

PROPRIEDADES DOS SOLOS TRANSPARENTES E TÉCNICAS DE  
CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS PARA APLICAÇÃO EM  
MODELAGEM FÍSICA GEOTÉCNICA

**TIAGO GOMES BARROSO CARVALHO**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
JULHO-2015

PROPRIEDADES DOS SOLOS TRANSPARENTES E TÉCNICAS DE  
CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS PARA APLICAÇÃO EM  
MODELAGEM FÍSICA GEOTÉCNICA

**TIAGO GOMES BARROSO CARVALHO**

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

Orientador: Prof. Fernando Saboya Albuquerque Jr.

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
JULHO-2015

PROPRIEDADES DOS SOLOS TRANSPARENTES E TÉCNICAS DE  
CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS PARA APLICAÇÃO EM  
MODELAGEM FÍSICA GEOTÉCNICA

**TIAGO GOMES BARROSO CARVALHO**

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

Aprovado em 24 de Julho de 2015.

Comissão Examinadora:

---

Profa. Denise M. S. Gerscovich – (D.Sc, Eng. Civil) - FEN/UERJ

---

Prof. Márcio Almeida - (Ph.D, Eng. Civil) – COPPE - UFRJ

---

Prof. Aldo Durand Fáfán - (D.Sc., Eng. Civil) - UENF

---

Prof. Sergio Tibana (D.Sc., Eng. Civil) – UENF

---

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Júnior (D.Sc., Eng. Civil) – UENF  
**(Orientador)**

**“Uma mente que se abre a um novo conhecimento  
jamais volta ao seu estado inicial.”**

Albert Einstein

## AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio financeiro no Brasil e no exterior;

Ao meu Orientador Fernando Saboya por vislumbrar e acreditar nesta linha de pesquisa com solos transparentes e imagens digitais;

Ao professor Magued Iskander pelo senso crítico e apoio incondicional a este trabalho;

A todos os professores do LECIV e em especial aos professores Sergio Tibana , Aldo Durand Farfán e Maria da Glória Alves pela atenção e presteza dada como professores e amigos;

Ao *Department of Civil Engineering* da NYU pela disponibilidade dos laboratórios;

Ao Departamento de Engenharia Civil da UENF por possibilitar o desenvolvimento desta tese de doutorado;

Aos amigos Medhi Omidvar, Eduardo Suescun Florez, Sophia Mercurio, Cris Chen Zabo, Nick Machiaras, Ivan Guzman, Sina Kashuk, Samer Sadek, Jeanne Doriou e Swaroop Shankar pela amizade e troca de conhecimentos;

A todos colegas e amigos da UENF que diretamente ou indiretamente contribuíram com este trabalho;

Aos técnicos de laboratório que contribuíram na execução dos ensaios, em especial a Milton Soares Pereira Jr., André Flores (UENF) e Sebastiano (NYU).

À minha noiva Bárbara pelo apoio e dedicação.

Aos meus pais, minhas irmãs meus sobrinhos e cunhados pelo apoio dado em todas as fases deste trabalho.

Ao meu filho Pedro Henrique.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS.....	xii
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	14
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 <b>Histórico do desenvolvimento de Solos Transparentes</b> .....	4
2.1.1 <i>Famílias de Solos transparentes atualmente disponíveis</i> .....	5
2.1.1.1    Pó de sílica amorfa para modelagem de argilas.....	5
2.1.1.2    Sílica Gel para modelagem de areias.....	8
2.1.1.3    Hidrogel para modelagem de sedimentos de baixa resistência.....	14
2.1.1.4    Laponita.....	14
2.1.1.5    Quartzo Fundido para modelagem de areias.....	15
2.2 <b>Desenvolvimentos notáveis em outros campos da ciência</b> .....	26
2.2.1 <i>Física</i> .....	26
2.2.2 <i>Dinâmica de fluidos e Engenharia Hidráulica</i> .....	26
2.2.3 <i>Biologia</i> .....	27
2.3 <b>Técnicas de Medição com o uso de Solos Transparentes</b> .....	28
2.3.1 <i>Interferometria Speckle</i> .....	28
2.3.2 <i>Técnica da camada opaca (embedded plane)</i> .....	34
2.3.3 <i>Técnicas não convencionais com o uso de solos transparentes</i> .....	35
2.3.3.1    Uso de propriedades térmicas.....	35
2.4 <b>Técnicas de Processamento e Análise de Imagens</b> .....	36
2.4.1 <i>Correlação Digital de Imagens Básica</i> .....	38
2.4.1.1    Correlação Cruzada Discreta (DCC).....	38
2.4.2 <i>Correlação Digital de Imagens Avançada</i> .....	39
2.4.3 <i>Componentes básicos de uma análise DIC</i> .....	40
2.4.4 <i>Etapas Básicas de Uma análise DIC</i> .....	41
2.4.4.1    Processamento digital de imagens.....	42

2.4.4.1.1 Imagem como matriz de pixel .....	43
2.4.4.2 Funções de Correlação .....	44
2.4.4.2.1 Zero-mean normalized cross correlation (ZNCC).....	45
2.4.4.2.2 Zero-mean normalized sum of squared difference (ZNSSD).....	46
2.4.4.2.3 Symmetric Phase-only cross correlation (SPOCC) .....	47
2.4.4.3 Obtenção dos deslocamentos .....	47
2.5 Desenvolvimento de algoritmos auxiliares à Correlação Digital de Imagens (DIC) em linguagem Matlab® .....	<b>49</b>
2.5.1 <i>Teste para escolha da função de correlação nas análises</i> .....	49
2.5.2 <i>Binarização</i> .....	49
2.5.3 <i>Campos de Deformação Cisalhante e Volumétrica a partir dos resultados da Correlação Digital de Imagens (DIC)</i> .....	50
2.5.4 <i>Trajetórias da partícula de solo</i> .....	54
2.5.5 <i>Trajetórias de Lagrange</i> .....	56
<b>3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>58</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	<b>58</b>
3.2 MATERIAIS TESTADOS .....	<b>59</b>
3.3 PROGRAMA DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	<b>61</b>
3.3.1 <i>SELEÇÃO DE PORO FLUIDOS NACIONAIS</i> .....	62
3.3.1.1 Refratômetros portáteis .....	64
3.3.1.2 Procedimento .....	64
3.3.2 <i>PESQUISA DE UM PORO FLUIDO NÃO VISCOSO A BASE DE ÁGUA</i> ...	65
3.3.3 <i>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS</i> .....	66
3.3.4 <i>ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA</i> .....	67
3.3.5 <i>ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO</i> .....	68
3.3.5.1 Preparação das amostras .....	68
3.3.5.2 Propriedades físicas da sílica gel .....	70
3.3.5.2.1 Índice de vazios da sílica gel .....	70
3.3.6 <i>ENSAIOS TRIAXIAIS</i> .....	72
3.3.6.1.1 Equipamento Triaxial Utilizado.....	72
3.3.6.2 Preparação das Amostras .....	73
3.3.7 <i>ENSAIO DE PERMEABILIDADE</i> .....	74
3.3.8 <i>COEFICIENTE DE FORMA E ESFERICIDADE</i> .....	75

3.3.8.1	Procedimento do Ensaio .....	75
3.3.9	<i>ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO I.R COM A TEMPERATURA</i> .....	76
3.3.10	<i>ENSAIO DE DEGRADAÇÃO DA MEMBRANA DE LÁTEX</i> .....	76
3.3.11	<i>TESTES DE REAPROVEITAMENTO DO PORO FLUIDO E SOLO</i> <i>TRANSPARENTES</i> .....	77
3.3.11.1	Poros Fluido constituído com óleo mineral.....	77
3.3.11.1.1	Procedimento .....	77
3.3.11.2	Poros Fluido constituído com iodeto de sódio .....	78
3.3.11.2.1	Procedimento .....	79
<b>3.4</b>	<b>PROGRAMA DE MODELAGEM FÍSICA DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS ...</b>	<b>79</b>
3.4.1	<i>MATERIAIS TESTADOS</i> .....	80
3.4.1.1	Areia natural (Ottawa sand).....	80
3.4.1.2	Quartzo fundido.....	80
3.4.1.3	Procedimento de preparação de amostras de areia .....	80
<b>3.5</b>	<b>APARATO EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS</b> .....	<b>82</b>
3.5.1	<i>METODOLOGIA DO ENSAIO DE INTERFERÊNCIA ENTRE SAPATAS</i> ...	82
3.5.1.1	Sistema ótico para ensaios .....	85
3.5.2	<i>METODOLOGIA DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE DUTOS</i> .....	87
3.5.3	<i>METODOLOGIA PARA O ENSAIO DE PENETRAÇÃO DINÂMICA</i> .....	91
3.5.3.1	Sistema ótico de aquisição de imagens.....	92
3.5.3.1.1	Configuração Ótica .....	92
3.5.3.2	Acelerador Eletro-pneumático e projéteis testados.....	93
3.5.3.3	A preparação das amostras .....	95
3.5.4	<i>METODOLOGIA DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO QUASI-ESTÁTICO</i> .....	95
3.5.5	<i>METODOLOGIA DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE TORPEDOS</i> ...	96
3.5.5.1	Sistema para arrancamento do torpedo .....	98
3.5.5.2	Sistema de aplicação de confinamento .....	99
3.5.5.3	Sistema de Lentes utilizadas .....	100
3.5.6	<i>Descrição da primeira metodologia utilizada</i> .....	102
3.5.7	<i>Descrição da segunda metodologia utilizada</i> .....	105
<b>4 -</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>107</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>107</b>
<b>4.2</b>	<b>PROGRAMA DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO</b> .....	<b>107</b>

4.2.1	SELEÇÃO DE PORO FLUIDOS NACIONAIS .....	107
4.2.2	Pesquisa de um Poro Fluido não viscoso a base de água.....	111
4.2.3	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS.....	113
4.2.3.1	Determinação das Densidades máximas e mínimas do QF.....	114
4.2.3.2	Propriedades físicas do quartzo fundido.....	115
4.2.3.3	COEFICIENTE DE FORMA E ESFERICIDADE .....	116
4.2.3.3.1	Areia de Ottawa .....	116
4.2.3.3.2	Quartzo fundido .....	117
4.2.3.4	RESULTADOS DA ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA..	117
4.2.3.4.1	Silica Gel (SG-1) e (SG-2) .....	118
4.2.3.4.2	Quartzo Fundido .....	119
4.2.3.5	ENSAIOS TRIAXIAIS .....	120
4.2.3.5.1	Quartzo fundido .....	120
4.2.4	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	129
4.2.4.1	Sílica Gel.....	129
4.2.4.1.1	Ângulo de atrito interno.....	130
4.2.4.2	Quartzo Fundido.....	135
4.2.4.2.1	Ângulo de atrito interno.....	135
4.2.4.3	ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	138
4.2.4.3.1	Quartzo Fundido .....	138
4.2.4.4	ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO I.R COM A TEMPERATURA.....	139
4.2.4.4.1	Poros fluidos Nacionais .....	139
4.2.4.4.2	Comparativo entre diferentes poros fluidos.....	140
<b>4.3</b>	<b>PROGRAMA DE MODELAGEM FÍSICA GEOTÉCNICA A 1G .....</b>	<b>144</b>
4.3.1	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS DO ENSAIO DE INTERFERÊNCIA ENTRE SAPATAS .....	144
4.3.1.1	Resumo dos Ensaios .....	144
4.3.1.2	Perfis de Deslocamento .....	145
4.3.1.3	Deformação Cisalhante e Volumétrica .....	148
4.3.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE DUTOS.....	151
4.3.2.1	Observações gerais .....	151
4.3.2.2	Resposta Carga vs. Deslocamento .....	152
4.3.2.3	Mecanismos de Deformação.....	153

4.3.2.4	Perfis de Deslocamento .....	154
4.3.3	<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DINÂMICA E QUASI-ESTÁTICO</i> .....	158
4.3.3.1	Observações gerais .....	158
4.3.3.2	Campos de deslocamento e velocidade .....	164
4.3.3.3	Deformação Cisalhante e Volumétrica .....	170
4.3.4	<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE ESTACAS TORPEDO</i> .....	176
4.3.4.1	Observações gerais .....	176
4.3.4.2	Resumo dos Testes .....	177
4.3.4.2.1	Resposta Carga vs. Deslocamento .....	177
4.3.4.3	Perfil de deslocamento .....	178
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>179</b>
5.1	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>179</b>
5.2	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>180</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>183</b>
	<b>APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DO SISTEMA E PREPARAÇÃO PARA ENSAIOS</b> ..	<b>191</b>
	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>191</b>
	Calibração da Câmera.....	<b>191</b>
	Aquisição de imagens “Fiducial” .....	<b>199</b>
	Escolha do melhor critério de correlação para análise DIC.....	<b>201</b>
	<b>APÊNDICE B - PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE SOLO TRANSPARENTE</b> .....	<b>205</b>
	<b>PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE SOLO TRANSPARENTES</b> .....	<b>206</b>
	<i>Técnica Convencional</i> .....	<b>206</b>
	<i>Técnica de preparação de amostras com controle de densidade</i> .....	<b>208</b>
	<i>Técnica da Camada Opaca (“embedded Plane”)</i> .....	<b>209</b>
	<b>APÊNDICE C - OTIMIZAÇÃO DO PLANO OPACO PARA ANÁLISE DE IMAGEM</b> .	<b>215</b>
	<b>APÊNDICE D - ALGORITMOS IMPLEMENTADOS EM LINGUAGEM MATLAB</b> .....	<b>219</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Pó de sílica amorfa (sílica micronizada).....	7
Figura 2.2 - A sílica gel (Na direita: sílica gel esférica (SG-1) e.....	8
Figura 2.3 - No fundo: óleos minerais utilizados na pesquisa; Na frente: tentativas de produção de solo transparente (algumas amostras se tornaram amareladas com o tempo). (cortesia: Samer Sadek).....	10
Figura 2.4 - Óleos minerais Drakeol® 35 e Norpar 12®.....	11
Figura 2.5 – Transparência exibida em um container com 3 cm de espessura com modelo feito com uma camada de pó de sílica e outra camada de sílica gel (Sadek e Iskander, 2002).....	12
Figura 2.6 – Comparação entre o quartzo fundido grosso (direita), quartzo fundido fino (esquerda) e uma areia padronizada de ottawa (acima). ....	16
Figura 2.7 – Material óptico de elevada pureza produzido com quartzo fundido .....	17
Figura 2.8- (a) – O quartzo fundido, b) Capa do livro “ Modelling with transparent soils” do prof. Magued Iskander visto através de uma espessura de 5 cm de solo transparente feito com quartzo fundido e mistura de óleos minerais.....	20
Figura 2.9 - Baldes de óleos <i>Puretol 7</i> e <i>Krystol 40</i> .....	21
Figura 2.10 - Transparência obtida com o solo transparente com <i>low color sucrose</i> vista ao fundo com um alvo oftalmológico. (Fonte: Guzman et al. 2014). ....	23
Figura 2.11 – Visualização de partículas discretas utilizando fluorescência <i>laser</i> . ....	27
Figura 2.12 – Visualização de velocidade de fluxo em meio granular. ....	27
Figura 2.13 - Diferentes estágios de obtenção de solo transparente com Nafion.....	28
Figura 2.14 - Representação da técnica da interferometria <i>speckle</i> . ....	29
Figura 2.15 – Padrão <i>speckle</i> típico de solo transparente de sílica gel (Sadek e Iskander, 2010).....	30
Figura 2.16 – Aparato experimental para o uso da interferometria <i>speckle</i> com solos transparentes (Iskander, 2010). ....	31
Figura 2.17 – Corte “ótico” da amostra para captura de imagens (Sadek, 2010).....	31
Figura 2.18 – Contornos horizontais ( $\delta x$ ) e verticais ( $\delta y$ ) obtidos para estaca hélice simples (Stanier e Hird, 2008).....	32

Figura 2.19 – Contornos horizontais ( $\delta x$ ) e verticais ( $\delta y$ ) obtidos para estaca hélice tripla (Stanier e Hird, 2008).....	33
Figura 2.20 – Amostra de solo transparente feita com o uso da técnica da camada opaca. ....	35
Figura 2.21 – Diminuição da transparência devido o aumento de temperatura (Black e Tatari, 2015).....	36
Figura 2.22- Uso da técnica de <i>Particle Image Velocimetry</i> (PIV) para estudo de fluido. ....	37
Figura 2.23 – Fluxograma de um algoritmo avançado DIC (Fonte: PIVTEC). ....	40
Figura 2.24 – Componentes de uma análise DIC avançada.....	41
Figura 2.25 –Etapas da correlação digital de imagens (DIC).....	42
Figura 2.26 - Escala de cinza típica de 8 bits. ....	43
Figura 2.27 - Triângulo constante de deformação resultante de três pontos adjacentes no centro da janela de interrogação DIC (O diagrama representa 12 janelas de interrogação DIC).....	51
Figura 2.28 – Exemplo de resultados com o uso do algoritmo: a) deslocamento acumulado; b) deformação cisalhante; c) deformação volumétrica. ....	57
Figura 3.1 – Alguns óleos minerais analisados como candidatos a poro fluidos neste trabalho.....	63
Figura 3.2 - Refratômetros portáteis do laboratório de solos transparentes .....	64
Figura 3.3 – Microscópio eletrônico da UENF/LAMAV .....	67
Figura 3.4 - Equipamento de cisalhamento direto do laboratório de solos LECIV/UENF. ....	68
Figura 3.5 - Ensaio de cisalhamento direto na sílica gel (SG-2).....	69
Figura 3.6 - Ensaio de cisalhamento direto no quartzo fundido. ....	70
Figura 3.7 – Mudança no índice de vazios com o peso específico da sílica gel .....	71
Figura 3.8 - Equipamento triaxial do laboratório de solos da NYU.....	73
Figura 3.9 – a) Interface tóxica utilizada para saturar o corpo de prova com.....	74
Figura 3.10 - Analisador de partículas <i>QicPic</i> da Universidade de Nova York – NYU. .	75
Figura 3.11 – Membrana do ensaio triaxial embebida com o poro fluido em estudo. ...	76
Figura 3.12 – Etapas para reutilização do solo transparente.....	78
Figura 3.13 - Etapas seguidas para a recuperação do iodeto de sódio. ....	79
Figura 3.14 - Preparo de amostra controladas com o uso do pluviador.....	81
Figura 3.15 - Detalhes do pluviador construído para esta pesquisa. ....	82

Figura 3.16 – Abertura dos furos equidistantes para o ensaio de interferência entre sapatas. ....	83
Figura 3.17 - Aparato experimental para o ensaio de interferência entre sapatas. ....	84
Figura 3.18 – Posicionamento e alinhamento do <i>scanner</i> para os testes. ....	85
Figura 3.19 – Comparação da uniformidade luminosa de duas imagens: Uma capturada pelo <i>scanner</i> (lâmpada fluorescente) e a outra capturada com uma câmera com iluminação halógena. ....	87
Figura 3.20 – a) Geogrelhas de 1.5D e D utilizadas neste estudo e b) instalação da geogrelha no duto com o auxílio de arame galvanizado. ....	88
Figura 3.21 - Aparato experimental para o teste de arrancamento de dutos. ....	89
Figura 3.22 - Aparato desenvolvido para esta tese. ....	90
Figura 3.23 - Sistema ótico desenvolvido para os ensaios de arrancamento de dutos. ....	91
Figura 3.24 - Aparato experimental utilizado para aceleração de projéteis. ....	92
Figura 3.25 - Câmera NAC HX-5 CMOS de alta resolução. ....	93
Figura 3.26 – Acelerador eletro-pneumático utilizado nesta pesquisa. ....	94
Figura 3.27 – Projéteis reto e cônico utilizados neste estudo. ....	95
Figura 3.28 - Aparato experimental para o ensaio quasi-estático de penetração. ....	96
Figura 3.29 – Estacas torpedo utilizadas neste estudo. ....	97
Figura 3.30 - Aparato experimental testado para o arrancamento das estacas torpedos. ....	98
Figura 3.31 – Sistema motorizado para o arrancamento das estacas torpedos. ....	99
Figura 3.32 – Etapas de construção do sistema de aplicação de pressão confinante. ....	100
Figura 3.33 – Configuração ótica do <i>laser</i> He-Ne vermelho. ....	101
Figura 3.34 – Configuração ótica do <i>laser</i> He-Ne verde. ....	102
Figura 3.35 – Aparato experimental da primeira tentativa deste ensaio. ....	103
Figura 3.36 – Ausência de um padrão speckle discernível no solo transparente feito de quartzo fundido e os óleos minerais <i>Puretol 7</i> e <i>Krystol 40</i> . ....	104
Figura 3.37 – Quartzo fundido tingido com uma tinta não metálica utilizado para ser incorporado no plano opaco da amostra de solo transparente. ....	105
Figura 3.38 – Preparação da amostra com o uso de técnica de pluviação por seções. ....	106
Figura 4.1 – Foto da centrífuga geotécnica da UENF vista através de um container de acrílico de 5 cm de espessura contido em seu interior solo transparente feito de quartzo	

fundido com o poro fluido constituído da mistura de dois óleos: <i>Garden Light e Puretol 7</i> . .....	110
Figura 4.2 – Foto de um grid com 3 cm de espessura com sílica gel e os óleos Garden Light e Glicerina. ....	110
Figura 4.3- Mudança de coloração devido a processo oxidativo. ....	111
Figura 4.4- Solução de iodeto de sódio exposta ao ambiente por 48 horas(esquerda), e amostra similar tratada com tiosulfato de sódio (direita).....	112
Figura 4.5 - 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.....	113
Figura 4.6- Granulometria dos materiais utilizados nesta pesquisa e de algumas areias naturais. ....	114
Figura 4.7 - Razão de forma da areia de Ottawa utilizada em duas aplicações nesta tese. .....	116
Figura 4.8- Distribuição granulométrica e razão de forma do quartzo fundido utilizado neste estudo. ....	117
Figura 4.9 - Sílica gel (com aumento ótico de microscópico eletrônico). a) Sílica gel (SG-1) e b) Sílica gel angular (SG-2) – (cortesia: LAMAV-UENF). ....	118
Figura 4.10 – Quartzo fundido (com aumento ótico de microscópico eletrônico). a) quartzo fundido (fração grosseira), b) quartzo fundido FQ-X , c e d) quartzo fundido QF-1 (cortesia: Laboratório de ótica – NYU Poly- USA). ....	119
Figura 4.11 – Curvas tensão-deformação e deformação volumétrica para o quartzo fundido seco, densidade relativa de 85% (denso). ....	122
Figura 4.12 – Curvas tensão-deformação e deformação volumétrica para o quartzo fundido seco, densidade relativa de 35% (fofo).....	123
Figura 4.13 – Curvas tensão-deformação e deformação volumétrica para o quartzo fundido saturado com o óleo de tocha Garden Light + Puretol 7, $D_r=35\%$ . ....	124
Figura 4.14 – Envoltória típica de <i>Mohr-Coulomb</i> para a quartzo fundido saturado com óleo Garden Light e Puretol 7. ....	125
Figura 4.15 – Curvas tensão-deformação e deformação volumétrica para o quartzo fundido saturado com iodeto de sódio, $D_r=85\%$ .....	126
Figura 4.16 - Envoltória típica de <i>Mohr-Coulomb</i> para a quartzo fundido saturado com iodeto de sódio.....	127

Figura 4.17 – Resposta tensão vs. deformação e resposta da deformação volumétrica do quartzo fundido saturado com vários poro fluidos incluindo água, sucrose, mistura de óleos minerais e iodeto de sódio sob compressão triaxial (deformação volumétrica de contração é positiva, e dilatação é negativa).....	128
Figura 4.18 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto para sílica gel (SG-1) seca, saturado com água e saturado com óleo. ....	132
Figura 4.19 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto para sílica gel (SG <sub>2</sub> ) seca, saturado com água e saturado com óleo. ....	133
Figura 4.20 – Envoltórias de resistência de pico ao cisalhamento para a .....	134
Figura 4.21 – Envoltórias de resistência de pico ao cisalhamento para a .....	134
Figura 4.22 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto no quartzo fundido (QF-1) seco, saturada com óleo mineral e saturada com água.....	137
Figura 4.23 – Envoltórias de resistência de pico ao cisalhamento para a .....	138
Figura 4.24 - Variação do índice de refração dos óleos com a temperatura.....	140
Figura 4.25 – Variação do índice de refração com a temperatura de poro fluidos transparentes.....	141
Figura 4.26 – Quantidade de solução de iodeto de sódio recuperada das cinco rodadas na avaliação de reutilização do poro fluido.....	143
Figura 4.27 – Antigo logotipo da escola politécnica da universidade de NY visto a 5cm através de solo transparente produzido com poro fluido de iodeto de sódio reaproveitado. ....	143
Figura 4.28 – Curvas carga vs. deslocamento para diferentes espaçamentos entre as sapatas em areia densa (Dr=85%) e fofa (Dr=35%).....	145
Figura 4.29 – Perfil de deslocamento cumulativo para S=B (areia densa – D1SS). ...	146
Figura 4.30 – Perfil de deslocamento cumulativo para S=3B (areia densa – D3SS) ..	147
Figura 4.31 – Perfil de deslocamento cumulativo para S=4B (areia densa – D4SS) ..	147
Figura 4.32 – Perfil de deformação cisalhante cumulativo para S=B (areia densa) ....	148
Figura 4.33 – Perfil de deslocamento cumulativo para S=0.5 B (areia densa).....	149
Figura 4.34 – Deformação volumétrica cumulativa para S=B (areia densa) .....	149
Figura 4.35 – Deformação volumétrica cumulativa para S=3B (areia densa) .....	150
Figura 4.36 – Deformação volumétrica cumulativa para S=4B (areia densa) .....	150
Figura 4.37 - Mecanismos de arrancamento de dutos enterrados na areia.: (a) Geometria do problema; (b) Bloco deslizante com superfícies deslizantes verticais; (c) Bloco de	

deslizamento com superfícies de deslizamento inclinadas; (e) fluxo em torno do duto. Adaptado de Cheuk et al. 2008. ....	151
Figura 4.38 – Resultados dos ensaios de arrancamento de dutos para areia fofa. ....	152
Figura 4.39 – Resultados dos ensaios de arrancamento do duto para areia densa. ..	153
Figura 4.40 - Sequência de imagens do arrancamento do duto em areia densa. ( $\delta$ = deslocamento vertical do duto e D, o diâmetro do duto).....	154
Figura 4.41 - Magnitude do deslocamento do arrancamento do duto em areia densa sem geogrelha em diferentes estágios de deformação. a) Pico; b) Preenchimento localizado; c) Formação de banda de cisalhamento no estágio pós-pico;d) Fluxo ao redor do duto. ....	155
Figura 4.42 - Magnitude do deslocamento do arrancamento do duto em areia densa com geogrelha 1,5D: a) Pico; b) Formação de banda de cisalhamento no estágio pós-pico. ....	156
Figura 4.43 – Comparação da magnitude do deslocamento do arrancamento do duto em areia densa sem geogrelha e com geogrelha 1,5D: a) Pico; b) Formação de banda de cisalhamento no estágio pós-pico. ....	157
Figura 4.44 – Vetores de deslocamento obtidos com o arrancamento do duto em areia densa, $D_r=85\%$ , no estágio de pico (a) e pós-pico (50% do pico) (b) e em areia fofa, $D_r=35\%$ , no estágio de pico (c) e pós-pico (50% do pico) (d).....	158
Figura 4.45-Imagens da penetração do projétil de ponta reta (a, b, c) e ponta cônica (d, e, f) na seção do solo transparente com camada opaca, nos tempos de penetração (a, d) $t=1,00$ ms, (b, e) $t=5,50$ ms, (c, f) $t=8,50$ ms seguido do impacto ( $t=0$ ).....	159
Figura 4.46 – Imagens da amostra de solo transparente após o ensaio de penetração com projétil de ponta cônica. ....	160
Figura 4.47 – Imagens instantâneas nas profundidades de penetração 1D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D do projétil de ponta reta no ensaio dinâmico de penetração.....	161
Figura 4.48 – Imagens instantâneas nas profundidades de penetração 1D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D do projétil de ponta cônica no ensaio dinâmico de penetração. ....	162
Figura 4.49 – Imagens nas profundidades de penetração 1D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D de uma haste reta no ensaio quasi-estático de penetração. ....	163
Figura 4.50 – Vetores de velocidade a 4D e 6D para projétil de ponta reta (imagens superiores) e para projétil de ponta cônica (imagens inferiores). ....	165
Figura 4.51 – Distribuição da magnitude da velocidade em incrementos de penetração a aproximadamente 1D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D do projétil de ponta reta, correspondendo a	

incrementos de tempo de 0,48 ms, 1,44 ms, 2,88 ms, 4,32 ms, 5,76 ms e 7,36 ms respectivamente.....	166
Figura 4.52 – Distribuição da magnitude da velocidade em incrementos de penetração a aproximadamente 1D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D do projétil de ponta cônica, correspondendo a incrementos de tempo de 0,48 ms, 1,44 ms, 2,88 ms, 4,32 ms, 5,76 ms e 7,36 ms respectivamente.....	167
Figura 4.53 - Contornos do campo de deslocamento horizontal incremental a profundidades correspondentes de penetração de 1D, 2D, 4D, and 6D para a penetração de projéteis de ponta reto e cônica. ....	168
Figura 4.54 - Contornos do campo de deslocamento incremental vertical a profundidades correspondentes de penetração de 1D, 2D, 4D, and 6D para a penetração de projeteis de ponta reta e cônica.....	169
Figura 4.55- Incrementos de deformações de cisalhamento a profundidades de penetração de 1D, 2D, 4D, e 6D para projétil de ponta reta, correspondendo a tempos de penetração de 0,48, 1,44, 3,68, e 5,12 ms. O cisalhamento máximo mostrado na barra são valores de corte – o valor máximo é 0,54. ....	170
Figura 4.56- Incrementos de deformações de cisalhamento a profundidades de penetração de 1D, 2D, 4D, e 6D para projétil de ponta cônica, correspondendo a tempos de penetração de 0,48, 1,44, 3,68, e 5,12 ms. O cisalhamento máximo mostrado na barra são valores de corte – o valor máximo é 0,54. ....	171
Figura 4.57- Comparação de incrementos de deformação cisalhante para a penetração quasi-estática e dinâmica para o projétil de ponta reta, mostrado a profundidades de penetração de 2D, 4D, 6D, e 8D. ....	173
Figura 4.58- Incrementos de deformações volumétricas a profundidades de penetração de 1D, 2D, 4D, e 6D para o projétil de ponta reta, correspondendo a tempos de penetração de 0,48, 1,44, 3,68, e 5,12 ms. Valores positivos e negativos representam compressão e dilatação, respectivamente; Os valores máximos de compressão e dilatação mostrados na barra são valores de corte. ....	174
Figura 4.59- Incrementos de deformações volumétricas a profundidades de penetração de 1D, 2D, 4D, e 6D para o projétil de ponta cônica, correspondendo a tempos de penetração de 0,48, 1,44, 3,68, e 5,12 ms. Valores positivos e negativos representam compressão e dilatação, respectivamente; Os valores máximos de compressão e dilatação mostrados na barra são valores de corte. ....	175

Figura 4.60- Imagens capturadas pela câmera no evento de arrancamento da estaca torpedo 2.....	176
Figura 4.61- Gráfico força de arrancamento vs. deslocamento para os ensaios com os torpedos 1 e 2. ....	177
Figura 4.62 - Perfil de deslocamento no primeiro estágio de deslocamento.....	178
Figura 7.1 – Procedimento para calibração de testes de medição ótica. ....	192
Figura 7.2 – O conceito de calibração da câmera. ....	192
Figura 7.3 – Lógica do algoritmo de calibração da câmera. ....	193
Figura 7.4 – Exemplo de grid de calibração (Cortesia: Polytechnic Institute of NYU – EUA). ....	194
Figura 7.5 – <i>Grid</i> de calibração construído para esta tese. ....	195
Figura 7.6 – Vinte imagens extraídas para a calibração. ....	195
Figura 7.7 – Extraíndo as extremidades (cantos) da figura 1.....	196
Figura 7.8 – Reprojeção do erros na imagem 15 desta calibração.....	196
Figura 7.9 - Posições relativas dos <i>grids</i> em relação a câmera.....	198
Figura 7.10 – Análise de erro obtida após a calibração.....	198
Figura 7.11 - Imagem "FIDUCIAL" do teste interferência entre fundações rasas.....	199
Figura 7.12 - Obtenção do fator de conversão no programa Microsoft Paint <sup>TM</sup> . ....	199
Figura 7.13 - Obtenção do fator de conversão no programa Microsoft Paint <sup>TM</sup> . ....	200
Figura 7.14 - Imagens recortadas utilizadas para a calibração do DIC. (a) Imagem original sem deslocamento ( $dx=dy=0$ ); (b) $dx=dy=8$ pixels. ....	201
Figura 7.15 – Vetores de deslocamento obtidos com a análise com o deslocamento de 8 pixels na direção vertical e horizontal (imagem ampliada).....	202
Figura 7.16 – Resultados da análise da escolha do melhor algoritmo DIC para as análises. Note que o pico ZNSSD é mais estreito e portanto mais preciso para realizar as análises de correlações.....	204
Figura 8.1 – Etapas de preparação de amostra convencional de solo transparente com quartzo fundido e mistura de óleos minerais. ....	207
Figura 8.2 - Vacuômetro construído para preparação de amostras de argila transparente. ....	208
Figura 8.3 – Pluviador para preparação de amostras de solo transparente.....	209
Figura 8.4 - Etapas da preparação de amostra de solo transparente utilizando a técnica da camada opaca. ....	210

Figura 8.5 – Imagens sequenciais das etapas de preparação da amostra de solo transparente com a técnica da camada opaca.....	212
Figura 8.6 - Imagens sequenciais das etapas de preparação da amostra de solo transparente com a técnica da camada opaca (continuação, parte 2).....	213
Figura 8.7 - Imagens sequenciais das etapas de preparação da amostra de solo transparente com a técnica da camada opaca (continuação parte 3).....	214
Figura 8.8 – Amostra pronta com a técnica da camada opaca.....	215
Figura 9.1 – Concentrações de camada opaca, DPOH 1%, 3%, 4% , 9% , 15%, 28% , 44 % (na parte superior ) e as correspondentes representações binarizadas (parte inferior) (após Omidvar et al. 2015 ).....	216
Figura 9.2 – Quantidade ótima de partículas tingidas de negro na camada opaca como função do tamanho a janela, determinada a partir do coeficiente de correlação e o SNR (razão do sinal pelo ruído) das análises DIC das figuras 9.1.....	218

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades físicas dos solos transparentes atualmente disponíveis. ....	6
Tabela 2.2 - Alguns índices físicos das sílicas ensaiadas (gel e pó). ....	10
Tabela 2.3 - Algumas propriedades geotécnicas das sílicas em gel e em pó. (Adaptado de Iskander et al. 2002). ....	11
Tabela 2.4 - Propriedades selecionadas do quartzo fundido. ....	17
Tabela 2.5 - Propriedades do óleo <i>Puretoll 7</i> e <i>Krystol 40</i> . ....	18
Tabela 2.6 - Propriedades dos líquidos a base de sacarose testados na pesquisa. ....	22
Tabela 2.7 - Propriedades selecionadas dos poro fluidos utilizados para produção de solos transparentes. ....	24
Tabela 2.8 – Fornecedores dos materiais utilizados para produção de solos transparentes. ....	25
Tabela 2.9 - Softwares PIV/DIC comerciais e livres disponíveis atualmente. ....	48
Tabela 3.1– Materias granulares testados nesta pesquisa. ....	60
Tabela 3.2- Propriedades físicas do iodeto de sódio e tiosulfato de sódio. ....	66
Tabela 3.3- Propriedades físicas dos modelos de estacas torpedo utilizados no estudo. ....	97
Tabela 4.1 – Índices de refração dos óleos minerais utilizados nesta pesquisa. ....	108
Tabela 4.2– Propriedades das misturas de óleos minerais. ....	109
Tabela 4.3– Tamanho médio dos grãos ( $D_{50}$ ), Coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) e indice de vazios minimo e máximo da sílica fundida e de algumas areias publicadas na literatura. ....	115
Tabela 4.4 - Resumo dos ensaios triaxiais CD realizados no quartzo fundido. ....	121
Tabela 4.5 – Ângulos de atrito obtidos pelos ensaios triaxiais CD para o quartzo fundido. ....	129
Tabela 4.6– Resumo dos ensaios de cisalhamento direto (sílica gel SG-1) ....	131
Tabela 4.7– Resumo dos ensaios de cisalhamento direto (sílica gel SG-2) ....	131
Tabela 4.8 – Resumo dos ensaios de cisalhamento direto realizados no quartzo fundido. ....	136
Tabela 4.9 - Permeabilidade de diferentes poro fluidos seguindo a ASTM D5084-10. ....	139
Tabela 4.10 – Resumo dos testes realizados com duas sapatas. ....	144

Tabela 7.1- Exemplo típico de parâmetros <i>extrínsecos</i> e <i>intrínsecos</i> obtidos com a calibração da câmera.....	197
Tabela 7.2 – Resumo dos resultados para busca do melhor critério de correlação....	203
Tabela 9.1 – Parâmetros de calibração das amostras.....	217

## LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

ASTM	<i>American Standard Testing Material</i>
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i>
PIV	<i>particle Image Velocimetry</i>
DIC	<i>digital image Correlation</i>
CAT	<i>computer aid Tomography</i>
pixel, px	<i>picture element</i>
FFT	<i>fast Fourier transform</i>
FOV	<i>field of view</i>
LSV	<i>laser speckle velocimetry</i>
CCD	<i>charged Coupled device</i>
CMOS	<i>complementary metal-oxide-semiconductor</i>
DSPIV	<i>digital stereo particle image velocimetry</i>
DPIV	<i>digital particle image velocimetry</i>
FT	<i>Fourier transform</i>
He-Ne	<i>Hélio - Neon</i>
IPCT	<i>image pattern correlation technique</i>
FISPQ	<i>Ficha de informação de segurança de produtos químicos</i>
IR	<i>Índice de refração</i>
ZNSSD	<i>Zero-mean normalized sum of squared difference</i>
ECF	<i>Error Correlation Function</i>
SPPOC	<i>Symmetric Phase-only cross correlation</i>
ZNND	<i>Zero-mean normalized cross correlation</i>
GUI	<i>Graphic user interface</i>
DCC	<i>Discrete Cross Correlation</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
DPO	<i>Densidade de Partículas opacas</i>

## RESUMO

Solos transparentes têm evoluído nas últimas duas décadas como uma ferramenta útil e poderosa para a modelagem física de problemas geotécnicos e geoambientais, sobretudo para visualização de mecanismos de interação solo-estrutura, do comportamento hidráulico de solos saturados e insaturados e em processos térmicos. Solos transparentes são constituídos por sólidos que representam o esqueleto do solo e um fluido de saturação, que ao possuírem o mesmo índice de refração (IR) torna a amostra de solo transparente. Aliado ao uso de solos transparentes sintéticos nos ensaios geotécnicos, utiliza-se técnicas de processamento de imagens digitais, sobretudo da técnica DIC (*Digital Image Correlation*) com a aquisição das imagens que serão analisadas para obtenção os resultados desejados acerca do comportamento dos solos ou da evolução de um determinado parâmetro. Neste trabalho a caracterização geotécnica de solos transparentes é apresentada. Dois poros fluidos inéditos para compor solos transparentes são introduzidos: Um poro fluido à base de óleos minerais nacionais e outro poro fluido à base de água e iodeto de sódio tratado com tiosulfeto de sódio. Novas técnicas de preparação e reaproveitamento de solos transparentes também são apresentadas e discutidas neste trabalho. Por fim, quatro aplicações de problemas geotécnicos ilustram a metodologia. Os resultados demonstram que o uso de solos transparentes e técnicas de processamento digital de imagens fornecem informações importantes acerca do comportamento do solo e são ferramentas que complementam e auxiliam estudos complexos de vários problemas geotécnicos da atualidade.

**Palavras chave:** modelagem física, solos transparentes, correlação digital de imagens

## ABSTRACT

Transparent soils have evolved in the past two decades as a powerful and useful tool for physical modeling of geotechnical and geoenvironmental problems, particularly for viewing soil-structure interaction mechanisms, saturated-unsaturated hydraulic behavior, and thermal processes in soils. Transparent soils are two-phase media made by refractive index (RI) matching of solids representing the soil skeleton and the saturating fluids. An essential component of physical modeling with transparent soils involves acquisition and analysis of images. During testing, images are acquired prior to and following loading, or at different stages of the problem in the case of fluid flow or thermal processes as examples, and the images are analyzed to reveal internal information, in the form of kinematics, flow characteristics, or evolution of a predetermined parameter. The most common tool used is digital image correlation (DIC), where image pairs are subdivided into subsets, and correlation coefficients calculated over the subsets are used to locate their displaced position between images. On this thesis, geotechnical characterization of transparent soils are presented. Two new pore fluids to produce transparent soils are introduced: A pore fluid based on Brazilian commercial mineral oils and a water based pore fluid based on sodium iodide treated with sodium thiosulfate. New preparation techniques and reuse capabilities of transparent soils are also presented and discussed in this work. Finally, four applications of geotechnical problems illustrate the methodology. The results shows that the use of transparent soils and Digital Image Correlation technique are suitable to provide important information on soil behaviour and can be useful to help understand some geotechnical problems.

**Keywords:** physical modeling, transparent soil, digital image correlation

# 1 - INTRODUÇÃO

Os meios transparentes têm sido amplamente utilizados para estudar os problemas geotécnicos como um substituto para o solo. Eles fornecem uma ferramenta valiosa para visualizar os fenômenos físicos que ocorrem no solo real, tais como o fluxo de fluidos, transporte, contaminação, propriedades térmicas e interação solo-estrutura, que não podem ser vistos naturalmente, devido a natureza opaca dos solos de um modo geral.

A medição dos campos de deformação interna é fundamental para a compreensão da resposta do solo sob várias condições. Muitas tentativas foram feitas no passado para desenvolver métodos para possibilitar tais observações. Na segunda metade do século XX, pesquisadores empregaram partículas de chumbo incorporadas no solos e usaram equipamentos de raios-X para medir deformações espaciais em modelos de pequena escala. Até o final do século XX, os pesquisadores empregavam o uso de tomografia computadorizada (CAT-scan) e ressonância magnética médica para sondar o interior de solos naturais.

Essas técnicas continuam a ter sua aplicação limitada devido ao alto custo ou a dificuldade técnica em sua utilização, principalmente quando utilizadas em grandes modelos. Para superar essas dificuldades, pesquisadores têm empregado substitutos para os solos naturais – os solos transparentes - para visualizar as condições dentro dos modelos de uma maneira não-intrusiva.

Por definição, os solos transparentes são compostos por duas fases: A primeira fase é composta por sólidos que representam o esqueleto do solo e a segunda fase o fluido de saturação, que ao possuírem o mesmo índice de refração (IR) torna a amostra de solo transparente.

Até agora, cinco famílias de materiais transparentes foram desenvolvidos para a modelagem de areia e argila. A primeira família é feita de pó de sílica amorfa para modelar o propriedades geotécnicas de argilas naturais (Iskander 1997 e 1998, Iskander et al. 2002a e Liu et al. 2003). A segunda família é composta de sílica gel, utilizada para modelagem de areia grossa (Iskander et al. 2002b). Ambas as famílias têm o mesmo índice de refração e portanto podem utilizar os mesmos poro fluidos, permitindo assim a sua utilização no mesmo modelo (Sadek et al. 2002). A terceira

família e quarta família são feitas de *Aquabeads* e Laponita, respectivamente, e são adequadas para representar o fluxo de água em solo e para modelagem da resistência de depósitos marinhos fracos.

A quinta e mais promissora família para modelagem de areia é constituída de quartzo fundido, que pode ser misturado com poro fluidos constituídos de dois óleos minerais, ou uma mistura de água e sucrose com o mesmo índice de refração do quartzo fundido. A grande desvantagem destes poro fluidos atualmente utilizados é a elevada viscosidade, o que pode ser proibitivo em alguns problemas geotécnicos. Nesta tese, um novo poro fluido a base de água é introduzido para modelagem com quartzo fundido. Trata-se de uma mistura de água e um sal – o iodeto de sódio – que quando adicionado à água altera o índice de refração da mistura. A solução pronta possui viscosidade próxima a viscosidade da água pura.

Um componente essencial da modelagem física com solos transparentes envolve a aquisição e análise de imagens digitais. Durante o teste, as imagens são capturadas antes e após o carregamento, ou em diferentes estágios do problema, como por exemplo, fluxo de fluidos ou processos térmicos. Em seguida, as imagens são analisadas para revelar informações internas, sob a forma de cinemática, características do fluxo, ou uma evolução de um parâmetro pré determinado.

O uso de solos transparentes em laboratórios geotécnicos tem ganhado expressiva popularidade nos últimos cinco anos – esta técnica de modelagem física ganhou adeptos por todo o mundo sobretudo nos EUA, Reino Unido, Canadá, Inglaterra, Austrália e China. Estes solos artificiais podem ser utilizados tanto em experimentos a 1g como em experimentos que envolvam maiores tensões como no caso de centrífugas geotécnicas.

Neste trabalho, algoritmos escritos em linguagem Matlab foram desenvolvidos para sistematizar o processo de calibração do sistema ótico e para obtenção de deformações cisalhantes e volumétricas a partir dos vetores de deslocamento resultantes da análise de correlação digital de imagens. Uma nova técnica que utiliza grãos de solos transparentes tingidos com uma tinta negra não metálica incorporada em um plano do solo transparente é apresentada nesta tese além de metodologias de reaproveitamento e reutilização de solos transparentes em múltiplos testes.

Quatro aplicações geotécnicas são utilizadas para ilustrar a metodologia. As primeiras duas aplicações desta tese, utilizam areia natural em conjunto com a técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC); As outras duas técnicas utilizam amostras de

solos transparentes com a técnica da camada opaca e a correlação digital de imagens.

Os objetivos deste trabalho são:

a) Apresentar as propriedades geotécnicas de várias famílias de materiais transparentes que são adequadas para representar o comportamento de solos na modelagem física;

b) Pesquisar poro fluidos a base de óleos minerais fabricados e comercializados em território nacional;

c) Desenvolver um novo poro fluido a base de água para produção de solos transparentes com comportamento próximo ao dos solos naturais;

d) Ilustrar a possibilidade de utilização de solos sintéticos transparentes no estudo de problemas geotécnicos. Quatro aplicações são apresentadas neste trabalho. As duas aplicações, enumeradas a seguir, utilizam uma areia calibrada (areia de Ottawa) e a técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC):

- Visualização da interação e interferência entre fundações rasas;
- Estudo do mecanismo de arrancamento de dutos utilizando reforço com geogrelha de diferentes tamanhos;

As outras duas aplicações, utilizam solos transparentes produzidos com a técnica da camada opaca, apresentada nesta tese, que consiste em semear partículas tingidas para melhor a rastreabilidade das partículas pela técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC). As aplicações, apresentadas nesta tese, que utilizam esta técnica são as seguintes:

- Estudo cinemático do mecanismo de penetração de projéteis com diferentes pontas em solos transparentes;
- Visualização do mecanismo de arrancamento de estacas torpedos utilizando solos transparentes.

Pretende-se, com este trabalho, demonstrar que os materiais transparentes possuem um grande potencial de serem utilizados no estudo de uma vasta gama de problemas geotécnicos em conjunto com técnicas óticas de aquisição de imagens que por sua vez proporcionam um método relativamente acessível e preciso para o estudo de problemas geotécnicos de uma forma não-intrusiva e não destrutiva.

## 2 - REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Histórico do desenvolvimento de Solos Transparentes

Ao longo das duas últimas décadas, alguns estudos foram realizados em busca de materiais transparentes que substituíssem os solos naturais. Allersma (1982) utilizou em seus ensaios, vidro triturado com um líquido de índice de refração conhecido para estudar a distribuição de tensões sob condições de cisalhamento simples em combinação com técnicas de fotoelasticidade. Shukla et al. (1992) adotou grânulos de vidro para estudar os fenômenos de propagação da onda dos materiais granulares. Estes estudos pioneiros, porém, não documentaram o comportamento geotécnico destes “solos artificiais” e de acordo com Mannheimer e Oswald, 1993 e Sadek et al. 2002 meios porosos utilizando grãos de vidro são translúcidos e não transparentes e não representam as propriedades geotécnicas naturais do solo granular.

Um solo transparente ocorre quando um fluido é misturado com um material granular e ambos possuem o mesmo índice de refração. O índice de refração de um material transparente é a razão entre a velocidade à qual uma onda de luz viaja através do material em comparação com a velocidade da luz que viaja através do vácuo. Por definição, Índice de refração é a relação entre a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e a velocidade da luz em um determinado meio. A relação pode ser descrita pela fórmula (Tipler, 1999):

$$\eta = \frac{c}{v} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $c = 3 \times 10^8$  m/s) e  $v$  é a velocidade da luz no meio; Quando a luz viaja a partir de um meio para outro com índices de refração diferentes, uma parte da luz será refletida e a outra parte entrará no segundo meio. Quanto mais próximos os índices de refração entre os dois meios menos reflexão irá ocorrer. Quando os índices de refração de ambos os meios são similares, a reflexão será eliminada e os dois meios aparecerão homogêneos à luz a medida que esta viaja através de ambos os meios, sem interrupção, ou seja, o solo transparente é criado quando um solo é saturado com um fluido de índice de refração correspondente.

Desde que possuam o mesmo índice de refração, a combinação solo/líquido parecerá homogênea à luz e por fim será transparente. Em graus de saturação menores que 100%, a transparência do meio é bastante reduzida e micro bolhas de ar tornam-se visíveis no interior do solo quando o ar entra no espaço, prejudicando assim a homogeneidade da combinação meio granular/poro fluido. (Take et al. 2011).

### **2.1.1 Famílias de Solos transparentes atualmente disponíveis**

Iskander et al. (2002,2004a, 2010) identificou quatro famílias diferentes de solos transparentes que têm sido usados para modelagem de solos naturais. Estas famílias são baseadas na correspondência do IR (índice de refração) das partículas do solo e o poro fluido para minimizar a refração da luz e por fim tornarem-se transparentes. A quarta família, embora tenha sido identificada por Iskander et al. 2010, foi comprovada por Ezzein e Bathurst (2011). Em 2015, uma quinta família foi identificada por Wallace e Rutherford. As propriedades físicas dos solos transparentes atualmente disponíveis encontram-se resumidas na tabela 2.1.

Estes materiais têm sido utilizados para estudar uma ampla gama de problemas geotécnicos. A seguir apresenta-se as características destas cinco famílias de solos transparentes atualmente disponíveis.

#### **2.1.1.1 Pó de sílica amorfa para modelagem de argilas**

A primeira família de solos transparentes foi criada com financiamento do Instituto de Pesquisas do Sudoeste dos EUA (NSF) no outono de 1991. Esta pesquisa, liderada por Mannheimer, foi pioneira no emprego da sílica amorfa hidratada misturada em uma suspensão com um poro fluido com mesmo índice de refração da sílica. O pó de sílica amorfa é um pó branco extremamente fino que possui várias aplicações na indústria, com destaque para: Fosqueamento de tintas e vernizes, lacas e revestimentos, adsorvedor de umidade para tintas em pó contendo pigmentos metálicos, como alumínio e zinco, agente antibloqueio para filmes plásticos, antiulectantes e *carriers* em aplicações na indústria alimentícia e farmacêutica e estabilização de cervejas. É constituída por partículas ultrafinas com diâmetros individuais das partículas na ordem de 0,02µm, como mostrado na Fig. 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades físicas dos solos transparentes atualmente disponíveis.

Propriedades	Famílias atualmente disponíveis				
	Primeira	Segunda	Terceira	Quarta	Quinta
	<b>Pó de sílica amorfa</b>	<b>Silica gel</b>	<b>Hidrogel (Aquabeads)</b>	<b>Quartzo fundido</b>	<b>Laponita</b>
Índice de refração	1,442	1,442	1,333	1,458	1,333
Aplicação	Modelagem de argila	Modelagem de areia	Fluxo de água em solo/ modelagem da resistência de depósitos marinhos fracos	Modelagem de areia saturada e não saturada	Modelagem de depósitos marinhos fracos
Peso específico saturado, kN/m <sup>3</sup>	9,4-16	11-14	10	13,4-16,4	10
Poro Fluido	Mistura de óleos minerais	Mistura de óleos minerais, sucrose, ISTS*	água	Mistura de óleos minerais	água
Viscosidade do poro fluido a 23 °C	0,0050 Pa.s	0,0050 Pa.s	0,0009 Pa.s	0,0085 Pa.s – 0,2012 Pas	0,0009 Pa.s
Coeficiente de permeabilidade (cm/s)	2,3x10 <sup>-7</sup> - 2,5x10 <sup>-5</sup>	1,5x10 <sup>-4</sup> -7x10 <sup>-3</sup>	7x10 <sup>-2</sup> - 2 x10 <sup>-5</sup>	1,3x10 <sup>-5</sup> - 2,1x10 <sup>-5</sup>	5,0x10 <sup>-9</sup> - 1,6x10 <sup>-6</sup>
Ângulo de atrito drenado	19 <sup>o</sup> -36 <sup>o</sup>	29 <sup>o</sup> - 42 <sup>o</sup>	-	44 <sup>o</sup> -59 <sup>o</sup>	-
Coesão drenada	20 - 44 kPa	0	-	0	-
Coesão não drenada	35-250 kPa	0	5-12kPa	0	0

Nota: \*ISTS – Iodeto de sódio tratado com tiosulfeto de sódio – Este novo poro fluido a base de água será apresentado nesta tese.

Esta pesquisa destacou duas vantagens distintas deste material, como um solo transparente substituto sobre os materiais até então utilizados. Em primeiro lugar o diâmetro das partículas de sílica era menor do que o comprimento de onda da luz visível e portanto não ocasionava dispersão de luz e distorção visual. Em segundo lugar, as partículas de sílica são porosas e higroscópicas e facilmente absorviam o poro fluido, dissipando assim o ar a partir da amostra sob vácuo. A redução do teor de ar na amostra aumenta significativamente a transparência, e melhora a adequação

destes materiais para uso como um substituto do solo na modelagem visual de problemas geotécnicos.

Concluiu-se que o material era adequado para representar as propriedades macroscópicas geotécnicas da argila com baixa plasticidade (Iskander et al. 2002, Liu et al., 2003). Este material foi bem recebido no meio acadêmico, particularmente pelos pesquisadores ingleses e australianos, e têm sido utilizado em uma ampla gama de problemas de fundações, como por exemplo: a) penetração de estacas em argila e b) deformações próxima a penetrômetros (Salgado et al. 2012).



Figura 2.1 - Pó de sílica amorfa (sílica micronizada).

A sílica amorfa é adequada para modelar a resistência, permeabilidade, e o comportamento adensado de argilas de baixa plasticidade (Iskander et al 2002; Liu et al. 2003). A resistência ao cisalhamento drenado, permeabilidade e as propriedades físicas do pó de sílica amorfa normalmente adensados assemelham-se com muitas argilas naturais, embora a sua resistência ao cisalhamento seja maior do que ocorre naturalmente em argilas normalmente adensadas. O comportamento sobreadensado também imita o de argilas naturais, tanto em condições drenadas e não drenadas.

### 2.1.1.2 Sílica Gel para modelagem de areias

A segunda família de solos transparentes também foi desenvolvido com financiamento do NSF. Esta família é composta de grãos de sílica gel para modelagem de areias. A sílica gel é uma forma coloidal de sílica. É inerte e poroso, e é encontrado em tamanhos que variam de 0,5 mm a 5 mm (Fig. 2.2). A sílica gel é feita parcialmente pela desidratação do ácido metassílico e é comumente usada como adsorvente de umidade, um catalisador, ou um purificador de substâncias impuras. O gel e o pó de sílica são capazes de absorver os poros fluidos e, assim, conduzir o ar para fora dos poros internos (Mannheimer e Oswald, 1993).

A sílica gel foi utilizada pela primeira vez em 1914 quando, durante a primeira guerra mundial, uma arma desenvolvida estava dizimando centenas de soldados. Tratava-se do mortal gás mostarda. Diversos cientistas dos Estados Unidos foram convocados para pesquisar e encontrar um produto que, quando colocado nas máscaras usadas pelos combatentes, adsorvesse o impiedoso gás impedindo a intoxicação dos soldados. O material foi exatamente a sílica gel.



Figura 2.2 - A sílica gel (Na direita: sílica gel esférica (SG-1) e na esquerda sílica gel (SG-2) angular.

Um grande avanço nesta temática, de solos transparentes, para uso em ensaios geotécnicos, ocorreu já no início dos anos 2000, quando Iskander et al. (1994, 2002a,

2002b,2010) investigaram o comportamento e as propriedades de meios transparentes para modelagem de argila e areia utilizando sílica gel e sílica em pó. Iskander et al. (1994, 2002a), após várias tentativas (Fig. 2.3), descobriu 2 poro fluidos que poderiam ser utilizados na fabricação do meio transparente por possuírem o mesmo índice de refração do material granular. O primeiro poro fluido é uma mistura de 50:50 em peso de um óleo mineral incolor, com o nome comercial de *Drakeol 35*<sup>®</sup> e um solvente a base de parafina com o nome comercial de *Norpar 12*<sup>®</sup> (Fig. 2.4); O segundo poro fluido é uma mistura de brometo de cálcio e água. O índice de refração e a viscosidade da mistura é de 1,448 e 3,6 cP, respectivamente, a 25° C. Ambos os poro fluidos possuem índice de refração de 1,447 a 24°C e viscosidade de 5.0 cP a 24°C. A densidade do poro fluido pronto é de 0,804 g/cm<sup>3</sup>.

Iskander et al. pesquisou as propriedades dos solos transparentes sintéticos desenvolvidos por Mannheimer. Foram conduzidos testes de transparência e estudados as propriedades das amostras feitas a partir de vários tipos de sílica amorfa hidratada (*Flo-Gard SP* e *Hi-Sil T-600* - fornecido por *PPG Industries, Inc.*) misturados com um líquido de mesmo índice de refração para criar uma amostra transparente em ambiente de laboratório (temperatura em torno de 23 °C). O poro fluido escolhido foi uma mistura de óleos (óleo mineral transparente e um solvente parafínico com índice de refração de 1,447 a 25 °C) ou solução salina (misturado a partir de brometo de cálcio e água, para ter um índice de refração de 1,448 a 25 °C). As amostras foram deairadas antes do adensamento em um consolidômetro unidimensional. A transparência de cada amostra foi avaliada subjetivamente, através de inspeção visual da nitidez de uma figura alvo colocada atrás de cada amostra. O pó de sílica amorfa foi avaliada em ensaios padrões geotécnicos e percebeu-se que ela apresentava propriedades semelhantes as das argilas normalmente adensadas.



Figura 2.3 - No fundo: óleos minerais utilizados na pesquisa; Na frente: tentativas de produção de solo transparente (algumas amostras se tornaram amareladas com o tempo). (cortesia: Samer Sadek).

Iskander et al.(2002a) analisou o uso da sílica amorfa utilizada para fabricação do solo sintético transparente, à luz da evolução das técnicas de análise visual proposta por Welker et al.(1999) e Gill e Lehane (2001). Como primeira etapa da investigação, Iskander et al. conduziu ensaios de caracterização dos índices físicos dos diferentes tipos de sílica utilizadas como solo transparente para modelagem de areia e argila. As tabelas 2.2 e 2.3 demonstram algumas características físicas e geotécnicas destes materiais e seus respectivos fabricantes.

Tabela 2.2 - Alguns índices físicos das sílicas ensaiadas (gel e pó).

(Adaptado de Iskander et al. 2002)

Material	Tamanho médio dos agregados (mm)	Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)	Absorção de Óleo (ml/100g)	Densidade	Aparência Visual
Hil-Sil T600 †	0,0014	150	150	56	Pó
Flo-Gard FF †	0,010	180	210	128	Pó
Flo-Gard SF †	0,025	220	260	144	Pó
Hi-Sil SC-72 †	0,175	150	200-300	230	Pó
Sílica Gel Grossa \	2-5	720-760	...	752	Grãos macroscópicos
Sílica Gel Fina \	0,5-1,5	735	...	720	Grãos macroscópicos

†Fabricante: Indústrias Químicas PPG, EUA (2000)

\Fabricante: Multisorb Tecnologia Inc., EUA (2000)



Figura 2.4 - Óleos minerais Drakeol® 35 e Norpar 12®

Tabela 2.3 - Algumas propriedades geotécnicas das sílicas em gel e em pó. (Adaptado de Iskander et al. 2002).

Material	Ângulo de atrito	Permeabilidade
	(drenado)	
	°	cm/seg
Hil-Sil T600†	36	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-5}$
Flo-Gard® SP†	36	$2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Sílica gel Grossa\	30-36	$7 \times 10^{-3}$
Sílica Gel Fina\	31-34	$1.5 \times 10^{-4}$

† Fabricante: Indústrias Químicas PPG, EUA (2000)

\*Fabricante: Multisorb Tecnologia Inc., EUA (2000)

Outra característica importante do pó de sílica amorfa para modelagem física de problemas geotécnicos é possuir o mesmo índice de refração da sílica gel, e, assim, os dois materiais podem ser usados em um mesmo modelo transparente com o mesmo poro fluido para simular problemas em camadas de areia e argila, como mostrado na Fig. 2.5 (Sadek et al. 2002).

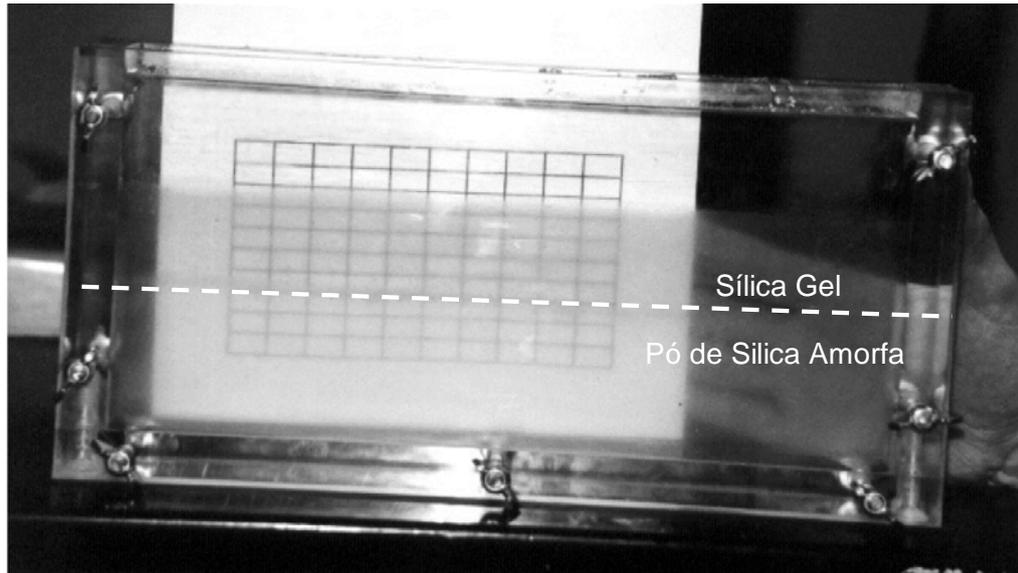


Figura 2.5 – Transparência exibida em um container com 3 cm de espessura com modelo feito com uma camada de pó de sílica e outra camada de sílica gel (Sadek e Iskander, 2002).

O primeiro tipo de sílica gel testada foi do tipo angular com um tamanho entre 0,5 - 1,5 mm; O segundo tipo de sílica gel testada tinha um formato esférico com tamanho dos grãos variando entre 2-5 mm. Os resultados desta investigação estão sumarizados abaixo:

- 1) A sílica gel demonstrou um comportamento tensão-deformação consistente com o da areia. A tensão máxima de cisalhamento foi alcançada a um nível de deformação maior do que comparado com o comportamento da areia;
- 2) O ângulo de atrito da sílica gel se situa na faixa de 29°-42° para a sílica gel angular e 34°-50° para sílica gel esférica;
- 3) Os valores típicos do módulo de elasticidade (o módulo de elasticidade a 50% da deformação de pico) para a sílica gel angular é 15-22 MPa para amostra fofa e 26-32 MPa para amostra densa. Os valores típicos do módulo de elasticidade da sílica gel esférica é 24-52 MPa para a amostra fofa e 36-84 MPa para amostra densa;
- 4) A permeabilidade da sílica gel foi testada utilizando um permeâmetro de parede flexível. O coeficiente de permeabilidade é  $1,5 \times 10^{-4}$  cm/s para a sílica angular e  $7 \times 10^{-3}$  cm/s para a sílica esférica;
- 5) A sílica gel demonstrou uma maior compressibilidade em relação a areia.

Concluiu-se, neste estudo, que a sílica gel tem um comportamento estático similar se comparado com a areia natural. No entanto, o uso da sílica gel para fabricar solos transparentes sintéticos possuem as seguintes limitações em graus diferentes, dependendo do tipo de sílica que esta sendo utilizada:

- a) As partículas se deformam plasticamente mesmo sob baixas pressões de confinamento (Iskander 1998; Iskander et. al 2003; Zhao e Ge 2007; Ezzein and Bathurst, 2011);
- b) A deaeração dos poros internos das partículas de sílica gel é difícil e pouco prático para maiores quantidades (em testes de maior escala). (Iskander et. al 2002b, 2003);
- c) As partículas de sílica gel são higroscópicas e, portanto, são afetadas pela alta umidade e a água, que pode fazer com que as partículas se quebrem e tornem-se amareladas;
- d) Podem haver outros processos químicos que causam alterações na cor e, portanto, reduzam a transparência da amostra com o tempo (Iskander, 2010);
- e) A profundidade visível no solo transparente de sílica gel é limitada a cerca de 50 mm.

A utilização do pó de sílica e sílica gel para fabricar solos de argilas e areias transparentes foram descritas por Iskander et al. (1994, 2002a, 2002b), Gill e Lehane (2001), Sadek et al.(2002), Liu et al.(2003), Zhao e Ge(2007) e Stanier e Hird (2010).

Sadek et al. (2002) concluíram que não existe material sílica gel disponível que pode satisfatoriamente simular as propriedades mecânicas da areia fina.

Dois poros fluidos de alta viscosidade foram identificados por Iskander em 2002, (*Drakeol/Norpar, Água e Brometo de Cálcio*) como já foi mencionado. No entanto, devido a elevada viscosidade destes dois poro fluidos, o ar facilmente aprisionava-se no interior da sílica ocasionando a perda da transparência, fato que dificulta a fabricação de uma quantidade maior de solo transparente. Além disso, os poro fluidos identificados causavam uma grave deterioração da membrana látex durante testes triaxiais de laboratório, além de serem tóxicos aos seres humanos.

Zhao et al. (2010) apresentaram uma investigação experimental de poro fluidos de baixa viscosidade para fabricar solo transparente, incluindo a interação fluido/partícula no látex: Este programa investigou 12 diferentes tipos de solventes

químicos para identificar poro fluidos de baixa viscosidade para fabricar solo transparente, juntamente com a sílica gel. Testes de viscosidade e de índice de refração foram realizados com as substâncias líquidas selecionadas. Os poros fluidos de baixa viscosidade com índice de refração maior ou igual a 1,448 e menor do que 1,448 foram selecionados; Aqueles com índice de refração maior do que 1,448 foram tomados como “*poro fluido base*” e os menores como “*poro fluidos de compensação*”.

As medições do índice de refração das misturas foram realizadas a temperaturas distintas (10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C) que cobriam as possíveis faixas de temperatura de operação; Do mesmo modo, investigou-se a variação da viscosidade dos poros fluidos com as possíveis temperaturas de operação (10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C).

Os resultados dos testes demonstraram que as misturas de *tolueno* e *metil etil cetona*, e *tolueno* e *propanol 2* são os dois melhores poro fluidos de baixa viscosidade devido a baixa interação com a membrana de látex em ensaios triaxiais. Os resultados pareciam promissores, porém, estes dois poro fluidos são prejudiciais ao corpo humano, e medidas de segurança e proteção (máscaras, luvas e sistemas de exaustão) devem ser tomados quando da sua utilização para a fabricação de solos transparentes.

#### 2.1.1.3 Hidrogel para modelagem de sedimentos de baixa resistência

A terceira família é um solo transparente à base de água feito com um polímero capaz de absorver 200 vezes o seu próprio peso em água. Partículas de hidrogel (*Aquabeads*) podem ser facilmente esmagadas, permitindo a formação de diversas distribuições granulométricas.

Os *Aquabeads* possuem o mesmo IR da água (RI=1,333), característica que os tornam ideais para o estudo de fluxo, usando água como o fluido correspondente. Embora os *Aquabeads* têm sido utilizados para estudar fluxos multifásicos e fluxo de surfactantes em solos, eles só podem simular sedimentos muito fracos (ex. sedimentos marinhos) em estudos de deformação.

#### 2.1.1.4 Laponita

Uma nova família de solo transparente feito de Laponita com propriedades próximas a hidrogéis foi apresentado por Wallace e Rutherford (2015). Esta nova família

foi usada recentemente para investigar as superfícies de ruptura produzidas por quatro equipamentos de medição in situ de resistência ao cisalhamento (Chini et al. 2015).

#### 2.1.1.5 Quartzo Fundido para modelagem de areias

As limitações apresentadas pela sílica gel para modelagem de areia deram origem a uma busca contínua de materiais que pudessem representar com proximidade o comportamento geotécnico da areia em modelos transparentes. No ano de 2011, Ezzein e Bathurst investigaram seis diferentes tipos de partículas granulares potencialmente candidatas a compor um solo transparente para simular areia e 20 diferentes líquidos, que possuíam o mesmo índice de refração entre si (partícula/líquido). Os materiais particulados foram grãos de vidro, vidro triturado, grãos de sílica gel, quartzo fundido, grãos de plástico transparente, e fluoreto de magnésio granulado.

As limitações dos materiais de vidro observados anteriormente foram confirmadas de uma forma independente por Ezzein e Bathurst, assim como a quebra das partículas de sílica gel, na presença de água e a alta umidade. As partículas de fluoreto de magnésio disponíveis neste estudo demonstraram não serem transparentes. As partículas de sílica gel também foram examinadas, mas observou-se que continham micro bolhas de ar aprisionadas no interior das partículas que resultavam num material translúcido quando saturado com um poro fluido com o mesmo índice de refração. Os candidatos a poro fluidos foram eliminados para modelagem em laboratório devido uma ou várias das seguintes razões:

- a) a volatilidade excessiva de líquido, levando a mudanças na composição e, portanto, alterações no índice de refração com o tempo;
- b) Risco potencial à saúde devido à possibilidade de inalação de fumos tóxicos inflamáveis não compatíveis com os níveis de segurança para ambientes geotécnicos de laboratório;
- c) Alta viscosidade do líquido;
- d) Alto custo.

Como resultado frutífero deste estudo, Ezzein et. al (2012) propôs uma nova composição para um meio transparente. Como material granular foi proposto o quartzo fundido, material este que já havia sido identificado por Iskander (2010) como

um substituto em potencial para a modelagem de areia, que é uma forma não cristalina (vidro) do dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) que devido a sua formação apresenta-se sem porosidade. O quartzo fundido possui composição química, estrutura, forma e características semelhantes às da areia silicatas naturais.

O quartzo fundido (Fig. 2.6) é fabricado por fusão utilizando-se um forno aquecido eletricamente ou um forno a gás, e neste processo a cerca de  $2000^\circ\text{C}$  ocorre naturalmente cristais de quartzo de pureza elevada. O processo de fusão é conduzida a vácuo para evitar a formação de bolhas no interior dos grãos. O quartzo fundido é normalmente transparente. As propriedades óticas e térmicas do quartzo fundido são superiores aos dos outros tipos de vidro, devido à sua pureza. Por estas razões, é amplamente utilizado em aplicações como a fabricação de semicondutores na indústria eletrônica, células solares, lentes de telescópio e microscópio dentre outros.



Figura 2.6 – Comparação entre o quartzo fundido grosso (direita), quartzo fundido fino (esquerda) e uma areia padronizada de ottawa (acima).

O quartzo fundido possui uma excelente transmissão ultravioleta quando comparada com a maioria dos outros vidros, sendo portanto, empregado na fabricação de lentes óticas. Seu baixo coeficiente de expansão térmica também o torna um material útil como substratos de espelho de precisão (Fig. 2.7).

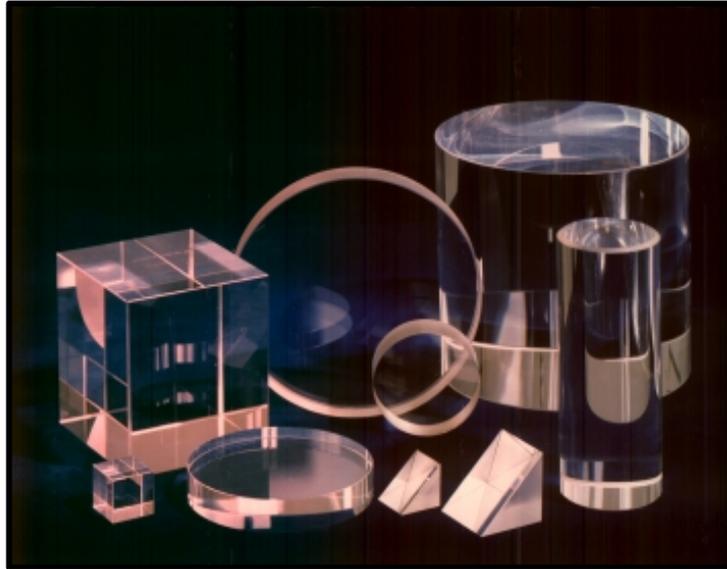


Figura 2.7 – Material óptico de elevada pureza produzido com quartzo fundido  
(Fonte: NewPort, Inc. EUA).

Os grãos de quartzo fundido são rejeitos do processos de fabricação dos materiais óticos e são impermeáveis, impedindo, portanto, a absorção do poro fluido. O quartzo fundido possui índice de refração de 1,4585. Algumas propriedades do quartzo fundido encontram-se na tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Propriedades selecionadas do quartzo fundido.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Densidade (mg/m <sup>3</sup> )	<b>2,2</b>
Gravidade Específica	<b>2,24<sup>a</sup></b>
Dureza (Mohs)	<b>4,9</b>
Módulo de Elasticidade (Gpa)	<b>72</b>
Aparência	<b>Esbranquiçada</b>
Coeficiente de Poisson	<b>0,16</b>
Índice de Refração	<b>1,4585</b>

<sup>a</sup> Valor obtido por Ezzein e Bathrust, 2012, utilizando o método ASTM D854.

Como condicionantes, o poro fluido deveria ser seguro (não tóxico), transparente, estável e sem cheiro. Deveria ter também baixa volatilidade, baixa

viscosidade e preferencialmente PH neutro. Foi encontrado que o poro fluido ideal é uma mistura de dois óleos minerais com o nome comercial de *Krystol 40*<sup>®</sup> e *Puretol 7*<sup>®</sup> produzidos pela Petro Canadá. (Ezzein and Bathurst, 2011).

O teor da mistura encontrado para coincidir com o índice de refração do quartzo fundido foi de 68% de *Puretol 7* e 32% de *Krystol 40* a 22°C. Para avaliar a estabilidade da mistura, um recipiente aberto foi deixado exposto ao ambiente, e durante seis meses nenhuma alteração detectável no valor de índice de refração ou de cor foi observada. A mistura final do poro fluido tem uma viscosidade de 10 cS o que significa que este fluido é 10 vezes mais viscoso do que a água. O índice de refração da mistura do óleo variou ao longo do intervalo  $1,4586 \pm 0.0003$  para a temperatura na faixa de  $22 \pm 3^\circ\text{C}$ . Algumas propriedades selecionadas dos óleos *Puretol 7* e *Krystol 40* encontram-se na tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Propriedades do óleo *Puretol 7* e *Krystol 40*.

<b>Propriedades</b>	<b><i>Krystol 40</i></b>	<b><i>Puretol 7</i></b>
Densidade a 15° C (mg/m <sup>3</sup> )	<b>0,823</b>	<b>0,859</b>
Viscosidade a 40° C (cSt)	<b>3,4</b>	<b>12,2</b>
Aparência	Incolor	Incolor
Odor	inodoro	inodoro
Ponto de Fulgor, °C	<b>135</b>	<b>170</b>
Índice de refração a 22 °C	<b>1,4505<sup>a</sup></b>	<b>1,4635<sup>a</sup></b>

Nota: cSt = centistokes =  $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  e PM = método Pesky-Martens (ASTM D93)

<sup>a</sup>Determinado neste trabalho utilizando um refratômetro digital portátil Atago Co., Ltd., Japan.

O solo de areia transparente descrito por Ezzein e Bathurst tem vantagens em relação aos demais solos transparentes que foram relatados na literatura, particularmente as areias fabricadas com sílica gel. Algumas das principais vantagens incluem o seguinte: (Ezzein and Bathurst, 2011)

- 1) As partículas não se quebram com a presença de óleo e não se deformam plasticamente sob carga;
- 2) As partículas de quartzo fundido não contêm micro bolhas internas o que facilita o processo de deaeração, sendo muitas vezes desnecessário seu uso;
- 3) As partículas não reagem quimicamente com o poro fluido;

- 4) As partículas não absorvem o poro fluido;
- 5) O índice de refração e a transparência do óleo incolor é estável com o tempo;
- 6) O poro fluido é inodoro, não tóxico, possui volatilidade baixa e alta temperatura de ignição que o tornam um poro fluido ideal para um ambiente de laboratório;
- 7) Há uma profundidade de transparência de 120 mm (quartzo grossa) quando colocado em um recipiente feito de acrílico com 25 mm de espessura;
- 8) O material de quartzo fundido e os óleos minerais são baratos.

Uma desvantagem do quartzo fundido grosso como fornecido pela fabricante, é que as partículas são muito angulares. No entanto, uma estratégia para fazer as partículas menos angulares é moer o material com uma máquina de abrasão *Los Angeles* ou com esferas de aço. A viscosidade do poro fluido (10 vezes a da água) pode ser uma preocupação em alguns problemas geotécnicos de meios porosos com modelagem de fluxo. A figura 2.8 mostra o aspecto macroscópico do quartzo fundido e a excepcional transparência obtida em um modelo com 50 mm de espessura.

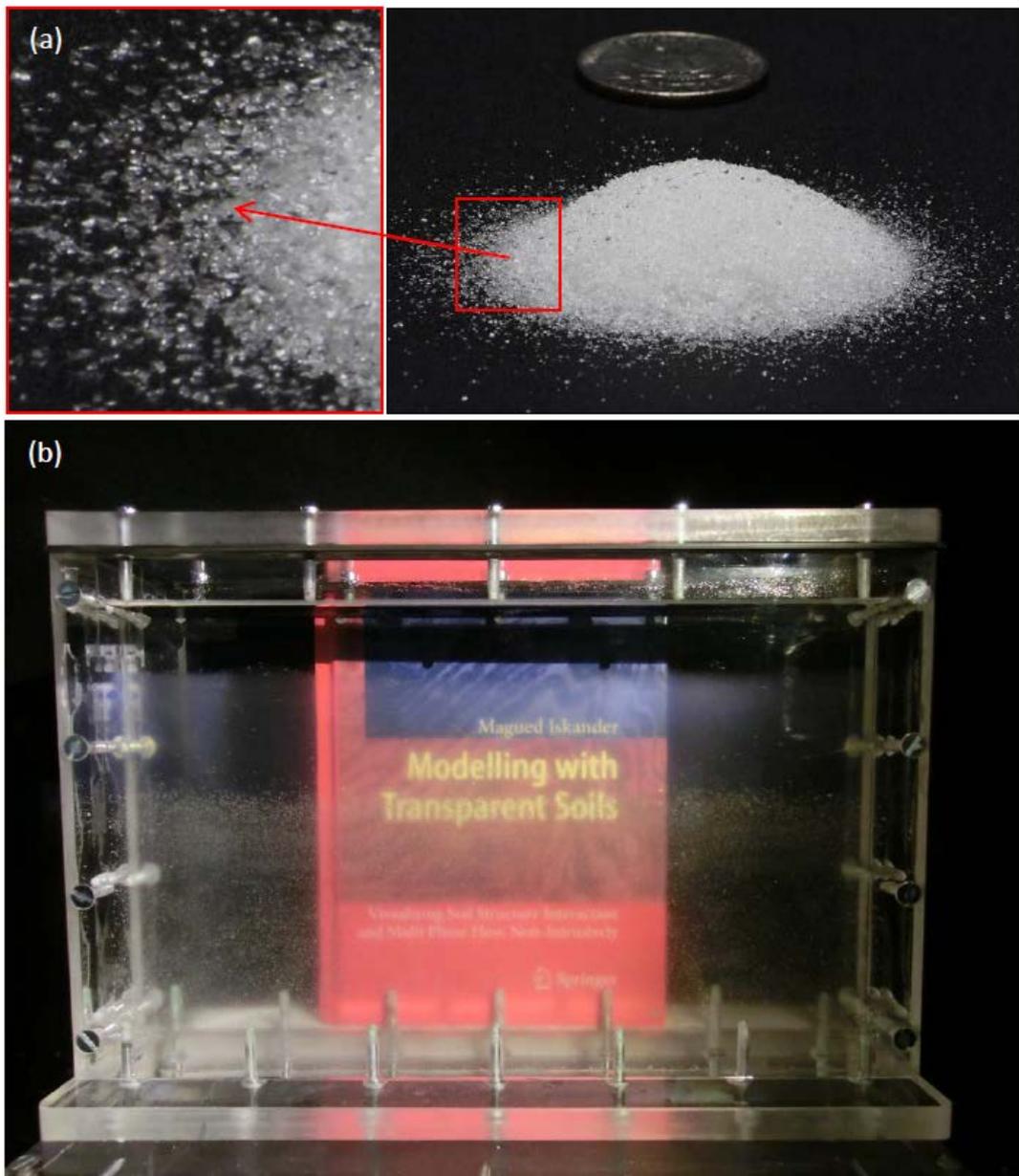


Figura 2.8- (a) – O quartzo fundido, b) Capa do livro “ Modelling with transparent soils” do prof. Magued Iskander visto através de uma espessura de 5 cm de solo transparente feito com quartzo fundido e mistura de óleos minerais.

Os óleos *Puretol 7* e *Krystol 40* são comercializados pela Petro Canadá em tambores de 250 litros ou em baldes de 25 litros (Fig. 2.9).



Figura 2.9 - Baldes de óleos *Puretol 7* e *Krystol 40*.

(Cortesia: Polytechnic Institute of NYU - EUA)

Em 2013, Guzman et al. estudaram um novo poro fluido a base de sacarose para compor o solo transparente com o quartzo fundido. A pesquisa baseou-se no fato de que ao adicionar produtos a base de sacarose na água, o índice de refração desta sofria uma variação que era permanente ao longo do tempo. Na tabela 2.6 estão sumarizados todos os produtos a base de sacarose testados na pesquisa conduzida por Guzman et al. e respectivas observações. O produto que demonstrou o melhor resultado foi o *Low Color Sucrose* da empresa americana *Indiana Sugars, inc.* Este produto foi escolhido por apresentar baixa coloração amarela e possibilidade de ajuste do índice de refração em uma faixa de 1,333 -1,503, propiciando assim modelos com excepcional transparência, conforme observa-se na figura 2.10 onde um tabela oftalmológica é vista a 50 mm de profundidade em um modelo de solo transparente com quartzo fundido saturado com solução de óleo mineral no topo e solução de sacarose na base.

Tabela 2.6 - Propriedades dos líquidos a base de sacarose testados na pesquisa.

<b>Produto</b>	<b>Nome Comercial / Fornecedor</b>	<b>Faixa de Índice de refração</b>	<b>Concentração (g/100 ml de água)</b>	<b>Notas</b>
Sucralose	Splenda/McNeal Nutritionals, LLC	1,333-1,426	75	
<i>Saccharin</i> (Sacarina)	Sweet 'n Low/Cumberland Packing	1,333-1,452	100	Alta concentração leva a perda de transparência
Stevia (sweetener)	Truvia/Cargill, Inc.	1,333-1,400	125	Alta concentração leva a precipitação do soluto
Açúcar de Cana	Domino/Domino Foods, Inc.	1,333-1,4664	205	Alta concentração leva a precipitação do açúcar
Sucrose	Sucrose/Indiana Sugars, Inc.	1,333-1,503	198,5	O índice de refração do produto como fornecido é de IR=1,458
<i>Low Color</i> <i>Sucrose</i>	Low Color Sucrose/Indiana Sugars, Inc.	1,333-1,503	-	O índice de refração do produto como fornecido é de IR=1,458

Os resultados deste estudo são sumarizados abaixo:

- 1) O índice de refração da mistura aquosa com sacarose não sofre mudança significativa com uma pequena variação da temperatura;
- 2) A densidade seca ficou entre 1,134 – 1,356 kg/m<sup>3</sup>;
- 3) O ângulo de atrito de pico do solo transparente ficou na faixa de 46° a 57°;
- 4) O poro fluido de sacarose pode ser misturado com óleo mineral;

- 5) O solo transparente feito com quartzo fundido e uma solução aquosa de sucrose é inerte e não tóxica o que facilita seu uso para fins educacionais;
- 6) Apesar de ser feito a base de sacarose, não propicia o surgimento de seres biológicos indesejáveis com o passar do tempo.

Porém o uso do solo transparente feito a base de sacarose possui limitações, que são enumeradas abaixo:

- 1) Alta viscosidade dificultando seu uso em vários problemas geotécnicos.



Figura 2.10 - Transparência obtida com o solo transparente com *low color sucrose* vista ao fundo com um alvo oftalmológico. (Fonte: Guzman et al. 2014).

O quartzo fundido tem muitas vantagens sobre os substitutos de areia transparente usados anteriormente, principalmente porque possui composição química, estrutura, forma e características semelhantes às das areias silicatas naturais.

As propriedades físicas dos poro fluidos disponíveis atualmente para produzir solos transparentes encontram-se resumidos na tabela 2.7. As principais desvantagens dos poro fluidos geralmente utilizados para produzir solos transparentes incluem volatilidade, alta toxicidade, viscosidade e a grande sensibilidade a variação de temperatura (Zhao et al. 2010). Para superar as limitações de viscosidade do poro fluido produzido a base de óleos minerais, é apresentado, como um dos resultados desta tese, um novo poro fluido composto por água diluída

com um sal – o iodeto de sódio tratado com thiosulfeto de sódio - que o faz um poro fluido promissor para modelagem de problemas geotécnicos quando misturado com o quartzo fundido.

Tabela 2.7 - Propriedades selecionadas dos poro fluidos utilizados para produção de solos transparentes.

	Água	Água + brometo de cálcio	Drakeol 35 <sup>TM</sup> + Norpar 12 <sup>TM</sup>	Puretol 7 + Krystol 40 <sup>TM</sup>	Água + sucrose	Água + Iodeto de sódio + Thiosulfato de sódio
Índice de refração	1,333	1,333-1,447	1,425-1,447	1,450-1,463	1,333-1,503	1,333-1,501
Viscosidade a 23° C (Pa.s)	0,0009	0,0036	0,0050	0,0050	0,2012	0,0022*
Nível de Perigo <sup>†</sup>	Não perigoso	perigoso	perigoso	Não perigoso	Não perigoso	Não perigoso
Para modelagem com:	hidrogel	silica gel silica em pó	silica gel silica em pó	Quartzo fundido	Quartzo fundido	Quartzo fundido

<sup>†</sup> De Acordo com a OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200);

\* baseado na ASTM D445

A tabela 2.8 apresenta as empresas fornecedoras dos materiais necessários para produção de solos transparentes das cinco famílias atualmente disponíveis. O novo poro fluido apresentado nesta tese, composto por iodeto de sódio tratado com thiosulfeto de sódio também foi incluído nesta tabela com o respectivo fornecedor testado.

Tabela 2.8 – Fornecedores dos materiais utilizados para produção de solos transparentes.

<b>Primeira Família: Pó de Sílica amorfa</b>		
Sólidos	Sílica Precipitada (pó)	PPG Industries, Inc.
Líquidos	Mistura de óleos Minerais	<b>Óleo Mineral:</b> <i>Drakeol 35</i> (CAS# 08042-47-5) <b>Solvente:</b> <i>Norpar 12: Exxon Mobil Chemical Company</i> (CAS# 67771-72-8)
	Brometo de Cálcio	<i>Tetra Chemicals</i>
<b>Segunda Família: Sílica Gel</b>		
Sólidos	Sílica Gel	<i>Multisorb Technologies, EUA</i>
Líquidos	O mesmo da primeira família	
<b>Terceira família: Hidrogels (Aquabeads)</b>		
Sólidos	Aquabeads (KI-GEL 201K)	<i>Kuraray Chemical Company, Osaka, JP</i>
Líquidos	água	destilada
<b>Quarta Família: Quartzo Fundido</b>		
Sólidos	Quartzo fundido triturado Nota: (Devido o quartzo fundido ser geralmente um produto reciclado, é recomendável investigar a transparência de uma amostra do material antes da compra.)	<i>Mintec, Co. (EUA)</i>
		<i>Marakama Kamado Touryou Cp. Ltd (JP)</i>
		<i>Louyang Bomn Import&amp;Export Co.,Ltd (China)</i>
		<i>Wuhan Tsunami Technology Co., Ltd (China)</i>
Líquidos	Mistura de óleo mineral	<i>Paraflex HT4 ou Krystol 40 e Puretol 7, Petro Canada</i>
	Solução de Sacarose	<i>Low Color sucrose, Indiana Sugars</i>
	Iodeto de sódio tratado com tiosulfato de sódio (ISTS) Nota: Introduzido neste trabalho	Thiosulfato de Sódio, <a href="http://Amazon.com/ChemCenter">Amazon.com/ChemCenter</a> Iodeto de Sódio, Scientific Equipment of Houston
<b>Quinta Família: Laponita</b>		
Sólidos	Laponita	BYK Aditivos
Líquidos	Água	destilada

## **2.2 Desenvolvimentos notáveis em outros campos da ciência**

O uso de meios granulares transparentes para a modelagem e visualização de fenômenos no lugar de meios porosos opacos tem se expandido em vários campos da ciência e engenharias. A maioria dos desenvolvimentos têm ocorrido de uma forma relativamente independente entre os campos das ciências. Alguns destes notáveis desenvolvimentos ocorreram na física de meio granular, engenharia nuclear, dinâmica de fluidos e engenharia hidráulica, medicina e biologia, e são descritos brevemente a seguir.

### **2.2.1 Física**

Métodos de correspondência de IR têm sido amplamente utilizados no estudo da física do meio granular. Um número significativo de pesquisadores têm se dedicado ao estudo do movimento *Browniano* de suspensões, bem como do fluxo friccional (por exemplo, Krishnan et al. 1996; Dijkstra et al. 2010; Lobkovsky et al. 2008). Vários estudos também exploraram aplicações práticas, como a penetração em meio granular (Toiya, et al. 2007).

### **2.2.2 Dinâmica de fluidos e Engenharia Hidráulica**

Métodos de correspondência de IR tem sido utilizados para estudar a erosão e fluxo de fluidos em leitos de rios (por exemplo, Lobkovsky et al 2008;. Sanvitale e Bowman 2012). Um exemplo de visualização de superfície de fluxo livre é mostrada na Figura 2.11, onde partículas de forma irregular e laser de fluorescência são empregados. Métodos de correspondência de índices de refração têm sido utilizados em estudos de fluxo nos canais e em torno dos componentes mecânicos tais como bombas e sistemas rotativos (por exemplo, Uzol et al., 2002). Além disso, a correspondência de IR tem sido empregado em outros campos da engenharia tais como na engenharia nuclear, onde o fluxo em reatores (Fig. 2.12) é um importante problema. (por exemplo, Hassan e Dominguez-Ontiveros 2008).

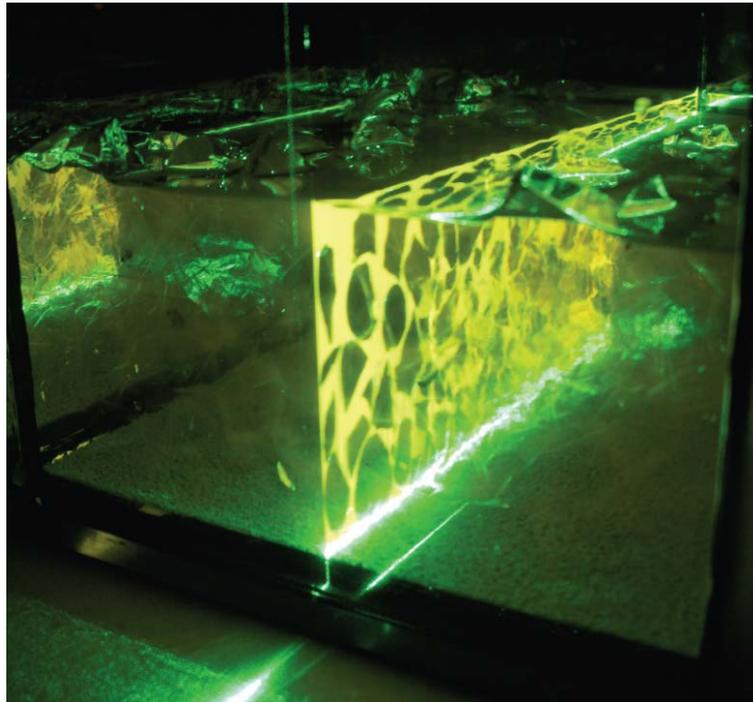


Figura 2.11 – Visualização de partículas discretas utilizando fluorescência *laser*.

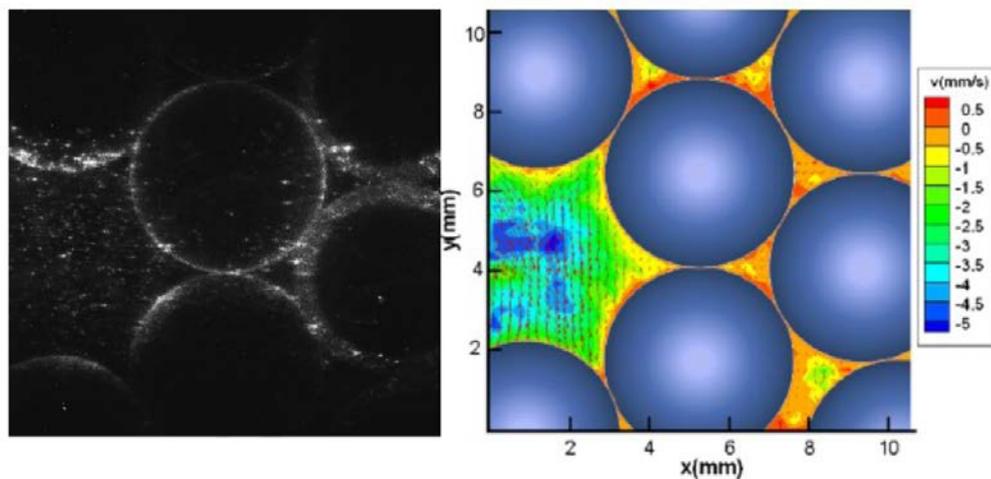


Figura 2.12 – Visualização de velocidade de fluxo em meio granular.

### 2.2.3 Biologia

Na área médica, métodos de correspondência de IR têm sido utilizados para modelagem de sistemas cardiovasculares *in vitro*, utilizando a correspondência do índice de refração entre o meio e o fluido (por exemplo, Brunette et al., 2008). Os processos celulares também foram estudados utilizando técnicas de correspondência de índice de refração. Os hidrogéis, semelhante a *Aquabeads* são populares para a modelagem de organismos biológicos e estruturas celulares (Por exemplo, Ravasio et al. 2014). Uma

combinação de um polímero chamado de Nafion e água foi mostrado para acomodar os organismos vivos. Estes solos transparentes foram usados para visualizar o crescimento de raízes de plantas in situ (Fig. 2.13) (por exemplo, Downie et al. 2012). Finalmente, a criolita, um sal de fluoreto transparente, também tem sido utilizada para o estudo de transporte de contaminantes e bactérias em meios porosos (Rashidi et al.1997).

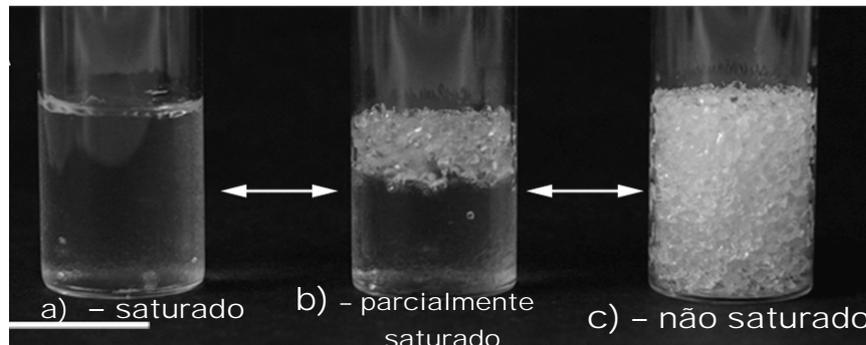


Figura 2.13 - Diferentes estágios de obtenção de solo transparente com Nafion  
(Adaptado de: Downie et al. 2012).

## 2.3 Técnicas de Medição com o uso de Solos Transparentes

### 2.3.1 Interferometria *Speckle*

A alta precisão da medição por interferometria fez muitos pesquisadores utilizarem a técnica de interferometria em laboratórios de geotecnia, (Jacquot e Facchini 1997a, 1997b Ghandehari et al 1999). A maioria dos aparatos utilizam a técnica de interferometria *speckle* para as medições de deformação. O aparato utilizado inclui uma câmera para aquisição das imagens, um *laser* de alta potência, e ao menos uma lente cilíndrica utilizada para gerar uma folha de luz *laser* que “corta opticamente” o modelo gerando o efeito *speckle* na seção de interesse para a captura das imagens. A figura 2.14, mostra esquematicamente, como funciona a técnica de interferometria *speckle* com solos transparentes.

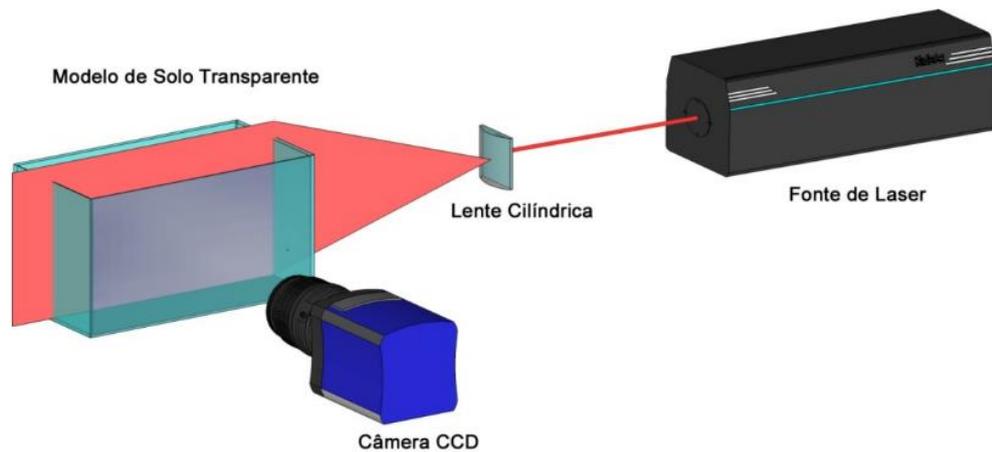


Figura 2.14 - Representação da técnica da interferometria *speckle*.

O efeito *speckle* é um dos principais fenômenos resultantes da interação de uma iluminação coerente com uma superfície opticamente rugosa. Por efeito *speckle* quer dizer o fenômeno de interferência de ondas mutuamente coerentes com uma variação ao acaso de fase. O resultado deste tipo de interferência é uma distribuição de máximos e mínimos na intensidade da luz que é estacionária no tempo, mas aleatória no espaço. Os picos individuais de intensidade representando pequenas manchas claras ou escuras são chamados de *speckle*. O agrupamento destes *speckles* é usualmente chamado de padrão de *speckle*. O termo superfície opticamente rugosa significa aquela que apresenta um micro-relevo tal que a altura dos picos individuais é comparável ou maior do que o comprimento de onda da luz usada para iluminação da superfície. Esta condição é válida, de modo geral, para superfícies de elementos estruturais reais de engenharia quando uma radiação visível de laser é utilizada na iluminação. A figura 2.15 mostra um padrão típico de *speckle* de um modelo de solo transparente feito com sílica gel e uma mistura de óleos minerais com o mesmo IR da sílica gel.

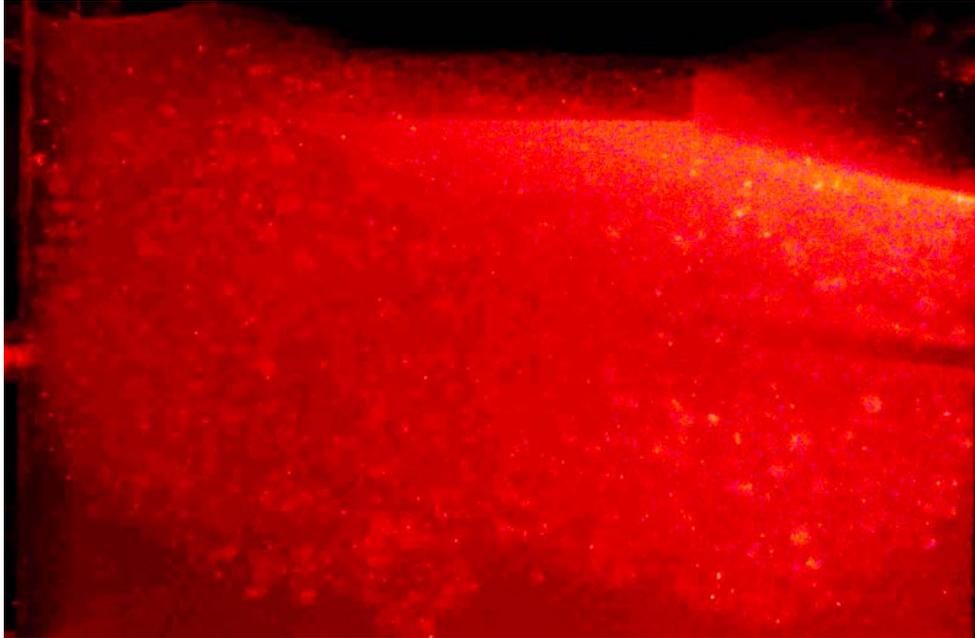


Figura 2.15 – Padrão *speckle* típico de solo transparente de sílica gel (Sadek e Iskander, 2010).

Liu e Iskander, 2010 aplicaram a técnica de interferometria para estudar deformações em um modelo de solo transparente feito em sílica gel em 2D e 3D. Foi concluído neste estudo que há grande semelhança e concordância no comportamento geotécnico do solo transparente e da areia natural e que os solos transparentes sintéticos são substitutos adequados para modelagem do comportamento de solos naturais em ambiente de laboratório. A figura 2.16 mostra o aparato utilizado nesta pesquisa que consiste de um pórtico, uma célula de carga conectada a um LVDT e a uma sapata de acrílico, um *laser* He-Ne e uma câmera para aquisição de imagens digitais ligada a um PC via uma placa de rede *ethernet*.

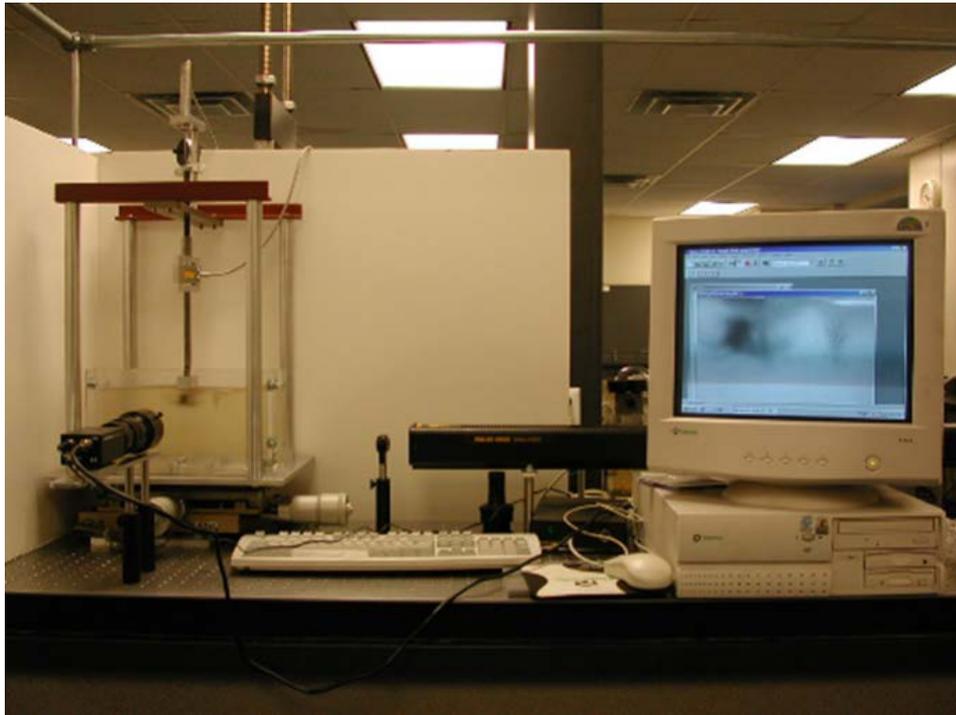


Figura 2.16 – Aparato experimental para o uso da interferometria *speckle* com solos transparentes (Iskander, 2010).

A figura 2.17 mostra o momento que o pulso de laser corta “oticamente” o modelo para a aquisição da sequência de imagens pela câmera digital.

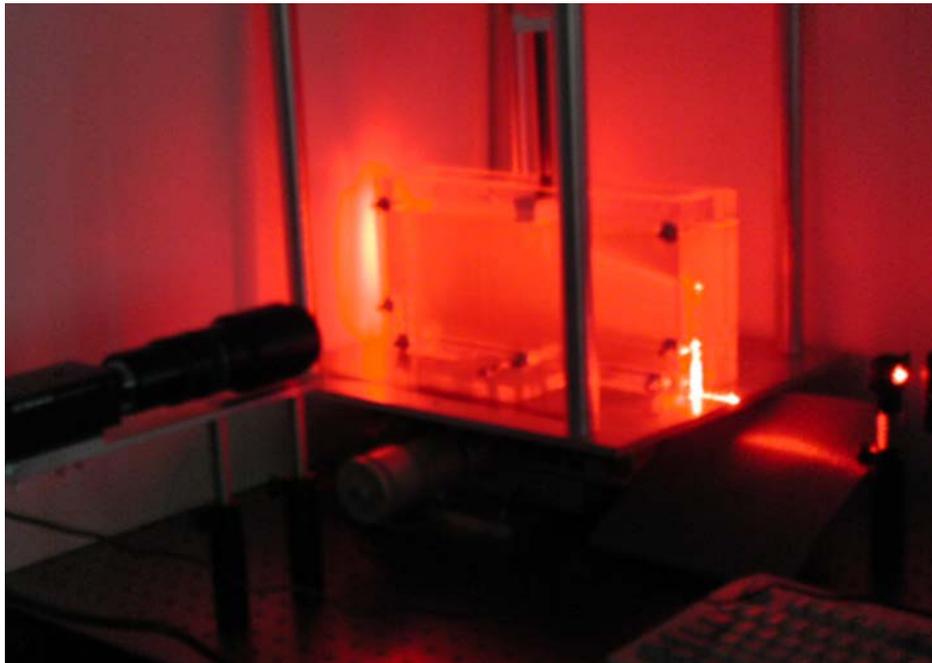


Figura 2.17 – Corte “ótico” da amostra para captura de imagens (Sadek, 2010).

Stanier e Hird, 2008 utilizaram um solo sintético transparente consistindo em pó de sílica amorfa e um poro fluido com mesmo índice de refração para representação de um modelo de argila. O coeficiente médio de adensamento  $C_v$ , medido durante estágios de consolidação unidimensional com pressões na faixa de 50-100 kPa foi de  $3,93 \text{ m}^2/\text{ano}$ , enquanto que a permeabilidade obtida foi de  $4 \times 10^{-9} \text{ m/s}$  com o mesmo incremento de tensão e a resistência ao cisalhamento medido pelo ensaio de palhetas no modelos foi de 16,5 kPa, em média. Assim, este solo pode representar argila altamente compressível (Gill & Lehane, 2001; McKelvey et al. 2004).

Neste modelo, foi simulado a instalação física em profundidade de estacas helicoidais em uma condição não drenada e o desempenho e mecanismo das estacas helicoidais foi estudado. A instalação da estaca helicoidal e ensaios de carregamento vs. deflexão foram realizadas com uma taxa de deslocamento axial da estaca de 0,2 mm/s, para garantir a captura de um número suficiente de imagens do ensaio.

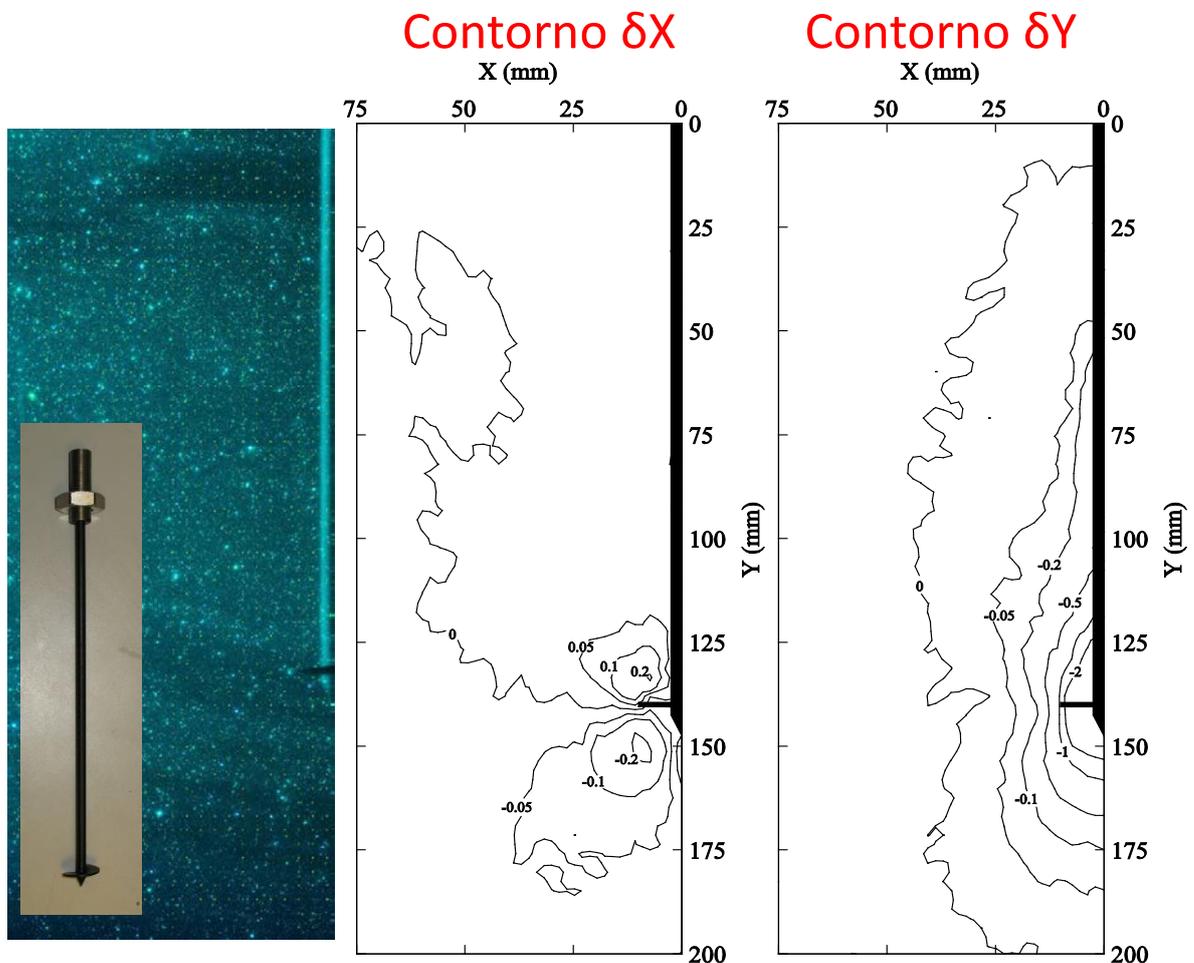


Figura 2.18 – Contornos horizontais ( $\delta x$ ) e verticais ( $\delta y$ ) obtidos para estaca hélice simples (Stanier e Hird, 2008).

A drenagem durante o ensaio de carga é considerada como sendo mínima, com base na relação de Lehane et al. (2008) que estima a relação de drenagem abaixo de sapatas circulares apoiadas em argila.

Uma câmera digital capturou imagens durante os testes de instalação e rotação da estaca, que permitiu a utilização da técnica de *Digital Image Correlation* (DIC). A figura 2.18 apresenta os contornos horizontais ( $\delta x$ ) e verticais ( $\delta y$ ) obtidos para estaca hélice simples, e a figura 2.19, os contornos horizontais ( $\delta x$ ) e verticais ( $\delta y$ ) obtidos para estaca hélice tripla.

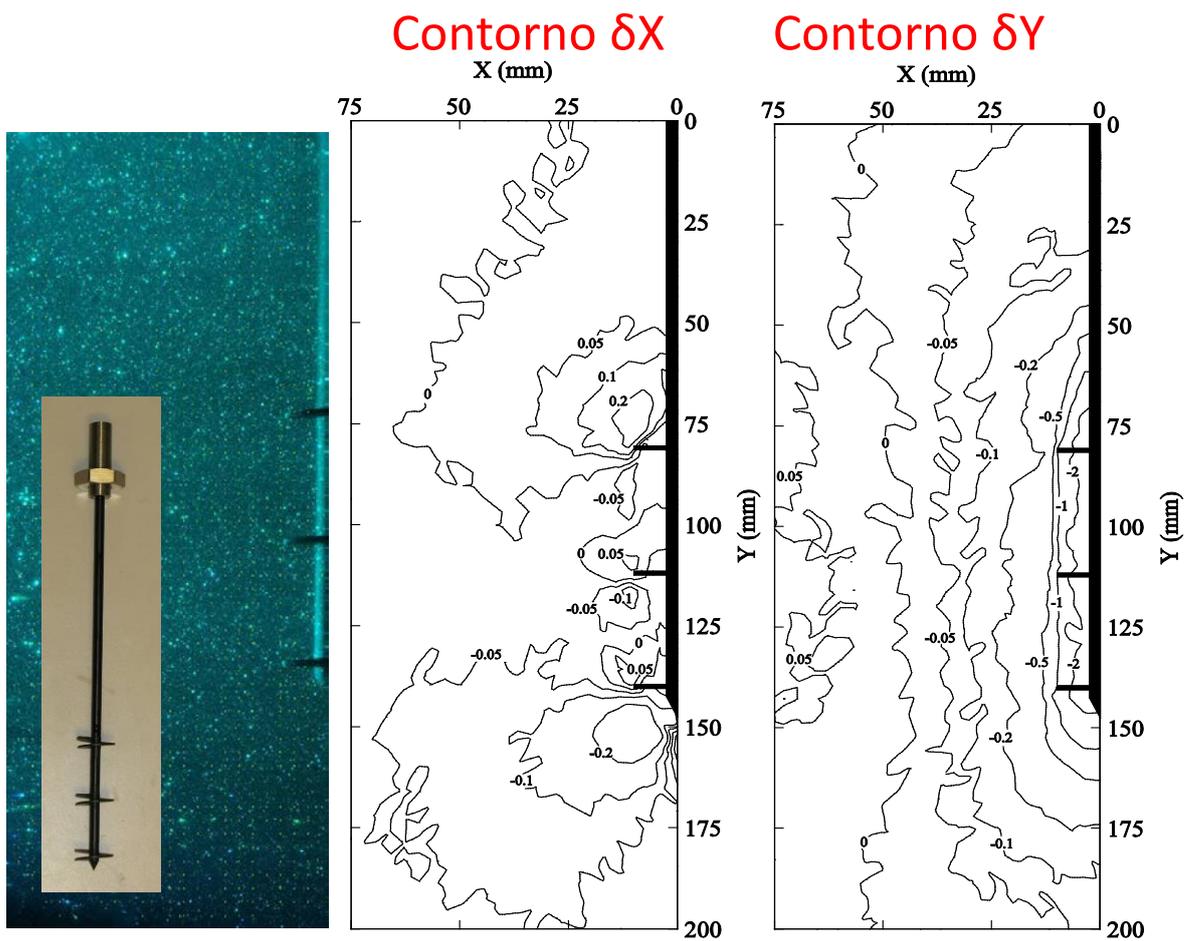


Figura 2.19 – Contornos horizontais ( $\delta x$ ) e verticais ( $\delta y$ ) obtidos para estaca hélice tripla (Stanier e Hird, 2008).

### 2.3.2 Técnica da camada opaca (*embedded plane*)

Metodologias até então descritas na literatura para visualizar deformações em solos transparentes consistem em iluminar um plano dentro da amostra usando uma fonte de luz *laser* coerente com o auxílio de uma lente cilíndrica (Iskander et al. 2003; Iskander e Liu 2010). No entanto, quando estuda-se fenômenos geotécnicos dinâmicos, como por exemplo a penetração de projéteis em meio granular, verifica-se a impossibilidade de capturar imagens do plano iluminado com *laser* com uma resolução adequada necessária para uma boa análise de correlação a posteriori. A intensidade de iluminação proporcionada pelo *laser* é insuficiente devido à baixa sensibilidade à luz da câmera de alta velocidade utilizada e também a iluminação proporcionada não ser uniforme devido a refletância do projétil e da cavidade formada durante a penetração. Omidvar et al. 2014 concebeu um novo método, no qual um plano no interior da amostra de solo transparente é fisicamente incorporado através da introdução de partículas opacas traçadoras feitas do mesmo material – quartzo fundido – tingidas com tinta negra não metálica para evitar a refletância (Fig. 2.20). Ao invés de utilizar uma fonte de luz *laser*, uma fonte de luz de tungstênio indireta controlada é utilizada nesta técnica para iluminar a amostra. Várias considerações influenciam o projeto do sistema de iluminação, incluindo a eliminação da tremulação, a necessidade de grande quantidade de luz, os requisitos de iluminação uniforme e sensibilidade à temperatura de solos transparentes. Todas as etapas necessárias para preparação de uma amostra com camada opaca encontra-se no apêndice B desta tese.

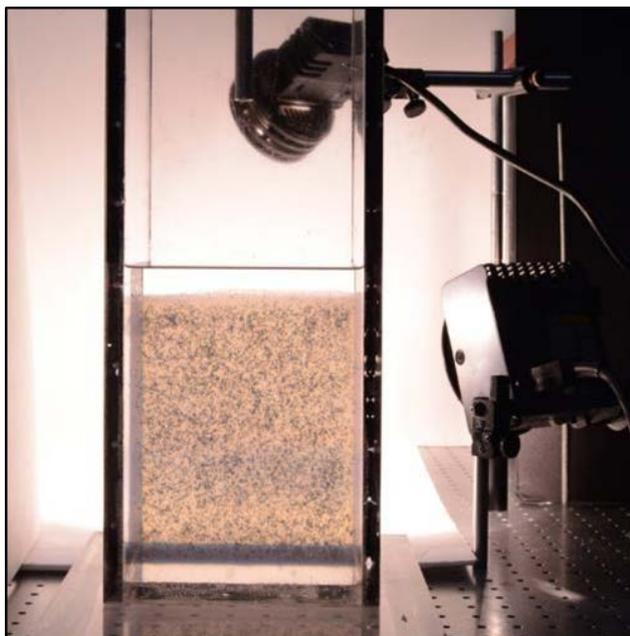


Figura 2.20 – Amostra de solo transparente feita com o uso da técnica da camada opaca.

### 2.3.3 Técnicas não convencionais com o uso de solos transparentes

#### 2.3.3.1 Uso de propriedades térmicas

A transparência ótica alcançada por meios granulares e poro fluidos de mesmo índice de refração é altamente dependente da temperatura. Enquanto o índice de refração do quartzo fundido é menos sensível a variações de temperatura, o poro fluido pode ter uma variação significativa com a mudança de temperatura.

Conseqüentemente, as mudanças na temperatura podem conduzir a uma incompatibilidade do índice de refração total da amostra, resultando assim em degradação da transparência (Guzman et al. 2013). Na maioria das aplicações convencionais de solos transparentes, uma temperatura constante é mantida durante a preparação e teste da amostra, a fim de evitar a degradação da transparência. No entanto, vários pesquisadores têm aproveitado essa propriedade para explorar processos térmicos em solos.

Duas contribuições importantes dadas por Black e Tatari (2015) e Siemens et al. (2015), que serão publicados na edição especial de solos transparentes do jornal *Geotechnical Testing Journal* em novembro de 2015, demonstram o conceito. Black e Tatari empregaram com sucesso a sensibilidade térmica da transparência para

visualizar o fluxo de calor adjacente a uma estaca em solos transparentes, e obtiveram a evolução temporal associada da zona de influência do aquecimento (Fig. 2.21).

Siemens et al. (2015) determinaram as faixas de temperatura onde são observadas uma relação linear entre as variações de temperatura e intensidade dos *pixels* das imagens capturadas. Esta informação foi depois utilizada com sucesso para visualizar o fluxo de calor em solos transparentes.

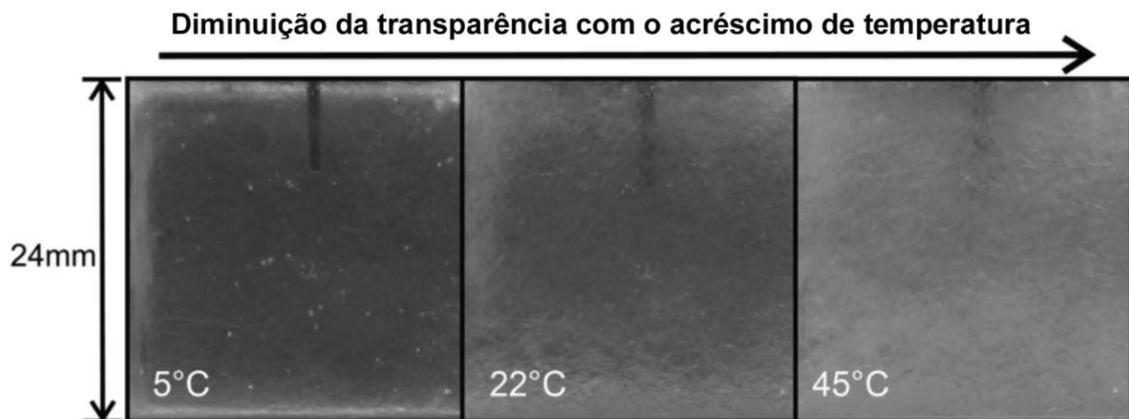


Figura 2.21 – Diminuição da transparência devido o aumento de temperatura (Black e Tatari, 2015).

## 2.4 Técnicas de Processamento e Análise de Imagens

A capacidade de visualizar o deslocamento ou os campos de cisalhamento dos solos podem elevar nossa compreensão acerca dos problemas geotécnicos. Algumas técnicas de visualização têm sido utilizadas na área da investigação geotécnica por mais de meio século.

A Velocimetria de partículas por Imagem (PIV) é um método de medição ótica utilizada inicialmente na mecânica dos fluidos para medir a velocidade de fluxo instantânea pelo rastreamento do movimento de traçadores no fluido. A técnica original consiste em cortar oticamente o fluido que se deseja medir com auxílio de um *laser* e capturar imagens sequenciais com auxílio de uma câmera fotográfica digital. Um esquema desta técnica empregada na mecânica dos fluidos é apresentado na Fig. 2.22.

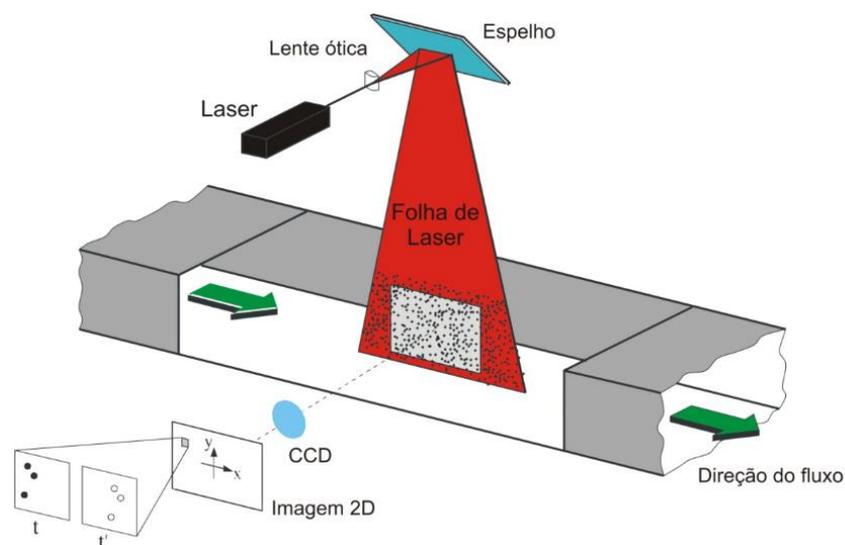


Figura 2.22- Uso da técnica de *Particle Image Velocimetry* (PIV) para estudo de fluido.

Nos últimos anos, técnicas de medição baseada em imagens têm ganhado popularidade na engenharia geotécnica. Recentemente, muitos pesquisadores da área geotécnica tem utilizado a correlação digital de imagens (DIC) para estudar as deformações do solo durante o cisalhamento (Sadek et al. 2002; White et al. 2003).

A Correlação digital de imagem (DIC) é uma técnica clássica de reconhecimento de padrões óticos, em que duas imagens sequenciais são comparadas entre si para obtenção do deslocamento relativo entre elas. O DIC é amplamente utilizado em diversos campos da engenharia para a obtenção de padrões de deformações espaciais, embora receba vários nomes, em particular velocimetria de partículas por imagem (PIV) quando deseja-se obter a velocidade correspondente entre duas imagens sequenciais.

Em linhas gerais, o DIC tem seu princípio de funcionamento baseado na comparação de imagens digitais obtidas de um modelo em diferentes estágios de deformação. Rastreando blocos de *pixels*, o sistema pode medir deslocamento de superfície e construir campos de deslocamento planar, campos de deformação 3D e mapas de deformação. Para o DIC funcionar com eficiência, os blocos de *pixels* precisam ser randômicos e únicos com uma faixa de níveis de contraste e intensidade.

A técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC) é amplamente utilizada para medições experimentais no campo da engenharia mecânica principalmente para: (1) análise de deslocamento de superfície (SDA) na mecânica dos sólidos e (2) *Particle Image Velocimetry* (PIV) na mecânica dos fluidos. No SDA, as deformações do modelo

são medidas por correlação dos *speckles* de imagens pares. A técnica de *Digital Image Correlation* também é recomendável para aplicações em modelos de areia natural ou argila, na engenharia geotécnica.

Conceitualmente, DIC é também recomendado para aplicações em modelos de solos transparentes porque estas aplicações utilizam tanto o SDA como o PIV. Um componente essencial da modelagem física com solos transparentes envolve a aquisição e análise de imagens digitais. Durante o teste, as imagens são capturadas antes e após o carregamento, ou em diferentes estágios do problema, como por exemplo, fluxo de fluidos ou processos térmicos. Em seguida, as imagens são analisadas para revelar informações internas, sob a forma de cinemática, características do fluxo, ou uma evolução de um parâmetro pré-determinado.

O processo matemático para identificar a posição deslocada de subconjuntos da imagem envolve a otimização de um coeficiente de correlação. A qualidade das correlações é afetada pela textura, variações de intensidade luminosa e contraste nas imagens adquiridas. A seguir é apresentado o conceito da correlação digital de imagens básica e da correlação digital de imagens avançada.

## 2.4.1 Correlação Digital de Imagens Básica

### 2.4.1.1 Correlação Cruzada Discreta (DCC)

A Correlação cruzada discreta foi a primeira função de correlação desenvolvida e possui características importantes como tamanho da janela de interrogação fixa. Esta correlação é utilizada nos softwares URAPIV e GeoPIV (White et al. 2003) apresentado na tabela 2.9. Esta função é considerada uma função de primeira geração e pode gerar erros consideráveis na predição de deslocamento entre duas imagens. A função de correlação é apresentada na Eq. 2.

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) g(m + \Delta x, n + \Delta y) \quad (\text{Eq.2})$$

Onde  $M$  e  $N$  são as dimensões da imagem de interrogação e  $m$  e  $n$  são duas variáveis e  $f$  e  $g$  são as intensidades de cinza de duas imagens sendo analisadas.

## 2.4.2 Correlação Digital de Imagens Avançada

Os erros de correlação do método DIC básico aumentam substancialmente quando a relação do deslocamento entre duas imagens atinge um certo limiar; Portanto, o valor de pico da função de correlação cruzada cai substancialmente com o aumento do deslocamento relativo existente entre as imagens comparadas. Isto ocorre, devido o algoritmo utilizar uma janela de interrogação fixa que realiza a varredura nas imagens em busca de deslocamentos, que por sua vez, não serão necessariamente compatíveis com o tamanho desta dada janela. No entanto, muitos algoritmos avançados DIC foram desenvolvidos para melhorar a acurácia do processo de correlação. Uma importante melhoria corresponde ao uso do 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. Um outro recurso, diz respeito a escolha da função de correlação para as análises. No método DIC básico, apenas a função de correlação cruzada (DCC) é utilizada. Na DIC avançada, estão disponíveis para o usuário várias funções de correlação que são apresentadas neste trabalho. A figura 2.23 mostra um fluxograma com as características de funcionamento de um algoritmo DIC avançado.

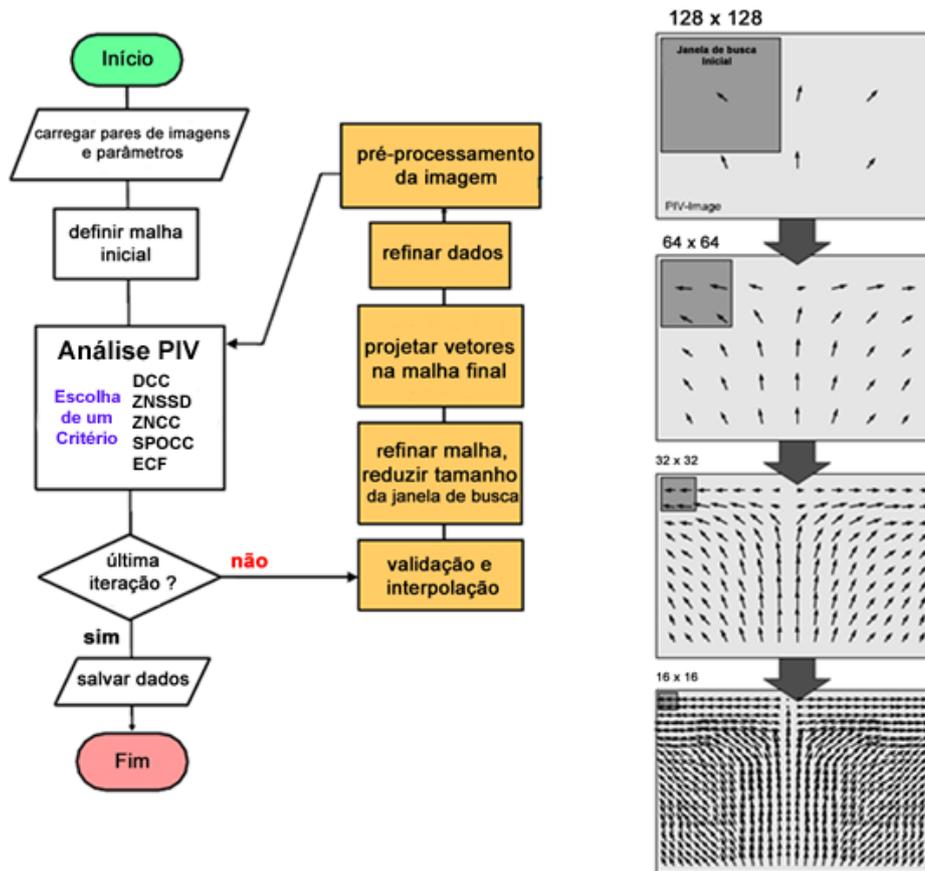


Figura 2.23 – Fluxograma de um algoritmo avançado DIC (Fonte: PIVTEC).

### 2.4.3 Componentes básicos de uma análise DIC

Os componentes básicos de uma análise DIC incluem o *grid* que corresponde a região de interesse da análise e constitui-se de todas as janelas de interrogação da região de interesse (ROI). No centro das janelas de interrogação é onde será plotado os vetores de deslocamento, quando se trata de uma análise DIC ou um vetor de velocidade quando corresponde a uma análise PIV. Em um algoritmo DIC avançado, várias janelas de busca são utilizadas em ordem decrescente na análise. Este método iterativo aumenta a precisão e acurácia do resultado final. A Figura 2.24 ilustra um esquema com os componentes básicos de uma análise DIC.

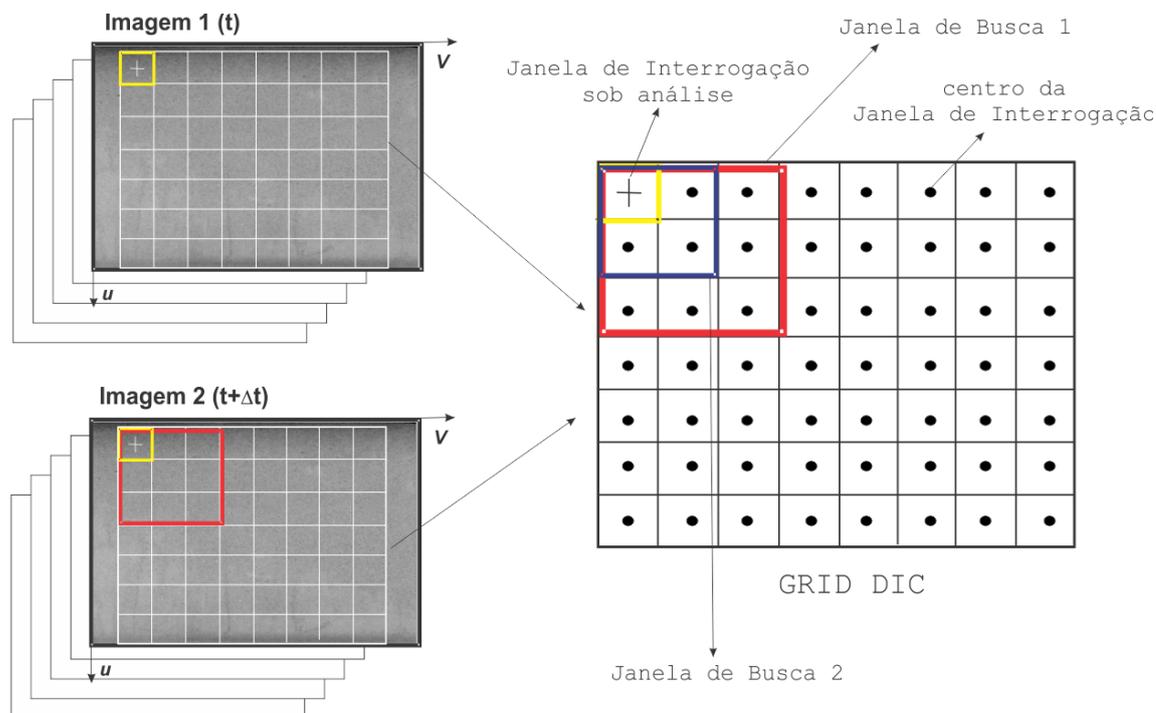


Figura 2.24 – Componentes de uma análise DIC avançada.

#### 2.4.4 Etapas Básicas de Uma análise DIC

A figura 2.25 mostra, esquematicamente, os passos necessários para realizar uma análise com a técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC). O primeiro passo consiste em capturar a sequência de imagens digitais do ensaio. Estas imagens podem ser capturadas por câmeras comerciais tradicionais como por exemplo as Reflex e as DSLR, como por câmeras de alta velocidade que chegam a capturar 50.000 imagens em um único segundo. Teoricamente, qualquer dispositivo que consiga capturar as imagens com velocidade compatível a do fenômeno a ser estudado pode ser utilizado, como é o caso do uso de digitalizadores de imagens (*scanners*) para captura de imagens de ensaios quasi-estáticos. A aquisição da imagem é acompanhada pelo Processamento Digital de Imagens.

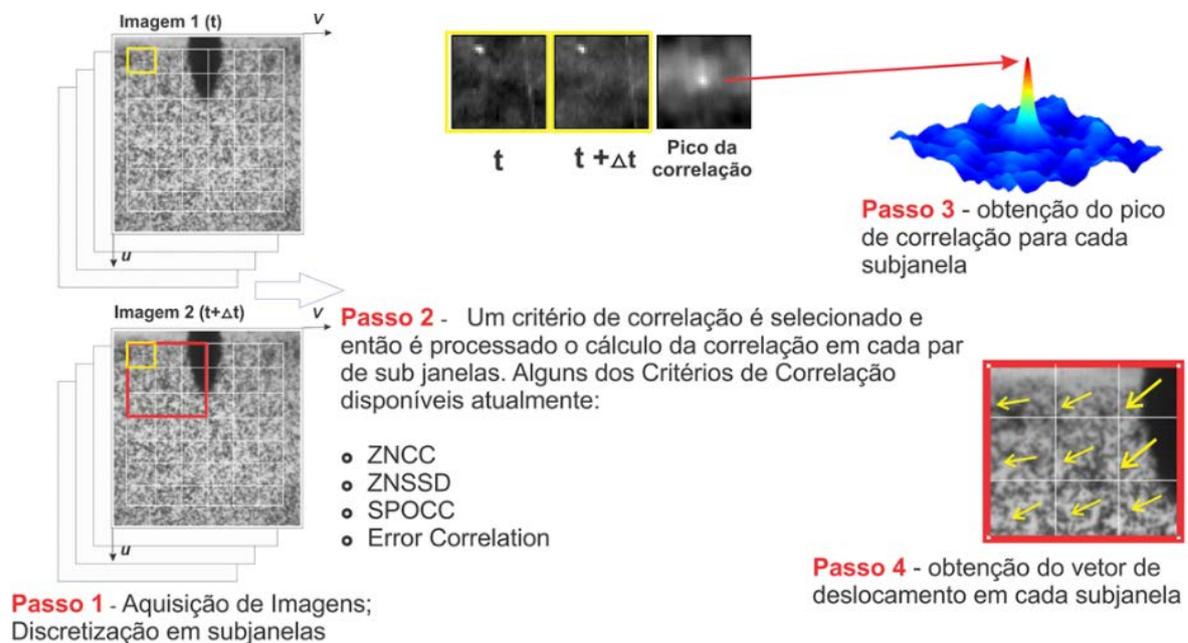


Figura 2.25 –Etapas da correlação digital de imagens (DIC).

#### 2.4.4.1 Processamento digital de imagens

O processamento digital das imagens tem a finalidade de preparar as imagens capturadas para que delas possam ser extraídas as informações dos campos de deslocamento. Para isto, alguns parâmetros básicos precisam ser previamente estabelecidos. O primeiro parâmetro é o formato da imagem a ser capturada. Entre os formatos de arquivos de imagens conhecidos, podemos citar cinco amplamente usados, os BMP, os TIFF, NEF, RAW e os JPEG. O formato BMP, TIFF, NEF e RAW são formatos cuja estrutura do arquivo de imagem é tal qual ele realmente é, ou seja, não faz nenhum tipo de compressão da imagem. Já no formato JPEG, a estrutura do arquivo utiliza somente os dados da imagem real que precisa para ser visualizada pelo olho humano. Este último é conhecido como formato comprimido. Uma imagem JPEG ocupa muito menos espaço de armazenamento do que uma imagem BMP ou TIFF, no entanto, pode alterar levemente as características de uma imagem. Para que o processamento possa alcançar todas as características da imagem capturada, o formato TIFF é recomendado.

Uma vez definido o formato de captura, as imagens passam pelas transformações que possibilitarão encontrar os deslocamentos. Estas transformações envolvem a decodificação do arquivo da imagem para uma matriz, a identificação das partículas na imagem e a obtenção do pico de todas as partículas.

#### 2.4.4.1.1 Imagem como matriz de pixel

Para que se possa submeter às imagens ao algoritmo de processamento de imagens é conveniente que estas sejam tratadas como uma matriz de *pixel*. Cada elemento da imagem, ou seja, um *pixel* é localizado na imagem por suas coordenadas no plano.

Para se aplicar os algoritmos de processamento de imagens desenvolvidos para a determinação do deslocamento de partículas, é necessário que os valores dos *pixels* estejam identificados por uma escala de cinza. Isto é distribuído da seguinte forma: para *pixels* cujo valor corresponde ao preto o nível de cinza é zero e para *pixels* cujo valor corresponde ao branco o nível de cinza é 255. A figura 2.26 exemplifica o funcionamento da escala de cinza.



Figura 2.26 - Escala de cinza típica de 8 bits.

Na escala de cinza, a imagem é dita como sendo formada por oito bits, ou seja, a palavra que contem a informação do *pixel* tem tamanho 8. Isto na concepção de números binários quer dizer ser possível fazer 256 combinações diferentes. O que acontece, com as imagens coloridas, é de que os valores dos pixels são formados por 24 bits, permitindo uma combinação de 16.777,216 diferentes cores.

Na verdade todas as cores podem ser obtidas com uma combinação de três grupos de oito bits, conhecida como padrão RGB (Iniciais de *Red*, *Green*, *Blue*) que são formados por uma escala de vermelho, uma de azul e uma de verde, de forma similar a escala de cinza.

Como o processamento das imagens das partículas foi padronizado para trabalhar com escala de cinza, é necessário então que as imagens quando capturadas coloridas sejam transformadas de RGB para valores de nível de cinza. Isto é possível fazendo-se a média dos níveis de RGB, como mostra a equação 3:

$$N_c = \frac{RED[i][j] + GREEN[i][j] + BLUE[i][j]}{3} \quad (\text{Eq.3})$$

O nível de cinza  $N_c$ , localizado na coordenada horizontal “ $i$ ” com a coordenada vertical “ $j$ ” é dado pelas somas dos componentes de cor do local dividido por 3. Deste modo, temos os valores dos *pixels* padronizados para a utilização dos algoritmos de análise das imagens.

Na formulação dos níveis de cinza que identificam um *pixel*, é observado que eles são localizados por suas coordenadas. No entanto, o arquivo de imagem no formato TIFF que se propõe trabalhar não fornece esta identificação direta. Para isto, é necessário observar como o arquivo está estruturado para que a matriz de *pixels* possa ser montada.

Todos os arquivos possuem um cabeçalho que identifica a imagem como sendo TIFF, qual o número de cores utilizada e a dimensão das imagens. Além disso, fornece em que *byte* do arquivo os dados da imagem propriamente dita se iniciam. Se a imagem é de 8 bits, ela virá como espécie de aquarela, chamada “*pallette*” que identificará os valores dos *pixels*. Se a imagem é de código de cinzas, esta “*pallette*” varia uniformemente de 0 a 255. Por outro lado, se a imagem é do tipo RGB, ela não possui “*pallette*” e os valores dos *pixels* são identificados por 3 bytes cada um, ou seja 24 bits.

A última relevância na passagem de um arquivo de imagem para uma matriz de *pixels* é de que a imagem no arquivo se posiciona da esquerda para direita e de baixo para cima.

O segundo passo consiste na escolha de um critério de correlação para a execução da análise.

#### 2.4.4.2 Funções de Correlação

A escolha da função de correlação ótima que resultará nos melhores resultados de predição dos deslocamentos entre imagens é uma etapa importante antes da

realização das análises. Existem vários critérios de otimização disponíveis na literatura, os mais utilizados incluem:

#### 2.4.4.2.1 Zero-mean normalized cross correlation (ZNCC)

Um coeficiente de correlação cruzada é calculado, com duas modificações: 1) Subtração do valor médio ao longo da região de interesse, que visa eliminar as variações de baixa frequência como as resultantes de uma iluminação não uniforme, e 2) a normalização pelo desvio padrão, o que melhora ainda mais a correlação através da região de interesse, particularmente na presença de grandes variações nos valores obtidos. O coeficiente **ZNCC** resultante pode ser escrito no domínio espacial como se segue:

$$ZNCC(l, k) = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n) - \bar{f}][g(m+l, n+k) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n) - \bar{f}]^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [g(m, n) - \bar{g}]^2}} \quad (\text{Eq.4})$$

Onde:

$l, k$  são as dimensões das imagens em *pixels*;

$f$  e  $g$  - são as duas imagens consecutivas ;

$\bar{f}$  e  $\bar{g}$  - são os valores médios das imagens,

$i$  e  $j$  - são os deslocamentos incrementais entre duas imagens nas direções horizontal e vertical, respectivamente. O valor de pico da Eq. 4 descreve o deslocamento da imagem original  $f$  na imagem deslocada  $g$ . Uma variação da Eq. 4, escrita no domínio de frequência é utilizada, como descrito abaixo:

$$ZNCC = \frac{C_{fg}(\Delta X, \Delta Y)}{\sqrt{C_{ff}(\Delta X, \Delta Y) C_{gg}(\Delta X, \Delta Y)}} \quad (\text{Eq.5})$$

Onde:

$$C_{fg}(\Delta x, \Delta y) = IFFT(F(X, Y) \times G^*(X, Y)) \quad (\text{Eq.6})$$

$$C_{ff}(\Delta x, \Delta y) = IFFT(F(X, Y) \times F^*(X, Y)) \quad (\text{Eq.7})$$

$$C_{gg}(\Delta x, \Delta y) = IFFT(G(X, Y) \times G^*(X, Y)) \quad (\text{Eq.8})$$

Onde:

$F(X, Y)$  e  $G^*(X, Y)$  são as transformadas de Fourier de  $f(x, y)$  e  $g^*(x, y)$ ,  $g^*(x, y)$  é o conjugado de  $g(x, y)$ ,  $C_{ff}$  e  $C_{gg}$  são autocorrelações, e IFFT representa a inversa da transformada rápida de Fourier.

#### 2.4.4.2.2 Zero-mean normalized sum of squared difference (ZNSSD)

Esta função de correlação realiza a subtração dos quadrados da diferença entre janelas de interrogação correspondentes, como se segue:

$$ZNSSD(m, n) = \left[ \frac{\sum_{i=j}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [f(i, j) - \bar{f}] \quad \sum_{i=j}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [g(i + m, j + n) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [f(i, j) - \bar{f}]^2} \quad \sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [g(i, j) - \bar{g}]^2}} \right]^2 \quad (\text{Eq.9})$$

Os algoritmos de otimização **ZNSSD** muitas vezes operam em uma escala local de *pixels*, pelo cálculo da equação, dentro de uma região que abrange vários *pixels*, e determinam o pico do critério de correlação. Pode observar que, como no caso de **ZNCC**, a correlação envolve a subtração de uma média local de intensidades de *pixel*, assim como a normalização pelo desvio padrão. Isso resulta em uma correlação que é insensível a variações locais lineares em iluminação (Tong 2005; Pan et al 2009). Pode ser mostrado que as duas correlações estão relacionados através da seguinte relação (Pan et al. 2007):

$$ZNSSD(m, n) = 2[1 - ZNCC(m, n)] \quad (\text{Eq.10})$$

Para ambientes típicos de iluminação encontrados nos laboratórios de geotecnia, esta função demonstra ser a que produz os melhores resultados em termos de predição de deslocamentos.

#### 2.4.4.2.3 Symmetric Phase-only cross correlation (SPOCC)

Este método é, basicamente, uma variação da correlação cruzada descrita acima, no qual um filtro espectral é aplicado ao coeficiente de correlação no domínio de frequência. O método baseia-se na observação de que o componente de fase da **FFT** contém mais informações sobre o movimento do que a amplitude. Por conseguinte, o filtro elimina amplitudes, dividindo-se o coeficiente de correlação por sua magnitude para reter o componente de fase de conversão da imagem no domínio da frequência. O método **SPOCC** de correlação demonstrou ser eficaz na produção de picos de correlação mais nítidas, e para suprimir o ruído de fundo. Os detalhes do método podem ser encontrados em Werner (2006).

#### 2.4.4.3 Obtenção dos deslocamentos

A quarta etapa é a obtenção e a representação gráfica dos vetores de deslocamento. Em um primeiro momento, a região em estudo sofre uma discretização regular através da geração de uma malha análoga as utilizadas em simulação numérica. O tamanho da malha corresponde ao primeiro tamanho da janela de busca configurada.

Num segundo momento, após escolhido a função de correlação apropriada, são encontrados os vetores deslocamento relacionados com cada par de imagem sequencial. No algoritmo DIC avançado, esta janela de busca incorporará um tamanho menor no próximo *step*. A finalidade é identificar e refinar o comportamento do vetor deslocamento em cada janela de interrogação integrantes da malha.

Uma variedade de códigos para a realização das análises DIC, com código aberto (livres) e comerciais estão disponíveis. Um *software* comercial normalmente é destinado a visualização de fluxo utilizando velocimetria de partículas por imagem (PIV), mas é adaptado para solos transparentes. Uma lista de *softwares* de código aberto e comerciais disponíveis para a análise DIC é fornecido na tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Softwares PIV/DIC comerciais e livres disponíveis atualmente.

Nome	Código Aberto	Stereo PIV	GUI	Domínio da Correlação de Imagens	Validação DIC/PIV	Funções Adicionais / Notas	Uso primário
<b>OPEN PIV</b> (Taylor et al. 2010)	Sim	Não	Sim	Frequência	Sim	Sucessor do URAPIV (Primeiro software usado em análises DIC para solos transparentes)	Dinâmica de fluidos
<b>Dynamic Studio</b> (Dantec)	Não	Sim	Sim	Frequência e tempo	Sim	PIV Avançado (Multi-Grid), ferramentas de processamento de imagens incorporada, calibração de imagens, processamento em lotes de imagens	Dinâmica de fluidos e mecânica de sólidos
<b>Geo PIV</b> (White et al. 2003)	Sim	Não	Não	Frequência	Não	Calculo de deformações, módulo de calibração de imagens incluso	Mecânica dos solos
<b>geoMAGIC</b> (Iskander et al. 2015)	Sim	Não	Sim	Frequência e tempo	Sim	Dinâmica em microescala, rastreamento de partículas, DIC Lagrangiano, cálculo de deformações, linguagem MATLAB	Mecânica dos solos
<b>PIV VIEW 2D e 3D (PIVTec)</b>	Não	Sim	Sim	Frequência e tempo	Sim	PIV Avançado (Multi-Grid), ferramentas de processamento de imagens incorporada, calibração de imagens, processamento em lotes de imagens	Dinâmica de fluidos
<b>ProVISION (IDT)</b>	Não	Sim	Sim	Frequência e tempo	Sim	PIV Avançado (Multi-Grid), processamento de imagens incorporada, processamento em lotes de imagens	Dinâmica de fluidos
<b>MATPIV</b>	Sim	Não	Não	Frequência	Não	Processamento em lotes de imagens, linguagem MATLAB	Dinâmica de fluidos
<b>Flow Master e Strain Master (LaVision)</b>	Não	Sim	Sim	Frequência	Sim	PIV Avançado (Multi-Grid), processamento em lotes de imagens	Dinâmica de fluidos
<b>PIVlab</b>	Sim	Não	Sim	Frequência e tempo	Sim	PIV Avançado (Multi-Grid), processamento em lotes de imagens, linguagem MATLAB	Dinâmica de fluidos
<b>VidPIV</b>	Não	Sim	Sim	Frequência	Sim	-	Dinâmica de fluidos
<b>VIC-2D e VIC-3DC</b>	Não	Sim	Sim	Frequência e tempo	Sim	PIV Avançado (Multi-Grid), ferramentas de processamento de imagens incorporada, cálculo de grandes deformações, calibração de imagens, processamento em lotes de imagens	Mecânica dos sólidos e dinâmica dos fluidos

## 2.5 Desenvolvimento de algoritmos auxiliares à Correlação Digital de Imagens (DIC) em linguagem Matlab®

A linguagem Matlab® é uma linguagem de programação universal para computação técnica e científica e processamento de imagens. A seguir são descritos quatro códigos desenvolvidos em linguagem Matlab® utilizados nas análises realizadas nesta tese.

### 2.5.1 Teste para escolha da função de correlação nas análises

Um dos passos da calibração para realizar corretamente as análises é a escolha da melhor função matemática de correlação. O algoritmo `correlation_config.mat` encontra-se no apêndice D deste trabalho. Este algoritmo utiliza duas imagens de referência do ensaio e testa as funções matemáticas de correlação mais prevalentes na literatura. Segundo Westerweel (1997) a melhor função matemática de correlação é aquela que gera picos de correlação mais estreitos, o que indica precisão e acurácia. O apêndice A deste trabalho mostra as etapas de calibração para ensaios, inclusive os resultados e um exemplo de aplicação deste algoritmo.

### 2.5.2 Binarização

A binarização é o método mais simples de segmentação de imagens. Consiste em converter uma imagem com níveis de cinza para uma imagem com representação binária (dois tons) com o objetivo de identificar objetos e separá-los do fundo da imagem. A binarização é utilizada para verificar qual a quantidade ótima de partículas opacas devem ser adicionadas na preparação de uma amostra de solo transparentes utilizando a técnica da camada opaca (*embedded plane*) apresentada nesta tese. Nesta análise o objetivo da binarização é a obtenção da concentração de partículas opacas em cada amostra de controle testada. O algoritmo `binarization.mat` escrito em linguagem MATLAB encontra-se no apêndice D deste trabalho.

### 2.5.3 Campos de Deformação Cisalhante e Volumétrica a partir dos resultados da Correlação Digital de Imagens (DIC)

Os vetores de deslocamento obtidos a partir da análise DIC podem ser utilizados para calcular as deformações utilizando a teoria das pequenas deformações da mecânica do contínuo. A teoria das deformações infinitesimais é uma aproximação da teoria das pequenas deformações, e só é válida matematicamente para pequenas (infinitesimais) deformações e rotações. Uma formulação de pequenas deformações foi utilizada na escrita deste algoritmo para calcular as deformações e rotações a partir de campos de deslocamento DIC obtidos das análises. Com este objetivo, a imagem é inicialmente discretizada em elementos triangulares, ligando pontos vizinhos centrais das janelas de interrogação. A discretização é obtida utilizando-se uma série de algoritmos, a maioria dos quais têm sido derivados da análise por elementos finitos.

Neste código, foi utilizado a *triangulação Delaunay* (de Berg et al., 2008), que baseia-se na ligação de pontos discretos numa malha triangular de forma que a circunferência de cada triângulo não contenha pontos a partir de qualquer outro triângulo.

Após a discretização em elementos triangulares, os componentes de deformação são calculados para cada elemento usando deslocamentos nodais obtidos a partir da análise DIC. Uma vez que cada nó de um triângulo corresponde a um centro de uma janela de interrogação, os componentes de deslocamento horizontal e vertical de cada nó também estão disponíveis a partir da análise DIC.

Uma forma simples de cálculo de deformações a partir dos deslocamentos nodais é empregar funções de forma, muito utilizadas na análise de elementos finitos: Na implementação deste algoritmo, os triângulos de deformação constante (TDC) foram empregados, o que resulta em funções de forma linear.

A Figura 2.27 mostra, esquematicamente, a discretização de uma análise em elementos triangulares. Os deslocamentos nodais  $x_i$ ,  $y_i$  do triângulo TDC em coordenadas globais são obtidos a partir da análise DIC.

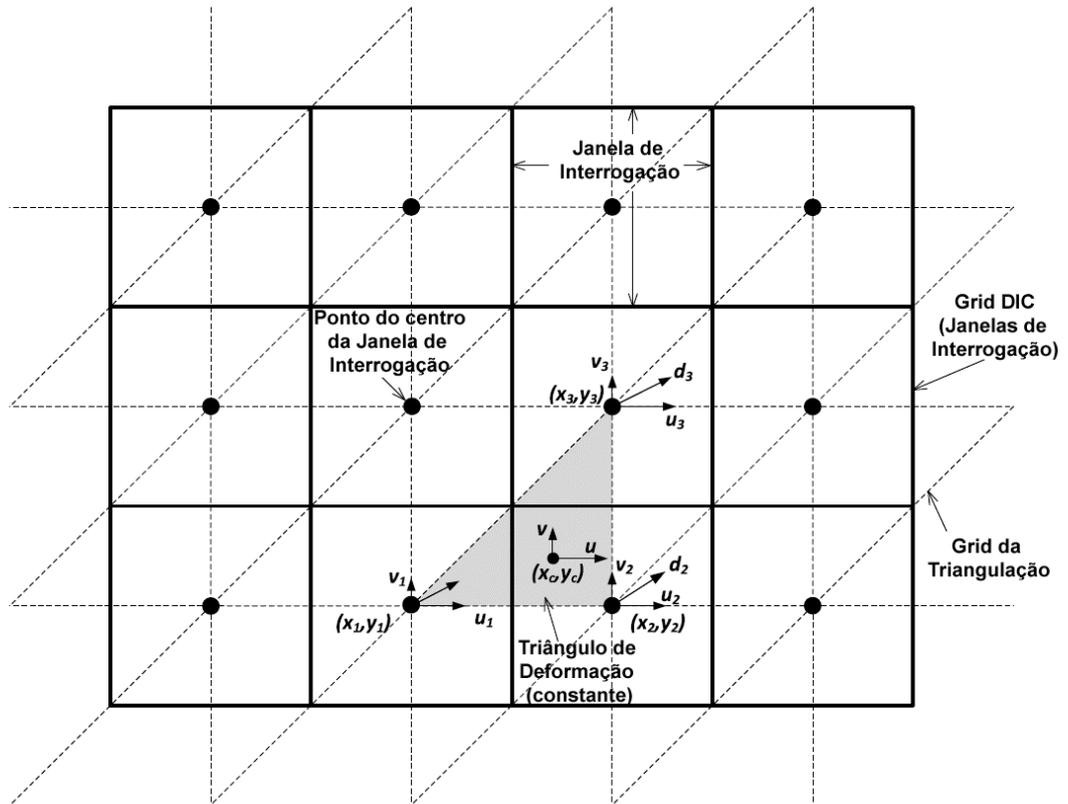


Figura 2.27 - Triângulo constante de deformação resultante de três pontos adjacentes no centro da janela de interrogação DIC (O diagrama representa 12 janelas de interrogação DIC).

A matriz deslocamento  $u$  do elemento pode ser escrito em termos de funções de forma, triângulos de deformação constante (TDC),  $N_i$ , e deslocamentos nodais,  $d$ , como mostrado abaixo (Onate 2009):

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}d \quad (\text{Eq.11})$$

Onde:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq.12})$$

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.13})$$

$$\mathbf{d} = \{u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3\}^T \quad (\text{Eq.14})$$

Fica claro da equação 11 que os deslocamentos de qualquer ponto do triângulo pode ser escrito como uma função linear dos deslocamentos nodais. A função de forma  $N_i$  pode ser escrita em termos das funções globais, como:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{2A} \{ (x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y \} \\ N_2 &= \frac{1}{2A} \{ (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y \} \\ N_3 &= \frac{1}{2A} \{ (x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y \} \end{aligned} \quad (\text{Eq.15})$$

onde A é a área do elemento, escrita como:

$$A = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.16})$$

O gradiente de deslocamento,  $\mathbf{L}$ , pode ser obtido por diferenciação parcial de  $\mathbf{u}$  na equação 11 após a substituição das funções de forma e os deslocamentos nodais a partir das equações 13 e 14, em conjunto, para obter:

$$\mathbf{L} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & -y_{13} \\ -x_{23} & x_{13} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{13} & v_{13} \\ u_{23} & v_{23} \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq.17})$$

A matriz gradiente de deslocamento na equação 17 é então utilizada para derivar as deformações e rotações primárias através de relações de cinemática do contínuo. A descrição espacial das deformações do contínuo é expressa utilizando o gradiente de deformação,  $\mathbf{F}$ , que está relacionada com o gradiente de deslocamento pela relação  $\mathbf{F} = \mathbf{L} + \mathbf{I}$ , onde  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade. De acordo com o teorema de decomposição polar, a matriz do gradiente de deformação pode ser escrita como o produto de uma matriz ortogonal,  $\mathbf{R}$ , conhecida como a matriz de rotação, e uma matriz simétrica,  $\mathbf{U}$ , conhecida como matriz elástica isto é,  $\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{U}$  (Lai et al. 2010). A matriz simétrica  $\mathbf{U}$  descreve a elasticidade sem rotação, enquanto a matriz ortogonal  $\mathbf{R}$  representa a rotação, sem elasticidade. O efeito combinado de  $\mathbf{U}$  e  $\mathbf{R}$  é, portanto a deformação e a rotação de um elemento no contínuo.

A matriz elástica é usada para definir as deformações da mecânica do contínuo. A deformação *Cauchy-Green* é definida como  $\mathbf{C} = \mathbf{U}^2$ . Várias definições de deformação podem ser encontradas na literatura (por exemplo, Lai et al. 2010). Outras Definições incluem a deformação verde lagrangiana (também conhecido como a deformação finita lagrangiana),  $\mathbf{E} = \frac{1}{2} (\mathbf{C} - \mathbf{I})$ , deformação Almansi,  $\mathbf{E} = \frac{1}{2} (\mathbf{I} - \mathbf{U}^2)$ , deformação logarítmica,  $\mathbf{E} = \frac{1}{2} (\ln \mathbf{C})$ , e deformação de Biot,  $\mathbf{E} = (\mathbf{C}^{1/2} - \mathbf{I})$ .

Todas as definições de deformação referidas podem ser implementadas no algoritmo descrito acima. Neste algoritmo, encontrado no apêndice D deste trabalho, a implementação da deformação foi demonstrada através do emprego da deformação logarítmica, porque grandes deformações foram antecipadas. Além disso, os cálculos de deformação logarítmica facilmente acomodam o mapeamento da acumulação incremental de deformação. Finalmente, a deformação de Biot foi utilizada para identificar as deformações iniciais, uma vez que estas não eram conhecidas a priori. A deformação máxima de cisalhamento logarítmica pode ser escrito como:

$\gamma_{\log, \max} = \epsilon_{\log, I} - \epsilon_{\log, II}$ , onde os subscritos indicam as deformações principais, que podem ser obtidos como  $\epsilon_{\log, I} = \ln(1 + \epsilon_{\text{eng}, I})$ , e  $\epsilon_{\log, II} = \ln(1 + \epsilon_{\text{eng}, II})$ . As deformações,  $\epsilon_{\text{eng}, I}$  e  $\epsilon_{\text{eng}, II}$  são os autovalores da deformação de Biot.

Como observado, a matriz  $R$  é uma matriz ortogonal que descreve a rotação. A rotação do elemento do solo em relação às coordenadas globais pode ser escrita como:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.18})$$

Finalmente, pode ser demonstrado que o volume inicial,  $V_0$ , e o volume da deformada,  $dV$ , do contínuo pode ser relacionado com  $dV = dV_0 J$ , onde  $J = |\det \mathbf{F}|$  é conhecido como o Jacobiano (Lai et al. 2010.). A deformação volumétrica,  $\epsilon_v$ , pode, portanto, ser calculada utilizando o Jacobiano, como  $\epsilon_v = (dV - dV_0) / dV_0 = J - 1$ .

#### 2.5.4 Trajetórias da partícula de solo

As Trajetórias dos elementos podem ser obtidas através da integração de deslocamentos incrementais do centro das janelas de interrogação a partir da análise de DIC. Isto pode ser conseguido usando tanto quadros de referência *Euleriana* e *Lagrangiana*. Em um referencial *Euleriano*, a trajetória é obtida para o ponto central de todas as janelas de interrogação por integração direta dos deslocamentos incrementais em cada janela de interrogação. Os deslocamentos incrementais podem então ser integrados em cada ponto fixo no centro, para se obter a trajetória *Euleriana* das partículas do solo dentro de cada janela de interrogação. Um código chamado `EDIC.mat`, que implementa a trajetória *Euleriana*, encontra-se no apêndice D deste trabalho.

As trajetórias das partículas do solo também podem ser obtidas por meio da análise *Lagrangiana*. Em uma estrutura de referência lagrangiana a origem é fixada

no centro de cada janela de interrogação, e assume-se seguir os deslocamentos encontrados em cada janela de interrogação. O resultado é que a localização aproximada de um grupo de partículas, inicialmente contidas dentro de uma janela de interrogação, é tomada como um deslocamento acumulado. Para os campos de deslocamento com vetores ligeiramente diferentes, os métodos *Eulerianos* e *Lagrangianos* geralmente produzem resultados semelhantes. No entanto, quando o campo de deslocamento compreende vetores de deslocamento com grandes gradientes entre imagens consecutivas, ou dentro do próprio campo de deslocamento, as previsões *Lagrangianas* de movimento e fluxo devem ser utilizadas (Yeung 2002).

Deslocamentos *Lagrangianos* exigem interpolação das coordenadas usando deslocamentos conhecidos que, no caso de análise de DIC, são os deslocamentos nos pontos centrais das janelas de interrogação. O método adotado no código `LDIC.mat` para a interpolação dos deslocamentos Lagrangianos na análise DIC consiste em empregar a *triangulação Delaunay* com os vértices definidos pelos pontos centrais das janelas de interrogação iniciais indeformadas. É importante notar que a malha triangular é uma malha virtual utilizada para gerar deslocamentos Lagrangianos, e é independente da malha DIC. Em outras palavras, as duas malhas não interagem entre si. As trajetórias são obtidas utilizando as funções de forma descritos pelas equações 15. O algoritmo `LDIC.mat` encontra-se no apêndice D deste trabalho. O algoritmo pode ser resumido em oito etapas como se segue:

1. Triangular a imagem usando triangulação Delaunay, com pontos centrais da janela de interrogação DIC como vértices do triângulo;
2. Realizar a análise DIC entre duas imagens consecutivas para derivar os deslocamentos incrementais nos pontos centrais das janelas de interrogação;
3. Aplicar os deslocamentos incrementais do incremento da análise DIC para cada nó, e atualizar a malha deformada de triangulação resultante dos deslocamentos incrementais;
4. Para cada nó da malha deformada, encontrar o triângulo na malha não deformada que contém o nó; associar esse triângulo com o nó dado para os próximos passos;

5. Realizar análise DIC no próximo par de imagens;
6. Para cada nó na malha deformada do passo 4, estimar os deslocamentos nodais utilizando os deslocamentos nodais dos vértices do triângulo principal. (Isto é obtido utilizando as funções de forma descrita acima para TDC, e a precisão da estimativa depende da função de forma adotada. Uma estimativa de primeira ordem pode ser obtida utilizando a formulação TDC, enquanto que as funções mais elevadas de forma podem levar a um aumento da precisão).
7. Para cada nó, adicione os deslocamentos nodais estimados a partir da etapa 6 para os deslocamentos nodais existentes, e
8. Realizar a análise DIC no próximo par de imagens consecutivas, e repita os passos 3-7.

A acumulação dos deslocamentos Lagrangianos utilizando os passos descritos acima resultam na trajetória lagrangiana para cada elemento, isto é, para cada janela de interrogação DIC. As trajetórias Eulerianas podem ser obtidas pela simples adição de resultados incrementais DIC no centro de cada janela de interrogação, sem atualizar as posições da janela de interrogação.

#### 2.5.5 Trajetórias de Lagrange

O resultado de uma análise DIC são os deslocamentos incrementais nas janelas de interrogação. Complementando este resultado, muitas vezes é desejável calcular os deslocamentos cumulativos resultantes da penetração. A fim de fazer isso, deslocamentos elementares podem ser adicionados a pontos centrais nas janelas de interrogação fixa DIC em uma sequência de análises. Isso resulta em deslocamentos cumulativos em um quadro *Euleriano*, que já foi comentado acima. No entanto, por exemplo, durante um evento cinemático de penetração rápida, espera-se que regiões com grandes gradientes formem-se em torno do projétil. Em tais casos, a integração de deslocamentos incrementais de pontos nodais fixos das análise DIC podem resultar em um erro significativo. Portanto, é desejável a obtenção de deslocamentos Lagrangianos em problemas de gradiente elevado de deslocamento. O passo a passo do método foi descrito acima, onde os deslocamentos incrementais das análise

sequenciais DIC foram usadas para atualizar a malha durante a penetração, por meio de *triangulação Delaunay* e interpolação linear. O método permite a predição de grandes deslocamentos, com gradientes de deslocamento elevados. Os deslocamentos acumulados apresentados nas próximas seções foram obtidos utilizando o método *Lagrangiano* descrito acima. A figura 2.28 apresenta resultados de deslocamento acumulado e deformações cisalhantes e volumétricas utilizando o algoritmo `LDIC.mat` e `LS.mat` na penetração de uma estaca em areia.

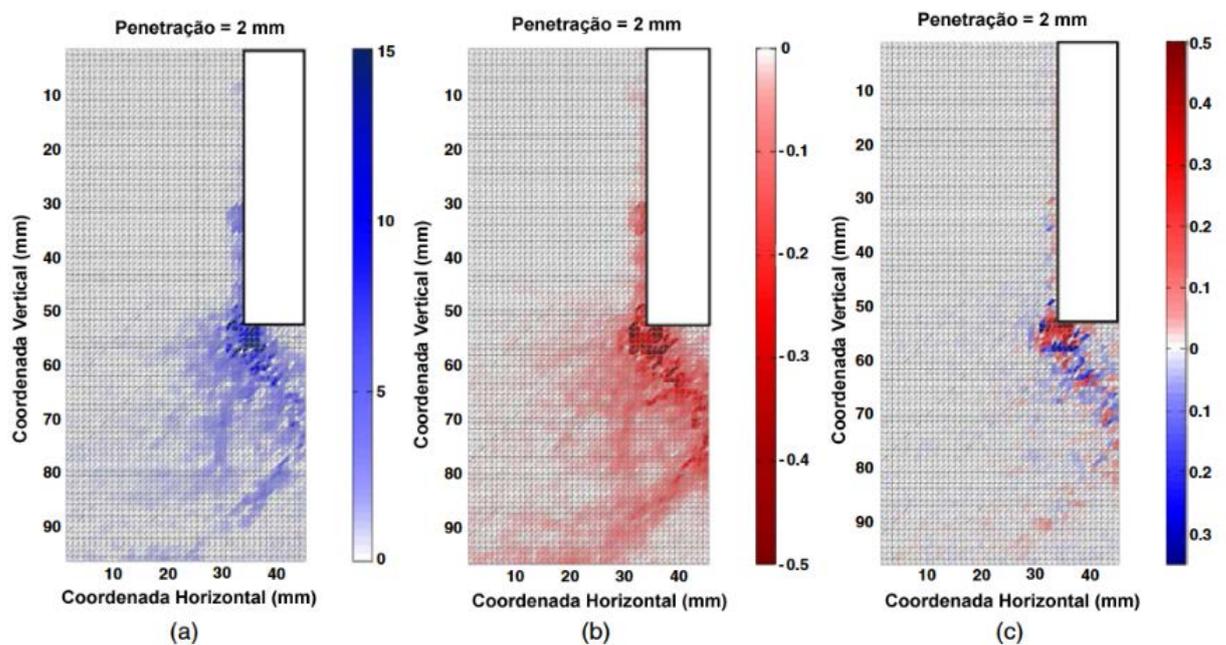


Figura 2.28 – Exemplo de resultados com o uso do algoritmo: a) deslocamento acumulado; b) deformação cisalhante; c) deformação volumétrica.

## 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado os materiais e métodos utilizados na consecução dos trabalhos que compõem esta tese. Esta tese compreende seis etapas distintas, porém complementares. A primeira etapa consiste na pesquisa e na busca de poros fluidos constituídos de óleos minerais de origem Brasileira para a produção de solos transparentes. Esta parte da tese foi realizada no laboratório de solos transparentes do LECIV/UENF.

A segunda etapa consiste na realização de diversos ensaios geotécnicos para testar o comportamento do poro fluido obtido e dos materiais substitutos do solo natural adquiridos para esta pesquisa: Parte dos ensaios foram realizados no laboratório de mecânica dos solos do LECIV/UENF e outra parte no laboratório de mecânica dos solos da Universidade de Nova York (NYU).

A terceira etapa compreende o estudo geotécnico de um novo poro fluido desenvolvido a base de água e de um sal – o iodeto de sódio – para uso no preparo de solos transparentes. Esta etapa foi desenvolvida integralmente no laboratório de solos transparentes da Universidade de Nova York.

A quarta etapa consiste em aplicações da técnica de análise DIC em dois problemas geotécnicos utilizando areia natural: O primeiro problema consiste no estudo da interação e interferência entre duas sapatas próximas entre si; O segundo problema consiste no estudo do mecanismo de deformação no arrancamento de dutos com o uso de geogrelhas de diferentes comprimentos. Estas etapas da tese foram realizadas no laboratório de testes de materiais da Universidade de Nova York (NYU).

A quinta etapa consiste no estudo da cinemática da penetração de dois projéteis, com diferentes pontas: reto e cônico utilizando solos transparentes. Esta etapa foi realizada no laboratório de solos transparentes da Universidade de Nova York (NYU).

Por fim, a sexta etapa desta tese consiste no estudo do mecanismo de deformação durante o arrancamento de estacas torpedo utilizando solos transparentes. Esta etapa foi realizada no laboratório de solos transparentes da

Universidade de Nova York. A seguir, são descritos os materiais e métodos utilizados em cada etapa para a elaboração desta tese.

### 3.2 MATERIAIS TESTADOS

Segundo Iskander et al. (2010) as sílicas em pó amorfas modelam com grande proximidade o comportamento das argilas; As sílicas gel modelam o comportamento das areias grossas e médias, porém não conseguem reproduzir com proximidade o comportamento das areias finas, sendo portanto, o quartzo fundido o material mais apropriado (Ezzein e Bathurst, 2012).

O grande desafio deste trabalho, ainda no período de pesquisa no Brasil, foi a busca de materiais que pudessem ser adquiridos em território nacional e que a qualidade e pureza destes materiais fossem satisfatórias para produção de solos transparentes. A grande maioria das sílicas gel e em pó comerciais, em suas diferentes granulometrias, encontradas no Brasil são de origem chinesa. Durante o período de busca de fabricantes, não foi encontrado nenhum fabricante de quartzo fundido no Brasil.

Iskander e Omidvar (2014) alertaram que um atual limitante para a produção de solos transparentes que apresentam elevada transparência para uso em ensaios geotécnicos é encontrar um fabricante de quartzo fundido que forneça o material sem impurezas e com alto nível de transparência. Este fato é também devido os grãos do quartzo fundido serem rejeitos de outros processos de transformação, principalmente na indústria de lentes óticas, o que justifica a falta de cuidado e preocupação por parte dos fabricantes com a pureza e transparência do material.

Materiais de várias empresas foram testados nos últimos anos. Porém o que ocorre, é a falta de regularidade da qualidade dos diferentes lotes de quartzo fundido inviabilizando seu uso para produção de solos transparentes. Os lotes mais regulares e de melhor transparência foi o da empresa *Mintec - Mineral Technologies Corporation*, EUA. Porém a empresa vem gradativamente reduzindo sua produção e interrompeu a venda de produtos para o exterior. Diante deste fato, o grupo de pesquisa liderado pelo professor Magued Iskander retomou as buscas por um fabricante de quartzo fundido que apresentasse regularidade de qualidade em seus diferentes lotes, tivesse alta pureza e preço competitivo. Uma empresa chinesa foi a única dentre várias pesquisadas que atendeu a estes requisitos.

Um tipo de sílica gel esférica e angular foram adquiridos pelo LECIV/UENF para serem testados em uma investigação geotécnica detalhada. O primeiro tipo de sílica gel possui a forma esférica e é referida com o código **SG-1**. O segundo tipo é angular e é referida com o código **SG-2**. Estes materiais foram selecionados por duas razões: a) Facilidade de aquisição por ser tratar de empresa nacional e/ou importador nacional e b) acredita-se que a faixa de dimensões dos grãos disponíveis possam ser utilizados para a modelagem de areia média a areia grossa.

Para o quartzo fundido, selecionou-se o material de duas empresas fornecedoras: A *Accumet Corporation – NY-USA* e a *Mintec – Mineral Technologies Corporation, inc.* empresa já mencionada em trabalhos anteriores por possuir os grãos de quartzo fundido mais transparentes com ausência de micro bolhas de ar em seu interior. O quartzo fundido da *Accumet Corporation* foi adquirida pelo LECIV/UENF e o quartzo fundido da *Mintec – Mineral Technologies Corporation* foi utilizada no período de pesquisa na Escola politécnica da Universidade de Nova York – NYU. A tabela 3.1 mostra os materiais testados neste trabalho com algumas propriedades físicas selecionadas.

Tabela 3.1– Materias granulares testados nesta pesquisa.

Material	Tamanho médio das partículas (mm)	Fabricante	Índice de Refração
			25 ° C
Sílica gel ( <b>SG-1</b> )	1,0 – 3,0	<i>Sinchen Chemical co. Ltd – China</i>	1,4420 <sup>a</sup>
Sílica gel( <b>SG-2</b> )	0,7 – 1,5	Saraguagi Ind. e. Com. LTDA	1,4420 <sup>a</sup>
Quartzo Fundido ( <b>QF-A</b> )	0,4 -1,5	<i>Accumet Corporation – NY-USA</i>	1,4585 <sup>a</sup>
Quartzo Fundido ( <b>QF-1</b> )	0,4 -1,5	Mintec quartz, inc.	1,4585 <sup>a</sup>
S.M.C.A <sup>b</sup>	<b>N.D</b>	UENF	N.D <sup>c</sup>

<sup>a</sup>Os índices de refração dos materiais granulares utilizados neste estudo foi baseado na medição do índice de refração do poro fluido ótimo que deixava a mistura com o maior nível de transparência possível.

<sup>b</sup> Sílica micronizada da casca de arroz, obtido por um processo patentado “SOL-GEL”

<sup>c</sup> Não disponível

Foi testado também uma sílica em pó obtida da casca do arroz por um processo patenteado denominado SOL-GEL. Esta sílica em pó é obtida pelo grupo de materiais compósitos do LECIV/UENF. Porém esta sílica quando entra em contato com óleos minerais modifica sua coloração para uma cor escura inviabilizando a produção de solos transparentes. Diante deste fato, este material foi descartado e não foi utilizado em testes de caracterização geotécnica. Outro material que foi descartado foi o quartzo fundido (**QF-A**) da empresa *Accumet Corporation, USA*, devido a baixa pureza do quartzo fundido entregue pelo fabricante.

### 3.3 PROGRAMA DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Com o objetivo de pesquisar um poro fluido nacional para fabricação de solos transparentes e caracterizar o comportamento geotécnico dos materiais substitutos do solo - sílica gel esférica (**SG-1**), sílica gel angular (**SG-2**), e quartzo fundido (**QF-1**) um programa de ensaios de laboratório foram executados como descrito a seguir:

- a) Seleção de óleos transparentes nacionais e obtenção do índice de refração (IR) dos óleos minerais candidatos a compor o poro fluido;
- b) Pesquisa de um poro fluido não viscoso a base de água; Este trabalho introduz um novo poro fluido não viscoso a base de água, baseado na mistura de água com iodeto de sódio tratado com tiosulfato de sódio;
- c) Análise granulométrica dos grãos; a análise foi realizada segundo prescrições da NBR 7181/1984.;
- d) Peso específico dos grãos ou dos sólidos; conforme prescrição da norma ABNT, NBR 6508/1984;
- e) Análise por microscopia eletrônica;
- f) Ensaio de cisalhamento direto; seguindo a ASTM D3080;
- g) Ensaio triaxial; os ensaios de compressão triaxiais drenados no quartzo fundido seguiram a norma ASTM D7181-11;
- h) Ensaio de permeabilidade na sílica gel SG-1, SG-2 e quartzo fundido QF-1 seguindo o método de parede flexível de acordo com a ASTM D5084-10;
- i) Análise da variação do IR com a temperatura; Foi estabelecido uma metodologia experimental para avaliar a variação do IR dos poro fluidos com a temperatura;

- j) Ensaio de degradação da membrana de látex: Este ensaio utilizou a metodologia proposta por Zhao et al., 2010;
- k) Reaproveitamento do poro fluido e reutilização dos solos transparentes;

A seguir, os procedimentos utilizados em cada etapa do programa de ensaios de laboratório são apresentados.

### 3.3.1 SELEÇÃO DE PORO FLUIDOS NACIONAIS

A primeira etapa dos ensaios de laboratório, compreendeu a busca de óleos minerais de fabricação nacional para a produção dos solos transparentes. Na busca do poro fluido para compor o solo transparente neste trabalho, algumas condições foram impostas como critério de eliminação para modelagem em laboratório devido uma ou várias das seguintes razões:

- a) a volatilidade excessiva de líquido, levando a mudanças na composição e, portanto, alterações no índice de refração com o tempo;
- b) Risco potencial à saúde devido à possibilidade de inalação de fumos tóxicos inflamáveis não compatíveis com os níveis de segurança para ambientes geotécnicos de laboratório;
- c) Alta viscosidade do líquido;
- d) Alto custo.

Doze óleos minerais, produzidos no Brasil, foram analisados para obtenção do índice de refração (Figura 3.1):

- a) Glicerina;
- b) Glicerina bi-destilada “Reagel”;
- c) Vaselina líquida “Imperial”
- d) Vaselina líquida “farmax”
- e) Querosene “LTC”
- f) Nujol®
- g) Mineróleo
- h) Propilenoglicol
- i) Oleo de bebê transparente da empresa Johnson’s & Johnson’s®

- j) Acetona
- k) Óleo para Tochas “*Garden Light*”
- l) Butanol

Outros óleos foram testados, como:

- m) Vaselina líquida “*Reagel*”
- n) Óleo de girassol
- o) Fluorolube
- p) Tolueno
- q) Álcool isopropílico



Figura 3.1 – Alguns óleos minerais analisados como candidatos a poro fluidos neste trabalho.

Quatro óleos minerais, produzidos no EUA e Canadá, foram analisados para obtenção do índice de refração:

- a) Drakeol 35
- b) Norpar 12

- c) Puretol 40
- d) Krystol 7

### 3.3.1.1 Refratômetros portáteis

Para a leitura do índice de refração dos fluidos foi utilizado um refratômetro portátil digital da marca QUIMIS modelo Q7476 do LECIV/UENF e um refratômetro analógico portátil ATAGO do laboratório de solos transparentes da NYU (Fig. 3.2). Algumas leituras foram realizadas no Brasil e outras nos Estados Unidos. Ambos os refratômetros operam a leitura na faixa do sódio D com comprimento de onda de 587,3 nm. Ambos os refratômetros podem medir uma ampla gama de índices de refração que compreende a faixa de 1,3300-1,5600 com uma precisão de  $\pm 0,0001$  nD.



Figura 3.2 - Refratômetros portáteis do laboratório de solos transparentes do LECIV (esquerda) e da NYU (direita).

### 3.3.1.2 Procedimento

Devido a dificuldade de encontrar um fluido que possua em condições normais de pressão e temperatura o mesmo índice de refração da sílica gel, do pó de sílica amorfa e do quartzo fundido pelo menos a mistura de dois óleos diferentes faz-se necessário para atingir estes índices de refração desejáveis de uma forma artificial. Estes fluidos foram selecionados com base em seu índice de refração e sua viscosidade. A sílica gel e o pó de sílica amorfa possuem o mesmo índice de refração de  $IR=1,442$  a  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; O

quartzo fundido possui índice de refração de  $IR=1,4585$  a  $22^{\circ}$  C. Por definição, os poro fluidos “base” são aqueles que possuem índice de refração superior a partícula sólida que se deseja misturar e os poro fluidos de compensação são aqueles que possuem índice de refração inferior à partícula sólida que se deseja misturar. Portanto, no caso da sílica gel e pó de sílica amorfa foram selecionados os fluidos com um índice de refração maior e menor do que  $1,442$ . Aqueles com índice de refração maior do que  $1,442$  foram tomados como poro fluidos base, e aqueles com um índice de refração inferior a  $1,442$  foram tomados como poro fluidos de compensação; O mesmo foi realizado para o quartzo fundido: Os poro fluidos com índice de refração maior do que  $1,4585$  foram tomados como poro fluidos base, e aqueles com um índice de refração inferior a  $1,4585$  foram tomados como poro fluidos de compensação.

Em seguida, por tentativa e erro os poro fluidos de compensação foram adicionados gradualmente ao poro fluido base até alcançar o IR desejado. A relação de volume entre o poro fluido base e o poro fluido de compensação foi então registrado, e o seu índice de refração foi medido com o auxílio do refratômetro. Durante o ensaio, a temperatura foi mantida a  $25^{\circ}$  C.

### 3.3.2 PESQUISA DE UM PORO FLUIDO NÃO VISCOSO A BASE DE ÁGUA

Segundo Ezzein e Bathurst (2012), para a correta simulação do comportamento do solo natural, o poro fluido selecionado deve ter as seguintes propriedades:

- A viscosidade cinemática idêntica ou próxima a da água;
- A tensão superficial próxima a da água;
- Incompressibilidade;
- Baixa ou nenhuma interação com a sílica gel, as membranas de látex (ensaios triaxiais) e as paredes do recipiente do modelo.

Os poro fluidos atualmente utilizados para preparar modelos de solo transparentes com quartzo fundido consistem de uma mistura de óleo mineral (Ezzein e Bathurst, 2011) e sacarose (Guzman e Iskander 2013). Embora ambos os materiais sejam inertes e seguros para o manuseamento e preparação da amostra, a mistura de óleo mineral não é à base de água, e a sacarose tem uma elevada viscosidade de  $0,2012$  Pas.

Para superar estas limitações, uma solução à base de água, um dos resultados promissores desta tese é introduzida como poro fluido. A solução consiste em iodeto de sódio misturado com água. Iodeto de sódio é um sal que está disponível na forma sólida. A 23° C, o RI da água é 1,330, e pode ser aumentado até o limite de 1,501 com a adição de iodeto de sódio.

O iodeto de sódio é altamente solúvel em água à temperatura ambiente, mas dissolve-se rapidamente em água quente. A uma concentração de 55% em peso (105 g/100 ml de água), o IR do iodeto de sódio é 1,457 a 23° C. As principais vantagens do iodeto de sódio como componente na preparação de solos transparentes é que (1) a viscosidade do poro fluido é comparável com a da água, e (2) o líquido é à base de água, permitindo uma modelagem mais realista de aplicações geoambientais. O composto é utilizado como um suplemento dietético para tratar a deficiência de iodo, e é amplamente usado em detectores de cintilação, em geofísica, monitoramento ambiental e em levantamentos aéreos (Lyday,2000). As propriedades físicas e químicas do iodeto de sódio e do tiosulfato de sódio podem ser encontradas na tabela 3.2.

Tabela 3.2- Propriedades físicas do iodeto de sódio e tiosulfato de sódio.

<b>Propriedade</b>	<b>Iodeto de sódio</b>	<b>Thiosulfato de sódio</b>
CAS No.	7681-82-5	10102-17-7
Densidade Relativa	3,670 g/cm <sup>3</sup>	1,729 g/cm <sup>3</sup>
Aparência	Branco a um pó amarelado	Cristais brancos ou pó
Solubilidade em água	Solúvel (81 g/l a 20 °C)	Solúvel (33%)
pH	5-9,5 (5% Sol.)	6,0-8,4 (25 °C, 5%)
Índice de refração a 22 ° C	1,7747	1,489

### 3.3.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS

Os parâmetros de caracterização física dos solos foram determinados a partir de amostras de sílica gel 1 (**SG-1**), amostras de sílica gel 2 (**SG-2**) adquiridos pelo LECIV e quartzo fundido (**QF-1**) da NYU. Os ensaios realizados no Laboratório de

Solos do LECIV/UENF, seguiram as especificações prescritas pelas seguintes normas da ABNT:

NBR – 7181/88: Análise Granulométrica

NBR – 6508-84: Peso específico dos grãos

### 3.3.4 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA

A microscopia eletrônica é uma importante técnica para determinar tamanho e forma de estruturas cristalinas e amorfas; inorgânicas e biológicas. No caso de amostras cristalinas, também pode revelar a composição das partículas. A microscopia eletrônica baseia-se na interação de elétrons incidentes sobre a matéria. Muitos são os efeitos desta interação e o comprimento de onda do elétron, variando entre 0,1 e 1nm, fornece informações de resolução atômica que são utilizadas não apenas pela microscopia eletrônica, mas por diversas técnicas analíticas.

Neste trabalho, foi utilizado o microscópio eletrônico *Olympus LEXT* (Figura 3.3) do laboratório de materiais avançados – LAMAV/UENF para uma caracterização morfológica dos materiais granulares utilizados para a fabricação de solos transparentes.



Figura 3.3 – Microscópio eletrônico da UENF/LAMAV

### 3.3.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Ensaio de cisalhamento direto foram realizados em amostras de sílica gel SG-1 e SG-2 e quartzo fundido (QF-1) utilizando o método de ensaio ASTM D3080. As amostras foram ensaiadas secas, com água e por fim uma mistura de dois óleos minerais de mesmo índice de refração da sílica (solo transparente). O equipamento de ensaios de cisalhamento direto do LECIV/UENF foi utilizado nesta pesquisa (Fig. 3.4).



Figura 3.4 - Equipamento de cisalhamento direto do laboratório de solos LECIV/UENF.

#### 3.3.5.1 Preparação das amostras

Os ensaios foram realizados numa caixa de cisalhamento com dimensões de 100x100x50 mm (comprimento x largura x altura). A caixa é dividida horizontalmente em duas metades. A força normal do corpo de prova é aplicada a partir do topo na caixa de cisalhamento. Tensões normais de 50, 100 e 200 kPa foram aplicadas. Nos ensaios de deformação controlada, uma taxa constante de deslocamento cisalhante igual a 0,5 mm/min foi aplicado a uma metade da caixa por um motor que atua por meio de engrenagens.

Para o ensaio com a mistura de óleo mineral, os grãos de sílica gel foram pluvias em três camadas. Após o colocação de cada camada de sílica gel, a caixa de testes foi deixada aberta por 2 horas para permitir a saída do ar aprisionado, até que a mistura ficasse transparente (100% saturação). A figura 3.5 mostra os diversos

momentos do ensaio da sílica gel 2 (SG-2) com água. Um resumo dos ensaios de cisalhamento direto realizados na sílica gel SG-1 e SG-2 são apresentados nas tabelas 3.3 e 3.4 respectivamente.

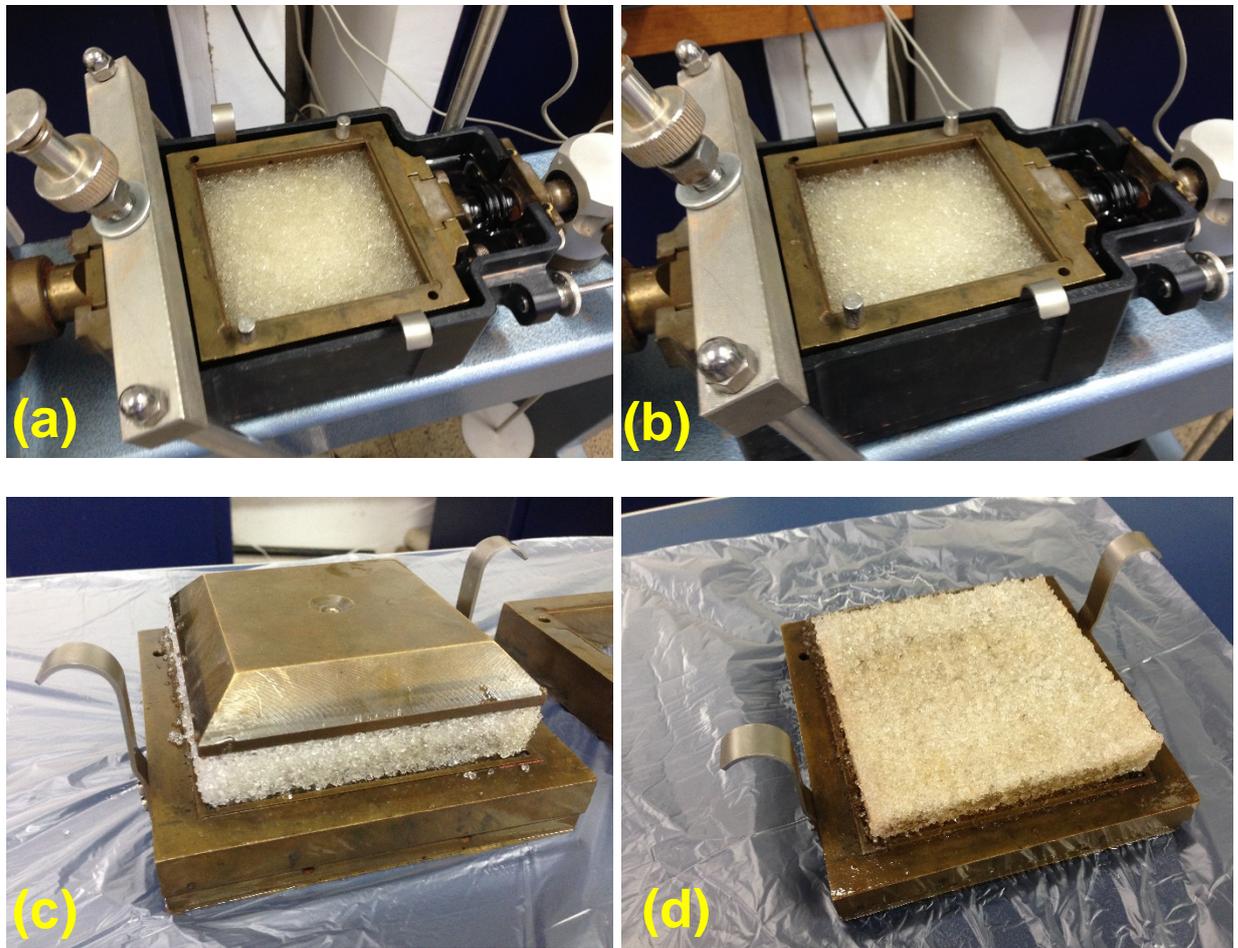


Figura 3.5 - Ensaio de cisalhamento direto na sílica gel (SG-2)

A figura 3.6 apresenta imagens do ensaio do quartzo fundido com água. Um resumo dos ensaios de cisalhamento direto realizados no quartzo fundido são apresentados na tabela 3.5.



Figura 3.6 - Ensaio de cisalhamento direto no quartzo fundido.

### 3.3.5.2 Propriedades físicas da sílica gel

A sílica gel é uma forma amorfa, altamente porosa, parcialmente hidratada de sílica, que é uma substância produzida a partir dos dois elementos mais abundantes na crosta terrestre, o silício e oxigênio. A sílica (dióxido de silício) e silicatos formam em conjunto 55% da crosta terrestre. A sílica gel é inerte e não tóxica. A estrutura interna das partículas de sílica gel é muito diferente das partículas de areia devido o grande número de micro poros contidas em seu interior. Este fato afeta todas as propriedades físicas deste material quando comparadas com as propriedades físicas da areia.

#### 3.3.5.2.1 Índice de vazios da sílica gel

O cálculo de índice de vazios para a sílica gel é diferente em relação ao solos naturais, devido a existência de poros no interior de suas partículas. Estes vazios no interior da partícula não devem ser considerados no cálculo de índice de vazios para qualquer propósito em engenharia geotécnica. Neste respeito a sílica gel exibe o mesmo comportamento da sílica amorfa em pó. A equação abaixo estima o índice de vazios entre os grãos baseado no diagrama de fases e assumindo uma constante chamada de fator de adsorção " $a$ ". O fator de adsorção para a sílica gel é assumido como sendo de  $0,43 \text{ cm}^3$  por grama de sílica para a sílica gel (Sphinx, 1993 apud Iskander 2010).

$$e_i = \frac{V_v - V_{vi}}{V_s + V_{vi}} = \frac{e - a\gamma_s}{1 + a\gamma_s} \quad (\text{Eq. 19})$$

Onde:

$V_v$  é o volume total de vazios;

$V_{vi}$  é o volume de vazios no interior dos grãos;

$\gamma_s$  é peso específico do sólido;

$V_s$  é o volume de sólidos;

$a$  é o fator de adsorção.

O fator de adsorção “ $a$ ” é definido como o volume de poro fluido absorvida por unidade de peso de sólidos. Usando a equação acima (Eq. 19), com  $a=0,43$ ,  $G_s=2,1$  a relação entre a mudança em ambos os índices de vazios e o índice de vazios entre os grãos com a mudança no peso específico seco é plotado na figura 3.7.

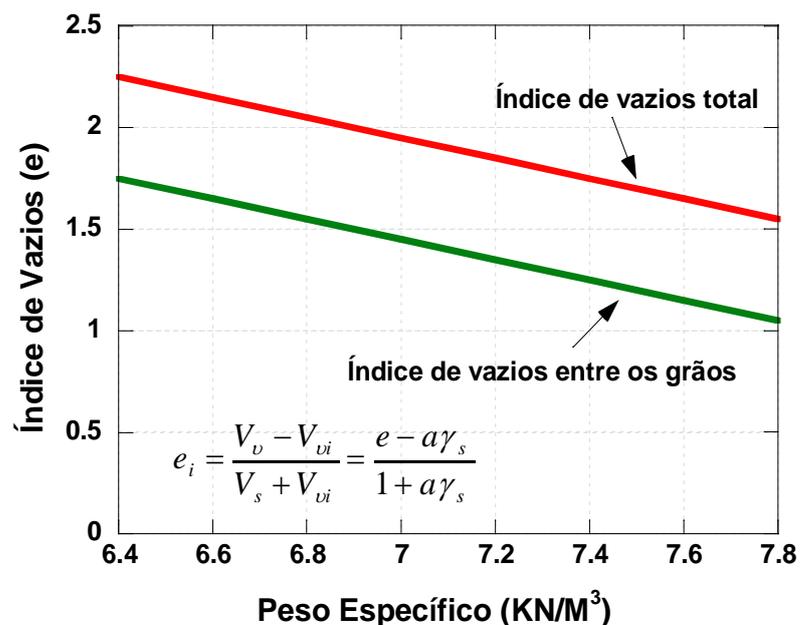


Figura 3.7 – Mudança no índice de vazios com o peso específico da sílica gel

### 3.3.6 ENSAIOS TRIAXIAIS

Atualmente, o quartzo fundido é o material transparente mais utilizado para modelagem de areia. O uso da sílica gel encontra-se em desuso devido as desvantagens apresentadas neste trabalho. Com o objetivo de uma melhor caracterização geotécnica do quartzo fundido, um programa de ensaios de compressão triaxiais CD foram realizados em amostras de quartzo fundido para avaliar:

- a)** O comportamento do quartzo fundido seco sob pressões de confinamento no intervalo de 25 a 400 Kpa;
- b)** O comportamento do quartzo fundido saturado com solução óleo de tocha “Garden Light” e Puretol 7™ sob pressões de confinamento no intervalo de 50 a 200 kPa;
- c)** O comportamento do quartzo fundido saturado com solução de iodeto de sódio tratado com tiossulfato de sódio sob pressões de confinamento no intervalo de 50 a 200 kPa;
- d)** a influência da viscosidade sob confinamento para os quatro poro fluidos utilizados na modelagem de solos transparentes disponíveis atualmente, incluindo água, óleo mineral, sacarose e a solução de iodeto de sódio/tiosulfato.

A solução de sacarose consiste de sacarose e água (Guzman e Iskander 2013), e o poro fluido de óleo consiste de dois óleos minerais Krystol 40™ e Puretol 7™, em proporções de volume de 32:68% (Ezzein e Bathurst 2011).

#### 3.3.6.1.1 Equipamento Triaxial Utilizado

A figura 3.8 mostra o equipamento de triaxiais do laboratório de solos da Universidade de Nova York.



Figura 3.8 - Equipamento triaxial do laboratório de solos da NYU.

### 3.3.6.2 Preparação das Amostras

As amostras foram preparadas pluvindo-se um peso conhecido de quartzo fundido para um molde de areia triaxial comercial, de aproximadamente, 38 mm de diâmetro com uma relação de 2:1 do comprimento para o diâmetro. As densidades relativas de 85% (amostra densa) e 35% (amostra fofa) foram alcançadas por vibração. Dimensões e peso final foram cuidadosamente medidas para garantir densidades relativas consistentes e índice de vazios iniciais. Os testes foram realizados de acordo com procedimentos descritos por Head (1986). A saturação foi realizada por contra pressão e foi utilizada para dissolver qualquer ar aprisionado dentro do restante da amostra. O valor-B introduzido por Bishop e Henkel (1962) foi monitorado para assegurar que um valor em excesso de 0,50 fosse alcançado, o que é indicativo de saturação de 99% em areias (Black e Lee 1973). A saturação com iodeto de sódio, óleo mineral e solução de sucrose foi realizada diretamente utilizando válvulas de drenagem da câmara triaxial com a adição de uma interface tóxica (Figura 3.9a). A interface tóxica impede que outros fluidos tóxicos, que não seja a água, de entrar e contaminar o sistema utilizado para medir e controlar as variações de volume de poro fluidos. Este sistema é de suma importância quando deseja-se saturar a amostra com outro fluido que não seja a água.

Para os ensaios com o quartzo fundido seco, quartzo fundido saturado com óleo de tocha “Garden Light” e Puretol 7™, e quartzo fundido saturado com solução de iodeto de sódio-tiosulfato uma tensão desviadora de 25%h foi empregada. Para os ensaios que visavam comparar os diferentes poro fluidos, uma tensão desviadora foi aplicada a uma taxa de deformação de 200%/h. Esta taxa de deformação alta foi propositadamente escolhida para evidenciar os potenciais efeitos da viscosidade do poro fluido em testes com diferentes poro fluidos. A figura 3.9b mostra o final de um ensaio triaxial, com a formação de banda de cisalhamento no corpo de prova.



Figura 3.9 – a) Interface tóxica utilizada para saturar o corpo de prova com o poro fluido a ser testado; b) ruptura do corpo de prova ensaiado.

### 3.3.7 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Ensaio de permeabilidade foram conduzidas em amostras de SG-1 e SG-2 e QF-1 utilizando o método de parede flexível seguindo a ASTM D5084-10. As amostras foram preparadas na câmara de ensaio triaxial e um fluxo constante de um determinado poro fluido foi aplicado, e o volume do poro fluido foi gravado. As amostras de sílica brasileiras foram permeadas com o óleo mineral *Garden Light* e Glicerina no laboratório de solos da NYU – Nova York.

No caso do quartzo fundido, ensaios de permeabilidade também foram conduzidos com água, óleo mineral e sacarose para comparação.

### 3.3.8 COEFICIENTE DE FORMA E ESFERICIDADE

A forma das partículas tem um efeito significativo sobre a resposta de solos granulados. As características da forma das partículas dos materiais substitutos do solo para produção de solo transparente foram determinados utilizando um analisador de imagens de partículas dinâmico *QicPic*® da empresa Sympatec (Fig. 3.10).



Figura 3.10 - Analisador de partículas *QicPic* da Universidade de Nova York – NYU.

#### 3.3.8.1 Procedimento do Ensaio

As partículas são introduzidas através de um funil acoplado a um sistema *ventury* onde são dispersas utilizando ar comprimido. A identificação das partículas é baseado em conceitos de difração de *laser*. A forma da partícula é capturada usando uma câmera de alta velocidade em uma resolução de quatro megapixels. As formas das partículas são precisamente detectadas quando o fluxo destas passam através de uma lente objetiva especial que em conjunto com transmissão de raios luminosos possibilitam a captura da imagem pela câmera que esta posicionada paralela ao eixo ótico, permitindo, inclusive, imagens de partículas altamente transparentes.

A distribuição de forma das partículas da sílica gel (SG-1), sílica Gel (SG-2) e quartzo fundido (QF-1), e areia de ottawa foram obtidas usando o método descrito acima.

### 3.3.9 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO I.R COM A TEMPERATURA

Todos os óleos candidatos escolhidos a compor o poro fluido composto de óleo mineral e a solução de iodeto de sódio tratado com tiosulfato de sódio foram colocados numa câmara com temperatura controlada, e os seus índices de refração foram medidos em cinco temperaturas diferentes (22, 24, 28, 30, e 34 °C), que cobrem a gama possível de funcionamento à temperatura ambiente. Foi utilizado um refratômetro da marca ATAGO do laboratório de solos transparentes da Universidade de Nova York nesta análise.

### 3.3.10 ENSAIO DE DEGRADAÇÃO DA MEMBRANA DE LÁTEX

Ensaio de degradação da membrana látex foram realizados para verificar o potencial de degradação de cada poro fluido sobre o látex. A metodologia aqui utilizada seguiu a proposta por Zhao et al. 2010. A membrana látex foi embebida com os poro fluidos e deixada em repouso por 7 dias. A interação dos seguintes poro fluidos com a membrana látex foram analisados:

- Mistura de óleo *Puretol 7* e *Krystol 40*;
- Óleo de tocha "Garden Light" e *Puretol 7* ;
- Óleo de tocha "Garden Light" e Glicerina.
- Água e Iodeto de sódio tratado com tiosulfato de sódio;

A figura 3.11 mostra uma membrana de látex embebida com solução de água e iodeto de sódio tratado com tiosulfato de sódio.



Figura 3.11 – Membrana do ensaio triaxial embebida com o poro fluido em estudo.

### 3.3.11 TESTES DE REAPROVEITAMENTO DO PORO FLUIDO E SOLO TRANSPARENTES

#### 3.3.11.1 Poro Fluido constituído com óleo mineral

Uma técnica batizada de **pluviação molhada** é introduzida neste trabalho de tese. Este método simples, tem como objetivo reaproveitar o óleo mineral e o quartzo fundido utilizado na modelagem, reduzindo assim os custos de preparação de amostras e com a modelagem em sí, além de ser uma prática ambientalmente responsável.

##### 3.3.11.1.1 Procedimento

A técnica de **pluviação molhada** consiste em instalar uma tela ajustável na entrada do container onde será preparado amostra de solo transparente. Esta tela deve ser confeccionada em tela metálica com malha de # 40 (Fig. 3.12a). Para ser ajustável, a tela deve possuir lados com altura de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  da altura total da amostra (Figura 3.12b). Em seguida, a tela é instalada no interior do container já preenchido com o óleo mineral com o índice de refração desejado; Utiliza-se grampos para o suporte da tela (Figura 3.12c). É importante que a tela fique imersa no óleo existente dentro do container. A função da tela é separar o os grãos de quartzo fundido do ar aprisionado entre eles. No próximo passo, pesa-se o material já utilizado e inicia-se a pluviação do material dentro de container (Figura 3.12d). Pode-se utilizar uma espátula para auxiliar no peneiramento e por consequência no processo de sedimentação do quartzo fundido (Figura 3.12e, 3.12f). É de suma importância que todo processo aconteça imerso no óleo para evitar que bolhas de ar se formem, degradando assim a transparência final desejada.

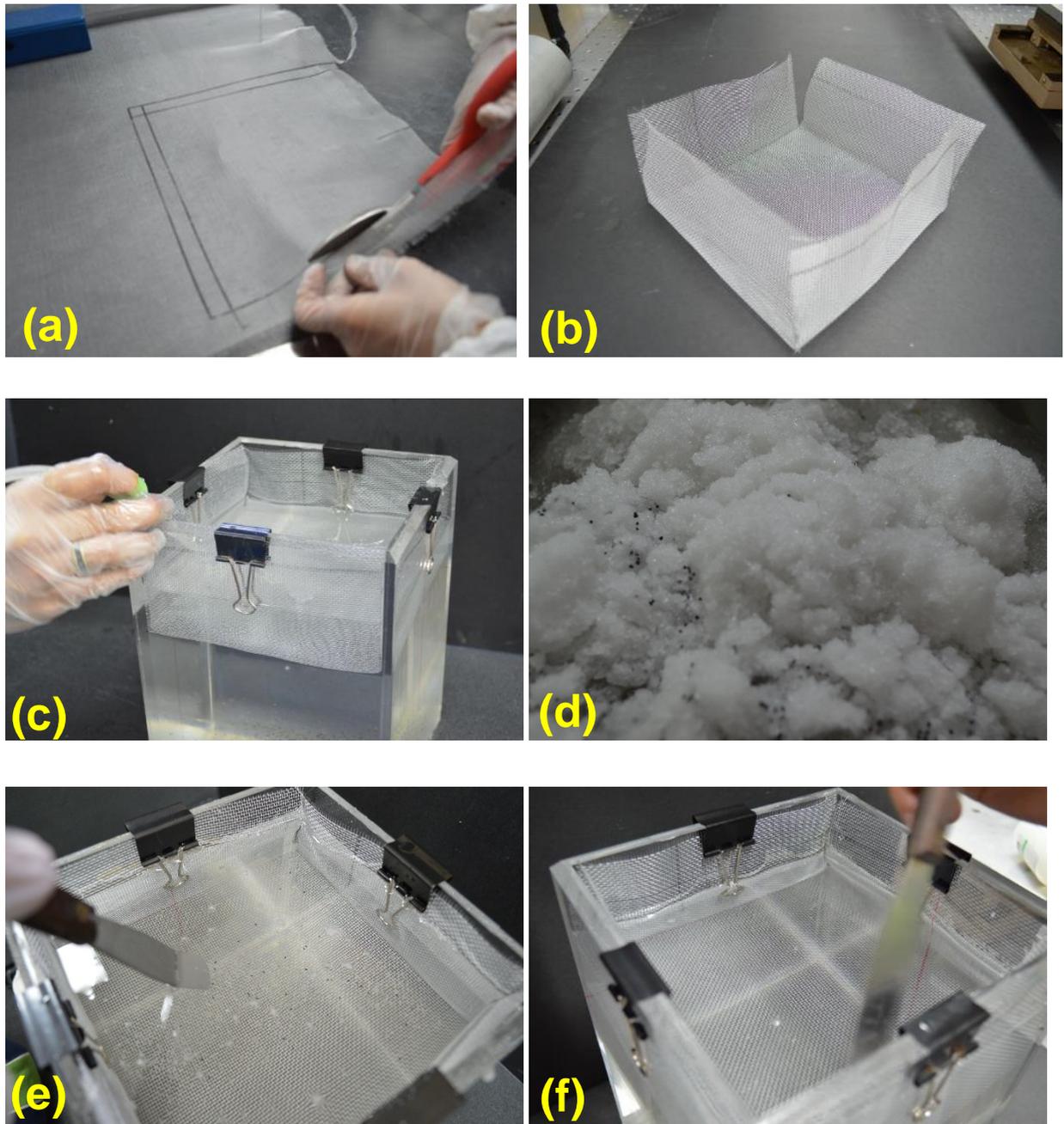


Figura 3.12 – Etapas para reutilização do solo transparente.

### 3.3.11.2 Poro Fluido constituído com iodeto de sódio

Apesar das importantes vantagens do iodeto de sódio para utilização em aplicações de modelagem física, há uma limitação que proíbe o uso do material para modelos físicos com maiores dimensões: O iodeto de sódio, em escala científica, é relativamente caro em relação a outros poro fluidos anteriormente utilizados na modelagem com solos transparentes. Em escala industrial, o iodeto de sódio é menos

dispendioso, mas estes não foram investigados neste estudo. Assim, um estudo sistemático foi realizado para investigar a reutilização do poro fluido em vários testes.

### 3.3.11.2.1 Procedimento

As amostras feitas utilizando iodeto de sódio foram transferidos para um recipiente para mistura, onde a água foi adicionada para criar uma pasta. O volume de água adicionada foi igual ao volume inicial da amostra. A amostra foi em seguida misturada por agitação. A quantidade de água contendo a concentração diluída de iodeto de sódio foi então removida e colocada num forno para a evaporação parcial. A evaporação foi permitida até que o índice de refração da solução restante atingisse um valor de 1,4585. O procedimento foi repetido cinco vezes para a amostra de quartzo fundido, pela adição de igual volume de água para a amostra, misturando a solução e recuperando a parte líquida em um outro recipiente (Fig. 3.13).

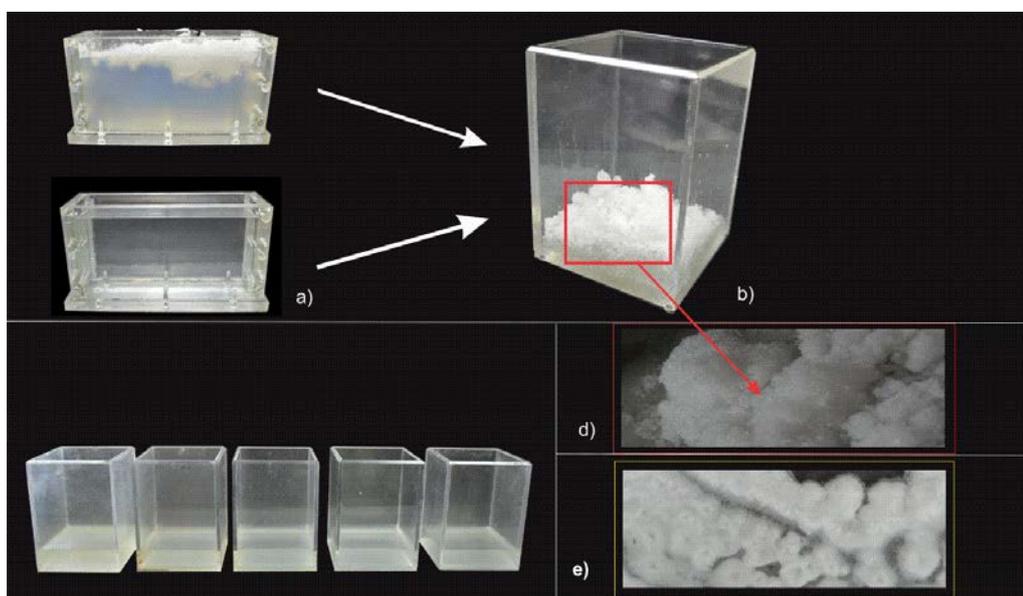


Figura 3.13 - Etapas seguidas para a recuperação do iodeto de sódio.

## 3.4 PROGRAMA DE MODELAGEM FÍSICA DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS

O uso da técnica de correlação digital de imagens (DIC) se popularizou na geotecnia principalmente para o estudos de mecanismos na interação solo-estrutura. Para ilustrar as potencialidades da técnica de correlação digital de imagens e o uso de

solos transparentes para modelagem de problemas geotécnicos, será apresentado quatro aplicações que foram concebidas e executadas na Escola politécnica da Universidade de Nova York (*poly-NYU*). A primeira aplicação consiste no estudo da interferência entre fundações rasas, com a variação da distância entre elas; A segunda aplicação consiste na visualização dos mecanismos durante o arrancamento de dutos com geogrelhas de diferentes comprimentos; A terceira aplicação consiste na visualização da penetração rápida de projéteis com diferentes geometrias de ponta: reta e cônica; e a quarta aplicação consiste no arrancamento de estacas torpedo utilizando solos transparentes. As duas primeiras aplicações foram realizadas com areia natural e as duas últimas aplicações com solos transparentes.

### 3.4.1 MATERIAIS TESTADOS

#### 3.4.1.1 Areia natural (Ottawa sand)

Uma areia de Ottawa calibrada foi utilizada nestas duas aplicações. A distribuição granulométrica, esfericidade e fatores de forma foram avaliados através de um analisador de partículas, *QicPic*<sup>TM</sup>. O princípio de funcionamento deste equipamento é brevemente descrito na seção 3.3.8.

#### 3.4.1.2 Quartzo fundido

Como recebido, o quartzo fundido foi peneirado para obter uma faixa de tamanho de partículas de 400-700  $\mu\text{m}$ , com um  $D_{50}$  de 450  $\mu\text{m}$  para melhorar a transparência. O fluido utilizado foi uma mistura de dois óleos minerais, *Puretol 7* e *Krystol 40*, ambos fornecidos pela Petro Canadá, com um índice de refração de 1,4635 e 1,4505, respectivamente, a 22°C. Os dois óleos foram misturados em proporções adequadas para produzir um índice de refração de 1,4585, que é o RI do quartzo fundido. Mas detalhes sobre a preparação de amostras podem ser encontradas no apêndice B desta tese.

#### 3.4.1.3 Procedimento de preparação de amostras de areia

Um container de acrílico foi construído para este trabalho de dimensões 700 x 600 x 75 mm (Fig. 3.14a). As amostras de solo foram preparadas utilizando um método controlado de pluviação descrito em Rad e Tumay, 2004. Um pluviador foi projetado de acordo com esta metodologia. O pluviador foi construído de madeira, com orifícios em

sua lateral (Fig. 3.14b) para o controle da altura e com arquitetura modular que permitisse a troca de telas quando do preparo de amostras densas e fofas. Para a pluviação, uma camada de 50 mm de altura de areia era colocada sob um tecido (Fig. 3.14c); Em seguida o tecido era retirado possibilitando a pluviação por camada até à profundidade desejada da amostra. (Fig. 3.14d).



Figura 3.14 - Preparo de amostra controladas com o uso do pluviador.

O pluviador consiste de uma caixa de madeira com espaço para instalação de uma tela adaptável em seu topo para permitir a pluviação uniforme de cada camada de solo. Duas telas diferentes (relação entre a área dos furos para a área total da tela) de 3 e 25% foram utilizadas para obter modelos com densidades relativas de 40 e 90%, respectivamente. A Fig 3.15 mostra detalhes do pluviador e as telas utilizadas para preparo de amostras fofas e densas.

Duas telas metálicas foram instaladas com uma orientação de 45° uma em relação a outra no interior da caixa, o que segundo a metodologia descrita em Rad e

Tumay, 2004, possibilita a deposição uniforme do solo pluviado. A densidade da amostra de solo foi medida em três pontos dentro de cada camada de solo, a fim de verificar a consistência da densidade relativa em cada camada, e em toda a profundidade do modelo. Copos de alumínio foram usados para extrair amostras para a verificação da densidade relativa obtida. Uma altura de pluviação constante de 400 mm foi mantida para ambas as amostras fofas e densas. Densidades relativas com grande controle foram obtidas em ambas as amostras fofas e densas, com um coeficiente de variação de cerca de 2% e 5% para sílica gel e areia de ottawa, respectivamente.



Figura 3.15 - Detalhes do pluviador construído para esta pesquisa.

### 3.5 APARATO EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS

#### 3.5.1 METODOLOGIA DO ENSAIO DE INTERFERÊNCIA ENTRE SAPATAS

A primeira aplicação desta tese consiste no estudo da interferência entre fundações rasas utilizando um digitalizador de mesa (*scanner*) para captura das imagens digitais.

O aparato experimental consiste em um scanner de mesa, um pórtico para aplicação de cargas e um computador móvel como mostrado na figura 3.17. O pórtico para aplicação de carga consiste em uma célula de carga e um atuador hidráulico. Duas

sapatas quadradas com 76,2 mm (3 inches) de comprimento (B) foram montadas em um perfil H de ferro com uma distância variável entre as sapatas (Figura 3.16). Os espaços entre as sapatas foram:  $S_1=B$ ,  $S_2=2B$ ,  $S_3=3B$  e  $S_4=4B$ . Devido a limitação da área de cobertura, o *scanner* foi alinhado no centro da segunda sapata como mostrado na Fig. 3.18.



Figura 3.16 – Abertura dos furos equidistantes para o ensaio de interferência entre sapatas.

Os testes foram realizados a deformação controlada. Uma taxa de deslocamento incremental de 0,064 cm/etapa foi aplicada durante os testes. Depois de cada etapa, o sistema automaticamente pausava e uma imagem era digitalizada pelo scanner e armazenada no computador portátil. Um total de 40 etapas foram realizadas totalizando 2,54 cm (1 inch) de penetração em cada teste. Um total de quatro testes foram realizados com areia fofa e quatro testes com areia densa.

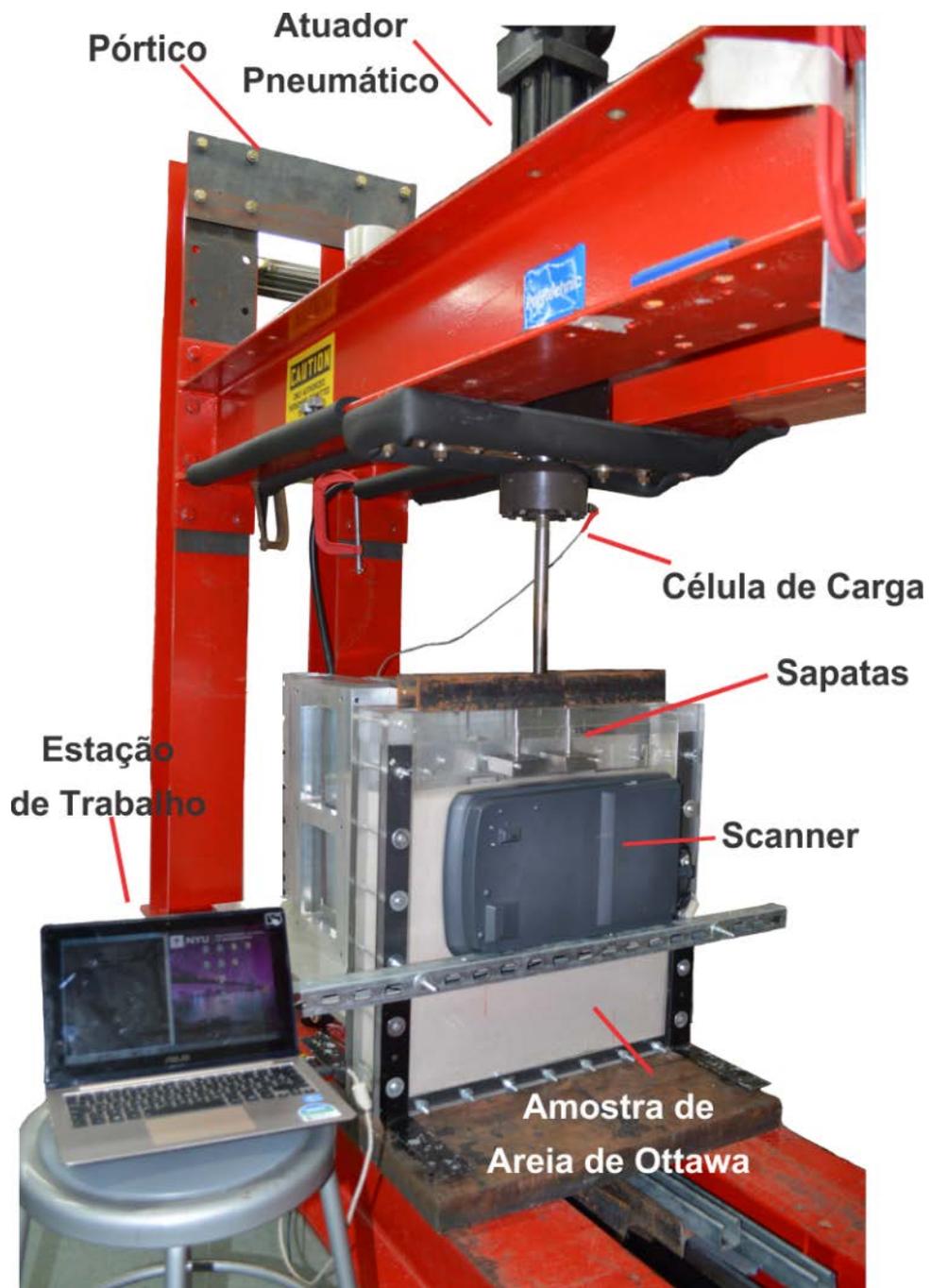


Figura 3.17 - Aparato experimental para o ensaio de interferência entre sapatas.

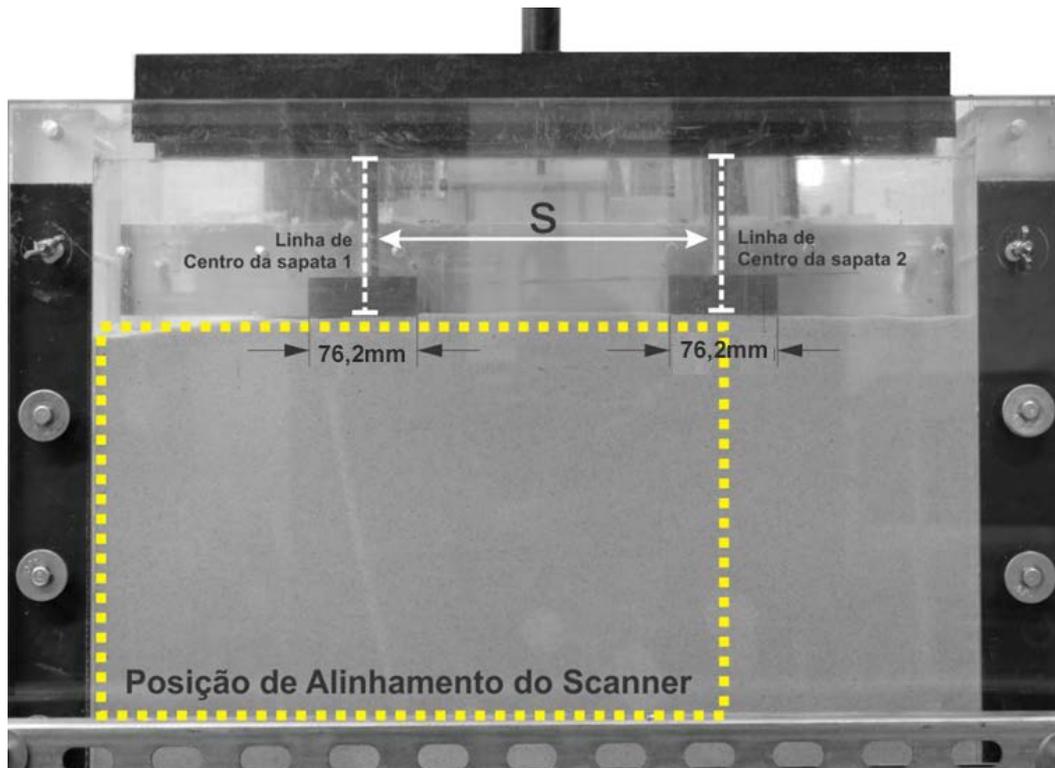


Figura 3.18 – Posicionamento e alinhamento do *scanner* para os testes.

### 3.5.1.1 Sistema ótico para ensaios

O scanner utilizado neste teste é um modelo **EPSON Perfection 3170 PHOTO** com uma resolução de 3200 dpi (pontos por polegada) e resolução de software de até 12,800 x 12,800 dpi com interpolação via *hardware*. A fonte de iluminação é composta por uma lâmpada fluorescente de catodo frio branca, com velocidade de digitalização de 8,7 milissegundos por linha em 3200 dpi e 2,8 milissegundos por linha em 600 dpi.

Um *scanner* colorido típico consiste de três matrizes CCD, cada um separadamente coberto por filtros verdes, azuis e vermelhos. O documento a ser digitalizado é iluminado por uma lâmpada fluorescente branca com pico de intensidade de luz verde, azul e vermelho. A luz é refletida por espelhos e óticamente reduzida por uma lente de modo a formar uma imagem sobrepondo as matrizes CCD.

O uso de *scanner* para estudos de problemas geotécnicos quasi-estáticos tem algumas vantagens, como descrito abaixo:

- **Intensidade Luminosa uniforme através da região de interesse:** é crucial garantir a iluminação uniforme da amostra, a fim de obter melhores resultados

na análise de correlação de imagens. O uso do *scanner* garante uma maior uniformidade luminosa na aquisição das imagens. Variações de iluminação, podem afetar a qualidade da correlação levando a resultados incorretos na predição dos deslocamentos. Várias tentativas de produzir uma iluminação mais uniforme foram relatadas como por exemplo uso de iluminação indireta com um fundo branco atrás da amostra para produzir uma refletância lambertiana utilizando refletores de tungstênio (Omidvar et al., 2014). A Fig. 3.19 mostra uma comparação da intensidade luminosa entre lâmpadas de tungstênio e catódica fluorescente branca do *scanner*. Pode-se inferir desta análise que em todas as linhas analisadas da imagem, a intensidade luminosa do *scanner* apresenta-se com tendência de uniformidade em relação a intensidade luminosa da iluminação lambertiana (hálogena).

- **Alta Resolução: Resolução de imagens de até 12,800 dpi:** Imagens com alta resolução são necessárias para obter melhores resultados na correlação digital de imagens.
- **Não é necessária a Calibração do Sistema:** O processo de calibração ótica compreende a estimativa de um conjunto de parâmetros intrínsecos e extrínsecos que descrevem o processo de como a imagem é capturada e processada pela câmera. Parâmetros intrínsecos lidam com características internas da câmera e de sua lente, tais como, o seu comprimento focal, inclinação, distorção, e um centro de imagem. Parâmetros extrínsecos descrevem sua posição e orientação após o alinhamento. Estes parâmetros são utilizados para distorcer e corrigir a imagem devido a erros de alinhamento ou devido a própria natureza da lente. O plano de digitalização do *scanner* é perfeitamente paralelo ao plano de container de acrílico, portanto impede a distorção de imagens durante a digitalização.
- **Baixo custo:** (Se comparada com câmeras comerciais convencionais): Este fator é desejável tanto quanto em ambientes educacionais ou em ambientes de pesquisa.

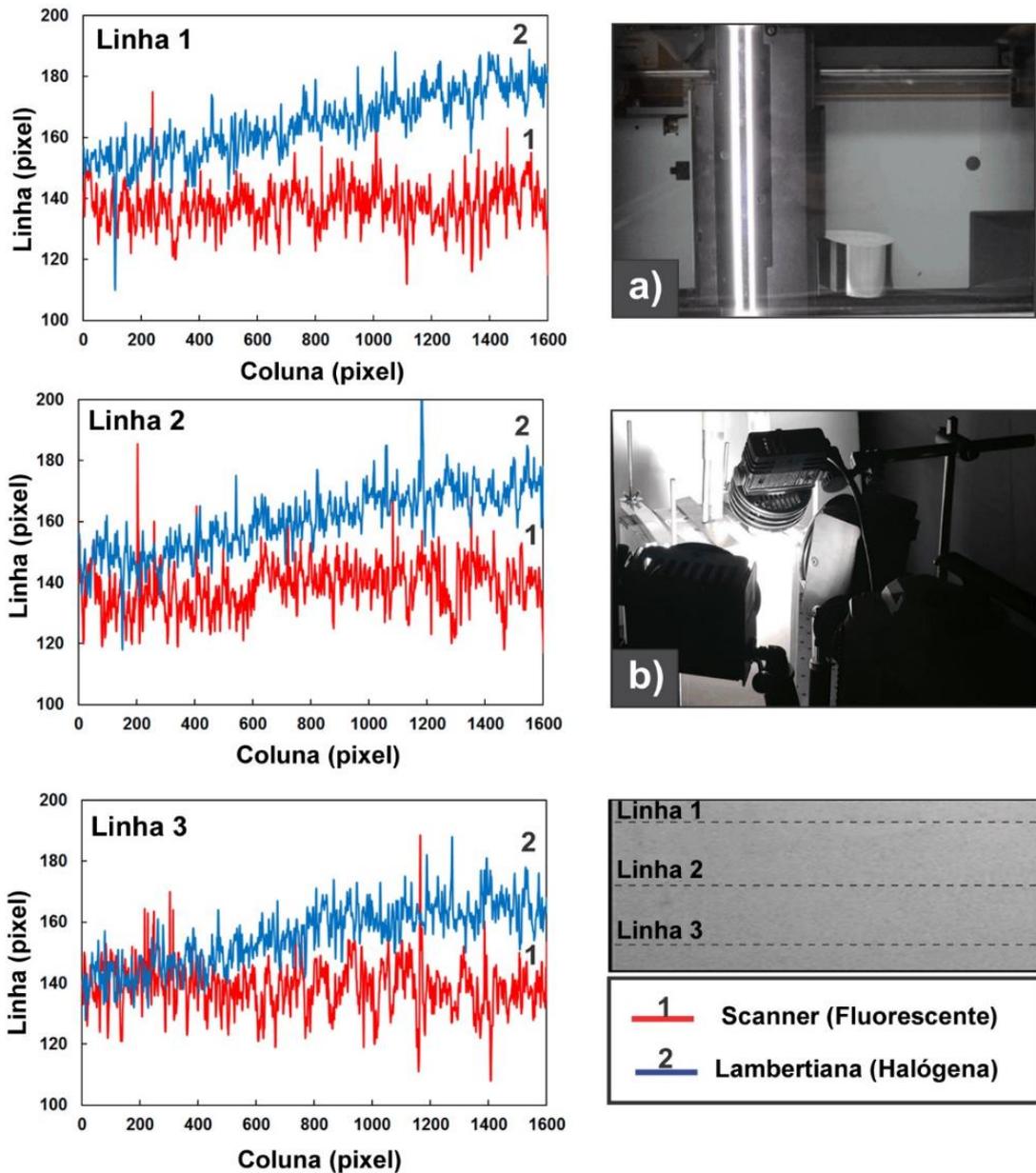
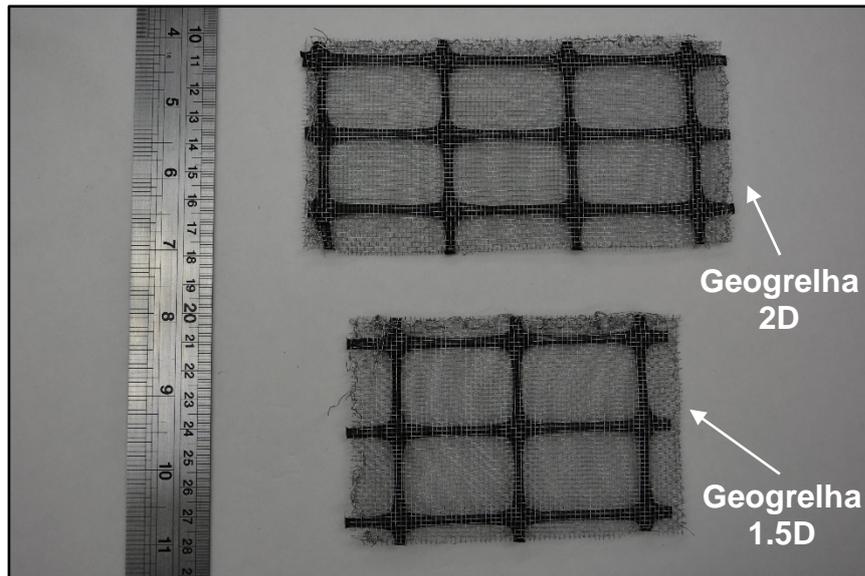


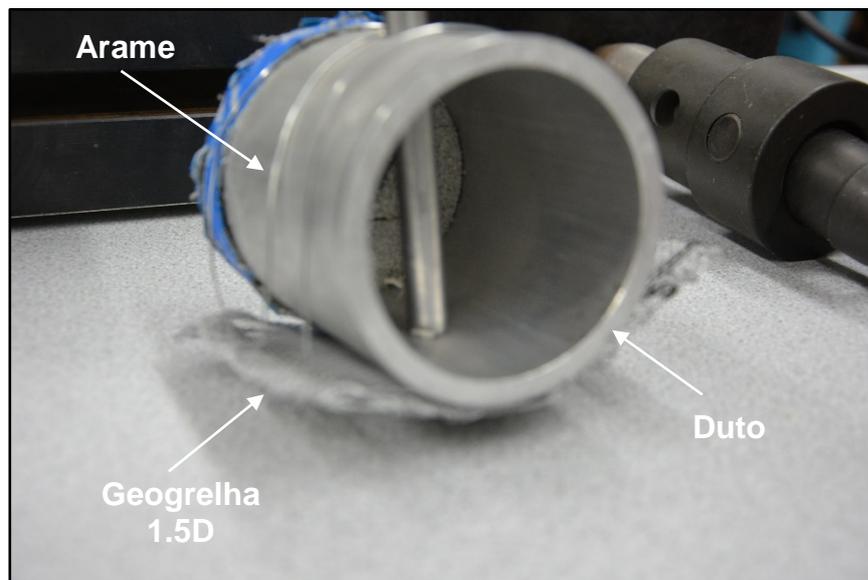
Figura 3.19 – Comparação da uniformidade luminosa de duas imagens: Uma capturada pelo *scanner* (lâmpada fluorescente) e a outra capturada com uma câmera com iluminação halógena.

### 3.5.2 METODOLOGIA DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE DUTOS

A ruptura de um oleoduto ou gasoduto tem consequências econômicas e ambientais graves. O uso de uma geogrelha solidária ao duto pode aumentar a resistência deste duto ao arrancamento (Fig. 3.20). Este ensaio tem por objetivo a visualização do mecanismo de arrancamento de dutos com geogrelha de diferentes comprimentos.



(a)



(b)

Figura 3.20 – a) Geogrelhas de 1.5D e D utilizadas neste estudo e b) instalação da geogrelha no duto com o auxílio de arame galvanizado.

O aparato experimental para o arrancamento de dutos utilizou o mesmo container utilizado no ensaio de interferência entre sapatas, e o mesmo método de preparação de amostras (densa ou fofa) foi seguido para este ensaio. O aparato para o arrancamento de dutos consiste em um atuador pneumático acoplado a uma célula de carga, uma câmera Nikon 7200 DRSL, um painel branco e um refletor com lâmpada halógena de tungstênio para iluminação indireta e um computador móvel como

mostrado na figura 3.21. A haste de alumínio articulada é ligada ao duto e a um atuador vertical, via uma célula de carga. O movimento de arrancamento foi controlado por um sistema computadorizado. A câmera Nikon 7200 DRSL foi controlada pelo PC através de uma conexão USB e o *software* de aquisição de imagens *DigiCam Control 3.0*.

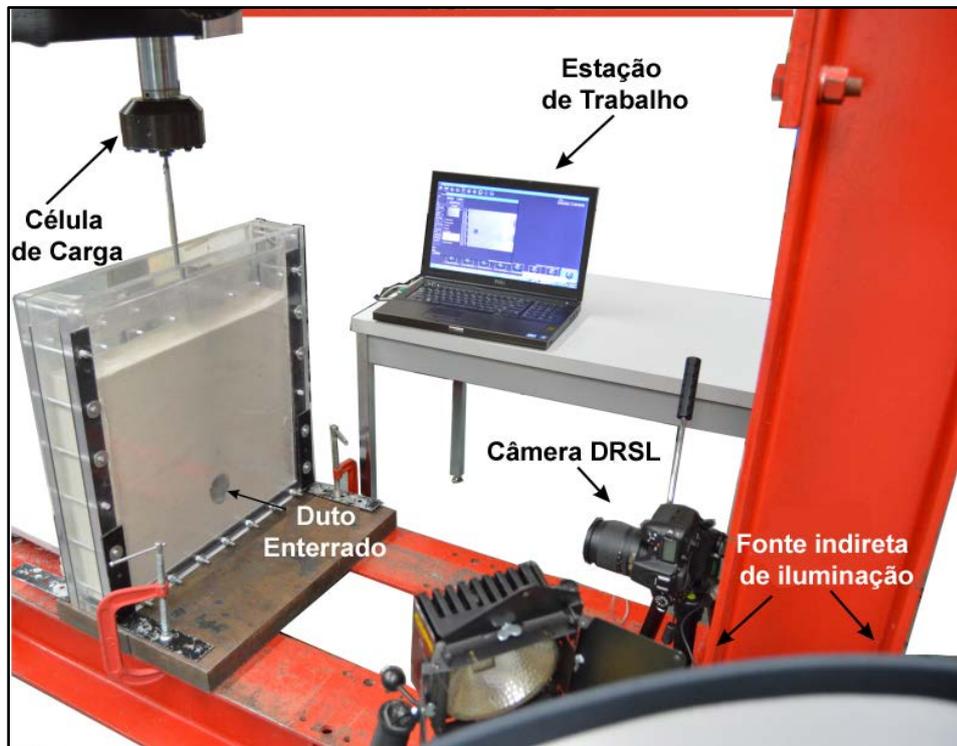


Figura 3.21 - Aparato experimental para o teste de arrancamento de dutos.

Um ensaio similar foi realizado no laboratório de solos transparentes do LECIV/UENF, porém em escala menor do que o realizado no laboratório de materiais da NYU. O aparato consistiu de uma mesa anti-vibração da *NewPort Corporation (USA)*, uma câmera de alta velocidade CCD (Charged Coupled Device) com resolução máxima de 1028x1240 *pixels* e velocidade máxima do obturador de 1100 fps da empresa *AOS Technologies (USA)*, modelo PROMON 500, e um computador para processamento das imagens, como mostrado nas figuras 3.22 e 3.23. A mesa anti-vibração permite ao sistema o mínimo de interferência externa, possibilitando assim alta estabilidade e melhor qualidade possível da captura das imagens.

Uma caixa de acrílico com as dimensões de 300x150x50mm (comprimento x largura x profundidade) foi utilizada nos testes com o modelo. Um tubo de alumínio com diâmetro de 50 mm e comprimento de 47 mm foi utilizado para simular um duto. O

arrancamento foi produzido por um motor acoplado a um atuador e uma célula de carga do fabricante *Alfa instrumentos*, faixa de sensibilidade de  $\pm 25$  V previamente calibrada.

Os parâmetros de velocidade de arrancamento, deslocamento do duto e carga de arrancamento foram controlados e registrados por sistema DAQ (*Data acquisition system*) da *National Instruments, Inc. Modelo NI-PXI 1052*. Uma interface em *LabView* foi desenvolvida para controle e gerenciamento dos dados. Um sistema de refletores de led foram utilizados para fornecimento de iluminação ao modelo. Neste ensaio, a velocidade de arrancamento utilizada foi de 1 mm/s.

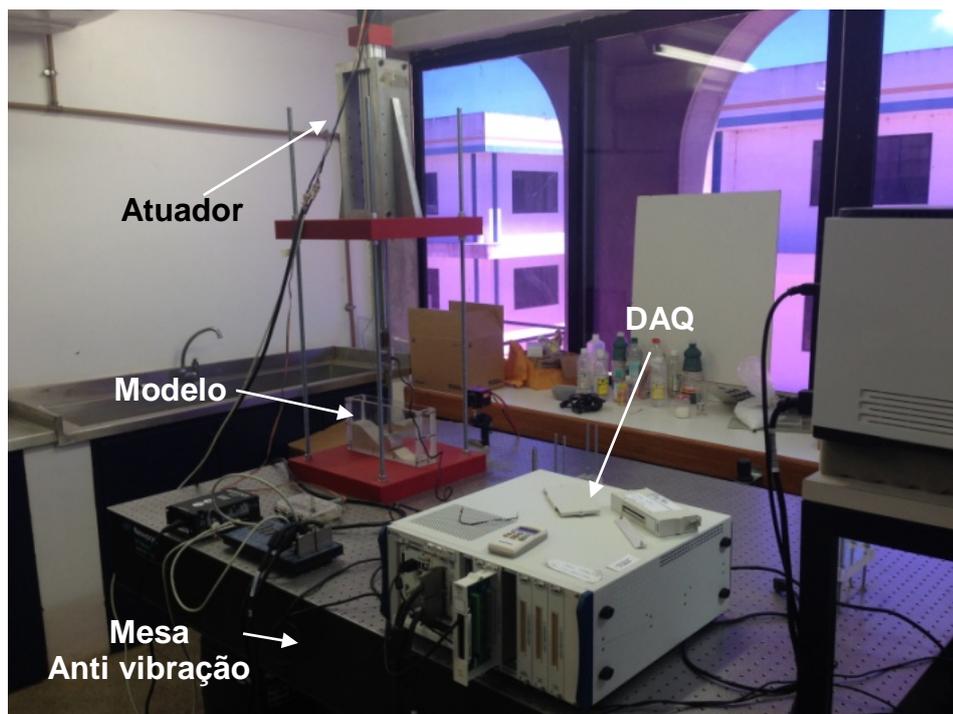


Figura 3.22 - Aparato desenvolvido para esta tese.

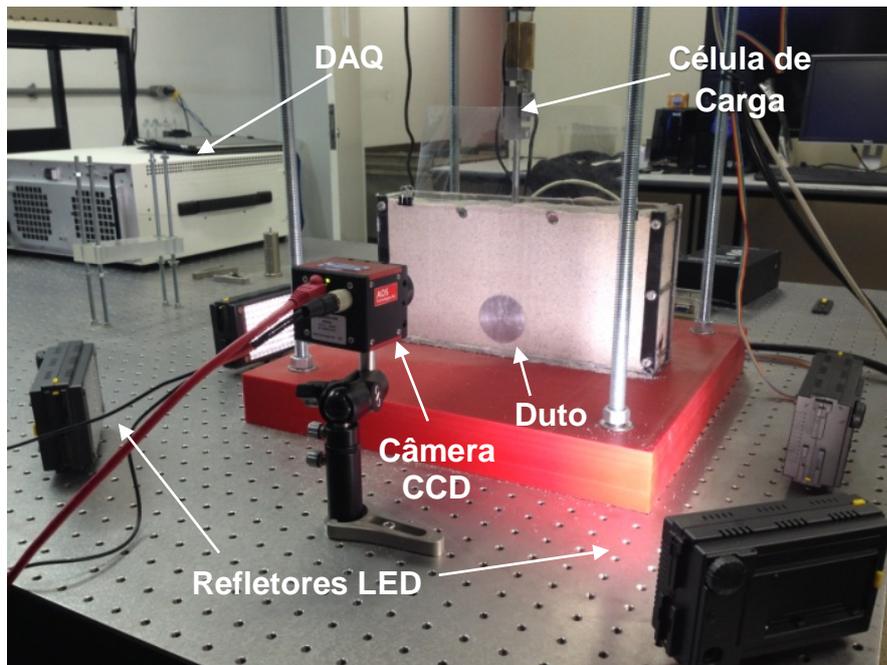


Figura 3.23 - Sistema óptico desenvolvido para os ensaios de arrancamento de dutos.

### 3.5.3 METODOLOGIA PARA O ENSAIO DE PENETRAÇÃO DINÂMICA

O estudo da penetração dinâmica em meio granulares foi motivada por uma série de aplicações civis e militares ao longo dos anos. (Por ex. Instalação de âncoras no leito marinho e proteção de estruturas). Nos últimos anos, avanços significativos em recursos computacionais e na modelagem numérica, tornou possível a modelagem de fenômenos complexos e interações durante a rápida penetração no meio granular. Cada vez mais, modelos numéricos podem fornecer informações mais precisas sobre este fenômeno. Observações globais da penetração, embora úteis, possuem limitações no desenvolvimento e validação de modelos preditivos avançados.

A demanda por informações mais precisas e em menor escala tem levado ao desenvolvimento de técnicas inovadoras para visualizar a penetração em meio granular em meso e micro escalas. Este trabalho, em uma de suas aplicações, apresenta a utilização de solos transparentes para modelar a penetração rápida de projéteis com diferentes pontas em meio granular.

O aparato experimental utilizado para acelerar os projéteis e possibilitar a penetração nos solos transparentes bem como todos os componentes e acessórios utilizados para a aquisição de imagens digitais durante o evento da penetração são mostrados na Fig. 3.24. O aparato consiste de um acelerador eletro-pneumático, um

modelo de solo transparente preparado de acordo com o técnica da camada opaca, componentes óticos e uma câmera para captura de imagens digitais de alta velocidade como descrito abaixo.

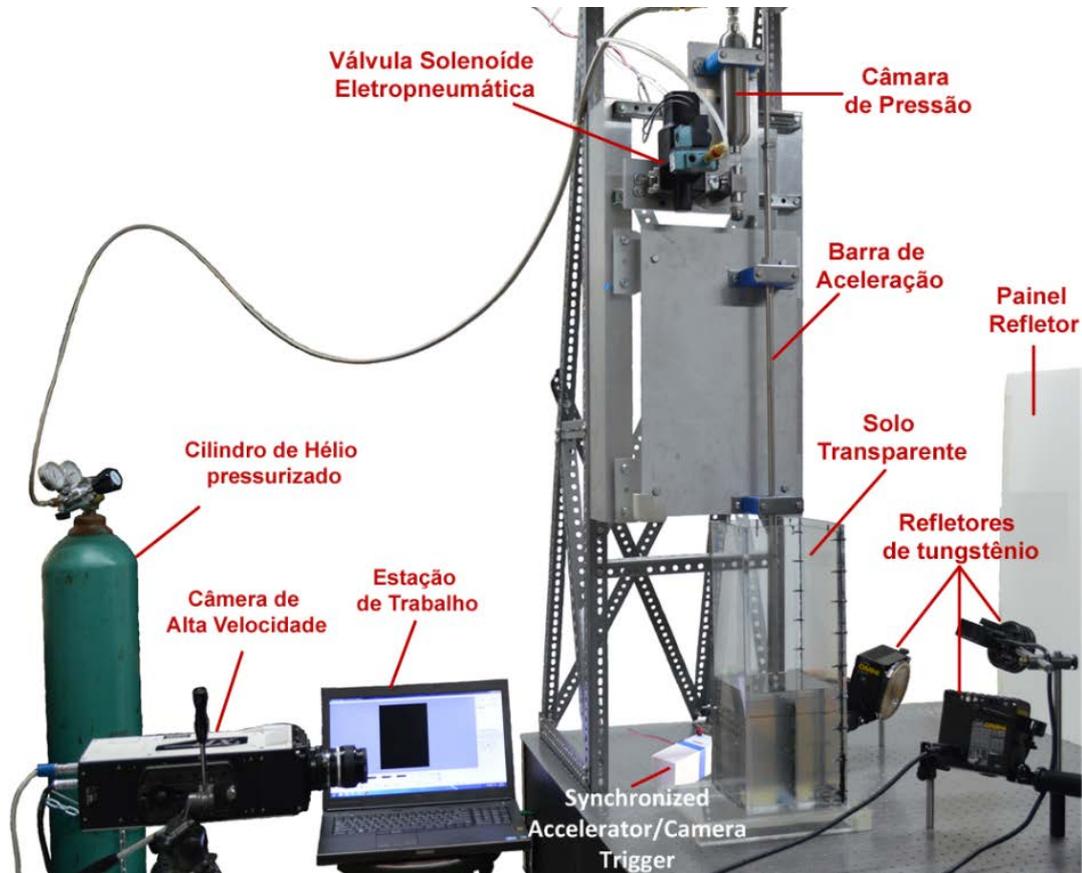


Figura 3.24 - Aparato experimental utilizado para aceleração de projéteis.

### 3.5.3.1 Sistema ótico de aquisição de imagens

#### 3.5.3.1.1 Configuração Ótica

Uma câmera NAC HX-5 CMOS de alta velocidade (Fig. 3.25) foi utilizada neste estudo. A câmera pode ser operada a uma resolução máxima de 4 megapixels em uma taxa de frequência de imagem de 1,65 kHz. Ao custo de se reduzir a resolução das imagens obtidas, a câmera pode ser operada em frequências de imagem superiores. Imagens monocromáticas de 24 bits foram capturadas. Na frequência de

imagem de 6 kHz, utilizada neste estudo, a resolução da imagem obtida foi de 1152 por 896 *pixels*. A análise de distorção das imagens (calibração) e imagens de conversão para unidades físicas foram realizadas antes do ensaio. Uma régua de alta precisão foi utilizada nas imagens de conversão para o cálculo da magnificação da câmera. O fator de conversão obtido foi de 7,154 px/mm. O procedimento completo de calibração de um sistema ótico pode ser encontrado no apêndice A desta tese.

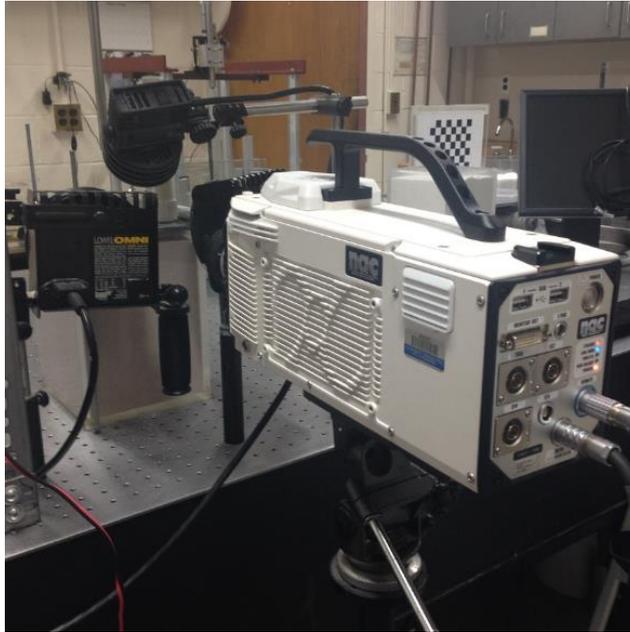


Figura 3.25 - Câmera NAC HX-5 CMOS de alta resolução.

Uma frequência de imagem, de 6 kHz e um tempo de exposição de 50  $\mu$ s foram empregados. A câmera foi equipada com uma lente Nikkor com abertura *f-stop* de 1,2. Um conjunto de duas fontes de luz halógenas de tungstênio de 500W foram usadas para iluminar a amostra. A iluminação indireta foi usada; Os refletores foram direcionados para um painel de espuma branco colocada por detrás da amostra, o que proporcionou refletância lambertiana.

### 3.5.3.2 Acelerador Eletro-pneumático e projéteis testados

Um acelerador de projéteis eletro-pneumático foi usado para impulsionar os projéteis para a amostra de solo transparente com uma velocidade de impacto

desejada. A figura 3.26 apresenta os principais componentes do acelerador eletro-pneumático utilizado nesta pesquisa.

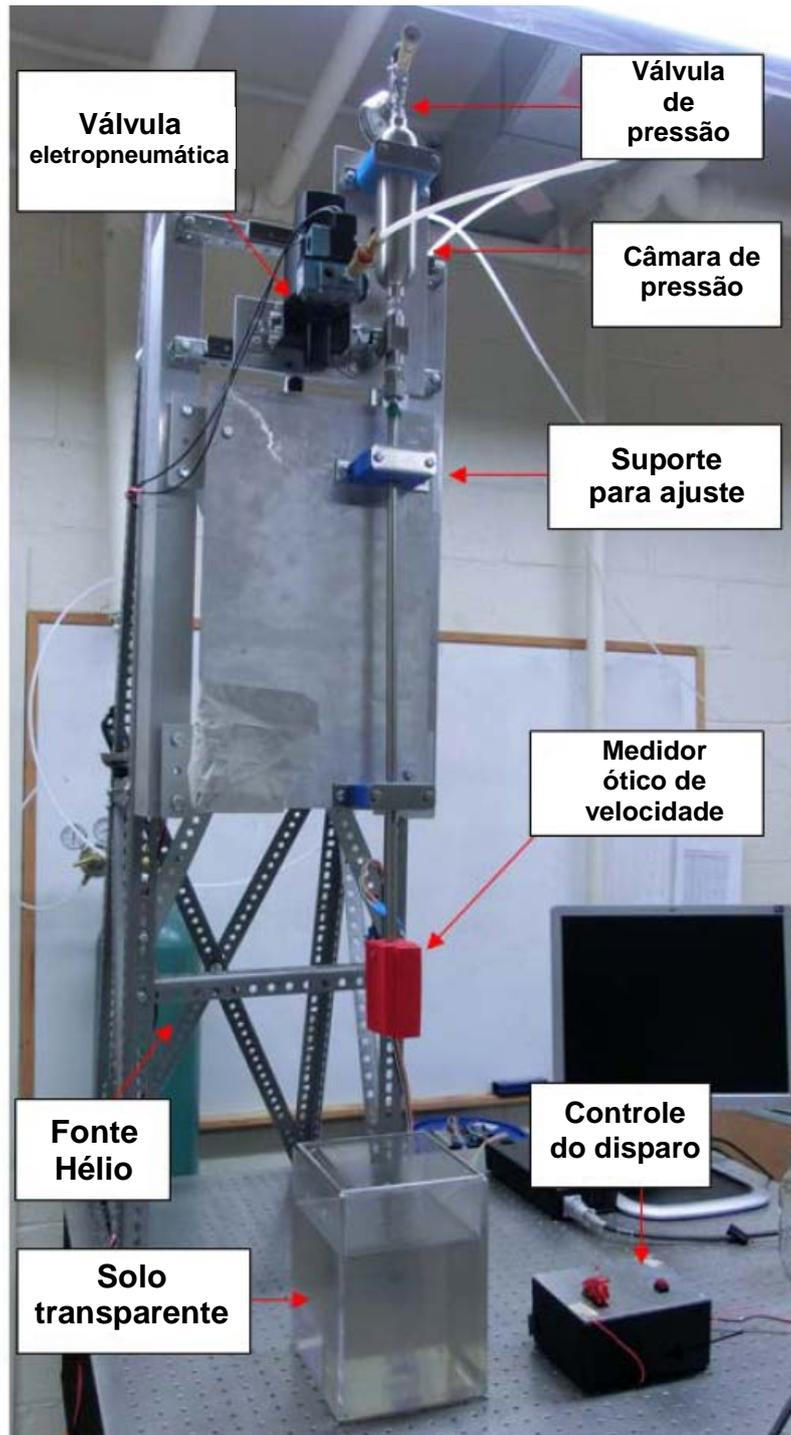


Figura 3.26 – Acelerador eletro-pneumático utilizado nesta pesquisa.

Os projéteis utilizados neste estudo, de ponta reta e cônico (Fig. 3.27), possuem 10 mm de diâmetro, 100 mm de comprimento, são feitos de aço e possuem respectivamente uma massa de 14,6 g e 15,2 g. A fim de aumentar a estabilidade dos

projéteis durante a penetração, o centro de massa foi movido com a abertura de um furo na extremidade traseira destes projéteis até uma profundidade de 63 mm. Uma velocidade de lançamento de 20 m/s foi utilizada neste estudo.

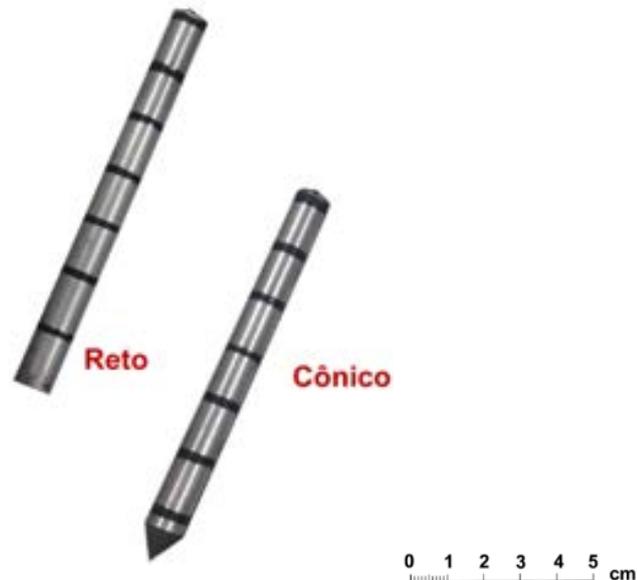


Figura 3.27 – Projéteis reto e cônico utilizados neste estudo.

### 3.5.3.3 A preparação das amostras

Amostras de solo transparente foram preparadas por meio de pluviação em um container com medidas de 480x180x180 mm (altura x largura x comprimento), construída com acrílico transparente de 13mm de espessura, com uma lateral removível para permitir a pluviação do quartzo fundido. A preparação da amostra utilizou a técnica da camada opaca. Detalhes e o passo a passo desta técnica pode ser encontrado no apêndice B desta tese.

### 3.5.4 METODOLOGIA DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO QUASI-ESTÁTICO

Além dos testes de penetração dinâmica, um teste adicional foi realizado sob carregamento quasi-estático para visualizar as diferenças qualitativas e quantitativas nas interações solo-projétil sob penetração quasi-estática e dinâmica. O teste de penetração quasi-estático foi realizado em amostras preparadas seguindo os procedimentos descritos no Apêndice B. Um atuador hidráulico da marca MTS foi

usado para penetrar uma haste que possui a mesma área de seção transversal dos projéteis utilizados em testes de penetração dinâmica. A haste penetrou na amostra de solo transparente a uma taxa constante de 0,1 mm/s. A resistência à penetração foi registrada utilizando uma célula de carga ligada ao penetrador. A figura 3.28 mostra a aparato experimental utilizado no ensaio quasi-estático de penetração.

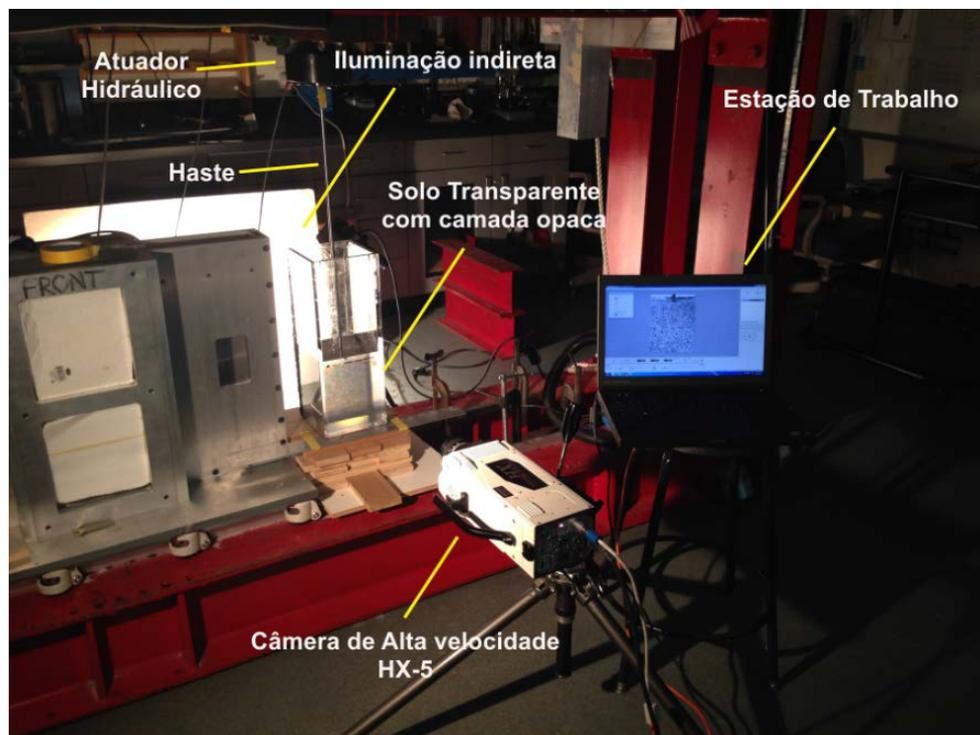


Figura 3.28 - Aparato experimental para o ensaio quasi-estático de penetração.

### 3.5.5 METODOLOGIA DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE TORPEDOS

O ensaio de arrancamento de estacas torpedo utilizou as geometrias de estacas torpedo propostas por O'Loughlin et al. 2004 e PETROBRÁS. Na Figura 3.29 são mostrados os torpedos construídos em uma escala de 1:125. O número um corresponde a geometria de um torpedo proposto por O'Loughlin et al. 2004. O número 2 corresponde a uma geometria semelhante ao usado pela PETROBRÁS para ancoragem de plataformas.

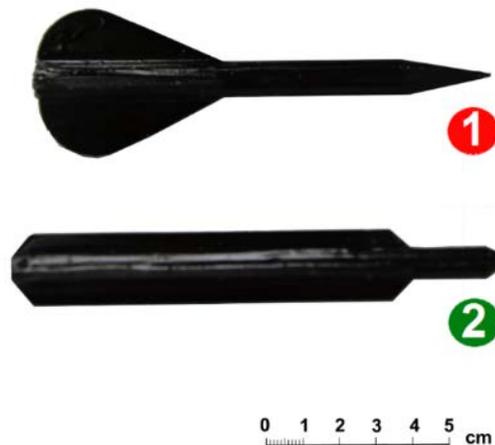


Figura 3.29 – Estacas torpedo utilizadas neste estudo.

A tabela 3.3 apresenta um sumário das propriedades físicas dos dois modelos de estacas torpedos utilizados.

Tabela 3.3- Propriedades físicas dos modelos de estacas torpedo utilizados no estudo.

<b>Propriedades do modelo</b>	<b>Torpedo 1</b>	<b>Torpedo 2</b>
Comprimento (mm)	120	120
Área superficial (mm <sup>2</sup> )	6680	6680
Diâmetro do corpo (mm)	9,45	7,50
Massa bruta (gramas)	32,4	28,4
Massa real do respectivo protótipo (toneladas)	63,3	55,5

O aparato experimental consiste de uma mesa ótica, e dois *lasers* de Hélio-Neon, um de 0,5 mW (vermelho) e o outro de 2 Watt (verde) alinhados a um container de acrílico de dimensões 200x200x300 mm (largura x comprimento x altura). A profundidade de penetração do feixe de laser em um modelo de solo feito de material sintético transparente depende da potência do *laser*. Dois sistemas de lentes foram utilizadas para a geração da folha de iluminação *laser*. Para o *laser* vermelho, utilizou-se uma lente cilíndrica. Para o *laser* verde, utilizou-se um polarizador, seguido de uma lente cilíndrica e uma lente convexa (Fig. 3.30).

Uma câmera DRSL NIKON 7200 foi utilizada neste ensaio para a captura das imagens. A câmera foi colocada em um tripé e posicionada ortogonalmente ao plano de captura das imagens. A câmera foi conectada a uma estação de trabalho e foi comandada pelo *software DigiCam 3.0*. Os procedimentos de calibração e a aquisição da imagem FIDUCIAL (apêndice A) foram executados antes de cada ensaio.

Além do aparato já mencionado, um sistema motorizado para arrancar os torpedos e outro para aplicação de confinamento na amostra foram desenvolvidos. Eles serão descritos a seguir.

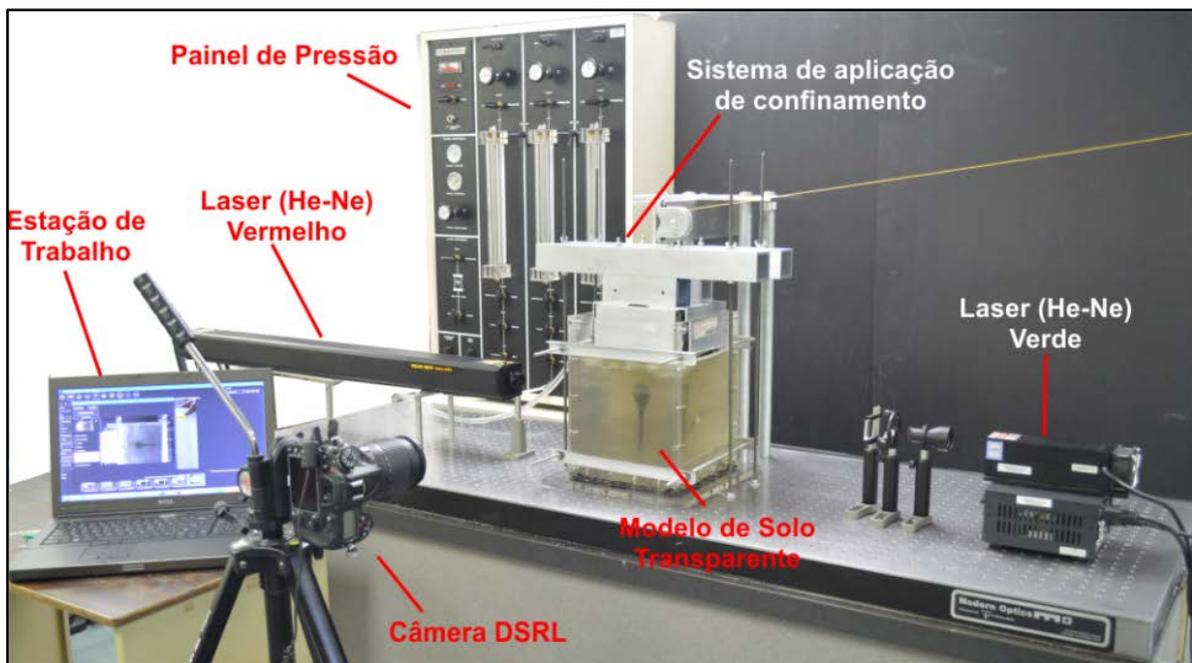


Figura 3.30 - Aparato experimental testado para o arrancamento das estacas torpedos.

### 3.5.5.1 Sistema para arrancamento do torpedo

Para arrancamento do torpedo, foi utilizado duas polias e uma linha de *kevlar* estrategicamente posicionados para evitar qualquer tipo de interferência durante o arrancamento. A primeira polia ficou posicionada em cima do sistema de confinamento e foi sustentada por quatro barras de alumínio. Um equipamento de ensaio triaxial foi utilizado para o arrancamento dos torpedos. Ensaios no modo de extensão foram

executados, e possibilitou o registro pela célula de carga a força necessária ao arrancamento e de um LVDT que registrou o deslocamento. A segunda roldana foi instalada na parte de cima da prensa triaxial. Um gancho foi atarrachado a célula de carga que por sua vez foi amarrada a linha de *kevlar*. A Figura 3.31 mostra a segunda parte do aparato utilizado para o arrancamento de torpedos.

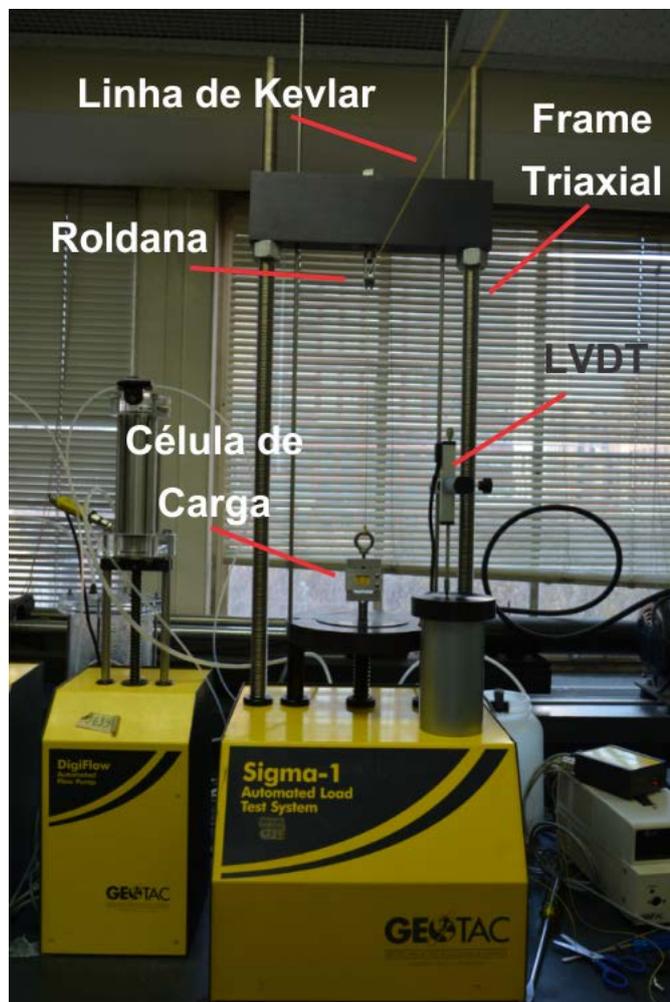


Figura 3.31 – Sistema motorizado para o arrancamento das estacas torpedos.

#### 3.5.5.2 Sistema de aplicação de confinamento

Um sistema de aplicação de pressão confinante foi construído para este teste. O sistema consiste em duas barras de alumínio de seção quadrada aparafusadas em cantoneiras de alumínio (Fig. 3.32a) de modo que existisse entre elas um

espaçamento por onde passa a linha de *kevlar* e o tubo de fornecimento de ar comprimido. Uma câmara de ar para pneu de bicicleta foi utilizada para aplicação de pressão. As cantoneiras foram dispostas de modo que a câmara ficasse bem alojada e com ausências de pontas e rebarbas metálicas que pudessem afetar sua integridade (Fig. 3.32b). Pedacos de madeira foram colocados no interior das cantoneiras para o ajuste de altura da câmara de ar no container de solo transparente. Uma placa de PVC porosa foi utilizada como interface entre a câmara de ar e a superfície da amostra do solo transparente. Um corte foi realizado na placa de PVC para a passagem da linha de *kevlar* até a estaca torpedado testada (Fig.3.32d).

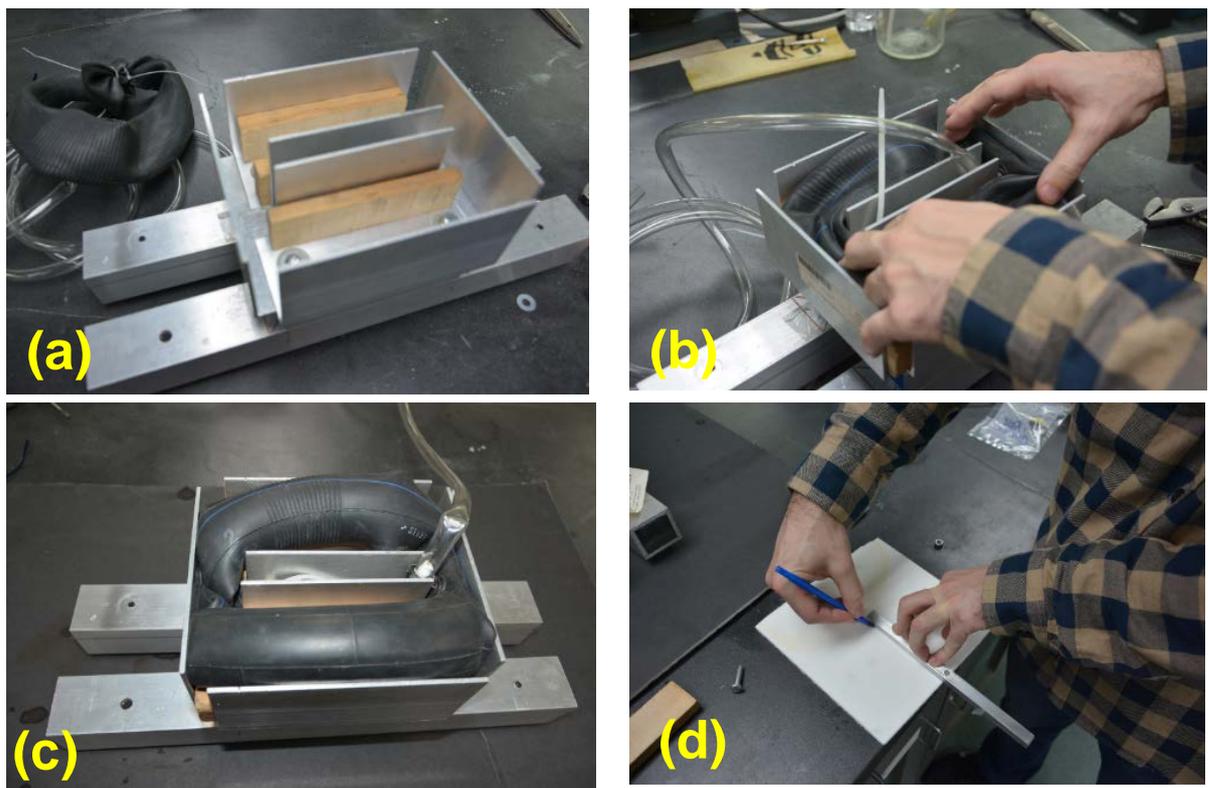


Figura 3.32 – Etapas de construção do sistema de aplicação de pressão confinante.

### 3.5.5.3 Sistema de Lentes utilizadas

O elemento essencial para a produção de uma folha de luz é uma lente cilíndrica. Quando usa-se feixe de *laser* com um diâmetro suficientemente pequeno - como por exemplo, lasers de argônio-íon - uma lente cilíndrica pode ser suficiente para gerar uma folha de luz de forma apropriada. Para outras fontes de luz - como por exemplo, lasers de Nd: YAG - uma combinação de diferentes tipos de lentes é normalmente necessária a fim de gerar as folhas finas de luz de alta intensidade. Pelo

menos uma lente adicional deve ser utilizada para transformar o feixe para uma espessura adequada.

A lente cilíndrica controla a divergência do plano de luz e não têm efeito sobre a espessura. O laser diverge em apenas uma direção quando atravessa uma lente cilíndrica de distância focal negativa. Pequenos comprimentos focais divergem o plano de luz mais rápido que grandes comprimentos focais. A lente esférica de distância focal positiva tem a finalidade de reduzir minimamente esta divergência no plano.

Tipicamente, o comprimento focal da lente esférica é muito maior que o da lente cilíndrica, fazendo com que a seleção das lentes seja independente uma da outra. As lentes esféricas são empregadas para controlar a espessura, convergente até ao comprimento focal e divergente a partir daí. Qualquer posição ao longo do plano de luz formado pode ser utilizada para direcionar a câmera, porém a imagem é normalmente capturada na zona do ponto focal antes mencionada onde a espessura do plano de luz é mínima, onde a intensidade é maior.

No sistema ótico de arrancamento de dutos utilizou-se dois *lasers* de Hélio Neon, devido as dimensões da amostra de solo transparente, maior do que o habitualmente utilizado. O primeiro *laser* He-Ne vermelho possui potência de 0,5 Watt e uma lente cilíndrica de comprimento focal de 200 mm foi utilizado para gerar a folha laser que corta “oticamente” a amostra. A representação esquemática do conjunto ótico utilizado no *laser* He-Ne vermelho é apresentado na Figura 3.33.

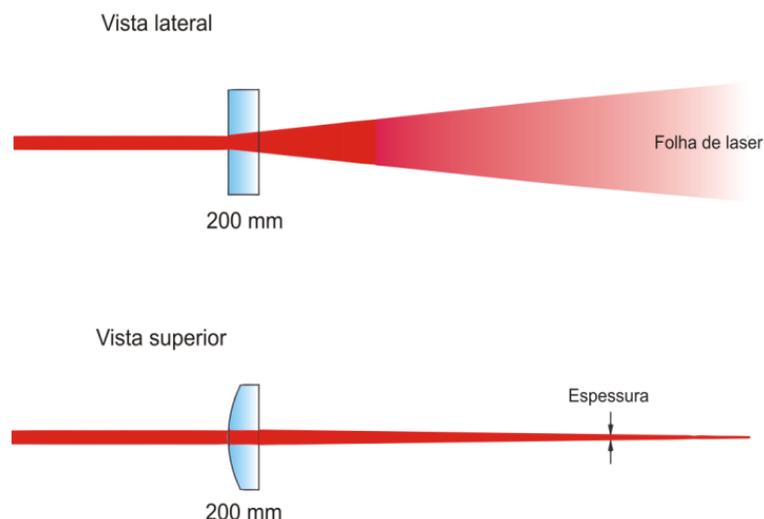


Figura 3.33 – Configuração ótica do *laser* He-Ne vermelho.

A configuração ótica utilizada no *laser* He-Ne verde é mostrado esquematicamente na figura 3.34. Nesta configuração duas lentes adicionais foram utilizadas. A razão pela qual uma lente divergente foi utilizada é para prevenir a formação de linhas focais. Em *lasers* de alta potência, como é o caso do *laser* He-Ne verde, pontos focais devem ser evitados, caso contrário o ar perto do ponto focal será ionizado. Linhas focais geralmente não ionizam o ar, mas as partículas de poeiras podem ser queimadas, formando pontos de fumaças visíveis.

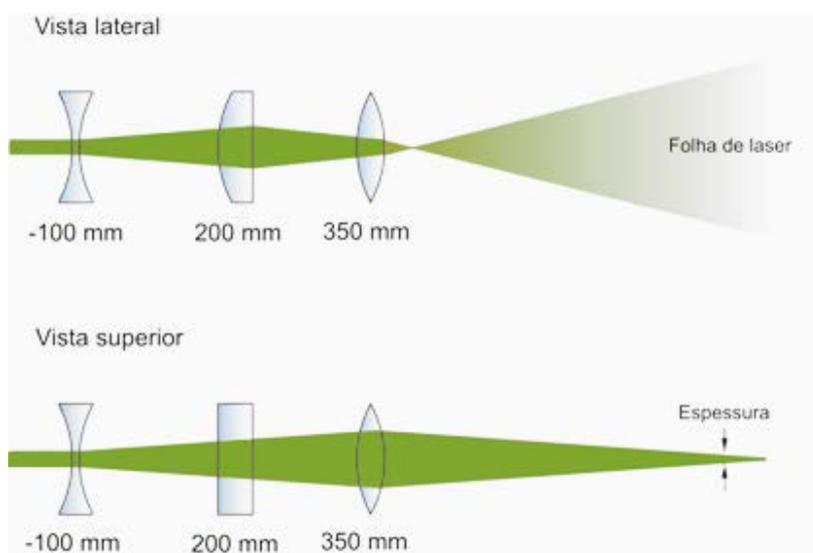


Figura 3.34 – Configuração ótica do *laser* He-Ne verde.

### 3.5.6 Descrição da primeira metodologia utilizada

Inicialmente, uma configuração com dois *lasers* He-Ne foi montado em uma mesa ótica para utilização da técnica de Interferometria *speckle* apresentada na revisão bibliográfica deste trabalho. Esta técnica consiste em cortar oticamente o modelo gerando assim um plano distinguível para a captura das imagens pela câmera. Os dois *lasers* foram necessários devido as dimensões do container. O *laser* He-Ne vermelho possui 0,5 mW de potência e foi utilizado com uma lente cilíndrica para gerar uma folha plana *laser*, O segundo *laser* He-Ne verde possui 2 Watts de potência e foi utilizado com um polarizador, seguido de uma lente cilíndrica e em seguida uma lente convexa conforme mostrado na Fig.3.35.

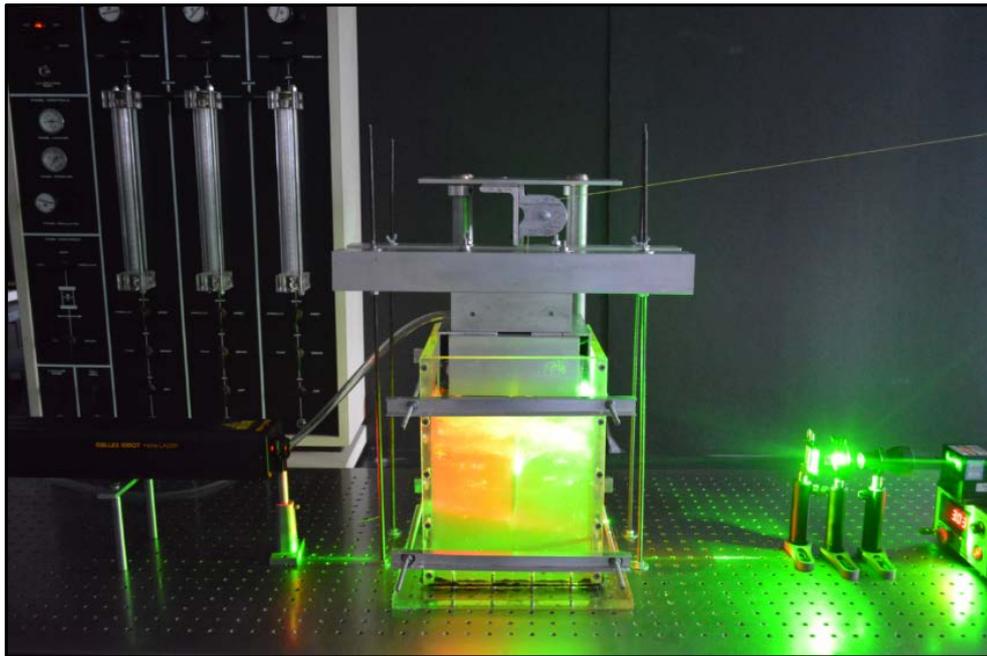


Figura 3.35 – Aparato experimental da primeira tentativa deste ensaio.

O solo transparente utilizado foi o quartzo fundido com a mistura de dois óleos minerais o *Puretol 7* e o *Krystol 40*. A excelente transparência apresentada por esta receita de solo transparente apresentou um inconveniente quando utilizado com a técnica de Interferometria *speckle*: A geração de um padrão *speckle* distinguível foi mínima o que impossibilitou o rastreamento do deslocamento dos grãos de solo durante o arrancamento do modelo da estaca torpeda. A figura 3.36 mostra a excelente transparência do solo transparente e a ausência de um padrão *speckle* passível de ser rastreado por algoritmos de Correlação Digital de Imagens (DIC).

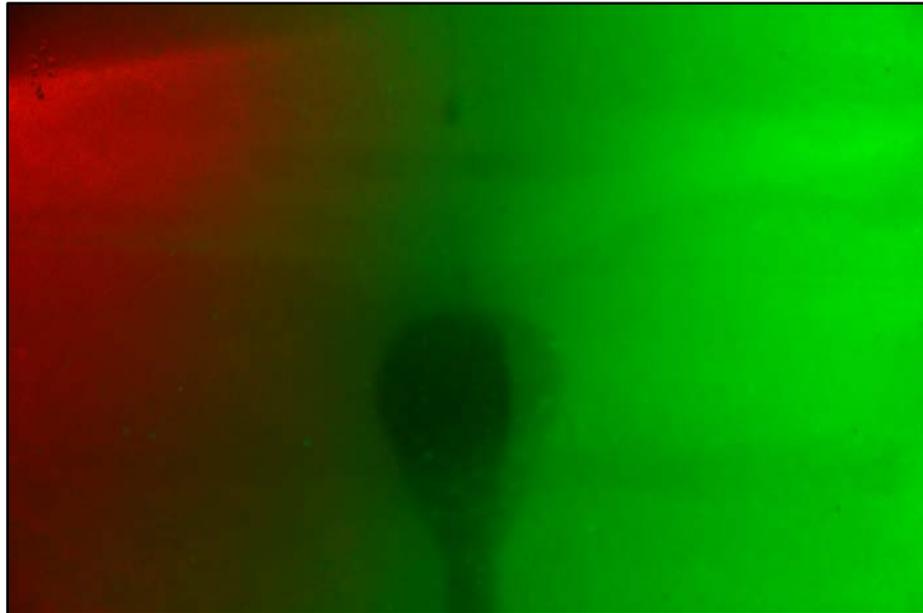


Figura 3.36 – Ausência de um padrão speckle discernível no solo transparente feito de quartzo fundido e os óleos minerais *Puretol 7* e *Krystol 40*.

Outras duas tentativas foram realizadas com esta receita de solo transparente: A primeira tentativa consistiu em misturar quartzo fundido de baixa pureza com quartzo fundido de alta pureza esperando assim a geração de um *speckle* discernível. O problema encontrado nesta tentativa consistiu na dificuldade de pluviação da mistura de quartzo fundido na área desejada sem afetar a transparência da parte frontal da amostra. A solução ideal e a reportada por outros autores (ex. Guymer et al., 2011) seria a adição de traçadores incorporados ao solo que produziriam um padrão *speckle* discernível. Porém, durante o período da concepção e execução deste ensaio no laboratório de solos transparentes na Universidade de Nova York, nenhum traçador foi encontrado que possuísse tamanho compatível com o  $D_{50}$  do quartzo fundido utilizado. Utilizou-se, portanto, na terceira tentativa traçadores utilizados na mecânica dos fluidos - as *hollow spheres*. Porém, a densidade das partículas de *hollow spheres* eram menores do que a densidade da mistura de óleo, impossibilitando assim a eficiente incorporação das partículas de *hollow spheres* com os grãos de quartzo fundido.

### 3.5.7 Descrição da segunda metodologia utilizada

Diante das dificuldades apresentadas do uso do modelo de solo transparente com a técnica de interferometria *speckle* decidiu-se utilizar a técnica da camada opaca para a realização deste ensaio. Esta técnica foi proposta por Omidvar et al., 2015 e consiste em incorporar um plano de partículas de quartzo fundido tingido com um corante negro não metálico no interior do modelo. Esta técnica não necessita portanto de nenhuma fonte *laser* para iluminar o plano a ser estudado no interior do solo, apenas iluminação indireta difusa com refletores de tungstênio. A figura 3.37 mostra partículas de quartzo fundido após o tingimento com corantes não metálicos.



Figura 3.37 – Quartzo fundido tingido com uma tinta não metálica utilizado para ser incorporado no plano opaco da amostra de solo transparente.

Uma adaptação da técnica da camada opaca foi utilizada na preparação da amostra. O container foi dividido em 3 seções através da instalação de guias de madeira e folhas de alumínio ultrafinas com espessura de 1mm. A pluviação do quartzo fundido seco foi realizada em quantidades iguais nas 3 seções sendo que foi utilizado quartzo fundido de elevada pureza na seção frontal, e de baixa pureza na parte de trás da

amostra. Na seção central foi posicionado a estaca torpedo em estudo e pluviado uma mistura de 50% de quartzo fundido tingido com 50% de quartzo fundido transparente. Após a preparação da amostra, as folhas de alumínio ultrafinas foram retiradas sem a amostra sofrer perturbação. A figura 3.38 mostra imagens das etapas de preparação das amostras.

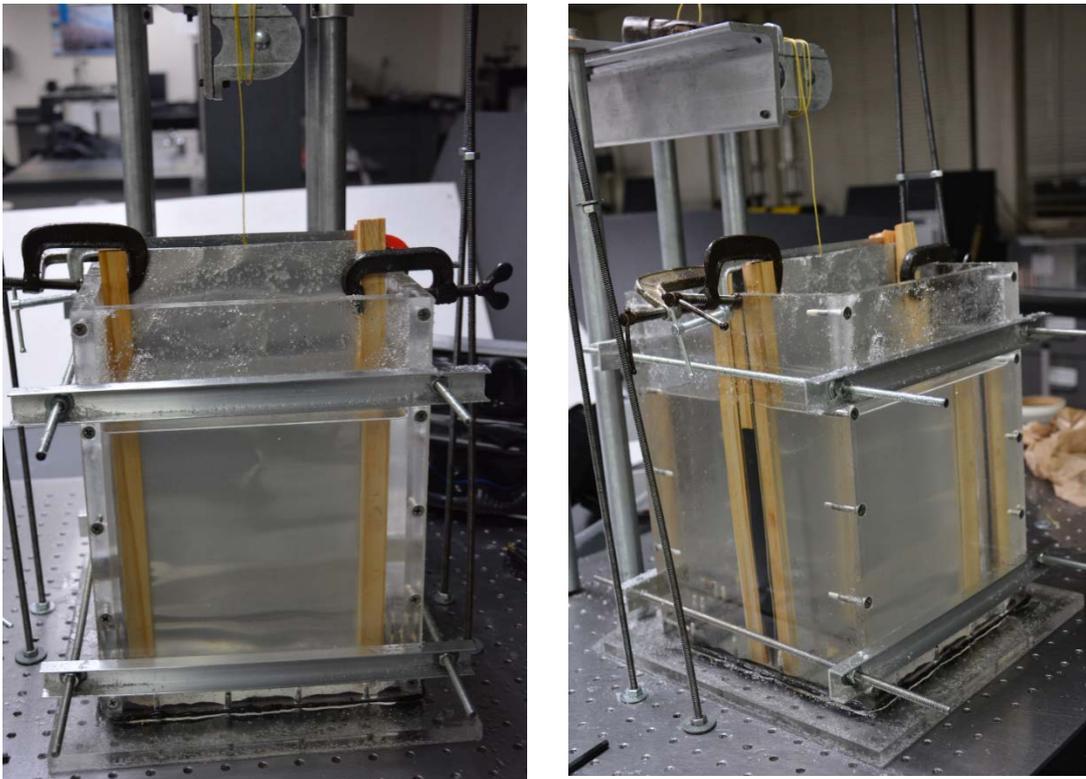


Figura 3.38 – Preparação da amostra com o uso de técnica de pluviação por seções.

## **4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises referentes a todas as etapas de ensaios laboratoriais de caracterização dos solos transparentes, cujas metodologias foram apresentadas no capítulo anterior. Também é apresentado neste capítulo alguns resultados, interpretações e discussões das análises de correlação digital de imagens das quatro aplicações utilizadas nesta tese para ilustrar a metodologia.

### **4.2 PROGRAMA DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

#### **4.2.1 SELEÇÃO DE PORO FLUIDOS NACIONAIS**

Dezessete fluidos nacionais foram selecionados como possíveis candidatos a compor um poro fluido de óleo mineral composto de produtos nacionais. Quatro poro fluidos já relatados na literatura de outra nacionalidade também foram selecionados. O resultado das leituras dos índices de refração a 22° C, a origem do poro fluido, o tipo e a toxicidade são encontrados na tabela 4.1. A coluna observações traz informações sobre a toxicidade e a inflamabilidade do poro fluido. Poro fluidos inflamáveis e tóxicos foram considerados não eleitos para compor este poro fluido nacional. Outro aspecto que foi levado em consideração para a rejeição do poro fluido foi a presença de coloração, como no caso do óleo de girassol; Além deste aspecto, os poro fluidos que apresentaram volatilidade excessiva também foram rejeitados, como o caso do álcool isopropílico.

Tabela 4.1 – Índices de refração dos óleos minerais utilizados nesta pesquisa.

Nome Comercial	Origem	Tipo	Índice de	Observações
			Refração 22 ° C (± 0.5)	
Glicerina	Brasil	compensação	1,431	Eleito
Vaselina Líquida	Brasil	base	1,458	Eleito
Nujol®	Brasil	compensação	1,418	Eleito
Óleo de Bebê J&J	Brasil	base	1,464	Eleito
Querosene LTC	Brasil	base	1,448	Inflamável/Tóxico
Acetona	Brasil	compensação	1,359	Eleito
Butanol	Brasil	compensação	1,395	Tóxico
Drakeol	EUA	compensação	1,425	Inflamável/Tóxico
Norpar 12	EUA	base	1,447	Inflamável/Tóxico
Tolueno	Brasil	base	1,496	Tóxico
Vaselina “Farmax”	Brasil	base	1,454	Eleito
Fluorolube	Brasil	compensação	1,415	Eleito
Óleo mineral “Mineroléo”	Brasil	compensação	1,422	Eleito
Óleo de Girassol	Brasil	base	1,467	Não Eleito
Óleo de tocha “Garden Light”	Brasil	base	1,447	Eleito
Vaselina Líquida(Reagel)	Brasil	compensação	1,432	Eleito
Glicerina(Reagel)	Brasil	compensação	1,433	Eleito
Álcool Isopropílico	Brasil	compensação	1,377	Não Eleito
Propilenoglicol	Brasil	compensação	1,439	Eleito
Puretol 7	Canadá	base	1,463	Eleito
Krystol 40	Canadá	compensação	1,450	Eleito

Os índices de refração dos óleos analisados superiores ao índice de refração da sílica gel e do quartzo fundido, 1,442 e 1,4585 respectivamente foram tomados como poro fluido base. Os demais óleos minerais analisados foram tomados como poro fluidos de compensação. O próximo passo foi realização de mistura dos poro fluidos base com os poro fluidos de compensação e através de tentativa e erro buscou-se a proporção ótima entre os óleos para se chegar a um poro fluido com índice de refração idêntica ao da sílica gel e do quartzo fundido.

A tabela 4.2 apresenta um resumo de algumas combinações de óleos minerais obtidas com o mesmo índice de refração dos materiais granulares substitutos dos solos naturais.

Tabela 4.2–Propriedades das misturas de óleos minerais.

Mistura de Óleos minerais	(%) por volume	Proporção da Mistura	Para uso Com o material	Índice de Refração da Mistura
				22 ° C (± 0.5)
Vaselina Líquida + Glicerina (Reagel)	48% 52%	1 : 1	sílica gel/sílica em pó	1,4420
Óleo para tochas “Garden Light”) + Glicerina (Reagel)	64% 36%	1 : 2	sílica gel/sílica em pó	1,4420
Óleo de bebê (Johnsons & Johnsons) + Glicerina	83% 17%	1 : 5	quartzo fundido	1,4585
Óleo para tochas “Garden Light”) + Puretol 7	72% 28%	1 : 3	quartzo fundido	1,4585

O resultado excepcional da transparência obtida com o solo transparente preparado com quartzo fundido e o poro fluido feito de mistura de óleo para tocha “Garden Light” e Puretol 7 quando misturados com a proporção de 72:38% em volume são apresentados na figura 4.1 . A figura 4.2 mostra a transparência para uma amostra de solo transparente feito de sílica gel e uma mistura de dois poro fluidos - o óleos Garden Light e glicerina na proporção de 64:36 % em volume.

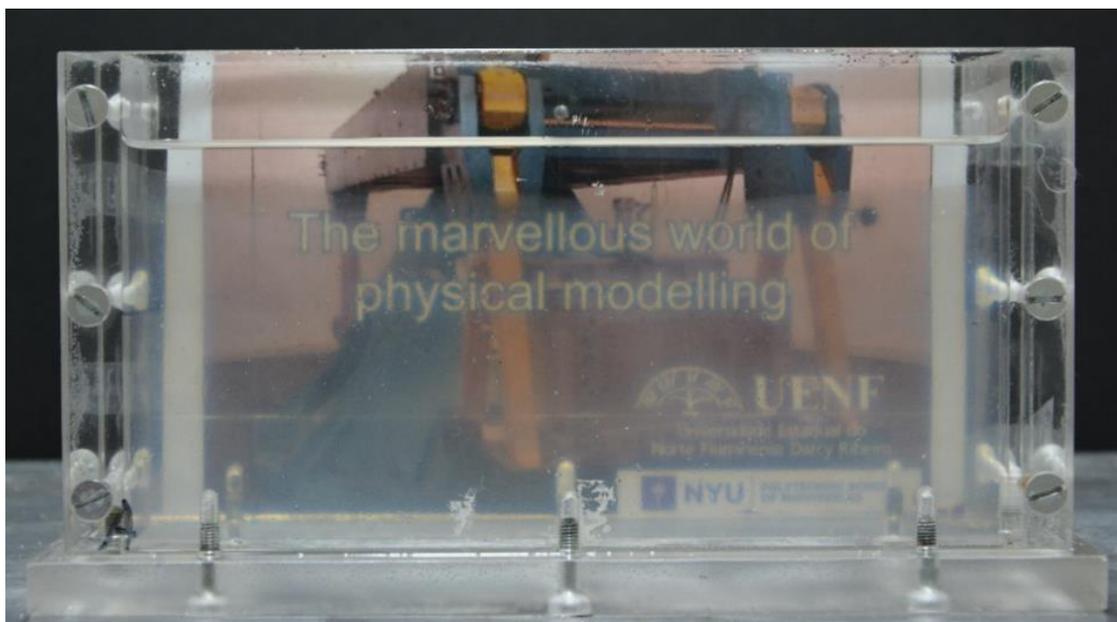


Figura 4.1 – Foto da centrífuga geotécnica da UENF vista através de um container de acrílico de 5 cm de espessura contido em seu interior solo transparente feito de quartzo fundido com o poro fluido constituído da mistura de dois óleos: *Garden Light* e *Puretol 7*.

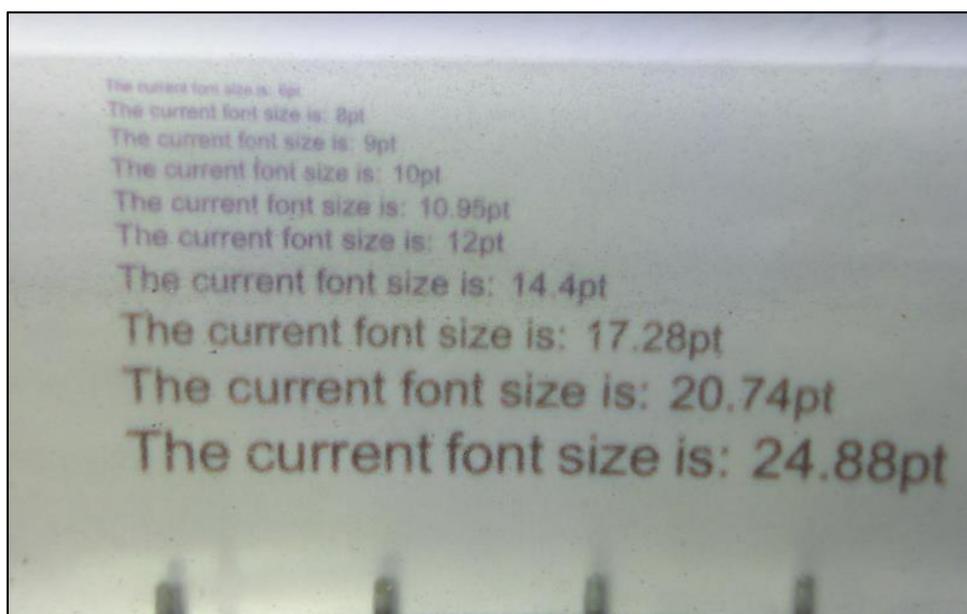


Figura 4.2 – Foto de um grid com 3 cm de espessura com sílica gel e os óleos *Garden Light* e *Glicerina*.

#### 4.2.2 Pesquisa de um Poro Fluido não viscoso a base de água

Na busca de um poro fluido a base de água que pudesse compor a receita de um solo transparente, utilizou-se nesta tese o iodeto de sódio tratado com o tiosulfato de sódio. Durante a fase de pesquisa, notou-se que após 24 horas de adição do iodeto de sódio à água e sob exposição à luz ambiente, houve uma mudança notável da mistura para uma cor amarelo escura (Figura 4.3). Isto é devido ao fenômeno da oxidação promovido pelo oxigênio atmosférico e como consequência a libertação de iodo livre. Com o objetivo de recuperar a coloração transparente, adiciona-se o tiosulfato de sódio.

Os ânions reagem com tiosulfato de sódio na solução aquosa, reduzindo-a para tetrionato. Verificou-se que uma proporção de 0,01% (tiosulfato de sódio / iodeto de sódio) por peso é suficiente para eliminar a coloração indesejável. Isto é demonstrado na Figura 4.4, onde inicialmente a amostra apresenta-se transparente e depois de adicionado iodeto de sódio e exposto ao ar ambiente durante 48 horas, adquire uma coloração amarelo escura. Ao adicionar uma proporção de 0,1% de tiosulfato de sódio a amostra volta a ter sua transparência original.



Figura 4.3- Mudança de coloração devido a processo oxidativo.

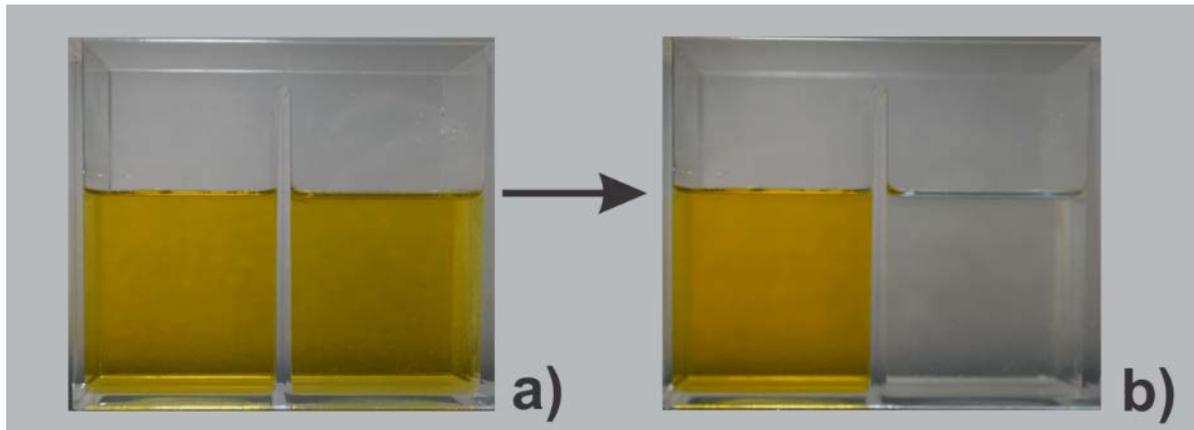


Figura 4.4- Solução de iodeto de sódio exposta ao ambiente por 48 horas(esquerda), e amostra similar tratada com tiosulfato de sódio (direita).

A fim de obter a concentração de iodeto de sódio ótima para adicionar a água e atingir o índice de refração do quartzo fundido ( $n=1,4585$ ), um modelo matemático proposto por Narrow et al. 2000 foi utilizado para prever o índice de refração de iodeto de sódio (NaI). Este modelo matemático relaciona o índice de refração ( $n$ ), a temperatura, a concentração e o comprimento de onda da seguinte forma:

$$\eta_{NaI}(T, c, \lambda) = 1.252 - (2.91 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})T + (0.365)c + (5542 \text{ nm}^2)\lambda^{-2} \quad (\text{Eq.20})$$

Onde:

$T$  é a temperatura em graus *Celsius*;

$c$  é a concentração de iodeto de sódio,

» é o comprimento de onda em *nm*.

Utilizando a Equação 20, neste estudo, amostras de solos transparentes foram preparadas através da adição de 105% em peso de iodeto de sódio com água, a uma temperatura ambiente controlada de 23 °C, com a adição de 0,01% por peso de tiosulfato de sódio.

Uma amostra de solo transparente de quartzo fundido e iodeto de sódio, dentro de um container com uma espessura de 50 mm, é mostrada na figura 4.5. As amostras foram preparadas utilizando métodos descritos no apêndice B desta tese. Pode ser visto que modelos com alta transparência podem ser produzidos com o uso deste novo poro fluido.



Figura 4.5 - 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.

#### 4.2.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS

As partículas de sílica gel comerciais são geralmente vendidas em tamanhos uniformes, isto é, a sílica gel comprada tem um tamanho máximo e mínimo de partículas já pré definidos. O quartzo fundido é adquirido já misturado com diferentes granulometrias. O resultado do ensaio granulométrico da sílica gel esférica (SG-1), sílica gel angular (SG-2) e do quartzo fundido (QF-1) e de algumas areias naturais para comparação encontram-se plotados na figura 4.6.

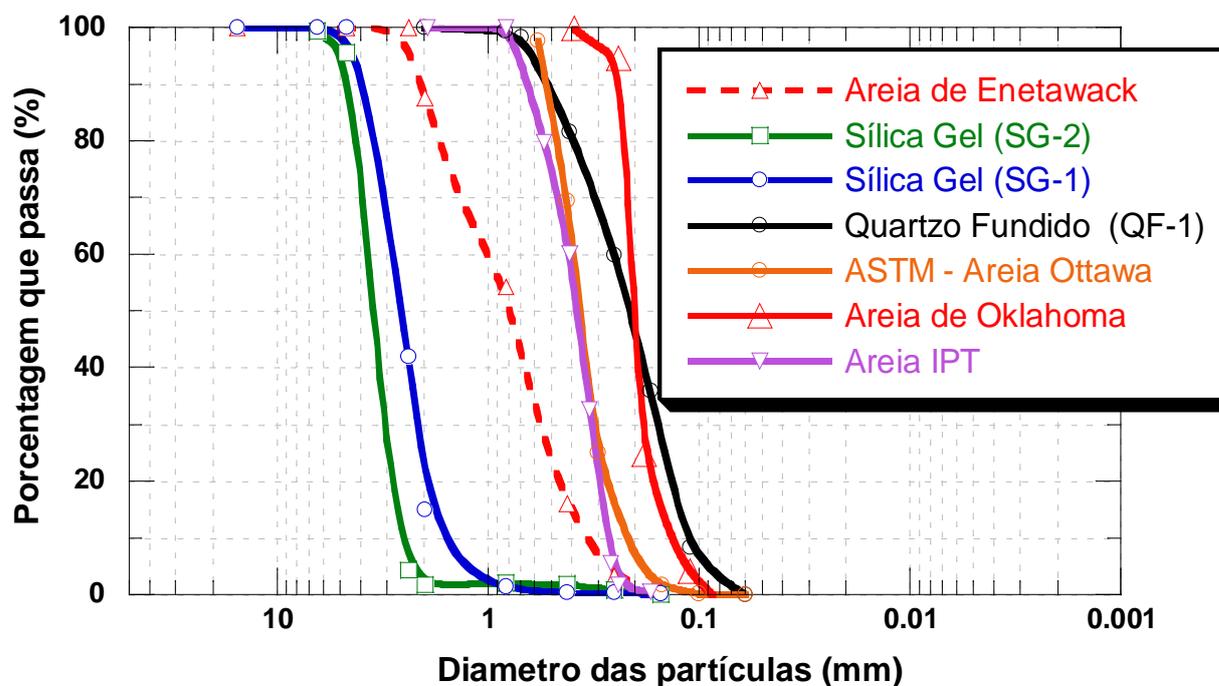


Figura 4.6- Granulometria dos materiais utilizados nesta pesquisa e de algumas areias naturais.

#### 4.2.3.1 Determinação das Densidades máximas e mínimas do Quartzo Fundido

Densidades secas máximas e mínimas foram determinadas seguindo o procedimento recomendado por Kolbuszewski (1948). A densidade máxima foi determinada pela vibração de 1 kg de FQ-1 em três camadas, durante 15 minutos por camada, em um cilindro graduado contendo água. O volume final foi usado para determinar uma densidade seca máxima de 1358 kg/m<sup>3</sup>. Nos ensaios realizados em condições submersas obteve-se uma densidade máxima mais elevada do que nos ensaios realizados em condições secas, como discutido por Kolbuszewski (1948).

A densidade mínima foi determinada pelo preenchimento de 1 kg de FQ-1 num cilindro graduado de vidro, tal como recomendado por Lee (1967). O volume máximo ocupado corresponde a uma densidade mínima de 1134 kg/m<sup>3</sup>. Cada ensaio foi repetido cinco vezes para assegurar medições consistentes de densidade de acordo com Tavenas & La Rochelle (1972). A densidade específica do quartzo fundido é relatada como sendo 2,2, valor menor do que as areias de quartzo (2,65 - 2,72). As

razões de índices de vazios,  $e_{min}$  e  $e_{max}$ , que correspondem às densidades máximas e mínimas, são de 0,65 e 0,97, respectivamente. Estes valores são idênticos aos que ocorrem nas areias naturais como mostrado na tabela 4.3.

Finalmente, verificou-se que a razão  $e_{max}/e_{min}$  da FQ-1 é 1,49, que é bem próximo ao valor empírico de 1,62 sugerido por Miura et al. para as areias naturais. As densidades máximas e mínimas foram também determinadas para as amostras de SG-1 e foram consideradas 820 kg/m<sup>3</sup> e 712 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. A densidade específica da sílica gel, é relatado na literatura como sendo 2,2 (Weast, 1986 apud Iskander, 2010), o que produz uma relação vazio mínimo e máximo,  $e_{min}$ ,  $e_{max}$ , de 1,68 e 2,01. Estes valores são muito maiores do que os normalmente atribuídos as areias naturais, o que torna FQ-1 um melhor substituto da areia em comparação a sílica gel.

Tabela 4.3– Tamanho médio dos grãos ( $D_{50}$ ), Coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) e índice de vazios mínimo e máximo da sílica fundida e de algumas areias publicadas na literatura.

Nome do Material	Parâmetros			
	$D_{50}$	$C_u$	$e_{min}$	$e_{max}$
FQ-1	0,22	0,21	0,97	0,65
SG-1	1,2	1,9	2,01	1,68
Nevada	0,15	1,8	0,85	0,57
Praia de Daytona	0,23	1,4	1,0	0,64
ASTM	0,35	1,7	0,82	0,50
Areia de Ottawa	0,20	2,2	1,10	0,73
Areia do IPT	0,20	0,8	0,723	1,06

#### 4.2.3.2 Propriedades físicas do quartzo fundido

O quartzo fundido é classificado como areia mal classificada (SP) de acordo com a Classificação de Solos do Sistema Unificado da ASTM (ASTM 2487). O quartzo fundido empregue neste estudo possui um tamanho médio,  $D_{50}$  de 0,22 mm e um tamanho efetivo,  $D_{10}$ , de 0,12 mm, um coeficiente de uniformidade,  $C_u$ , de 2,1 e um coeficiente de curvatura,  $C_c$ , de 0,96. O Quartzo fundido tem um índice de refração ótico de 1,4585 a 23 ° C e uma gravidade específica de 2,2, como relatado por Weast (1985).

### 4.2.3.3 COEFICIENTE DE FORMA E ESFERICIDADE

#### 4.2.3.3.1 Areia de Ottawa

A distribuição da forma da areia de Ottawa é mostrado na Fig. 4.7. A relação de aspecto dos grãos, definida como a razão entre o maior diâmetro do grão entre o menor diâmetro ortogonal a ele, foi usada para caracterizar os grãos. Formas típicas dos grãos em vários tamanhos também são mostrados na parte inferior da Figura 6.8. Pode ser visto que as partículas têm uma forma arredondada, e têm razões de aspecto na faixa de 0,54 - 0,77.

A areia de Ottawa é classificada como SP de acordo com o Sistema Unificado de classificação de solos e tem um diâmetro médio ( $D_{50}$ ) de 0,20 mm, um tamanho efetivo ( $D_{10}$ ) de 0,065 mm, um coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) de 0,8, e um coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) de 0,56.

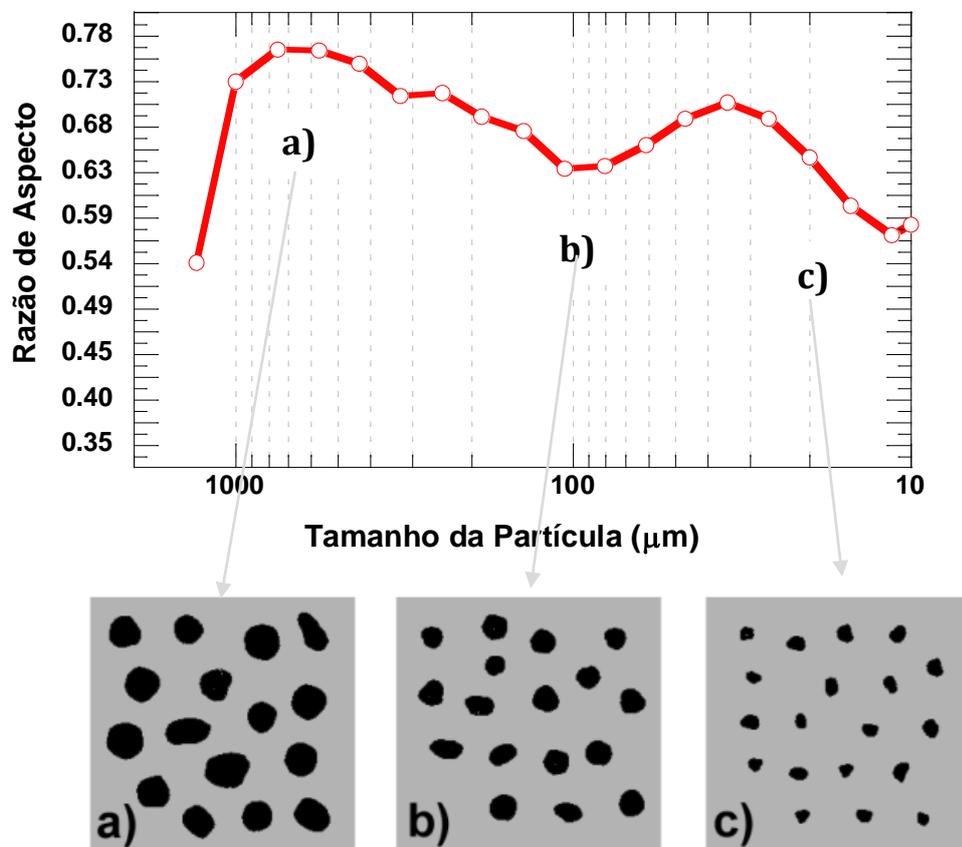


Figura 4.7 - Razão de forma da areia de Ottawa utilizada em duas aplicações nesta tese.

#### 4.2.3.3.2 Quartzo fundido

A distribuição de forma das partículas de quartzo fundido usando o método descrito acima é mostrado na Figura 4.8. A relação de aspecto dos grãos, definida como a razão entre o maior diâmetro da partícula e o menor diâmetro ortogonal a ele, foi usada para caracterizar os grãos. Formas típicas dos grãos em vários tamanhos também são mostrados na inserção da Figura 4.8. Pode ser visto que os grãos possuem formas angulares, e tem relações de aspecto na faixa de 0,55-0,65. O substituto do solo transparente é, portanto, adequado para simular a resposta de areias naturais angulares.

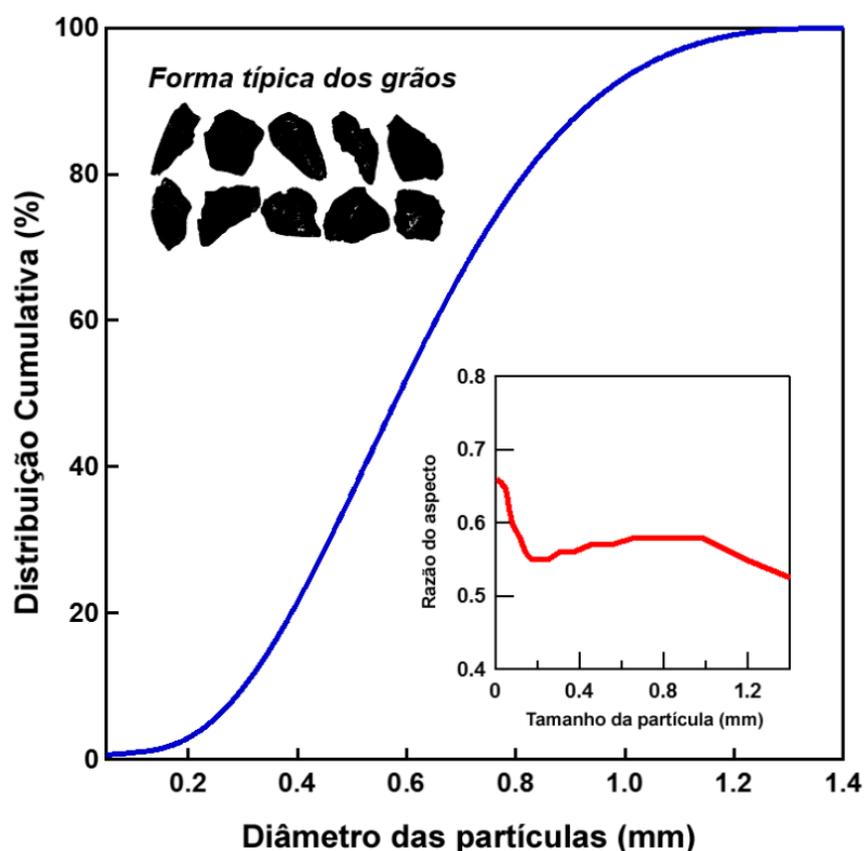


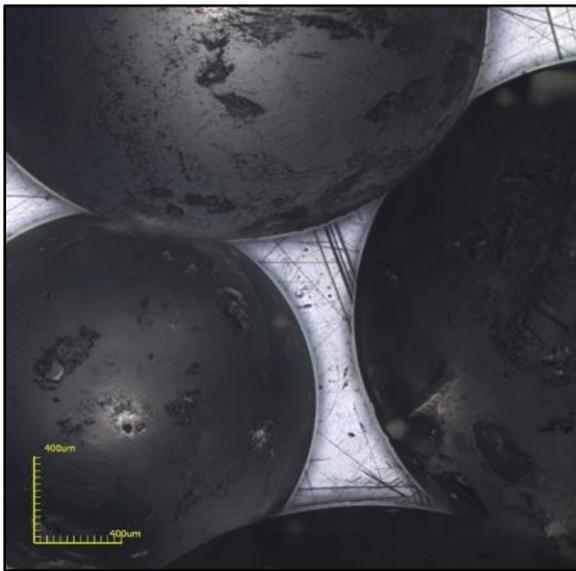
Figura 4.8- Distribuição granulométrica e razão de forma do quartzo fundido utilizado neste estudo.

#### 4.2.3.4 RESULTADOS DA ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA

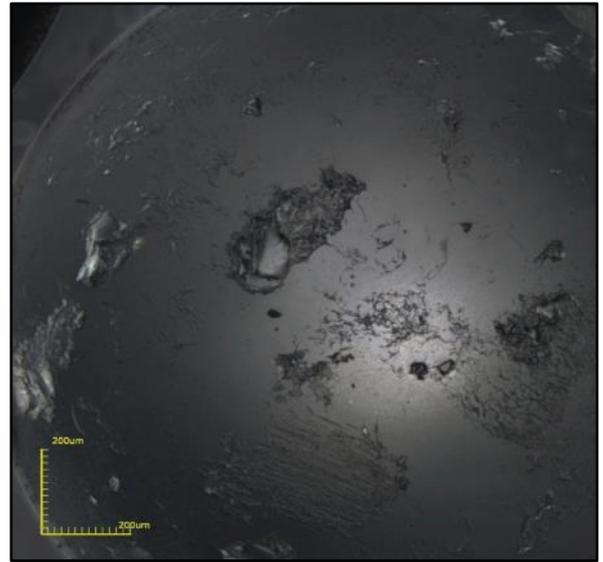
As imagens obtidas por microscopia eletrônica dos materiais testados são apresentados a seguir.

#### 4.2.3.4.1 Silica Gel (SG-1) e (SG-2)

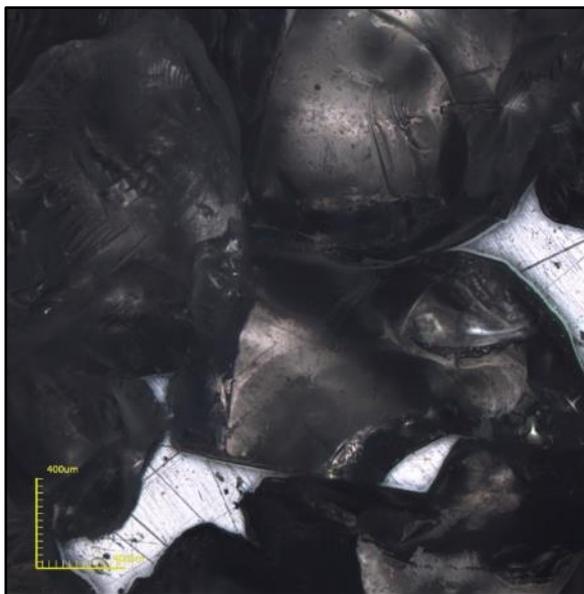
A figura 4.9 mostra detalhes das sílicas gel SG-1 e SG-2 obtidas por microscopia eletrônica. A figura 4.9a mostra a forma esférica dos grãos de sílica gel SG-1 e a figura 4.9b mostra a ampliação de micro fissuras existentes na área superficial da sílica gel SG-1. As figuras 4.9c apresenta as formas angulares presentes na sílica gel SG-2; A figura 4.9d, por sua vez, mostra a aparência da superfície irregular da sílica gel SG-2.



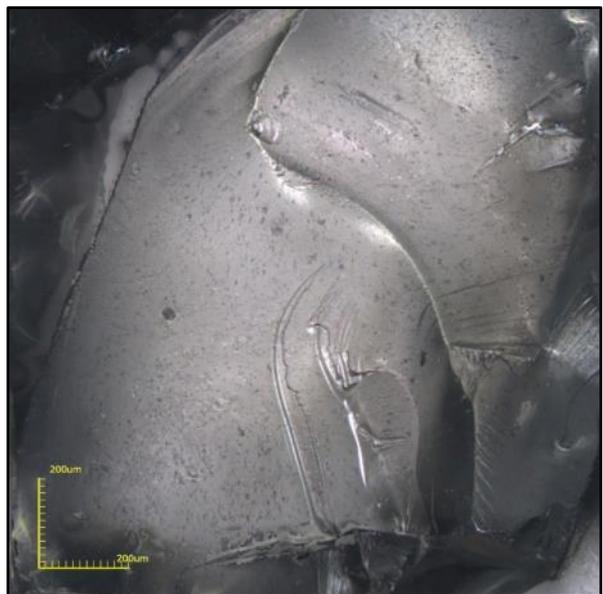
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.9 - Sílica gel (com aumento ótico de microscópio eletrônico). a) Sílica gel (SG-1) e b) Sílica gel angular (SG-2) – (cortesia: LAMAV-UENF).

#### 4.2.3.4.2 Quartzo Fundido

As imagens capturadas pelo microscópio *laser* do laboratório de ótica da Universidade de Nova York encontram-se na figura 4.10. As frações granulométricas do quartzo fundido foram separadas antes da obtenção das imagens pelo microscópio. A figura 4.10a mostra os maiores grãos do quartzo fundido (fração grosseira) e a figura 4.10b mostra a fração mais fina dos grãos do quartzo fundido chamada de QF-X . As figuras 4.10c e 4.10d apresentam as duas frações misturadas que formam o QF-1 utilizado neste trabalho.

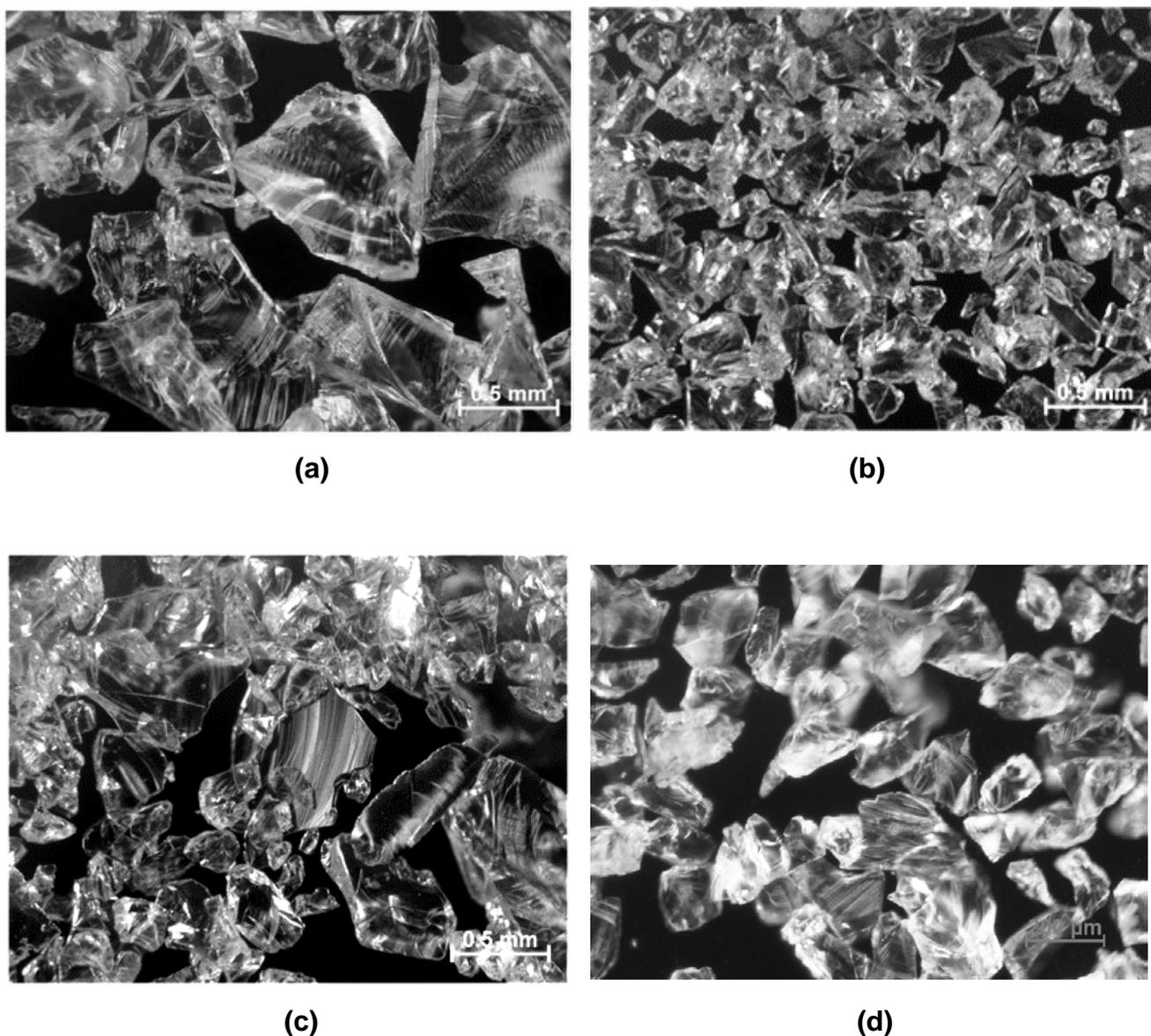


Figura 4.10 – Quartzo fundido (com aumento ótico de microscópico eletrônico). a) quartzo fundido (fração grosseira), b) quartzo fundido FQ-X , c e d) quartzo fundido QF-1 (cortesia: Laboratório de ótica – NYU Poly- USA).

## 4.2.3.5 ENSAIOS TRIAXIAIS

### 4.2.3.5.1 Quartzo fundido

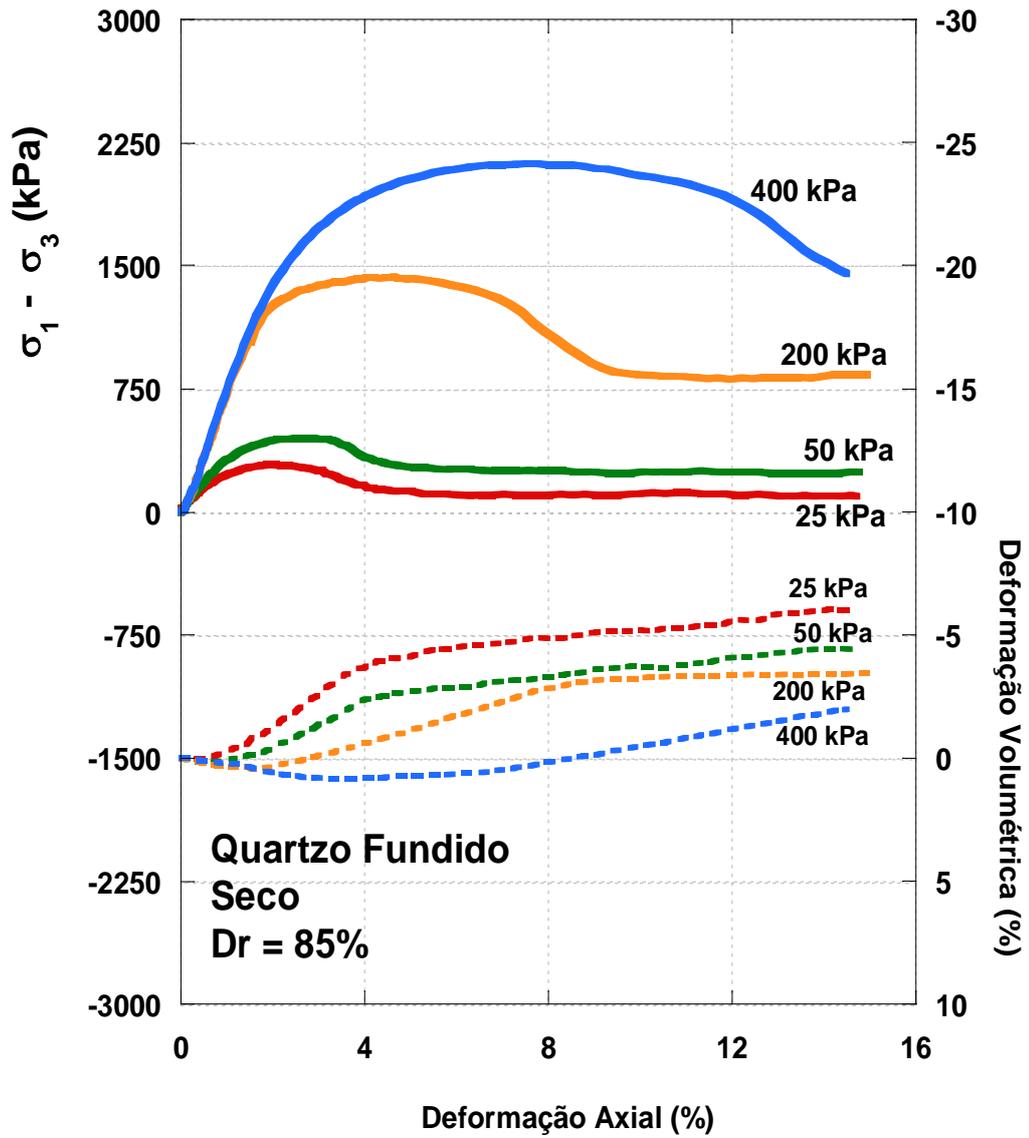
A resposta tensão-deformação do quartzo fundido seco, juntamente com a mudança de volume sob cisalhamento é mostrado nas figura 4.11 e 4.12 para densidades relativas de 85% e 35% respectivamente. Pode-se observar que o quartzo fundido seco exibe uma resposta altamente dilatante sob baixas pressões de confinamento. Aumentando a pressão de confinamento produz um endurecimento da amostra antes da plastificação, e conseqüentemente o aumento da tensão desviadora máxima. Além disso, pode-se observar que o pico da resistência geralmente coincide com a máxima taxa de dilatação em cada teste. Envoltórias de ruptura de *Mohr-Coulomb* são apresentados nas figuras 4.11b e 4.12b. A envoltória de pico de força tangencial apresenta uma curvatura clara dentro da faixa de pressões de confinamento considerados neste estudo. As envoltórias de ruptura do quartzo fundido saturado com iodeto de sódio exibiram ângulos de atrito de pico variando de 46° a 62° (tabela 4.5). Estas observações são consistentes com o comportamento típico observado em areias naturais.

Um total de dezesseis testes triaxiais consolidados drenados foram conduzidos seguindo os procedimentos descritos por Head (1986). A tabela 4.4 apresenta um resumo dos ensaios triaxiais CD realizados no quartzo fundido.

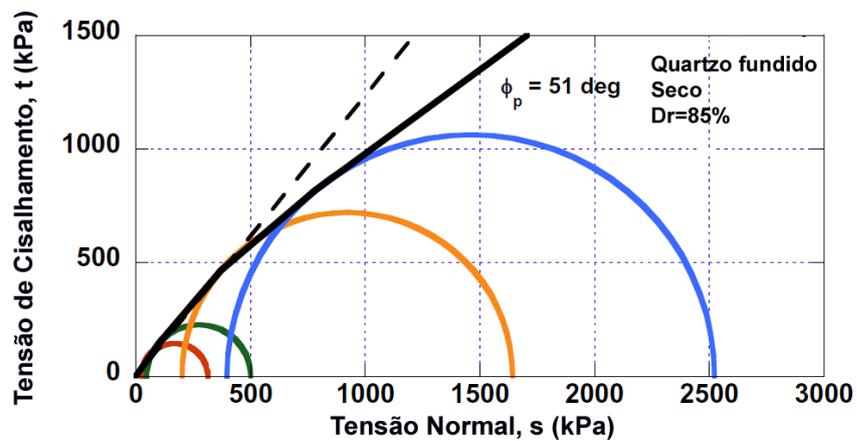
Tabela 4.4 - Resumo dos ensaios triaxiais CD realizados no quartzo fundido.

Ensaio n°	Condição/ Fluido de Saturação	Densidade Relativa (%)	Pressão Confinante (kPa)	Peso específico seco inicial (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios Inicial (e)	Ângulo de atrito (pico)
1	Fofa - seco	38%	25	1210	0,85	53°
2	Fofa - seco	37%	50	1208	0,85	50°
3	Fofa - seco	39%	200	1213	0,85	42°
4	Fofa - seco	33%	400	1198	0,86	42°
5	Denso-seco	82%	25	1312	0,71	59°
6	Denso-seco	82%	50	1312	0,71	56°
7	Denso-seco	87%	200	1325	0,66	51°
8	Denso-seco	84%	400	1317	0,73	47°
9	Denso-ISTS	85%	50	1314	0,72	46°
10	Denso-ISTS	86%	100	1314	0,72	50°
11	Denso-ISTS	85%	200	1315	0,73	53°
12	Denso - Garden Light +Puretol	88%	50	1315	0,73	43°
13	Denso - Garden Light +Puretol	89%	100	1318	0,73	52°
14	Denso - Garden Light +Puretol	88%	200	1325	0,66	54°
15	Denso - água	85%	200	1314	0,72	55°
16	Denso - Sacarose	85%	200	1314	0,72	64°

Nota: ISTS – Iodeto de Sódio tratado com tiosulfato de sódio

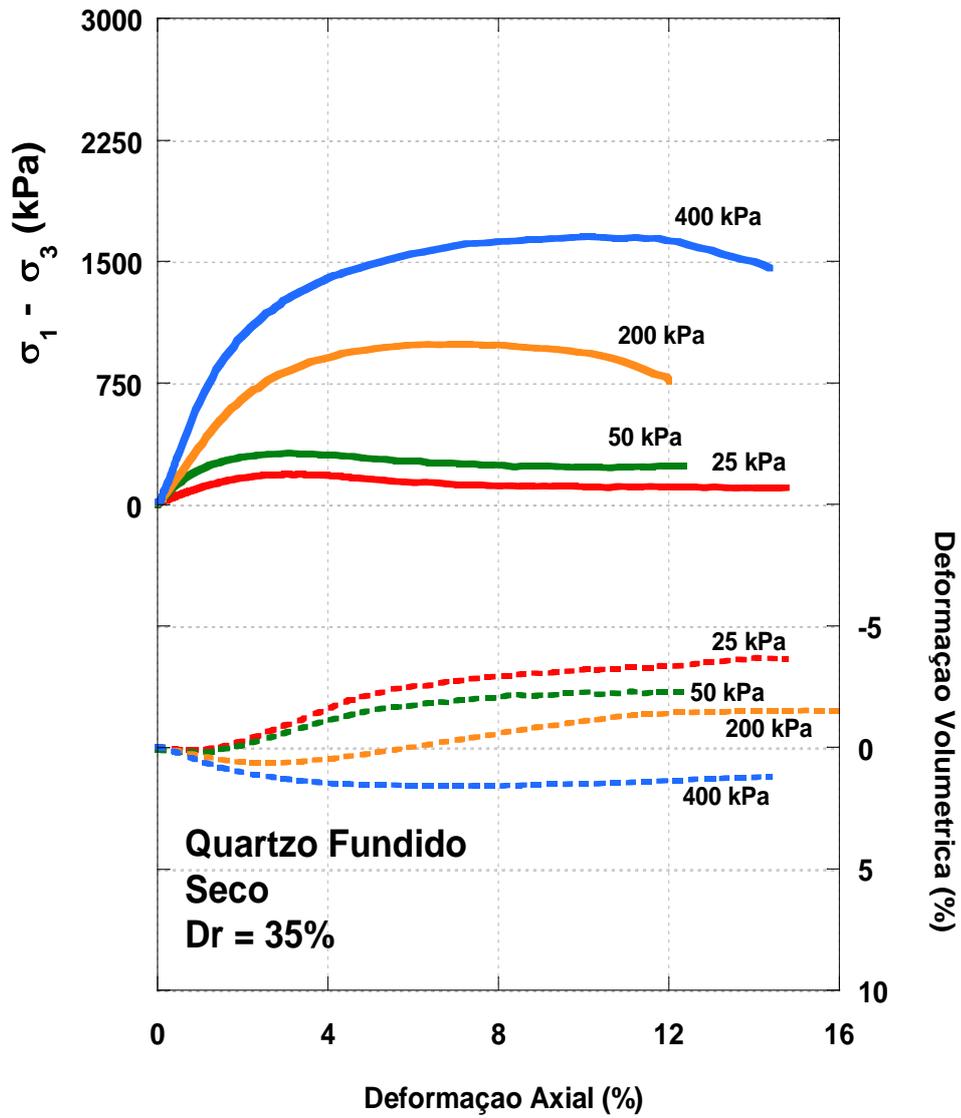


(a)

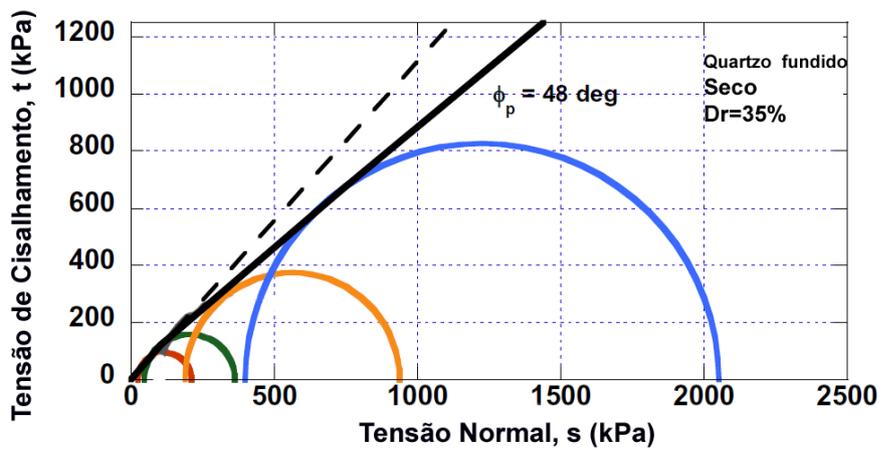


(b)

Figura 4.11 – a) Curvas tensão-deformação e deformação volumétrica para o quartzo fundido seco, densidade relativa de 85% (denso) e b) Envoltória típica de *Mohr-Coulomb* para a quartzo fundido seco,  $D_r=85\%$ .



(a)



(b)

Figura 4.12 – a) Curvas tensão-deformação e deformação volumétrica para o quartzo fundido seco, densidade relativa de 35% (fofo). b) Envoltória típica de *Mohr-Coulomb* para a quartzo fundido seco,  $Dr=35\%$ .

A fig. 4.13 apresenta as curvas de tensão vs. deformação e deformação volumétrica para o quartzo fundido saturado com a mistura de óleos *Garden Light* e *Puretoll 7* com densidade relativa de 35% (fofo). Pode ser visto que na pressão confinante de 100 kPa a amostra de quartzo fundido saturado com a mistura de óleos exibe uma grande tendência de expansão volumétrica. A medida que a pressão de confinamento aumenta (200 kPa e 400 kPa) a dilatação diminui gradativamente. Estas observações estão em concordância com o comportamento típico observado em areias naturais.

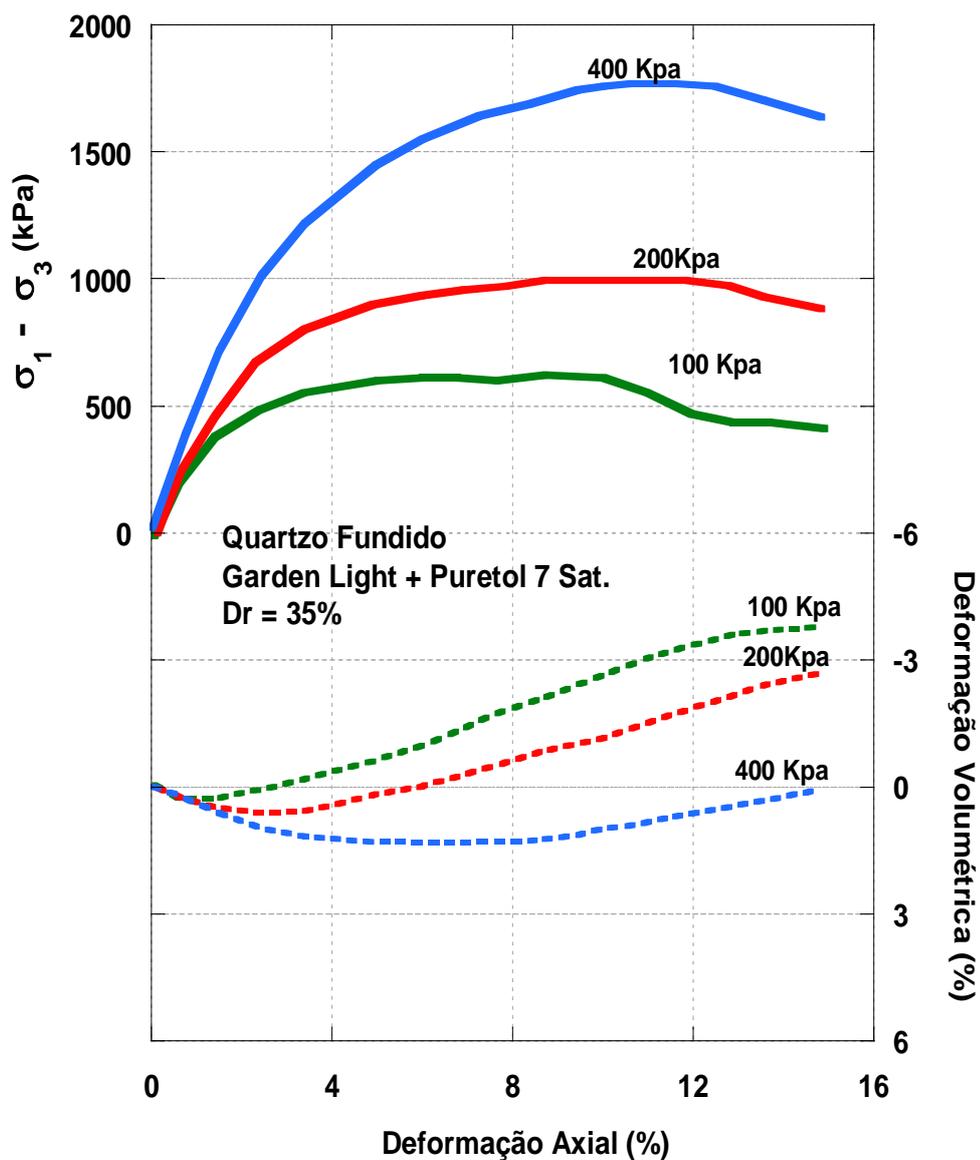


Figura 4.13 – a) Curvas tensão-deformação e deformação volumétrica para o quartzo fundido saturado com o óleo de tocha Garden Light + Puretol 7, Dr=35%.

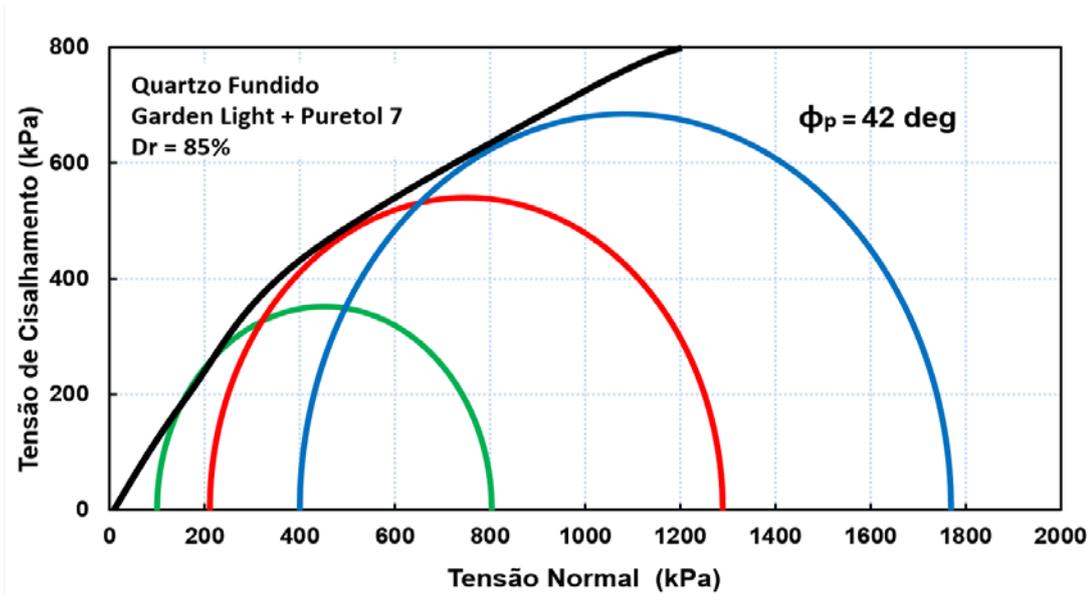


Figura 4.14 – Envoltória típica de *Mohr-Coulomb* para a quartzo fundido saturado com óleo Garden Light e Puretol 7.

Envoltórias de ruptura de *Mohr-Coulomb* são apresentados na figura 4.14. A envoltória de pico de força tangencial apresenta uma curvatura clara dentro da faixa de pressões de confinamento considerados neste estudo. As envoltórias de ruptura do quartzo fundido saturado com iodeto de sódio exibiram ângulos de atrito de pico variando de 16° a 22° (tabela 4.5).

Pode-se observar que o quartzo fundido saturado com iodeto de sódio exibe uma resposta altamente dilatante sob baixas pressões de confinamento (Fig. 4.15). A tendência a dilatação é suprimida como aumentos da tensão de confinamento. O pico de tensão também corresponde à máxima taxa de dilatação. Além disso, com o aumento da pressão confinante, o pós-pico é mais evidente na forma de uma redução acentuada da taxa de dilatação.

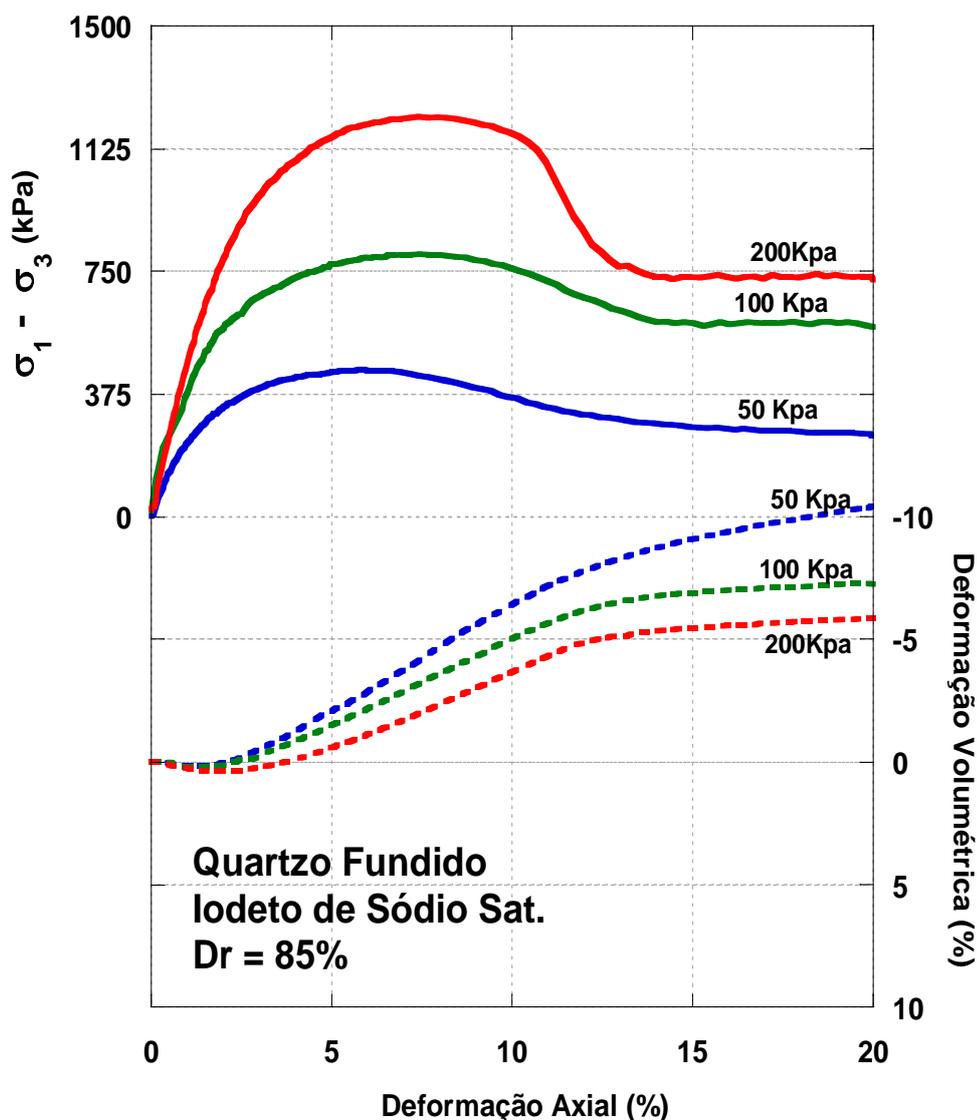


Figura 4.15 – Curvas tensão-deformação e deformação volumétrica para o quartzo fundido saturado com iodeto de sódio,  $D_r=85\%$ .

Envoltórias de ruptura de *Mohr-Coulomb* são apresentados na figura 4.16. A envoltória de pico de força tangencial apresenta uma curvatura clara dentro da faixa de pressões de confinamento considerados neste estudo. As envoltórias de ruptura  $p-q$  mostradas na Fig. 4.1688b foram utilizadas para calcular os ângulos de atrito. As envoltórias de ruptura do quartzo fundido saturado com iodeto de sódio exibiram ângulos de atrito de pico variando de  $46^\circ$  a  $62^\circ$  (tabela 4.5).

Os ângulos de atrito de pico do quartzo fundido também são comparáveis aos de alguns materiais granulares angulares (por exemplo, Holtz et al. 2011). O módulo de Young calculado ficou entre 30% e 90% do pico de tensão desviadora, tal como sugerido por Hunt (1984), também é apresentado na Tabela 4.5. Os elevados ângulos

de atrito interno de materiais granulares sob baixas pressões de confinamento foram relatados em outros estudos (por exemplo, Sture et al., 1998).

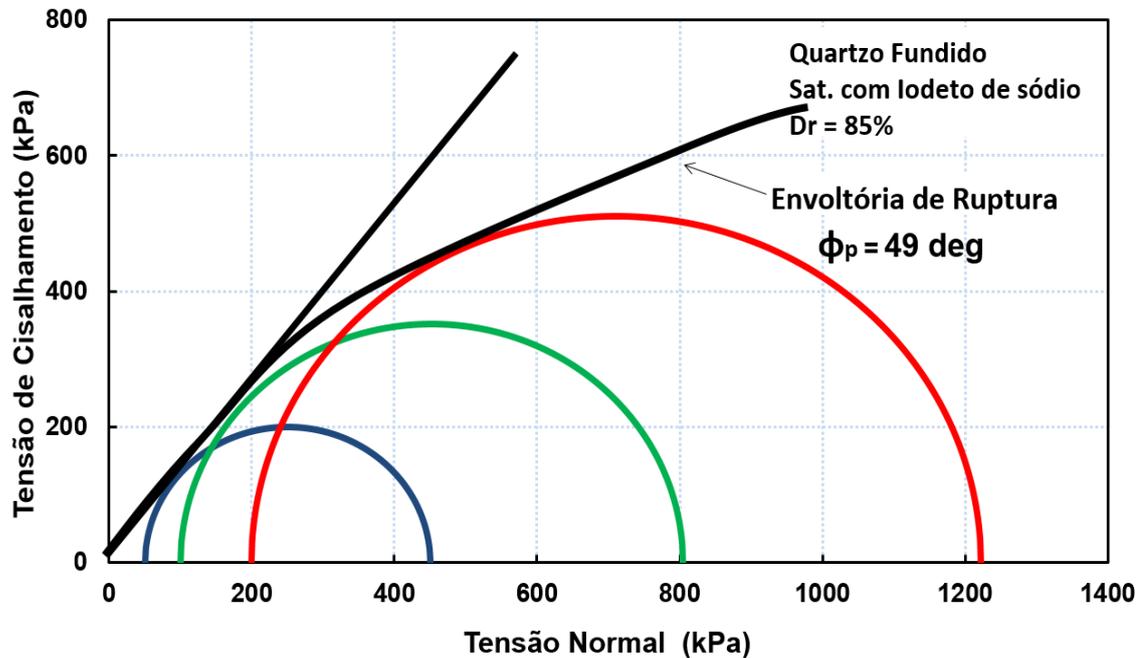


Figura 4.16 - Envoltória típica de *Mohr-Coulomb* para a quartzo fundido saturado com iodeto de sódio.

Uma comparação também foi realizada entre o comportamento tensão-deformação do quartzo fundido saturado com diferentes poros fluidos, incluindo iodeto de sódio, água, mistura de óleos minerais e sacarose. Os testes foram realizados a uma pressão confinante de 200 kPa. Os resultados são mostrados na Figura 4.17 e na Tabela 4.5. Pode-se verificar que as amostras com solução de iodeto de sódio e as amostras saturada com água têm picos de resistência semelhantes, enquanto que a resistência final da solução de iodeto de sódio é ligeiramente menor que a da água. A solução com sacarose possui um pico de resistência significativamente maior quando comparada com a da água, aproximadamente 20%, e a mistura de óleo mineral tem pico de resistência inferior em aproximadamente 25%.

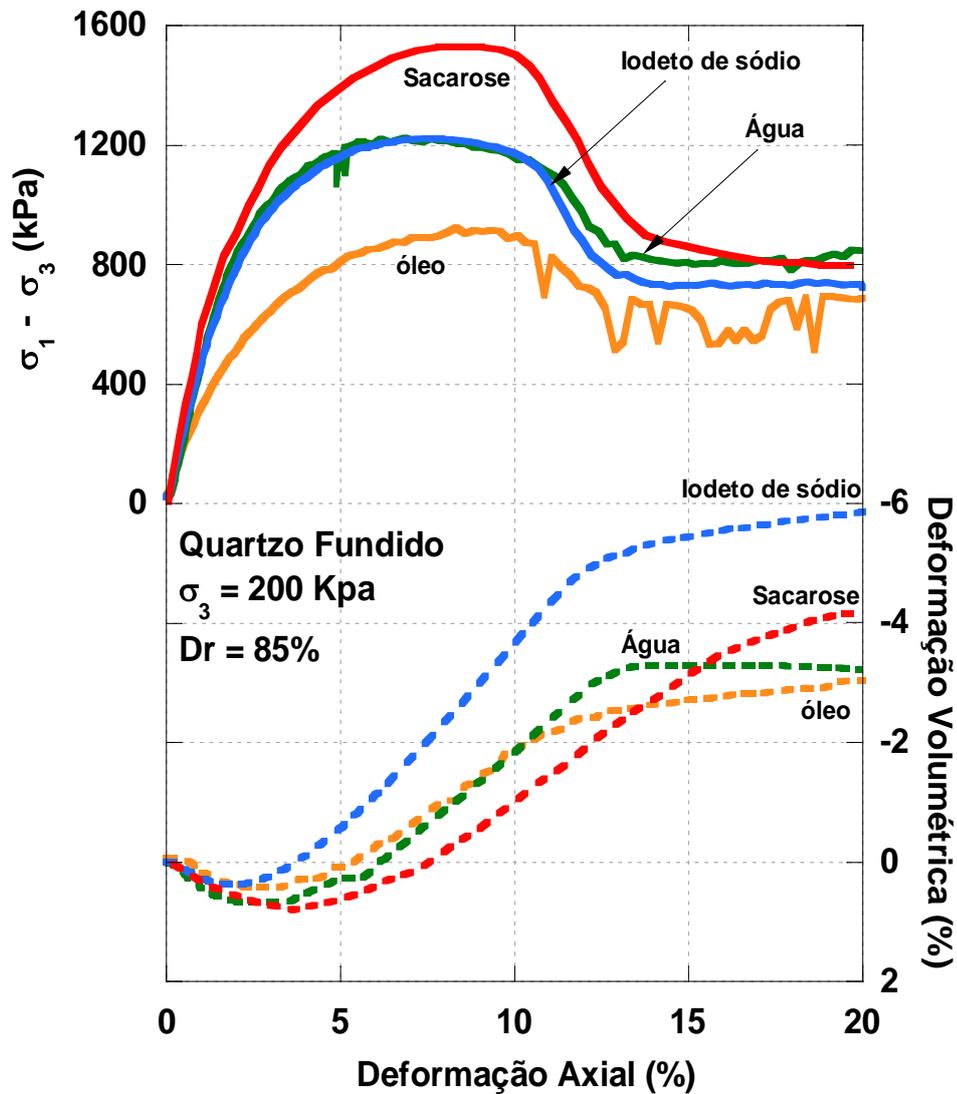


Figura 4.17 – Resposta tensão vs. deformação e resposta da deformação volumétrica do quartzo fundido saturado com vários poro fluidos incluindo água, sucrose, mistura de óleos minerais e iodeto de sódio sob compressão triaxial (deformação volumétrica de contração é positiva, e dilatação é negativa).

Esta diferença é visível apenas em amostras densas. Não foi observado esta tendência em amostras fofas. O aumento observado na resistência do quartzo fundido saturado com sacarose pode, eventualmente, ser um resultado da viscosidade do poro fluido, tornando-se difícil para os grãos executarem pequenos rearranjos. A viscosidade do poro fluido pode introduzir uma resistência extra, o que limita o rearranjo de grãos, até um certo ponto. O poro fluido de óleo mineral, por outro lado, pode proporcionar um efeito lubrificante nas amostras densas. É importante salientar que as curvas tensão-deformação de água e iodeto de sódio são semelhantes, embora seu comportamento dilatante seja um pouco diferente, mas as razões para isto, ainda estão sob investigação.

Tabela 4.5 – Ângulos de atrito obtidos pelos ensaios triaxiais CD para o quartzo fundido.

Faixa de Tensão de Confinamento (kPa)	Fluido de Saturação	Peso específico Médio kg/m <sup>3</sup>	Densidade Relativa (%)	Faixa de Pico do Ângulo de atrito (°)	Média do Ângulo de atrito de pico da envoltória de ruptura (°)	Módulo de Young Secante (MPa)
25-400	Seco	1,316	84	47-59	53	18-62
25-400	Sucrose	1,314	82	48-64	57	10-32
25-100	Puretol™ + Krystol™	1,270	95	43-54	49	43-46
100-400	Garden Light + Puretol™	1,208	35	38-45	42	16-28
50-200	Água	1,205	36	44-49	47	17-30
		1,220	95	43-55	51	15-30
50-200	Iodeto de Sódio + Thiosulfato de Sódio	1,314	85	46-53	51	25-47

#### 4.2.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

##### 4.2.4.1 Sílica Gel

Ensaio de cisalhamento direto foram executados com sílica gel (SG-1 e SG-2) em amostras secas e saturadas com água e mistura de óleos minerais para diferentes tensões normais: 50, 100 e 200 Kpa. Os resultados para as amostras de sílica gel (SG-1 e SG-2) são apresentados nas Figs. 4.18 e 4.19 respectivamente.

O comportamento tensão-deformação da sílica gel SG-1 no ensaio seco é consistente com o comportamento típico de areia, para ambas as condições densas e fofas. As amostras densas apresentam um pico definido e exibem uma tendência de compressão antes da expansão, como ocorre em areias naturais. Areias fofas exibem endurecimento e comportamento de contração, particularmente em condições normais de pressão mais elevadas. O pico da resistência coincide com a variação volumétrica

de pico para ambas as amostras densas e fofas. A resistência residual de areias densas se aproxima da resistência de pico de areias fofas a mesma pressão normal, comprovando, portanto, a teoria do índice de vazios crítico (Casagrande, 1936, 1975) para as sílicas gel.

As amostras SG-2 exibiram uma resistência e variação volumétrica similar em relação as amostras SG-1 (Fig 4.19). Uma grande flutuação no comportamentos tensão-deformação foi observado no estágio pós-pico em todos os testes, devido à quebra das partículas. Todas as amostras exibiram amolecimento. No entanto, os resultados podem ter sido influenciados pelo grande diâmetro das partículas SG-1 e SG-2 (2-5 mm) em relação à altura da amostra na caixa de cisalhamento (20 mm).

#### 4.2.4.1.1 Ângulo de atrito interno

Os ângulos de atrito interno para a sílica gel SG-1,  $\phi$ , calculado para cada ensaio, assumindo que não há coesão, variaram entre 36° e 41,5° (Tabela 4.6), e para a sílica gel SG-2 variaram de 32,7° a 37,5° (Tabela 4.7) o que é consistente com os ângulos de atrito de areias grossas. O ângulo de atrito interno diminui com o aumento da tensão confinante, resultando em um envoltória de ruptura curva, assim como ocorre em areias naturais.

Este fenômeno aparece nas areias, mas em maiores tensões confinantes (Holtz & Kovacs, 1981). Por exemplo, a curvatura começa a aproximadamente 0,2 Mpa em sílica gel, mas foi relatado começar em cerca de 2 Mpa, na areia do rio de Sacramento (Lee e Seed 1967).

As figuras 4.20 e 4.21 mostram as envoltórias de resistência de pico a cisalhamento para a sílica gel SG-1 e SG-2, respectivamente, do ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 4.6– Resumo dos ensaios de cisalhamento direto (sílica gel **SG-1**)

Ensaio Nº	Condição/ fluido de saturação	Tensão Normal ( $\bar{A}_n$ )	Peso específico seco inicial ( $kN/m^3$ )	Densidade Relativa (%)	Índice de vazios inicial entre os grãos	Índice de vazios inicial total (e)	ângulo de atrito (pico)
1	Denso - seco	50	8,85	36%	0,67	1,31	
2	Denso - seco	100	8,81	38%	0,68	1,30	41,5°
3	Denso - seco	200	8,83	36%	0,65	1,32	
4	Denso – água	50	8,82	36%	0,75	1,34	
5	Denso – água	100	8,80	35%	0,76	1,30	36,2°
6	Denso – água	200	8,80	35%	0,75	1,35	
7	Denso – Garden Light + Glicerina	50	8,83	34%	0,70	1,33	
8	Denso – Garden Light + Glicerina	100	8,80	35%	0,71	1,32	36,0°
9	Denso – Garden Light + Glicerina	200	8,81	38%	0,70	1,32	

Tabela 4.7– Resumo dos ensaios de cisalhamento direto (sílica gel **SG-2**)

Ensaio Nº	Condição/ fluido de saturação	Tensão Normal ( $\bar{A}_n$ )	Peso específico seco inicial ( $kN/m^3$ )	Densidade Relativa (%)	Índice de vazios inicial entre os grãos	Índice de vazios inicial total (e)	ângulo de atrito (pico)
1	Denso - seco	50	8,82	35%	0,67	1,31	
2	Denso - seco	100	8,82	35%	0,67	1,29	37,5°
3	Denso - seco	200	8,84	33%	0,64	1,34	
4	Denso – água	50	8,85	34%	0,63	1,32	
5	Denso – água	100	8,80	36%	0,76	1,30	35,5°
6	Denso – água	200	8,82	35%	0,62	1,33	
7	Denso – Garden Light + Glicerina	50	8,83	35%	0,70	1,33	
8	Denso – Garden Light + Glicerina	100	8,84	33%	0,64	1,35	32,7°
9	Denso – Garden Light + Glicerina	200	8,86	32%	0,62	1,29	

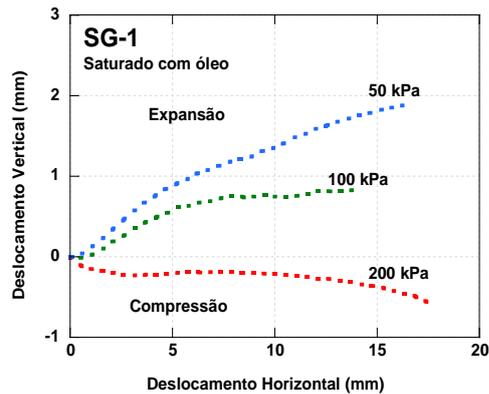
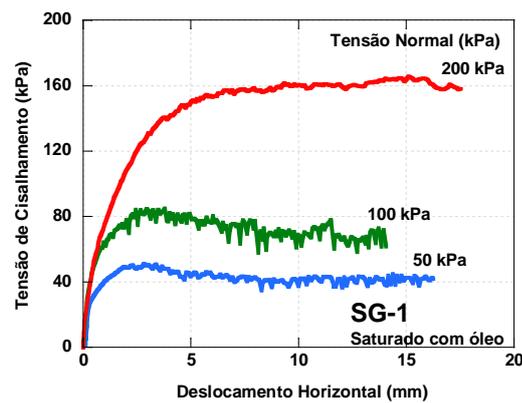
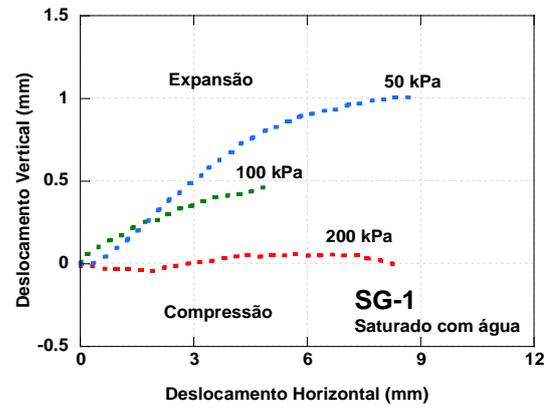
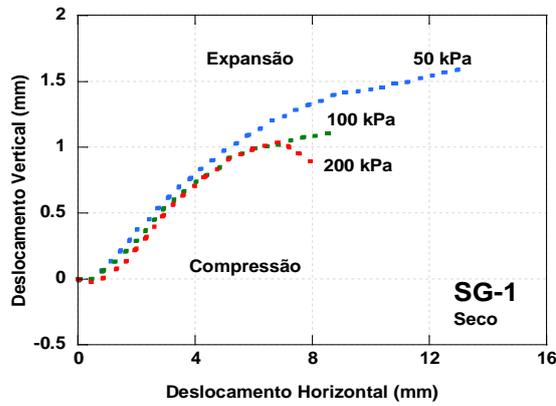
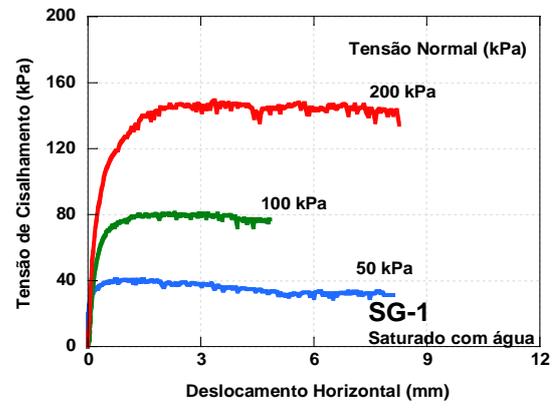
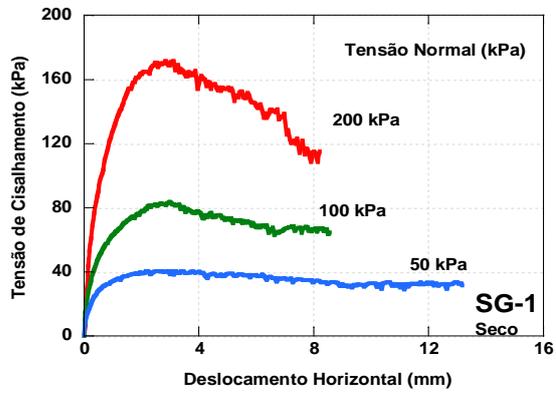


Figura 4.18 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto para sílica gel (SG-1) seca, saturado com água e saturado com óleo.

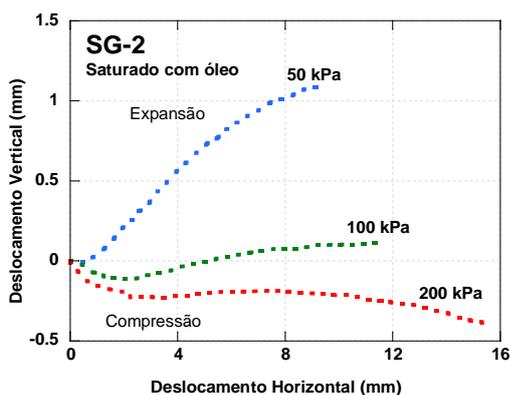
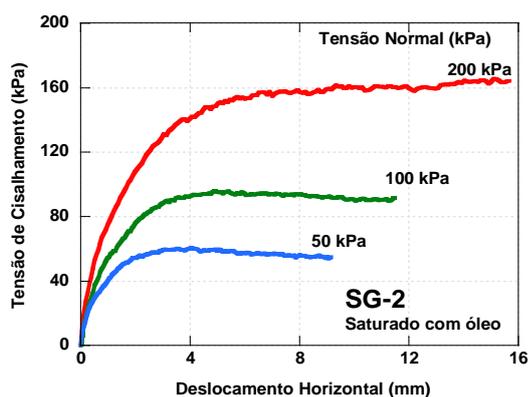
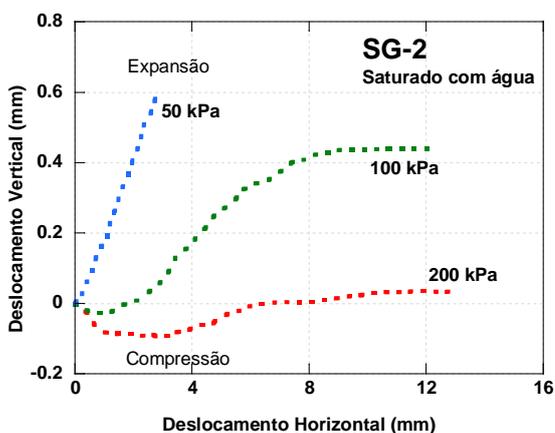
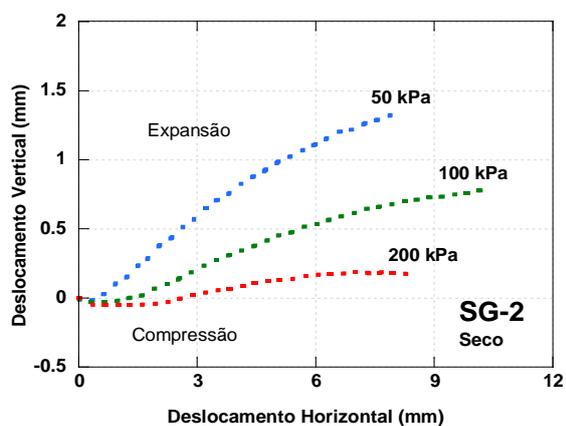
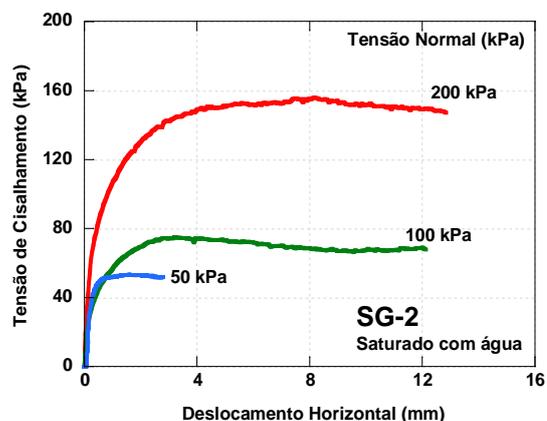
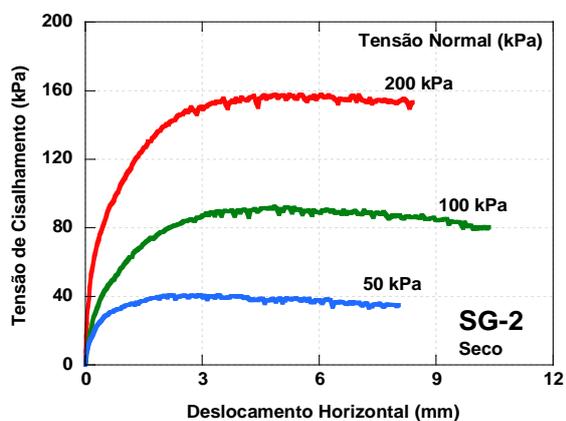


Figura 4.19 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto para sílica gel (SG<sub>2</sub>) seca, saturado com água e saturado com óleo.

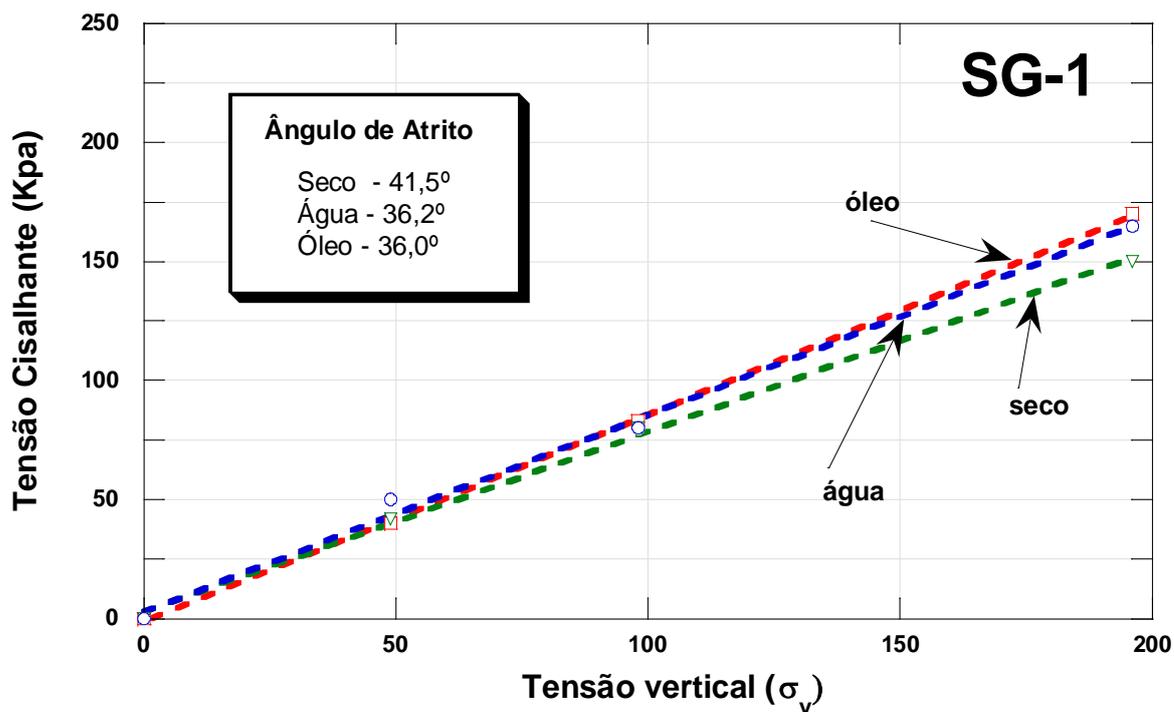


Figura 4.20 – Envoltórias de resistência de pico ao cisalhamento para a sílica gel SG-1 do ensaio de cisalhamento direto.

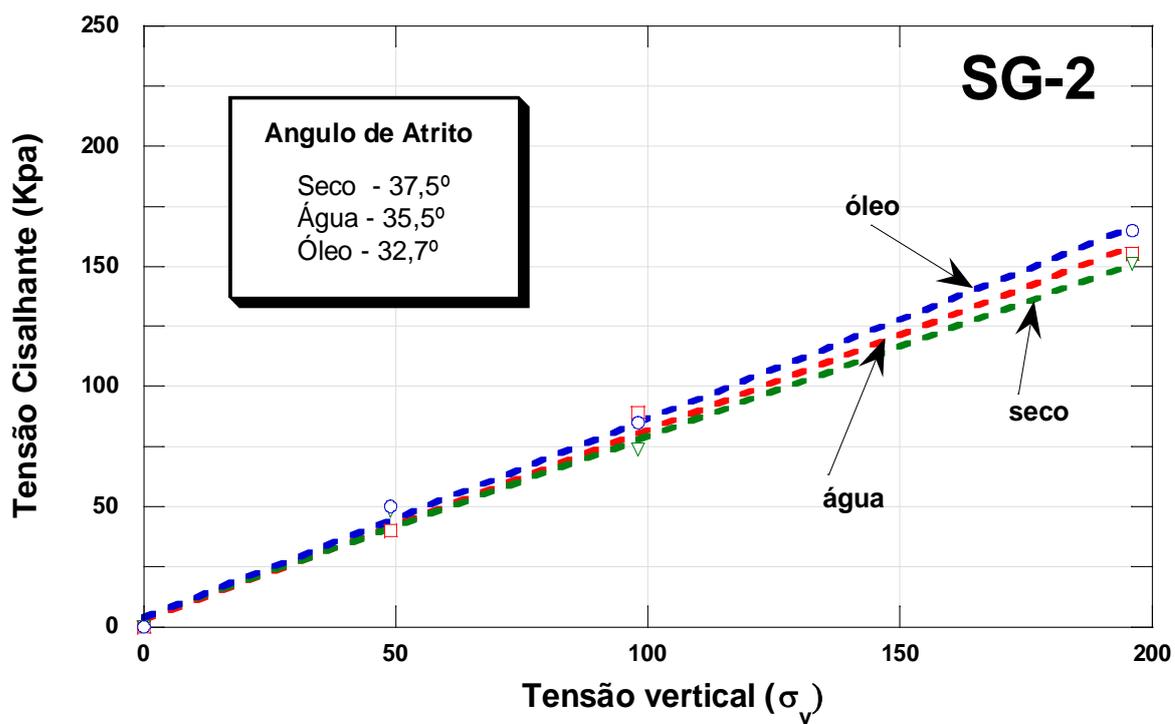


Figura 4.21 – Envoltórias de resistência de pico ao cisalhamento para a sílica gel SG-2 do ensaio de cisalhamento direto.

#### 4.2.4.2 Quartzo Fundido

Ensaio de cisalhamento direto foram executados com quartzo fundido (QF-1) em amostras secas e saturadas com água e mistura de óleos minerais para diferentes tensões normais: 50, 100 e 200 kPa. Os resultados são apresentados na Fig. 4.22. Oscilações durante o carregamento foram observados após a carga de pico para os ensaios com o quartzo fundido saturado com óleo mineral (Fig. 4.22) mas não para as amostras secas e saturadas com água. Skinner (1969) e Bathurst (2011) relataram oscilações de carga semelhantes na resistência pós-pico em ensaios de cisalhamento direto com esferas de vidro com 1mm de diâmetro onde a magnitude destas oscilações eram maiores quando os poros eram preenchidos com água em comparação com as amostras secas. Na investigação atual, as oscilações no pós-pico (para amostras saturadas com óleo) diminuiu em amplitude quando diminuiu-se a tensão normal.

Entretanto, o comportamento dos ensaios de cisalhamento direto realizados com quartzo fundido saturado com óleo mineral, com a exceção das oscilações de resistência no estágio de pós-pico, foi qualitativamente semelhante para os mesmos ensaios realizados nas mesmas condições com a quartzo fundido seco e saturado com água. Quantitativamente, a magnitude da dilatação foi menor para as amostras de óleo mineral o que acredita-se ser devido a lubrificação das partículas.

##### 4.2.4.2.1 Ângulo de atrito interno

Os ângulos de atrito interno,  $\phi$ , calculada para cada ensaio, assumindo que não há coesão, variaram entre 37° e 43,7° (Tabela 4.8), o que é consistente para as areias naturais. O ângulo de atrito interno diminuiu com o aumento da tensão confinante, resultando em uma envoltória curva de ruptura (Fig. 4.23).

Tabela 4.8 – Resumo dos ensaios de cisalhamento direto realizados no quartzo fundido.

Ensaio N°	Condição/ fluido de saturação	Tensão Normal ( $\bar{A}_n$ )	Peso específico seco inicial ( $kN/m^3$ )	Densidade Relativa (%)	Índice de vazios inicial total (e)	ângulo de atrito (pico)
1	Denso - seco	50	12,33	32	0,72	
2	Denso - seco	100	12,29	33	0,70	43,7°
3	Denso - seco	200	12,35	35	0,74	
4	Denso – água	50	12,30	33	1,33	
5	Denso – água	100	12,31	34	1,34	39,9°
6	Denso – água	200	12,30	33	1,33	
7	Denso – Garden Light + Glicerina	50	12,33	32	1,31	
8	Denso – Garden Light + Glicerina	100	12,32	32	1,32	37,0°
9	Denso – Garden Light + Glicerina	200	12,32	32	1,32	

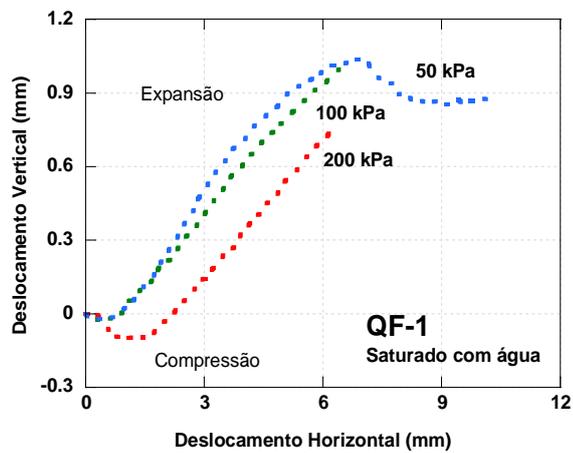
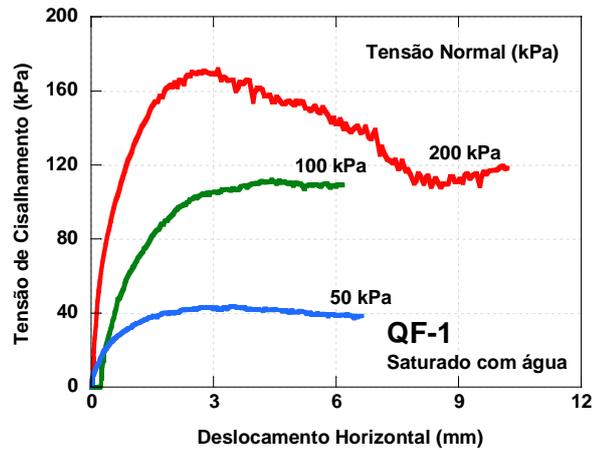
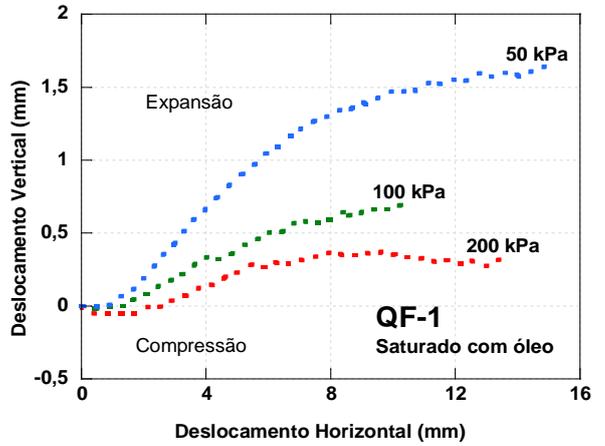
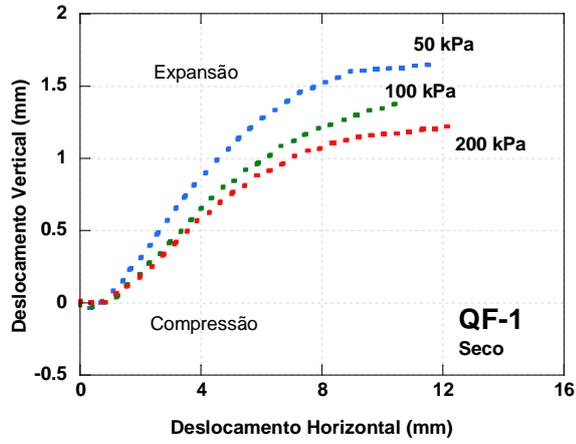
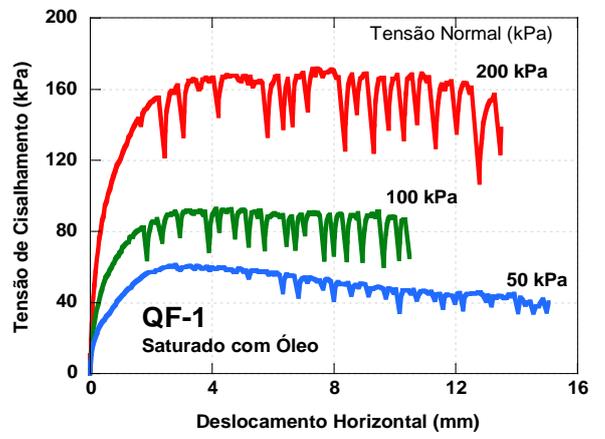
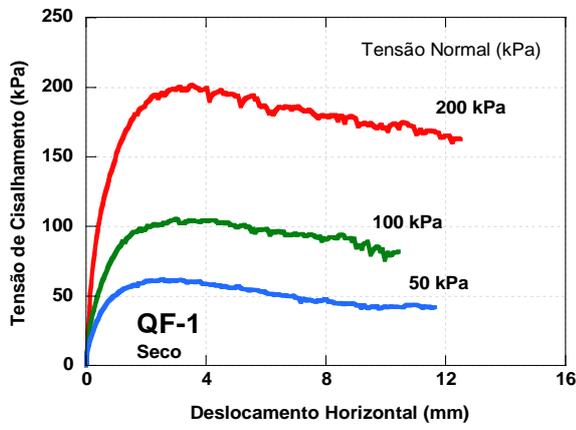


Figura 4.22 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto no quartzo fundido (QF-1) seco, saturada com óleo mineral e saturada com água.

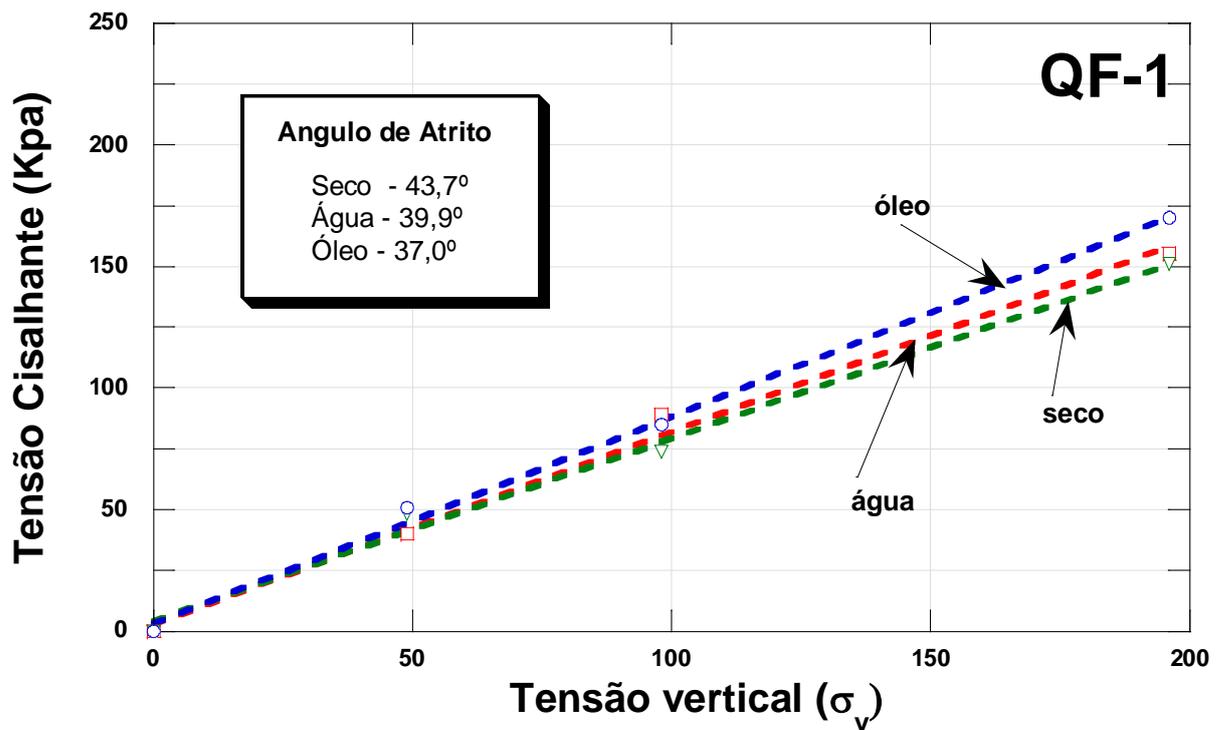


Figura 4.23 – Envoltórias de resistência de pico ao cisalhamento para a quartzo fundido QF-1 do ensaio de cisalhamento direto.

#### 4.2.4.3 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

##### 4.2.4.3.1 Quartzo Fundido

Ensaio de permeabilidade foram conduzidas utilizando o método de parede flexível seguindo a ASTM D5084-10. As amostras foram preparadas na câmara de ensaio triaxial e um fluxo constante de iodeto de sódio tratado com tiosulfato de sódio foi aplicada, e o volume do poro fluido foi gravado. Ensaio de permeabilidade também foram conduzidos com água, óleo mineral e sacarose para comparação (Tabela 4.9).

A permeabilidade da amostra saturada com iodeto de sódio é próxima ao da amostra saturada com água. A condutividade hidráulica obtida são consistentes com os relatados na literatura para a areia natural fina (Peck 1974; Hunt 1984; Holtz et al. 2010).

Tabela 4.9 - Permeabilidade de diferentes poro fluidos seguindo a ASTM D5084-10.

<b>Poro Fluido</b>	<b>Faixa de permeabilidade obtida (cm/s)</b>
Água	$1,80 \times 10^{-2} - 5,5 \times 10^{-3}$
Solução de Sacarose	$5,65 \times 10^{-5} - 6,12 \times 10^{-6}$
Puretol™ + Krystol 40™	$1,32 \times 10^{-4} - 2,64 \times 10^{-5}$
Iodeto de sódio + Thiosulfato de sódio	$2,52 \times 10^{-2} - 4,6 \times 10^{-3}$
“Garden Light” + Puretol 7	$1,18 \times 10^{-4} - 2,02 \times 10^{-5}$

#### 4.2.4.4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO I.R COM A TEMPERATURA

##### 4.2.4.4.1 Poro fluidos Nacionais

O índice de refração dos líquidos orgânicos depende da temperatura, da concentração e do comprimento de onda da luz. Guzman et al. (2014) relataram que o IR do quartzo fundido varia apenas 0,001 ao longo da faixa de temperatura de 20-30 °C, na faixa de comprimento de onda visível, usando fórmulas fornecidas por Malitson (1965). Essa variação é inferior a precisão de um refratômetro portátil (0,001), e assim, o IR do quartzo é assumido constante em 1,4585 para condições normais de laboratório.

A variação do índice de refração com a temperatura para alguns dos poro fluidos nacionais testados é mostrado na figura 4.24. Com o objetivo de investigar a dependência da temperatura do IR dos poro fluidos nacionais, uma amostra contendo cada fluido foi colocado em um forno e a temperatura foi aumentada gradualmente. Um termômetro foi utilizado para determinar a temperatura, e um refratômetro que utiliza o comprimento de onda de 589,3 nm (Sódio D) foi usado para as leituras do IR. O índice de refração de todos os poros fluidos testados apresentaram uma variação linear com a temperatura dentro da gama de temperaturas testadas, mas com diferentes inclinações.

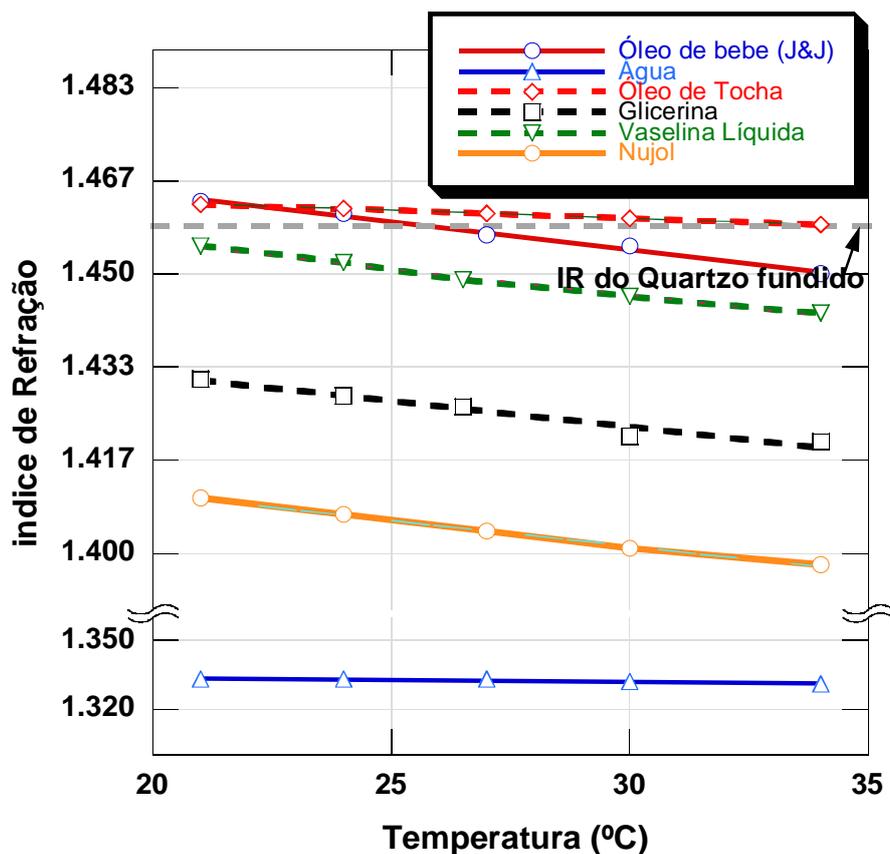


Figura 4.24 - Variação do índice de refração dos óleos com a temperatura.

#### 4.2.4.4.2 Comparativo entre diferentes poro fluidos

Na maioria dos líquidos orgânicos o índice de refração diminui cerca de  $0,00045 \pm 0,0001$  para cada  $1^{\circ}\text{C}$  de aumento da temperatura (Williamson et al. 2010). A fim de investigar a dependência da temperatura do IR do iodeto de sódio neste estudo, o procedimento adotado no item 5.2.4.4.1 foi utilizado. O resultado foi comparado com os dados obtidos por Guzman et al. incluindo a água, solução de sucrose de baixa coloração (LCS), e os óleos minerais *Krystol 40<sup>TM</sup>* e *Puretol 7<sup>TM</sup>*. A dependência do IR com a temperatura é mostrado na figura 4.25 para vários poros fluidos assim como o calculado pela equação 20 apresentada neste trabalho.

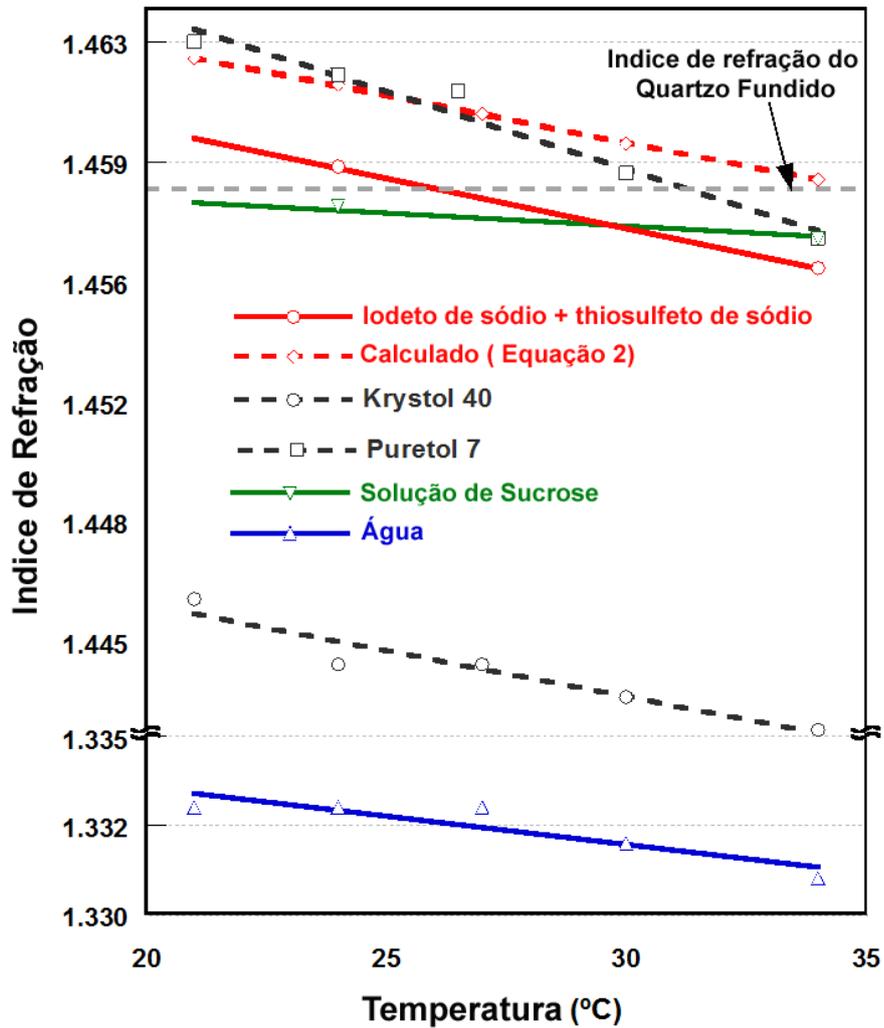


Figura 4.25 – Variação do índice de refração com a temperatura de poro fluidos transparentes.

Pode ser visto que o IR é linearmente dependente da temperatura na faixa de 20-30 °C de temperatura, o que permite simples cálculo dos volumes de substâncias necessárias para criar um poro fluido com IR de 1,4585. O índice de refração da água possui menor dependência a temperatura do que a maioria dos líquidos orgânicos, diminuindo cerca de 0,0001 para cada 1°C de aumento da temperatura. Pode ser visto que a solução de iodeto de sódio tem uma dependência a temperatura semelhante para os poro fluidos de óleo minerais previamente utilizados na preparação de solos transparentes.

### 3.3.9 ENSAIO DE DEGRADAÇÃO DA MEMBRANA DE LÁTEX

Os resultados do ensaio de degradação da membrana de látex são apresentados nesta seção. A metodologia aqui utilizada seguiu a proposta por Zhao et al. 2010. A membrana látex foi embebida com os poro fluidos e deixada em repouso por 7 dias. A interação dos seguintes poro fluidos com a membrana látex foram analisados:

- Mistura de óleo *Puretol 40* e *Krystol 7*;
- Óleo de tocha “Garden Light” e *Puretol 40*;
- Óleo de tocha “Garden Light” e Glicerina.
- Água e Iodeto de sódio tratado com tiosulfato de sódio;

O resultado obtido para todos os poro fluidos foi que nenhum deles promove reação ou interação com a membrana de látex, sendo portanto indicados para testes em ensaios triaxiais.

### 3.3.10 TESTES DE REAPROVEITAMENTO DO PORO FLUIDO

Um estudo sistemático foi realizado para investigar a possibilidade de reutilização do poro fluido composto por água e iodeto de sódio em vários testes. O procedimento, aqui adotado, está descrito na seção 3.3.11.2.1.

Os resultados do estudo de reutilização, mostrado na figura 4.26, revelam que na primeira e segunda fase de extração, 210 ml e 110 ml de solução de iodeto de sódio foram recuperados, a partir de aproximadamente 400 ml do volume inicial do poro fluido utilizado, correspondendo a uma taxa de recuperação de 80%. Extrações subsequentes produziram concentrações menores de iodeto de sódio, e as amostras foram deixadas no forno para a completa evaporação. Este procedimento resultou em iodeto de sódio sólido que pode ser misturado com água para uso subsequente. A capacidade de reutilizar o poro fluido em vários testes permite a redução dos custos de preparação de amostras. Além disso, o método é ambientalmente sustentável. A figura 4.27 apresenta uma amostra com uma parte produzida com quartzo fundido e o poro fluido iodeto de sódio virgem e a outra parte com quartzo fundido e o poro fluido iodeto de sódio reaproveitado. Pode-se observar a excelente transparência obtida em ambas as seções através da visualização do antigo logotipo da escola politécnica da NYU vista de um container com 50 mm de espessura.

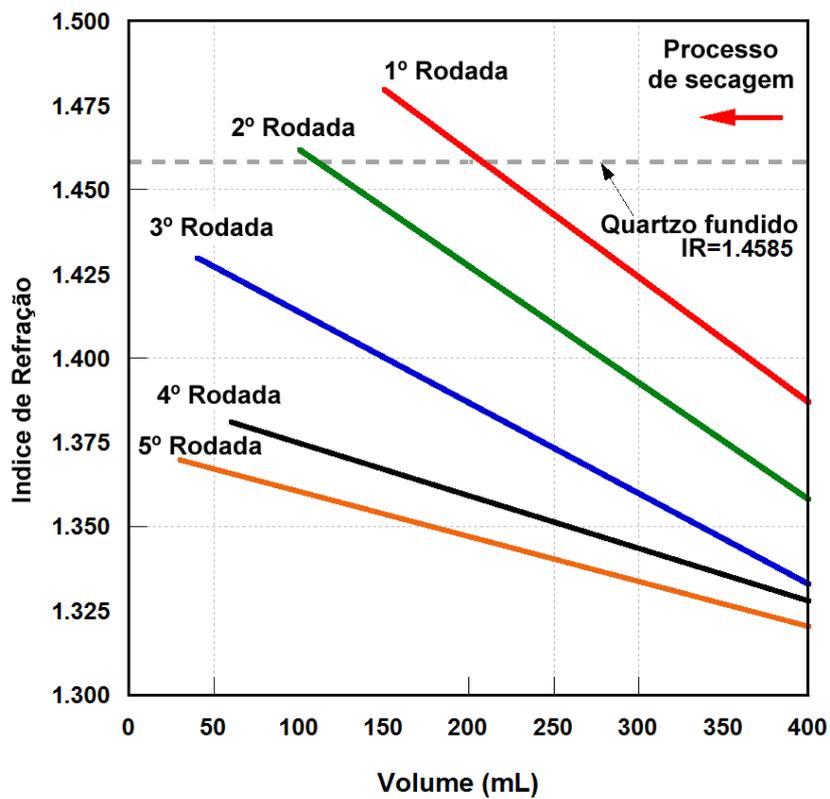


Figura 4.26 – Quantidade de solução de iodeto de sódio recuperada das cinco rodadas na avaliação de reutilização do poro fluido.



Figura 4.27 – Antigo logotipo da escola politécnica da universidade de NY visto a 5cm através de solo transparente produzido com poro fluido de iodeto de sódio reaproveitado.

## 4.3 PROGRAMA DE MODELAGEM FÍSICA GEOTÉCNICA A 1G

### 4.3.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS DO ENSAIO DE INTERFERÊNCIA ENTRE SAPATAS

#### 4.3.1.1 Resumo dos Ensaios

As curvas de carga vs. deslocamento e valores  $q_{ult}$  obtidos a partir de testes de carga para as condições densa ( $Dr=85\%$ ) e fofa ( $Dr=35\%$ ) são mostrados na Fig 4.28.

Os valores de  $q_{ult}$ , para condição densa, mostrado na fig.4.28 são 1454, 1247, 1056, e 764 N para os casos  $S = B$ , 2B, 3B e 4B, respectivamente. O  $q_{ult}$  para os ensaios em areia fofa são 724, 677, 526 e 420 para os casos de  $S=B$ , 2B, 3B e 4B, respectivamente. Para o caso de areia fofa, realizou-se um ensaio com uma sapata isolada (LISOL). Como esperado, observou-se a diminuição da  $q_{ult}$ , com o aumento da distância entre as sapatas. Na Tabela 4.10 estão resumidos os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 4.10 – Resumo dos testes realizados com duas sapatas.

Test no.	Código	Condição	Distância entre sapatas "S"	Densidade do solo, $\gamma_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$q_{ult}$ (N)	Deslocamento (mm)
1	D1SS	Densa	B	1421	1454	8,62
2	D2SS		2B	1420	1247	6,12
3	D3SS		3B	1419	1056	8,15
4	D4SS		4B	1420	495	7,92
6	L1SS	Fofa	B	1135	724	12,89
7	L2SS		2B	1138	677	13,30
8	L3SS		3B	1134	526	10,17
9	L4SS		4B	1136	420	9,12

Pode ser visto que a proximidade de duas sapatas afeta as magnitudes tanto do deslocamento quanto da capacidade limite última de carga do solo.

Das e Larbi-Cherif e Kumar e Saran através de testes em laboratório com um modelo usando duas sapatas próximas investigaram a variação da capacidade de carga limite, como uma função da distância entre sapatas. Os resultados das

investigações acima mencionadas indicam que  $q_{ult}$  do solo sob duas sapatas é tipicamente maior do que o  $q_{ult}$  do solo sob uma única sapata.

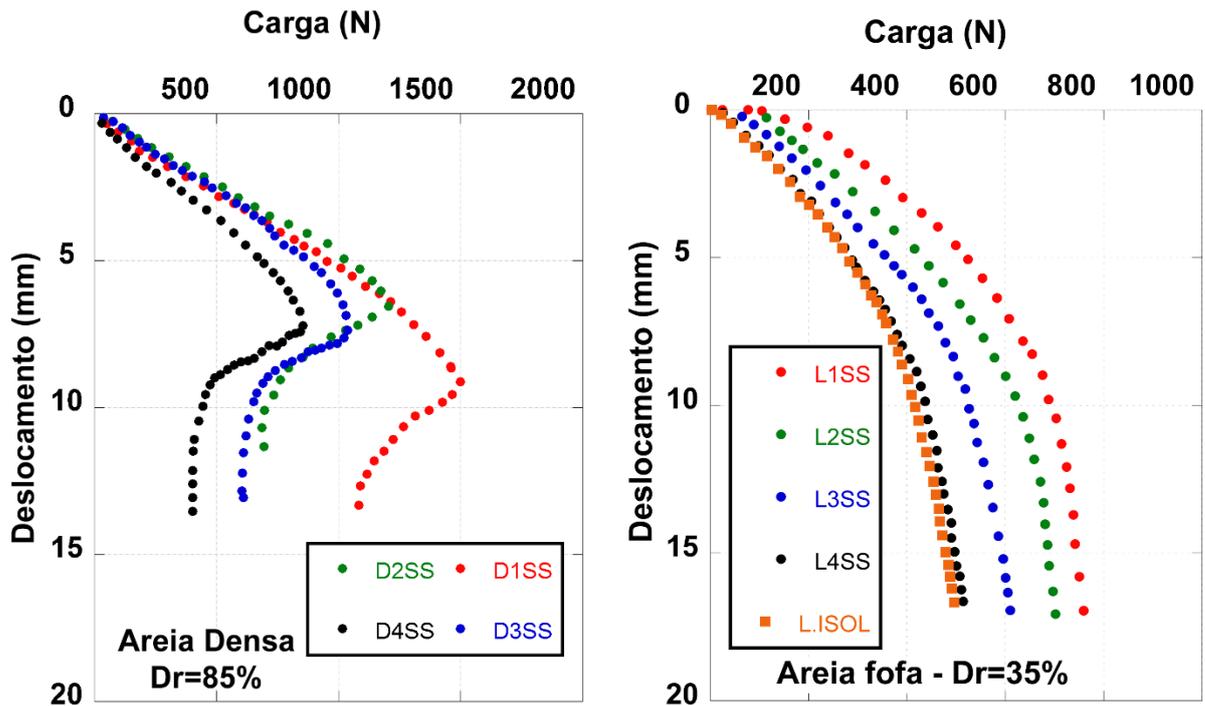


Figura 4.28 – Curvas carga vs. deslocamento para diferentes espaçamentos entre as sapatas em areia densa ( $Dr=85\%$ ) e fofa ( $Dr=35\%$ ).

#### 4.3.1.2 Perfis de Deslocamento

A análise DIC foi realizada em pares de imagens consecutivas, de acordo com metodologia descrita na revisão bibliográfica deste trabalho. Após testes de calibração, o critério de correlação **ZNSSD** foi escolhido para as análises devido o fato deste critério de correlação ter gerado o pico mais estreito de correlação. Vinte imagens foram capturadas pelo scanner. A figura 4.29 apresenta o perfil cumulativo de deslocamento para espaçamento igual a B. Fica evidente a interferência das contornos de deslocamento entre as duas sapatas o que aumenta a resistência do solo nesta condição.

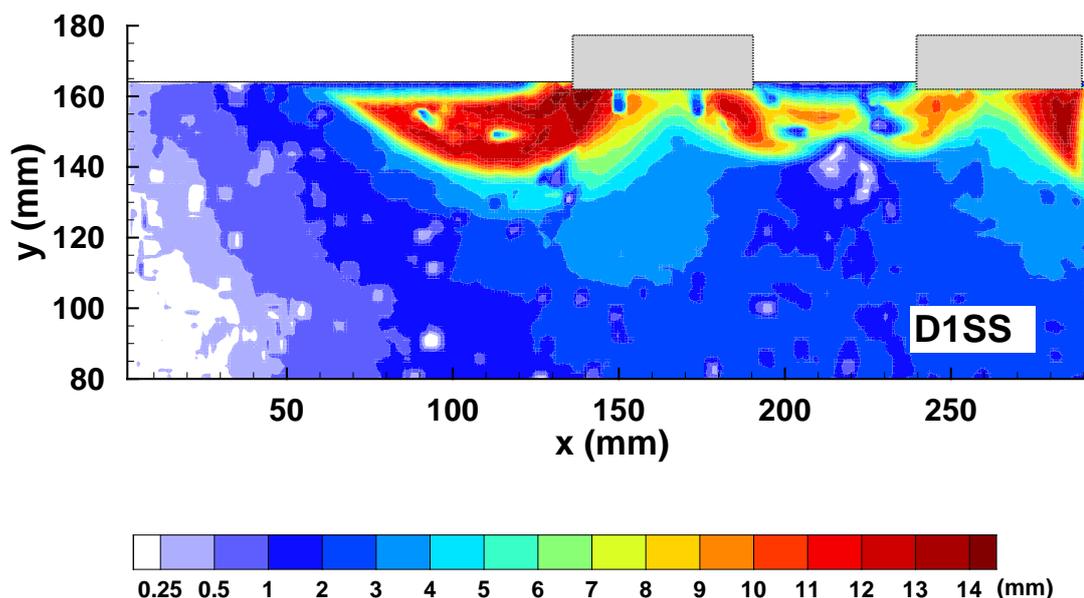


Figura 4.29 – Perfil de deslocamento cumulativo para S=B (areia densa – D1SS).

Pode-se observar na figura da imagem 4.29 “o bloqueio” das zonas radiais internas sob as duas sapatas, que causa o efeito de arqueamento juntamente com a redistribuição das tensões. Este fenômeno foi reportado por Stuart (1983) para sapatas próximas entre si. Na região onde ocorre o efeito de arqueamento, o  $q_{ult}$  aumenta com a diminuição da distância entre as sapatas. De acordo com Graham et al., o  $q_{ult}$  de duas sapatas próximas a uma distância  $d$  igual ao comprimento da sapata ( $B$ ) é aproximadamente 150% maior do que a situação de uma sapata isolada, para solos com  $\phi = 35^\circ$ . Verifica-se esta situação, observando as cargas limite última na tabela 4.10. A medida que distância ( $S$ ) entre as sapatas aumenta, o  $q_{ult}$  diminui aproximando-se da situação de haver apenas uma sapata isolada aplicando pressão ao solo. Pode-se observar esta condição no perfil de deslocamento da fig. 4.31, para o caso de  $S=4B$ , teste D4SS.

A fig. 4.30 mostra o perfil de deslocamento para o ensaio com o espaçamento entre as sapatas  $S=3B$ . Pode-se perceber que a partir desta distância não há mais interferência entre os contornos de deslocamento entre as sapatas. Kumar et al. (2009) obteve resultados semelhantes. Ele observou-se que as respostas ao carregamento de duas sapatas próximas entre si são semelhantes as respostas ao carregamento de uma única sapata quando separadas em distâncias maiores do que três vezes o comprimento da sapata (quando  $S=3B$ ).

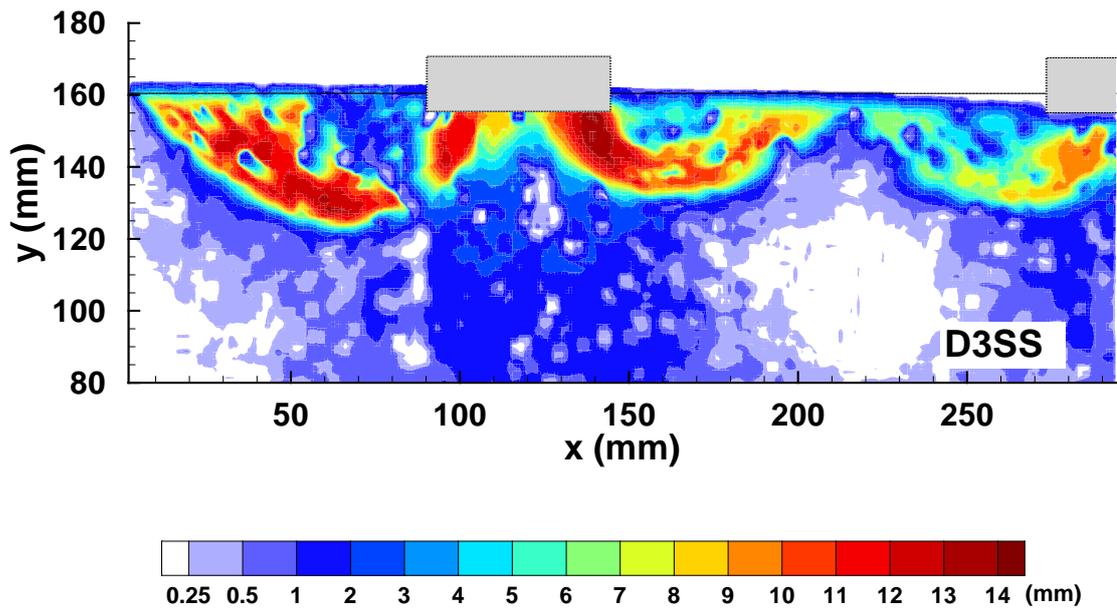


Figura 4.30 – Perfil de deslocamento cumulativo para S=3B (areia densa – D3SS)

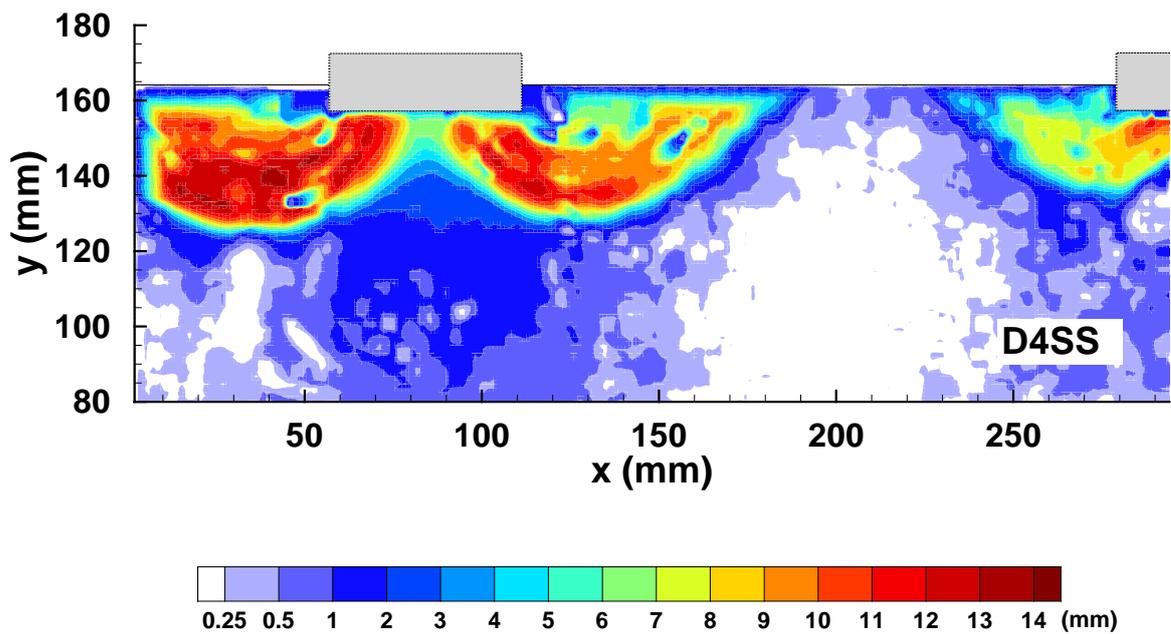


Figura 4.31 – Perfil de deslocamento cumulativo para S=4B (areia densa – D4SS)

#### 4.3.1.3 Deformação Cisalhante e Volumétrica

Deslocamentos obtidos a partir da análise DIC de imagens sequenciais capturados pelo scanner foram utilizados para gerar campos de deformação cisalhante e volumétrica utilizando o algoritmo `LS.mat` escrito em Matlab, que pode ser encontrado no apêndice D. A Figura 4.32 mostra os perfil de deformação cisalhante acumulada durante as diferentes fases de carregamento no ensaio com areia densa. Regiões de intenso cisalhamento podem ser observados na região de ruptura no teste D1SS com a formação de uma superfície de ruptura arqueada localizada.

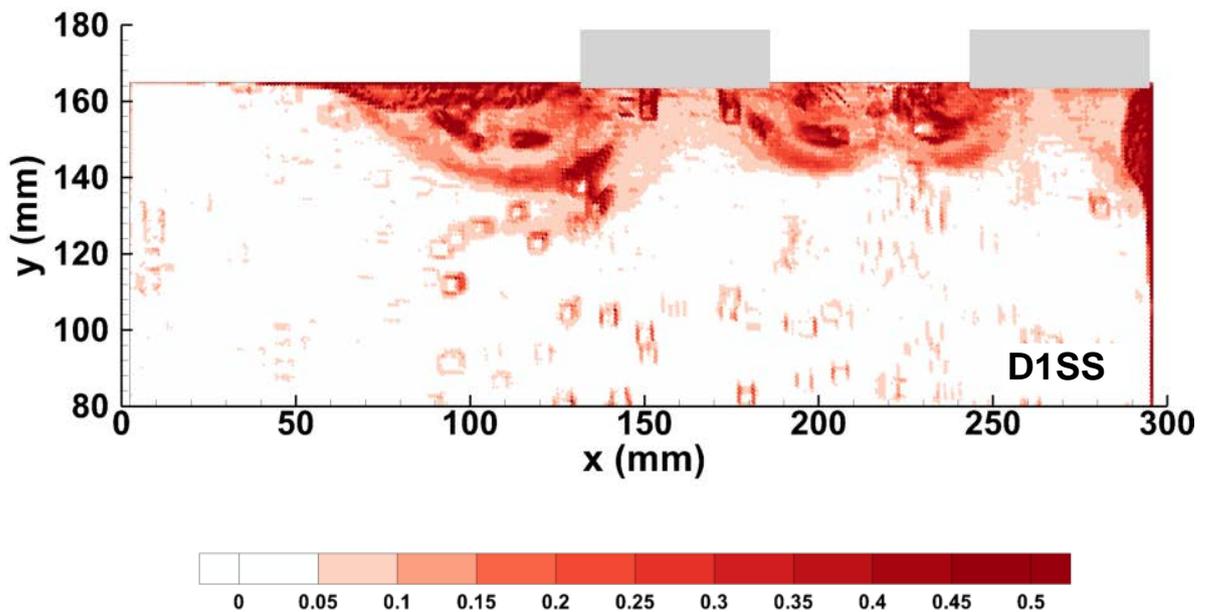


Figura 4.32 – Perfil de deformação cisalhante cumulativo para S=B (areia densa)

O mesmo cisalhamento intenso pode ser visualizado no teste D3SS, (Figura 4.33) com planos de ruptura bem definidos, resultando numa superfície de cisalhamento localizado, típico de areas densas.

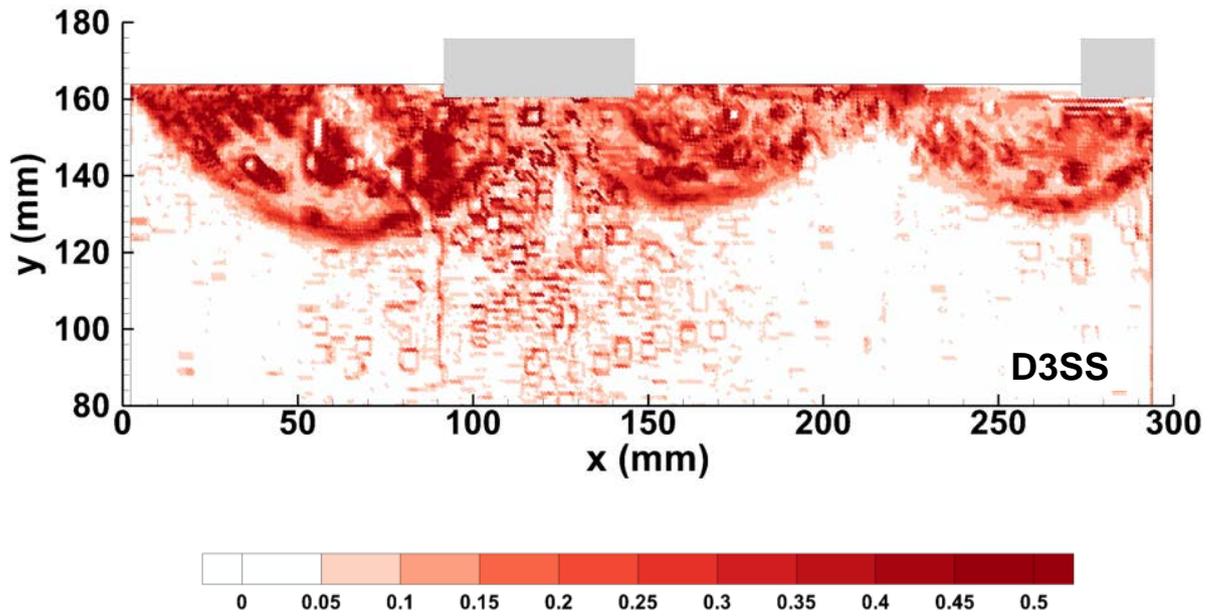


Figura 4.33 – Perfil de deslocamento cumulativo para  $S=0.5 B$  (areia densa)

Os gráficos da Fig 4.34, 4.35 e 4.36 mostram as deformações volumétricas obtidas dos ensaios D1SS, D3SS e D4SS respectivamente.

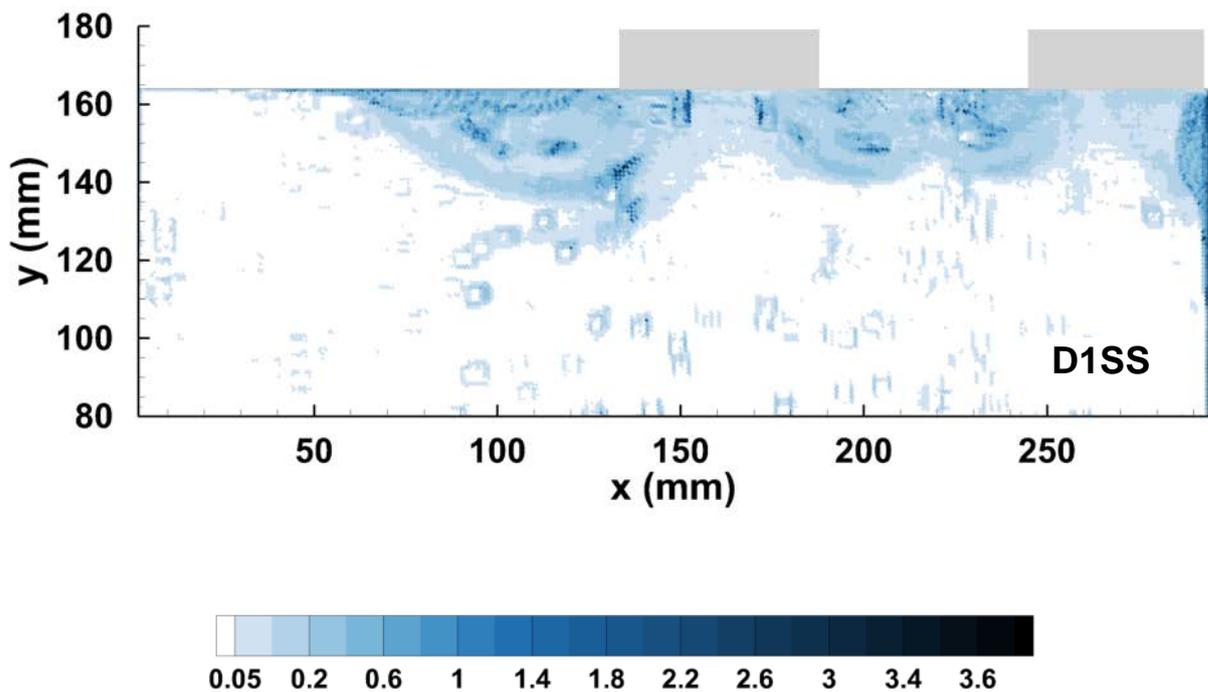


Figura 4.34 – Deformação volumétrica cumulativa para  $S=B$  (areia densa)

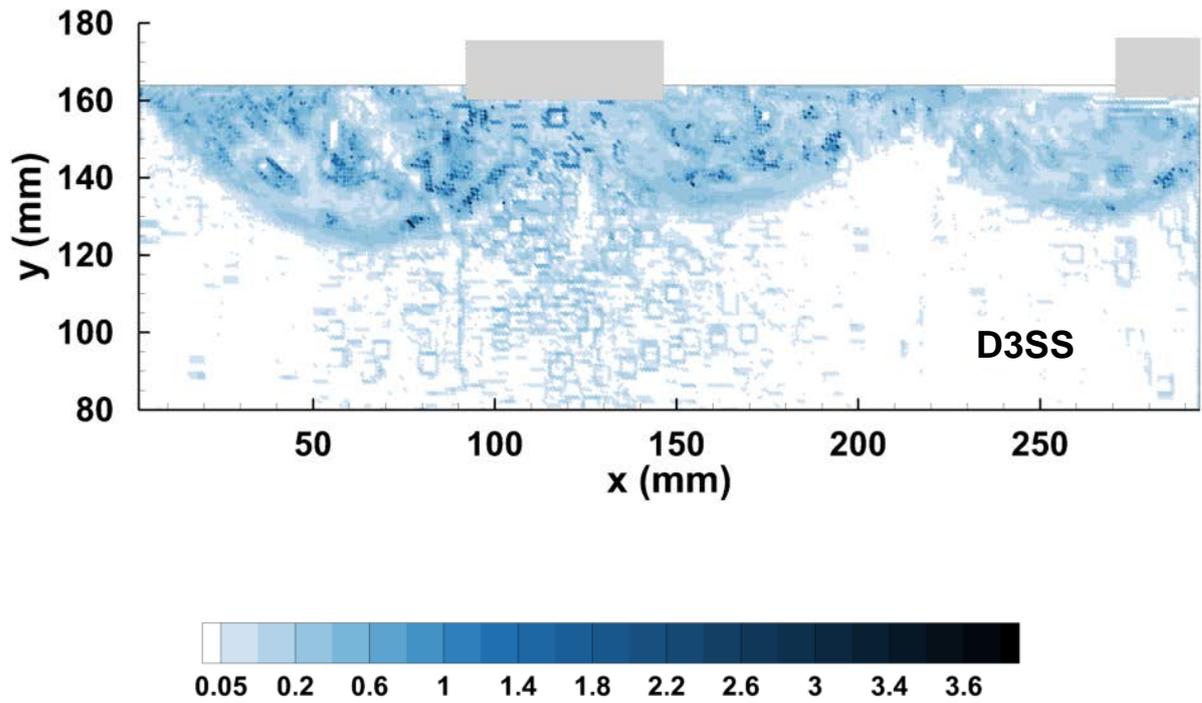


Figura 4.35 – Deformação volumétrica cumulativa para S=3B (areia densa)

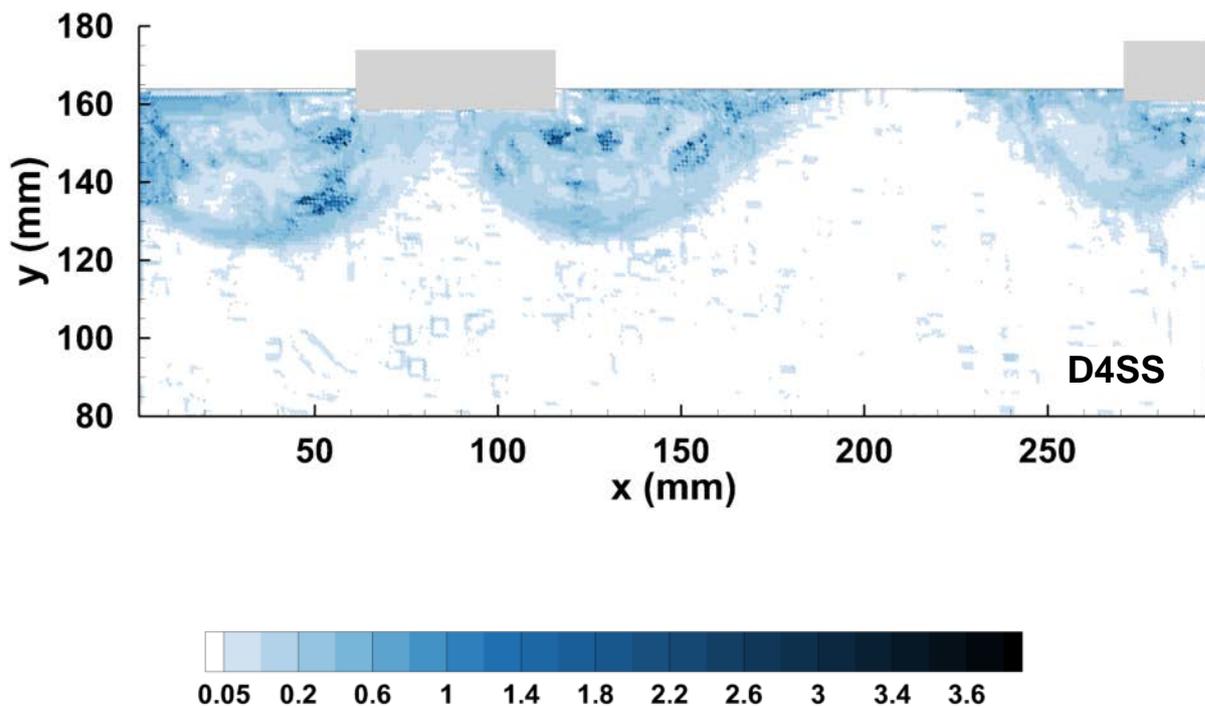


Figura 4.36 – Deformação volumétrica cumulativa para S=4B (areia densa)

## 4.3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE DUTOS

### 4.3.2.1 Observações gerais

A geometria de um duto enterrado é mostrado na Fig. 4.37a. Estudos anteriores sugerem que o mecanismo de arrancamento inclui um bloco deslizante limitado por um par de bandas de cisalhamento (Fig. 4.37b). A inclinação das bandas de cisalhamento é próxima do ângulo de dilatação do solo (Fig.4.37c) (Ng e Springman 1994; White et al. 2001).

Vanden Berghe et al. (2005) confirmou este mecanismo através de análises por elementos finitos. Para areia muito fofa, um cisalhamento localizado com um mecanismo de fluxo ao redor do duto foi observado em ensaios com modelo conduzido por Bransby et al. (2001) e Cheuk (2008). Este mecanismo também foi observado em um modelo denso após atingida a resistência de pico (White et al. 2001), e foi observado numericamente para areia muito fofa, com um ângulo de dilatação de  $-10^\circ$  (Vanden Berghe et al. 2005 ). Bransby et al. (2001) confirmou que a máxima carga de arrancamento (pico) é mobilizada em um deslocamento aproximadamente de 1% do diâmetro do duto.

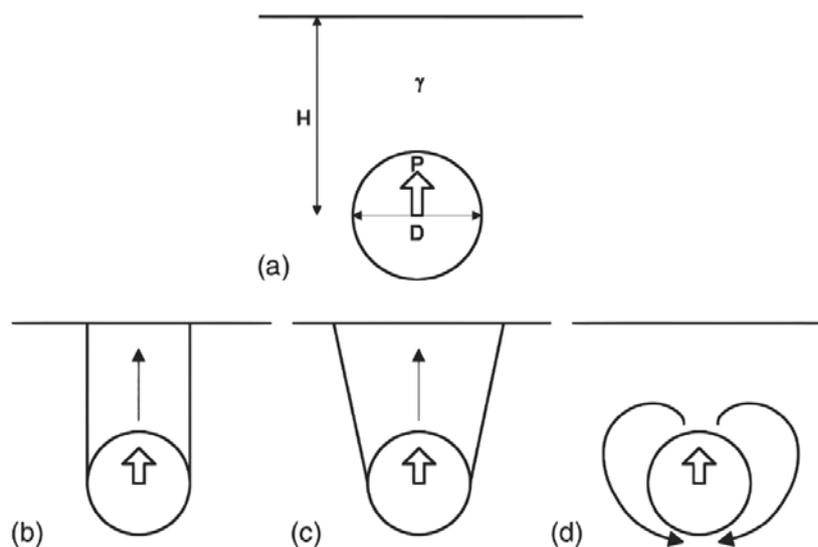


Figura 4.37 - Mecanismos de arrancamento de dutos enterrados na areia.: (a) Geometria do problema; (b) Bloco deslizante com superfícies deslizantes verticais; (c) Bloco de deslizamento com superfícies de deslizamento inclinadas; (e) fluxo em torno do duto. Adaptado de Cheuk et al. 2008.

### 4.3.2.2 Resposta Carga vs. Deslocamento

Um teste de calibração foi conduzido para determinar a força de atrito exercida pelo modelo do duto contra as paredes do container de acrílico. A força de arrancamento medida foi constante e igual a  $18 \pm 2$  N. Este valor foi subtraído da força de arrancamento registrada para todos os testes. As Fig 4.38 e 4.39 mostram as curvas da força de arrancamento versus o deslocamento do duto para os testes com areia fofa e densa, respectivamente para dutos sem geogrelha e com geogrelha de 1,5D, 2,0D e 3,0D. Todos os testes apresentaram um aumento acentuado na resistência ao arrancamento nos primeiros 5 mm, e mobilizado um pico a 10 mm, independentemente da densidade em que encontrava a amostra.

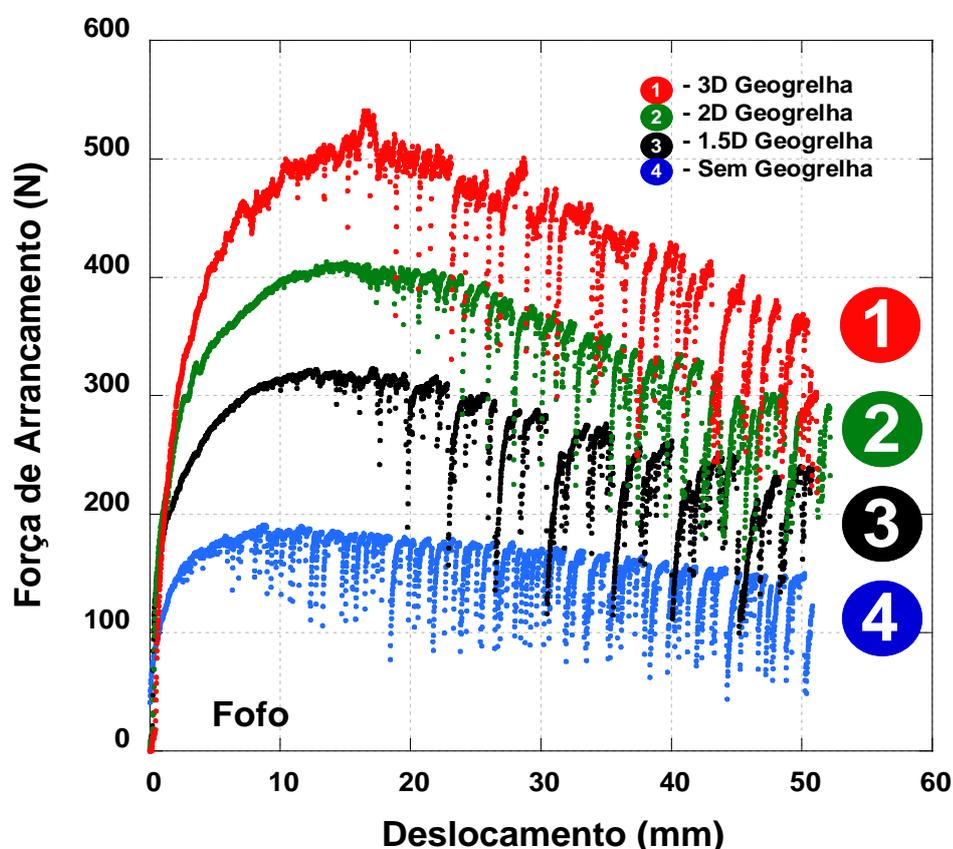


Figura 4.38 – Resultados dos ensaios de arrancamento de dutos para areia fofa.

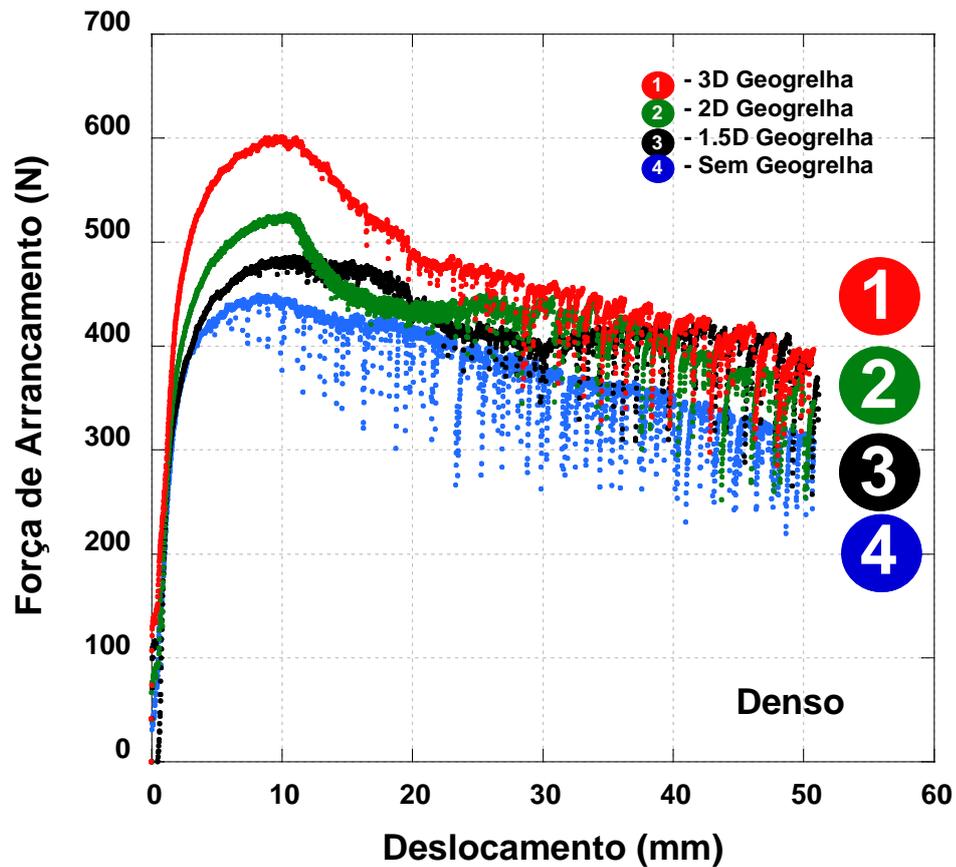


Figura 4.39 – Resultados dos ensaios de arrancamento do duto para areia densa.

#### 4.3.2.3 Mecanismos de Deformação

A Fig. 4.40 mostra uma sequência de imagens em várias fases do arrancamento vertical do duto ( $\delta$ ). A resistência de arrancamento de pico foi mobilizada em um deslocamento de 10 milímetros ( $p=1\%D$ ), que esta de acordo com a literatura (Trautmann et al. 1985; Bransby et al. 2001, Cheuk et al. 2008). Nesta fase, um pequeno espaço circular é formado abaixo do duto. A medida que este espaço aumenta, gradativamente as inclinações laterais vão se tornando retilíneas devido ao preenchimento por areia deste espaço.

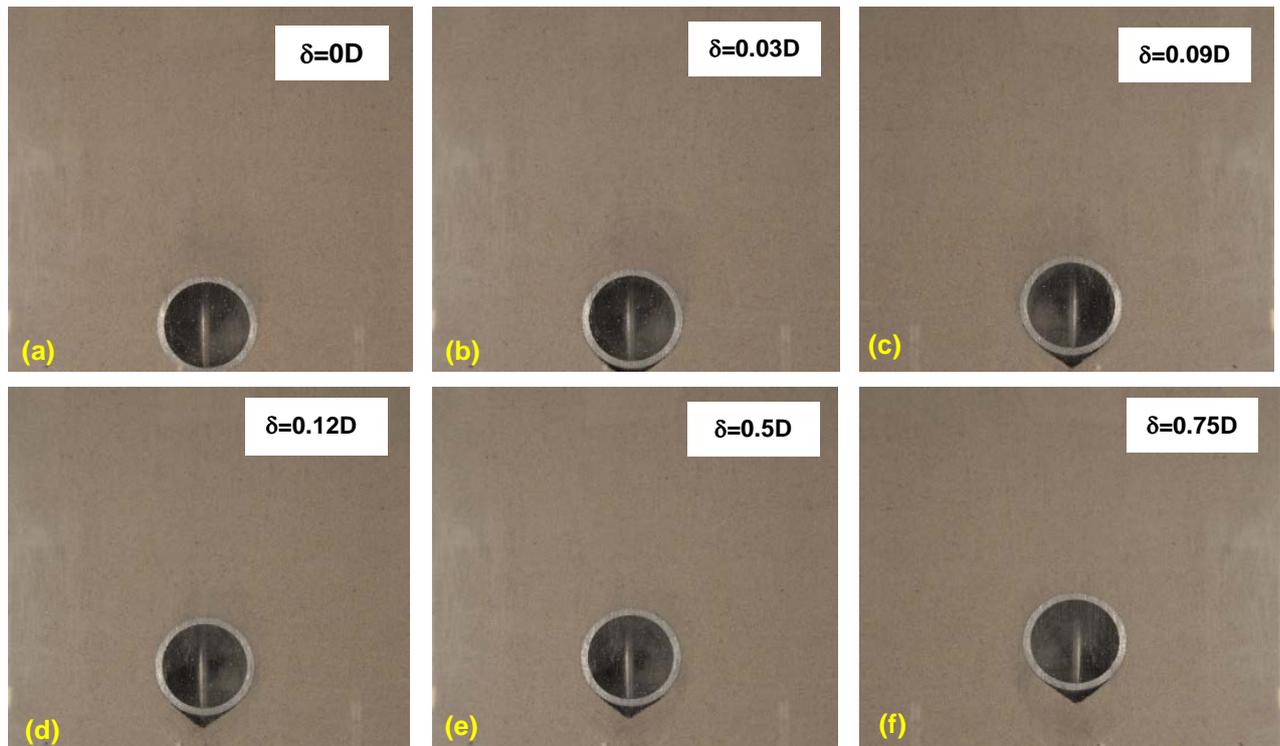


Figura 4.40 - Sequência de imagens do arrancamento do duto em areia densa. ( $\delta$  = deslocamento vertical do duto e  $D$ , o diâmetro do duto)

Os testes realizados por Cheuk et al. (2008) sugerem que o mecanismo de deformação durante o arrancamento de dutos consistem em quatro estágios fundamentais:

1. Mobilização da Resistência de Pico;
2. Preenchimento localizado abaixo do duto;
3. Formação de banda de cisalhamento no estágio de pósito;
4. Fluxo ao redor do duto.

#### 4.3.2.4 Perfis de Deslocamento

A análise DIC foi realizada em pares de imagens consecutivas, de acordo com metodologia descrita na revisão bibliográfica deste trabalho. Após testes de calibração, o critério de correlação **ZNSSD** foi escolhido para as análises devido este critério ter gerado o pico mais estreito de correlação. Com objetivo de ilustrar e demonstrar alguns resultados obtidos destes ensaios, o perfil de deslocamento incremental de cada

estágio do mecanismo de deformação para o duto sem geogrelha é mostrada na fig. 4.41. A figura 4.41a mostra o perfil de deslocamento no estágio da mobilização da resistência de pico; A figura 4.41b mostra o perfil de deslocamento de preenchimento localizado abaixo do duto; A figura 4.41c mostra o perfil da formação de banda de cisalhamento no estágio de pós pico e a figura 4.41d, por sua vez, mostra o último estágio do mecanismo de arrancamento que é o fluxo ao redor do duto.

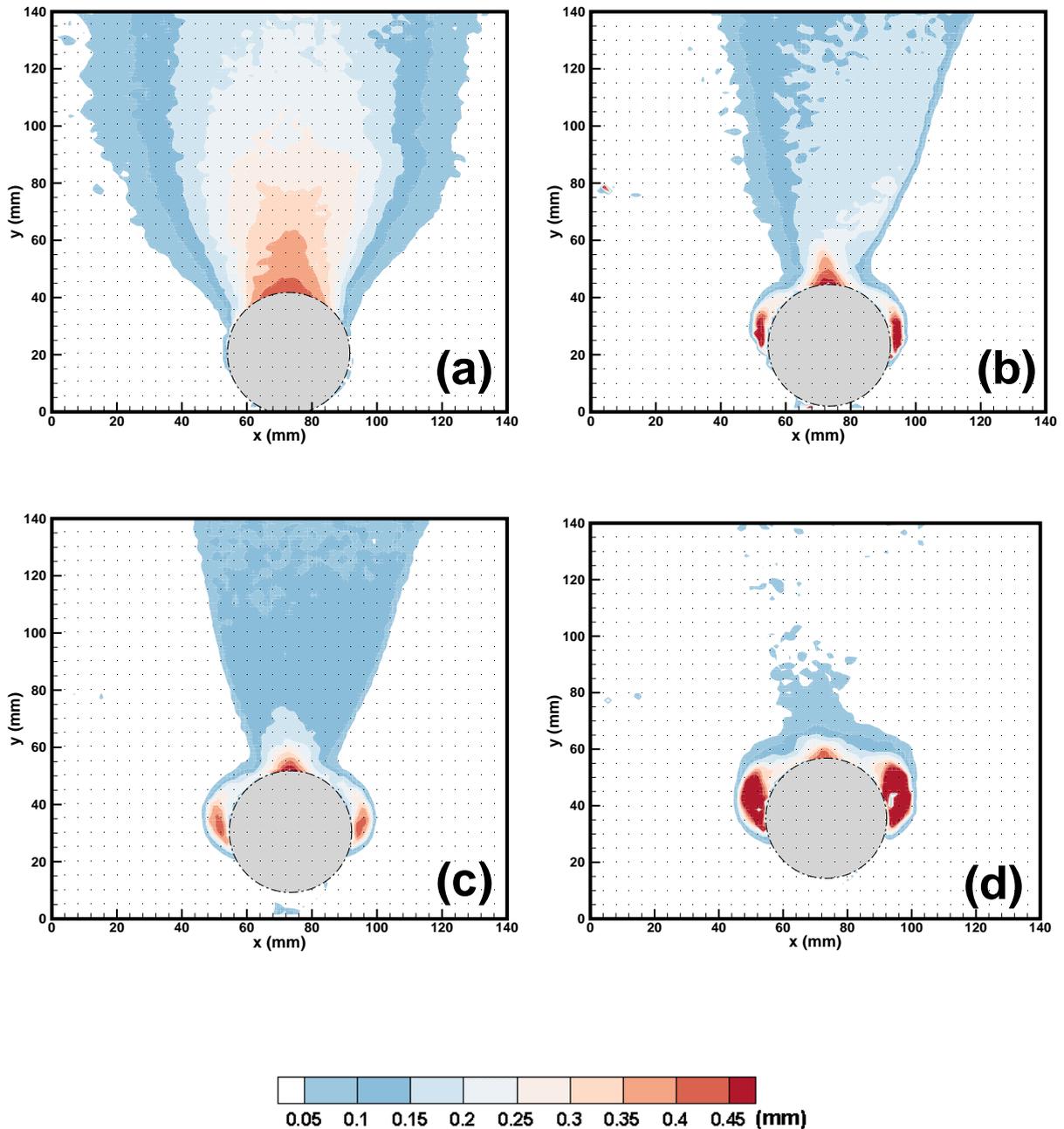


Figura 4.41 - Magnitude do deslocamento do arrancamento do duto em areia densa sem geogrelha em diferentes estágios de deformação. a) Pico; b) Preenchimento localizado; c) Formação de banda de cisalhamento no estágio pós-pico; d) Fluxo ao redor do duto.

A inclinação média das zonas de cisalhamento é influenciada pela densidade do solo, ou seja, quanto mais denso o solo mais dilatante será seu comportamento. A zona de deformação cisalhante mobilizada em areia densa tem um ângulo de inclinação maior em relação à horizontal comparada com a da areia fofa.

A magnitude da resistência de pico não é afetada pelo tamanho dos grãos do solo. No entanto, a largura das zonas de cisalhamento é fortemente dependente do tamanho dos grãos do solo. As figuras 4.42 mostram, respectivamente, o perfil de deslocamento no estágio da mobilização da resistência de pico (fig.4.42a) e figura 4.42b mostra o perfil de deslocamento de preenchimento localizado abaixo do duto; Porém, fica claro que ao instalar a geogrelha de comprimento  $1,5D$ , estes mecanismos são alterados: A inclinação da zona de cisalhamento é aumentada no estágio da mobilização da resistência de pico; o mesmo ocorre no estágio original de preenchimento localizado abaixo do duto: Com a instalação da geogrelha, ocorrerá um fluxo ao redor desta geogrelha de areia já que o fluxo de areia ao redor do duto ficará impedido de preencher o espaço abaixo do duto acumulando-se na geogrelha. Com isto, haverá um déficit de preenchimento de areia abaixo do duto, com o aumento deste espaço em relação ao duto sem geogrelha. Observa-se também um aumento da inclinação da zona de cisalhamento no estágio original de preenchimento localizado.

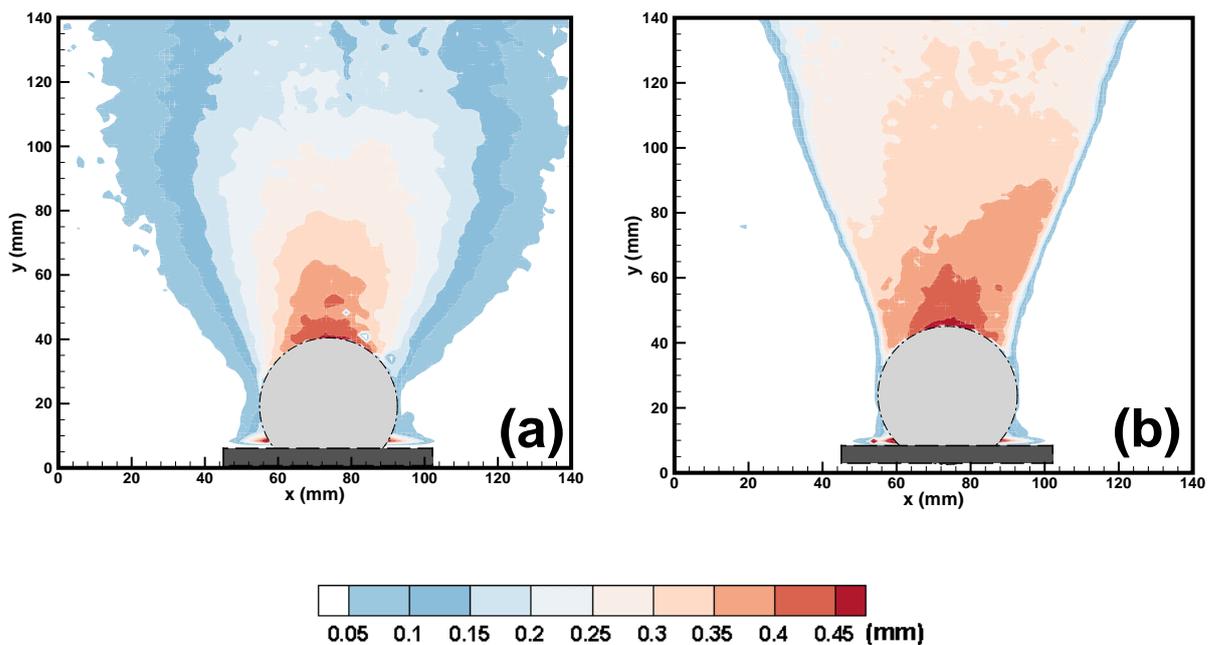


Figura 4.42 - Magnitude do deslocamento do arrancamento do duto em areia densa com geogrelha  $1,5D$ : a) Pico; b) Formação de banda de cisalhamento no estágio pós-pico.

Esta comparação fica melhor evidenciada nos gráficos da figura 4.43. A figura 4.43a apresenta a comparação no mecanismo no estágio de mobilização da resistência de pico e, por sua vez, a figura 4.43b, mostra a comparação no estágio de preenchimento localizado para o duto sem e com geogrelha de 1,5D de comprimento.

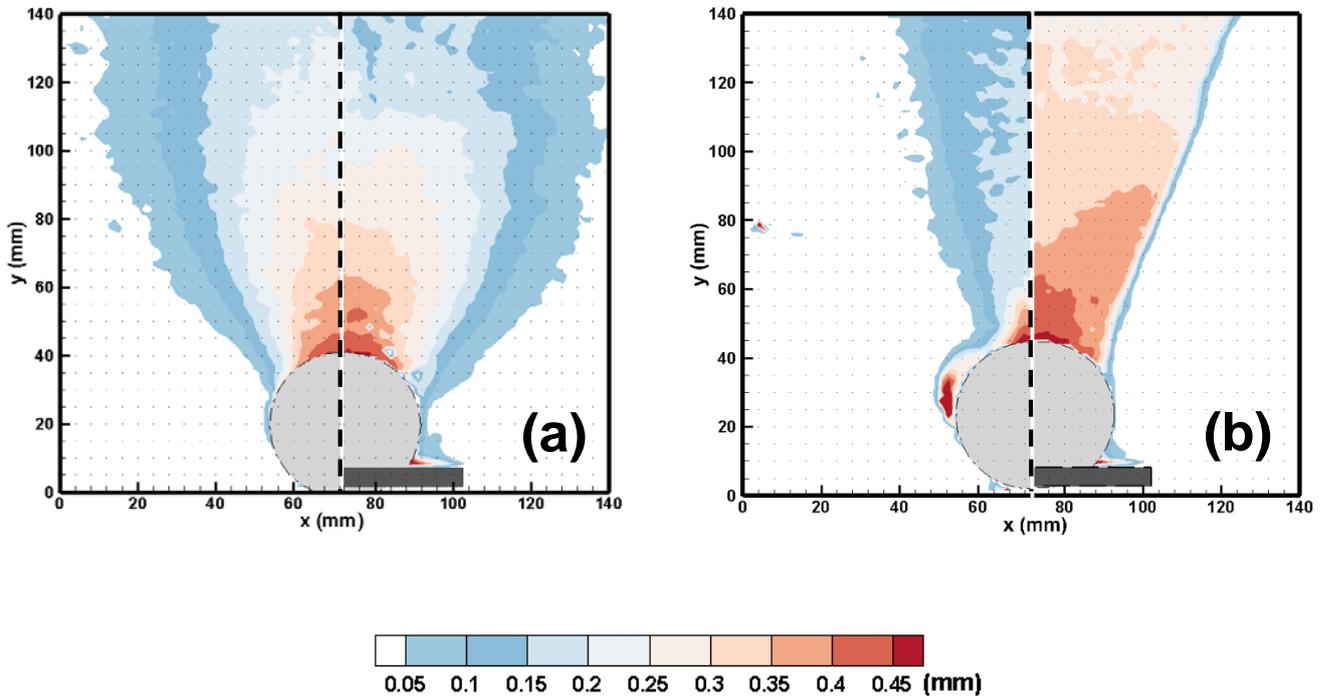


Figura 4.43 – Comparação da magnitude do deslocamento do arrancamento do duto em areia densa sem geogrelha e com geogrelha 1,5D: a) Pico; b) Formação de banda de cisalhamento no estágio pós-pico.

Resultado semelhante foi obtido no período de pesquisa no Brasil. A fig. 4.44 mostra os vetores de deslocamento obtidos com o arrancamento do duto em areia densa,  $D_r=85\%$ , no estágio de pico (Fig. 4.44a) e pós-pico (Fig. 4.44b) e em areia fofa,  $D_r=35\%$ , no estágio de pico (Fig. 4.44c) e pós-pico (Fig. 4.44d). Foi utilizado o programa PIVlab (Thielicke e Stamhuis, 2014) nestas análises. A tabela 2.9, encontrada na revisão bibliográfica desta tese, apresenta algumas características deste código livre, desenvolvido em linguagem de programação Matlab.

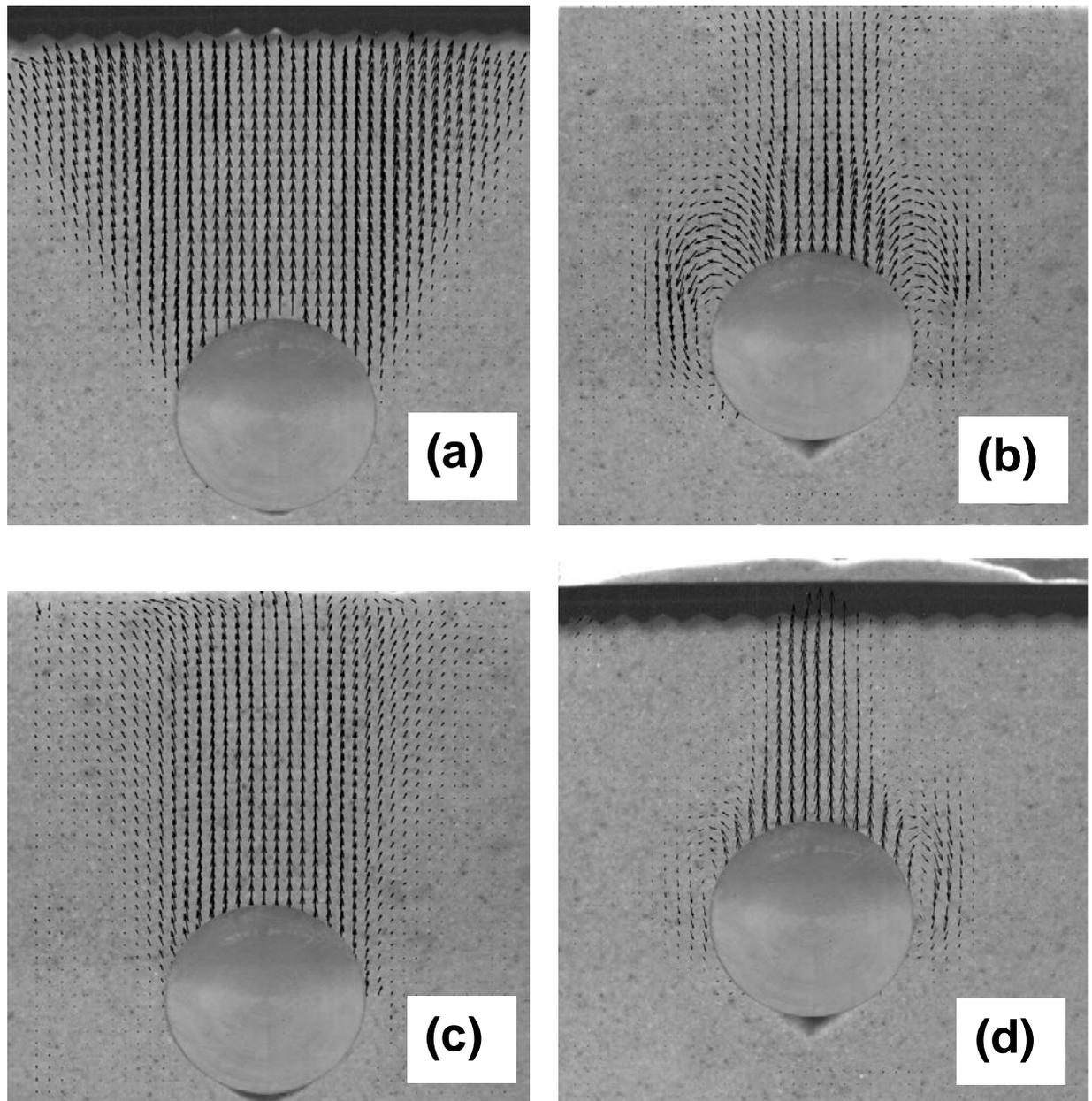


Figura 4.44 – Vetores de deslocamento obtidos com o arrancamento do duto em areia densa,  $D_r=85\%$ , no estágio de pico (a) e pós-pico (50% do pico) (b) e em areia fofa,  $D_r=35\%$ , no estágio de pico (c) e pós-pico (50% do pico) (d).

### 4.3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DINÂMICA E QUASI-ESTÁTICO

#### 4.3.3.1 Observações gerais

Imagens Instantâneas da penetração no plano opaco da amostra de solo transparente são mostrados na figura 4.45 para a penetração dos projéteis de ponta reta e cônica. Pode ser visto que para a velocidade de impacto considerada, o impacto

e a penetração inicial resultam na formação de uma cavidade que aparece como uma mancha nas imagens.

Durante esta fase inicial de penetração, a ponta do projétil entra em contato com o solo que oferece uma resistência, enquanto o restante do corpo do projétil move-se no vazio da cavidade formada. À medida que a velocidade do projétil diminui, o fenômeno da cavitação cessa, e o corpo do projétil, cada vez mais, entra em contato com o solo circundante durante a penetração. Comparando-se os dois projéteis de ponta reta e o de ponta cônica, pode-se inferir que a região opaca formada nas fases iniciais de penetração do projétil de ponta reta é maior do que a de ponta cônica.

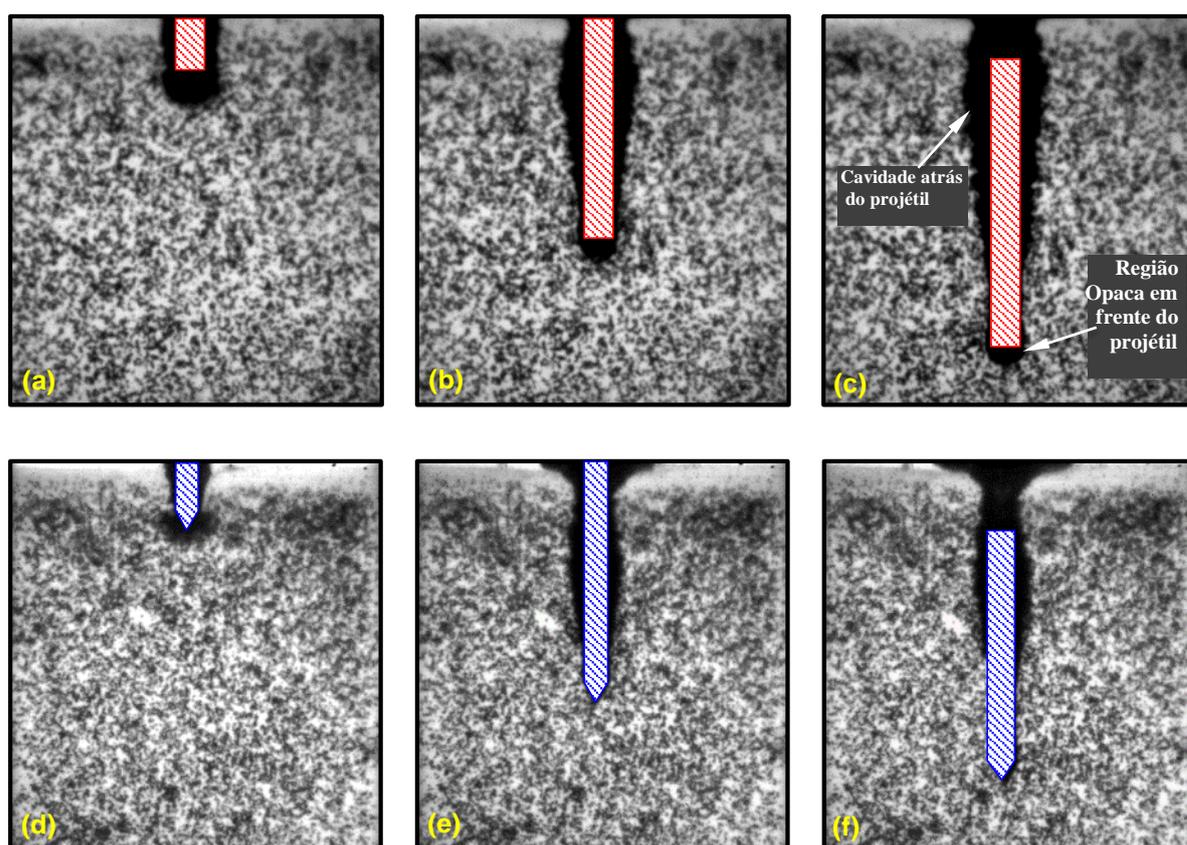


Figura 4.45-Imagens da penetração do projétil de ponta reta (a, b, c) e ponta cônica (d, e, f) na seção do solo transparente com camada opaca, nos tempos de penetração (a, d)  $t=1,00$  ms, (b, e)  $t=5,50$  ms, (c, f)  $t=8,50$  ms seguido do impacto ( $t=0$ ).

Durante os primeiros instantes da penetração, uma região opaca forma-se à frente do projétil de ponta reta, com um diâmetro maior do que a do projétil de ponta cônica. Esta região opaca é visualizada com mais clareza no teste com projétil de ponta reta (Fig. 4.45). A região opaca imediatamente à frente do projétil tem a forma

aproximada de um cone, no caso do projétil de ponta reta, e persiste à frente da ponta do projétil durante as fases posteriores da penetração. No entanto, no caso do projétil de ponta cônica, esta região opaca não persiste durante as fases posteriores de penetração (Fig. 4.45). A aparência escura desta região, semelhante à cavidade formada por detrás da ponta do projétil, é resultado de uma região opaca formada à frente do projétil que refratou a luz. A formação destas regiões opacas podem ser explicados por uma ou mais hipóteses, incluindo as alterações induzidas por pressão no índice de refração (por exemplo, Weir e Waxler 1963; Vedam e Samara 1983) e a cavitação devida à dilatação induzida pelo cisalhamento. A Fig. 4.49 mostra imagens do ensaio quasi-estático a diferentes profundidades onde não há o aparecimento de uma região opaca durante a penetração da haste. A fig. 4.46 mostra imagens da amostra de solo transparente após o evento de penetração do projétil de ponta cônica.

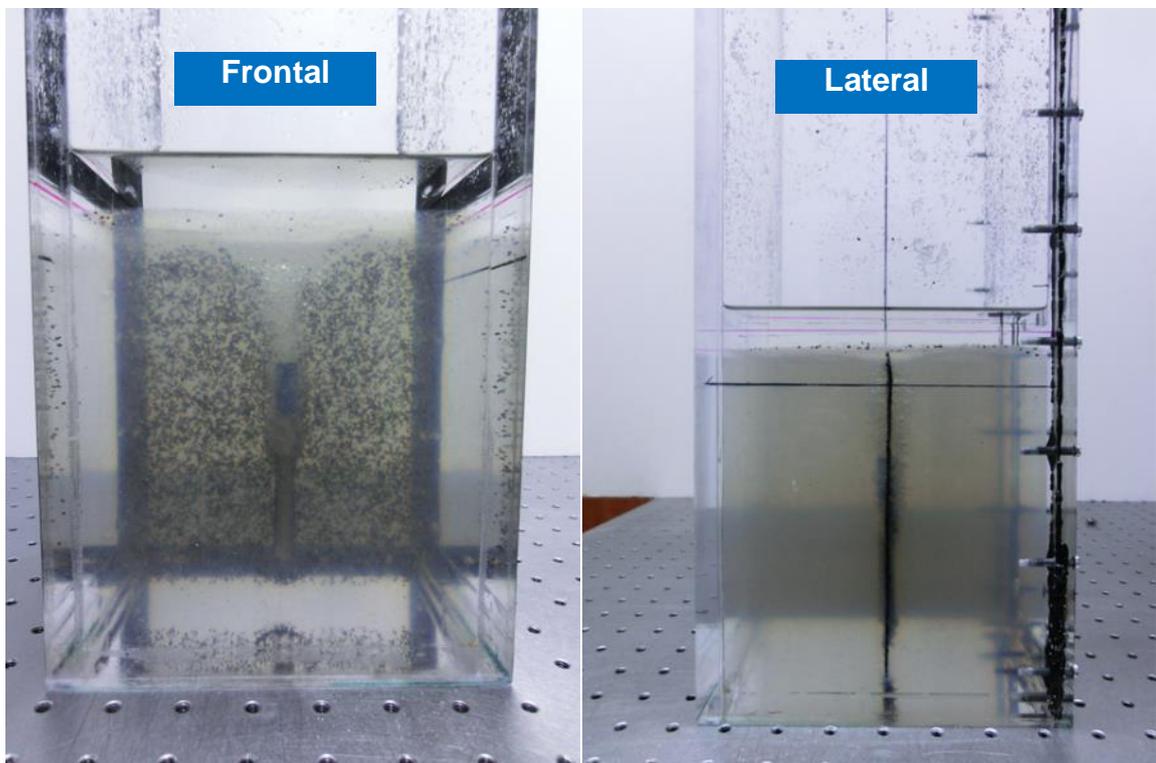


Figura 4.46 – Imagens da amostra de solo transparente após o ensaio de penetração com projétil de ponta cônica.

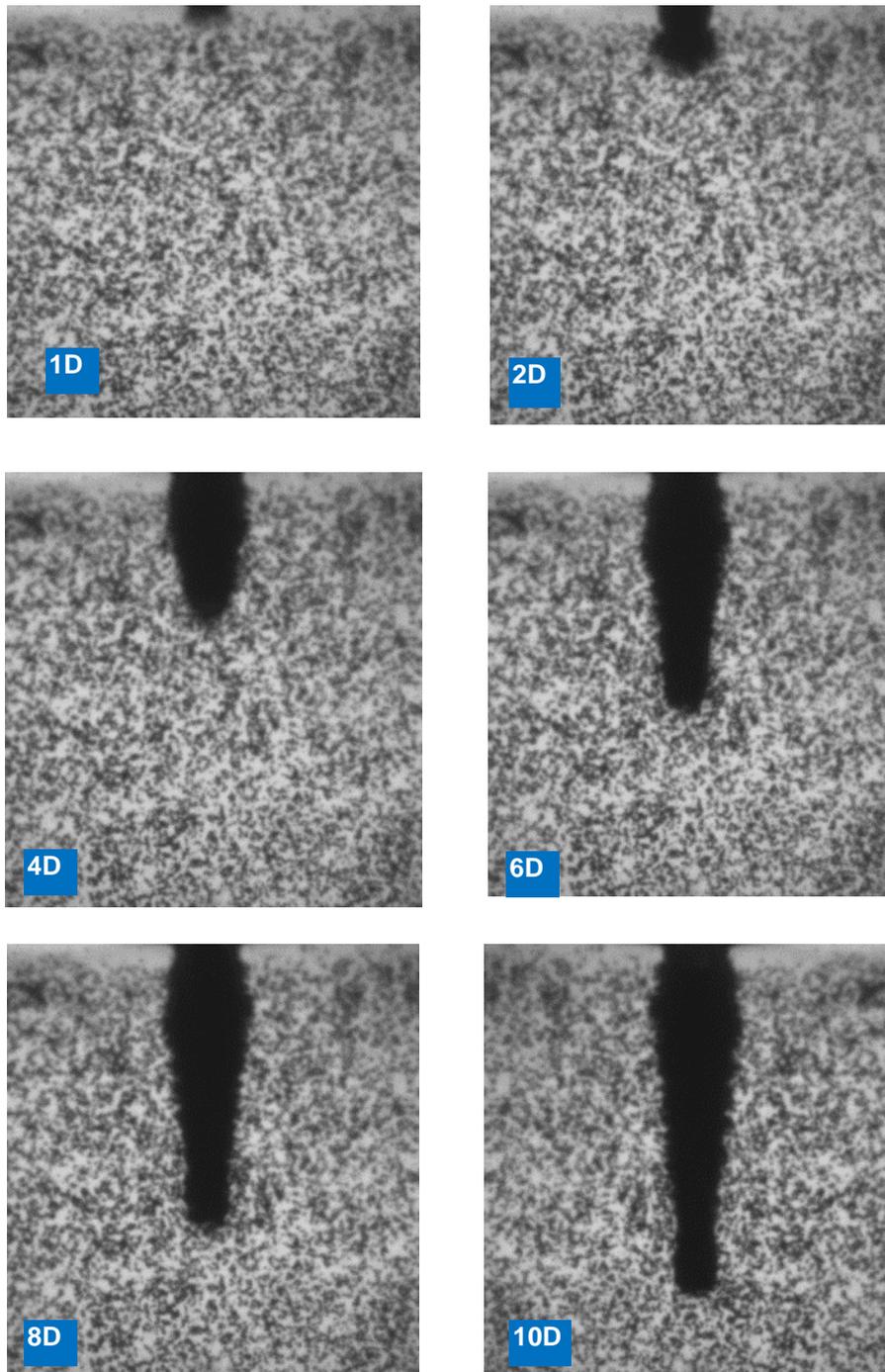


Figura 4.47 – Imagens instantâneas nas profundidades de penetração 1D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D do projétil de ponta reta no ensaio dinâmico de penetração.

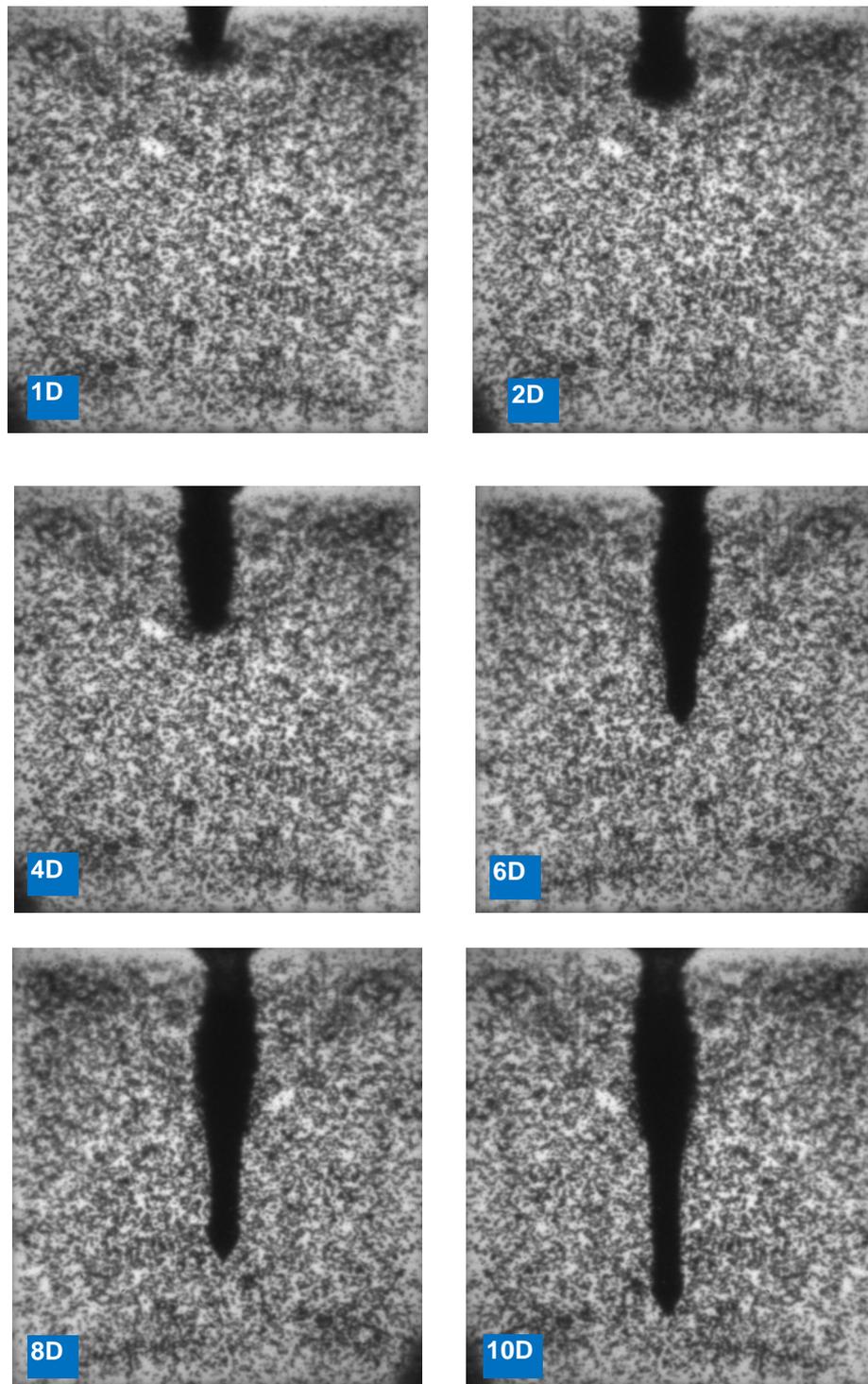


Figura 4.48 – Imagens instantâneas nas profundidades de penetração 1D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D do projétil de ponta cônica no ensaio dinâmico de penetração.

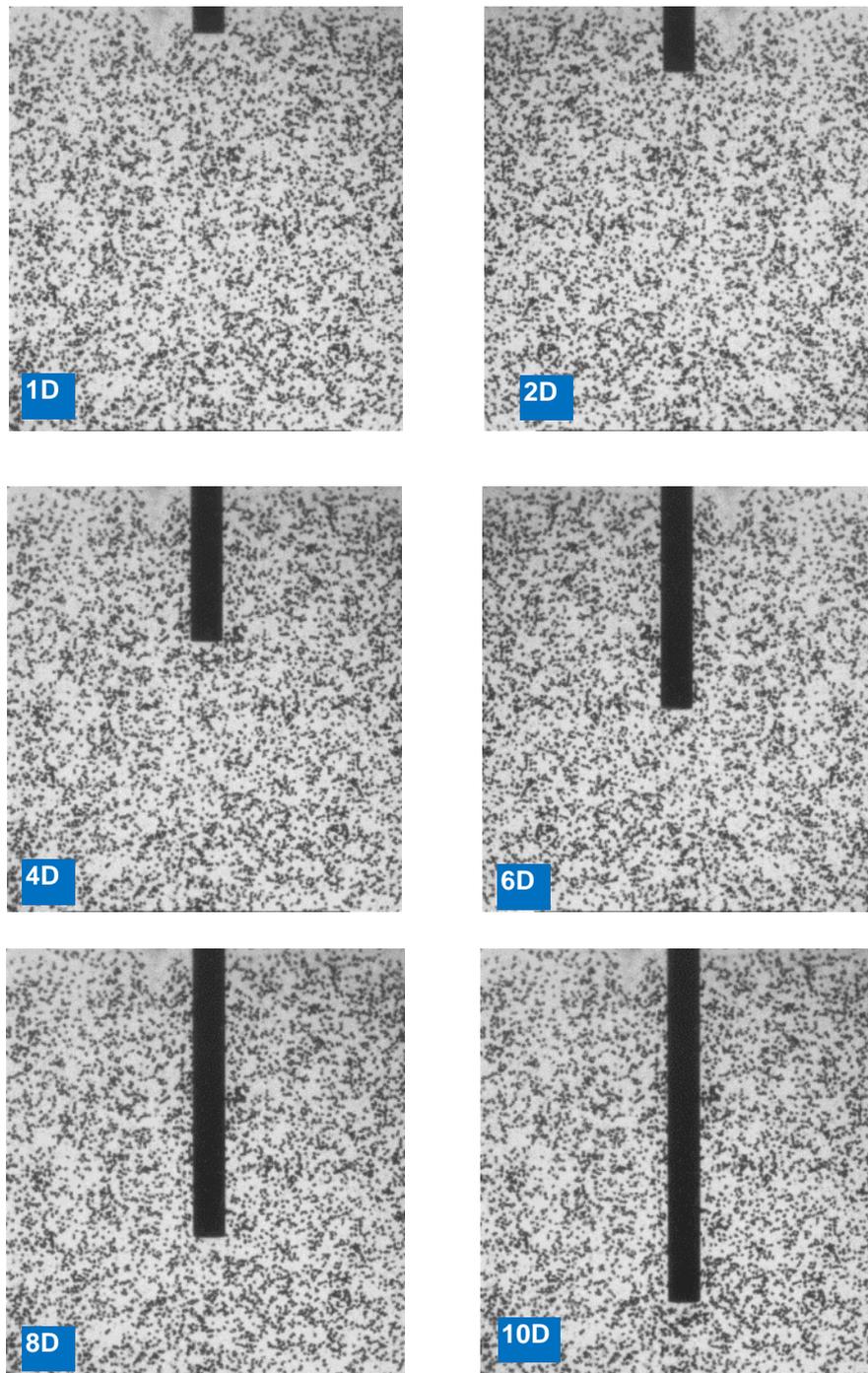


Figura 4.49 – Imagens nas profundidades de penetração 1D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D de uma haste reta no ensaio quasi-estático de penetração.

#### 4.3.3.2 Campos de deslocamento e velocidade

A análise DIC foi realizada em pares de imagens consecutivas, de acordo com metodologia descrita na revisão bibliográfica deste trabalho. Após testes de calibração, o critério de correlação **ZNSSD** foi escolhido para as análises. A figura 4.50 demonstra os vetores de velocidade à profundidade de penetração de 4D e 6D para o projétil de ponta reta e 4D e 6D para o projétil de ponta cônica.

A parcela da magnitude da velocidade entre pares de imagens sequenciais são mostrados na figura 4.51 , para a penetração em profundidades correspondentes a 1D, 2D, 4D, 6D, 8D e 10D para o projétil de ponta reta. A parcela da magnitude da velocidade entre pares de imagens sequenciais são mostrados na figura 4.52, para a penetração em profundidades correspondentes a 1D, 2D, 4D, 6D, 8D e 10D para o projétil de ponta cônica. O software TECPLOT Focus foi utilizado para plotar os gráficos importados dos resultados obtidos na análise DIC pelo software PIVVIEW 2C/3C.

Pode ser visto a formação de uma cavidade hemisférica na profundidade de penetração 1D. Esta cavidade hemisférica expande durante a fase de penetração posterior, como evidenciado na penetração em 2D. Durante as fases posteriores de penetração, os deslocamentos dentro da região hemisférica decaem, e a maior parte do perfil de velocidade está localizada eventualmente a uma região que se estende aproximadamente a 3D a partir da ponta do projétil. A magnitude da velocidade para além desta região fica a duas ordens de grandeza menor do que a velocidade de impacto. Observações semelhantes foram realizadas para a penetração do projétil cônico.

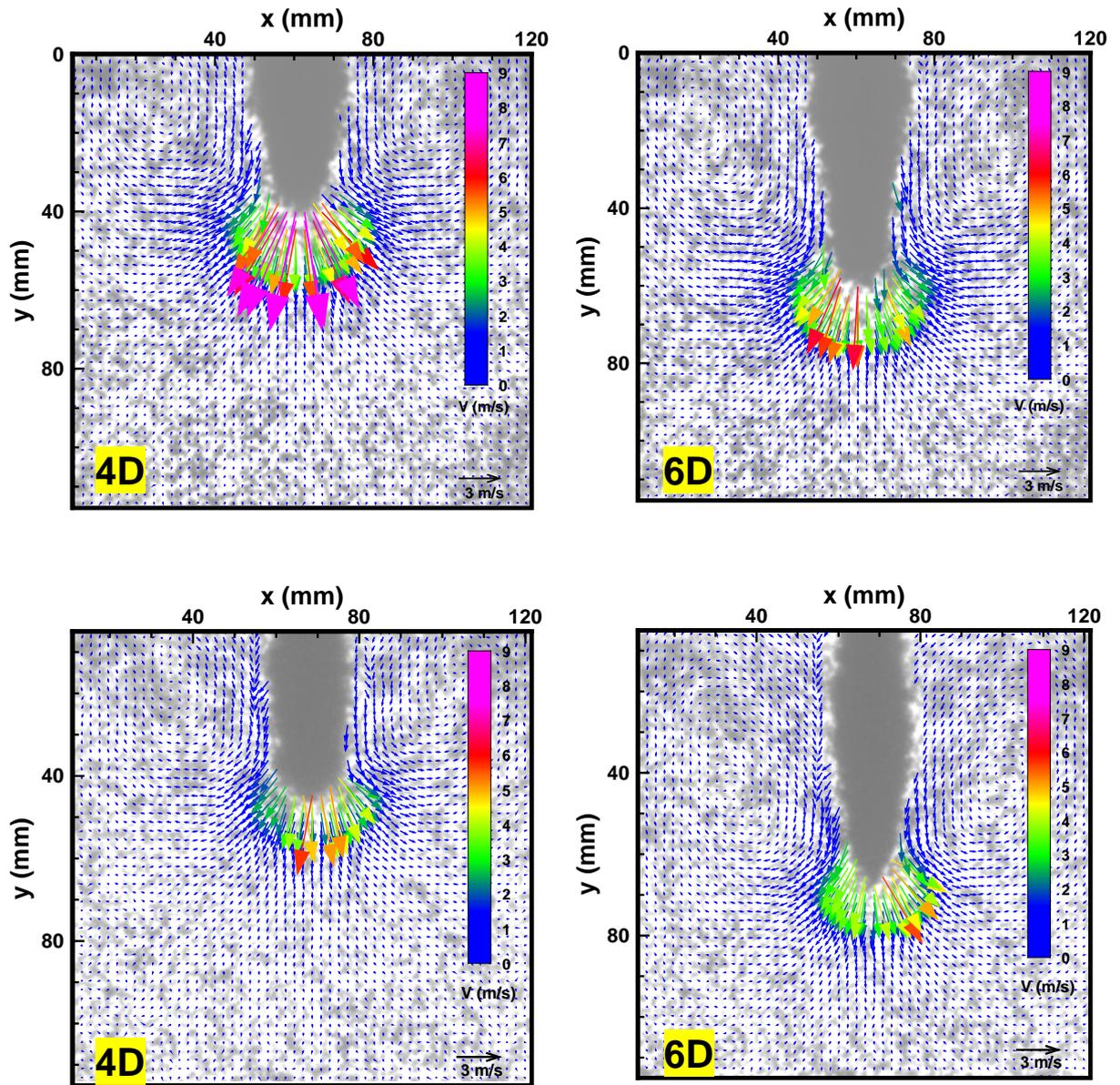


Figura 4.50 – Vetores de velocidade a 4D e 6D para projétil de ponta reta (imagens superiores) e para projétil de ponta cônica (imagens inferiores).

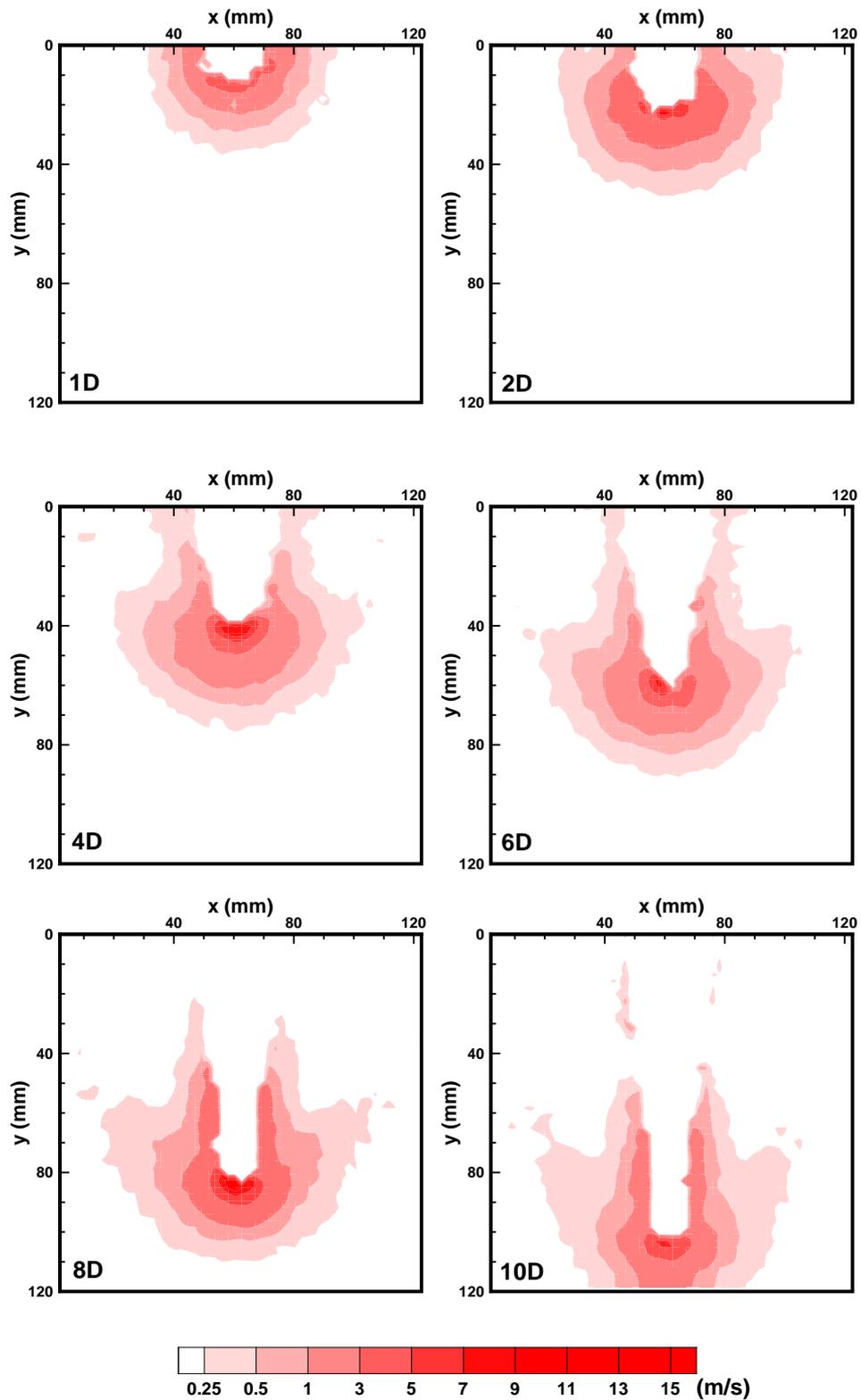


Figura 4.51 – Distribuição da magnitude da velocidade em incrementos de penetração a aproximadamente 1D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D do projétil de ponta reta, correspondendo a incrementos de tempo de 0,48 ms, 1,44 ms, 2,88 ms, 4,32 ms, 5,76 ms e 7,36 ms respectivamente.

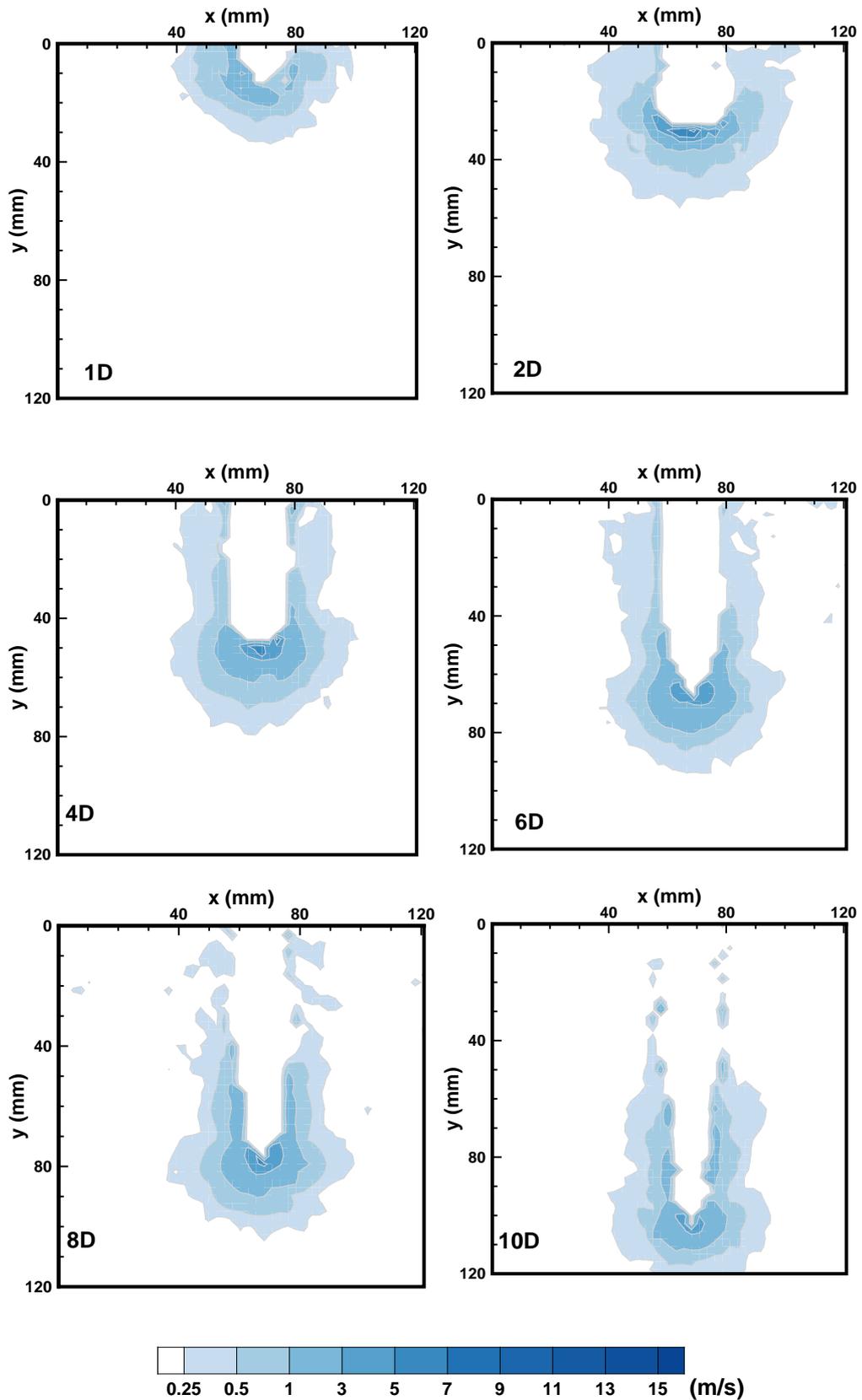


Figura 4.52 – Distribuição da magnitude da velocidade em incrementos de penetração a aproximadamente 1D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D do projétil de ponta cônica, correspondendo a incrementos de tempo de 0,48 ms, 1,44 ms, 2,88 ms, 4,32 ms, 5,76 ms e 7,36 ms respectivamente.

Com o objetivo de melhor caracterizar a natureza do campo de deslocamento, componentes de deslocamento horizontal e vertical foram obtidos para a penetração dos projéteis de ponta reta e cônica. Os resultados, apresentados na figura 4.53 e 4.54, revelam que as tendências gerais de deformação do solo são semelhantes para os dois projéteis.

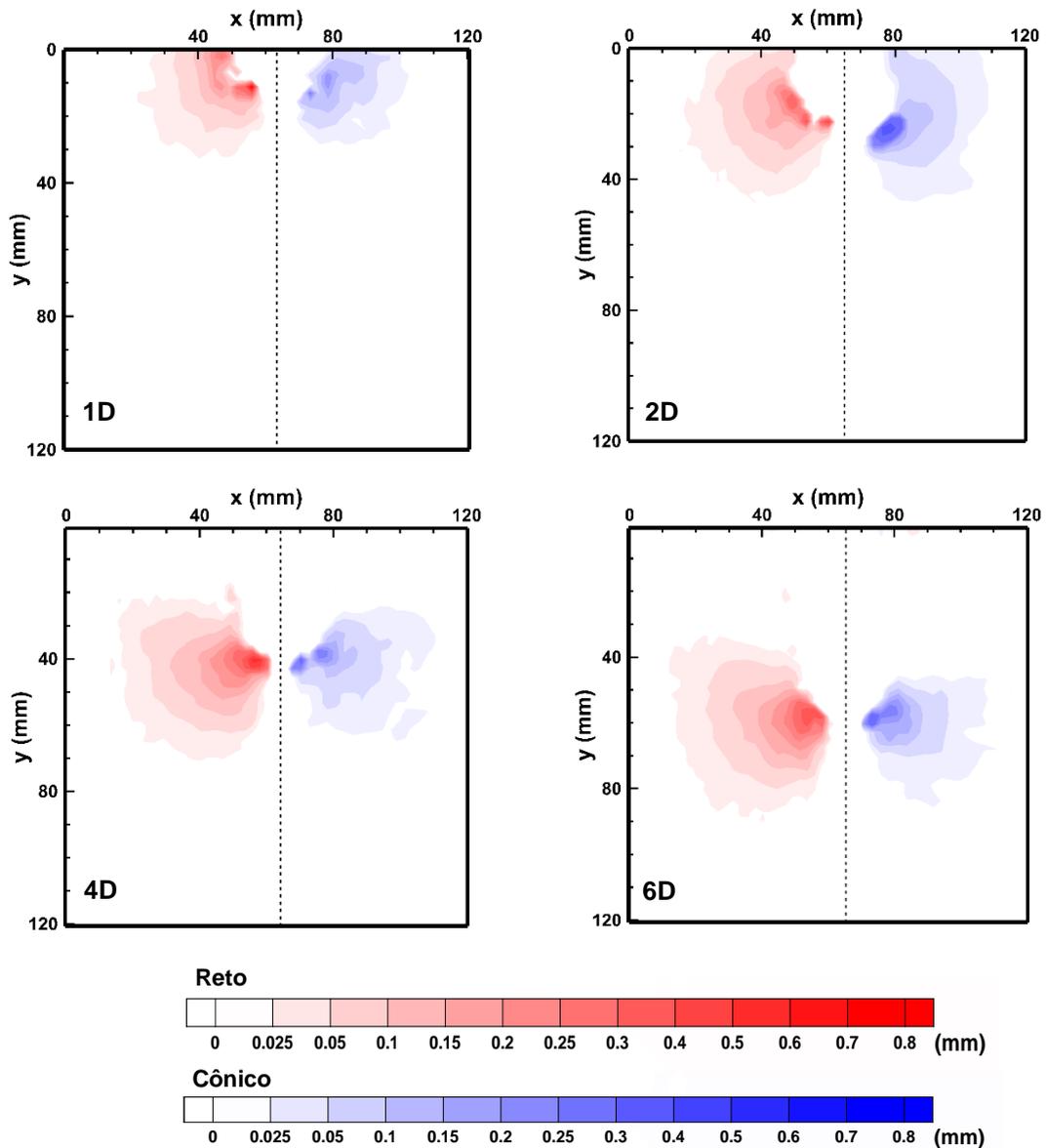


Figura 4.53 - Contornos do campo de deslocamento horizontal incremental a profundidades correspondentes de penetração de 1D, 2D, 4D, and 6D para a penetração de projéteis de ponta reta e cônico.

Os gráficos da figura 4.54 mostram incrementos de deslocamento horizontal para diferentes profundidades de penetração (1D, 2D, 4D e 6D). O incremento da penetração é de aproximadamente 1-3 mm, dependendo da profundidade de penetração. A principal diferença entre os deslocamentos laterais em projéteis de ponta cônica e reta é que, no caso do primeiro os deslocamentos laterais estão limitados a uma menor região em torno da ponta do projétil, enquanto que o projétil de ponta reta produz deslocamentos maiores e de maior alcance radial tomando como origem a ponta do projétil.

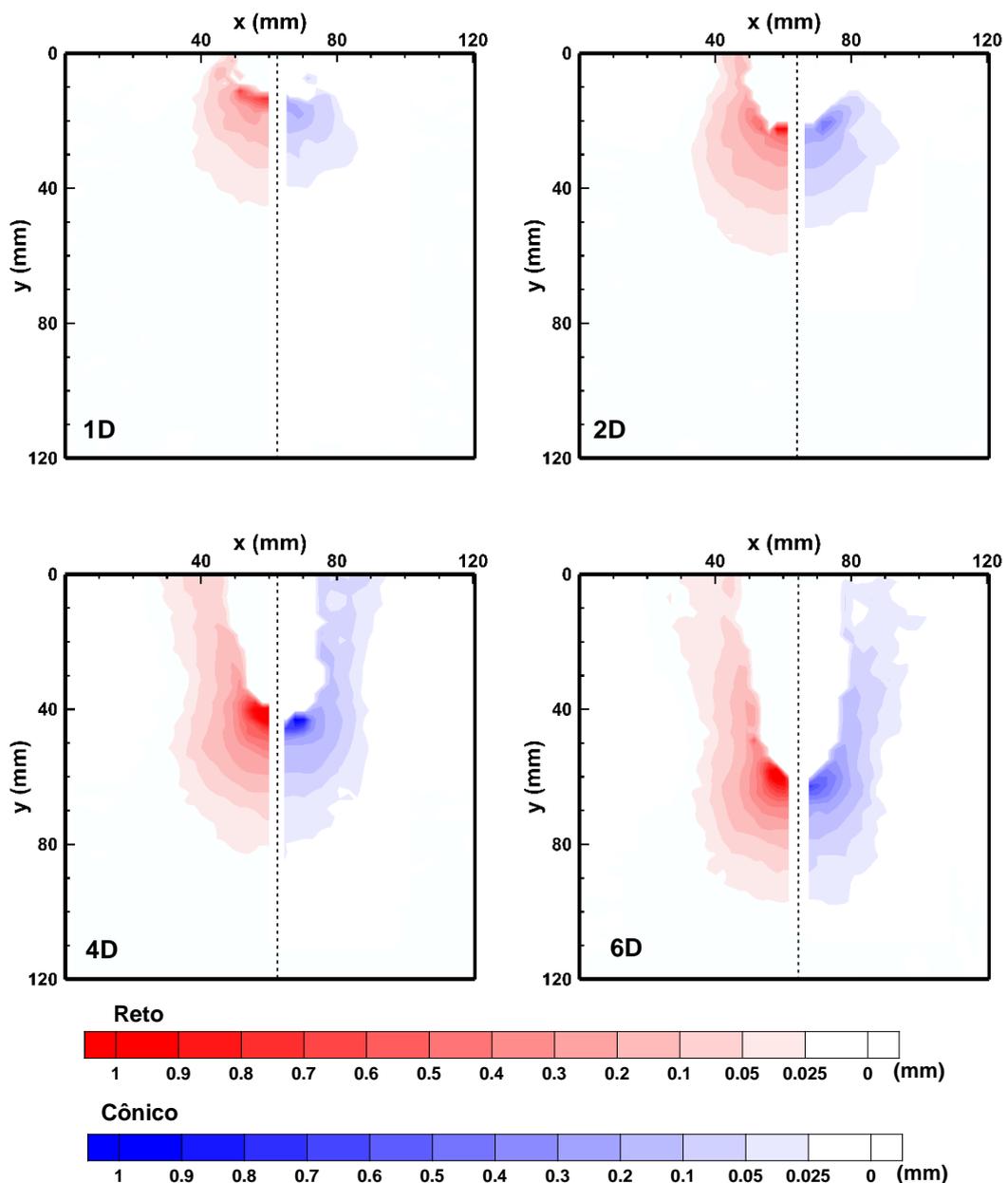


Figura 4.54 - Contornos do campo de deslocamento incremental vertical a profundidades correspondentes de penetração de 1D, 2D, 4D, and 6D para a penetração de projéteis de ponta reta e cônica.

#### 4.3.3.3 Deformação Cisalhante e Volumétrica

Deslocamentos obtidos a partir da análise DIC de imagens sequenciais foram utilizados para gerar campos de deformação cisalhante e volumétrica utilizando o algoritmo `LS.mat` escrito em Matlab (apêndice D) de acordo com o referencial teórico da Revisão Bibliográfica deste trabalho. Contornos incrementais de cisalhamento correspondentes à incrementos de profundidade de penetração de 1D, 2D, 4D e 6D são mostrados nas figuras 4.55 e 4.56 para o projétil reto e cônico.

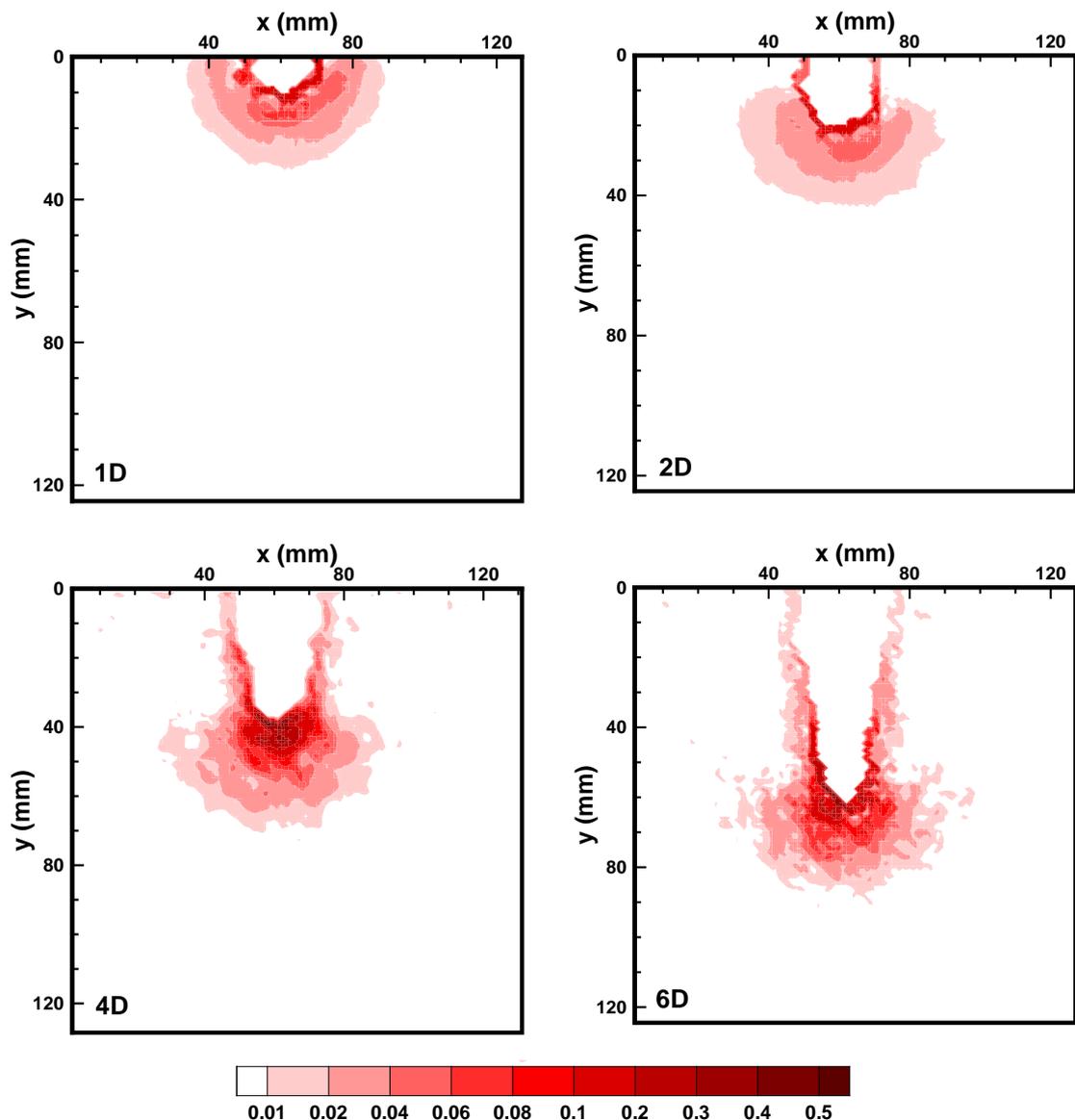


Figura 4.55- Incrementos de deformações de cisalhamento a profundidades de penetração de 1D, 2D, 4D, e 6D para projétil de ponta reta, correspondendo a tempos de penetração de 0,48, 1,44, 3,68, e 5,12 ms. O cisalhamento máximo mostrado na barra são valores de corte – o valor máximo é 0,54.

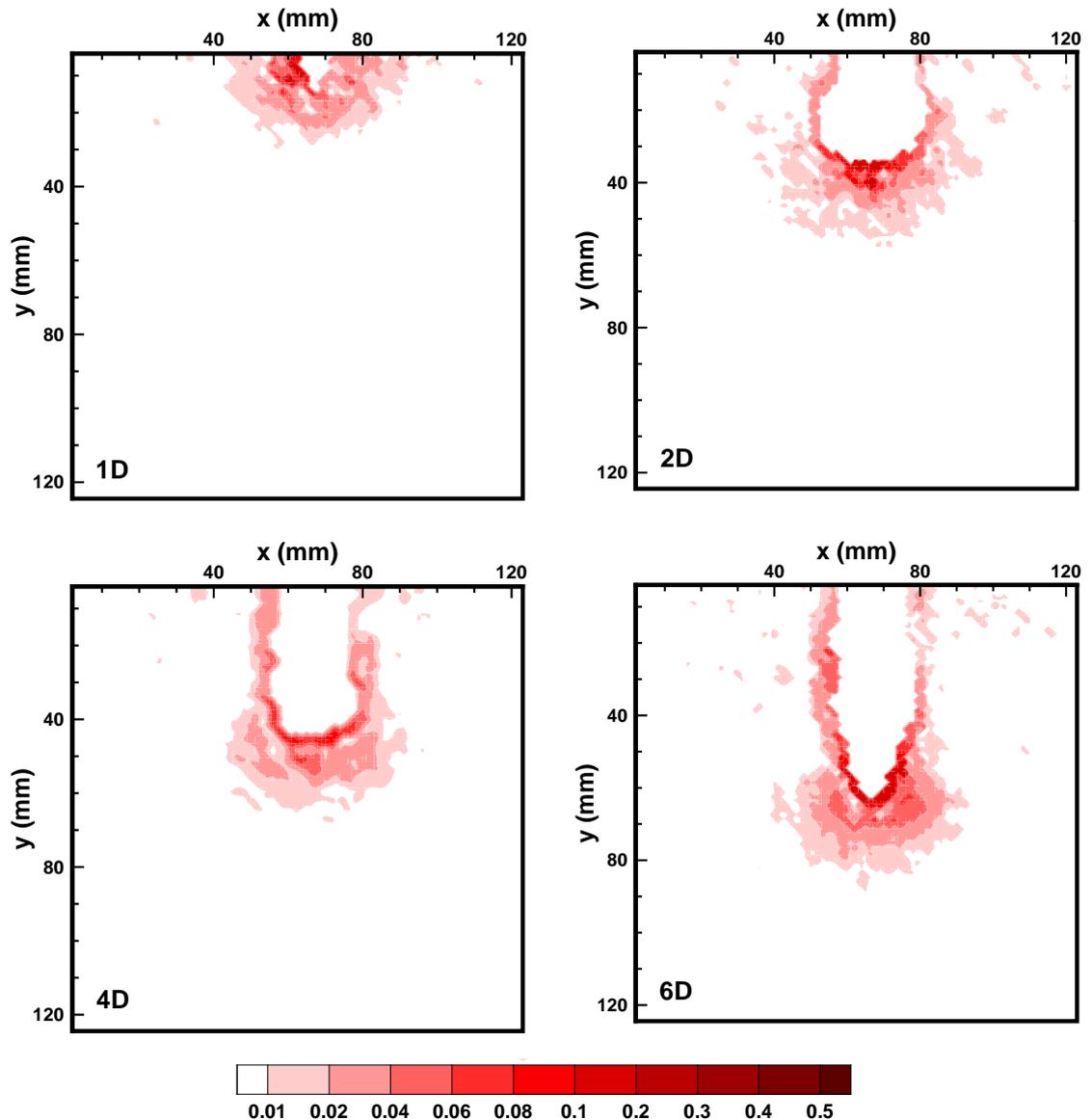


Figura 4.56- Incrementos de deformações de cisalhamento a profundidades de penetração de 1D, 2D, 4D, e 6D para projétil de ponta cônica, correspondendo a tempos de penetração de 0,48, 1,44, 3,68, e 5,12 ms. O cisalhamento máximo mostrado na barra são valores de corte – o valor máximo é 0,54.

Pode ser visto que as grandes deformações cisalhantes ocorrem na ponta do projétil para ambos os casos. A comparação dos diferentes gráficos de deformação cisalhante incremental a diferentes profundidades de penetração para o projétil reto sugere que a região opaca formada à frente do projétil durante as fases iniciais de penetração pode delinear um limite interior do solo que continuamente sofre cisalhamento em frente da ponta do projétil. Esta quantidade de solo, que viaja com o

projétil, forma uma ponta aparente e estendida na frente do projétil - A formação de um falso cone durante a penetração.

A forma cônica aproximada desta frente também é confirmada pelas imagens de penetração mostrados na Figura 4.45, e é também evidenciada em gráficos de deformação cisalhante mostrado na figura 4.55. Vale destacar que as grandes deformações de cisalhamento formadas em frente do projétil indicam que para as velocidades de penetração encontradas neste estudo, o fluxo de cisalhamento induzido é um importante mecanismo que contribui na penetração. Diferenças qualitativas entre os campos de deformação do projétil reto e cônico podem ser vistas a partir das Figuras 4.55 e 4.56 . No caso do projétil de ponta reta, a maior intensidade de deformação de cisalhamento é observado imediatamente após o limite da região opaca. Grandes deformações cisalhantes superiores a 0,5 ocorrem na ponta do projétil, enquanto deformações cisalhantes menores na faixa de aproximadamente 2,5D e 2D ocorrem no sentido radial dos projéteis reto e cônico, respectivamente.

A comparação das deformações de cisalhamento dos dois projéteis revela que no caso do projétil reto, maiores deformações de cisalhamento ocorrem abaixo da ponta do projétil, enquanto que no caso do cônico, as maiores deformações de cisalhamento são observados ao longo das paredes do cone. Em ambos os casos, consideráveis deformações de cisalhamento são perceptíveis ao longo dos limites da região opaca, que se prolonga até à superfície do solo. Grandes deformações de cisalhamento no caso do projétil cônico são limitadas a uma pequena região imediatamente ao longo das fronteiras da região opaca. A principal diferença entre os dois projéteis é que as deformações de cisalhamento são muito mais localizadas no caso do projétil cônico, ao passo que no projétil reto grandes deformações de cisalhamento estendem-se a aproximadamente 2D para fora a partir do limite da região opaca.

Também foi realizada uma comparação entre as deformações de cisalhamento resultantes de incrementos da penetração quasi-estática e dinâmica, como mostrado na Fig 4.57. Os gráficos revelam que a maioria das deformações de cisalhamento, no caso da penetração quasi-estática, são concentradas ao longo de uma região de forma aproximadamente cônica que se estende até 1,5 D da ponta do projétil. Deformações cisalhantes são insignificantes para além desta região de forma cônica aproximada; Por outro lado, a penetração dinâmica, produz deformações cisalhantes consideráveis que se prolongam com alcance significativamente maior a partir da ponta do projétil, como discutido acima. Além disso, as maiores deformações de cisalhamento são observadas

ao longo do corpo do projétil na penetração dinâmica se comparado com seu homólogo quasi-estático.

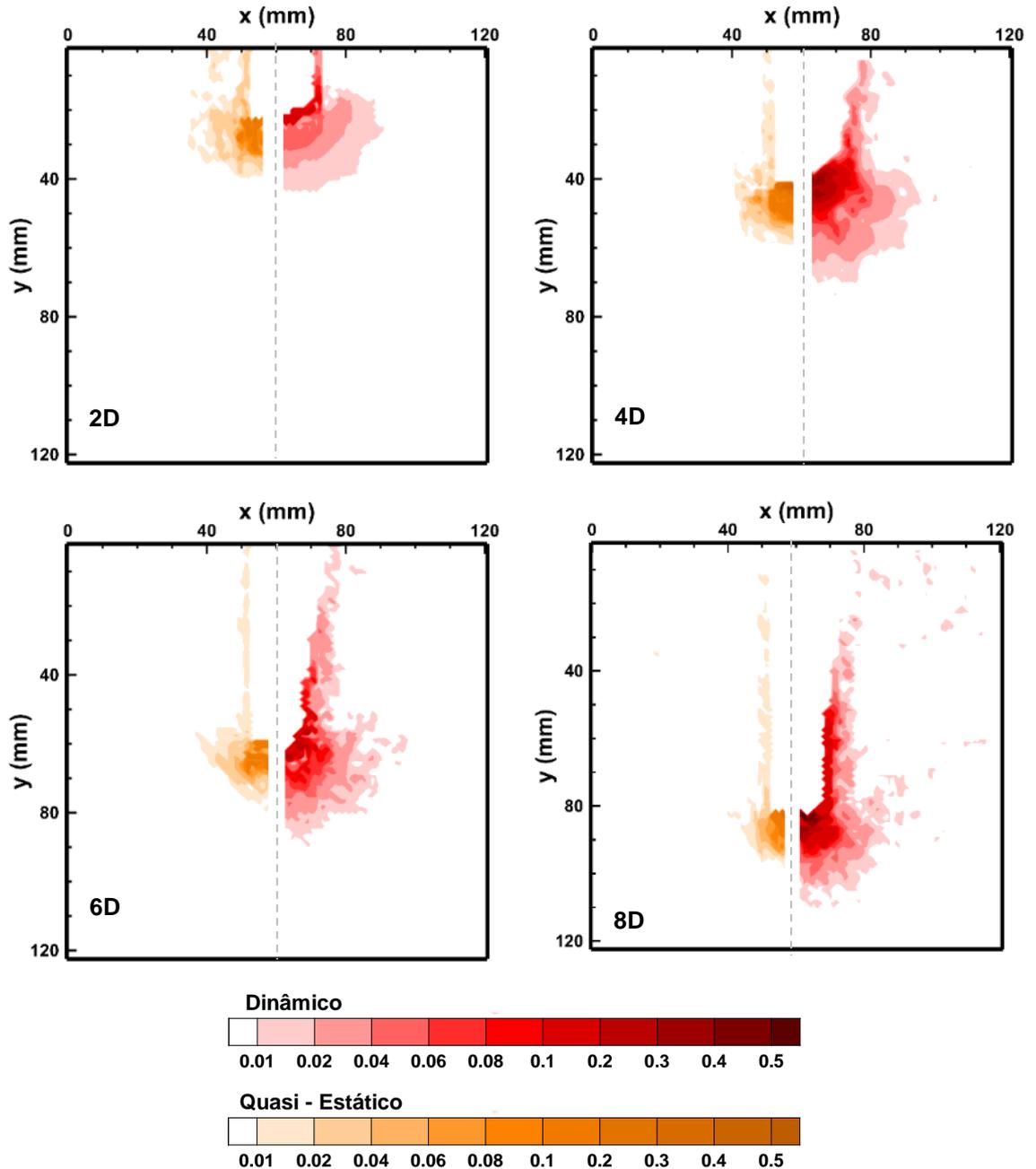


Figura 4.57- Comparação de incrementos de deformação cisalhante para a penetração quasi-estática e dinâmica para o projétil de ponta reta, mostrado a profundidades de penetração de 2D, 4D, 6D, e 8D.

Observações importantes também podem ser feitas a partir de gráficos de deformação volumétrica, mostrado nas figuras 4.58 e 4.59. Regiões de compressão significativa são formadas imediatamente próximas a ponta do projétil, um pouco além da região opaca. Uma notável compressão também continua em torno da cavidade

quando o projétil passa de um dado ponto. Isto é consistente com observações relatadas por Cooper e Breaux (2010) que observaram que uma camada de areia compactada forma-se em torno da cavidade após a penetração.

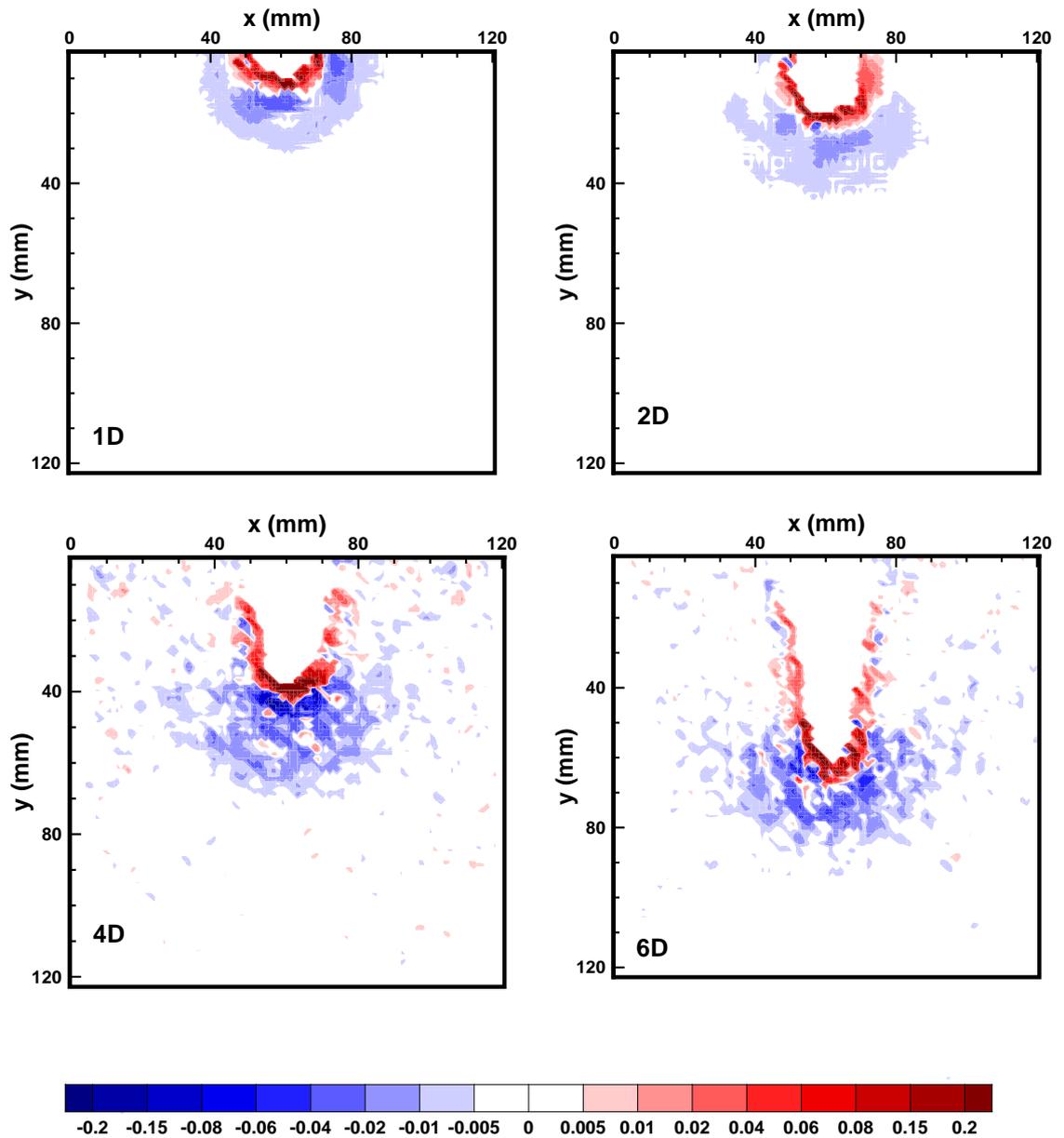


Figura 4.58- Incrementos de deformações volumétricas a profundidades de penetração de 1D, 2D, 4D, e 6D para o projétil de ponta reta, correspondendo a tempos de penetração de 0,48, 1,44, 3,68, e 5,12 ms. Valores positivos e negativos representam compressão e dilatação, respectivamente; Os valores máximos de compressão e dilatação mostrados na barra são valores de corte.

Também pode ser visto a partir das Figuras 4.58 e 4.59, que uma dilatação considerável ocorre à frente do projétil, em todas as fases de penetração. É interessante notar que a maioria das deformações volumétricas, com profundidade maior do que 0,5-1D da ponta do projétil são deformações de dilatação, estendendo-se para até a profundidade de 3D a partir da frente do projétil.

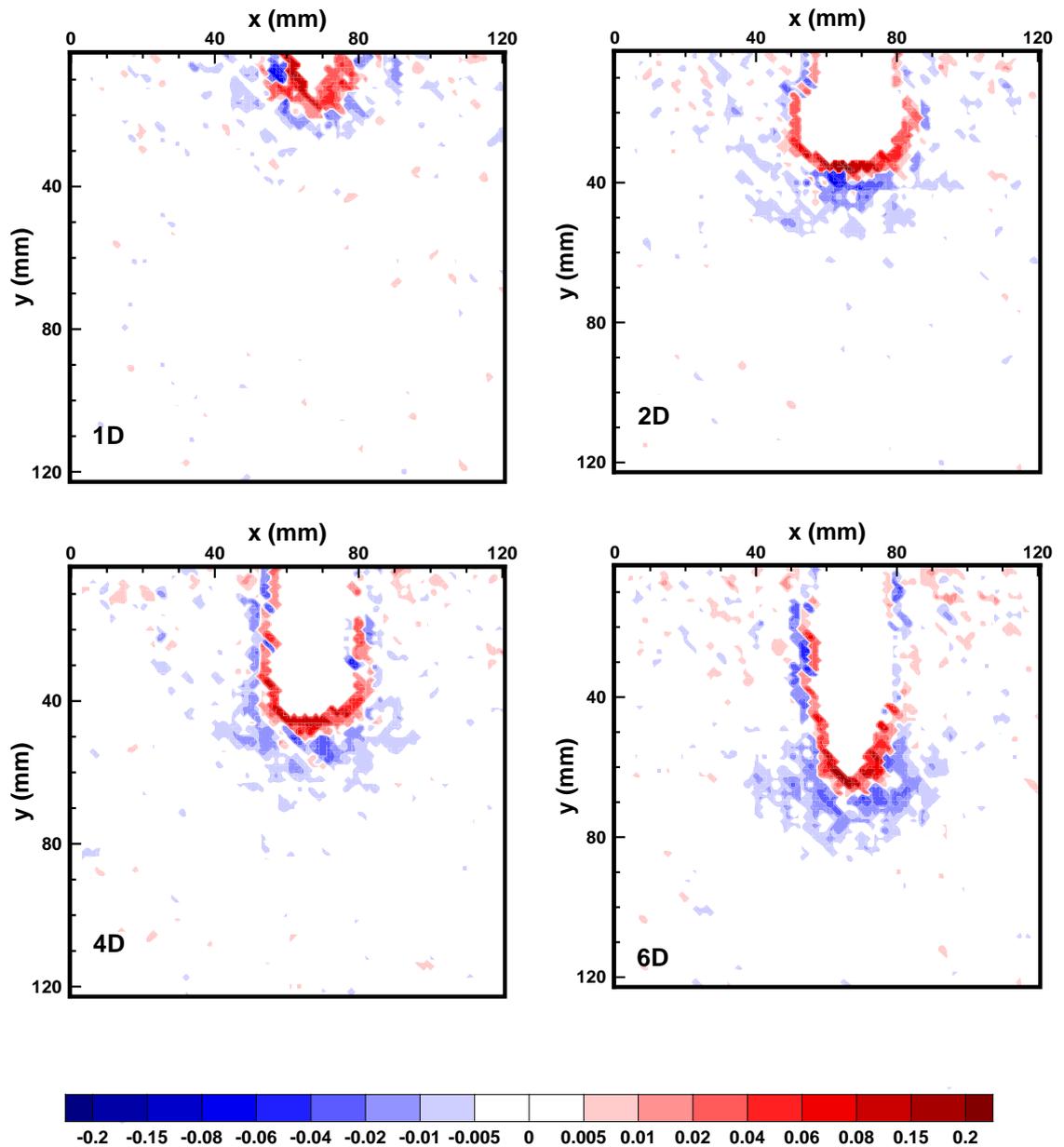


Figura 4.59- Incrementos de deformações volumétricas a profundidades de penetração de 1D, 2D, 4D, e 6D para o projétil de ponta cônica, correspondendo a tempos de penetração de 0,48, 1,44, 3,68, e 5,12 ms. Valores positivos e negativos representam compressão e dilatação, respectivamente; Os valores máximos de compressão e dilatação mostrados na barra são valores de corte.

Comparando-se as deformações volumétricas produzidas pelo projétil reto e cônico, observa-se que as deformações de compressão são maiores no caso do projétil cônico. Além disso, uma maior dilatação ocorre no projétil de ponta reta, que alcança uma maior região a partir da ponta do projétil, em comparação com o projétil cônico.

#### 4.3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE ESTACAS TORPEDO

##### 4.3.4.1 Observações gerais

Imagens capturadas pela câmera durante o arrancamento da estaca torpedo 2 são mostrados na figura 4.60.

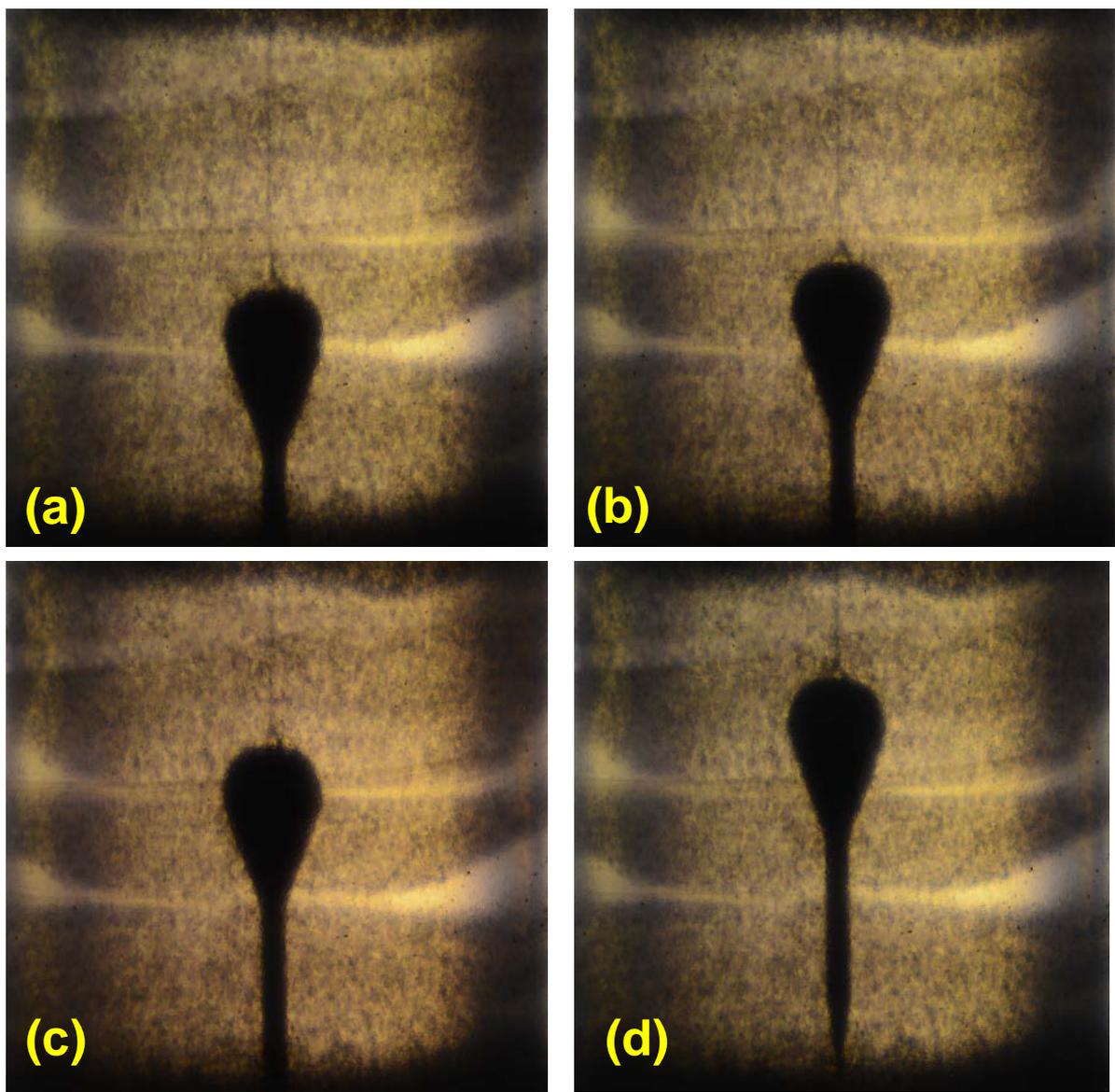


Figura 4.60- Imagens capturadas pela câmera no evento de arrancamento da estaca torpedo 2.

#### 4.3.4.2 Resumo dos Testes

##### 4.3.4.2.1 Resposta Carga vs. Deslocamento

Uma pressão de ar comprimido de 3,0 *psi* foi aplicado no sistema de confinamento. A prensa triaxial foi configurada para executar um ensaio de extensão e os componentes da prensa triaxial, célula de carga e LVDT registraram os dados durante o evento de arrancamento. A medida que a base da prensa motorizada se movimentava a linha de *kevlar* era tensionada e imagens eram capturadas pela câmera com uma taxa de velocidade de uma imagem capturada a cada 30 segundos.

Verificou-se que o torpedo só se movimentava quando a resistência total oferecida pelo solo era vencida, e esta movimentação ocorria com uma grande amplitude gerando picos oscilatórios a cada evento registrado. A figura 4.61 apresenta o resultado registrado pela célula de carga e pelo LVDT durante os eventos de arrancamento dos torpedos 1 e 2.

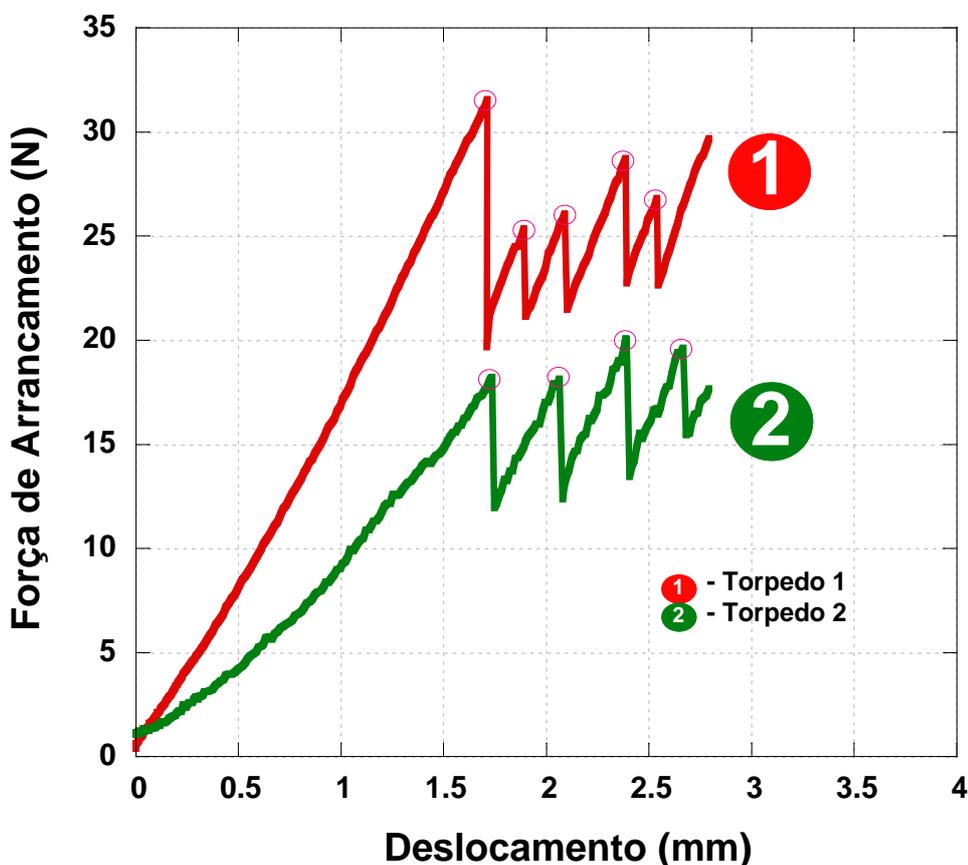


Figura 4.61- Gráfico força de arrancamento vs. deslocamento para os ensaios com os torpedos 1 e 2.

Observa-se do gráfico 4.61 que o torpedo 1 oferece uma resistência em torno de 55 % superior ao arrancamento em comparação ao torpedo 2. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Brum, 2012.

#### 4.3.4.3 - Perfil de deslocamento

O perfil de deslocamento incremental do primeiro estágio do arrancamento é apresentado na figura 4.62. Para uma melhor análise DIC, menores deslocamentos deveriam ocorrer entre uma imagem e outra, porém não foi observado este comportamento. Quando vencida a resistência do solo em cada estágio, a estaca deslocava cerca de 1 cm no interior do solo. Novos testes, com diferentes tensões de confinamento, serão realizados na Universidade de Nova York, para corrigir este problema.

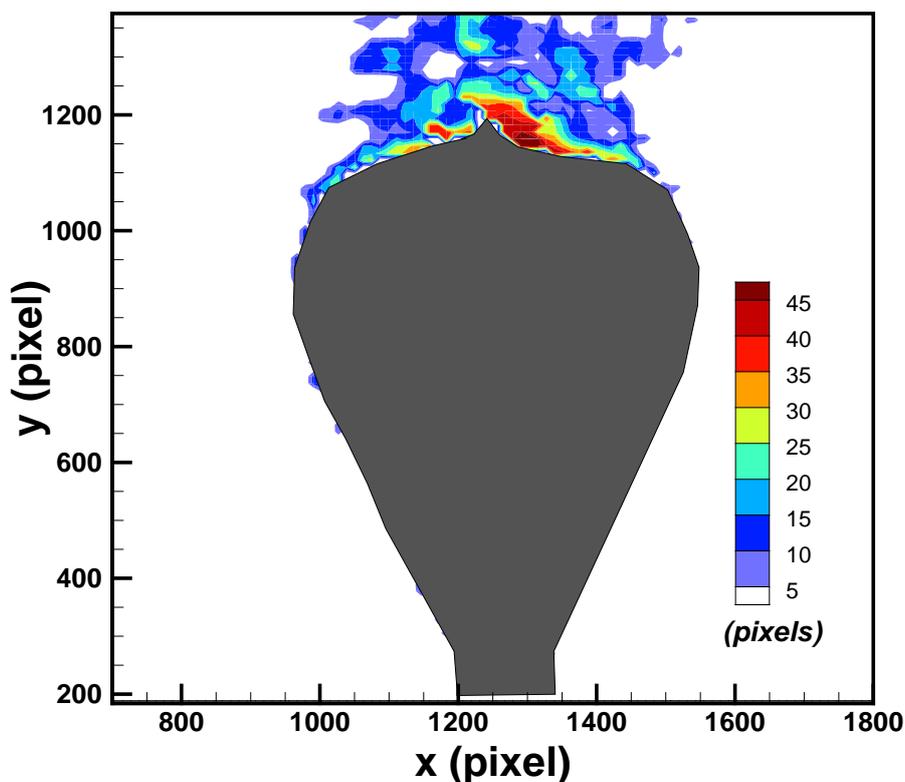


Figura 4.62 - Perfil de deslocamento no primeiro estágio de deslocamento.

## 5 - CONCLUSÕES SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

- Óleos minerais selecionados produzidos no Brasil demonstraram ser adequados em termos de transparência e comportamento geotécnico para composição de poro fluidos com sílica gel e quartzo fundido para modelagem de areia e pó de sílica amorfa para modelagem de argila o que facilita a difusão desta técnica pelo país e reduz o custo de preparação das amostras;
- Um novo poro fluido para modelar problemas geotécnicos com solos transparentes foi apresentado nesta tese. O material consiste de quartzo fundido saturado com uma solução de iodeto de sódio tratado com thioissulfato de sódio. Ensaio geotécnicos padrões demonstraram que a resistência ao cisalhamento, a permeabilidade, a forma dos grãos e análise granulométrica da quartzo fundido saturada com iodeto de sódio é comparável a das areias naturais saturadas com água. O material é, portanto, adequado para a modelagem física de muitos problemas geotécnicos. Semelhante ao solo transparente feito de sucrose e quartzo fundido, o solo transparente composto de iodeto de sódio pode ser combinado com uma mistura de óleo mineral imiscível no mesmo modelo, permitindo o estudo de problemas de fluxo acoplados em aplicações geoambientais. Um procedimento simples para reutilizar o poro fluido em vários ensaios também foi descrito, o que reduz os custos de preparação da amostra e facilita ainda mais a utilização do material em aplicações geotécnicas;
- O uso de um *scanner* para a captura de imagens digitais para ensaios quasi-estáticos demonstrou ser viável e com vantagens em relação a câmeras fotográficas digitais devido ao custo reduzido, alta resolução de imagens e a não necessidade de realizar calibração para aquisição de imagens;
- Perfis de deslocamento, deformação cisalhante e deformação volumétrica foram visualizados no ensaio quasi-estático de interferência entre sapatas e os mecanismos visualizados estão de acordo com a literatura;
- Perfis de deslocamento foram visualizados no ensaio de arrancamento de dutos com reforço de geogrelha;

- Em relação ao ensaio de penetração de projéteis em solo transparente: Os perfis de deslocamento incremental dos projéteis reto e cônico revelaram que os padrões de deslocamento foram comparáveis entre si,
- O uso do quartzo fundido de elevada pureza não proporciona a formação de um *speckle* discernível no uso com a técnica de interferometria com o uso de iluminação *laser*,
- A técnica da camada opaca para preparação de amostras de solos transparentes demonstrou ser vantajosa em situações onde a iluminação *laser* não é viável como em casos de estudo de penetração rápida e poderá ter um uso com sucesso em centrífugas geotécnicas;

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As ideias apresentadas nesta tese representam uma contribuição para a utilização dos solos transparentes na modelagem do comportamento de solos naturais em problemas geotécnicos. Os itens seguintes representam áreas de pesquisa em potencial para o avanço da tecnologia de modelagem:

- **Busca de novos materiais transparentes:** Outras fontes de solos transparentes devem ser investigadas em conjunto com suas propriedades geotécnicas, como por exemplo fluoreto de sais, tais como criolita. Qualquer destes materiais pode vir a ser substitutos úteis para aplicações específicas. Como exemplo recente, Wallace e Rutherford (2015) apresentaram o uso da Laponita para representar sedimentos fracos;
- **Busca de novos poro fluidos:** Esta tese apresentou um novo poro fluido a base de água com a adição de um sal – o iodeto de sódio tratado com thiosulfeto de sódio para remoção da cor amarelo escura devido a oxidação. Porém este estudo limitou-se testes com iodeto de sódio em escala comercial, o que torna a amostra com custo elevado em relação a amostras similares preparadas com mistura de óleos minerais. Torna-se necessário, testes com o

iodeto de sódio em escala industrial o que diminuiria o custo da amostra ou a produção do iodeto de sódio em laboratório;

- **Desenvolvimento de uma GUI (Graphic User interface) e de novos códigos auxiliares de processamento de imagens** – Seria interessante reunir os códigos apresentados neste trabalho em uma interface mais amigável ao usuário em linguagem *Matlab* ou outra linguagem com código fechado;
- **Uso da técnica de correlação digital de imagens com imagens coloridas:** Kashuk e Iskander (2014) estudaram fluxo de contaminantes e observaram que algumas famílias de cores em imagens digitais são menos sensíveis a ruídos, em comparação a imagens de tons de cinza. Assim, uma análise com imagens coloridas foi utilizada para segmentar a zona NAPL e transformar a informação de pixel em valores da concentração do contaminante, utilizando um modelo de calibração previamente publicada por Kashuk et al. (2014) . Os resultados mostram que a metodologia proposta fornece uma reconstrução eficiente para a zona NAPL em comparação com métodos convencionais de análise de imagem em tons de cinza. Embora análises com imagens coloridas não têm sido empregadas para correlação digital de imagens, os resultados até então disponíveis sugerem que é um caminho interessante para futuras pesquisas;
- **Cinemática das partículas em micro-escala** : A maioria das aplicações com solos transparentes consiste em visualizar campos de deformação em meso escala. Um uso em potencial para a pesquisa com solos transparentes envolve o uso de solos transparentes para visualizar a cinemática das partículas em micro-escala e a interação solo-estrutura na escala das partículas. Isto pode ser obtido incorporando um corante fluorescente no poro fluido. Quando iluminado por um laser plano que gere uma folha de luz, o poro fluido com o corante incorporado é iluminado. Isto deixa as partículas granulares com uma maior intensidade gerando um contraste em relação ao poro fluido. Imagens capturadas de qualquer plano na amostra de solo irá consistir do poro fluido com uma maior intensidade, e as partículas de solo com uma menor intensidade, o que permite a identificação das partículas, utilizando técnicas de imagem convencionais. Este método tem sido utilizado na física, e a maioria

das aplicações têm sido limitadas apenas com o uso de suspensões, ou grandes partículas de forma regular. Assim, existe um potencial significativo para o desenvolvimento de ferramentas para identificar e rastrear a cinemática de forma irregular usando grãos de solos fluorescentes transparentes tingidos no estudo de interações solo - estrutura em aplicações geotécnicas .

- **Desenvolvimentos de técnicas com Stereo PIV:** Um sistema com multi-câmeras é necessário para capturar deformações fora do plano de estudo e construir imagens em 3D das deformações; Porém, estudos precisam ser conduzidos para o aperfeiçoamento da técnica;
- **Uso em uma centrífuga:** Muitos processos geotécnicos são melhores estudados em uma centrífuga a fim de reproduzir a influência da tensão em pequenos ensaios com modelo. Song et al. (2009) foi o pioneiro na utilização dos solos transparentes em centrífuga, para observar mecanismos de arrancamento de âncora em areia, com condições de tensão in situ elevadas. O uso de solos transparentes em centrífuga possui uma série de desafios, como o uso de uma fonte de luz laser, a aquisição de imagens e a durabilidade dos componentes óticos associados. Pesquisas devem ser desenvolvidas para solucionar estes problemas com soluções criativas e originais.

## REFERÊNCIAS

ASTM D2487 (2011) "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D445 (2010) "Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)," *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM D5084-10 (2010) "Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bishop, A. and Henkel, D. (1962) *The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test*, Edward Arnold Publishers, London. Black, D. and Lee, K., 1973, "Saturating Laboratory Samples by Back Pressure," *J. Soil Mech. Found. Div.*, Vol. 99(1), pp. 75–94.

Allersma, H.: Using imaging technologies in experimental geotechnics. In: Proc. 2nd Int. Conf. on Imaging Technologies: Techniques and Applications in Civil Engr., ASCE, pp. 1–9 (1998)

Allersma, H., "Photo-elastic stress analysis and strains in simple shear," Proc. IUTAM Symposium on Deformation and Failure of Granular Materials, P.A. Vermeer and H. J. Luger, eds., A. A. Balkema, Rotterdam, 345-353, 1982.

Bransby, M. F., Newson, T. A., Brunning, P., and Davies, M. C. R., 2001 "Numerical and centrifuge modeling of the upheaval resistance of buried pipelines." *Proc., 20th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil.

Black, J. and Tatari, A. (2015). Transparent soil to model thermal processes: A thermal pile example. *ASTM Geotechnical Testing*.

Backofen, J. E., 1989, "Supersonic compressible penetration modeling for shaped charged jets, Proceedings of the 11th International Symposium on Ballistics," May 9-11, 1989, Brussels, Belgium, Vol. II, pp. 395-406.

Borvik, T., Dey, S., Olovsson, L., 2014, "Penetration of granular materials by small-arms bullets," *International Journal of Impact Engineering*, In Press, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.016.

Brunette, J., Mongrain, R., Laurier, J., Galaz, R. and Tardif, J. C. (2008). 3D flow study in a mildly stenotic coronary artery phantom using a whole volume PIV method. *Medical Engineering Physics*, 30: 1193-1200.

Bouguet, J-Y., 2008, "Camera Calibration Toolbox for MATLAB," Computer Vision Research Group, Dept. of Electrical Engineering, California Institute of Technology, [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html)

Brum, S.A 'Ensaio de Centrifugação para avaliação do desempenho de penetrômetros dinâmicos para ancoragens de estruturas offshore', Dissertação de Mestrado, UENF, 2009.

Cave, A., Roslyakov, S., Iskander, M., and Bless, S., 2014, "Design and performance of a laboratory pneumatic gun for soil ballistic applications," *Experimental Techniques*, in press, 10.1111/ext.12091. Clark, A. H., Peterson, A. J., Behringer, R., 2014,

Cooper, W., L., and Breaux, B. A., 2010, "Grain fracture in rapid particulate media deformation and a particulate media research roadmap from the PMEE workshops," *International Journal of Fracture*, 162, pp. 137-150.

Casagrande, A.: Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. *Journal of Boston Soc. of Civil Engineers* (1936) (Reprinted in contributions to Soil Mechanics 1925-1940, Boston Soc. of Civil Engineers)

Chen, Z. C., Omidvar, M., Iskander, M., and Bless, S. (2014). Modelling of projectile penetration using transparent soils. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 14(3), 68-79.

Cheuk, Y. C., White, D. J., and Bolton, M. D. (2008). "Uplift mechanisms of pipe buried in sand." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 134(2), 154–163.

Chini, C., Wallace, J., Rutherford, C. and Peschel, C. J. (2015). Shearing failure visualization using digital image correlation and particle image velocimetry in soft clay using a transparent soil. *ASTM Geotechnical Testing Journal*.

Das, B. M., and Larbi-Cherif, S. (1983). "Bearing capacity of two closely spaced shallow foundations on sand." *Soils Found.*, 23(1), 1–7.

Downie, H., Holden, N., Otten, W., Spiers, A. J., Valentine, T. A. and Dupuy, L. X. (2012). Transparent soil for imaging the Rhizosphere. *PLOS One*, 7(9): e44276.

Dijksman, J. A., Wandersman, E., Slotterback, S., Berardi, C. R., Updegraff, W. D., van Hecke, M. and Losert, W. (2010). From frictional to viscous behavior: Threedimensional imaging and rheology of gravitational suspensions. *Physical Review E*, 82, 060301(R).

de Berg, M., Cheong, O., van Kreveld, M., and Overmars, M. (2008). *Computational geometry: Algorithms and applications*, 3rd Ed., Springer, New York.

Ezzein, F. M. and Bathurst, R. J. (2011) "A Transparent Sand for Geotechnical Laboratory Modeling," *Geotech. Test. J.*, Vol. 34(6), pp. 1–12.

Fernandez Serrano, R., Iskander, M. and Tabe, K. (2011). 3D Contaminant flow imaging in transparent granular porous media. *Geotechnique Letters*, 1(3): 71-78.

F. Tavenas, P. La Rochelle, Accuracy of relative density measurements, *Geotechnique* 22 (1972) 549-562.

Graham J, Raymond GP, Suppiah A. Bearing capacity of three closely spaced footings on sand. *Geotechnique* 1984;34(2):173–82

Gill, D., Lehane, B.: An optical technique for investigating soil displacement patterns. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ 24(3), 324–329 (2001)

Guzman, I., and Iskander, M. (2013) “Geotechnical properties of sucrose-saturated fused quartz for use in physical modeling,” *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 36 (3), pp. 448-454.

Guzman, I., Iskander, M., Suescun-Florez, E., and Omidvar, M. (2014). “A transparent aqueous saturated sand surrogate for use in physical modeling,” *Acta Geotechnica*, 9 (2), pp. 187-206.

G. Cho, J. Dodds, J.C. Santamarina, Particle shape effects on packing density, stiffness and strength: natural and crushed sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 132 (2006) 591-602.

Head, K. H. (1986). *Manual of Soil Laboratory Testing*, John Wiley and Sons, New York.

Hunt, R. (1984). *Geotechnical engineering Investigation Manual*. Mc-Graw-Hill, New York.

Holtz, R., W, Kovacs and T. Sheahan (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Second Edition, Prentice Hall.

H. Allersma, Using image processing in centrifuge research. *Proceedings Centrifuge*, Balkema, Rotterdam, 1991, pp. 551-559.

Hearst, J. R., and Lynch, C. S., 1994, “Measurement of in situ strength using projectile penetration,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science Geomechanics Abstracts*, 31(3), pp. 243-51.

Hassan, Y. A. and Dominguez-Ontiveros, E. E. (2008). Flow visualization in a pebble bed reactor experiment using PIV and refractive index matching techniques, *Nuclear Engineering and Design*, 238: 3080–3085.

Iskander, M., Sadek S. and Liu, J. (2003). Optical measurement of deformation using transparent silica gel to model sand. *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, 2(4): 13-26.

Iskander, M., 2010, *Modeling with transparent soil*, Springer, New York.

Iskander, M. (2010). *Modelling with Transparent Soils. Visualizing Soil structure Interaction and Muptiphase Flow, non-intrusively*. Springer. Chicago, p.331.

Jacquot, P. and Fournier, J. 2000, “Interferometry in Speckle Light: Theory and Applications, *Proceedings of the international conference*, September 25-28, Lausanne, Switzerland, Springer-Verlag, Berlin”.

J. Kolbuszewski, An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands, *Procedures of Second International Conference of Soil Mechanics* 1 (1948) 158-165.

- Kashuk, S., Mercurio, R. and Iskander, M. (2014). Visualization of dyed NAPL concentration in transparent porous media using color space components. *Journal of Contaminant Hydrology*, 162–163: 1–16.
- Kumar, J. and Bhoi, M. (2009). "Interference of Two Closely Spaced Strip Footings on Sand Using Model Tests." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(4), 595–604.
- K. Konagai, P. Rangelow, T. Sato, Real-time observation of dynamic changes in the fabric of granular material structures through laser-aided tomography. 10th European Conf. on Earthquake Engr., 1994, pp. 459-466.
- Krishnan, G. P., Beimfohr, S. and Leighton, D. T. (1996). Shear-induced radial segregation in bidisperse
- K. Miura, K. Maeda, M. Furukawa, S. Toki, Physical characteristics of sands with different primary properties, *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society 37 (1997) 53-64.
- Lyday, P. A. (2000). *Iodine and Iodine Compounds*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
- Ladd, C., Lambe, T.: The strength of undisturbed clay determined from undrained tests. *Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM STP No. 361, pp. 342–371 (1963)
- Liu, J., and Iskander, M., 2004, "Adaptive cross correlation for imaging displacements in soils," *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18 (1), pp. 46-57.
- Liberzon, A., Gurka, R. and Shavit, U. (2000), URAPIV, Particle Image Velocimetry Research Group, [Http:// urapiv.tripod.com/](http://urapiv.tripod.com/).
- Lehane, B. and Gil, D. (2004). Displacement fields induced by penetrometer installation in an artificial soil. *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, 4, No. 1, 25-36.
- Lee, K., Seed, H.: Drained strength characteristics of sands. *Journal of The Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE 93(SM6), 117–141 (1967)
- Liu, J. and Iskander, M. G. (2010). Modelling capacity of transparent soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(4): 451-60.
- Lobkovsky, A. E., Orpe, A. V., Molloy, R., Kudrolli, A. and Rothman, D. H. (2008). Erosion of a granular bed driven by laminar fluid flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 605: 47-58.
- Lai, M., Krempl, E., and Ruben, D. (2010). *Introduction to continuum mechanics*, 4th Ed., McGraw-Hill, New York.
- M.D. Bolton, The strength and dilatancy of sand, *Geotechnique* 36 (1986) 65- 78.
- Malitson, I. H. (1965). Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica. *Journal of the Optical Society of America*, 55(10): 1205-1209.

Mannheimer, R. (1990). Slurries you can see through. *Technology Today*, March Issue, p. 2., Southwest Research Institute, San Antonio, Texas

Mannheimer, R. J. and Oswald, C. J. (1993). Development of transparent porous media with permeabilities of soils and reservoir materials. *Ground Water*, 31( 5): 781-788.

Miller, P., Danielson, K., Moody, G., Slifka, A., Drexler, E. and Hertzberg, J. (2006). Matching index of refraction using a diethyl phthalate/ethanol solution for in vitro cardiovascular models. *Experiments in Fluids*, 41(3): 375-381.

Narrow T. L., Yoda, M., and Abdel-Khalik S. I. (2000) "A simple model for the refractive index of sodium iodide aqueous solutions". *Experiments in Fluids* 28, 28(3) 282-283.

Peck, R. B. (1974) *Foundation Engineering*, John Wiley and Sons, New York.

Ni, Q., Hird, C. and Guymer, I. (2010). Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry. *Geotechnique*, 60(2): 121- 32.

Ng, C. W. W., and Springman, S. M. (1994). "Uplift resistance of buried pipelines in granular materials." Proc., Centrifuge, 94, F. H. Lee, C. F. Leung and T. S. Tan, eds., Taylor & Francis, Singapore, 753–758.

Omidvar, M., Chen, Z. and Iskander, M. (2014). Image based Lagrangian analysis of granular kinematics. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000433.

Oñate, E. (2009). "Structural analysis with the finite element method: linear statics." Basis and solids, Vol. 1, Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences, Springer, New York.

O'Loughlin, C. D., Randolph, M. F., Richardson, M., (2004). "Experimental and theoretical studies of deep penetrating anchors," *Offshore Technology Conference*, Houston, May, 2004, Paper No. OTC 16841.

Pan, B., Qian, K., Xie, H. and Asundi, A. (2009). Two dimensional digital image correlation for in plane displacement and strain measurement: a review. *Measurements in Science and Technology*, 20: 062001.

Peters, S. B., Siemens, G. A. and Take, W. A. (2011). Characterization of transparent soil for unsaturated applications. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 34(5): 1-11.

Rad, N. S. and Tumay, M. T., "Factors Affecting Sand Specimen Preparation by Raining," *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 10, No. 1, 1987, pp. 31-37

Ravasio, A., Vaishnavi, S., Ladoux, B. and Viasnoff, V. (2015). High resolution imaging of cellular processes across textured surfaces using an indexed matched elastomer. *Acta Biomaterialia*, In Press.

Roth, Hart, and Katz, (1995) "Feasibility of Using the L64720 Video Motion Estimation Processor (MEP) to increase Efficiency of Velocity Map Generation for Particle Image

Velocimetry (PIV).” ASME/JSME Fluids Engineering and Laser Anemometry Conference, Hilton Head, South Carolina, pp. 387-393.

Rashidi, M., Dehmeshki, J., Daemi, F., Cole, L. and Dickenson, E. (1997). Color image analysis of contaminants and bacteria transport in porous media. In *Proc. SPIE 3159, SPIE Annual Meeting*, San Diego, CA, 27 July–1 August 1997, pp. 276–286.

Randolph, M. F., and Houlsby, G. T. 1984. “The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil.” *Geotechnique*, 34, 613–623.

Ravasio, A., Vaishnavi, S., Ladoux, B. and Viasnoff, V. (2015). High resolution imaging of cellular processes across textured surfaces using an indexed matched elastomer. *Acta Biomaterialia*, In Press.

Sadek, S., Iskander, M. and Liu J. (2003). Accuracy of digital image correlation for measuring deformations in transparent media. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, 17(2): 88-96.

Sadek, S., Iskander, M. G. and Liu, J. (2002). Geotechnical properties of transparent silica. *Canadian Geotechnical Journal*, 39: 111-124

Stuart, J. G. (1962). “Interference between foundations with special reference to surface footings in sand.” *Geotechnique*, 12(1), 15–23.

Sture, S., Costes, N. C., Batiste, S. N., Lankton, M. R., Alshibli, K. A., Jeremic, B., Swanson, R. A., and Frank, M., 1998, “Mechanics of Granular Materials at Very Low Effective Stresses,” *J. Aerosp. Eng.*, Vol. 11(3), pp. 67–72.

Sanvitale, N. and Bowman, E. T. (2012). Internal imaging of saturated granular freesurface flows. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 12(4): 129-142.

Salgado, R (2012). “The mechanics of cone penetration: Contribution from experimental and theoretical studies.” *Geotechnical and geophysical site characterization 4*, R. Q. Coutinho and P. W. Mayne, eds., Vol. 1, Taylor and Francis, London, 131–153.

Santiago, P., Saboya, F.: “Uplift Capacity of Reinforced Buried Pipelines on Sand”, 2011 Pan-am CGS Geotechnical Conference, Canada.

Stanier, S. A., Black, J. and Hird, C. C. (2012). Enhancing accuracy and precision of transparent synthetic soil modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 12(4):162–175.

Stanier, S. A., Black, J. and Hird, C. C. (2013). Modelling helical screw piles in soft clay and design implications. *ICE Geotechnical Engineering*, 167(5): 447–460.

Siemens, G., Mumford, K. and Kucharczuk, D. (2015). Characterization of variably transparent soil for use in heat transport experiments. *ASTM Geotechnical Testing Journal*

Siemens, G., Peters, S. and Take, W. A., 2010, "Analysis of a Drawdown Test Displaying the Use of Transparent Soil in Unsaturated Flow Applications." *Unsaturated soils. Fifth International Conference of Unsaturated Soils*, E. Alonso and A.Gens, Eds., CRC Press, Boca Raton.

Shukla, A., Sadd, W. Qiu and Boardman, W.G., "Modeling wave propagation in Granular media using elastic networks," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 29, No. 2, 161-170, 1992.

Song, Z., Hu, Y., O'Loughlin, C. and Randolph, M. F. (2009). Loss in anchor embedment during plate anchor keying in clay. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(10): 1475-85.

Toiya, M., Hettinga, J. and Losert, W. (2007). 3D Imaging of particle motion during penetrometer testing. *Granular Matter*, 9(5): 323-329.

Thielicke, W. and Stamhuis, E.J. (2014): PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software* 2(1):e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>.

Tipler, P. A, 1999, *Physics for engineers and Scientist: Electricity, Magnetism and Light*, 4<sup>o</sup> Edition, W,H Freeman and Company, NY, pp. 1041-1042.

Uzol, O., Chow, Y-C., Katz, J. and Meneveau, C. (2002). Unobstructed particle image velocimetry measurements within an axial turbo-pump using liquid and blades with matched refractive indices. *Experiments in Fluids*, 33(6): 909-919.

Wallace, J. and Rutherford, C. (2015). Geotechnical properties of Laponite RD. *ASTM Geotechnical Testing Journal*

Weast, R. (1985) *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Boca Raton, FL.

Williamson, K., and Masters, K. (2010). *Macroscale and microscale organic experiments*. Cengage Learning, Belmont, CA.

Westerweel J., Dabiri D., Gharib M. (1997): The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of PIV recordings, *Exp. Fluids*, 23, pp. 20–28.

West, J. M., and Stuart, J. G. (1965). "Oblique loading resulting from interference between surface footings on sand." *Proc., 6th Int. Conf. on Soil Mechanics*, Vol. 2, Montreal, 214–217.

Welker, A., Bowders, J., Gilbert, R.: Applied research using transparent material with hydraulic properties similar to soil. *ASTM Geotechnical Testing J.* 22(3), 266–270 (1999)

White, D. J., Take, W. A., and Bolton, M. D. 2003. "Soil deformation measurement using particle image velocimetry PIV and photogrammetry." *Geotechnique*, 537, 619–631.

suspensions. *Journal of Fluid Mechanics*, 321: 371-393.

Yeung, P. K. (2002). "Lagrangian investigations of turbulence." *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 34(1), 115–142.

Zhao, H., Ge., L. and Luna, R. (2010). Low viscosity pore fluid to manufacture transparent soil. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 33(6): 1-6

## 6 - APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DO SISTEMA E PREPARAÇÃO PARA ENSAIOS

### 6.1 INTRODUÇÃO

A calibração de todo sistema que utiliza imagens para medição de grandezas físicas é importante para se obter um resultado final desejado, principalmente quando a câmera não está posiciada perpendicularmente a região de interesse (**ROI**) desejada ou para se detectar erros de alinhamento entre a câmera e o objeto que se deseja medir. Um procedimento de calibração é dividido em três partes. A primeira parte é realizada para se obter os parâmetros *extrínsecos* e *intrínsecos* da câmera para corrigir a distorção natural da lente da câmera e erros de alinhamento. A segunda parte diz respeito a conversão da unidade de imagens - *pixels* para uma unidade de grandeza física – no nosso caso o milímetro (mm) com a aquisição de imagens de prova, geralmente com uma régua milimetrada – Os *fiducial* - e, finalmente, a terceira parte objetiva obter a melhor configuração dos parâmetros de correlação **DIC** para uma melhor medição de deslocamentos.

- Calibração da Câmera

Calibração é o processo de se estimar um conjunto de parâmetros que descreve o processo de obtenção das imagens pela câmera. Com este conjunto de parâmetros, uma matriz de projeção em perspectiva pode ligar diretamente um ponto na estrutura 3-D de referência global para a sua projeção não distorcida no plano da imagem. Em outras palavras, é o processo de estimativa dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera. Os parâmetros intrínsecos lidam com as características internas da câmera, tais como, a sua distância focal, inclinação, distorção, e um centro de imagem. Parâmetros extrínsecos descrevem sua posição e orientação no mundo. Obter os parâmetros intrínsecos é um passo essencial, uma vez que permite estimar a estrutura da cena no espaço euclidiano e remove distorção da lente, o que degrada a precisão. As etapas de uma calibração completa para um ensaio é mostrado, esquematicamente, no fluxograma da figura 8.1

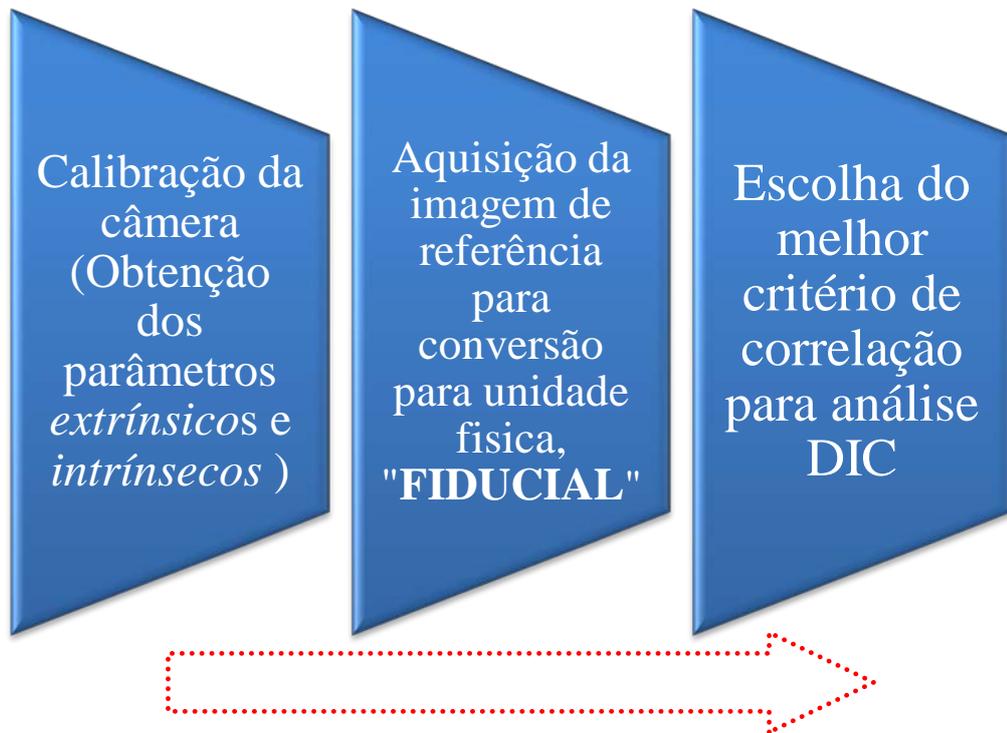


Figura 6.1 – Procedimento para calibração de testes de medição ótica.

A fim de obter os parâmetros relacionados com a câmera do sistema de coordenadas global, é utilizada uma série de imagens emparelhadas. A relação entre as coordenadas da imagem ( $u, v$ ), e as coordenadas globais ( $X, Y$ ) são mostrados esquematicamente na Figura 8.2.

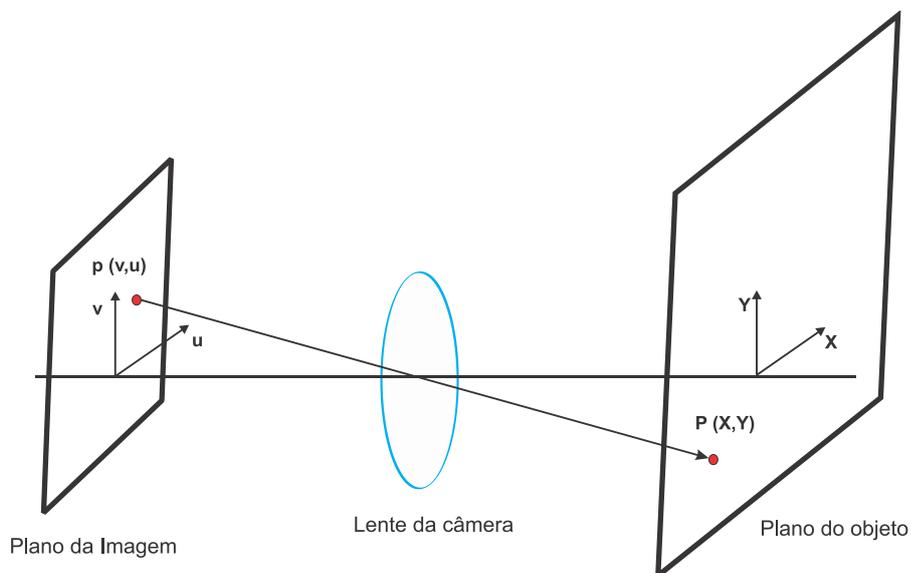


Figura 6.2 – O conceito de calibração da câmera.

O modo mais simples para calibrar uma câmera é através do *método pinhole*, que é baseado no princípio da colinearidade. Uma relação linear entre um ponto no objeto e um ponto em sua imagem é assumido. Devido o fato que a lente da câmera distorce as imagens e também porque o objeto esta comumente atrás de uma janela com iluminação natural, uma simples relação entre as coordenadas do objeto e as coordenadas da imagem normalmente não existem. (Heikkila and Silven,1997).

Muitas técnicas de calibração foram desenvolvidas nos últimos anos. Neste trabalho optou-se por utilizar o algoritmo escrito em Matlab® chamado de *calibration toolbox*® desenvolvido por Bouguet, 2006 devido a simplicidade e disponibilidade gratuita na internet. O resultado da calibração deste algoritmo inclui: distância focal, coordenadas dos pontos principais, coeficientes de distorção, matriz de rotação e o vetor de translação da câmera.

O algoritmo Matlab *calibration toolbox*® possui uma sequência de etapas que inclui: leitura das imagens de calibração, extração dos *corners*, calibração e análise do erros na reprojeção como mostrado no fluxograma da Figura 8.3.

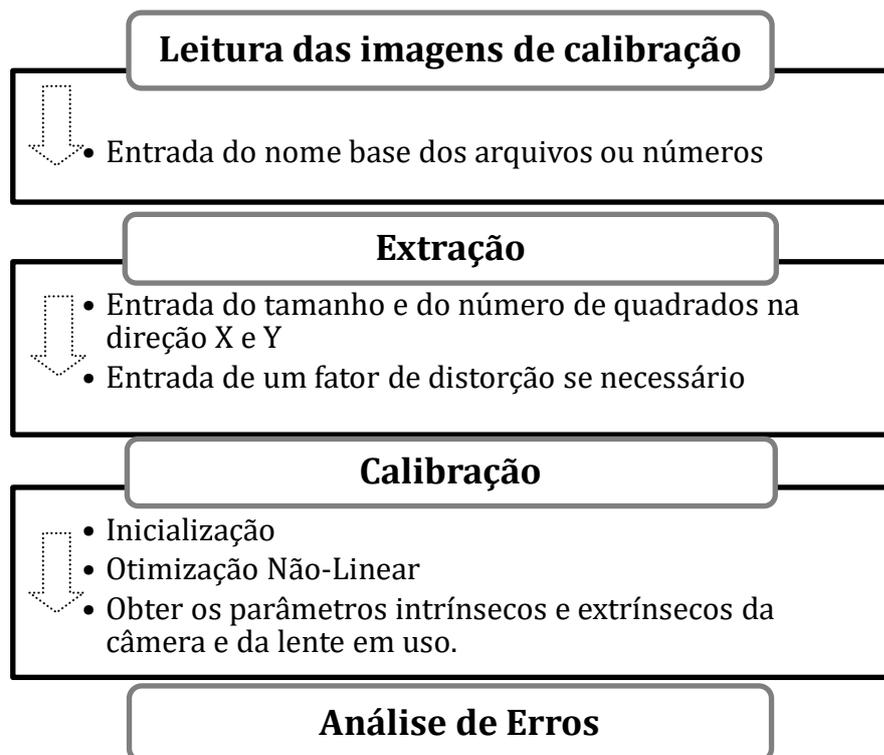


Figura 6.3 – Lógica do algoritmo de calibração da câmera.

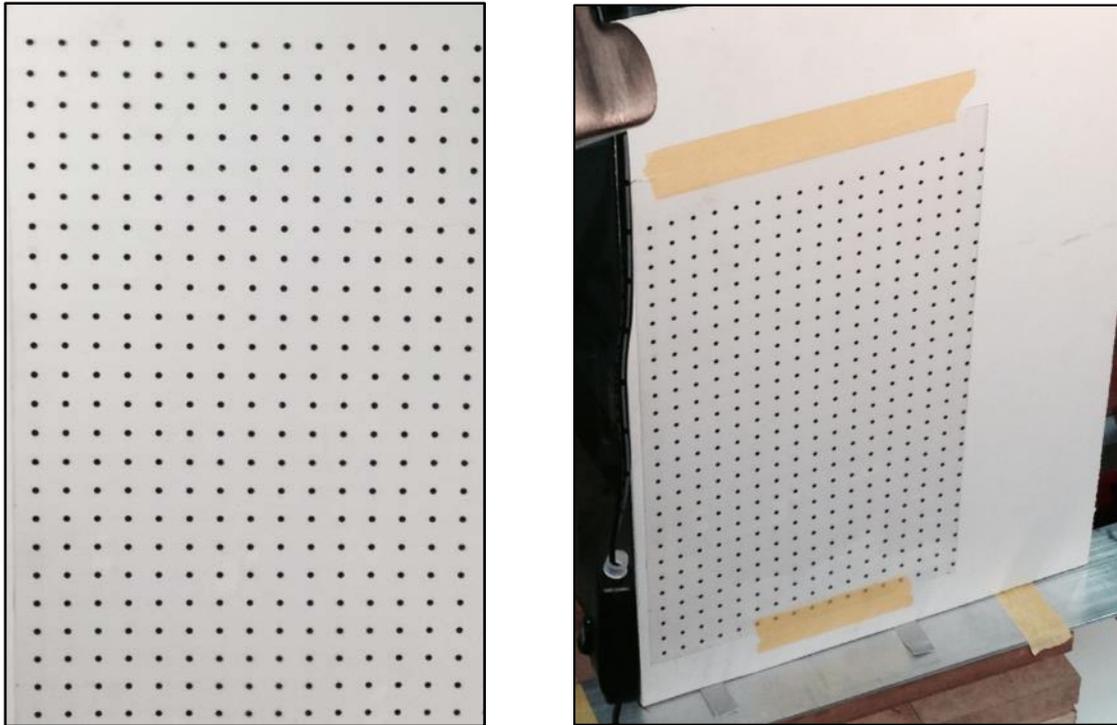


Figura 6.4 – Exemplo de grid de calibração (Cortesia: Polytechnic Institute of NYU – EUA).

Para a calibração do sistema, um *grid* é impresso e colado em um painel de madeira liso e fino. A figura 8.4 mostra um exemplo de *grid* utilizado na calibração dos ensaios na escola politécnica da Universidade de Nova York. O painel é direcionado na região de interesse (**ROI**) e uma sequência de imagens é capturada pela câmera. Durante a sequência de captura das imagens, uma mudança na posição do *grid* é necessária. Para ilustrar o processo de calibração, será utilizado um *grid* confeccionado para a calibração dos ensaios no LECIV/UENF, como mostra na figura 8.5. Nesta calibração, cerca de vinte diferentes imagens são capturadas, como mostrado na Figura 8.6, para o cálculo dos parâmetros da câmera. O espaçamento do *grid* utilizado neste estudo é de 20 mm.

A primeira etapa do algoritmo é a extração dos corners (extremidades) de cada uma das vinte imagens capturadas para o processo de calibração. O algoritmo solicita a distância entre quadrados e o número de quadrados nas direções X e Y. O número de quadrados uma vez escolhido deverá ser mantido para todas as imagens da calibração.

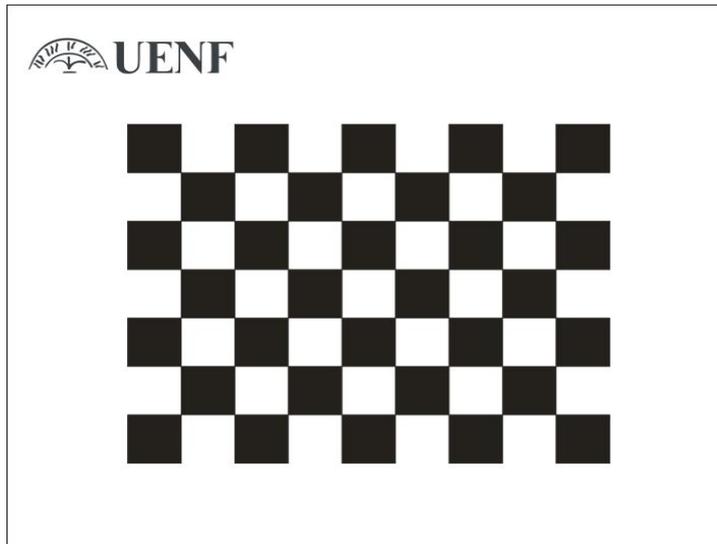


Figura 6.5 – *Grid* de calibração construído para esta tese.

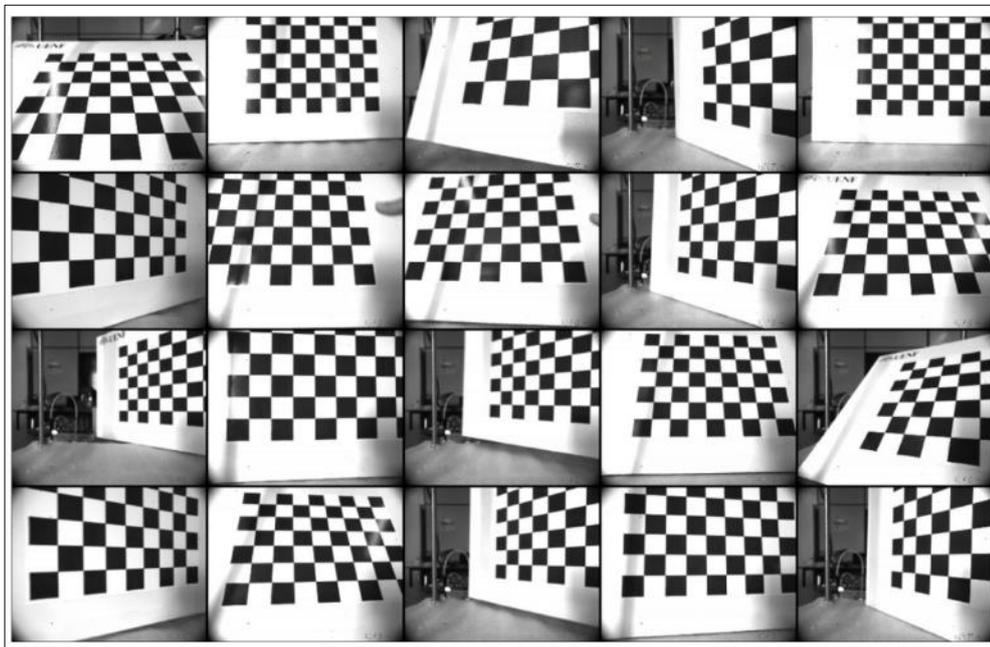


Figura 6.6 – Vinte imagens extraídas para a calibração.

Quando estiver extraindo as extremidades (cantos) do grid, é importante determinar a ordem da sequência de pontos, definindo a extremidade 1, e depois 2, 3 e 4 conforme mostrado na Figura 8.7. O primeiro ponto é definido como o ponto de origem da moldura resultante final do processo.

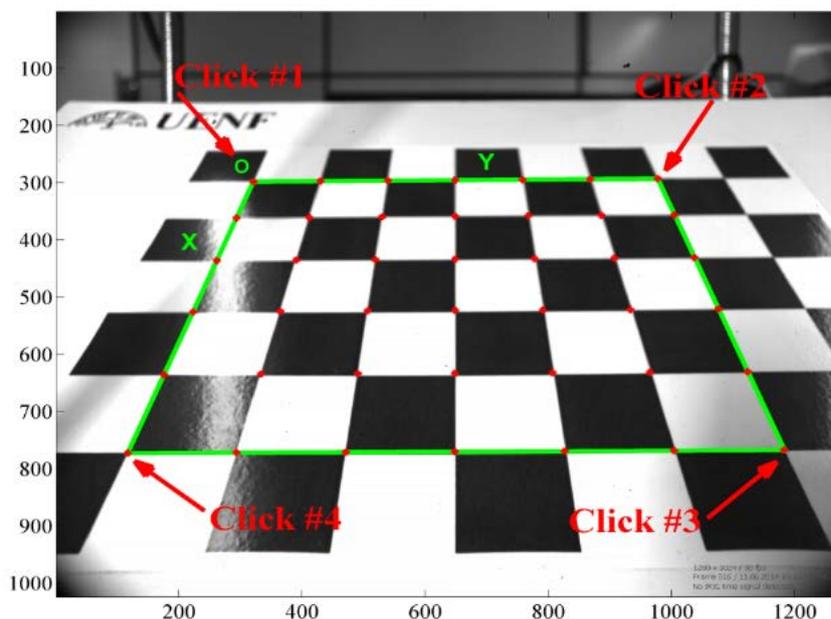


Figura 6.7 – Extraindo as extremidades (cantos) da figura 1.

O algoritmo inclui um mecanismo automático de contagem do número de quadrados dentro da moldura formada pelos quatro pontos definidos. Esta ferramenta é especialmente conveniente quando se possui uma grande quantidade de imagens e o usuário, portanto, não necessita digitar manualmente o número de quadrados existentes nos eixos x e y. As extremidades (cantos) são extraídas com uma precisão de 0,1 *pixel*.

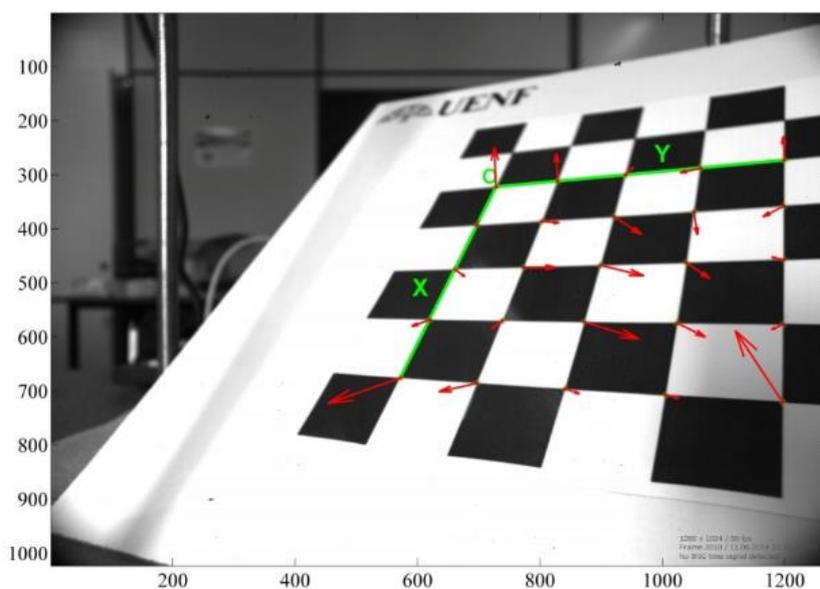


Figura 6.8 – Reprojção do erros na imagem 15 desta calibração.

As coordenadas globais conhecidas ( $X, Y$ ) e a coordenada das imagens ( $u, v$ ) são usadas para calcular os parâmetros da câmera e da lente. A relação entre o sistema de coordenada de imagens ( $u, v$ ) e o sistema de coordenada global ( $X, Y$ ) é descrito abaixo:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & c_1 \\ 0 & f_2 & c_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.20})$$

Onde:

$u$  e  $v$  são o Sistema de coordenadas da imagem;

$f_1$  e  $f_2$  são as distâncias focais em pixels ao longo dos eixos X e Y;

$c_1$  e  $c_2$  são coordenadas do ponto principal;

$\mathbf{R} = r_{11}, \dots, r_{32}$  é a matrix de rotação;

$\mathbf{T} = t_1, t_2, t_3$  são vetores de translação; e

X e Y são as coordenadas globais do sistema.

A Equação 20 foi usada para corrigir a distorção das imagens utilizando os parâmetros *intrínsecos* da câmera obtidos na etapa de calibração como mostrado na Tabela 8.1.

Tabela 6.1- Exemplo típico de parâmetros *extrínsecos* e *intrínsecos* obtidos com a calibração da câmera.

Parâmetros	Resultados da Calibração
Focal length1 ( $f_1$ )	1058,119
Focal length 2( $f_2$ )	1062,757
Principal point coordinate 1( $c_1$ )	646.502
Principal point coordinate 2( $c_2$ )	486.279
Distortion coefficients 1( $k_1$ )	-0.10682
Distortion coefficients 2 ( $k_2$ )	0.16581
Rotation matrix( $\mathbf{R}_1$ )	$\begin{bmatrix} 0.45 & 0.56 \\ 0.23 & 0.34 \\ 0.34 & 0.34 \end{bmatrix}$
Translation vector( $\mathbf{T}_1$ )	[ 0,001; 0,001;0]

Os parâmetros extrínsecos (posições relativas dos *grids* em relação à câmera) podem ser apresentados na forma de um gráfico 3D. Nesta figura, o quadro ( $O_c, X_c, Y_c, Z_c$ ) é o quadro de referência da câmera. A pirâmide vermelha corresponde ao campo de visão efetivo da câmera definida pelo plano de imagem, como mostrado na figura 9.9. A figura 9.10 mostra a análise de erro obtida ao final da análise.

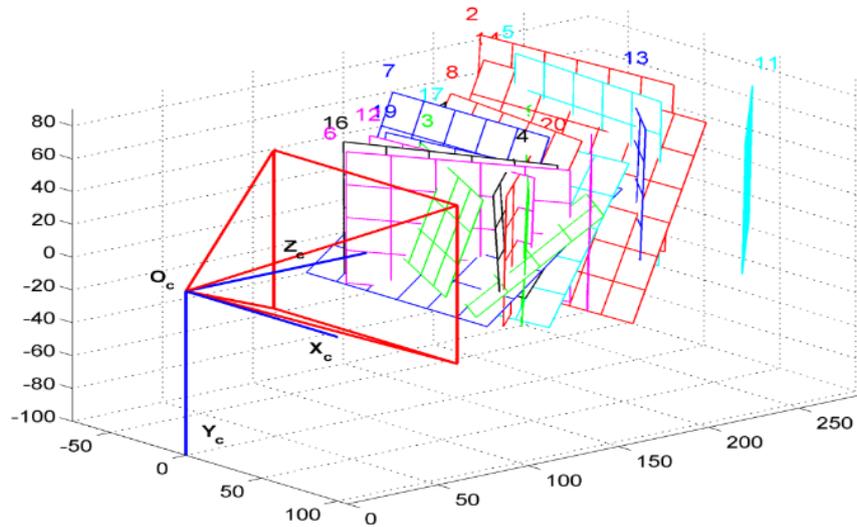


Figura 6.9 - Posições relativas dos *grids* em relação a câmera.

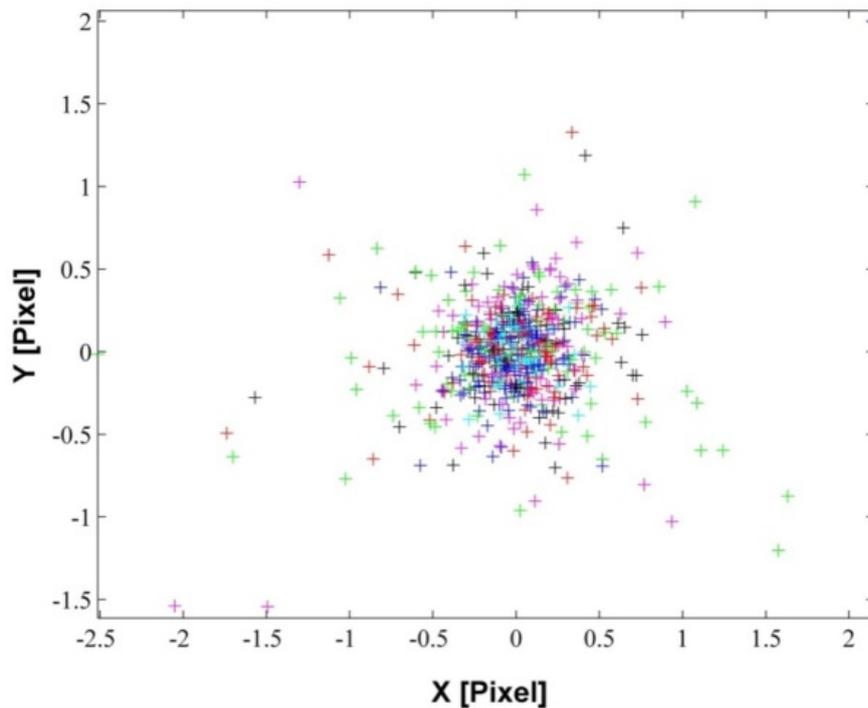


Figura 6.10 – Análise de erro obtida após a calibração.

- Aquisição de imagens “Fiducial”

Após a realização da calibração das imagens, o próximo passo é obtenção das imagens de conversão para unidades físicas. Uma régua milimetrada é colocada no plano de captura da câmera e ao menos três imagens são obtidas. O objetivo desta análise é obter o fator de conversão de *pixel* para milímetros. A figura 8.11 mostra uma imagem fiducial obtida pelo scanner do estudo da interferência de fundações rasas apresentado neste trabalho. Utiliza-se o programa *Microsoft Paint™* nesta análise. Habilitar o recurso da régua no programa e realizar a contagem do intervalo de *pixels* correspondentes a 10 mm. Para obter o fator de conversão, basta realizar uma regra de 3. A figura 8.12 mostra uma imagem capturada deste procedimento.



Figura 6.11 - Imagem "FIDUCIAL" do teste interferência entre fundações rasas.



Figura 6.12 - Obtenção do fator de conversão no programa Microsoft Paint™.

Para a leitura na régua milimetrada, foi selecionado o intervalo entre 19 e 20 cm (Figura 8.12), que correspondente respectivamente 365 e 288 *pixels*. Portanto o fator de conversão é de **1mm = 7,7 *pixels***.

No caso de testes com solos transparentes, a régua milimetrada deverá ser posicionada no plano a ser estudado no interior do solo. Faz-se isto com o container preenchido com o óleo mineral para levar em conta a distorção causada na imagem pela refração. A Figura 8.13 apresenta um exemplo, onde uma haste metálica é inserida no solo após ter sido realizado o ensaio para facilitar a visualização do plano e colocação da régua milimetrada.

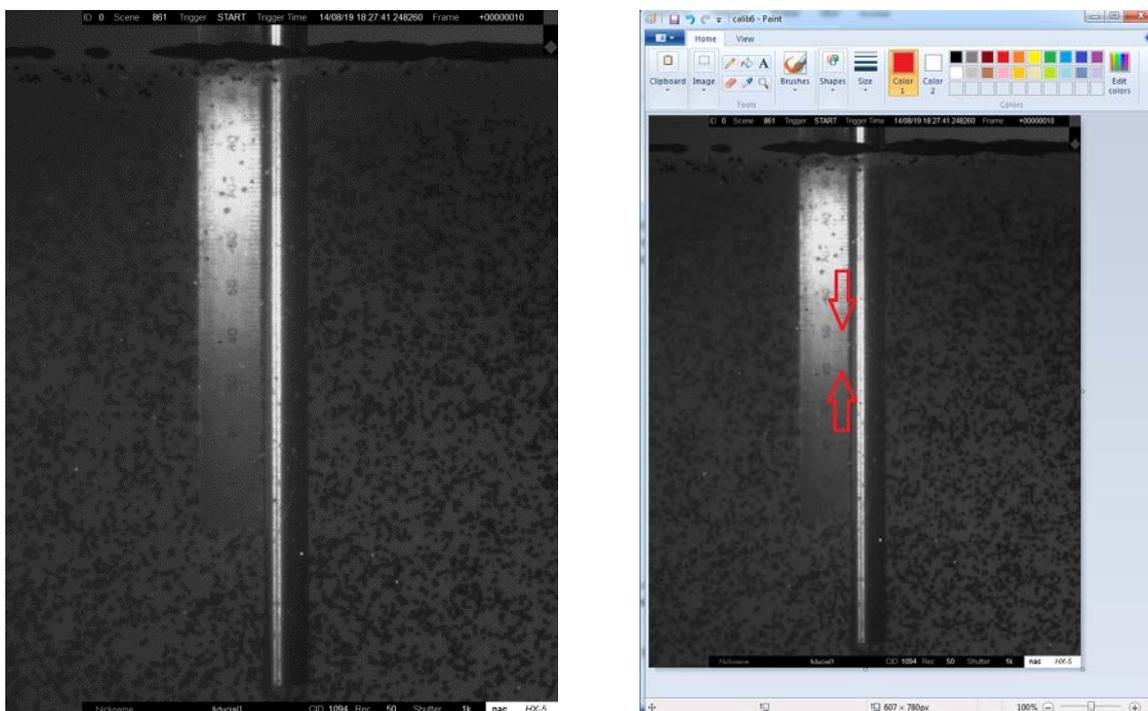


Figura 6.13 - Obtenção do fator de conversão no programa Microsoft Paint™.

Para a leitura na régua milimetrada, foi selecionado o intervalo entre 40 e 50 cm, que correspondente respectivamente 361 e 307 *pixels*. Portanto o fator de conversão é de **1mm = 5,4 *pixels***.

- Escolha do melhor critério de correlação para análise DIC

Após realizada a correção da distorção das imagens e aquisição da imagens fiducial a próxima etapa para a calibração do ensaio é investigar a melhor função de correlação que resultará na predição ótima dos deslocamentos entre imagens sequenciais além dos melhores parâmetros de configuração da análise DIC.

Uma imagem do ensaio, após processo de correção de distorção realizado pelo algoritmo *CalibrationToolbox for Matlab*® é utilizada; Uma parte da imagem é recortada (p. ex. 512 x 512 *pixels*). Com o uso do programa Adobe PhotoShop® deslocamentos verticais (*dy*) e deslocamentos horizontais (*dx*) são aplicados digitalmente em uma imagem de referência. Um deslocamento de 8 *pixels* foi utilizado na calibração que corresponde, aproximadamente, o deslocamento de um interframe (aproximadamente 1 mm). A imagem de referência recortada e as imagens com deslocamentos horizontais e verticais de 8 *pixels* são apresentados na Figura 8.14.

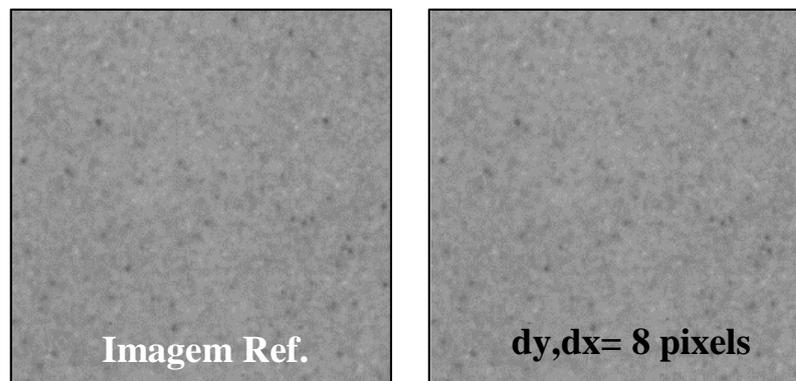


Figura 6.14 - Imagens recortadas utilizadas para a calibração do DIC. (a) Imagem original sem deslocamento ( $dx=dy=0$ ); (b)  $dx=dy=8$  pixels.

As imagens com os deslocamentos aplicados digitalmente foram analisadas com o programa PIVVIEW 2C/3C. Como apresentado na Revisão da Literatura, existem algumas funções matemáticas de correlação que podem ser utilizados para a correlação das imagens. As mais prevalentes são :

- *Discrete Cross Correlation (DCC)*;
- *Zero-mean normalized cross correlation (ZNCC)*;
- *Zero-mean normalized sum of squared difference (ZNSSD)*;
- *Symmetric Phase-only cross correlation (SPOCC)*

A figura 8.15 mostra os vetores de deslocamento obtidos com a análise utilizando o critério **ZNSSD**. Os resultados obtidos com estes parâmetros são apresentados na Tabela 8.2 para a medição de deslocamento na diagonal para todos os critérios de correlação testados.

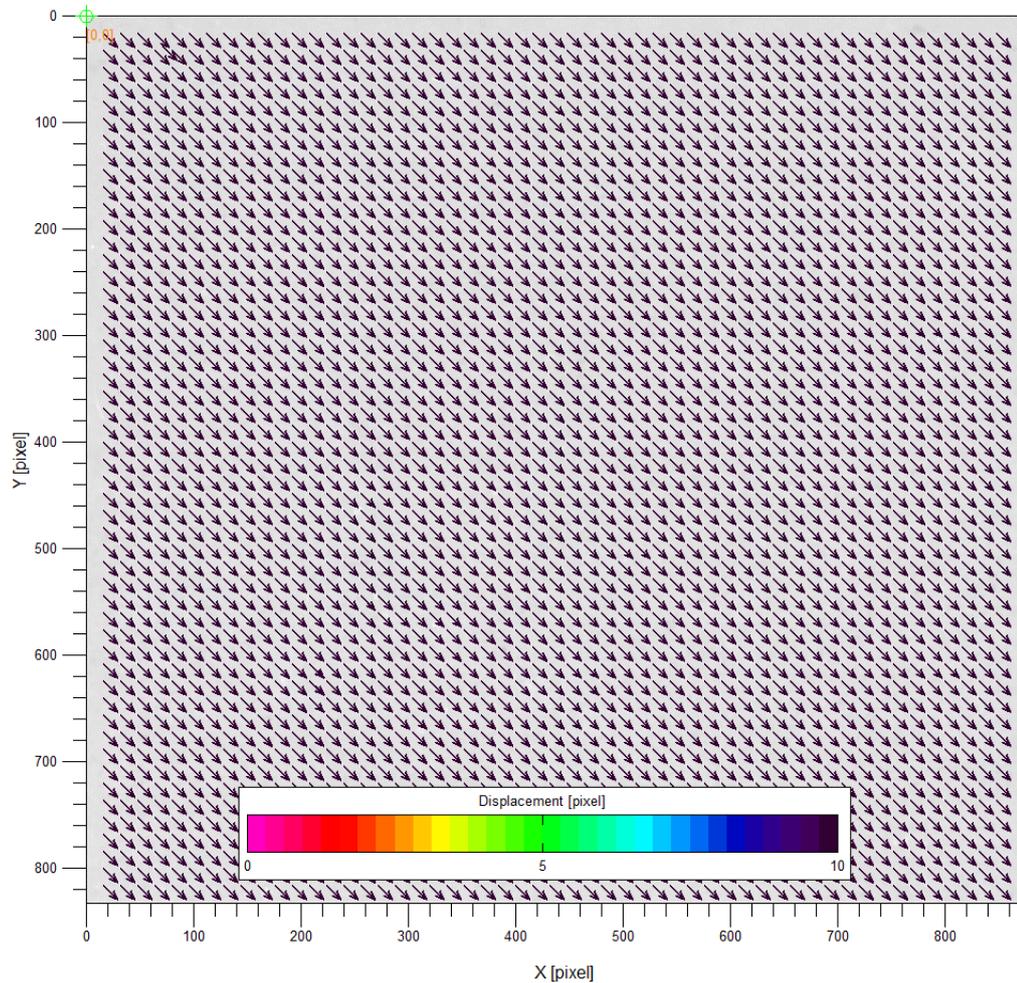


Figura 6.15 – Vetores de deslocamento obtidos com a análise com o deslocamento de 8 pixels na direção vertical e horizontal (imagem ampliada).

Tabela 6.2 – Resumo dos resultados para busca do melhor critério de correlação.

Critério de Correlação	dx,dy aplicado (pixel)	Magnitude $\sqrt{(dx^2 + dy^2)}$	Resultados obtidos				Vetores substituídos (%)
			Magnitude média medida (pixel)	Tolerância	Erro (pixel) (%)		
<b>ZNCC</b>			11,31465	± 1,68315	0,00095	0,01	1,65
<b>ZNSSD</b>	8	<b>11,3137</b>	11,33496	± 0,64004	0,02126	0,19	-
<b>SPOCC</b>			11,28502	± 2,89165	0,02867	0,25	2,25
<b>DCC</b>			11,32541	± 0,37209	0,01171	0,10	-

O erro relatado na tabela 8.2, para cada critério de correlação, representa a diferença entre a média e o deslocamento calculado do deslocamento digital aplicado. O erro, considerando todos os deslocamentos é 0,00095 *pixels* para o critério **ZNCC**, 0,021260 *pixels* para **ZNSSD**, 0,02867 *pixels* para **SPOCC** e 0,01171 para **DCC**. Raffel et al. (2007) relataram que os erros na ordem de 0,05 a 0,1 de pixel são realistas para as zonas de interrogação de 32 x 32 pixels de imagens digitais de 8 bits. White et al. (2003) relataram que os erros na ordem de 0,05 pixel podem ser obtidos.

Os resultados da análise, resumidos na Tabela 8.2, revelam que os quatro critérios de correlação realizam adequadamente a predição dos deslocamentos diagonais entre as duas imagens. Para a escolha do melhor critério, um algoritmo foi implementado em linguagem Matlab, onde são plotados os picos da correlação para cada critério. Segundo Pan et al. 2009, picos de correlação estreitos possuem maior eficácia e precisão para os cálculos DIC. O algoritmo `correlation_config.mat` encontra-se no apêndice D desta tese. Os picos de correlação de cada função encontram-se na figura 8.16. Observa-se, a partir da figura 8.16 que as funções de correlação **SPOCC** e **ZNSSD** produzem mapas com picos mais estreitos e altos, que normalmente são adotados como critérios para eficácia dos cálculos DIC.

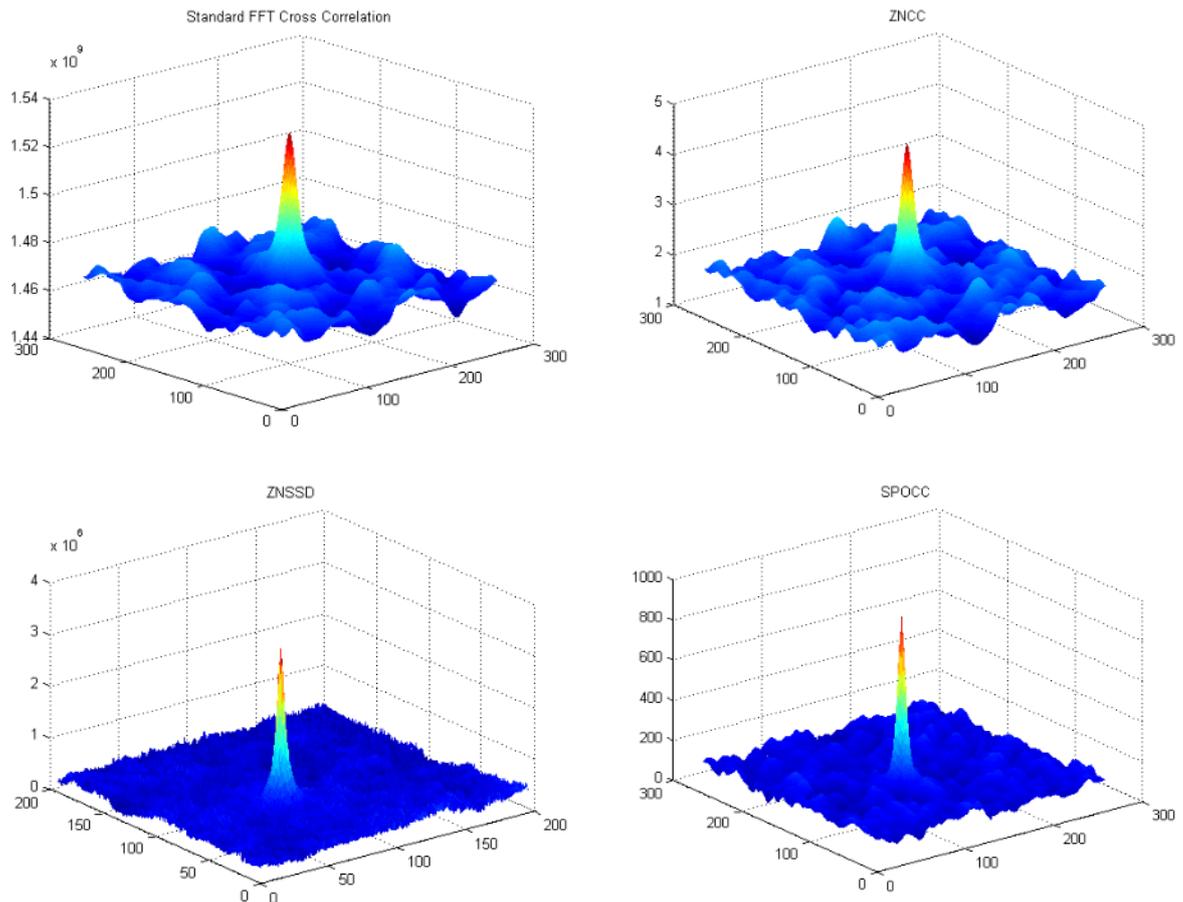


Figura 6.16 – Resultados da análise da escolha do melhor algoritmo DIC para as análises. Note que o pico ZNSSD é mais estreito e portanto mais preciso para realizar as análises de correlações.

A função de correlação **ZNSSD** foi selecionada para todas as análises realizadas nesta tese. Uma correlação cruzada adaptável com duas iterações, multi-grid, e estimativa de deslocamento a nível de sub-*pixel* foi usada nas análises. Para o multi-grid, um tamanho da janela inicial de 128x128 *pixels* foi selecionado, com um tamanho final da janela de 32x32 *pixels*, e uma sobreposição de 50% das janelas de interrogação. A seleção destes parâmetros resultou em cálculo de campos de deslocamento sobre uma grade quadrada de 16 *pixels*, o que corresponde a um vetor de deslocamento plotado a cada  $4,5D_{50}$ .

## 7 - APÊNDICE B - PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE SOLO TRANSPARENTE

Solos transparentes são feitos com poro fluido e partículas transparentes com mesmo índice de refração. Os modelos necessitam ser saturados porque o ar, juntamente com impurezas e diferenças de índice de refração entre meio e poro fluido são as causas primárias de perda de transparência e opacidade. Os tópicos a seguir apresentam as principais itens que devem ser observados na preparação de uma boa amostra de solo transparente:

1. **Precisão do IR do poro fluido:** O IR da quartzo fundido é 1,4585. É necessário que o IR do poro fluido seja igual ao IR da quartzo fundido para obter a melhor transparência possível. Um refratômetro portátil é utilizado para medir o índice de refração do óleo, para assegurar a mistura uniforme dos dois poro fluidos e obter o índice de refração desejado. O IR de  $1,4585 \pm 0.0005$  foi alcançado, a 22 °C;
2. **Altura de queda entre a malha metálica e a superfície do poro fluido:** Após a pluviação, as partículas de quartzo fundido não quebram imediatamente a tensão superficial do óleo; Elas flutuam no topo da superfície. Para uma correta preparação da amostra, as partículas de quartzo fundido devem cair sobre a superfície do poro fluido, e dispor de tempo suficiente para as que suas áreas superficiais sejam umedecidas pelo poro fluido e sedimentem no interior do fluido. Aumentando velocidade de pluviação e a altura de queda em relação a superfície de óleo resultam em grupos de partículas que se aglomeram sobre a superfície do óleo, o que permite-lhes quebrar a tensão superficial do óleo antes de submergir deslocando totalmente o volume intersticial. O ar aprisionado entre o vazios intersticiais das partículas ainda parcialmente secas é uma fonte de degradação da transparência. A altura de queda de 15 mm foi empiricamente considerada adequada para conseguir a transparência ótima da amostra;
3. **Taxa de deposição do quartzo fundido:** É importante reduzir a taxa de deposição para garantir a saturação ótima das partículas de quartzo fundido pelo poro fluido. Ensaios iniciais demonstraram que uma velocidade de deposição

inicial de aproximadamente 0,4 g/min/cm<sup>2</sup> foi adequada para assegurar o umedecimento ótimo das partículas;

4. **Profundidade de sedimentação dentro do poro fluido:** Aumentando a profundidade de sedimentação resulta em um aumento da liberação do ar aprisionado para superfície. O poro fluido foi mantido a 10 mm da superfície do container a todo tempo. A medida que o container era preenchido com quartzo fundido, o excesso de poro fluido era succionado a fim de manter a profundidade ótima supracitada.

## PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE SOLO TRANSPARENTES

### Técnica Convencional

Amostras de solos transparentes são preparadas levando-se em consideração os itens apresentados anteriormente. A sílica em pó amorfa é utilizada para modelagem de argila e a sílica gel é utilizada para modelagem de areia, porém sua utilização em modelagem geotécnica encontra-se em desuso devido as desvantagens apresentadas neste trabalho. Atualmente, utiliza-se o quartzo fundido para modelagem de areia. A primeira etapa para a preparação de amostras de solos transparentes é encher o container com a mistura de poro fluido com IR=1,4585. Como descrito acima, um dos fatores que degradam a transparência final da amostra é a não coincidência do IR do quartzo fundido com o poro fluido. É desejável que a mistura dos óleos tenha ocorrido com 48 horas de antecedência antes da preparação da amostra. Utiliza-se o refratômetro para checar o IR da mistura. Caso o IR não seja 1,4585 adiciona-se o óleo mineral correspondente (para aumentar ou diminuir o IR) até atingir o IR do quartzo fundido. Caso seja adicionado óleo mineral, deve-se esperar no mínimo uma hora até que a mistura se estabilize e outra medição com o refratômetro é realizada. Uma vez atingida pelo poro fluido o mesmo IR do quartzo fundido, coloca-se uma tela de alumínio de espaçamento de 4mm e inicia-se a pluviação manual do quartzo fundido. Um forro de plástico é colocado sob os containers para evitar qualquer perda do quartzo fundido durante a pluviação. Um outro container com quartzo fundido é pesado e registra-se seu peso. A altura desejada final da amostra é marcada no container. As amostras

apresentam uma densidade seca ( $\gamma_{\text{seco}} = 1,11 - 1,18 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ ). A figura 9.1 ilustra as etapas de preparação de amostras de solos transparentes com a técnica convencional.

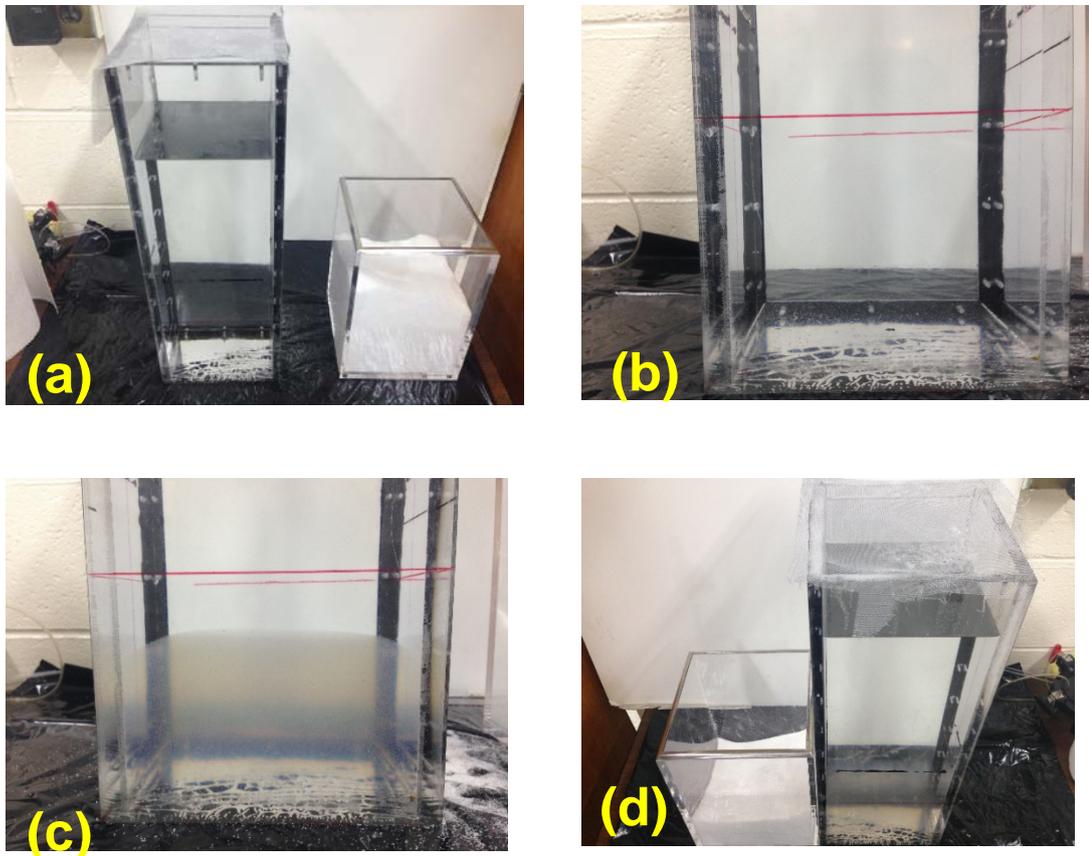


Figura 7.1 – Etapas de preparação de amostra convencional de solo transparente com quartzo fundido e mistura de óleos minerais.

Para a preparação de solos transparentes com sílica em pó amorfa é necessário o uso de um vacuômetro (Fig. 9.2) para expulsar as microbolhas de ar que se formam no amostra devido as propriedades higroscópicas do pó de sílica amorfa. Iskander et al. 2002 reportou que uma das principais causas de perda da transparência, é o acúmulo de bolhas ar dentro do modelo.

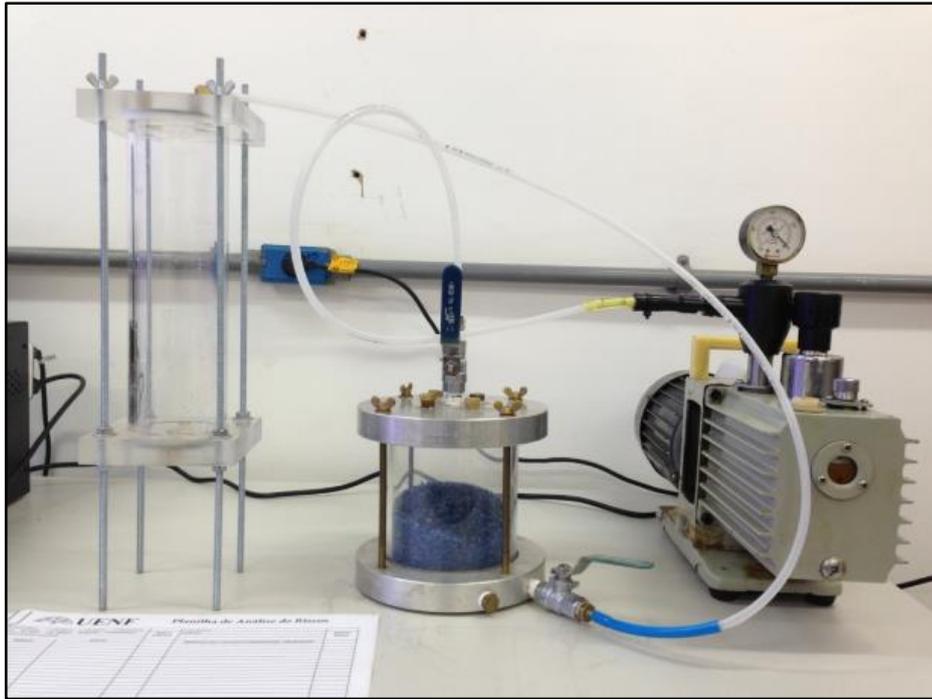


Figura 7.2 - Vacuômetro construído para preparação de amostras de argila transparente.

#### 7.1.1 - Técnica de preparação de amostras com controle de densidade

Para a preparação de amostras de solos transparentes a base de quartzo fundido e com controle de densidade, utiliza-se um pluviador (Figura 9.3) construído segundo metodologia descrita em Rad e Tumay, 2004. O pluviador é construído com telas intercambiáveis o que permite a escolha do tipo de densidade da amostra (fofa ou densa). O quartzo fundido é pluviado seco e a saturação é realizada pela parte do fundo do container para cima com auxílio de uma válvula instalada no fundo do container. Esta técnica previne a entrada de bolhas de ar na amostra e conseqüentemente a degradação da transparência da amostra.



Figura 7.3 – Pluviador para preparação de amostras de solo transparente.

#### 7.1.2 - Técnica da Camada Opaca (“embedded Plane”)

A técnica da camada opaca ou do inglês “embedded plane technique” consiste em semear partículas de quartzo fundido pintadas com uma tinta escura não metálica em uma determinada camada vertical para aumentar a rastreabilidade das partículas durante um determinado carregamento ou interação por métodos de correlação de pares sequenciais de imagens digitais. Esta técnica mostrou-se adequada para o estudo de penetração cinemática de projéteis em meio granular. Neste tipo de problema faz-se necessário uma enorme quantidade de luz, não sendo, portanto, apropriado o uso de iluminação *laser*.

A figura 9.3 mostra as etapas necessárias para a confecção de uma amostra de solo transparente com a técnica da camada opaca. A caixa de acrílico deve possuir

uma face lateral destacável para o correto preparo da amostra. O preparo da amostra ocorre na horizontal; um separador de madeira com hastes é instalado na altura final desejada da amostra sendo vedada com silicone resistente à óleo (Fig. 9.4).

Figura 7.4 - Etapas da preparação de amostra de solo transparente utilizando a técnica da camada opaca.

Inicialmente, o container de acrílico é colocado na horizontal, ao longo de sua altura (Passo 1 e Figura 9.5). A parede lateral destacável é então removida, e o container preenchido com poro fluido constituído da mistura de dois óleos minerais, com o mesmo índice de refração do quartzo fundido (*Puretol 7* e *Krystol 40*) (Figura 9.5f). A altura desejada da amostra foi então determinada pela colocação de uma barreira de madeira no interior do container, para restringir a pluviação para esta profundidade, como mostrado no *Passo 2* (Figura 9.5d). Uma fita plástica adesiva é colocada sob a camada de silicone. Uma tela de alumínio # 40 foi então colocada

sobre o container, e o quartzo fundido é pluviado manualmente, ocorrendo a sedimentação através do poro fluido (Figuras 9.6 h,i,j,l)

A pluviação manual do quartzo fundido é realizada até uma profundidade de 90 mm, correspondente à seção transversal da amostra localizada no meio da amostra. A superfície do solo transparente é então cuidadosamente nivelada, e uma camada de quartzo fundido tingida é pluviada. A densidade ótima da área superficial do quartzo tingido foi determinado através de uma série de testes de calibração, descritas no apêndice C deste trabalho. Aproximadamente 10g de partículas opacas (quartzo tingido) são pluviadas para produzir uma fina camada uniforme incorporada à amostra (Fig. 10.7).

A segunda metade do container de acrílico é posteriormente preenchido através da pluviação de quartzo fundido. As bordas da faces do container de acrílico são então revestidas com uma camada de silicone resistente à óleo, de forma a impedir qualquer vazamento. A lateral do container é então aparafusada em seu lugar (*Passo 4*). Finalmente, o container de acrílico é cuidadosamente rotacionado de modo que a amostra fique na horizontal e pronta para o ensaio de penetração com o projétil (Fig. 10.8).

A massa total do quartzo fundido seco pluviado bem como a das partículas tingidas incorporadas são registradas durante a preparação da amostra, a fim de determinar a densidade seca da amostra. Este método de pluviação através do poro fluido invariavelmente resulta em uma amostra fofa. Antes da realização do ensaio de penetração, a amostra é deixada durante um período de 72 horas, durante este tempo ocorre uma auto compactação e a densidade relativa sofre um crescimento de 10%. As amostras apresentam uma densidade seca ( $\gamma_{seco}$ ) = 1,11 – 1,18 ± 0,02 g / cm<sup>3</sup>.

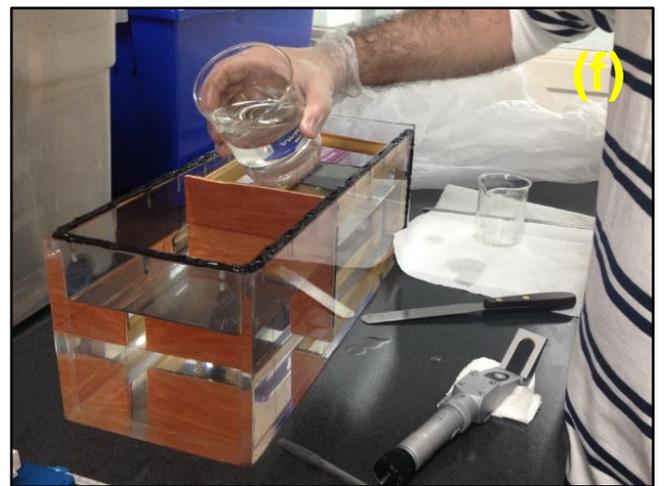
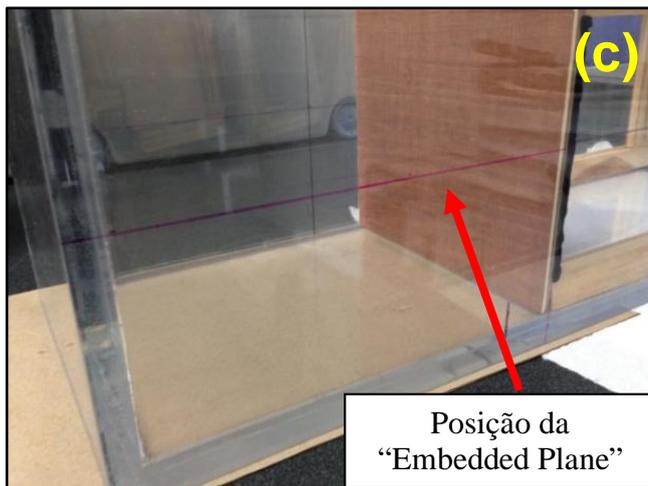
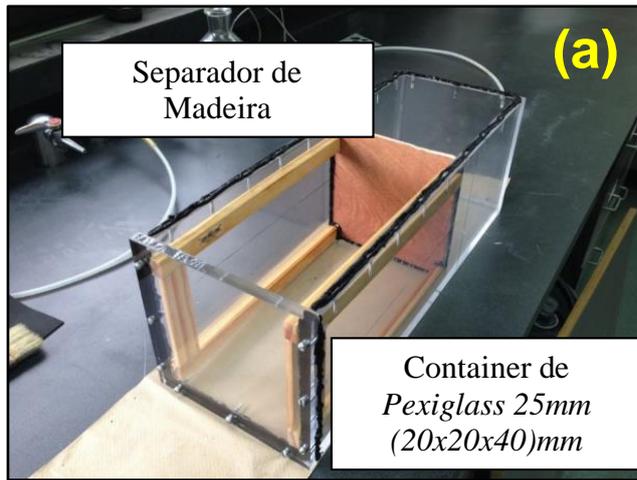


Figura 7.5 – Imagens sequênciais das etapas de preparação da amostra de solo transparente com a técnica da camada opaca.

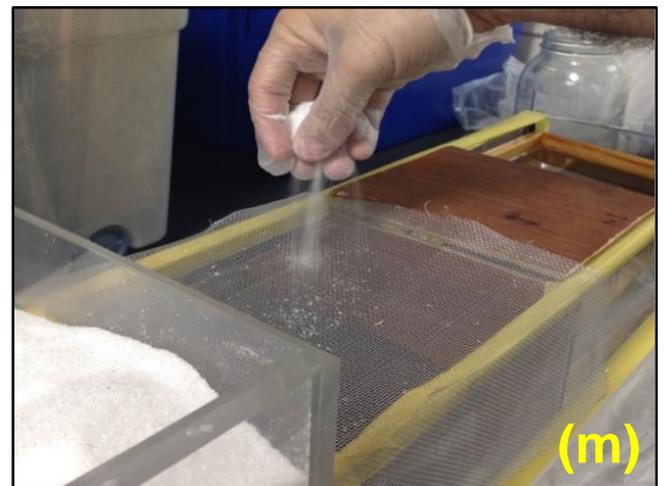
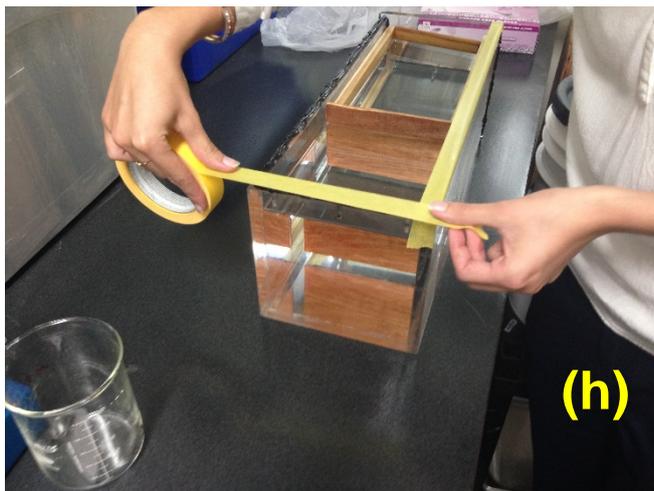
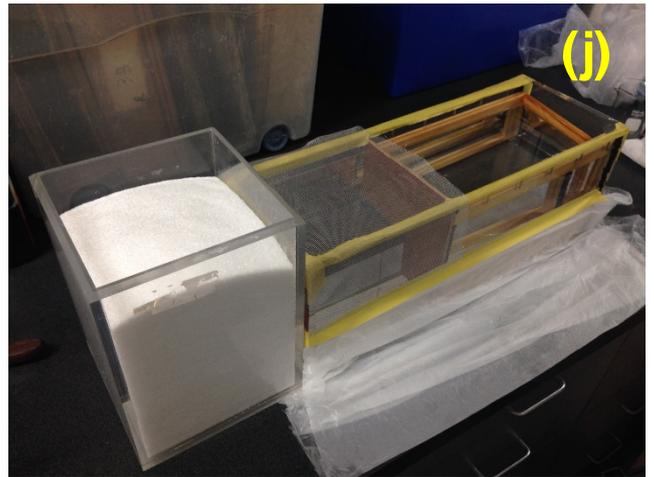


Figura 7.6 - Imagens sequências das etapas de preparação da amostra de solo transparente com a técnica da camada opaca (continuação, parte 2).



Figura 7.7 - Imagens sequênciais das etapas de preparação da amostra de solo transparente com a técnica da camada opaca (continuação parte 3).

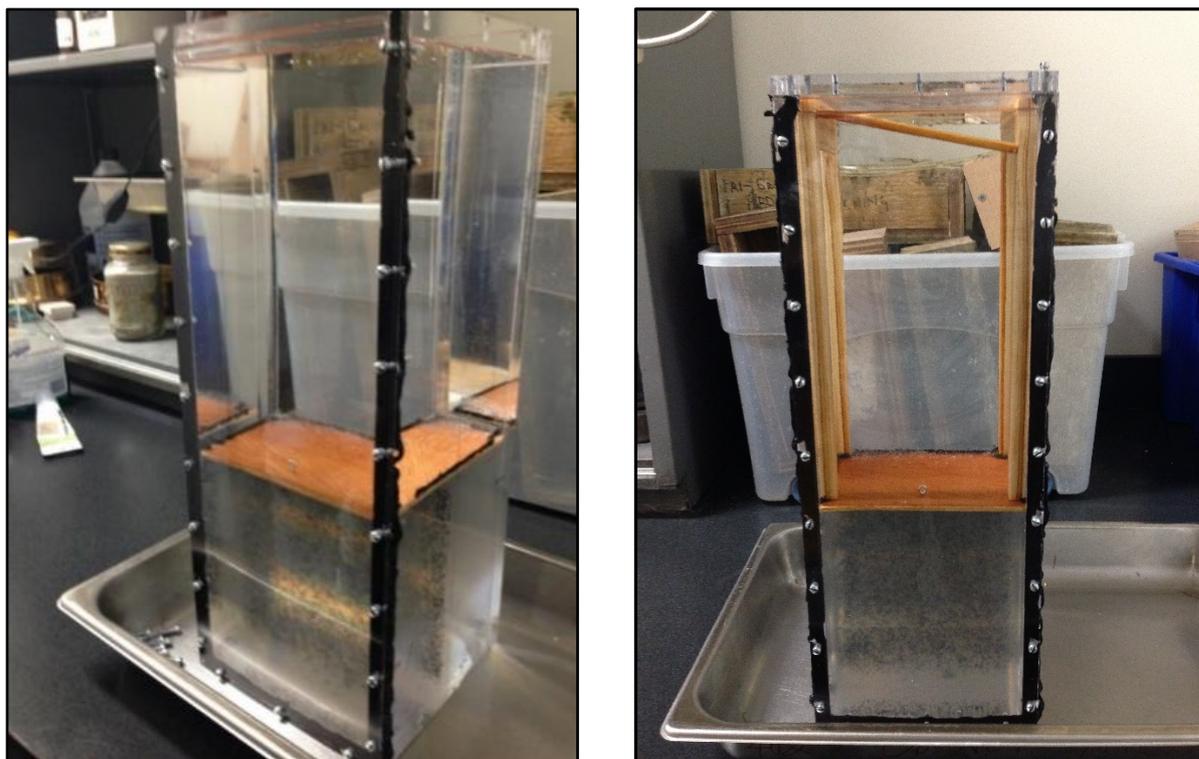


Figura 7.8 – Amostra pronta com a técnica da camada opaca.

## 8 - APÊNDICE C - OTIMIZAÇÃO DO PLANO OPACO PARA ANÁLISE DE IMAGEM

O sucesso da análise das imagens obtidas no ensaio depende da capacidade da camada opaca em produzir um padrão discernível na escala necessária para a análise que possa ser rastreada pelo *software*. Um conjunto de ensaios de calibração foi realizada para determinar a concentração ótima de partículas tingidas que deveriam ser introduzidas no plano opaco do solo transparente, bem como os parâmetros de correlação do programa PIVVIEW 2C/3C que deveriam ser utilizados. As etapas dos ensaios de calibração são descritas abaixo:

- Sete recipientes cúbicos de acrílico com uma seção quadrada de 70 milímetros foram preenchidos com uma mistura de dois poro fluidos (*Puretol 40<sup>TM</sup>* e *Krystol 7<sup>TM</sup>*) com IR de 1,4585;
- Sete misturas com proporções diferentes de quartzo fundido tingido e transparente foram preparadas de acordo com a Tabela 10.1.

- Cada mistura foi pluviada em seu respectivo container para formar um plano incorporado opaco na base dos recipientes em diferentes concentrações de massa, de acordo com a Tabela 10.1.

Em seguida, o quartzo fundido transparente foi pluviado até atingir uma profundidade de 70 mm. A fim de simular a iluminação traseira do plano opaco, os recipientes cúbicos de acrílico foram colocados em um armação transparente, com um espelho montado abaixo dos recipientes a 45° ao longo da sua diagonal. Uma fonte de luz de tungstênio de 250W foi direcionada para o espelho que por sua vez refletia a luz através dos da camada opaca, simulando assim, uma iluminação indireta difusa. Uma câmera DSLR Nikon 3200 com uma lente macro Tamron foi utilizada para a aquisição de imagens para binarização.

A binarização é o método mais simples de segmentação de imagens. Consiste em converter uma imagem com níveis de cinza para uma imagem com representação binária (dois tons) com o objetivo de identificar objetos e separa-los do fundo da imagem. Nesta análise o objetivo da binarização é a obtenção da concentração de partículas opacas em cada amostra de controle testada. O algoritmo de binarização escrito em linguagem MATLAB encontra-se no apêndice D deste trabalho.

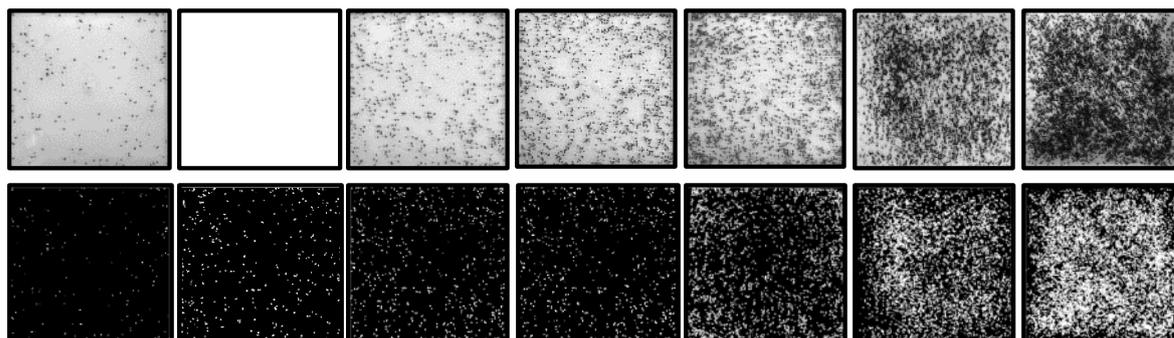


Figura 8.1 – Concentrações de camada opaca, DPOH 1%, 3%, 4% , 9% , 15%, 28% , 44 % (na parte superior ) e as correspondentes representações binarizadas (parte inferior) (após Omidvar et al. 2015 ).

Sete amostras experimentais de controle foram preparadas, contendo cada uma as concentrações de densidade das partículas opacas (DPO) de acordo com a tabela 10.1 como mostrado na Fig. (10.1). DPO é definida como a fração da área projetada total em corte transversal ocupada pelas partículas opacas. Registrou-se também a

massa correspondente de partículas opacas necessária para obter uma dada DPO. Em seguida, as imagens capturadas foram binarizadas utilizando valores limites de 0,6 - 0,7 (com uma escala análoga de 0 a 1). A área da região binarizada ocupada por partículas opacas foi quantificada para produzir a DPO. As DPOs resultantes eram de aproximadamente 1%, 3%, 4%, 9%, 15%, 28%, e 44%.

Tabela 8.1 – Parâmetros de calibração das amostras.

Concentração (%)	Massa de partículas tingidas (opacas) em gramas
1	0,10
3	0,20
4	0,40
9	0,70
15	1,20
28	2,50
44	4,00

As amostras de calibração foram utilizadas para determinar a concentração ótima de partículas opacas para as análises de correlação. Para este teste, as amostras foram colocadas em uma mesa acoplada a um micrômetro, e um deslocamento de 0,7 milímetros, o que corresponde aproximadamente a  $1,7D_{50}$ , foi aplicado na direção horizontal. As imagens foram capturadas antes e depois do deslocamento. Utilizou-se o programa PIVVIEW 2C/3C para avaliar os deslocamentos previstos, conforme descrito anteriormente.

Além da determinação da melhor densidade de partículas opacas que resultariam na correlação mais precisa, o tamanho ótimo das janelas de interrogação também foi avaliado por meio da realização de várias análises DIC usando tamanhos de janela de interrogação que variaram de cerca de  $3D_{50}$  a  $33D_{50}$  para cada DPO. A média do coeficiente de correlação foi calculado para cada tamanho da área de interrogação e DPO, bem como o erro médio quadrado (RMSE) entre os deslocamentos previstos e reais.

Os resultados das análises são mostrados na figura 10.2. Pode ser observado que a média do coeficiente de correlação primeiro aumenta à medida que aumenta a DPO, até uma DPO de aproximadamente 28%, para além do qual observa-se uma pequena diminuição. Esta tendência é mantida ao longo de todos os tamanhos de janela de interrogação. Também pode ser visto a partir da Fig 10.2 que, independentemente da DPO, um tamanho da janela de interrogação de pelo menos  $8D_{50}$  deve ser utilizada para produzir correlações precisas. Concluiu-se a partir dos testes de calibração que um DPO de aproximadamente 0,3, com um tamanho de janela de interrogação de aproximadamente  $8D_{50}$  é adequada para análise DIC dos deslocamentos ocorridos no plano da camada opaca.

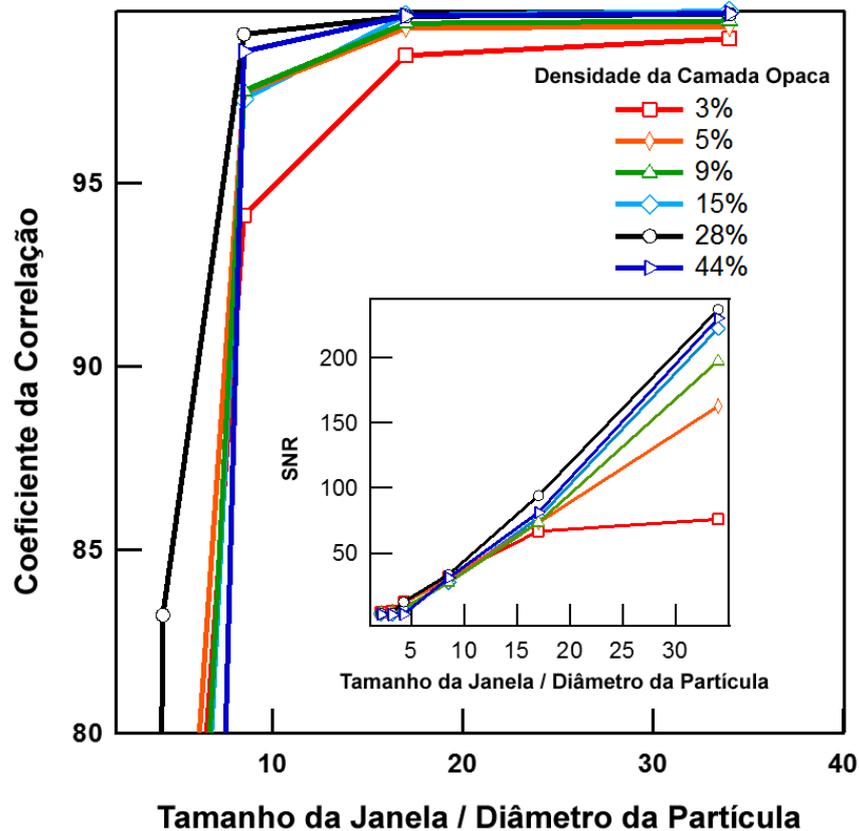


Figura 8.2 – Quantidade ótima de partículas tingidas de negro na camada opaca como função do tamanho a janela, determinada a partir do coeficiente de correlação e o SNR (razão do sinal pelo ruído) das análises DIC das figuras 10.1.

## APÊNDICE D - ALGORITMOS IMPLEMENTADOS EM LINGUAGEM MATLAB

---

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF
%Polytecnic University of New York - Poly NYU
%Written by: Tiago Carvalho and Medhi Omidivar

% Email: tiago.carvalho@nyu.edu, m.omdivar@nyu.edu

% Algoritmo: correlation_config.mat
% Objetivo: Testar todas as funções de correlação com objetivo de se
escolher a melhor para a análise

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc;
clear all;

fi=imread('ESCREVER O NOME DA FIGURA 0 REF.tif');
gi=imread('ESCREVER O NOME DA FIGURA 1.tif');
fi=rgb2gray(fi);
gi=rgb2gray(gi);
f=fi(100:356,100:356);
g=gi(100:356,100:356);
%Standard FFT
tic;
SFFT =fftshift(real(ifft2(conj(fft2(f)).*fft2(g))));
figure();
surf(SFFT,'LineStyle', 'none');
title('Standard FFT Cross Correlation');
maxr=max(max(SFFT));
[y,x] = find(SFFT==maxr);
[r,c,v]=find(SFFT>(maxr*0.5));
L=length(find(c==y))
peaks_SFFT=imregionalmax(SFFT);
G_SFFT=regionprops(peaks_SFFT,'PixelIdxLis');
P_SFFT=peaks_SFFT.*SFFT;
[svals_SFFT,idx_SFFT] = sort(P_SFFT(:),'descend'); % sort to vector
FMax_SFFT=svals_SFFT(1) % First largest value
SMax_SFFT=svals_SFFT(80) % Second largest value
Ratio_SFFT=FMax_SFFT./SMax_SFFT
toc;
%%
%ZNCC(freq domain)
tic;
f1=mean2(f);
g1=mean2(g);
f2=f-f1;
g2=g-g1;
result_conv =fftshift(real(ifft2(conj(fft2(f2)).*fft2(g2))));
ZNCC=result_conv./sqrt((sum(sum(f2.^2)))*(sum(sum(g2.^2))));
figure();
surf(ZNCC,'LineStyle', 'none');
title('ZNCC');
maxr=max(max(ZNCC));
[y,x] = find(ZNCC==maxr)
```

```

[r,c,v]=find(ZNCC>(maxr*0.5));
L=length(find(c==y))
peaks_ZNCC=imregionalmax(ZNCC);
G_ZNCC=regionprops(peaks_ZNCC,'PixelIdxLis');
P_ZNCC=peaks_ZNCC.*ZNCC;
[svals_ZNCC,idx_ZNCC] = sort(P_ZNCC(:),'descend'); % sort to vector
FMax_ZNCC=svals_ZNCC(1); % First largest value
SMax_ZNCC=svals_ZNCC(2); % Second largest value
Ratio_ZNCC=FMax_ZNCC./SMax_ZNCC
toc;
%%
%Phase only filter cross correlation (SPOCC)
tic;
S1=fft2(f);
S2=fft2(g);
W=1./(abs(S2));
POCC=fftshift(real(ifft2((conj(S2).*W).*S1)));
figure();
surf(POCC,'LineStyle', 'none');
title('POCC');
maxr=max(max(POCC));
[y,x] = find(POCC==maxr)
[r,c,v]=find(POCC>(maxr*0.5));
L=length(find(c==y))
%Determining peak ratio
peaks_POCC=imregionalmax(POCC);
G_POCC=regionprops(peaks_POCC,'PixelIdxLis');
P_POCC=peaks_POCC.*POCC;
[svals_POCC,idx_POCC] = sort(P_POCC(:),'descend'); % sort to vector
FMax_POCC=svals_POCC(1); % First largest value
SMax_POCC=svals_POCC(2); % Second largest value
Ratio_POCC=FMax_POCC./SMax_POCC
toc;
%%
%Symmetric Phase only filter cross correlation
tic;
S1=fft2(f);
S2=fft2(g);
W=1./sqrt(abs(S2).*abs(S1));
SPOCC=fftshift(real(ifft2((conj(S2).*W).*S1)));
figure();
surf(SPOCC,'LineStyle', 'none');
title('SPOCC');
maxr=max(max(SPOCC));
[y,x] = find(SPOCC==maxr)
[r,c,v]=find(SPOCC>(maxr*0.5));
L=length(find(c==y))
%Determining peak ratio
peaks_SPOCC=imregionalmax(SPOCC);
G_SPOCC=regionprops(peaks_SPOCC,'PixelIdxLis');
P_SPOCC=peaks_SPOCC.*SPOCC;
[svals_SPOCC,idx_SPOCC] = sort(P_SPOCC(:),'descend'); % sort to vector
FMax_SPOCC=svals_SPOCC(1); % First largest value
SMax_SPOCC=svals_SPOCC(2); % Second largest value
Ratio_SPOCC=FMax_SPOCC./SMax_SPOCC
toc;
%%
tic;
%SSD
[m n]=size(g);
%g1=padarray(g,[m-1 n-1]);
g1=gi(50:500,50:500);

```

```

[m1 n1]=size(g1);
for i=1:m1
    for j=1:n1
        if(i+m-1<=m1 && j+n-1<=n1)
            reg=g1(i:i+m-1,j:j+n-1);
            SSD(i,j)=sum(sum((f-reg).*(f-reg)));
        end
    end
end
SSD=max(max(SSD))-SSD;
maxr=max(max(SSD));
[y,x] = find(SSD==maxr)
figure();
surf(SSD,'LineStyle', 'none');
title('SSD');
[r,c,v]=find(SSD>(maxr*0.5));
L=length(find(c==y))
%Determining peak ratio
peaks_SSD=imregionalmax(SSD);
G_SSD=regionprops(peaks_SSD,'PixelIdxLis');
P_SSD=peaks_SSD.*SSD;
[svals_SSD,idx_SSD] = sort(P_SSD(:),'descend'); % sort to vector
FMax_SSD=svals_SSD(1); % First largest value
SMax_SSD=svals_SSD(2); % Second largest value
Ratio_SSD=FMax_SSD./SMax_SSD
toc
%%
%SAD
tic;

%ZSSD
tic;
[m n]=size(g);
%g1=padarray(g,[m-1 n-1]);
g1=gi(50:500,50:500);
[m1 n1]=size(g1);
fm=mean(mean(f));
for i=1:m1
    for j=1:n1
        if(i+m-1<=m1 && j+n-1<=n1)
            reg=g1(i:i+m-1,j:j+n-1);
            gm=mean(mean(reg));
            ZSSD(i,j)=sum(sum(((f-fm)-(reg-gm)).^2));
        end
    end
end
ZSSD=max(max(ZSSD))-ZSSD;
maxr=max(max(ZSSD));
[y,x] = find(ZSSD==maxr)
figure();
surf(ZSSD,'LineStyle', 'none');
title('ZSSD');
[r,c,v]=find(ZSSD>(maxr*0.5));
L=length(find(c==y))
%Determining peak ratio
peaks_ZSSD=imregionalmax(ZSSD);
G_ZSSD=regionprops(peaks_ZSSD,'PixelIdxLis');
P_ZSSD=peaks_ZSSD.*ZSSD;
[svals_ZSSD,idx_ZSSD] = sort(P_ZSSD(:),'descend'); % sort to vector
FMax_ZSSD=svals_ZSSD(1); % First largest value
SMax_ZSSD=svals_ZSSD(2); % Second largest value
Ratio_ZSSD=FMax_ZSSD./SMax_ZSSD

```

```

toc;
%%
%NSSD
tic;
[m n]=size(g);
%g1=padarray(g,[m-1 n-1],255);
g1=gi(50:500,50:500);
[m1 n1]=size(g1);
for i=1:m1
    for j=1:n1
        if(i+m-1<=m1 && j+n-1<=n1)
            reg=g1(i:i+m-1,j:j+n-1);
            NSSD(i,j)=sum(sum((((sum(sum(f.*reg))/sum(sum(reg.*reg))).*reg)-
f).^2)))));
        end
    end
end
NSSD=max(max(NSSD))-NSSD;
maxr=max(max(NSSD));
[y,x] = find(NSSD==maxr)
figure();
surf(NSSD,'LineStyle','none');
title('NSSD');
[r,c,v]=find(NSSD>(maxr*0.5));
L=length(find(c==y))
%Determining peak ratio
peaks_NSSD=imregionalmax(NSSD);
G_NSSD=regionprops(peaks_NSSD,'PixelIdxLis');
P_NSSD=peaks_NSSD.*NSSD;
[svals_NSSD,idx_NSSD] = sort(P_NSSD(:),'descend'); % sort to vector
FMax_NSSD=svals_NSSD(1); % First largest value
SMax_NSSD=svals_NSSD(2); % Second largest value
Ratio_NSSD=FMax_NSSD./SMax_NSSD
toc;
%%
%NCC
tic;
f1=mean2(f);
g1=mean2(g);
result_conv =fftshift(real(ifft2(conj(fft2(f)).*fft2(g))));
NCC=result_conv./sqrt((sum(sum(f.^2)))*(sum(sum(g.^2))));
maxr=max(max(NCC));
[y,x] = find(NCC==maxr)
figure();
surf(NCC,'LineStyle','none');
title('NCC');
[r,c,v]=find(NCC>(maxr*0.5));
L=length(find(c==y))
%Determining peak ratio
peaks_NCC=imregionalmax(NCC);
G_NCC=regionprops(peaks_NCC,'PixelIdxLis');
P_NCC=peaks_NCC.*NCC;
[svals_NCC,idx_NCC] = sort(P_NCC(:),'descend'); % sort to vector
FMax_NCC=svals_NCC(1); % First largest value
SMax_NCC=svals_NCC(2); % Second largest value
Ratio_NCC=FMax_NCC./SMax_NCC
toc;
%%
%ZNSSD
tic;
[m n]=size(g);
%g1=padarray(g,[m-1 n-1]);

```

```

g1=gi(50:500,50:500);
[m1 n1]=size(g1);
for i=1:m1
    for j=1:n1
        if(i+m-1<=m1 && j+n-1<=n1)
            reg=g1(i:i+m-1,j:j+n-1);
            gb=mean(mean(reg));
            fb=mean(mean(f));
            gib=reg-gb;
            fib=f-fb;
            of=sum(sum(fib.*gib))/sum(sum(gib.*gib));
            ZNSSD(i,j)=sum(sum((((of.*reg)-(gb.*of)-(f-fb)).^2)));
        end
    end
end
end
ZNSSD=max(max(ZNSSD))-ZNSSD;
maxr=max(max(ZNSSD));
[y,x] = find(ZNSSD==maxr)
figure();
surf(ZNSSD,'LineStyle', 'none');
title('ZNSSD');
[r,c,v]=find(ZNSSD>(maxr*0.5));
L=length(find(c==y))
%Determining peak ratio
peaks_ZNSSD=imregionalmax(ZNSSD);
G_ZNSSD=regionprops(peaks_ZNSSD,'PixelIdxLis');
P_ZNSSD=peaks_ZNSSD.*ZNSSD;
[svals_ZNSSD,idx_ZNSSD] = sort(P_ZNSSD(:),'descend'); % sort to vector
FMax_ZNSSD=svals_ZNSSD(1); % First largest value
SMax_ZNSSD=svals_ZNSSD(3); % Second largest value
Ratio_ZNSSD=FMax_ZNSSD./SMax_ZNSSD
toc;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% END.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF
%Polytecnic University of New York - Poly NYU
%Written by: Tiago Carvalho and Medhi Omidivar

% Email: tiago.carvalho@nyu.edu, m.omdivar@nyu.edu

Algoritmo: Binarization.mat
Objetivo: Binarizar as imagens
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc;
clear all;

I=255-(imread('COLOCAR O NOME DA IMAGEM.TIF'));
[m n]=size(I);
BW = im2bw(I, 0.7);
% STATS = regionprops(BW, 'Centroid');
% centroids = cat(1, STATS.Centroid);
figure();
imshow(BW)
% hold on
% plot(centroids(:,1), centroids(:,2), 'b*')
% hold off

```

```

STATS = regionprops(BW, 'Area');
Area = cat(1, STATS.Area);
Area=sum(sum(Area))*100/(m*n)

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Polytecnic University of New York - Poly NYU
%Written by: Chris Chen Zabo, Tiago Carvalho e Medhi Omidvar

% Email: tiago.carvalho@nyu.edu, m.omdivar@nyu.edu

```

### Algoritmo: **LDIC.mat**

Objetivo: This code is written to plot lagrangian trajectories.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

clear all
clc
tic;
% Ler multiplos arquivos DIC na pasta 'f:\pasta das analises DIC'
myPath='f:\pasta das analises DIC';
file = dir(fullfile(myPath, '*.dat'));
files={file.name};
% arrumar as arquivos (a função sort_nat é requerida - encontra-se neste
apêndice)
[S,INDEX]=sort_nat(files);
file=file(INDEX);
NF=length(file);
baseFN=file(1).name;
fprintf(1, 'Now reading %s\n', baseFN);
L9=load(baseFN);
% obter as coordenadas x e y na matrix
X{1}=L9(:,1);
Y{1}=L9(:,2);
Y=flipud(Y);
mj=find(Y{1}==Y{1}(1));
y=reshape(Y{1},length(mj),length(Y{1})/length(mj));
x=reshape(X{1},length(mj),length(Y{1})/length(mj));
% converter os dados x e y em matrix
U{1}=L9(:,4);
V{1}=L9(:,5);
% Assegurar que os valores U e V possuem valores lógicos
for s=1:size(U{1},1)
    if isnan(U{1}(s));
        U{1}(s)=10e-08; V{1}(s)=10e-08;
    else
        continue
    end
end
% atualizar as coordenadas x and y na matrix
X{2}=X{1}+U{1};
Y{2}=Y{1}+V{1};
C{1}=[X{1}(:),Y{1}(:)];
C{2}=[X{2}(:),Y{2}(:)];
EL{1}=[U{1}(:),V{1}(:)];

for k=2:NF
baseFN=file(k).name;
fprintf(1, 'Now reading %s\n', baseFN);
L9=load(baseFN);
X{1}=L9(:,1);

```

```

Y{1}=L9(:,2);
Y=flipud(Y);
mj=find(Y{1}==Y{1}(1));
y=reshape(Y{1},length(mj),length(Y{1})/length(mj));
x=reshape(X{1},length(mj),length(Y{1})/length(mj));
[M,N]=size(x);
T=M*N;
U_step=L9(:,4);
V_step=L9(:,5);
for s=1:size(U_step,1)
    if isnan(U_step(s));
        U_step(s)=10e-08; V_step(s)=10e-08;
    else
        continue
    end
end
end

%número total de pontos
num_el=size(U_step);

%Triangulação Delaunay no espaço DIC
DT_ini = delaunayTriangulation(x(:),y(:));
DT_ini_Connect=DT_ini.ConnectivityList(:,:);
P_locate=zeros(num_el(1,1),1);
for j=1:num_el(1,1)
    %find the triangle in which the point lies
    P_locate(j) = pointLocation(DT_ini,X{k}(j),...
        Y{k}(j));
end
for p=1:num_el(1,1)
    if ~isnan(P_locate(p,1))
        p_ini_01 = DT_ini.Points(DT_ini.ConnectivityList...
            (P_locate(p),1),:);
        p_ini_02 = DT_ini.Points(DT_ini.ConnectivityList...
            (P_locate(p),2),:);
        p_ini_03 = DT_ini.Points(DT_ini.ConnectivityList...
            (P_locate(p),3),:);
        x_total=X{k}(p);
        y_total=Y{k}(p);
        %obter as coordenadas vertex ds triangulos correspondentes
        x_ini_01=p_ini_01(1,1); y_ini_01=p_ini_01(1,2);
        x_ini_02=p_ini_02(1,1); y_ini_02=p_ini_02(1,2);
        x_ini_03=p_ini_03(1,1); y_ini_03=p_ini_03(1,2);
        %definir os parâmetros da função de forma
        a_ini_1=x_ini_02.*y_ini_03-x_ini_03.*y_ini_02;
        a_ini_2=x_ini_03.*y_ini_01-x_ini_01.*y_ini_03;
        a_ini_3=x_ini_01.*y_ini_02-x_ini_02.*y_ini_01;
        b_ini_1=y_ini_02-y_ini_03;
        b_ini_2=y_ini_03-y_ini_01;
        b_ini_3=y_ini_01-y_ini_02;
        c_ini_1=x_ini_03-x_ini_02;
        c_ini_2=x_ini_01-x_ini_03;
        c_ini_3=x_ini_02-x_ini_01;
        %area of the delaunay triangle
        Al_ini=[1 1 1;x_ini_01 x_ini_02 x_ini_03;y_ini_01...
            y_ini_02 y_ini_03];
        A_ini=0.5*det(Al_ini);
        %componentes da função de forma ; x(i) ey(i) são os
centroides
        %coordenadas do triângulo
        N_lag_1=(a_ini_1+b_ini_1*x_total+...
            c_ini_1*y_total)/(2*A_ini);

```

```

N_lag_2=(a_ini_2+b_ini_2*x_total+c_ini_2...
*y_total)/(2*A_ini);
N_lag_3=(a_ini_3+b_ini_3*x_total+c_ini_3...
*y_total)/(2*A_ini);
Ux_step_1=U_step(DT_ini.ConnectivityList(P_locate(p),1));
Ux_step_2=U_step(DT_ini.ConnectivityList(P_locate(p),2));
Ux_step_3=U_step(DT_ini.ConnectivityList(P_locate(p),3));
Uy_step_1=V_step(DT_ini.ConnectivityList(P_locate(p),1));
Uy_step_2=V_step(DT_ini.ConnectivityList(P_locate(p),2));
Uy_step_3=V_step(DT_ini.ConnectivityList(P_locate(p),3));
Ui=[N_lag_1 0 N_lag_2 0 N_lag_3 0; 0 N_lag_1 0 N_lag_2...
0 N_lag_3]*[Ux_step_1 Uy_step_1 Ux_step_2 Uy_step_2...
Ux_step_3 Uy_step_3]';
% Deslocamento do ponto langrangiano
Ux_lag(p)=Ui(1,1);
Uy_lag(p)=Ui(2,1);
else
Ux_lag(p)=0;
Uy_lag(p)=0;
end
end
% Atualizar as coordenadas langrange
U{k}=Ux_lag';
V{k}=Uy_lag';
X{k+1}=X{k}+U{k};
Y{k+1}=Y{k}+V{k};
C{k+1}=[X{k+1}(:),Y{k+1}(:)];
EL{k}=[U{k}(:),V{k}(:)];
end
% Salvar os resultados do cálculo
save calculationresults2.mat

toc;

PLOT_THIS=zeros(size(EL{1}));
for cz=1:NF
PLOT_THIS=PLOT_THIS+EL{cz};
End
% fator de escala (pixels -> mm)

CS=7.154;
CJ_x=reshape(PLOT_THIS(:,1),M,N);
CJ_y=reshape(PLOT_THIS(:,2),M,N);
CJ_x_p=CJ_x(:,27)./CS;
CJ_y_p=CJ_y(:,27)./CS;
plot(x(:,1)./CS,CJ_y(:,27)./CS)
%Write files to Excel
A_write='RESULTADOS.xlsx';
sheet=1;
xlrange1='A1';
xlswrite(A_write,CJ_x_p,sheet,xlrange1)
xlrange2='B1';
xlswrite(A_write,CJ_y_p,sheet,xlrange2)
X_PLOT=x(:,1)./CS;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Polytecnic University of New York - Poly NYU
%Written by: Chris Chen Zabo, Tiago Carvalho e Medhi Omidvar

% Email: tiago.carvalho@nyu.edu, m.omdivar@nyu.edu

```

### Algoritmo: **LS.mat**

Objetivo: Este código foi escrito para plotar a deformação volumetrica cumulativa, deformação cisalhante cumulativa e rotação.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

clc
clear all

```

```

% Carregaros resultados do DIC lagrangiano do código LSDIC.mat
load calculationresults2.mat
tic;

```

```

% Triangular o espaço das particulas originais convertendo os pontos
originais em vértices do triângulo
DT0{1}= delaunayTriangulation(C{1});
P_DT_Connect{1}=DT0{1}.ConnectivityList(:, :);

```

```

%Triangular o espaço das particulas deslocadas, convertendo os pontos
originais em vértices de um triangulo
for w=1:NF
TR1{w}=triangulation(P_DT_Connect{1},C{w+1});
DT0{w+1}=TR1{w};
end

```

```

%cálculo da deformação
s1=0;s2=0;s3=0;s4=0;s5=0;s6=0;s7=0;s8=0;s9=0;s10=0;s11=0;s12=0;
for j=1:NF
%contar o número de triângulos de cada imagem
[NT,MT]=size(DT0{j}.ConnectivityList);

```

```

%Obter os coordenadas dos triangulos originais
for i=1:NT
point_01{j}(i,1:2) = DT0{j}.Points(DT0{j}.ConnectivityList(i,1),:);
point_02{j}(i,1:2) = DT0{j}.Points(DT0{j}.ConnectivityList(i,2),:);
point_03{j}(i,1:2) = DT0{j}.Points(DT0{j}.ConnectivityList(i,3),:);

```

```

x01{j}(i)=point_01{j}(i,1); y01{j}(i)=point_01{j}(i,2);
x02{j}(i)=point_02{j}(i,1); y02{j}(i)=point_02{j}(i,2);
x03{j}(i)=point_03{j}(i,1); y03{j}(i)=point_03{j}(i,2);

```

```

%área do triangulo delaunay
A1{j}(i)=0.5*det([1 1 1;x01{j}(i) x02{j}(i) x03{j}(i);y01{j}(i) y02{j}(i)
y03{j}(i)]);

```

```

%calcular o centroide de cada triangulo
xc{j}(i)=(x01{j}(i)+x02{j}(i)+x03{j}(i))/3;
yc{j}(i)=(y01{j}(i)+y02{j}(i)+y03{j}(i))/3;

```

```

%obter os dados u e v baseados na connectivitylist
Ux1{j}(i)=EL{j}(DT0{j}.ConnectivityList(i,1),1);
Ux2{j}(i)=EL{j}(DT0{j}.ConnectivityList(i,2),1);
Ux3{j}(i)=EL{j}(DT0{j}.ConnectivityList(i,3),1);

```

```

Uy1{j}(i)=EL{j}(DT0{j}.ConnectivityList(i,1),2);
Uy2{j}(i)=EL{j}(DT0{j}.ConnectivityList(i,2),2);
Uy3{j}(i)=EL{j}(DT0{j}.ConnectivityList(i,3),2);

%This is a constant strain triangle (CST) formulation. Higher order
%elements and the associated shape functions will be added eventually.
%Displacement gradient matrix (L)

L1{j}(1:2,i)=[(y02{j}(i)-y03{j}(i)) (y03{j}(i)-y01{j}(i));(x03{j}(i)-
x02{j}(i)) (x01{j}(i)-x03{j}(i))]*[(Ux1{j}(i)-Ux3{j}(i)) (Ux2{j}(i)-
Ux3{j}(i))]'./(2*A1{j}(i));
Uxx{j}(i)=L1{j}(1,i);
Uxy{j}(i)=L1{j}(2,i);
L2{j}(1:2,i)=[(y02{j}(i)-y03{j}(i)) -(y01{j}(i)-y03{j}(i));-(x02{j}(i)-
x03{j}(i)) (x01{j}(i)-x03{j}(i))] *[(Uy1{j}(i)-Uy3{j}(i)) (Uy2{j}(i)-
Uy3{j}(i))]'./(2*A1{j}(i));
Uyx{j}(i)=L2{j}(1,i);
Uyy{j}(i)=L2{j}(2,i);
L{j}(1:2,1:2,i)=[Uxx{j}(i) Uxy{j}(i);Uyx{j}(i) Uyy{j}(i)];

%matrix gradient de deformação (F)
F{j}(1:2,1:2,i)=L{j}(1:2,1:2,i)+eye(2);

%Calculate engineering volumetric strains
volume{j}(i)=det(F{j}(1:2,1:2,i))-1;

%Calculate stretch matrix
%Perform polar decomposition
%Str=stretch matrix (symmetric part of DefGrad)
%Rot=rotation matrix (skew symmetric part of DefGrad)
Str1{j}(1:2,1:2,i)=F{j}(1:2,1:2,i)'*F{j}(1:2,1:2,i);
Str{j}(1:2,1:2,i)=sqrtm(Str1{j}(1:2,1:2,i));
Rot{j}(1:2,1:2,i)=F{j}(1:2,1:2,i)/Str{j}(1:2,1:2,i);

%Calculate Biot strain matrix
EBi{j}(1:2,1:2,i)=Str{j}(1:2,1:2,i)-eye(2);

%Calculate engineering linear strain. This represents elongation of line
%elements oriented with the x and y axes.
e_eng_xx{j}(i)=EBi{j}(1,1,i);
e_eng_yy{j}(i)=EBi{j}(2,2,i);

%Calculate engineering shear strains
gamma_xy{j}(i)=EBi{j}(1,2,i)+EBi{j}(2,1,i);

%Calculate eigenvalues of Biot strain matrix. These are the principal
%engineering strains.
e_prince{j}(1:2,i)=eig(EBi{j}(1:2,1:2,i));
e_eng_p1{j}(i)=e_prince{j}(1,i);
e_eng_p2{j}(i)=e_prince{j}(2,i);

%Calculate natural strains in xx and yy directions
e_log_xx{j}(i)=log(Str{j}(1,1,i));
e_log_yy{j}(i)=log(Str{j}(2,2,i));
%Convert engineering principal strain to natural strain
e_log_p1{j}(i)=log(1+e_eng_p1{j}(i));
e_log_p2{j}(i)=log(1+e_eng_p2{j}(i));

%Calculate maximum natural shear strains
gamma_log_max{j}(i)=e_log_p1{j}(i)-e_log_p2{j}(i);

```

```

%Rotation in degrees
rotation{j}(i)=acos(Rot{j}(1,1,i))*180/pi;
end

%Obtain cumulative strain
s1=s1+e_eng_xx{j};
Te_eng_xx{j}=s1;
s2=s2+e_eng_yy{j};
Te_eng_yy{j}=s2;
s3=s3+gamma_xy{j};
Tgamma_xy{j}=s3;
s4=s4+e_eng_p1{j};
Te_eng_p1{j}=s4;
s5=s5+e_eng_p2{j};
Te_eng_p2{j}=s5;
s6=s6+e_log_xx{j};
Te_log_xx{j}=s6;
s7=s7+e_log_yy{j};
Te_log_yy{j}=s7;
s8=s8+e_log_p1{j};
Te_log_p1{j}=s8;
s9=s9+e_log_p2{j};
Te_log_p2{j}=s9;
s10=s10+gamma_log_max{j};
Tgamma_log_max{j}=s10;
s11=s11+rotation{j};
Trotation{j}=s11;
s12=s12+volume{j};
Tvolume{j}=s12;
end
CS=39.3;
%trisurf plots
figure
z=zeros(numel(C{1}(:,1)),1);
tri=delaunay(C{1}(:,1),C{1}(:,2));
trisurf(tri,C{1}(:,1)/CS,C{1}(:,2)/CS,z(:),Trotation{NF})
%caxis([0,20])
set(gca,'TickDir','in','FontSize',12,'FontWeight','bold')
axis equal
xlabel('Horizontal coordinate (mm)','FontWeight','bold','FontSize',14);
ylabel('Vertical coordinate (mm)','FontWeight','bold','FontSize',14);
figure
z=zeros(numel(C{1}(:,1)),1);
tri=delaunay(C{1}(:,1),C{1}(:,2));
trisurf(tri,C{1}(:,1)/CS,C{1}(:,2)/CS,z(:),Tvolume{NF})
set(gca,'TickDir','in','FontSize',12,'FontWeight','bold')
axis equal
xlabel('Horizontal coordinate (mm)','FontWeight','bold','FontSize',14);
ylabel('Vertical coordinate (mm)','FontWeight','bold','FontSize',14);

figure
z=zeros(numel(C{1}(:,1)),1);
tri=delaunay(C{1}(:,1),C{1}(:,2));
h=trisurf(tri,C{1}(:,1)/CS,C{1}(:,2)/CS,z(:),Tgamma_log_max{NF});
set(gca,'TickDir','in','FontSize',12,'FontWeight','bold')
axis equal
xlabel('Horizontal coordinate (mm)','FontWeight','bold','FontSize',14);
ylabel('Vertical coordinate (mm)','FontWeight','bold','FontSize',14);
toc;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Function [cs,index] = sort_nat(c,mode)
% Version: 1.4, 22 January 2011
% Author: Douglas M. Schwarz
% Email: dmschwarz=ieee*org, dmschwarz=urgrad.rochester.edu
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Set default value for mode if necessary.
if nargin < 2
    mode = 'ascend';
end
% Make sure mode is either 'ascend' or 'descend'.
modes = strcmpi(mode,{'ascend','descend'});
is_descend = modes(2);
if ~any(modes)
    error('sort_nat:sortDirection',...
        'sorting direction must be 'ascend' or 'descend'.')end
% Replace runs of digits with '0'.
c2 = regexprep(c,'\d+','0');

% Compute char version of c2 and locations of zeros.
s1 = char(c2);
z = s1 == '0';
% Extract the runs of digits and their start and end indices.
[digruns,first,last] = regexp(c,'\d+','match','start','end');
% Create matrix of numerical values of runs of digits and a matrix of the
% number of digits in each run.
num_str = length(c);
max_len = size(s1,2);
num_val = NaN(num_str,max_len);
num_dig = NaN(num_str,max_len);
for i = 1:num_str
    num_val(i,z(i,:)) = sscanf(sprintf('%s ',digruns{i}{:}),'%f');
    num_dig(i,z(i,:)) = last{i} - first{i} + 1;
end
% Find columns that have at least one non-NaN. Make sure activecols is a
% 1-by-n vector even if n = 0.
activecols = reshape(find(~all(isnan(num_val))),1,[]);
n = length(activecols);
% Compute which columns in the composite matrix get the numbers.
numcols = activecols + (1:2:2*n);
% Compute which columns in the composite matrix get the number of digits.
ndigcols = numcols + 1;
% Compute which columns in the composite matrix get chars.
charcols = true(1,max_len + 2*n);
charcols(numcols) = false;
charcols(ndigcols) = false;
% Create and fill composite matrix, comp.
comp = zeros(num_str,max_len + 2*n);
comp(:,charcols) = double(s1);
comp(:,numcols) = num_val(:,activecols);
comp(:,ndigcols) = num_dig(:,activecols);
% Sort rows of composite matrix and use index to sort c in ascending or
% descending order, depending on mode.
[unused,index] = sortrows(comp);
if is_descend
    index = index(end:-1:1);
end
index = reshape(index,size(c));
cs = c(index);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%END

```