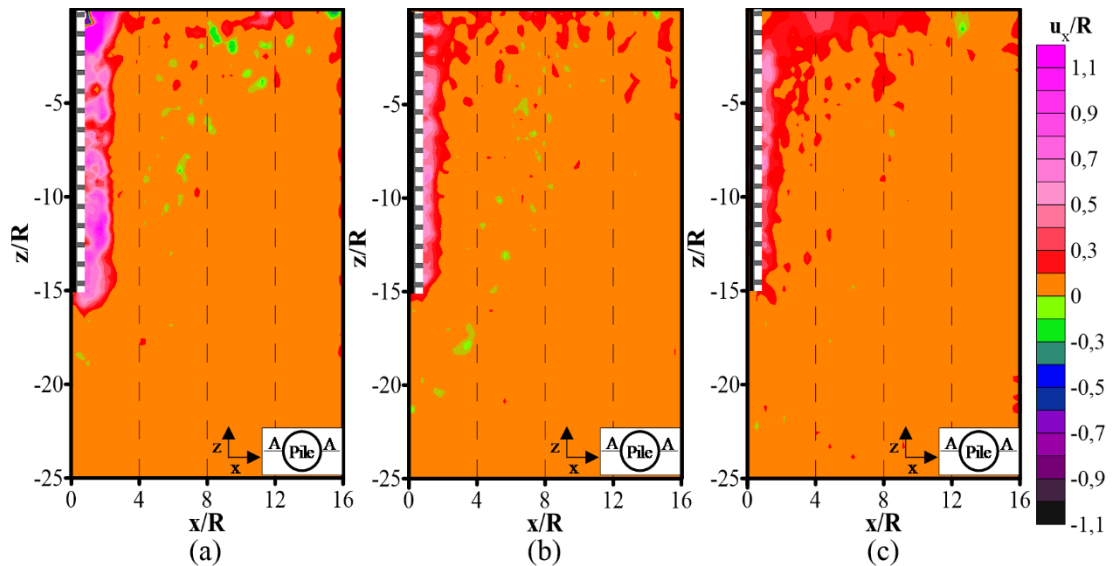


Figura 140 - Contornos de deslocamento horizontal normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 15R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c) N969T1.

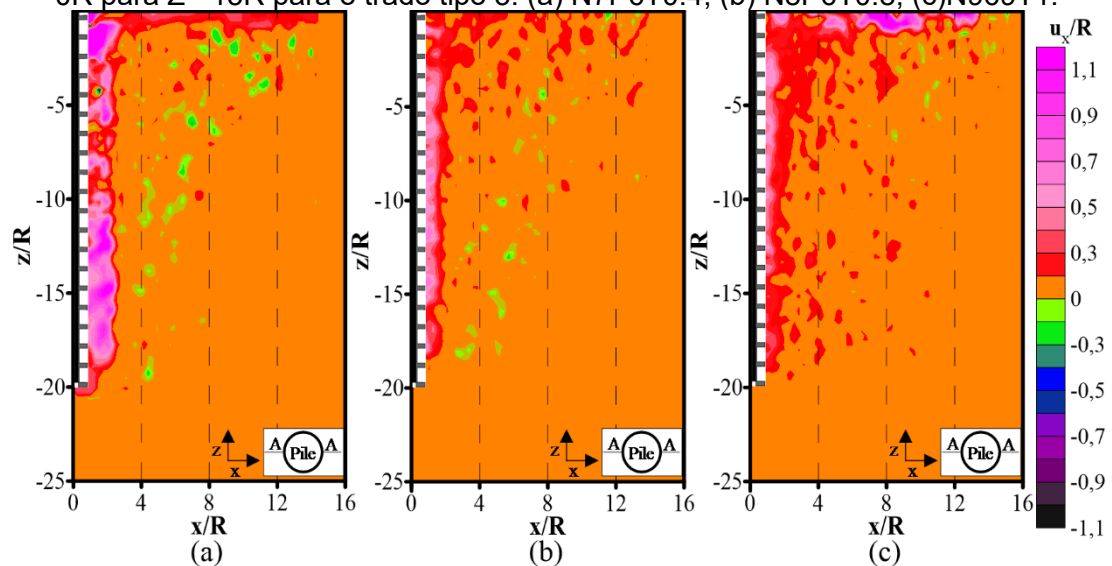


Figura 141 - Contornos de deslocamento lateral normalizados para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c) N969T1.

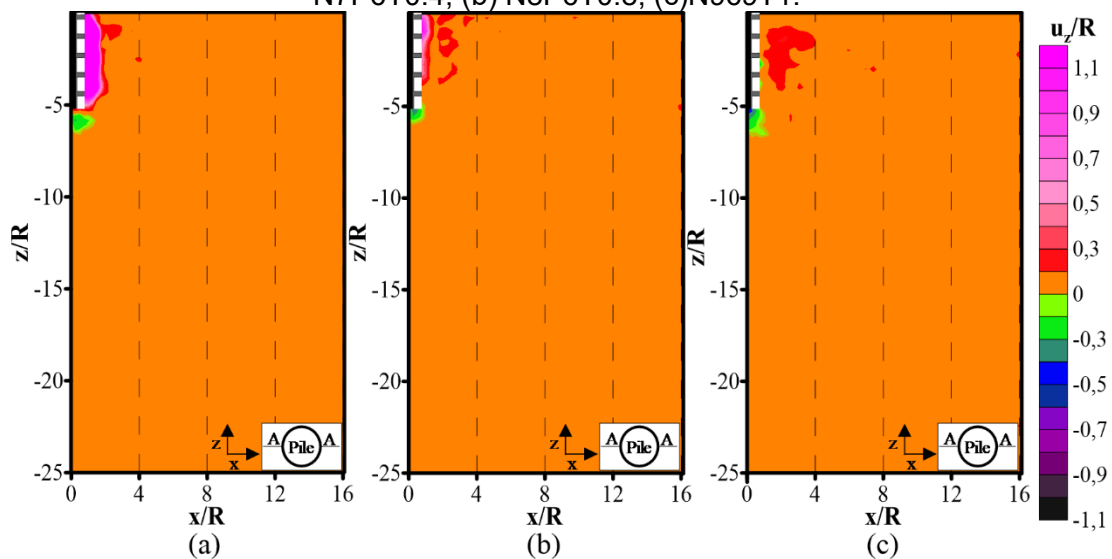


Figura 142 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 5R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c) N969T1.

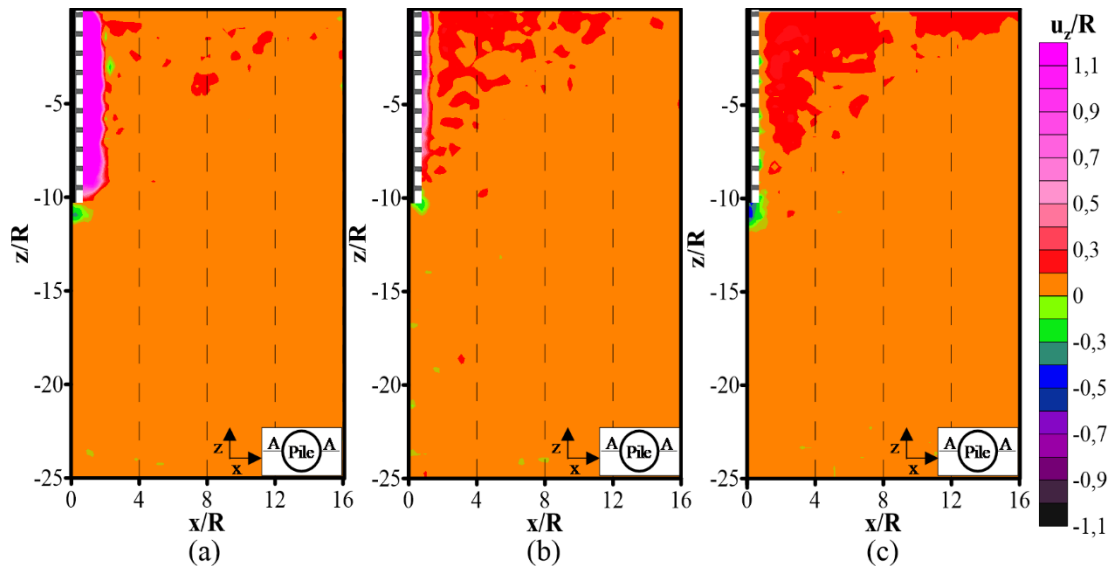


Figura 143 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 10R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c) N969T1.

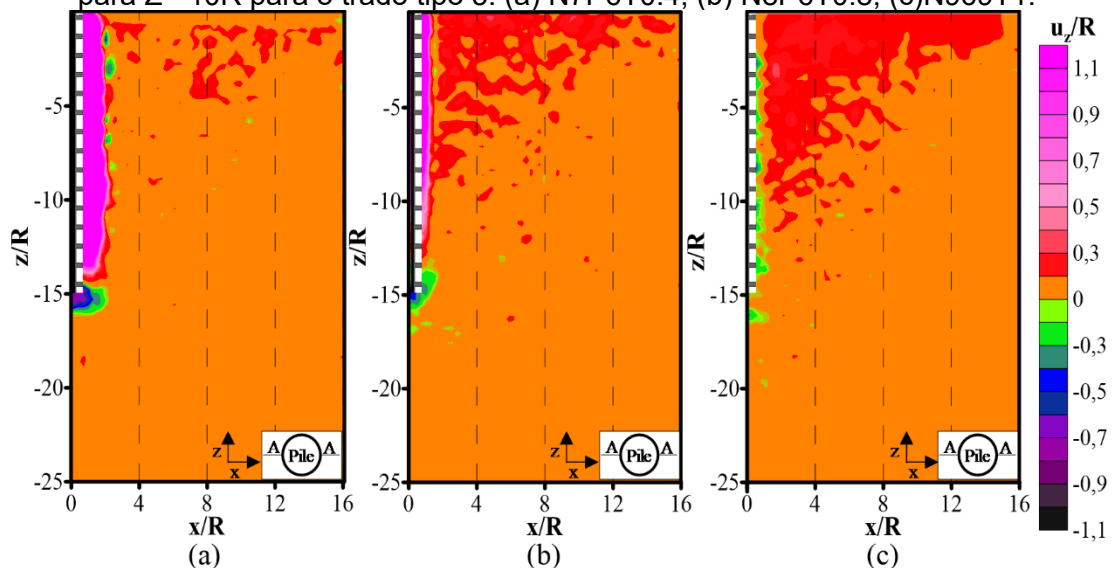


Figura 144 - Contornos de deslocamento vertical normalizados incrementais de $z = 0R$ para $Z = 15R$ para o trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c) N969T1.

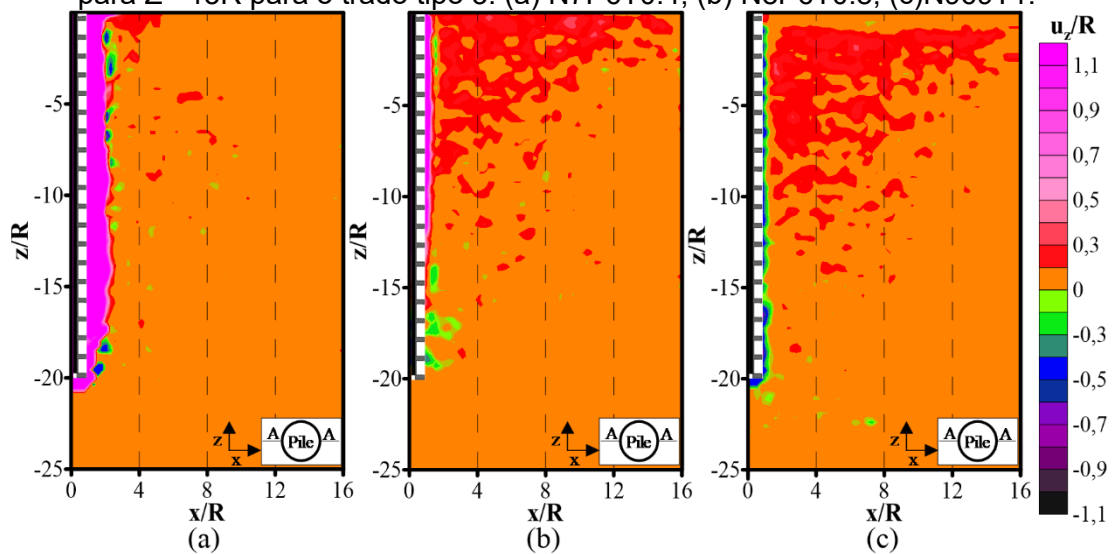


Figura 145 - Contornos de deslocamento vertical normalizados para trado tipo 3: (a) N7P6T0.4; (b) N8P6T0.8; (c) N969T1.

Os resultados dos ensaios realizados com o trado tipo 3 apresentaram o comportamento muito similar aos anteriores e, novamente, percebe-se o aumento da tendência do movimento descendente localizado abaixo da ponta do trado, à medida que a taxa de cravação aumenta (Figura 145). Ou seja, com a velocidade mais rápida de rotação (N7P6T0.4), o movimento descendente reduz e as hélices do trado perdem o potencial de preenchimento do trado pelo solo da base. Como resultado, dessa alimentação de base insuficiente para manter os espaços entre as hélices do trado preenchidos, o trado se alimenta do solo lateral, gerando a descompressão do maciço, concordando com as conclusões relatadas por BROWN *et al.* (2007) e HIRD *et al.* (2011), no seu trabalho de modelagem física de trados do tipo ômega em argila transparente.

A Figura 146 apresenta um esquemático mostrando o processo de cravação do trado de uma estaca hélice contínua com elevada velocidade de rotação em relação ao avanço vertical.

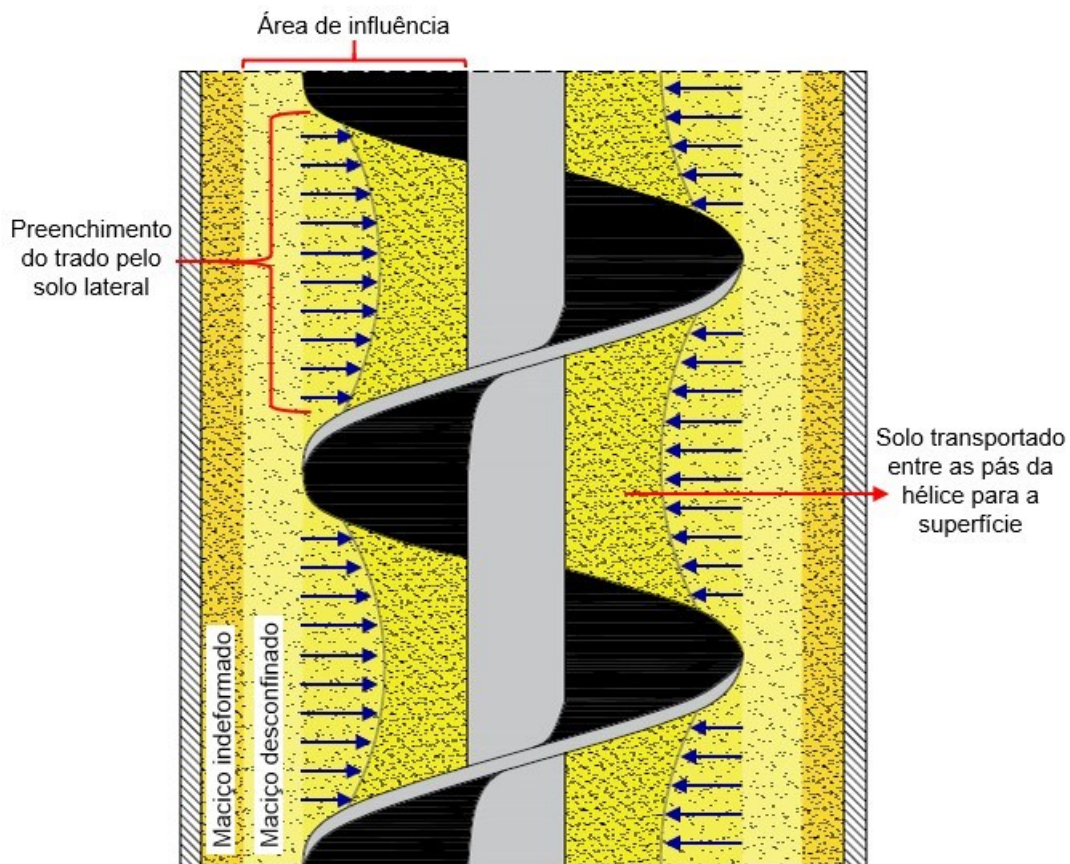


Figura 146 - Esquemático mostrando o processo de cravação do trado de uma estaca hélice contínua com elevada velocidade de rotação em relação ao avanço vertical.

Outro ponto a observar (Figura 145) é que o deslocamento vertical é muito maior na parte superficial do maciço de solo. A razão para este comportamento é que, em maiores profundidades, desenvolvem-se maiores pressões laterais, dificultando, assim, o deslocamento lateral nas maiores profundidades.

5.3 Influência do Passo

Além da investigação da influência da taxa de cravação no deslocamento do solo na etapa de cravação do trado do processo executivo da estaca hélice contínua, foi avaliado o efeito do passo. Para isso, comparam-se sempre os ensaios com a mesma taxa de cravação, porém com trados de passos diferentes, ou seja, comparam-se a Figura 125(a) com a Figura 129(a) e a Figura 133(a) ; a Figura 125(b), a Figura 129(b) e a Figura 133(b); e a Figura 125(c); a Figura 129(c) e a Figura 133(c). Analogamente fazem-se as comparações para os contornos de deslocamentos vertical.

Dessa maneira, comparando os resultados dos contornos de deslocamento vertical normalizados dos ensaios e os resultados dos contornos de deslocamento lateral normalizados, nota-se no geral, que a mudança da geometria do trado (trado tipo 1, 2 e 3) não resultou em influências significativas no campo de deslocamento do solo durante o processo de cravação.

A influência do passo não é clara, devido à alteração do passo modificar diferentes fatores no processo, como: a inclinação da hélice e a área de contato entre a parede do furo e o solo entre as hélices do trado (Figura 147).

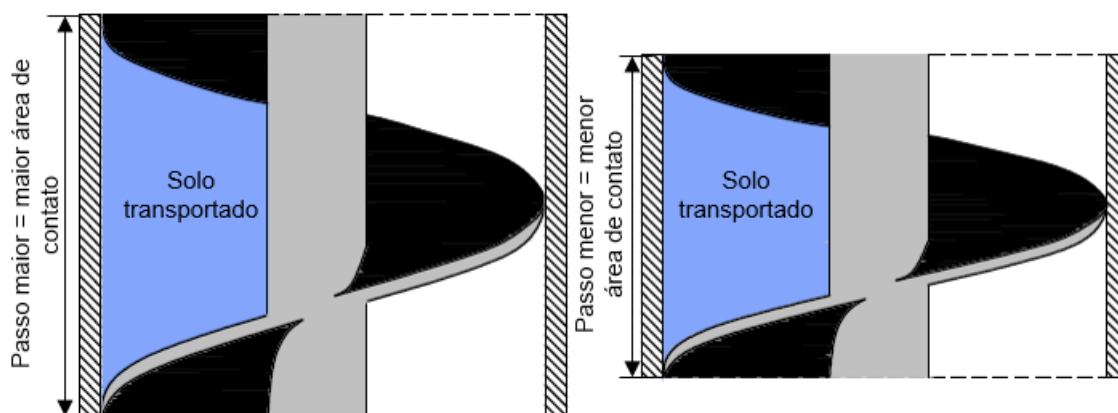


Figura 147 - Efeito da configuração do trado no transporte do solo

Portanto, como esses fatores agem de maneiras distintas na ação de transporte do solo entre as hélices do trado contínuo, conforme será descrito posteriormente na seção 5.5, acaba não resultando em modificações do estado do solo no entono da estaca.

5.4 Área de Influência

A área do solo que sofre distúrbio como resultado da etapa de cravação do trado, durante o processo executivo das estacas hélices contínua, também pode ser observada por meio das figuras 122 a 145. De modo geral, notam-se evidências claras de que há uma perturbação significativa do solo no entorno da estaca, dentro de uma zona de aproximadamente igual a $6R$, para os ensaios do trado tipo 1, considerado como a referência. Tal observação se aproxima dos resultados encontrados por SIEGEL (2012) em um estudo da perturbação do solo por meio de ensaios de penetração de cone (CPT), realizados ao lado de quatro estacas instaladas com diferentes velocidades de rotações do trado. Esta zona afetada também se aproxima das áreas de influência relatadas por outros métodos de instalação em trabalhos experimentais de LUNDBERG *et al.* (2013), VESIC (1977), SALGADO (2014) e SULEIMAN *et al.* (2014) e por resultados analíticos propostos por DIJKSTRA *et al.* (2011).

Observa-se, ainda, que a zona perturbada tem um formato, aproximadamente, cônico, similar aos resultados gerados por modelos reduzidos obtidos por KENNY *et al.* (1997) e pelas análises de ensaios de campo obtidos por THORBURN *et al.* (1993).

5.5 Análise da ação de transporte do solo entre as hélices do trado contínuo

Para melhor compreender a influência da taxa de cravação do trado no transporte de solo, são feitos cortes verticais nos contornos de deslocamento vertical normalizados, no solo lateral do trado (para $x/R = 1$), conforme a Figura 148.

Identifica-se que, quanto menor a taxa de cravação, ensaios: N1P8T0.4; N4P9T0.4 e N7P6T0.4, maior é a tendência do solo, exatamente na envolvente

da estaca, de movimentar-se para cima. No entanto, essa medição de deslocamento vertical nas imediações do trado, não mostra claramente se grãos do solo estão sendo retirados pelas hélices do trado na cravação ou se os grãos estão se movendo lateralmente para cima e para fora das hélices do trado.

Assim, além dessa medição dos contornos de deslocamento vertical, a massa dos grãos de sílica transportados entre as hélices do trado para a superfície são pesados sempre ao final dos ensaios e confirmaram que quanto menor a taxa de cravação, maior é o volume de solo retirado do furo, conforme a Figura 149. O volume foi calculado assumindo que a areia era transportada entre das hélices do trado na sua densidade crítica.

Conseqüentemente, um número excedente de rotações pode ser danoso, pois o volume de solo extraído do maciço pelo trado, pode exceder o volume de solo densificado, devido ao tamanho do trado e ao corte. Portanto, pode ocorrer a descompressão e a diminuição da densidade do solo próximo à estaca, o que influenciará na capacidade de carga final da estaca e aumentará o recalque superficial.

Nota-se que o volume transportado para a superfície entre as hélices do trado é maior que o volume do fuste quando é utilizado o trado de passo igual 6,4 (trado tipo 3) e taxa de cravação igual a 0,4 ($v/n\rho = 0,4$) (N7P6T0.4), Figura 149. Portanto, observa-se claramente que nesse caso ocorre o desconfinamento do maciço.

Além dessas observações, os resultados (Figura 149) mostram evidências de que quanto maior o passo do trado e, conseqüentemente, maior inclinação das pás do trado, menor é a tendência de transporte do solo para a superfície. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, quando a inclinação das hélices aumenta, o valor de $\lambda_{m\acute{a}x}$ diminui, e assim a velocidade de elevação diminui, conforme é apresentado na Figura 150. Esta tendência também concorda com os trabalhos apresentados por FLEMING (1995) e KENNY *et al.* (1997).

No entanto, a inclinação da hélice não é o único elemento que influencia nas características de transporte do solo entre as hélices do trado e no campo de

deslocamento do solo resultante do processo de cravação. A rugosidade do trado também influencia nas características de transporte de solo, bem como a área de contato entre a parede do furo e o solo entre as hélices do trado (Figura 150).

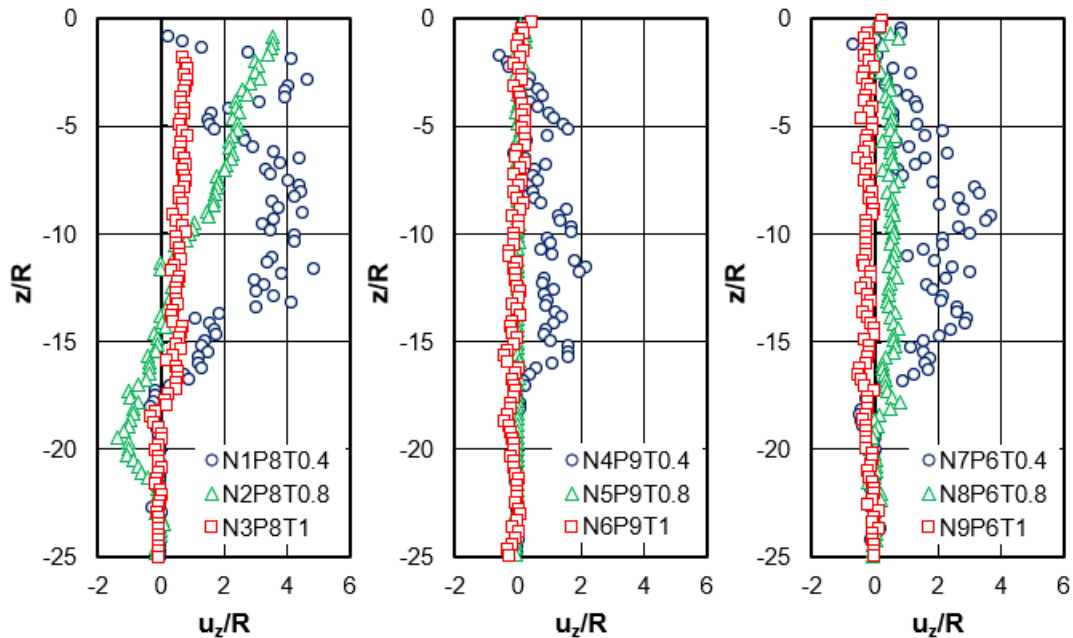


Figura 148 - Contornos de deslocamento vertical normalizados para $x/R = 1$

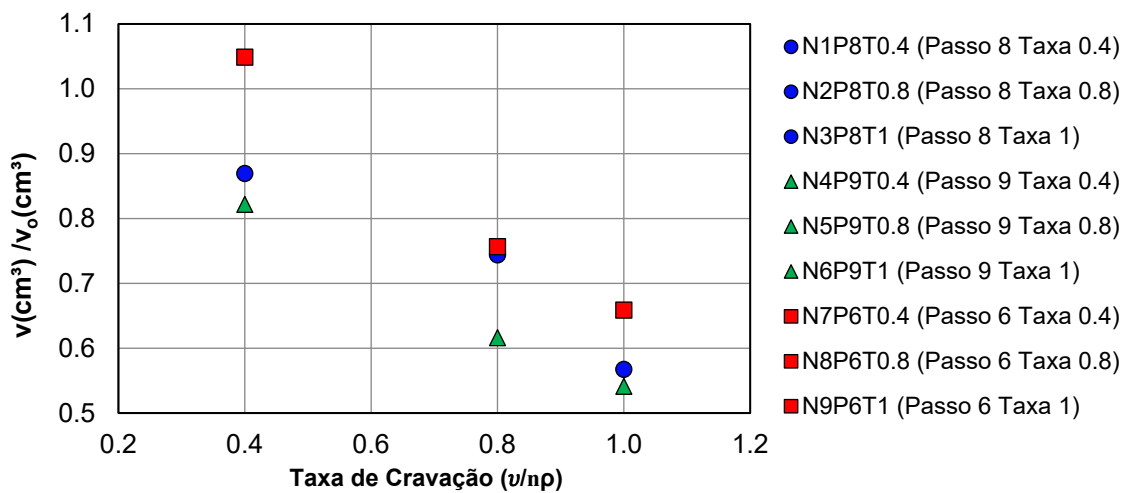
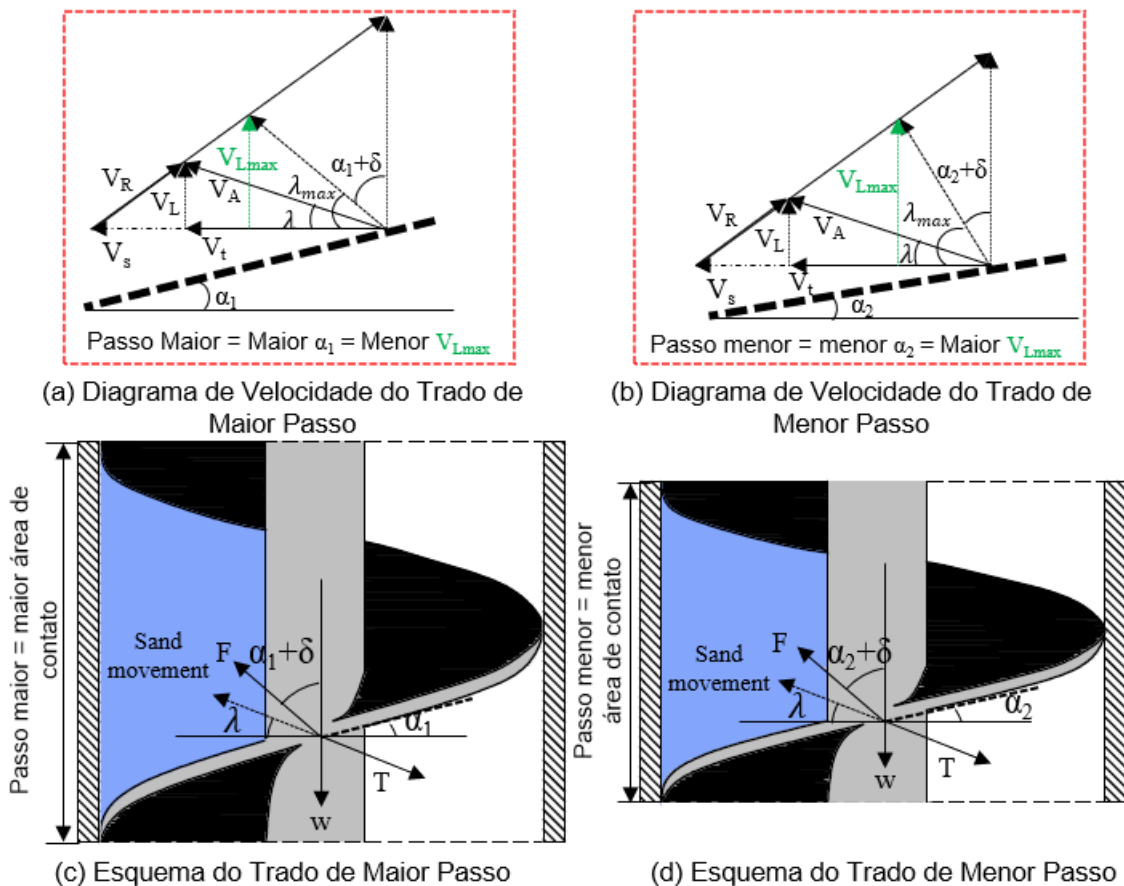


Figura 149 - Variação do volume de solo transparente transportado para superfície com a taxa de cravação. Nota: v_0 representa o volume do furo e v representa o volume transportado para a superfície.

Segundo KENNY *et al.* (1997) quanto mais rugosa é a superfície do trado, menos solo é transportado para a superfície. No entanto, como os trados utilizados no presente trabalho são do mesmo material, a rugosidade não é um parâmetro possível de ser avaliado neste momento.

Em relação a área de contato, segundo SLATTER (2000), quando se aumenta o passo entre as hélices do trado, a área de contato entre a parede do furo e o solo de dentro das hélices do trado também aumenta, o que resulta em maior transporte de solo entre as hélices do trado. Analogamente, quando o espaço entre as hélices do trado é reduzido, aumenta-se a dificuldade do transporte de solo entre as hélices do trado, pois a área de contato entre a parede do furo e o solo dentro dos espaços entre as hélices se reduz. Isso explica os volumes de solo transportados entre as hélices do trado dos ensaios N2P8T0.8 e N8P6T0.8; N3P8T1 e N9P6T1 serem tão similares, mostrando que não é apenas a inclinação da hélice o fator determinante para as características de transporte do solo entre as hélices do trado.



Legenda:

W = força peso do solo dentro do passo
 F = força da hélice que empurra o solo lateral
 T = força oposta a F causada por pressões de terra laterais
 λ = ângulo que governa o movimento da partícula
 $\lambda_{\text{máx}}$ = ângulo máximo do movimento da partícula
 α = representa a inclinação da hélice do trado.

V_s = velocidade tangencial;
 V_R = velocidade relativa da partícula
 V_a = velocidade absoluta da partícula
 V_L = velocidade de elevação
 V_t = velocidade de rotação
 δ = ângulo de atrito de superfície
 $V_{L\text{máx}}$ = velocidade máxima de elevação

Figura 150 - Efeito da configuração do trado no transporte do solo.

É importante ressaltar que a descompressão do maciço não é identificada minuciosamente nos resultados de contornos de deslocamentos horizontal e vertical, incrementais e acumulados, pois a retirada da maior massa de solo ocorre na retirada do trado e os contornos de deslocamentos registrados são correspondentes ao processo de introdução do trado no maciço. Portanto, os contornos de deslocamentos apresentados, quando se utiliza menores taxas de cravação, mostram uma maior tendência de o solo movimentar-se para cima entre as hélices do trado, consequentemente, podendo descomprimir o maciço.

5.6 Determinação da Taxa de cravação ótima do trado

A densificação de maciços de solos fundamentalmente arenosos no estado fofo ou mediantemente compactos, pelo uso de estacas cravadas, é uma técnica bem compreendida no meio técnico (KENNY *et al.* 1997). No entanto, o processo executivo das estacas do tipo hélice contínua, pode gerar a perturbação dos solos sem coesão e, consequentemente, diminuir a capacidade de carga da estaca. Sabe-se que o distúrbio do solo é minimizado quando na cravação do trado de estacas hélice contínua é mantido o transporte do solo entre as hélices do trado em equilíbrio, conforme o esquemático apresentado na Figura 151. Isso vai ser alcançado se o excesso de volume de solo produzido na cravação for igual ao volume transportado entre as hélices do trado para a superfície (V_t). O excesso de volume é a soma do volume deslocado pelo trado de metal, que depende, em grande parte, do diâmetro do trado oco (V_{dt}), e do volume deslocado devido ao corte (V_d), Equação(12):

$$V_t = V_{dt} + V_d \quad (12)$$

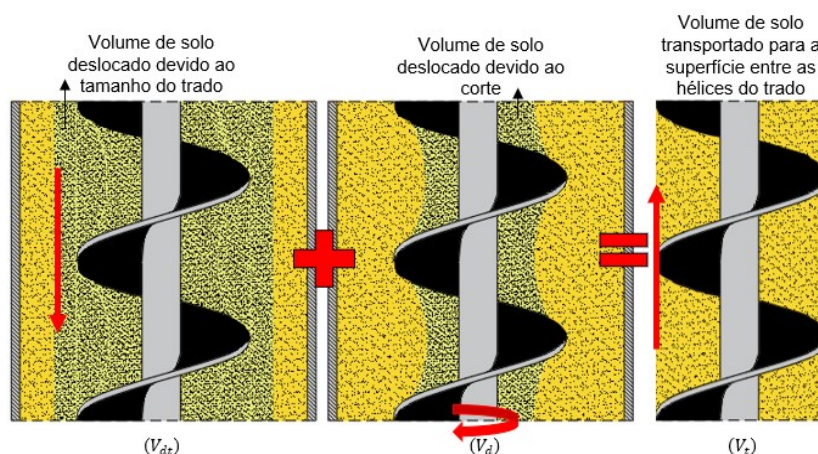


Figura 151 – Condição para cravação do trado de estacas

CANAKCI (1996) mostra que a capacidade de transporte de um trado que se move verticalmente é geralmente definida em termos da eficiência volumétrica equivalente de um trado estacionário ($\eta_{(v=0)}$) calculada pelas equações 13 e 14:

$$\eta_{(v=0)} = \frac{\text{volume real de material transportado } (V)}{\text{volume total de areia contida dentro de um passo do trado}} \quad (13)$$

$$\eta_{(v=0)} = \frac{V}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)\rho} \quad (14)$$

onde, D é o diâmetro externo do trado; d é o diâmetro interno do trado, ρ é o passo do trado e V é o volume transportado por excesso de rotação e calculado assumindo que a areia era levada para superfície dentro hélices na sua densidade crítica. CANAKCI (1996), ainda, mostra que o transporte do volume de materiais entre as hélices do trado é maior para um trado estacionário, ou seja, para o trado sem movimentação vertical ($v/n\rho = 0$) e depende da geometria do trado e das pressões laterais desenvolvidas em torno do trado durante a introdução do trado. Além disso, o autor relatou que, quando o trado penetra no solo com uma taxa de cravação igual a 1 ($v/n\rho = 1$), a eficiência volumétrica é igual a zero.

Portanto, com base no estudo de CANAKCI (1996), considera-se a eficiência volumétrica igual a zero para os ensaios realizados com as taxas iguais a 0,8 e 1, e analisa-se a eficiência volumétrica para os ensaios realizados com a taxa de cravação igual 0,4 ($v/n\rho = 0,4$) (N1P8T0.4; N4P9T0.4 e N7P6T0.4). As eficiências volumétricas, para o presente estudo, estão apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 - Eficiências volumétricas dos trados, durante a cravação com taxa igual a 0,4.

Ensaio	ρ (mm)	ρ/D	$\eta_{(v=0)}$ (%)
N7P6T0.4	6,4	0,5	41
N1P8T0.4	8	0,6	34
N4P9T0.4	9,6	0,8	32

Observou-se que à medida que o passo da hélice aumenta a eficiência volumétrica diminuiu, pois, o volume de material transportado por rotação para os trados com as hélices mais inclinadas é menor. Resultado

semelhante aos relatados por KENNY *et al.* (1997) para o trado com relação igual a $\rho/D=0,6$.

Além do cálculo da eficiência volumétrica equivalente de um trado estacionário, é possível estimar a taxa de cravação ótima. Para isso, calcula-se: o volume de areia transportado entre as hélices do trado em um intervalo de tempo, dado pela Equação 15:

$$V_t = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)n\rho\Delta t\eta \quad (15)$$

onde, Δt é o tempo de cravação e η é a eficiência volumétrica de cravação do trado, dado pela Equação 16:

$$\eta = \eta_{(v=0)}\left(1 - \frac{v}{n\rho}\right) \quad (16)$$

Assim, $\eta = 0$ quando a taxa de cravação ($v/n\rho$) é igual a 1, e quando a taxa de cravação ($v/n\rho$) é igual a 0, a eficiência é $\eta = \eta_{(v=0)}$ e o trado transporta o máximo de areia. O volume de areia deslocada devido a cravação do trado no maciço em um intervalo de tempo é dado pela Equação (17):

$$V_{dt} = \frac{\pi d^2}{4} V\Delta t\eta \quad (17)$$

O volume alterado devido à densificação ou dilatação do solo granular durante o corte é calculado pela Equação (18):

$$V_d = \frac{\pi D^2}{4} V\Delta t a \quad (18)$$

onde, a é um fator que relaciona a variação de volume da areia em relação a densidade crítica dividida pelo volume inicial. Portanto, considerando que o excesso de volume de solo produzido na cravação é igual ao volume transportado entre as hélices do trado (Equação 13) pode-se calcular a taxa de cravação ótima do trado, o que está expresso pela Equação (19):

$$\frac{v}{n\rho} = \frac{\eta_{(v=0)} \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right)}{\left[\left(\frac{d}{D}\right)^2 (1 - \eta_{(v=0)}) + (a + \eta_{(v=0)})\right]} \quad (19)$$

O efeito da relação $\frac{\rho}{D}$ na taxa de cravação ótima para a densidade relativa igual a 30%, calculados para os presentes ensaios a partir da Equação 19, é mostrado na Figura 152.

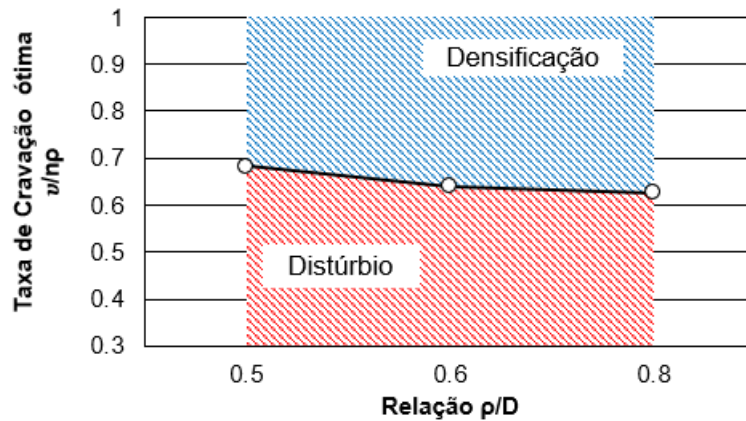


Figura 152 – Efeito da relação ρ/D do trado na taxa de cravação ótima ($v/n\rho$).

Dessa maneira, a variação da taxa de cravação ótima em relação ρ/D , da Figura 152, indica as taxas de cravação necessárias para equilibrar as ações de corte e de transporte do trado. Qualquer combinação de taxa de cravação que se encontra na área vermelha pode causar alívio de tensões do solo. Da mesma forma, qualquer combinação que esteja na área azul, pode causar densificação do entorno da areia.

Se a taxa de cravação recomendada por MASSARSCH *et al.* (1988) for usada ($v/n\rho = 1$), o trado deverá densificar ou comprimir o solo circundante, desde que a perfuratriz tenha torque suficiente. No entanto, se a taxa de cravação recomendada por THORBURN *et al.* (1993) é adotada ($v/n\rho = 0,5$), o alívio de tensões poderá ocorrer, particularmente, quando os trados convencionais são usados em areia fofa. Portanto, conclui-se que se for utilizada uma taxa de cravação inferior 0,68 ($v/n\rho = 0,68$), provavelmente ocorrerá o desconfinamento do maciço.

5.7 Comparação dos resultados dos ensaios realizados com as teorias CEM e SSPM

Atualmente, duas teorias vêm sendo utilizadas sistematicamente para avaliar o campo de deslocamento do solo e as mudanças de tensão resultantes da instalação de estacas cilíndricas: o método de expansão de cavidade (CEM) e o método do caminho de deformação superficial (SSPM). Dessa forma, para avaliar a possibilidade da associação dessas teorias com a previsão de deslocamento do solo na etapa de cravação do trado, os resultados dos ensaios realizados foram comparados com as previsões teóricas (CEM e SSPM) e com outros dados experimentais publicados na literatura técnica (COOKE *et al.*, 1979; FRANCESCON, 1983; Gue, 1984; LEHANE e GILL, 2004; NI *et al.*, 2010; RANDOLPH *et al.*, 1979; ZHOU *et al.* 2017).

5.7.1 Comparação da solução CEM e os resultados dos ensaios existentes

O método conhecido como CEM é uma ferramenta eficiente para analisar as mudanças do campo de deslocamento e as mudanças de tensão no solo resultantes da instalação de estacas cilíndricas (COOKE *et al.*, 1979; CAO *et al.*, 2001; CARTER *et al.*, 1986; CHEN e ABOUSLEIMAN, 2012; GIBSON e ANDERSON, 1961; HILL, 1950; RANDOLPH *et al.*, 1979; SALGADO *et al.*, 1997; VESIC, 1972; YU, 1990; ZHOU *et al.*, 2014a, 2014b, 2014c, 2015).

O método de expansão da cavidade (CEM), aplicado às estacas, pressupõe que, durante a instalação da estaca, o solo é deslocado de maneira semelhante ao solo na envolvente de uma cavidade cilíndrica em expansão. Portanto, devido à simetria radial da instalação de estacas cilíndricas, todas as variáveis de campo (ou seja, deslocamentos, tensões e poropressão) dependem, unicamente, da distância radial do eixo da estaca.

RANDOLPH *et al.* (1979) mostraram que o CEM fornece uma estimativa razoável dos deslocamentos radiais gerados durante a cravação de uma estaca cilíndrica. ZHOU *et al.* (2017) mostra a expressão do método CEM, para o deslocamento radial (u_x) do solo, é dado pela Equação 20:

$$\frac{u_x}{R_{eq}} = \frac{r}{R_{eq}} - \sqrt{\left(\frac{r}{R_{eq}}\right)^2 - 1} \quad (20)$$

onde o R_{eq} é o raio da estaca de ponta fechada ou o raio equivalente de uma estaca de igual volume de solo deslocado para uma estaca de ponta aberta. Portanto, fez-se uma adaptação do método CEM para estimar o deslocamento radial do solo transparente devido à etapa de cravação do trado do processo executivo das estacas hélice continua simulada no estudo. A adaptação consistiu em, ao invés de utilizar o raio da estaca fechada, utilizou-se o raio equivalente que define uma estaca sólida cilíndrica de mesmo volume de solo retirado da cravação. Em forma matemática, é dada a Equação 21:

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{\Delta v}{\pi L}} \quad (21)$$

onde Δv é o volume medido de solo retirado de cada ensaio realizado e L é o comprimento do furo.

Dessa forma, dados experimentais dos deslocamentos radiais, do processo executivo de estacas da literatura técnica e dos ensaios atuais (para $z/R = 5$), são comparados nas figuras 153 e 154, com deslocamentos radiais previstos pela solução CEM. Os deslocamentos laterais são normalizados pelo raio externo do trado R e a variável x significa a posição radial, em relação ao eixo da estaca, da partícula de solo antes da instalação da estaca.

Observa-se que existe uma boa concordância entre todos os dados experimentais e com a solução CEM, embora tenham diferentes procedimentos, geometrias de estacas e tipos de solo. Além disso, vale ressaltar que os dados dos deslocamentos radiais obtidos pelo PIV tiveram algumas imprecisões, já que em alguns gráficos não se obteve uma linha de tendência tão definida dos resultados. Isto pode ser devido à reflexão do laser no trado que gera um problema de alteração do padrão speckle na envolvente do trado, problema relatado também por ZHOU *et al.* (2017).

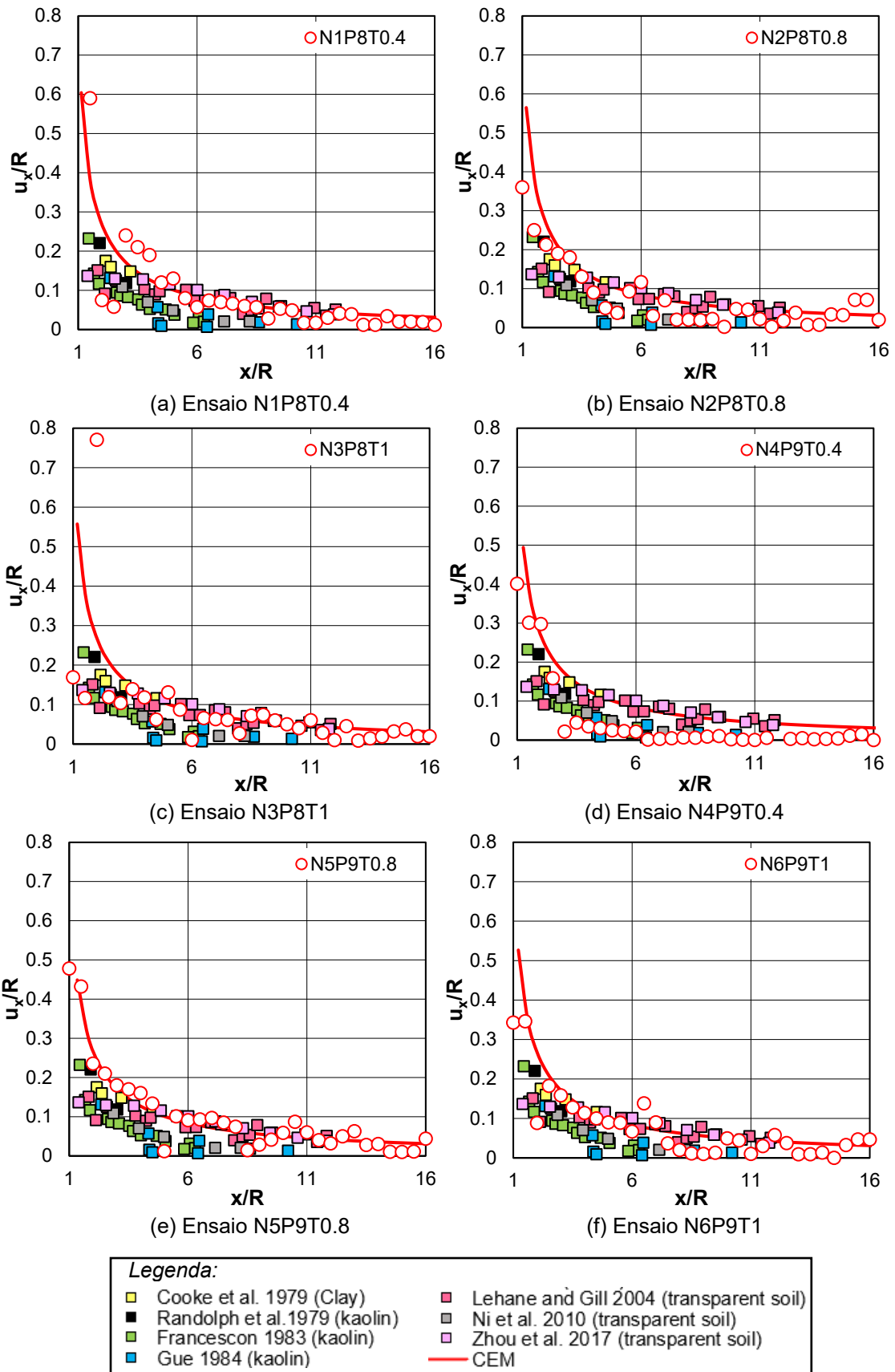


Figura 153 - Comparação entre a estimativa pelo método CEM e os dados experimentais.

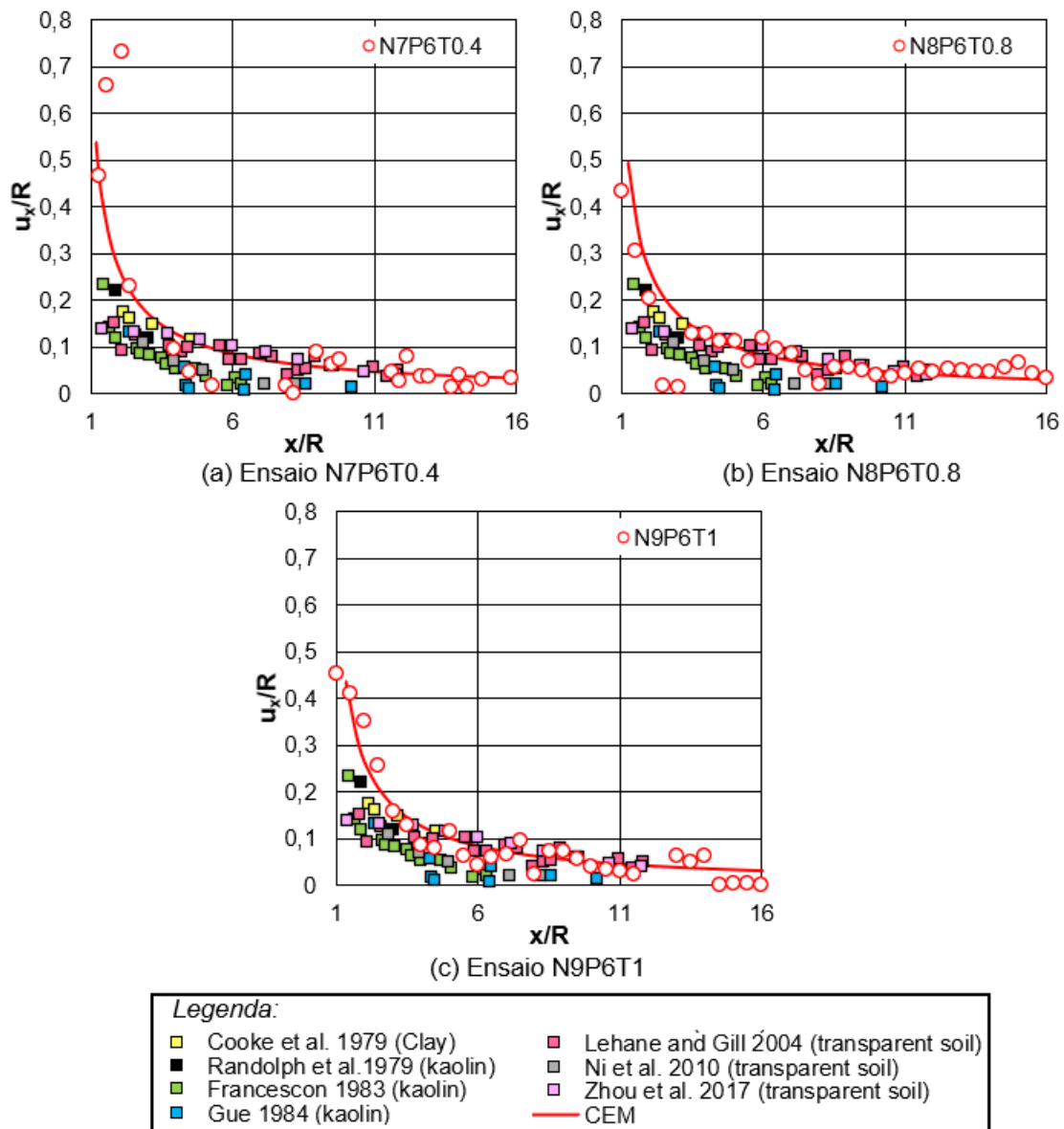


Figura 154 - Comparação entre a estimativa pelo método CEM e os dados experimentais.

A ferramenta CEM para o estudo da deformação do solo no processo de cravação do trado foi aplicada, pela primeira vez, neste estudo, e apresentou concordância com os resultados obtidos dos ensaios. Acredita-se que esta concordância esteja relacionada ao de processo de introdução do trado se assemelhar ao que ocorre com uma estaca cravada no solo. Dessa maneira, os resultados apresentados nas figuras 153 e 154 reforçam a importância da ferramenta CEM, embora esta seja uma teoria simplificada.

5.7.2 Curva de elevação da superfície

Em geral, a instalação de estacas faz com que o solo superficial se eleve na área próxima à sua localização (HWANG *et al.* 2001; ASHFORD *et al.* 2006; HAERI *et al.* 2012; LARISCH *et al.* 2013; XIAO *et al.* 2016; QI *et al.* 2016).

Neste trabalho, as curvas de elevação da superfície versus a distância do eixo da estaca para o trado Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3, sob diferentes taxas de cravação, encontram-se ilustrados na Figura 155.

Observa-se na Figura 155 que os perfis de elevação dos ensaios realizados com a taxa de cravação igual 0,4 ($v/n\rho = 0,4$) apresentam-se com menor levantamento superficial do solo transparente. Este menor levantamento superficial confirma que, com a maior velocidade de rotação, menor é a tendência do levantamento superficial do solo. Este comportamento também foi descrito por KENNY *et al.* (1997). Acrescenta-se que, em praticamente todos os modelos ensaiados, foram observadas fissuras superficiais como resultado do levantamento do solo.

Em relação à forma de elevação, não se observa um perfil bem definido, no entanto a extensão da elevação concorda com a encontrada por LARISCH *et al.* (2015) para estacas escavadas sob diferentes taxas de cravação de trados.

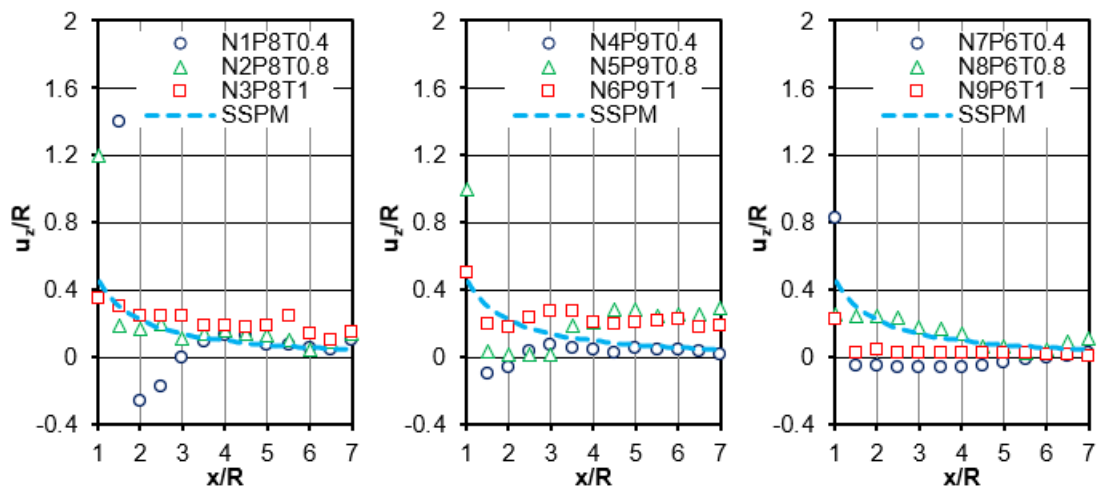


Figura 155 - Esquema do movimento vertical do solo e previsão do método SSPM

5.7.3 Verificação da curva de elevação dos resultados dos ensaios utilizando o SSPM

SAGASETA *et al.* (1997) e SAGASETA e WHITTLE (2001) forneceram um modelo atualizado, conhecido como o método do caminho de tensão superficial (SSPM), que calcula o valor teórico do levantamento do solo no entorno de uma estaca cilíndrica em argila, conforme a Equação (22):

$$u_z = \frac{1}{8} \left(\frac{D^2}{x} - \frac{D^2}{\sqrt{L^2 + x^2}} \right) \quad (22)$$

onde, u_z é o deslocamento vertical da superfície do solo, D é o diâmetro da estaca, L é o comprimento da estaca e x é a distância até ao eixo da estaca.

O método SSPM é uma extensão do método do caminho de deformação (SPM), desenvolvido por BALIGH (1985), e está sendo utilizado amplamente para simular o efeito da instalação de estacas. No método considera-se que o solo no entorno da estaca é um líquido sem viscosidade e incompressível e com fluxo independente da resistência ao cisalhamento solo.

Segundo SAGASETA e WHITTLE (2001), o SSPM é capaz de prever, de forma confiável, as deformações do solo na ponta da estaca, porém o método subestima ligeiramente a oscilação vertical medida na superfície. Além disso, o método não é o ideal para ser aplicado no presente estudo por ter sido desenvolvido para estaca cilíndrica em argila e não para a cravação do trado em areia. No entanto, apesar das limitações, o método será aplicado neste trabalho, assim como o SSPM foi aplicado por ZHOU *et al.* (2017) para avaliar os deslocamentos do solo durante a instalação de estacas pré-moldadas de concreto em seção-X em ensaios utilizando, também, solo transparente simulando areia. Para isso, na Equação 22 considera-se D o diâmetro externo do trado.

Os resultados utilizando a Equação 22 para a estimar o levantamento do solo na superfície são apresentados na Figura 155 para serem comparados com os resultados dos ensaios realizados. Observou-se que a forma de levantamento do solo apresentada em todos os ensaios foi próxima ao levantamento do terreno

estimada pela previsão do SSPM, ambas apresentaram forma côncava. Esse comportamento, não concorda com os resultados relatados por LARISCH *et al.* (2015) para estacas escavadas em argilas.

Outra análise realizada é se o método SSPM estima, razoavelmente, o volume de levantamento do solo (Figura 156). Para isso, fez-se a razão de área definida pelo método SSPM pela área deslocada de solo definida em cada ensaio, ao invés de fazer a relação entre os volumes. Assim, observa-se, na Figura 156, que os ensaios com relação maior que um indicam que o método SSPM superestima o volume de solo deslocado, porém, os ensaios que apresentaram uma relação entre 0 a 1 indicam que a ferramenta SSPM subestima o volume deslocado.

Percebe-se, na Figura 156, que existem diferenças do deslocamento volumétrico estimado pelo método SSPM e do definido nos ensaios realizados. Porém, para os ensaios com a taxa igual a 1, constata-se as menores diferenças. Isso pode ser explicado, porque na taxa de cravação igual a 1 ($v/n\rho = 1$), o trado apresenta a menor velocidade de rotação, conseqüentemente, tende a empurrar o solo para cima e para o lado, e assim, se aproxima mais das considerações admitidas pelo método.

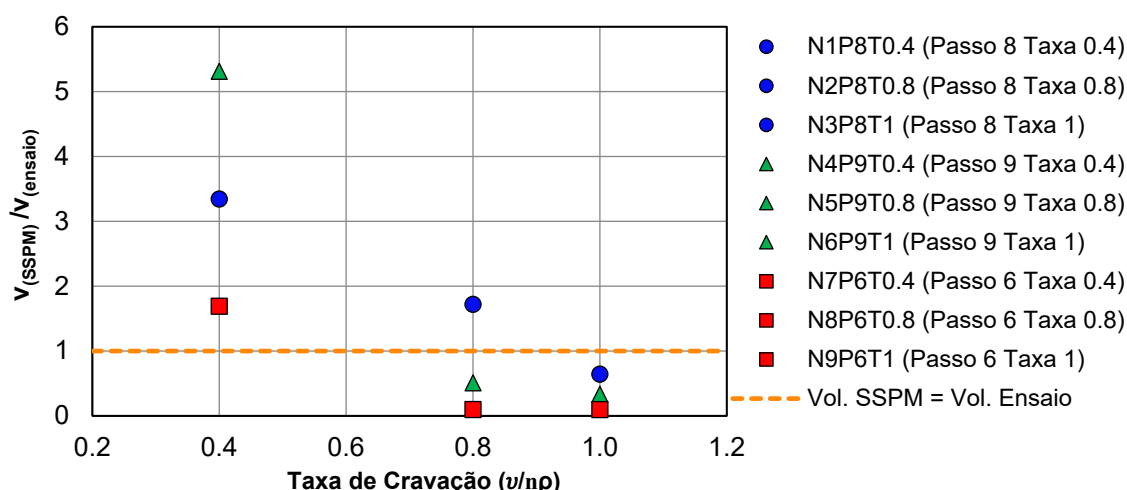


Figura 156 - Comparação de volume estimada pelo método SSPM e dados experimentais.

As diferenças exibidas entre o deslocamento volumétrico estimado pelo método SSPM e o definido nos ensaios realizados (Figura 156), são decorrentes dos seguintes fatores: o modelo constitutivo da areia não é levado em conta no

SSPM; nos ensaios realizados foram utilizados modelos reduzidos e não ensaios em escalas reais; por fim, o método foi originalmente desenvolvido para o cálculo do valor teórico do levantamento do solo em torno da cravação de uma estaca cilíndrica em argila e não na introdução do trado em areia.

5.8 Limitações da técnica de solos transparentes

A técnica de solos transparente utilizada na modelagem física da etapa de cravação do trado do processo executivo de estacas do tipo hélice contínua se mostra adequada. Porém, a técnica apresenta a restrição do tamanho da caixa de ensaio e dos modelos. Esta limitação existe, pois, a transparência dos solos transparentes constituídos por sílica gel é limitada na espessura máxima de 50mm e devido à intensidade da luz laser reduzir gradualmente à medida que corta opticamente o solo transparente. Conseqüentemente, ocorre a variação do padrão *speckle* perto do trado modelo, onde é importante o solo transparente apresentar uma boa textura para gerar resultados representativos. Portanto, as limitações da técnica fizeram com que o tamanho dos modelos fosse limitado e os efeitos do tamanho da caixa de ensaio tiveram que ser tolerados.

Outra consequência decorrente da limitação do tamanho da amostra é que foi violado o princípio da continuidade que estabelece que a menor dimensão do modelo deve ser, pelo menos, 30 vezes maior do que o maior diâmetro do grão (CHEUK *et al.*,2008).

Segundo ZHIBO *et al.* (2014), embora o comportamento na escala contínua seja interessante, ele é decididamente influenciado por fenômenos que ocorrem em escalas subjacentes. Interações granulares como rotação, translação e esmagamento são fenômenos significativos na microescala. No entanto, estes podem ser aproximados em uma escala intermediária, conhecida como mesoescala, onde ocorre o comportamento coletivo, como rearranjo, dilatação e deformação.

Mais recentemente, os pesquisadores têm explorado não apenas os aspectos globais do comportamento, mas também o comportamento mesoescala dos meios granulares. Assim, é razoável esperar que os modelos baseados na mesoescala conduziram a previsões razoáveis de deslocamentos decorrentes

da cravação do trado. Contudo, as descrições dos processos de mesoescala continuam desafiando devido à natureza complexa da areia.

Mais uma limitação da técnica de solos transparentes realizadas a 1 gravidade é que não é possível obter similaridade entre os perfis de tensão do modelo e do protótipo. Isso significa, que os resultados obtidos por meio da modelagem utilizando o solo transparente, a 1 gravidade, não podem ser facilmente extrapolados e comparados com as medidas reais do campo.

5.9 Comparação dos resultados do caso de estudo e da modelagem física

Nesta seção se discutem as análises resultantes do caso de estudo com as análises obtidas por meio da modelagem física utilizando o solo transparente. A discussão é qualitativa, visto que é impraticável obter similaridade entre os perfis de tensão do modelo e do protótipo em modelos utilizando solos transparentes a 1 gravidade, conforme descrito no item 5.8.

5.9.1 Metodologias

A técnica de solos transparentes associada à correlação digital de imagens e à técnica de tomografia computadorizada são técnicas não intrusivas, ou seja, permitem visualizar a morfologia, os deslocamentos, as deformações, os caminhos de fluxo internamente nos solos.

Comparando ambas as técnicas, percebe-se que o solo transparente tem como principal vantagem analisar a cravação do trado ao longo do processo e pode-se controlar, de maneira mais eficiente, tanto as características do maciço quanto velocidade de cravação e giro do trado. Porém, a técnica é utilizada em modelo reduzido em um nível de tensão igual a 1 gravidade, portanto não é possível, simplesmente, extrapolar os resultados com as medidas obtidas no campo.

Em relação à forma com que a tomografia computadorizada é aplicada no estudo, verificam-se vantagens e desvantagens. As principais vantagens são: os testemunhos são retirados na envolvente de uma estaca real e é possível visualizar a morfologia do solo na envolvente da estaca.

As principais desvantagens são: inerente ao procedimento de amostragem, qualquer retirada de amostras passa pelo inevitável alívio de tensões; no campo o ambiente não é controlado, portanto, o maciço pode apresentar especificidades, como a heterogeneidade, gerando dificuldades nas interpretações dos resultados.

Dessa maneira, conclui-se que ambas as técnicas se mostram adequadas ao estudo do processo executivo de estacas hélice contínua, apesar de cada uma apresentar suas limitações.

5.9.2 Variação dos índices de vazios

Uma forma de comparar os dois resultados é por meio da análise da variação do índice de vazios ao longo da distância radial. Para isso, considera-se o processo da cravação do trado um problema axissimétrico, de forma que pode ser representado por uma seção transversal que, ao ser rotacionada em torno do eixo do furo, gera um sólido de revolução cilíndrico (Figura 157). Posteriormente, calculam-se as deformações ε_{xx} , ε_{zz} , $\varepsilon_{\theta\theta}$ utilizando os deslocamentos horizontais e verticais definidos nos ensaios e os conceitos da teoria da elasticidade. Por fim, fez-se o cálculo da variação do índice de vazios em uma profundidade ($z/R = 5$).

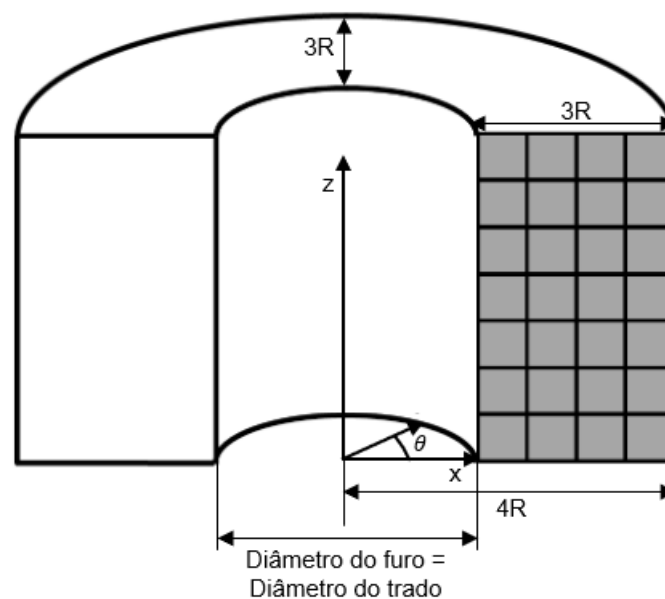


Figura 157 – Considerações para o cálculo das deformações utilizando

Ressalta-se que comparam-se os resultados da tomografia computadorizada e os resultados dos ensaios realizados em solos transparentes, utilizando o trado tipo um e com as taxas de cravação iguais a 0,8 e 1, pois, o trado 1 foi dimensionado geometricamente de acordo com o trado de campo, e as taxas utilizadas nos ensaios são as mais próximas às das utilizadas no campo.

As figuras 158 e 159 exibem os resultados. Ressaltam-se que os resultados dos ensaios no solo transparente são limitados a 3R, devido às considerações de cálculo.

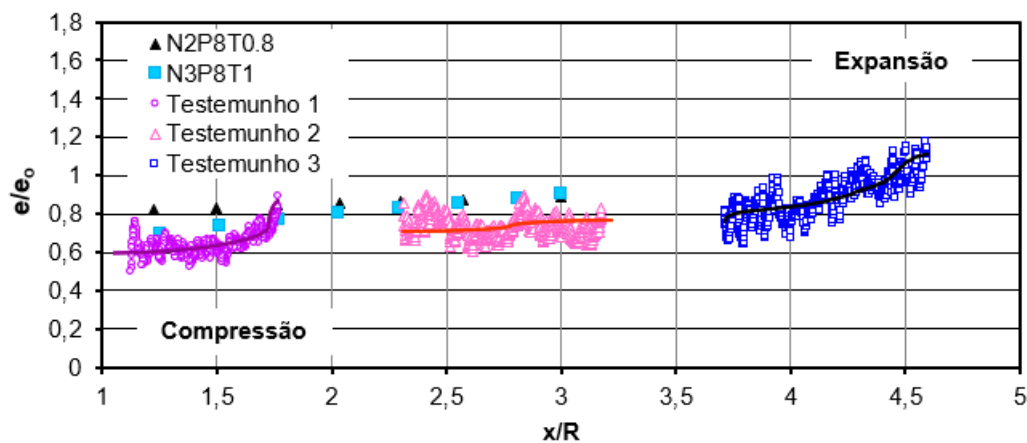


Figura 158 – Comparação dos índices de vazios obtidos no campo e nos ensaios utilizando solo transparentes.

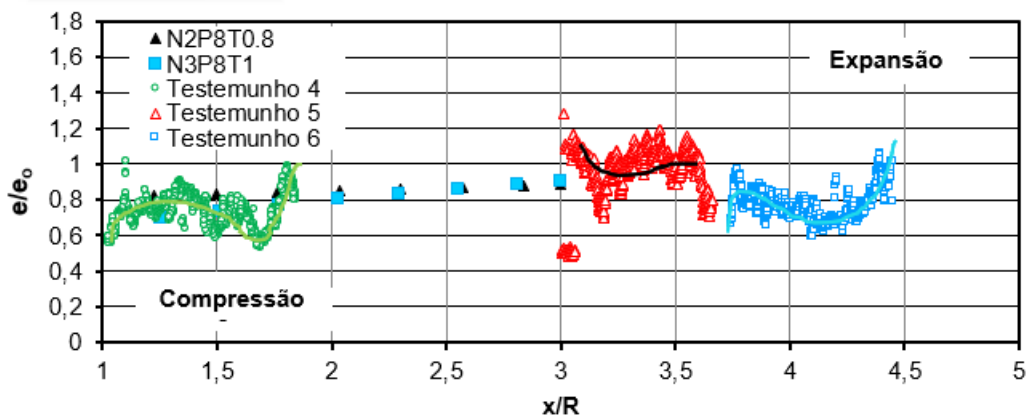


Figura 159 – Comparação dos índices de vazios obtidos no campo e nos ensaios utilizando solo transparentes.

Verifica-se que os índices de vazios para o testemunho 1 não são idênticos aos do testemunho 4, evidenciando a heterogeneidade do solo. Analogamente, para os testemunhos 2 e 5, também se nota uma grande variação de índices de vazios em relação ao índice de vazios inicial indicando, novamente, a heterogeneidade do solo. Conseqüentemente, o solo heterogêneo apresenta variáveis de estado

do solo também heterogêneas, assim, a resposta do solo frente ao processo executivo de estacas hélice contínua será influenciada, conforme descrito na 3.3.5.

Nas figuras 158 e 159, também, se constata que os resultados dos testemunhos 1 e 2, referentes aos índices de vazios dos testemunhos do campo, apresentam uma compressão próxima aos obtidos em laboratório. Isso indica que a etapa de concretagem do processo executivo da estaca hélice contínua, realizada em campo, pode não ter influência significativa nas alterações das propriedades do solo nas imediações da estaca. Concordando com THORBURN *et al.* (1993), BROWS (2005) e HERITAGE (2007) que afirmam que a etapa de cravação do trado das estacas do tipo hélice é a mais propensa a causar modificações no estado do solo no entorno da estaca.

5.9.1 Taxa de cravação ótima

Por meio dos resultados das imagens da tomografia computadorizada e dos ensaios em modelos reduzidos em solo transparente é possível investigar a taxa de cravação ótima do caso de estudo. A taxa de cravação inferior à taxa ótima calculada resulta na descompressão do solo na envolvente da estaca e da superfície. Uma taxa de cravação do trado maior do que a taxa ótima calculada resulta em densificação do solo circundante da estaca e elevação da superfície.

A taxa de cravação ($v/n\rho$) utilizada no processo executivo da estaca no campo, do caso de estudo, foi calculada por meio das informações retiradas do monitoramento da estaca, como ilustrado na Figura 54. A taxa de cravação média utilizada foi igual a 0,7 ($v/n\rho = 0,7$); indicando uma taxa adequada, visto que todas as análises sugeriram a densificação do solo (figuras 158 e 159). Além disso, é uma taxa de cravação considerada adequada pelos resultados dos ensaios em solo transparente, visto que é uma taxa de cravação superior à taxa ótima determinada para trados que possuem a relação ρ/D igual a 0,6, conforme mostra a Figura 152.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi realizado um estudo sobre o efeito da cravação do trado de estacas hélice contínua em maciços arenosos utilizando técnicas não intrusivas. Dessa maneira, neste capítulo serão descritas as conclusões gerais do trabalho e as conclusões que podem ser extraídas sobre: o caso de obra; a caixa de cisalhamento desenvolvida; a modelagem física; e o desenvolvimento da técnica de solos transparentes. Além disso, aqui serão expostas as sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

6.1.1 Conclusões gerais

- Comparando os resultados gerados por meio do caso de obra e da modelagem física, observa-se que a modificação dos parâmetros do solo na envolvente da estaca, após sua instalação, está associada ao processo executivo de instalação, porém a forma e a magnitude da modificação também são influenciadas pelos parâmetros de estado do solo.
- A análise realizada utilizou modelos reduzidos, portanto necessita-se de maiores estudos para as presentes conclusões serem aplicadas em processos executivos de estacas hélice contínua de escala real.

6.1.2 Sobre o caso de Obra

- A tomografia desenvolvida na pesquisa, utilizando um amostrador de PVC de paredes finas, permite que o testemunho de solo não precise ser removido do amostrador para a análise do índice de vazios. Consequentemente, possibilita amenizar as alterações nas propriedades dos testemunhos de solo devido à amostragem, diferentemente das técnicas convencionais.

- A utilização da tomografia computadorizada de raios-X para o estudo do efeito do processo executivo de estaca hélice contínua revela-se de grande potencial, pois a ferramenta, em relação às técnicas convencionais, permite identificar com maior refinamento a variação dos índices de vazios do solo próximo à estaca.
- A densificação do maciço arenoso no entorno da estaca do caso de obra, identificada por meio da variação do índice de vazios do solo, está associada ao processo executivo de instalação da estaca.

6.1.3 Sobre a caixa de cisalhamento desenvolvida

- Em relação à caixa de cisalhamento desenvolvida, conclui-se que o comportamento do material foi afetado pelo tamanho e forma da caixa.

6.1.4 Sobre a modelagem física

- De maneira geral, o deslocamento do solo provocado pelo processo de cravação do trado é semelhante ao deslocamento provocado pelo processo executivo de estacas cravadas cilíndricas, com o solo superficial sendo empurrado para cima e o solo abaixo do trado sendo forçado a sair da base do trado e sendo empurrado para baixo.
- O uso de taxas de cravação menores que 0,4 ($v/n\rho = 0,4$) merece atenção, pois o volume de solo extraído do maciço pelo trado pode exceder o volume de solo deslocado, devido ao tamanho do trado, e o volume de solo densificado, devido ao corte. Assim, ocorre a redução da tensão lateral e a diminuição da densidade lateral, o que, conseqüentemente, influenciará na capacidade de carga final da estaca e no recalque superficial.
- A área, que é significativamente afetada pela cravação do trado, está localizada em uma zona com distância inferior a $6R$ do eixo da estaca e tem um formato cônico.
- O deslocamento do solo próximo à estaca provocado pelo processo de cravação do trado não sofre influência clara do passo do trado.
- A ferramenta CEM se mostra razoável para prever os deslocamentos radiais do solo.

- A previsão do levantamento do solo utilizando o método SSPM não se mostra apropriada para os ensaios realizados no solo transparente.
- Os resultados fornecem uma base para futuramente desenvolver previsões de mudanças de parâmetros do solo na envolvente da estaca hélice contínua.

6.1.5 Sobre o desenvolvimento da técnica de solos transparentes

- O solo transparente, constituído pela sílica gel e o óleo, produzido no Brasil, demonstra ser apropriado em termos de transparência e comportamento geotécnico, para simular areia em modelagens físicas. Dessa maneira, a produção do solo com materiais nacionais incentiva o desenvolvimento da técnica no Brasil, devido à redução de custo e à facilidade de acesso aos materiais.
- A utilização da técnica de solos transparentes associada à correlação digital de imagens apresenta limitações, porém, acredita-se que técnicas similares às empregadas neste trabalho podem ser aplicadas em diferentes modelagens físicas de problemas geotécnicos. Além disso, com a evolução da tecnologia da imagem digital e o desenvolvimento de adição de partículas refletoras, poderá ser possível a obtenção de uma textura das imagens mais uniforme e de melhor qualidade, podendo alcançar modelos de maiores escalas.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como trabalhos a serem desenvolvidos a partir da presente tese, sugere-se:

- Executar a metodologia desenvolvida na tese, de amostragem de areia, antes e após instalação de uma estaca hélice contínua, localizada em um ambiente de laboratório controlado. Posteriormente, levar os testemunhos para um tomógrafo, e assim avaliar, de uma forma mais específica, a influência do processo executivo da estaca e das variáveis de estado do solo nas alterações dos parâmetros geotécnicos na envolvente da estaca.
- Estudar as alterações dos parâmetros geotécnicos devido ao processo executivo de estacas hélice contínua no solo entre um grupo de estaca.

- Avaliar as alterações provocadas pelas diferentes taxas de cravação do processo executivo na capacidade de carga de estacas hélice contínua.
- Aperfeiçoar a técnica de resinagem para avaliação da variação do índice de vazios do solo próximo à estaca.
- Estudar especificamente o efeito da etapa de concretagem nos parâmetros do solo no campo de deslocamento do solo resultante do processo de instalação de estacas hélice contínua;
- Analisar a influência da densidade do maciço de fundação no campo de deslocamento do solo resultante do processo de instalação de estacas hélice contínua;
- Estudar materiais para compor novos solos transparentes, de preferência de marcas nacionais, para ser possível simular diferentes tipos de solos e impulsionar o uso da técnica de solos transparentes no Brasil.
- Desenvolver algoritmos auxiliares à Correlação Digital de Imagens para obter informações sobre os Campos de Deformação Cisalhante e Volumétrica do solo.
- Utilizar os ensaios do processo executivo de estacas hélice contínua em modelos físicos reduzidos com solos transparentes para calibrar modelagens numéricas. Pois, as modelagens numéricas, diferentemente dos ensaios em escala reduzida, não necessitam de grande complexidade e tempo para simular diferentes maciços. Além disso, o número de ensaios em modelo reduzido é limitado, devido aos grandes custos relacionados aos insumos para preparação dos solos transparentes, por exemplo. Portanto, atualmente os modelos numéricos funcionam como uma ferramenta capaz de fornecer informações para orientar o número de ensaios em modelo reduzido, diminuindo grande parte dos ensaios a serem executados, e direcionar as principais variáveis do problema estudado, para obter respostas mais relevantes.
- Aprofundar o estudo sobre a influência do tamanho da caixa de cisalhamento para ser possível revisar os limites de D / D_{max} e $w / D_{máx}$ sugeridos pela ASTM D 3080-90.

REFERÊNCIAS

- ADEJUMO, T.W., BOIKO, I.L. **Effect of installation techniques on the allowable bearing capacity of modeled circular piles in layered soil.** Int. J. Sci. Eng. Technol. Res. (IJSETR) 2(8), 1536–1542, 2013.
- AHMED, M. and Iskander, M. **Analysis of Tunneling- Induced Ground Movements Using Transparent Soil Models.** J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 137, No. 5, pp. 525–535, 2011.
- AHMED, M. **Investigation of Tunnel Face Stability and Ground Movements Using Transparent Soil Models.** PhD thesis, Polytechnic Institute of New York Univ., Brooklyn, NY, 2011.
- ALBUQUERQUE, P.J.R. **Estacas escavadas, hélice contínua e ômega: estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de cargas instrumentadas em profundidade.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 263p, 2001.
- ALMEIDA NETO, J.A **Análise do desempenho de estacas hélice contínua e ômega: aspectos executivos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 174p, 2002.
- ALONSO, U. R. **Contribuição para a formação de um banco de dados de provas de carga de estacas hélice contínua.** In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia (Sefe). 4. 2000, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, 2000b. v. 2, p. 430-45, 2000.
- ALONSO, U. R. **Estacas hélice contínua com monitoração eletrônica – Previsão da capacidade de carga através do ensaio SPT-T.** In: SEFE, 3., 1996, São Paulo. Anais... V. 2, p.141-151, 1996.
- ALSHIBLI, K. A., BATISTE, S. N., SWANSON, R. A., Sture, S., Costes, N. C. & Lankton, M. **Quantifying void ratio variation in sand using computed tomography. In Geotechnical measurements: Lab and field,** Proceedings of Geo-Denver 2000, Geotechnical Special Publication No. 106, pp. 30–43. Reston, VA: ASCE, 2000a.
- ALSHIBLI, K. A., STURE, S., COSTES, N. C., FRANK, M., LANKTON, M., BATISTE, S. & SWANSON, R. **Assessment of localized deformations in sand using X-ray computed tomography.** ASTM Geotech. Test. J. 23, No. 3, 274–299, 2000b.

- ANJOS, G.J.M. **Estudo do comportamento de fundações escavadas em solos tropicais**. 341 f. Tese (Doutorado) - Publicação G.TD-033/06. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2006.
- ANTUNES, W.; TAROZZO, H. **Estacas hélice contínua**. In: HACHICH, W. et al. *Fundações: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. cap. 9, p. 345 – 348, 1998.
- ASHFORD, S. A., JUIRNARONGRIT, T., SUGANO, T., AND HAMADA, M. **Soil-pile response to blast-induced lateral spreading. I: Field test**. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132: 2(152), 152–162, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12007 Solo – Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6502 1995. Solo –Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares com carga constante – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181 Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.
- BALIGH, M. M. **Strain path method**. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(9), 1108-1136, 1985.
- BATHURST, R. J. AND EZZEIN, F. M. **Geogrid and Soil Displacement Observations During Pullout Using a Transparent Granular Soil**. *Geotech. Test. J.*, Vol. 38, No. 5, (in this special issue) pp. 1–13, 2015.
- BDRABBO, F. M.; GAAVER, KHALED E. **Installation effects of auger cast-in-place piles**. *Alexandria Engineering Journal*, v. 51, n. 4, p. 281-292, 2012.
- BLACK, J. A.; TATARI, A. **Optical Characterization of Transparent Gelita Using the Modulation Transfer Function**, Chicago, p. 421-432, nov. 2016.
- BLACK, J.A. **Centrifuge modelling with transparent soil and laser aided imaging** *Geotechnical Testing Journal*, 2015.
- BRINK, J.A., HEIKEN, J.P. **Helical CT: Principles and technical considerations**. *Radiographics* 14(4): 887-893, 1994.

BRONS, K. F.; KOOL, A. F. **Methods to improve the quality of auger piles.** In: **International geotechnical seminar on deep foundations on bored and auger piles**, 1, Ghent-Belgium. Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, p. 269-272, **1988**.

BROWN, D. A., DAPP, S. D., THOMPSON, W. R., & LAZARTE, C. A. **Design and construction of continuous flight auger piles** (No. FHWA-HIF-07-03). United States. Federal Highway Administration. Office of Technology Applications, 2007.

BRUNKE, O., NEUBER, D., AND LEHMANN, D. K. NanoCT: **Visualizing of internal 3D-structures with submicrometer resolution.** Proc., Materials Research Society Symp.: Materials, Processes, Integration and Reliability in Advanced Interconnects for Micro- and Nanoelectronics, Materials Research Society, Warrendale, PA, 325–331., 2007.

BUSTAMANTE, M. **Auger and bored pile construction monitoring and testing Proceedings**, 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Van Impe (ed.), Balkema, Rotterdam, 27-41, 2003.

BUZON, L., G., FEDRISSI, T., MARCHEZEPE, B., K., SILVA, C., C., VALENTIN, C., A., SILVA, J., L. **Estimativa didática do ângulo de atrito de solo secos.** XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRANSEG), 2016.

CAO LF, TEH CI AND CHANG MF, **Undrained cavity expansion in modified Cam clay I: theoretical analysis.** Géotechnique 51(4): 323–334, 2001.

CAO, Z., LIU, J., AND LIU, H., **Transparent Fused Silica to Model Natural Sand**, Proceedings of Pan American CGS Conference (CD-ROM), Toronto, Canada, October 2–6. Canadian Geotechnical Society, Richmond, British Columbia, Canada, 2011.

CAPUTO, HOREMO PINTO. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 5° edição. Ver. E ampliada. Rio de Janeiro. Livros técnicos e científicos, 1981.

CARVALHO T. **Propriedades dos solos transparentes e técnicas de correlação digital de imagens para aplicação em modelagem física geotécnica.** 254p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes – RJ, 2015.

CARVALHO, T., Suescun, E., Omidvar, M., and Iskander, M., **A Water Based Transparent Soil for Modeling Mechanical Response of Saturated Sand.** Geotech. Test. J., Vol. 38, No. 5, (in this special issue) pp. 1–7, 2015.

CHANG, C.S., MATSUSHIMA, T. AND LEE, X., **Heterogeneous strain and bonded granular structure change in triaxial specimen studied by computer tomography.** *Journal of engineering mechanics*, 129(11), pp.1295-1307, 2003.

CHEN SL AND ABOUSLEIMAN YN. **Exact undrained elasto-plastic solution for cylindrical cavity expansion in modified Cam Clay**, 2012.

CHEN, C., PACKMAN, A. I., AND GAILLARD, J. F. **Using X-ray microtomography and pore-scale modeling to quantify sediment mixing and fluid flow in a developing streambed.** *Geophys. Res. Lett.*, 36(8), L08403, 2009.

CHEN, J. F., GUO, X. P., XUE, J. F., & GUO, P. H. **Load behaviour of model strip footings on reinforced transparent soils.** *Geosynthetics International*, 1-10, 2019.

CHEN, Z., OMIDVAR, M., ISKANDER, M., & BLESS, S. **Modelling of projectile penetration using transparent soils.** *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 14(3), 68-79, 2014.

CHENG, P., SUTTON, M.A., SCHREIER, H.W. AND MCNEILL, S.R. **Full field speckle pattern image correlation with B-spline deformation function.** *Experimental Mechanics*, 42(3): 344-352, 2002.

CHINI, C., WALLACE, J., RUTHERFORD, C., AND PESCHEL, C. J. **Shearing Failure Visualization Using Digital Image Correlation and Particle Image Velocimetry in Soft Clay Using a Transparent Soil.** *Geotech. Test. J.*, Vol. 38, No. 5, (in this special issue) pp. 1–17, 2015.

CLEMENTI, A. E., PENNA, P., & SILVESTRI, R. **Hardness results for the power range assignment problem in packet radio networks.** In *Randomization, Approximation, and Combinatorial Optimization. Algorithms and Techniques* (pp. 197-208). Springer, Berlin, Heidelberg, 1999.

CORRÊA, C. N. **Acompanhamento de estacas hélice contínua monitorada.** In: *Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotenia – SEFE V, 5º*, 2004, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABMS, V. 1, P. 90-99, 2004.

DANN, R., TURNER, M., CLOSE, M., AND KNACKSTEDT, M. **Multi-scale characterisation of coastal sand aquifer media for contaminant transport using X-ray computed tomography.** *Environ. Earth Sci.*, 63(5), 1125–1137, 2011.

- DANTAS, B.T **Análise do comportamento de estruturas de solo reforçado sob condições de trabalho**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 222p, 2004.
- DAS. B. M. Principles of Foundations Engineering. Cengage Learning. Boston, USA, 2016.
- DE GUZMAN, E.M.B. AND ALFARO, M.C. **Laboratory-Scale Model Studies on Corduroy-Reinforced Road Embankments on Peat Foundations using Transparent Soil**. *Transportation Geotechnics*, 2018.
- DESRUES, J., CHAMBON, R., MOKNI, M. & MAZEROLLE, F. **Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography**. *Géotechnique* 46, No. 3, 529– 546, 1996.
- DIAS, K. O.; CAVALCANTE, E.H.; BARBOSA, V.C.S.; NETO, O. F.; JÚNIOR, C. R. C.; PRATA, F. A. **Previsão de capacidade de carga de uma fundação em estaca hélice contínua apoiada sobre solo mole: um estudo de caso**. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia,GO, Brasil, 2014.
- DOWUONA, G.N., TAINA, I.A. AND HECK, R.J. **Porosity analysis of two Acrisols by X-ray computed microtomography**. *Soil science*, 174(11), pp.583-593, 2009.
- DUMBERRY, K., DUHAIME, F. AND ETHIER, Y.A. **Erosion monitoring during core overtopping using a laboratory model with digital image correlation and X-ray microcomputed tomography**. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(2), pp.234-245, 2017.
- EMMETT, K. **Movement of soil and groundwater around piles in layered ground**. PhD. University of Sheffield, 2007.
- ENGLISH HERITAGE. **Piling and archaeology: an English Heritage guidance note**. London: English Heritage Publishing, 2007.
- ERVIN, MAX C.; FINLAYSON, JIM E. **Piled foundations for Eureka Tower, Melbourne, Australia**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, v. 159, n. 3, p. 187-194, 2006.
- EZZEIN, F. **Investigation of Soil-Geogrid Interaction Using a Novel Pullout Test Apparatus and Transparent Granular Soil**. Ph.D. thesis, Royal Military College of Canada, Kingston, ON, Canada, 2014.

EZZEIN, F. M. AND BATHURST, R. J. **A New Approach to Evaluate Soil-Geosynthetic Interaction Using a Novel Pullout Test Apparatus and Transparent Granular Soil**, Geotex. Geomem., Vol. 42, No. 3, pp. 246–255, 2014.

EZZEIN, F. M. AND BATHURST, R. J. **A Transparent Sand for Geotechnical Laboratory Modeling**, Geotech. Test. J., Vol. 34(6), pp. 1–12, 2011.

FARIA, D. A. B. **Segmentação, Reconstrução e Quantificação 3D de Estruturas em Imagens Médicas – Aplicação em Imagem Funcional e Metabólica**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 76p, 2010.

FARQUHARSON, F.B.; HENNES, R.G. **Gelatin Models for Photoelastic Analysis of Stress on Earth Masses**. Civil Engineering . Vol . 10 , No. 4, p. 211 - 214, 1940.

FERNANDEZ SERRANO, R., ISKANDER, M., AND TABE, K. **3D Contaminant Flow Imaging in Transparent Granular Porous Media**. Geotech. Lett., Vol. 1, No. 3, pp. 71–78, 2011.

FERREIRA, J. AND ZORNBERG, J. **A Transparent Pullout Testing Device for 3-D Evaluation of Soil-Geogrid Interaction**, Geotech. Test. J., Vol. 38, No. 5, (in this special issue) pp. 1–22, 2015.

FERREIRA, J. **Evaluation of Soil-Geogrid Interaction at Different Load Levels Using Pullout Tests and Transparent Soil**. Ph.D. thesis, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX, 2013.

FLEMING, W.G.K. **Current understanding and control of continuous flight auger piling**, Transportation Research Record No. 1447, Design and Construction of Auger Cast Piles, and Other Foundation Issues, 260-278, 1994.

FLEMING, W.G.K. **The understanding of continuous flight auger piling, its monitoring and control**, Proceedings, Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 157-165, 1995.

FRANCESCON, M. **Model pile tests in clay, stresses and displacements due to installation and axial loading**. Ph. D Thesis, Cambridge University, 1983.

FRANGOULIDES, A. C. **Research into the behaviour of Continuous Helical Displacement piles**. Master of Engineering. Cambridge University, 1999.

GAO, B. AND SUI, W. **Experimental Modeling of Quicksand with Transparent Soil through an Orifice**. Geotechnical Testing Journal, Vol. 40, No. 5, pp. 798–809, <https://doi.org/10.1520/GTJ20160256>. ISSN 0149-6115, 2017.

GAO, YUE, SUI, WANGHUA, AND LIU, JINYUAN. **Visualization of Chemical Grout Permeation in Transparent Soil**. Geotechnical Testing Journal, Vol. 38, No. 5, pp. 774–786, doi:10.1520/GTJ20140202. ISSN 0149-6115, 2015.

GILL, D., **Experimental and Theoretical Investigations of Pile and Penetrometer Installation in Clay**. Ph.D. thesis, Univ. of Dublin, Dublin, Ireland, 1999.

GOMES, O. F. M. **Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

GOMES, R. C. **Interação Solo-Reforço e Mecanismos de Ruptura em Solos Reforçados com Geotêxteis**. Tese de Doutorado em Geotecnia. USP. São Carlos. p. 116; Hain, S.J. & Lee, I.K. (1978). The analysis of flexible raft-pile systems. Geotechnique, 28(1). p. 65-83, 1993.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R.E. **Digital Image Processing**. 2nd edition. Prentice-Hall. Upper Saddle River – NJ, 2002.

GOTLIEB, M. ET AL. **Um método simples para avaliação da tensão admissível no topo de estacas tipo hélice contínua**. In: seminário de engenharia de fundações especiais e geotecnia (SEFE), 4., São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, 2000. v. 1. p. 312-319, 2000.

GUE, S. S. **Ground heave around driven piles in clay** (Doctoral dissertation, University of Oxford), 1984.

GUZMAN, E.M., ALFARO, M. **Modelling a Highway Embankment on Peat Foundations Using Transparent Soil**. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics; 143, p. 363 – 370. doi: 0.1016/j.proeng.2016.06.046, 2016.

GUZMAN, I. AND ISKANDER, M. **Geotechnical Properties of Sucrose-Saturated Fused Quartz for Use in Physical Modeling**. Geotech. Test. J., Vol. 36, No. 3, pp. 448–454, 2013.

GUZMAN, I. **Development of a Transparent Soil for Simulating Projectile Penetration Into Granular Materials.** Ph.D. thesis, Polytechnic Institute of New York Univ., Brooklyn, NY, 2014.

GUZMAN, I., ISKANDER, M., SUESCUN, E., AND OMIIDVAR, M. **A Transparent Aqueous-Saturated Sand-Surrogate for Use in Physical Modeling.** *Acta Geotech.*, Vol. 9, No. 2, pp. 187–206, 2014.

H.C. LO, M. ISKANDER, K. TABE, Modeling of 2D Flow Using Transparent Aquabeads, in *Geocongress 2008: Characterization, Monitoring and Modeling of GeoSystems: Proceedings of Sessions of Geocongress 2008, March 9 -12, 2008 New Orleans, 2008.*

HAERI, S. M., KAVAND, A., RAHMANI, I., AND TORABI, H. Response of a group of piles to liquefaction-induced lateral spreading by large scale shake table testing. *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 38, 25–45, 2012.

HAKHAMANESHI, M., BLACK, A. J. AND TATARI, A. Optical Characterization of Transparent Gelita using the Modulation Transfer Function, *Proceeding of Geo-Chicago Conference on Sustainability, Energy, and the Geoenvironment.*, Chicago, USA, 2016.

HARRIS, H. G.; SABNIS G. M. **Structural modeling and experimental techniques.** 2nd edition. CRC PRESS. Boca Raton, 1999.

HARTIKAINEN, J & GAMBIN, MP **Deep foundations with soil excavation: bored piles, root piles, CFA-piles, slurry trench walls.** In *General, Report Draft, 4th International Conference on Piling and Deep Foundations*, Stresa, 1991.

HIGO, Y., ET AL. **Visualization of strain localization and microstructures in soils during deformation using microfocus X-ray CT Advances in computed tomography for geomaterials,** Wiley, Hoboken, NJ, 43–51, 2013.

HIGO, Y., OKA, F., SATO, T., MATSUSHIMA, Y. AND KIMOTO, S., **Investigation of localized deformation in partially saturated sand under triaxial compression using microfocus X-ray CT with digital image correlation.** *Soils and Foundations*, 53(2), pp.181-198, 2013.

HIRD, C. C. AND STANIER, S.A. **Modelling helical screw piles in clay using transparent soil.** 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Zurich, June 28th - July 1st 2010. London: Taylor and Francis, 2010.

HIRD, C. C., NI, Q., GUYMER, I. **Physical modelling of deformations around piling augers in clay**. *Geotechnique* Vol. 61, No. 11, pp 993-999, 2011.

HIRD, C. C., NI, Q., GUYMER, I. **Physical modelling of displacements around Continuous Flight Augers in clay**. BGA International Conference on Foundations. Dundee, Scotland, 24th-27th June 2008. London: IHS BRE Press, 2008.

HIRD, C. C.; EMMETT, K. B.; DAVIES, G. **Piling in layered ground: risks to groundwater and archaeology**. Environment Agency, 2006.

HOLKO, MICHAL; STACHO, JAKUB. **Comparison of Numerical Analyses with a Static Load Test of a Continuous Flight Auger Pile**. *Slovak Journal of Civil Engineering*, v. 22, n. 4, p. 1-10, 2014.

HOSNY, HOSSAM E.; IBRAHIM, AHMED H.; FRAIG, RAYMOND F. **Cost analysis of continuous flight auger piles construction in Egypt**. *Alexandria Engineering Journal*, v. 55, n. 3, p. 2709-2720, 2016.

HOVER, E.D., NI, Q. AND GUYMER, I. **Investigation of centreline strain path during tube penetration using transparent soil and particle image velocimetry**. *Géotechnique Letters*, 3(2), pp.37-41, 2013.

HWANG, J. H., LIANG, N., AND CHEN, C. H. **Ground response during pile driving**. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1090 -0241(2001)127:11(939), 939–949, 2001.

IGLESIAS, J. C. A. **Uma Metodologia para Caracterização de Sínter de Minério de Ferro: Microscopia Digital e Análise de Imagens**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

IKEDA, S., NAKANO, T., TSUCHIYAMA, A., UESUGI, K., SUZUKI, Y., NAKAMURA, K.I., NAKASHIMA, Y. AND YOSHIDA, H. **Nondestructive three-dimensional element-concentration mapping of a Cs-doped partially molten granite by X-ray computed tomography using synchrotron radiation**. *American Mineralogist*, 89(8-9), pp.1304-1313, 2004.

ISKANDER, M. AND LIU, J. **Spatial Deformation Measurement Using Transparent Soil**, *Geotech. Test. J.*, Vol. 33, No. 4, pp. 1–7, 2010.

ISKANDER, M. G., LIU, J. Y., AND SADEK, S. **Transparent Amorphous Silica to Model Clay**, J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 128, No. 3, pp. 262–273, 2002.

JATAV, S., & JOSHI, Y. M. **Chemical stability of Laponite in aqueous media**, *Applied Clay Science*, 97, 72-77, 2014.

JEFFREY JR **Investigating the Performance of Continuous Helical Displacement Piles**. PhD thesis, Division of Civil Engineering, University of Dundee, Dundee, UK, 2012.

JERRAM, D. A., MOCK, A., DAVIS, G. R., FIELD, M., AND BROWN, R. J. 3D crystal size distributions: **A case study on quantifying olivine populations in kimberlites**. *Lithos*, 112(8–9), 223–235, 2009.

KASHUK, S., (2014) **Ideal Color Space for Reconstruction of Contaminant Transport in Transparent Soils**. Ph.D. thesis, New York Univ., New York, NY, 2014.

KASHUK, SINA, MERCURIO, SOPHIA R., AND ISKANDER, MAGUED, **Methodology for Optical Imaging of NAPL 3D Distribution in Transparent Porous Media**, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 38, No. 5, pp. 603– 619, doi:10.1520/GTJ20140153. ISSN 0149-6115, 2015.

KELLY, P. **Soil Structure Interaction and Group Mechanics of Vibrated Stone Column Foundations**. Ph.D. thesis, Univ. of Sheffield, Sheffield, UK, 2014.

KENNY, M.J., ANDRAWES, K.Z., AND CANAKCI, H. Soil disturbance during continuous flight auger piling in sand. *Proceedings, 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Hamburg, Germany, Vol. 2, 1085-1090, 1997.*

KHADDOUR, G., RIEDEL, I., ANDÒ, E., CHARRIER, P., BÉSUELLE, P., DESRUES, J., VIGGIANI, G. AND SALAGER, S. **Grain-scale characterization of water retention behaviour of sand using X-ray CT**. *Acta Geotechnica*, pp.1-16, 2018.

Kitazume, M. **Twenty nine years of experience with physical modelling of geotechnical problems in port structures**. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, v. 9, n. 3, p. 01-19, 2009.

KNAPPETT JA, CAUCIS K, BROWN MJ, JEFFREY JR AND BALL J. **CHD pile performance: part II – numerical modelling**. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1680/jgeen.15.00132>, 2016.

KONDIC, L., GOULLET, A., O'HERN, C. S., KRAMAR, M., MISCHAIKOW, K., & BEHRINGER, R. P. **Topology of force networks in compressed granular media.** EPL (Europhysics Letters), 97(5), 54001, 2012.

KONG, G., CAO, Z., ZHOU, H., AND SUN, X. Analysis of Piles Under Oblique Pullout Load Using Transparent Soil Models. Geotech. Test. J., Vol. 38, No. 5, (in this special issue) pp. 1–14, 2015.

KONG, G.Q., ZHOU, L.D., WANG, Z.T., YANG, G. AND LI, H. **Shear modulus and damping ratios of transparent soil manufactured by fused quartz.** Materials Letters, 182, pp.257-259, 2016.

LADE, P. V., YAMAMURO, J. A., & BOPP, P. A. Significance of particle crushing in granular materials. Journal of Geotechnical Engineering, 122(4), 309-316, 1996.

LARISCH, M., ARNOLD, M., UHLIG, M., SCHWITEILO, E., WILLIAMS, D., AND SCHEUERMANN, A. **Stress and displacement monitoring of auger displacement piles. Proc., Int. Conf. on State of the Art of Pile Foundation and Pile Case Histories, Piling Contractors, Queensland, Australia, 1–12, 2013.**

LARISCH, M.D.; SCHEUERMANN, A.; WILLIAMS D. J. **Influence of pile installation techniques on ground heave in clays.** In 12th Australia New Zeland Conference on Geomechanics, 2015.

LAUDER KL AND BROWN M. **Scaling effects in the 1 g modelling of offshore pipeline ploughs.** In ICPMG2014 – Physical Modelling in Geotechnics: Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (Gaudin C and White D (eds)). CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 377–383, 2014.

LEHANE B. M., GILL D. R. **Displacement fields induced by penetrometer installation in an artificial soil.** International Journal of Physical Modelling in Geotechnics,4, 1: 25–37, 2004.

LIN, Z. **Study on Space-Time Evolution Law and Mechanism of Deformation-Cracking of Deep Rock Mass.** Ph.D. Thesis, China Univ. of Mining and Technology, Beijing, China, 2014.

LIU J, SUI W, GAO Y. **Visualization of chemical grout permeation in transparent soil.** Geotechnical Testing Journal. <http://dx.doi.org/10.1520/GTJ20140202>, 2015.

LIU, J. **Visualization of 3-D Deformations Using Transparent 'Soil' Models**. Ph.D. thesis, Polytechnic Univ. of New York, Brooklyn, NY, 2003.

LIU, J., & ISKANDER, M. Adaptive cross correlation for imaging displacements in soils. **Journal of computing in civil engineering**, 18(1), 46-57, 2004.

LO, H-C, K. TABE, ISKANDER, M. & S. **Modeling of multi-phase flow and surfactant flushing using transparent Aquabeads, Characterization, Monitoring and Modeling of Geosystems**, GSP No. 179, pp. 846-853, ASCE, 2008.

LUNDBERG, A. B., DIJKSTRA, J., AND TOL, A. F. V. **Displacement pile installation effects in sand**. **Proc.**, Int. Conf. on Installation Effects in Geotechnical Engineering, CRC Press, Boca Raton, FL, 2013.

MANAHILOH, K. N. **Microstructural analysis of unsaturated granular soils using X-ray computed tomography**. Ph.D. dissertation, Washington State Univ., Pullman, WA, 2013.

MANAHILOH, K. N., AND MUHUNTHAN, B. **Characterizing liquid phase fabric of unsaturated specimens from X-ray computed tomography images, Unsaturated soils: Research and applications**, C. Mancuso, C. Jommi, and F. D'Onza, eds., Springer, Berlin, 71–80, 2012.

MANAHILOH, K.N. AND MEEHAN, C.L. **Determining the soil water characteristic curve and interfacial contact angle from microstructural analysis of X-ray CT images**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(8), p.04017034, 2017.

MANNHEIMER, R. **Slurries You Can See Through**. Technology Today, Southwest Research Institute, San Antonio, TX, p. 2, 1990.

MANNHEIMER, R.J. AND C. OSWALD, **Development of transparent porous media with perm abilities and porosities comparable to soils, aquifers and petroleum peservoirs**. *Ground Water*, Vol. 31, No. 5, 781-788, 1993.

MASAD, E., SAADEH, S., AL-ROUSAN, T., GARBOCZI, E., AND LITTLE, D. **Computations of particle surface characteristics using optical and X-ray CT images**. *Comput. Mater. Sci.*, 34(4), 406–424, 2005.

MASSARSCH, K.R., TANCRE, E. & W. BRIEKE. **Displacement auger piles with compacted base.** *Proc. of 1st Int. Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*: 333- 342. Balkema: Rotterdam, 1988.

MCKELVEY, D. **The Performance of Vibro Stone Column Reinforced Foundations in Deep Soft Ground.** Ph.D. thesis, Queen's Univ. Belfast, Belfast, UK, 2002.

MCKELVEY, D.; SIVAKUMAR V.; BELL. A., GRAHAM J. **Modelling vibrated stone columns in soft clay** *Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Geotechnical Engineering*, 157, pp. 137-149, 2004.

MOAYED.R.Z.; MEHDIPOUR I.; JUDI A. **Undrained lateral behavior of short pile under combination of axial, lateral and moment loading in clayed soil.** *Kuwait J. Sci. Eng.*, Vol 39, p. 59-78, 2012.

NI, Q., HIRD, C., AND GUYMER, I. **Physical Modelling of Pile Penetration in Clay Using Transparent Soil and Particle Image Velocimetry,** *Géotechnique*, Vol. 60, No. 2, pp. 121–132, 2010.

OMIDVAR, M. AND ISKANDER, M. **Modeling of projectile penetration using transparent soils,** *Proceedings, 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, 2017.

Omidvar, M., Malioche, J. D., Chen, Z., Iskander, M., and Bless, S. **Visualizing Kinematics of Dynamic Penetration in Granular Media Using Transparent Soils,”** *Geotech. Test. J.*, Vol. 38, No. 5, (in this special issue) pp. 1–18, 2015.

PENG, X. AND ZORNBERG, J.G. **Evaluation of load transfer in geogrids for base stabilization using transparent soil.** *Procedia engineering*, 189, pp.307-314, 2017.

PENNA, A *estaca hélice-contínua: a experiência atual.* São Paulo: ABMS/ABEF/IE, 1999.

PETCHSINGTO, T., AND KARPYN, Z. T. **Deterministic modeling of fluid flow through a CT-scanned fracture using computational fluid dynamics.** *Energy Sources, Part A: Recovery, Util. Environ. Eff.*, 31(11), 897–905, 2009.

PETERS, S. B., SIEMENS, G. A. AND TAKE, W. A. **Characterization of transparent soil for unsaturated applications.** *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 34(5): 1-11, 2011.

QI, C. G., ISKANDER, M., & OMIDVAR, M. **Soil Deformations During Casing Jacking and Extraction of Expanded-Shoe Piles, Using Model Tests.** Geotechnical and Geological Engineering, 35(2), 809-826, 2017.

QI, C.G., ZHANG, Q., ZUO, D.J. AND CHEN, G. **Transparent Sand Experimental Method for Geotechnical Physical Modeling Using Digital Imaging of Particle Image Velocimetry.** Arabian Journal for Science and Engineering, 43(4), pp.2013-2020, 2018.

RANDOLPH MF, CARTER JP AND WROTH JR **Driven piles in clay-the effects of installation and subsequent consolidation.** Géotechnique 29(4): 361–393, <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.4.361>, 1978.

REINHORN, A. M. **Experimental methods in structural engineering.** Lecture notes of Departamento of Civil. Structural and Environmental Engineering of University at Buffalo. Buffalo - New York, 2008.

RIBEIRO, L. F. M. **Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos.** Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2000.

ROBERTS, A.W. & A.H. WILLIS **Performance of grain augers.** Proc. Instn. of Mechanical Engineers, Manipulative & Mechanical Handling Machinery Group, 176 (8): 165-187, 1962.

SADEK, S. **Soil structure interaction in transparent synthetic soils using digital image correlation.** PhD Thesis. New York: Polytechnic University; 2002.

SADEK, S. **Soil Structure Interaction in Transparent Synthetic Soils Using Digital Image Correlation.** Ph.D. thesis, Polytechnic University, Brooklyn, NY, 2000.

SADEK, S., ISKANDER, M. G., & LIU, J. **Accuracy of digital image correlation for measuring deformations in transparent media.** Journal of Computing in Civil Engineering, 17(2), 88-96, 2003.

SADEK, S., ISKANDER, M. G., AND LIU, J. **Geotechnical Properties of Transparent Silica,** Can. Geotech. J., Vol. 39, No. 1, pp. 111–124, 2002.

SAGASETA, C., & WHITTLE, A. J. **Prediction of ground movements due to pile driving in clay.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(1), 55-66, 2001.

SAGASETA, C., WHITTLE, A. J., & SANTAGATA, M. **Deformation analysis of shallow penetration in clay**. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 21(10), 687-719, 1997.

SALGADO, R. **Experimental research on cone penetration resistance**. Keynote Lecture GeoCongress 2014, ASCE, Reston, VA, 2014.

SALGADO, R., BOULANGER, R. W., & MITCHELL, J. K. Lateral stress effects on CPT liquefaction resistance correlations. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 123(8), 726-735, 1997.

SANTOS, L. N. **Comportamento da Areia de Coimbra sob Carregamento Monotónico**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2009.

SCHMITT, A. & KATZENBACH, R. **Modelagem baseada em partículas de CFA e estacas de deslocamento de solo**. Em Proc do 4º Seminário Geotécnico Internacional 'Fundamentos Profundos em Estacas Perfuradas e Trado', Ghent, Bélgica (pp. 217-225), 2003.

SHI, B., MURAKAMI, Y., WU, Z., CHEN, J., AND INYANG, H. **Monitoring of internal failure evolution in soils using computerization X-ray tomography**. Eng. Geol., 54(3), 321–328, 1999.

SIEGEL, T. C. **Testing of augered cast-in-place piles installed with varying auger rotations**. In Full-Scale Testing and Foundation Design: Honoring Bengt H. Fellenius (pp. 333-348), 2012.

SIEMENS, A., MUMFORD, G., AND KUCHARCZUK, D. **Characterization of Transparent Soil for Use in Heat Transport Experiments**, Geotechnical Testing Journal, Vol. 38, No. 5, 2015,

SIEMENS, G.A. AND BEDDOE, R. **Spatial Resolution of Degree of Saturation Measurements in Unsaturated Transparent Soil Experiments**. In PanAm Unsaturated Soils 2017 (pp. 174-184), 2017.

SLATTER, J.; TCHEPAK, S. **Design and construction aspects of piled foundations for Eureka Tower project**. In: international geotechnical seminar on deep foundations on bored and auger piles, 5., 2008, Ghent-Belgium. Proceedings... London: Van Impe & Van Impe (Ed.). Taylor & Francis Group, 2009. ISBN 978-0-415-47556-3. 1 CD-ROM, p. 323-328, 2008.

SOK, R. M., VARSLLOT, T., GHOUS, A. Latham, S., Sheppard, A. P., and Knackstedt, M. A. **Pore scale characterization of carbonates at multiple scales: Integration of micro-CT, BSEM, and FIBSEM.** *Petrophysics*, 51(6), 379–387, 2010.

SONG Z, HU Y, O'LOUGHLIN C, WANG D. **Pullout capacity and rotational behaviour of square anchors.** In: *Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*. London: Taylor & Francis Group; 2006.

SONG, Z., HU, Y., O'LOUGHLIN, C., AND RANDOLPH, M. F. **Loss in Anchor Embedment During Plate Anchor Keying in Clay.** *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 135, No. 10, pp. 1475–1485, 2009.

SONG, Z., **Pullout Behaviour of Suction Embedded Plate Anchors in Clay**, Ph.D. thesis, Curtin University, WA Australia, 2008.

STANIER SA, WHITE DJ. **Improved image-based deformation measurement in the centrifuge environment.** *Geotechnical Testing Journal* 36(6): 1-14, 2013.

STANIER, S. A. **Modelling the Behaviour of Helical Screw Piles.** Ph.D. thesis, University of Sheffield, Sheffield, UK, 2011.

STANIER, S. A., BLACK, J., AND HIRD, C. C. **Enhancing Accuracy and Precision of Transparent Synthetic Soil Modelling.** *Int. J. Phys. Modell. Geotech.*, Vol. 12, No. 4, pp. 162–175, 2012.

SUESCUN-FLOREZ, E. M. ISKANDER, V. KAPILA AND R. CAIN. **Geotechnical Engineering in US Elementary Schools.** *European Journal of Engineering Education*, Vol. 38, No. 3, pp. 300–315, doi: 10.1080/03043797.2013.800019, Taylor & Francis, 2013.

SUI, W., QU, H., AND GAO, Y. **Modeling of Grout Propagation in Transparent Replica of Rock Fractures.** *Geotech. Test. J.*, Vol. 38, No. 5 (in this special issue) pp. 1–9, 2015.

SULEIMAN, M. T., NI, L., AND RAICH, A. **Development of pervious concrete pile ground improvement alternative and behavior under vertical loading.** *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001135, 13, 2014.

TABE, K. **Aquabeads to Model the Geotechnical Behavior of Natural Soils.** Ph.D. thesis, Polytechnic Institute of New York University, Brooklyn, NY, 2009.

TAINA, I.A., HECK, R.J., DEEN, W. AND MA, E.Y., **Quantification of freeze—thaw related structure in cultivated top soils using X-ray computer tomography.** Canadian Journal of Soil Science, 93(4), pp.533-553, 2013.

TAUD, H. *ET AL.* **Porosity estimation method by X-ray computed tomography.** Journal of Petroleum Science & Engineering, v. 47, p. 209-217, 2005.

TAVARES, F. **Avaliação experimental de fundações estacadas em modelos 1g.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Brasília, DF, 154p, 2012.

TAYLOR, Z. J., GURKA, R., KOPP, G. A., AND LIBERZON, A. **Long-Duration Time-Resolved PIV to Study Unsteady Aerodynamics.** IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 59, No. 12, pp. 3262–3269, 2010.

THORBURN, S., D.A. GREENWOOD & W.G.K. FLEMING **The response of sands to the construction of continuous flight auger piles.** Proc. of 2nd Int. Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles: 429-443. Balkema: Rotterdam, 1993.

VAN IMPE, W. *ET AL.* **Load-settlement behaviour versus distinctive Omega-pile execution parameters.** Deep foundations on bored and auger piles-bap III, p. 355-366, 1988.

VAN WEELE, A. F. **Cast in situ piles. Installation methods, soil disturbance and resulting pile behaviour.** In: Proceedings of I seminar on deep foundations on bored and auger piles, Ghent. p. 219-232, 1988.

VELLOSO, D. A., LOPES, F. R. Fundações. **Critério de projetos –investigação de subsolo –Fundações superficiais –Fundações Profundas.** São Paulo. Oficina de Textos, 201.

VESIC **AC Expansion of cavities in infinite soil mass. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE 98(SM3): 265–290, 1972.**

VESIC, A. S. **Design of pile foundations,** National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC, 1977.

VIANA DA FONSECA, A.; COSTA, E.; SANTOS, J. A. **Ensaio de carga vertical em estacas executadas em solo residual do granito.** In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA (SEFE), 5., 2004, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, 2004. v. 2, p. 57-68.

VIGGIANI, G., ANDÒ, E., TAKANO, D. AND SANTAMARINA, J.C. **Laboratory X-ray tomography: a valuable experimental tool for revealing processes in soils.** *Geotechnical Testing Journal*, 38(1), pp.61-71, 2014.

VIGGIANI, G., RAMPOLLO, S., & GEORGIANNOU, V. N. **Experimental analysis of localisation phenomena in triaxial tests on stiff clays.** In *Geotechnical Engineering of hard soils-soft rocks* (pp. 849-856), 1993.

VIGIANI, C. **Further experiences with auger piles in Naples area.** In: *Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Van Impe (ed), pp. 445-455. Balkema: Rotterdam, 1998.

VIPULANANDAN, C., HUSSAIN, A., & USLUOGULARI, O. **Parametric study of open core-hole on the behavior of drilled shafts socketed in soft rock.** In *Contemporary Issues In Deep Foundations* (pp. 1-10), 2007.

WALLACE, J. AND RUTHERFORD, C. **Geotechnical Properties of Laponite RD.** *Geotech. Test. J.*, Vol. 38, No. 5 (in this special issue) pp. 1–14, 2015.

WANG, J., LIU, X., LIU, S., ZHU, Y., PAN, W. AND ZHOU, J. Physical model test of transparent soil on coupling effect of cut-off wall and pumping wells during foundation pit dewatering. *Acta Geotechnica*, pp.1-22.

WELKER, A. In Situ **Remediation of Contaminated Soils Using Prefabricated Vertical Drains.** Ph.D. thesis, University of Texas at Austin, Austin, TX, 1998.

White, D. J., Take, W. A., and Bolton, M. D. **Soil Deformation Measurement Using Particle Image Velocimetry (PIV) and Photogrammetry,** *Géotechnique*, Vol. 53, No. 7, pp. 619–631, 2003.

WILDENSCHILD, D., AND SHEPPARD, A. P. **X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems.** *Adv. Water Resour.*, 51, 217–246, 2012.

WILLSON, C.S., LU, N. AND LIKOS, W.J. **Quantification of grain, pore, and fluid microstructure of unsaturated sand from X-ray computed tomography images.** *Geotechnical Testing Journal*, 35(6), pp.911-923, 2012.

WONG, R. C. **Mobilized strength components of Athabasca oil sand in triaxial compression.** *Can. Geotech. J.*, 36(4), 718–735, 1999.

WOOD, D. M. *Geotechnical Modelling.* Spon Press, 2004.

XIAO, Y., YIN F.; LIU H.; CHU, J., AND ZHANG W. **Model Tests on Soil Movement during the Installation of Piles in Transparent Granular Soil**. International Journal of Geomechanics, p. 06016027, 2016.

XIAO, Y.; YIN, F.; LIU, H.; CHU, J.; ZHANG, W. Model tests on soil movement during the installation of piles in transparent granular soil. Int. J. Geomech. 17, 06016027, 2017.

XU, G. **Research on the Mechanism and Evolution Law of Rock Deformation and Cracking Around Deep Tunnels**. Ph.D. thesis, China University of Mining and Technology, Beijing, China, 2011.

YIN, F., XIAO, Y., LIU, H., ZHOU, H. AND CHU, J. **Experimental Investigation on the Movement of Soil and Piles in Transparent Granular Soils**. Geotechnical and Geological Engineering, pp.1-9, 2018.

YU H. **Cavity Expansion Theory and Its Application to the Analysis of Pressuremeters**. PhD thesis, University of Oxford, Oxford, UK, 1990.

Yu, M. **Effect of persulfate formulations on soil permeability**. M.Sc. thesis, Washington State Univ., Pullman, WA, 2010.

ZHAO HH, GE L. **Investigation on the shear moduli and damping ratios of silica gel**. Granular Matter;16(4):449e56, 2014.

ZHAO, H. **Development and Assessment of Transparent Soil and Particle Image Velocimetry in Dynamic Soil- Structure Interaction**. Ph.D. thesis, University of Missouri- Rolla, Rolla, MO, 2007.

ZHOU H, KONG G, LI P AND LIU H. **Flat cavity expansion: theoretical model and application to the interpretation of the flat dilatometer test**. Journal of Engineering Mechanics 142(1): 04015058, 2015.

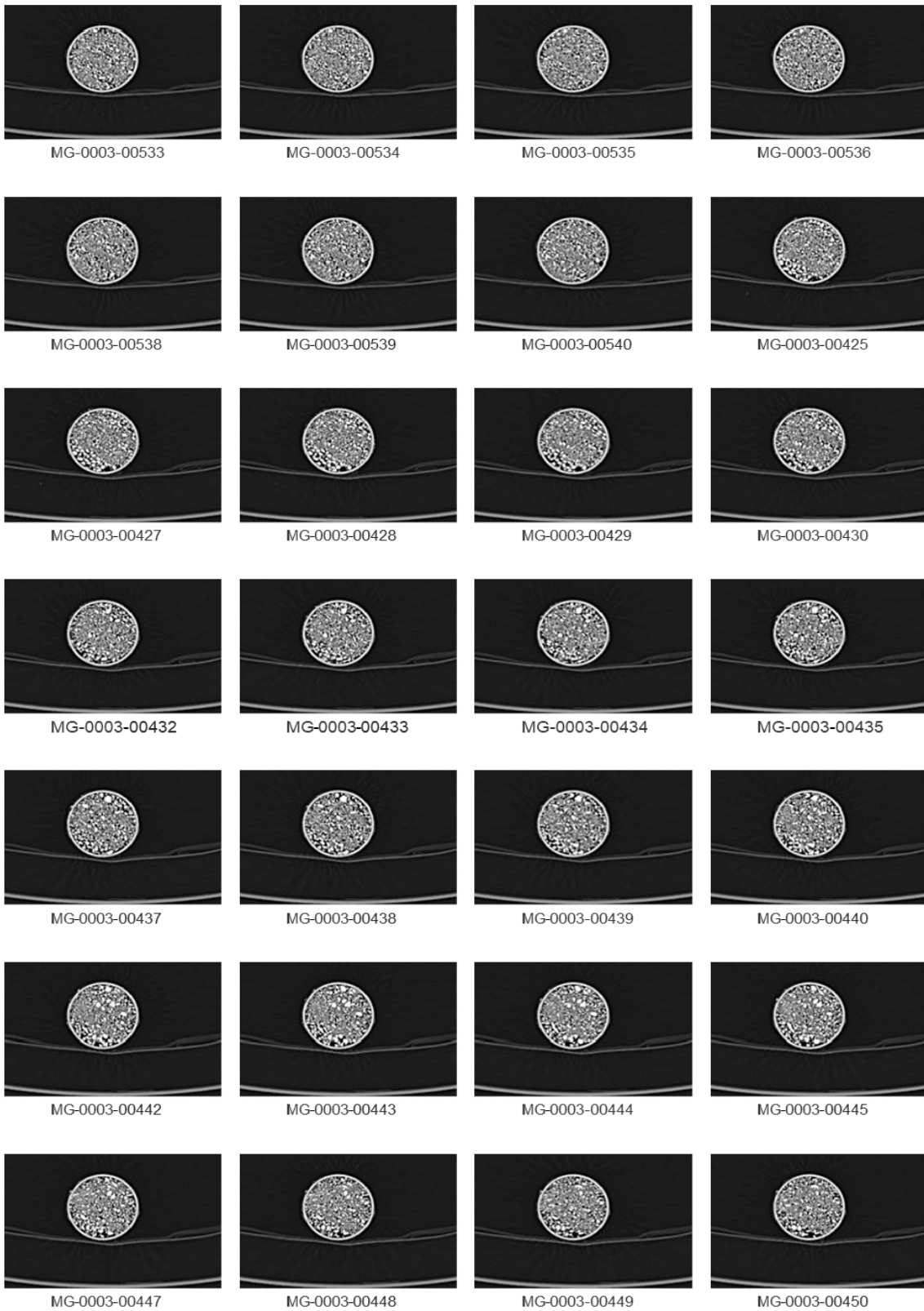
ZHOU H, LIU H AND KONG G. **Influence of shear stress on cylindrical cavity expansion in undrained elastic–perfectly plastic**, (2014b).

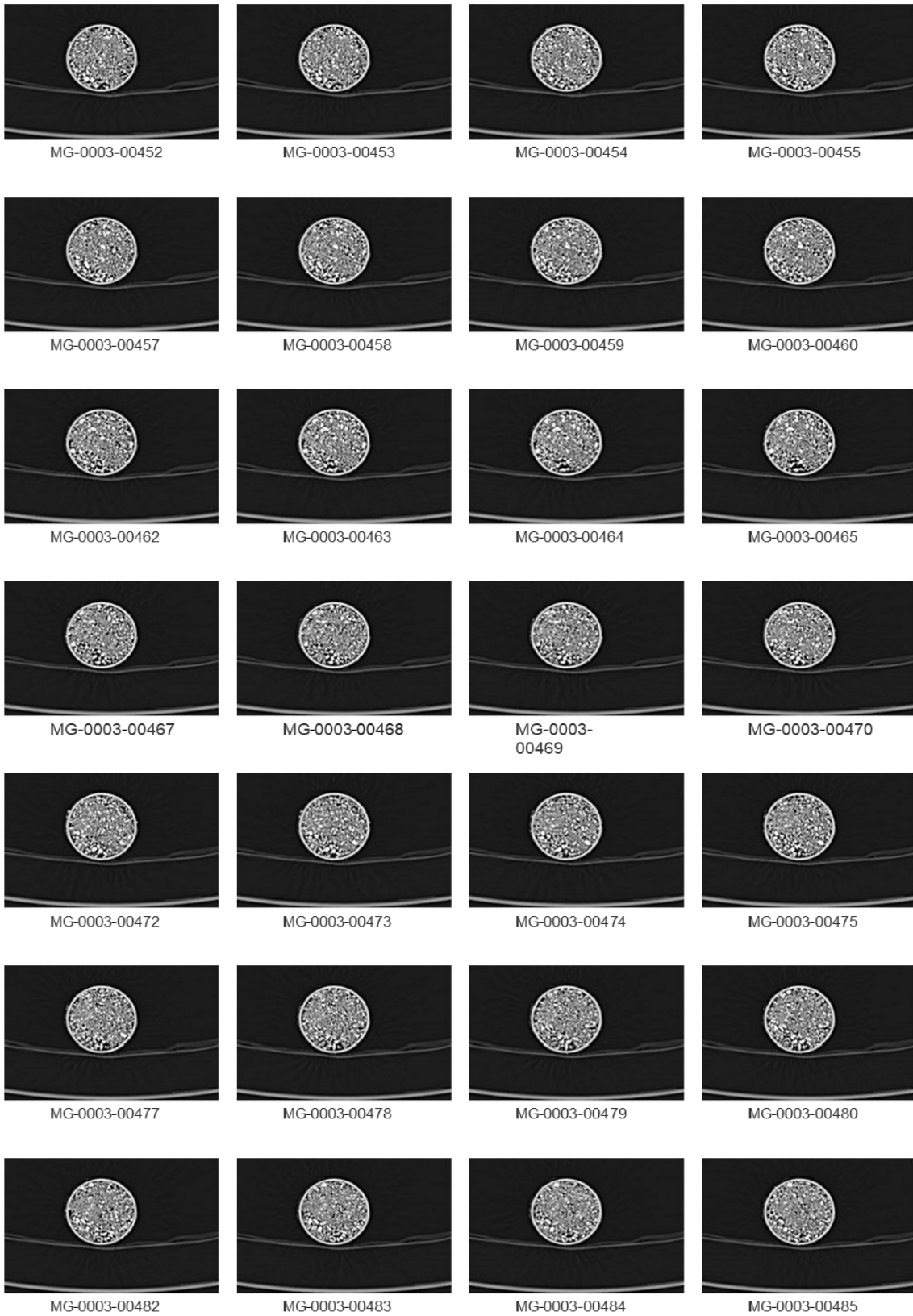
ZHOU H, LIU H, KONG G AND CAO Z. **Analytical solution for pressure-controlled elliptical cavity expansion in elastic-perfectly**, (2014a).

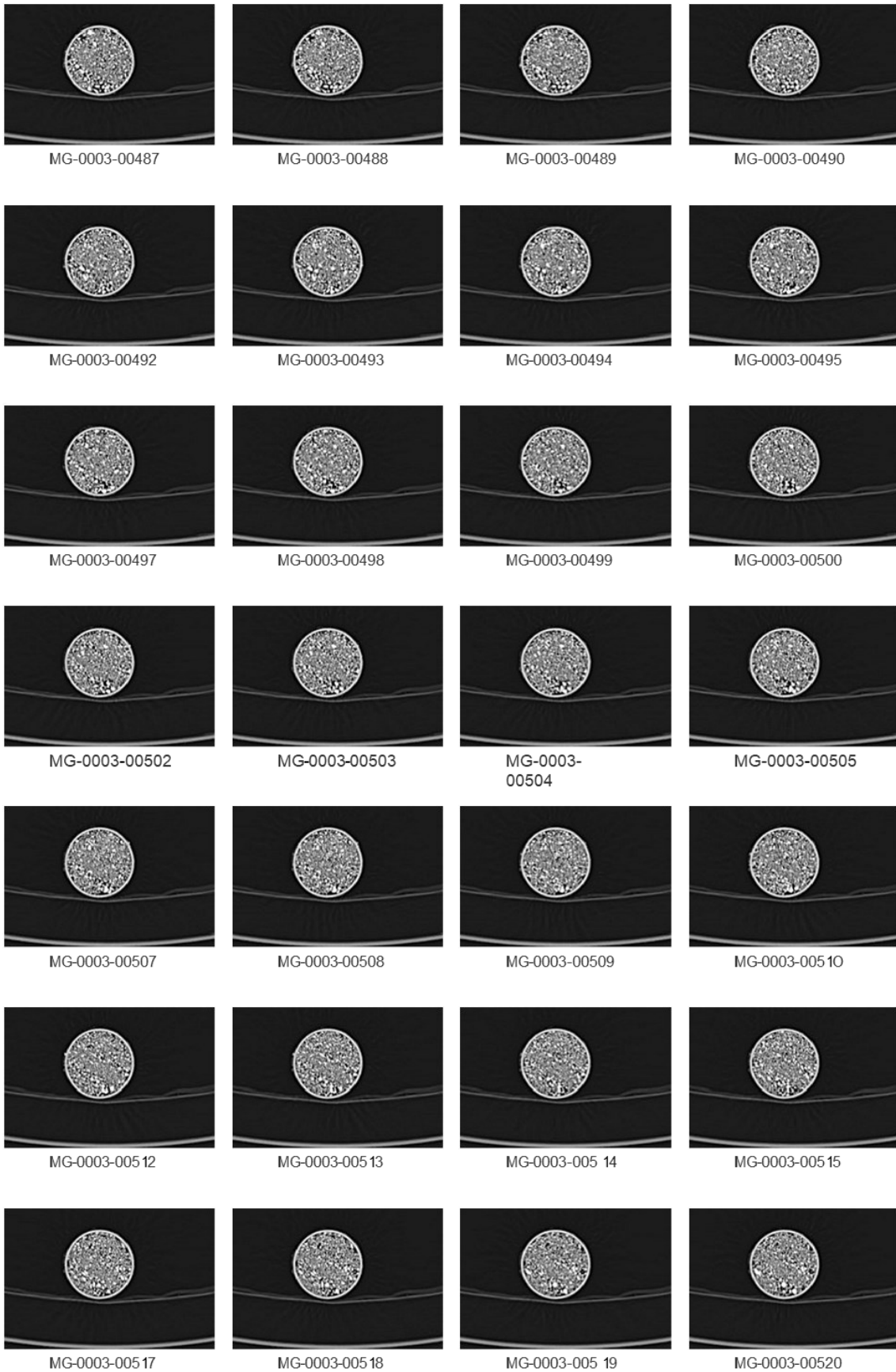
ZHOU H, LIU H, KONG G AND HUANG X. **Analytical solution of undrained cylindrical cavity expansion in saturated soil under anisotropic initial stress**. Computers and Geotechnics 55: 232–239, (2014c).

ANEXO A - IMAGENS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

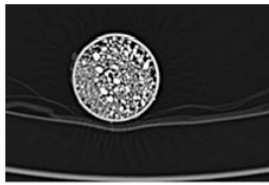
Amostra 1



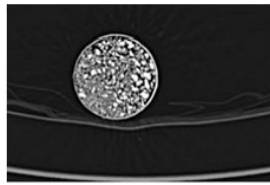




Amostra 2



MG-0004-00150



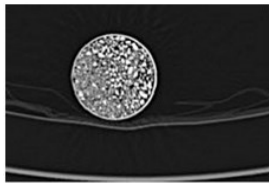
MG-0004-00045



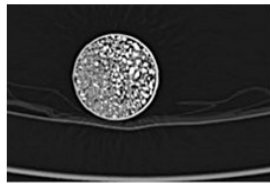
MG-0004-00046



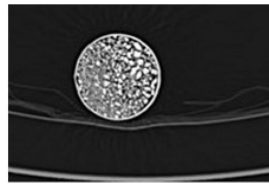
MG-0004-00047



MG-0004-00049



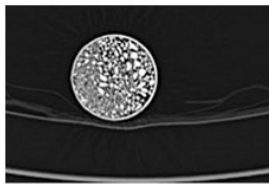
MG-0004-00050



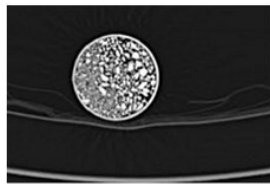
MG-0004-00051



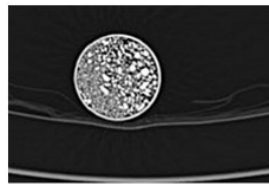
MG-0004-00052



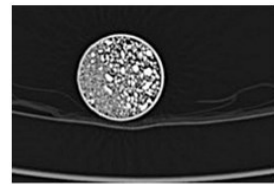
MG-0004-00054



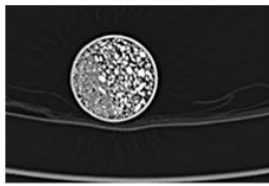
MG-0004-00055



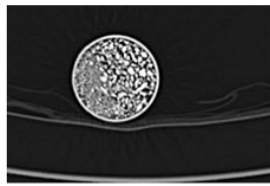
MG-0004-00056



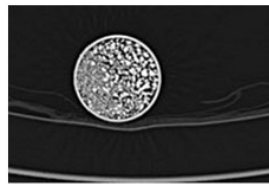
MG-0004-00057



MG-0004-00059



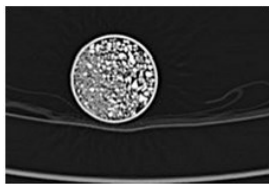
MG-0004-00060



MG-0004-00061



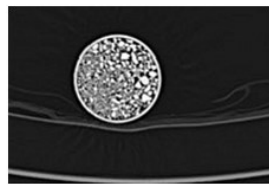
MG-0004-00062



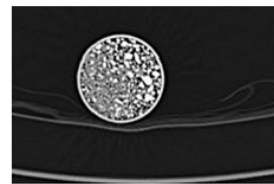
MG-0004-00064



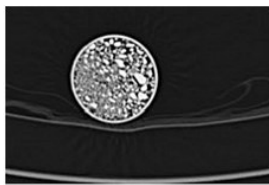
MG-0004-00065



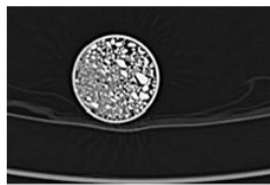
MG-0004-00066



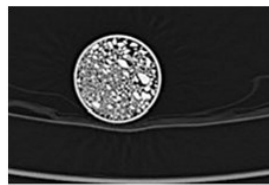
MG-0004-00067



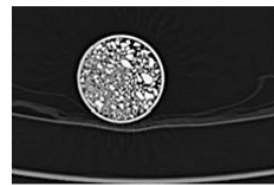
MG-0004-00069



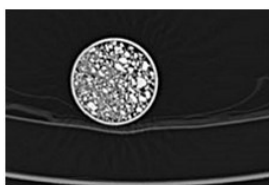
MG-0004-00070



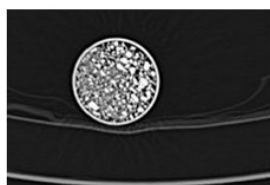
MG-0004-00071



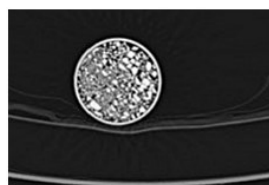
MG-0004-00072



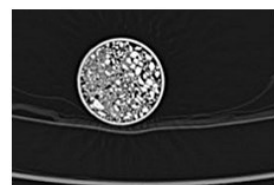
MG-0004-00074



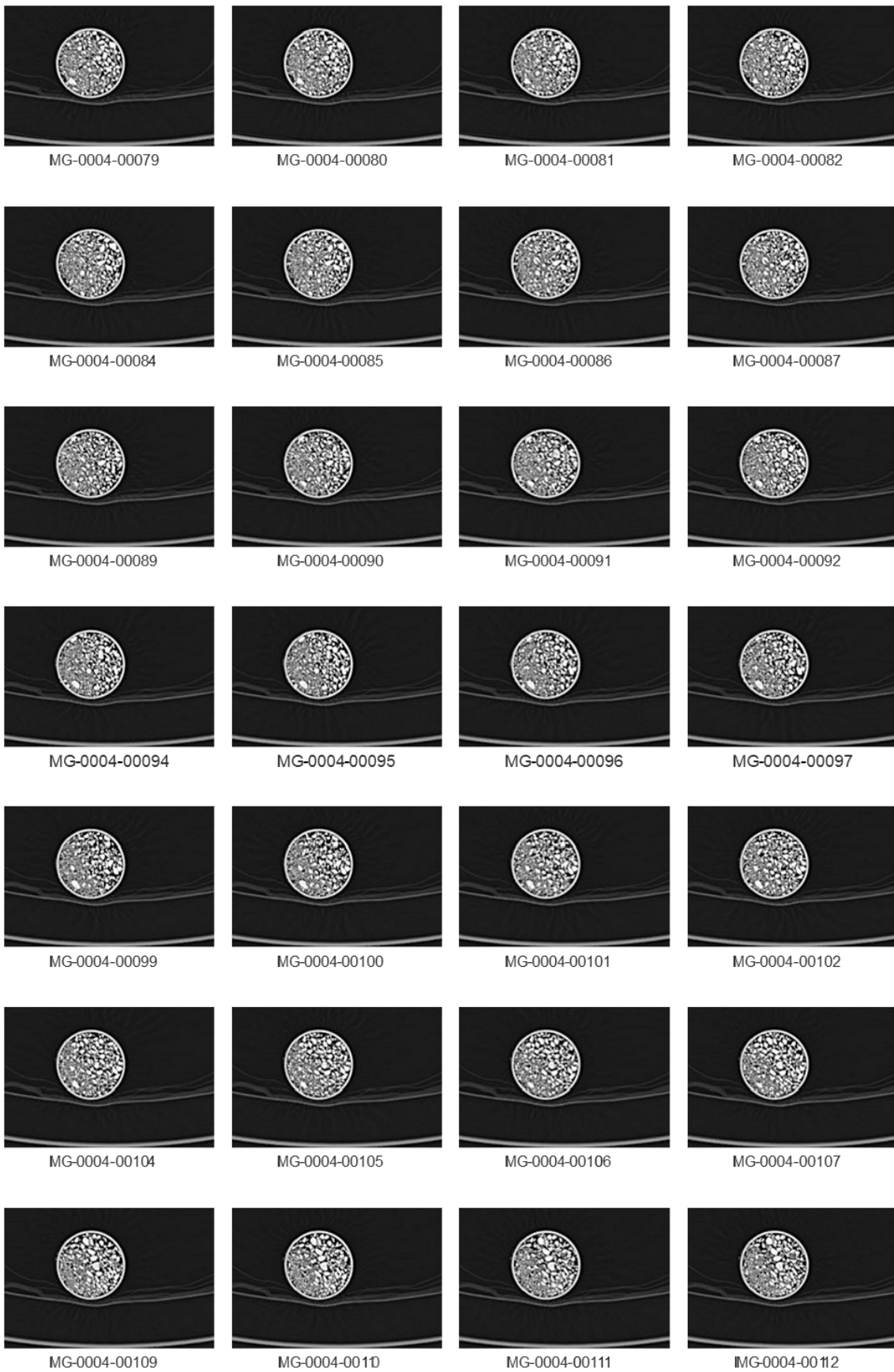
MG-0004-00075



MG-0004-00076



MG-0004-00077





MG-0004-00114



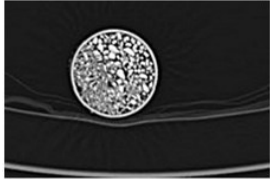
MG-0004-00115



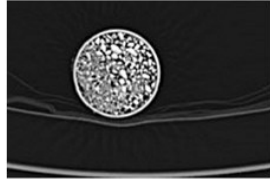
MG-0004-00116



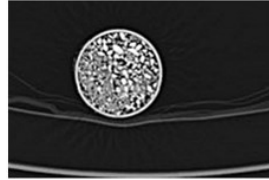
MG-0004-00117



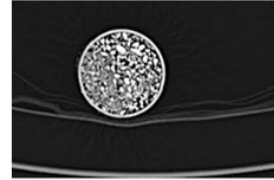
MG-0004-00119



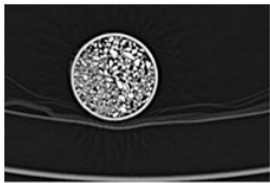
MG-0004-00120



MG-0004-00121



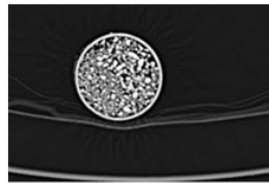
MG-0004-00122



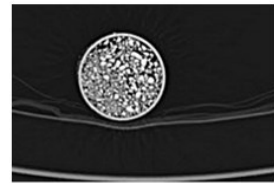
MG-0004-00124



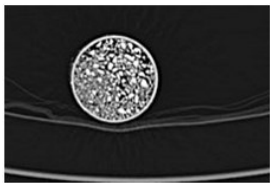
MG-0004-00125



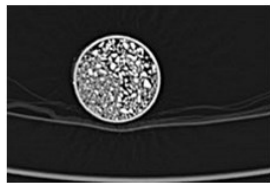
MG-0004-00126



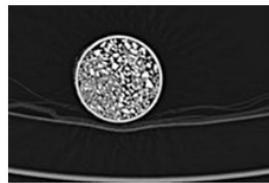
MG-0004-00127



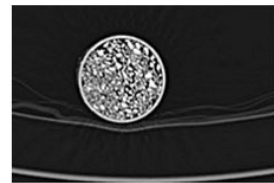
MG-0004-00129



MG-0004-00130



MG-0004-00131



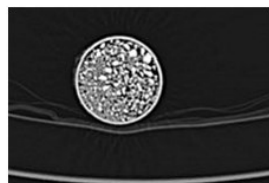
MG-0004-00132



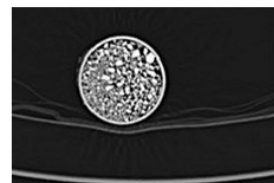
MG-0004-00134



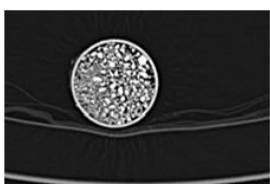
MG-0004-00135



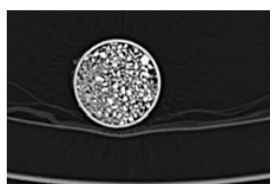
MG-0004-00136



MG-0004-00137



MG-0004-00139



MG-0004-00140



MG-0004-00141



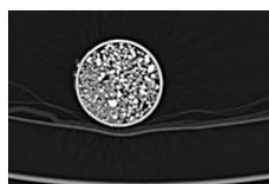
MG-0004-00142



MG-0004-00144



MG-0004-00145

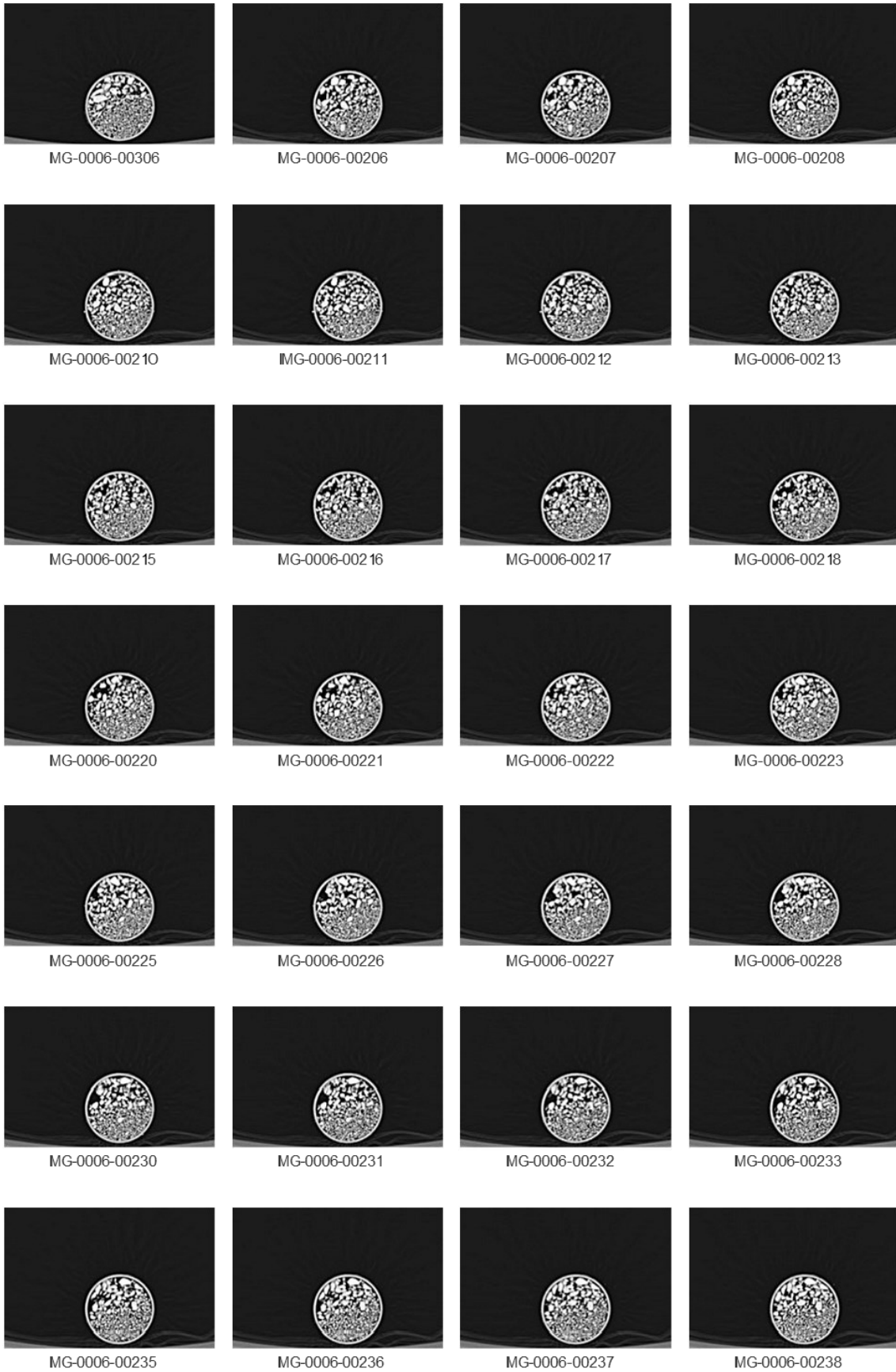


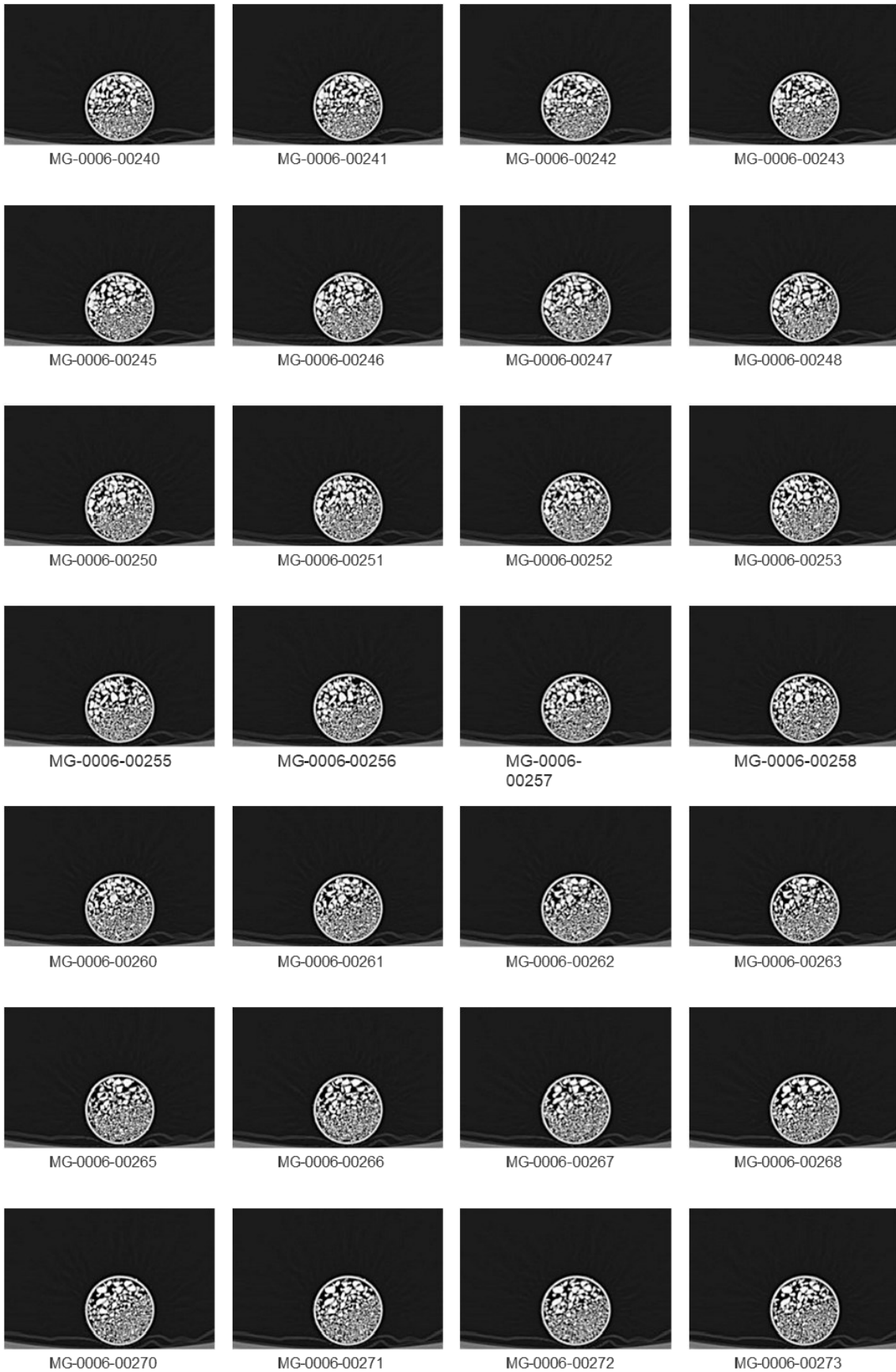
MG-0004-00146



MG-0004-00147

Amostra 3



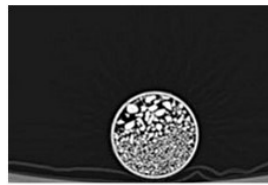




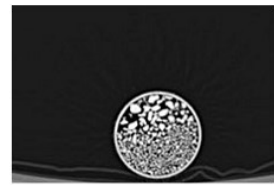
MG-0006-00275



MG-0006-00276



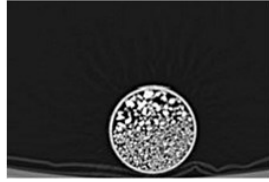
MG-0006-00277



MG-0006-00278



MG-0006-00280



MG-0006-00281



MG-0006-00282



MG-0006-00283



MG-0006-00285



MG-0006-00286



MG-0006-00287



MG-0006-00288



MG-0006-00290



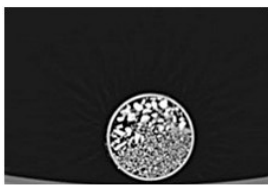
MG-0006-00291



MG-0006-00292



MG-0006-00293



MG-0006-00295



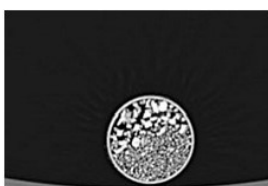
MG-0006-00296



MG-0006-00297



MG-0006-00298



MG-0006-00300



MG-0006-00301



MG-0006-00302



MG-0006-00303

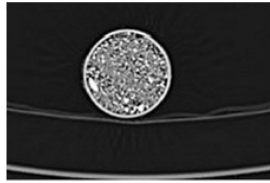


MG-0006-00305

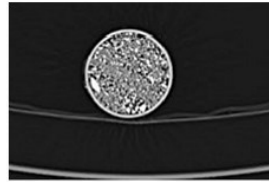
Amostra 4



MG-0003-00522



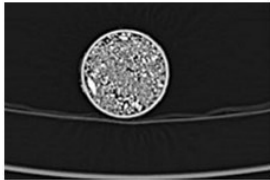
MG-0003-00523



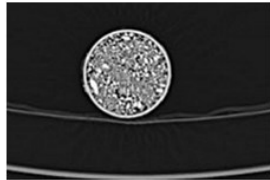
MG-0003-00524



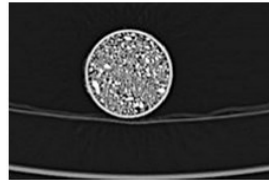
MG-0003-00525



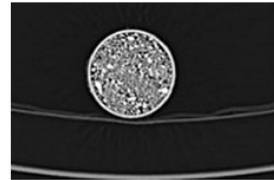
MG-0003-00527



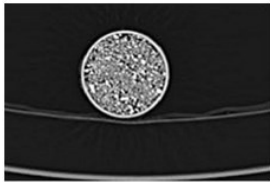
MG-0003-00528



MG-0003-00529

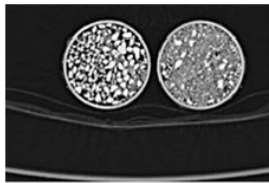


MG-0003-00530

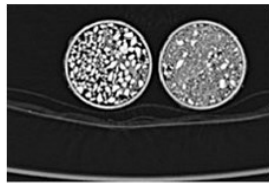


MG-0003-00532

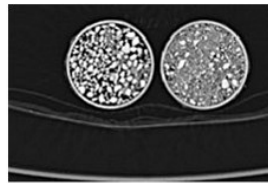
Amostra 5 e 6



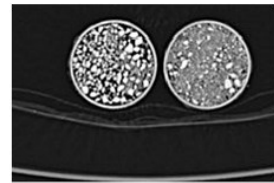
MG-0007-003 17



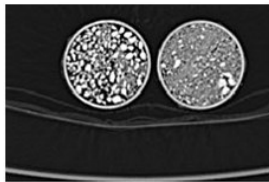
MG-0007-00318



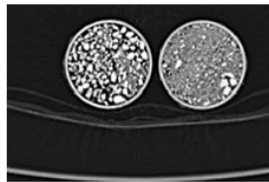
MG-0007-003 19



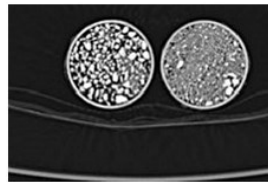
MG-0007-00320



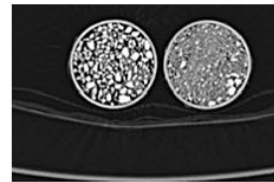
MG-0007-00322



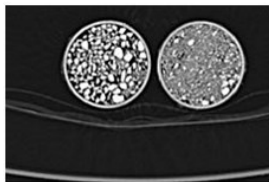
MG-0007-00323



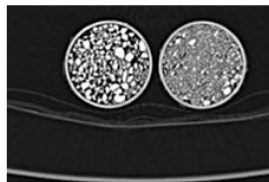
MG-0007-00324



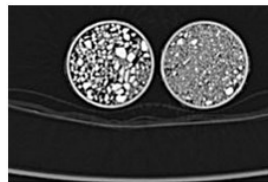
MG-0007-00325



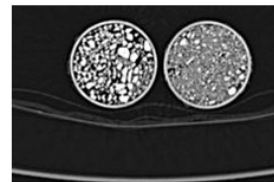
MG-0007-00327



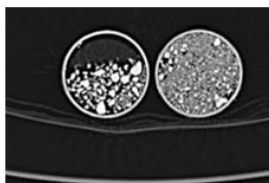
MG-0007-00328



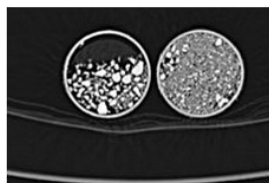
MG-0007-00329



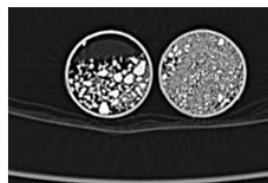
MG-0007-00330



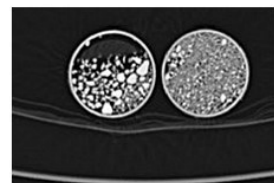
MG-0007-00231



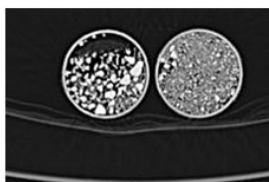
MG-0007-00232



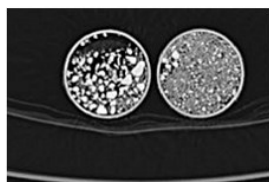
MG-0007-00233



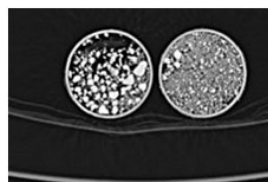
MG-0007-00234



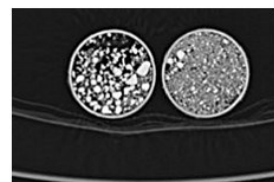
MG-0007-00236



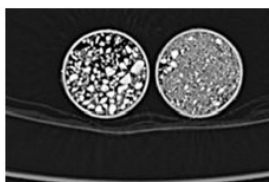
MG-0007-00237



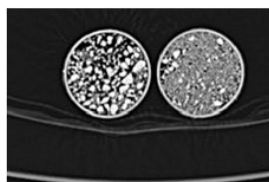
MG-0007-00238



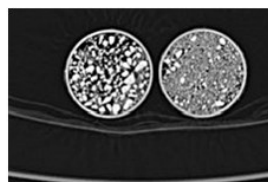
MG-0007-00239



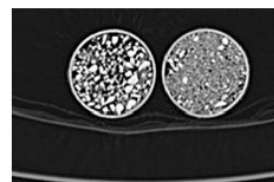
MG-0007-00241



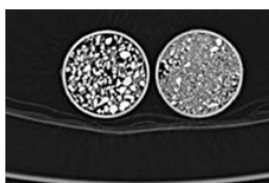
MG-0007-00242



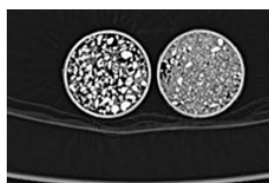
MG-0007-00243



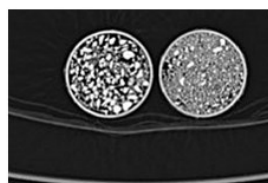
MG-0007-00244



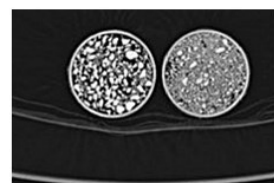
MG-0007-00246



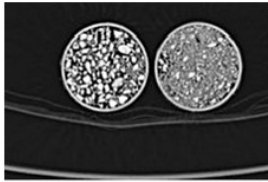
MG-0007-00247



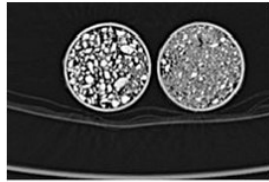
MG-0007-00248



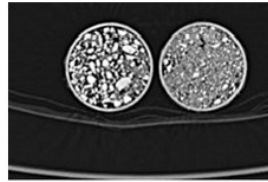
MG-0007-00249



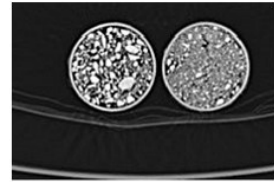
MG-0007-00251



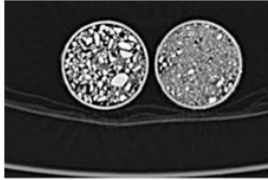
MG-0007-00252



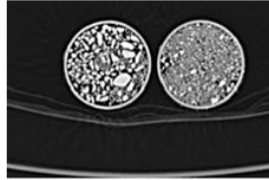
MG-0007-00253



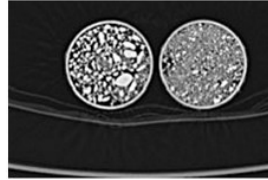
MG-0007-00254



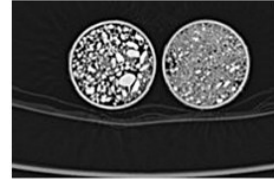
MG-0007-00256



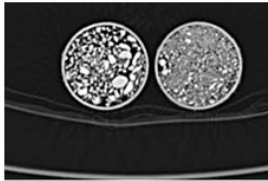
MG-0007-00257



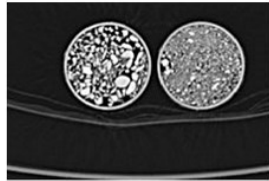
MG-0007-00258



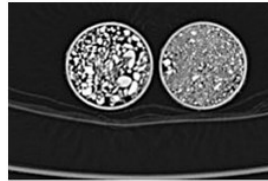
MG-0007-00259



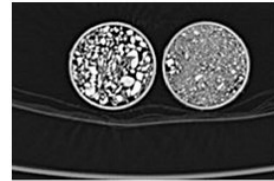
MG-0007-00261



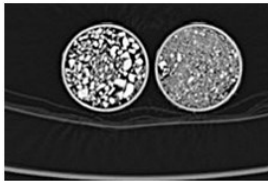
MG-0007-00262



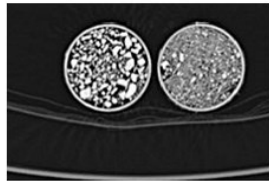
MG-0007-00263



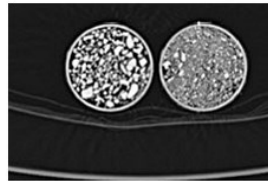
MG-0007-00264



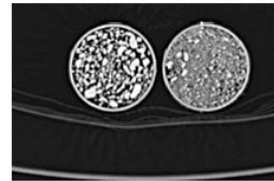
MG-0007-00266



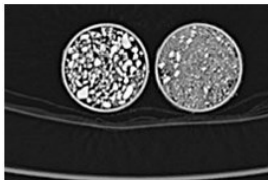
MG-0007-00267



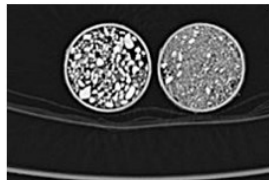
MG-0007-00268



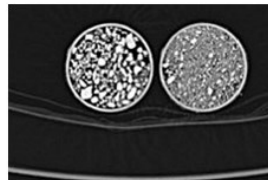
MG-0007-00269



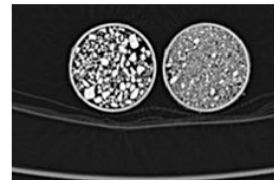
MG-0007-00271



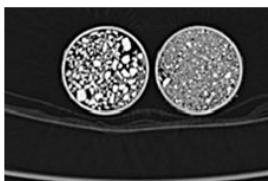
MG-0007-00272



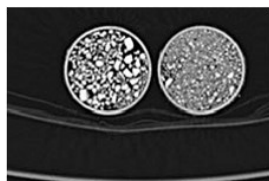
MG-0007-00273



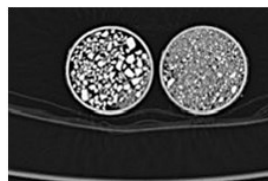
MG-0007-00274



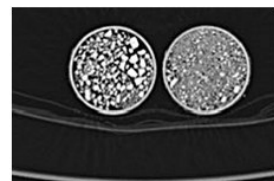
MG-0007-00276



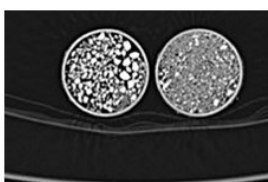
MG-0007-00277



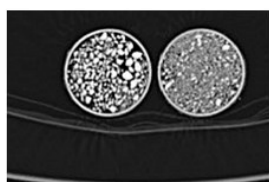
MG-0007-00278



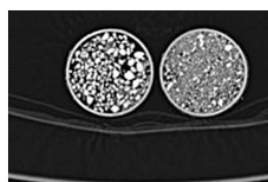
MG-0007-00279



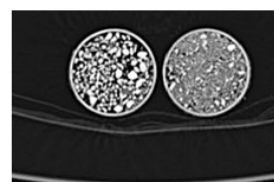
MG-0007-00281



MG-0007-00282



MG-0007-00283



MG-0007-00284

ANEXO B - ALGORITMOS PARA CONTROLAR A VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

```

// CONTROLANDO O MOTOR DE GIRO DO TRADO
// Modulo DRV8825 / Arduino Nano
// OBS: Motor Unipolar 4 fios configurado como Bipolar
// Definições das Portas Digitais do Arduino
int RST = 8;           // Porta digital D08 - reset do DRV8825
int SLP = 9;          // Porta digital D09 - dormir (sleep) DRV8825
int ENA = 7;          // Porta digital D07 - ativa (enable) DRV8825
int M0 = 4;           // Porta digital D04 - M0 do DRV8825
int M1 = 5;           // Porta digital D05 - M1 do DRV8825
int M2 = 6;           // Porta digital D06 - M2 do DRV8825
int DIR = 3;          // Porta digital D03 - direção (direction) do
DRV8825
int STP = 2;          // Porta digital D02 - passo(step) do DRV8825
int MeioPeriodo;     // 156.25 = 60rpm MeioPeriodo no pulso em
microsegundos correcao de +10 ms 1490
int PPS;              // Pulsos por segundo
boolean sentido = true; // Variavel de sentido
int PPR=200;          // Número de passos por volta
int Voltas;           // voltas do motor
int RPM;              // Rotacoes por minuto
int Distancia;
int Fator;
int Velocidade;
int Velocidade2;
int setup()
{
  Serial.begin(9600);
  DDRD = DDRD | B11111100; // Configura Portas D02 até D07 como saída
  disa_DRV8825();         // Desativa as saidas DRV8825
  FULL();                 // Seleciona modo Passo Completo

  DDRB = 0x0F;           // Configura Portas D08,D09,D10 e D11 como
saída
  digitalWrite(SLP, HIGH); // Desativa modo sleep do DRV8825
  rst_DRV8825();          // Reseta o chip DRV8825
  digitalWrite(ENA, LOW); // Ativa as saidas DRV8825

void rst_DRV8825()
{
  digitalWrite(RST, LOW); // Realiza o reset do DRV8825
  delay (1);              // Atraso de 1 milisegundo
  digitalWrite(RST, HIGH); // Libera o reset do DRV8825
  delay (10);             // Atraso de 10 milisegundos
}
void disa_DRV8825()
{
  digitalWrite(ENA, HIGH); // Desativa o chip DRV8825
  delay (10);              // Atraso de 10 milisegundos
}
void ena_DRV8825()
{
  digitalWrite(ENA, LOW); // Ativa o chip DRV8825
  delay (10);             // Atraso de 10 milisegundos
}
void HOR()                // Configura o sentido de
rotação do Motor

```



```

{
    digitalWrite(DIR, HIGH);           // Configura o sentido
HORÁRIO
    Serial.print(" Sentido Horario ");
}
void AHR()                             // Configura o sentido de
rotação do Motor
{
    digitalWrite(DIR, LOW);           // Configura o sentido
ANTI-HORÁRIO
    Serial.print(" Sentido Anti-horario ");
}
void PASSO()                            // Pulso do passo do Motor
{
    digitalWrite(STP, LOW);           // Pulso nível baixo
    delayMicroseconds (MeioPeriodo); // MeioPeriodo de X microsegundos
    digitalWrite(STP, HIGH);          // Pulso nível alto
    delayMicroseconds (MeioPeriodo); // MeioPeriodo de X microsegundos
}
void Frequencia()                       // Configura Frequencia dos pulsos
{
    Pulsos = PPR * Voltas;            // Quantidade total de Pulsos PPR
= pulsos por volta
    PPS = 1000000 / (2 * MeioPeriodo); // Frequencia Pulsos por segundo
    RPM = (PPS * 60) / PPR;           // Calculo do RPM
}
void FULL()
{
    PPR = 200;                        // PPR pulsos por volta
    digitalWrite(M0, LOW);            // Configura modo Passo completo (Full step)
    digitalWrite(M1, LOW);
    digitalWrite(M2, LOW);
    Serial.println(" Passo Completo ");
}
void HALF()
{
    PPR = 400;                        // PPR pulsos por volta
    digitalWrite(M0, HIGH);           // Configura modo Meio Passo (Half step)
    digitalWrite(M1, LOW);
    digitalWrite(M2, LOW);
    Serial.println(" Meio Passo ");
}
void P1_4()
{
    PPR = 800;                        // PPR pulsos por volta
    digitalWrite(M0, LOW);            // Configura modo Micro Passo 1/4
    digitalWrite(M1, HIGH);
    digitalWrite(M2, LOW);
    Serial.println(" Micropasso 1/4 ");
}
void P1_8()
{
    PPR = 1600;                      // PPR pulsos por volta
    digitalWrite(M0, HIGH);           // Configura modo Micro Passo 1/8
    digitalWrite(M1, HIGH);
    digitalWrite(M2, LOW);
    Serial.println(" Micropasso 1/8 ");
}
void P1_16()
{
    PPR = 3200;                      // PPR pulsos por volta

```

```

    digitalWrite(M0, LOW);    // Configura modo Micro Passo 1/16
    digitalWrite(M1, LOW);
    digitalWrite(M2, HIGH);
    Serial.println(" Micropasso 1/16 ");
}
void P1_32()
{
    PPR = 6400;                // PPR pulsos por volta
    digitalWrite(M0, HIGH);    // Configura modo Micro Passo 1/32
    digitalWrite(M1, LOW);
    digitalWrite(M2, HIGH);
    Serial.println(" Micropasso 1/32 ");
}
void TesteMotor()             // Gira motor nos dois sentidos
{
    HOR();
    Serial.print(" / Voltas = ");
    Serial.println(Voltas);
    for (int i = 0; i <= Pulsos; i++)    // Incrementa o Contador
    {
        PASSO();                       // Avança um passo no Motor
    }
    disa_DRV8825();
    delay(10000);
    ena_DRV8825();
}
void Print_RPM ()
{
    Serial.print(" PPR = ");
    Serial.print(PPR);
    Serial.print(" / Pulsos = ");
    Serial.println(Pulsos);
    Serial.print(" 1/2 T = ");
    Serial.print(MeioPeriodo);
    Serial.print(" us / ");
    Serial.print(" PPS = ");
    Serial.print(PPS, 2);
    Serial.print(" / RPM = ");
    Serial.println(RPM, 2);
}
void loop()
{
    Serial.println();
    Tempo =290; //
    Velocidade =0.112; //
    MeioPeriodo=156.25/Velocidade;
    Voltas = Velocidade*Tempo ;// Numero de voltas no Motor
    P1_16(); // Seleciona o Modo do Passo FULL() HALF() P1_4()
    P1_8() P1_16() P1_32()
    Frequencia(); // Calcula RPM
    Print_RPM (); // Imprime configuracao
    TesteMotor(); // Testa o Motor
}

```

ANEXO C - ALGORITMOS PARA CONTROLAR A VELOCIDADE DE SUBIDA E DESCIDA

```

// Controle de Motor de Passo Bipolar com Modulo driver DRV8825
// Modulo DRV8825 / Arduino Uno
// OBS: Motor Unipolar 4 fios configurado como Bipolar
// Definições das Portas Digitais do Arduino
int RST = 8;           // Porta digital D08 - reset do DRV8825
int SLP = 9;          // Porta digital D09 - dormir (sleep) DRV8825
int ENA = 7;          // Porta digital D07 - ativa (enable) DRV8825
int M0 = 4;           // Porta digital D04 - M0 do DRV8825
int M1 = 5;           // Porta digital D05 - M1 do DRV8825
int M2 = 6;           // Porta digital D06 - M2 do DRV8825
int DIR = 3;          // Porta digital D03 - direção (direction) do
DRV8825
int STP = 2;          // Porta digital D02 - passo(step) do DRV8825
float MeioPeriodo;   // 156.25 = 60rpm MeioPeriodo no pulso em
microsegundos correcao de +10 ms 1490
int PPS;              // Pulsos por segundo
boolean sentido = true; // Variavel de sentido
int PPR;              // Número de passos por volta
int Pulsos;           // Pulsos para o driver do motor
int Voltas;           // voltas do motor
int RPM;              // Rotacoes por minuto
int Distancia;
int Fator;
int Velocidade;
int Velocidade2;
int Tempo;
void setup()
  Serial.begin(9600);
  DDRD = DDRD | B11111100; // Configura Portas D02 até D07 como saída
  disa_DRV8825();         // Desativa as saidas DRV8825
  FULL();                 // Seleciona modo Passo Completo

  DDRB = 0x0F;           // Configura Portas D08,D09,D10 e D11 como
saída
  digitalWrite(SLP, HIGH); // Desativa modo sleep do DRV8825
  rst_DRV8825();          // Reseta o chip DRV8825
  digitalWrite(ENA, LOW); // Ativa as saidas DRV8825
}
void rst_DRV8825()
{
  digitalWrite(RST, LOW); // Realiza o reset do DRV8825
  delay (1);              // Atraso de 1 milisegundo
  digitalWrite(RST, HIGH); // Libera o reset do DRV8825
  delay (10);             // Atraso de 10 milisegundos
}
void disa_DRV8825()
{
  digitalWrite(ENA, HIGH); // Desativa o chip DRV8825
  delay (10);              // Atraso de 10 milisegundos
}
void ena_DRV8825()
{
  digitalWrite(ENA, LOW); // Ativa o chip DRV8825
  delay (10);              // Atraso de 10 milisegundos
}

```

```

void HOR() // Configura o sentido de
rotação do Motor
{
    digitalWrite(DIR, HIGH); // Configura o sentido
HORÁRIO
    Serial.print(" Sentido Horario ");
}
void AHR() // Configura o sentido de
rotação do Motor
{
    digitalWrite(DIR, LOW); // Configura o sentido
ANTI-HORÁRIO
    Serial.print(" Sentido Anti-horario ");
}

void PASSO() // Pulso do passo do Motor
{
    digitalWrite(STP, LOW); // Pulso nível baixo
    delayMicroseconds (MeioPeriodo); // MeioPeriodo de X microsegundos
    digitalWrite(STP, HIGH); // Pulso nível alto
    delayMicroseconds (MeioPeriodo); // MeioPeriodo de X microsegundos
void Frequencia() // Configura Frequencia dos pulsos
{
    Pulsos = PPR * Voltas; // Quantidade total de Pulsos PPR
= pulsos por volta
    PPS = 1000000 / (2 * MeioPeriodo); // Frequencia Pulsos por segundo
    RPM = (PPS * 60) / PPR; // Calculo do RPM
}

void FULL()
{
    PPR = 200; // PPR pulsos por volta
    digitalWrite(M0, LOW); // Configura modo Passo completo (Full step)
    digitalWrite(M1, LOW);
    digitalWrite(M2, LOW);
    Serial.println(" Passo Completo ");
}
void HALF()
{
    PPR = 400; // PPR pulsos por volta
    digitalWrite(M0, HIGH); // Configura modo Meio Passo (Half step)
    digitalWrite(M1, LOW);
    digitalWrite(M2, LOW);
    Serial.println(" Meio Passo ");
}
void P1_4()
{
    PPR = 800; // PPR pulsos por volta
    digitalWrite(M0, LOW); // Configura modo Micro Passo 1/4
    digitalWrite(M1, HIGH);
    digitalWrite(M2, LOW);
    Serial.println(" Micropasso 1/4 ");
}
void P1_8()
{
    PPR = 1600; // PPR pulsos por volta
    digitalWrite(M0, HIGH); // Configura modo Micro Passo 1/8
    digitalWrite(M1, HIGH);
    digitalWrite(M2, LOW);
    Serial.println(" Micropasso 1/8 ");
}

```

```

void Pl_16()
{
  PPR = 3200;          // PPR pulsos por volta
  digitalWrite(M0, LOW); // Configura modo Micro Passo 1/16
  digitalWrite(M1, LOW);
  digitalWrite(M2, HIGH);
  Serial.println(" Micropasso 1/16 ");
}
void Pl_32()
{
  PPR = 6400;          // PPR pulsos por volta
  digitalWrite(M0, HIGH); // Configura modo Micro Passo 1/32
  digitalWrite(M1, LOW);
  digitalWrite(M2, HIGH);
  Serial.println(" Micropasso 1/32 ");
}
void TesteMotor()      // Gira motor nos dois sentidos
{
  AHR();
  Serial.print(" / Voltas = ");
  Serial.println(Voltas);
  for (float i = 0; i <= Pulsos; i++) // Incrementa o Contador
  {
    PASSO(); // Avança um passo no Motor
  }
  disa_DRV8825();
  delay (750) ; // Atraso de 750 mseg
  ena_DRV8825();
  delay(10000);
  HOR();
  Serial.print(" / Voltas = ");
  Serial.println(Voltas);
  for (float i = 0; i <= Pulsos; i++) // Incrementa o Contador
  {
    PASSO(); // Avança um passo no Motor
  }
  disa_DRV8825();
  delay (10000) ; // Atraso de 750 mseg
  ena_DRV8825();
}
void Print_RPM ()
{
  Serial.print(" PPR = ");
  Serial.print(PPR);
  Serial.print(" / Pulsos = ");
  Serial.println(Pulsos);
  Serial.print(" 1/2 T = ");
  Serial.print(MeioPeriodo);
  Serial.print(" us / ");
  Serial.print(" PPS = ");
  Serial.print(PPS, 2);
  Serial.print(" / RPM = ");
  Serial.println(RPM, 2);
}
{
  Serial.println();
  Distancia=30; // Distancia desejada que o atuador ande (Inserir a
distancia)
  Fator=1.2; // Fator de conversão de voltas para milímetros do atuador
(Valor que é obtido por meio da calibração do motor analisando o quanto
desce e o quanto sobe )
}

```

```

    Velocidade2=0.398; //Velocidade desejada em cm/s (Inserir a
velocidade)
    Tempo = Distancia/Velocidade2; // Tempo necessário para o ensaio
    Voltas = Distancia/Fator ;// Numero de voltas no Motor
    Velocidade= Voltas/Tempo; // velocidade em volta/s
    MeioPeriodo=312.5/Velocidade;
    P1_8(); // Selecione o Modo do Passo FULL() HALF() P1_4()
P1_8() P1_16() P1_32()
    Frequencia(); // Calcula RPM
    Print_RPM (); // Imprime configuracao
    TesteMotor(); // Testa o Motor
}

```

ANEXO D - CALIBRAÇÃO DA IMPRESSORA 3D UP PLUS

Para realizar a impressão é necessário o desenho do trado e depois calibrar os pontos da impressora 3D, para que se obtenha o resultado desejado.

A calibração consistiu nos seguintes passos:

- 1- Primeiramente na tela de “Maintenance” colocou-se a mesa na posição central clicou-se em “Center”, depois aproximou-se a plataforma do bico clicando-se em “To”: com o valor por exemplo em 120.
- 2- Em seguida, entrou-se no menu “3D Print” e depois em “Platform Calibrate”. Posteriormente, clica-se em “Set nozzle height”. Para imprimir com sucesso, a plataforma deve ser definida para iniciar a uma distância de 0,2 milímetros do bico. Portanto, utilizou-se duas folhas de papel sulfite entre o bico e a mesa, este deve ficar raspando, mas não preso, o que dá aproximadamente os 0,2mm.
Seguindo o passo 2 fez-se um nivelamento fino da mesa em relação ao bico, clicando-se em cada posição de 1 a 9 definindo, assim 9 pontos da mesa.
Toda posição de 1 a 9 foi selecionada para que todos os pontos ficassem à mesma altura em relação à mesa, sempre utilizando as duas folhas de papel.
- 3- Por fim, pressionou-se “Apply current values” e depois confirmou-se em SIM.