



Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Recursos Naturais da Amazônia

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO  
GRANULOMÉTRICA DOS FINOS DE MINÉRIO DE FERRO NA  
LIQUEFAÇÃO DURANTE O TRANSPORTE MARÍTIMO**

**DEBORA DIAS COSTA MOREIRA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, PRODERNA/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Dr. André Luiz Amarante Mesquita.

BELÉM, PA - BRASIL

MAIO DE 2022

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO  
GRANULOMÉTRICA DOS FINOS DE MINÉRIO DE FERRO NA  
LIQUEFAÇÃO DURANTE O TRANSPORTE MARÍTIMO**

Debora Dias Costa Moreira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Examinada por:

Prof. André Luiz Amarante Mesquita, D.Sc.  
(PRODERNA/ITEC/UFPA - Orientador)

Prof. José Antônio da Silva Souza, D.Sc.  
(PRODERNA/ITEC/UFPA)

Prof. João Nazareno Nonato Quaresma, D.Sc.  
(PRODERNA/ITEC/UFPA)

Prof. Rosa Malena Fernandes Lima, D.Sc.  
(UFOP)

Prof. Marcio Ferreira Martins, D.Sc.  
(PPGEM/UFES)

BELÉM, PA - BRASIL

MAIO DE 2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

D541e Dias Costa Moreira, Debora.  
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO  
GRANULOMÉTRICA DOS FINOS DE MINÉRIO DE FERRO  
NA LIQUEFAÇÃO DURANTE O TRANSPORTE MARÍTIMO/  
Debora Dias Costa Moreira. — 2022.  
104 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Recursos Naturais na Amazônia, Belém, 2022.

1. Liquefação. 2. Finos de Minério de Ferro. 3.  
Distribuição Granulométrica . 4. Limite de Umidade  
Transportável . I. Título.

CDD 621.042

---

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus filhos Alice e Artur Moreira que me ensinaram a ser forte mesmo havendo muita dor, que multiplicaram em mim o amor pelo outro, que me transformaram em um ser humano mais tolerante e compreensivo. Eu amo vocês por todo o amor a mim dedicado.

Aos meus pais pela bela educação que dedicaram a mim e meus irmãos. Mesmo com pouca escolaridade e dinheiro souberam conduzir seus filhos no caminho da honestidade e educação. A eles toda minha gratidão.

Ao meu marido e amigo Davi Carvalho Moreira pela ajuda e incentivo para o excelente andamento deste trabalho. Sem ele ao meu lado nada disso seria possível, pois toda força e resiliência em continuar lutando vieram através de suas palavras. Obrigada pela paciência e total apoio nessa longa jornada.

Ao meu orientador André Luiz Amarante Mesquita pela ajuda e parceria na orientação, incentivo e composição do trabalho.

A todos do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA), em especial, à Secretária Syglea Rejane dos Santos Vieira.

Aos colegas do Campus Universitário de Tucuruí – CAMTUC, em especial da Faculdade de Engenharia Civil – FEC, pelo incentivo, parceria e colaboração para a conclusão do trabalho.

À equipe do Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados – FLUIPAR pela dedicação e ajuda nos experimentos.

À Universidade Federal do Pará por contribuir com a minha capacitação profissional, dando asas para chegar no mais alto nível de sabedoria. É uma honra fazer parte dessa instituição.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (D.Sc.)

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS FINOS DE MINÉRIO DE FERRO NA LIQUEFAÇÃO DURANTE O TRANSPORTE MARÍTIMO**

DEBORA DIAS COSTA MOREIRA

Maio/2022

Orientador: André Luiz Amarante Mesquita.

Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais.

Nas últimas décadas, muitos incidentes com graneleiros ocorreram devido à liquefação de cargas sólidas a granel, sendo o minério de ferro o responsável pelo maior volume de negócios de cargas sólidas no mundo. A liquefação de cargas sólidas a granel em navios graneleiros tem sido uma das principais causas de acidentes graves, inclusive com perda de vidas e embarcações. O minério de ferro é o responsável pelo maior volume de negócios de cargas sólidas no mundo. No entanto, nas últimas décadas ocorreram muitos incidentes com graneleiros devido à liquefação de cargas sólidas a granel, ocasionando acidentes graves, inclusive com óbitos e prejuízos com embarcações. Os finos de minério de ferro, conhecido do acrônimo em inglês IOF “Iron Ore Fines”, são produtos preparados a partir do refino de minério de ferro e foi reclassificado, em 2011, pela International Maritime Organization (IMO), como um material liquefável do 'Grupo A'. Atualmente, o limite de umidade transportável, do inglês TML “Transportable Moisture Limit” é o único parâmetro, usado pela IMO, para minimizar o risco de liquefação de cargas do 'Grupo A' para transporte marítimo. Nesta tese foram propostas duas metodologias para investigar o potencial de liquefação do IOF. A primeira metodologia objetivou classificar o potencial de liquefação das amostras de IOF considerando o TML e o fator de coesão de Coulomb. A segunda metodologia teve por objetivo utilizar o teste de mesa de vibração para análise do potencial de liquefação do IOF através de indicadores propostos. Os estudos foram realizados com amostras de IOF preparadas com tamanhos de partícula de 9,5 mm a 25 µm em diferentes conteúdos de finos (partículas < 150 µm) e umidade. Na primeira parte da tese, os testes de

cisalhamento direto detectaram que a adição do conteúdo de finos nas amostras de IOF proporciona grande influência na resistência ao cisalhamento. Também foi constatado, através do teste Proctor/Fagerberg e teste de mesa de fluxo, que a adição do conteúdo de finos nas amostras de IOF produziram aumento do TML. Estes resultados foram utilizados para proposição de uma metodologia para classificação do potencial de liquefação de IOF. Na segunda parte da tese, o teste Proctor/Fagerberg modificado identificou um conteúdo de finos de transição para o TML. Por meio da metodologia experimental proposta para o teste de mesa de vibração, observou-se que o potencial de liquefação do IOF possui correlação com a migração de umidade para a superfície e valores de índices de vazios, grau de saturação e densidade são equivalentes à metodologia de compactação teste Proctor/Fagerberg modificado. Finaliza com a proposição dos indicadores,  $I_p$  e  $ISWC$ , que são parâmetros úteis avaliar potencial de liquefação de IOF em amostras com diferentes conteúdos de finos e umidades; para o IOF testado,  $I_p \leq 3,63$  indicou que não houve liquefação e  $ISWC > 0$  indicou liquefação.

Palavras-chave: Liquefação. Finos de minério de ferro. Distribuição granulométrica. Limite de umidade transportável.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Sc.)

## **STUDY INFLUENCE OF GRANULOMETRIC DISTRIBUTION OF THE IRON ORE FINES TO LIQUEFACTION FOR THE MARINE TRANSPORTATION**

**DEBORA DIAS COSTA MOREIRA**

May/2022

Advisor: André Luiz Amarante Mesquita

Research Area: Use and Transformation of Natural Resources

In recent decades, many incidents with bulk carriers have occurred due to the liquefaction of solid bulk cargoes, with iron ore being responsible for the largest volume of solid cargo business in the world. The liquefaction of solid bulk cargoes in bulk carriers has been one of the main causes of serious accidents, including loss of life and vessels. Iron ore fines (IOF) are products prepared from the refining of iron ore and were reclassified, in 2011, by the International Maritime Organization (IMO), as a liquefiable material of the 'A group'. Currently, the transportable moisture limit (TML) is the only parameter used by the IMO to minimize the risk of liquefaction of 'Group A' cargoes for maritime transport. In this thesis, two methodologies were proposed to investigate the liquefaction potential of IOF, the first methodology aimed to classify the liquefaction potential of IOF samples considering the TML and the Coulomb cohesion factor and the second methodology aimed to use the table test of vibration for analysis of the liquefaction potential of the IOF through proposed indicators. The studies were performed with IOF samples prepared with particle sizes from 9.5 mm to 25  $\mu\text{m}$  in different fines contents (particles < 150  $\mu\text{m}$ ) and moisture. In the first part of the thesis, the direct shear tests showed that the addition of fines content in the IOF samples provides great influence on the shear strength. It was also observed, through the Proctor/Fagerberg test and the flow table test, that the addition of fines content in the IOF samples produced an increase in TML. These results were used to propose a methodology for classifying the liquefaction potential of IOF. In the second part of the thesis, the modified Proctor/Fagerberg test showed that there is a transition fine content for the TML. Through the experimental methodology proposed for the vibration table test, it was observed that the liquefaction potential of the IOF has a correlation with the

migration of moisture to the surface and values of void ratio, degree of saturation and density are equivalent to the methodology of modified Proctor/Fagerberg test compression. It ends with the proposition of the indicators,  $I_p$  and ISWC, which are useful parameters to evaluate the potential for liquefaction of IOF in samples with different contents of fines and moisture; for the tested IOF,  $I_p \leq 3.63$  indicated that there was no liquefaction and  $ISWC > 0$  indicated liquefaction.

Keywords: Liquefaction; Iron ore fines; Granulometric distribution; Transportable moisture limit.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	4
<b>1.1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>4</b>
1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	5
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	5
CAPÍTULO 2 .....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1 ASPECTOS REGULATÓRIOS DO TRANSPORTE MARÍTIMO DE CARGAS SÓLIDAS A GRANEL.....	7
<b>2.1.1 Organização Marítimo Internacional – IMO.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.2 Código Marítimo de Cargas Sólidas a Granel – Código IMSBC .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.3 O TML e os testes para o controle da liquefação de cargas.....</b>	<b>9</b>
2.2 O FINO DE MINÉRIO DE FERRO (IOF) DO NO BRASIL.....	10
<b>2.2.1 Acidentes com Suspeita de Liquefação .....</b>	<b>13</b>
2.3 PRINCÍPIOS GERAIS DA LIQUEFAÇÃO.....	16
<b>2.3.1 Natureza do carregamento: liquefação estática e liquefação dinâmica....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2 Distribuição granulométrica e teor de finos .....</b>	<b>20</b>
2.4 LIQUEFAÇÃO DE CARGAS SÓLIDAS A GRANEL .....	25
CAPÍTULO 3 .....	33
3 TESTES EXPERIMENTAIS .....	33
3.1 TESTE DE MESA DE FLUXO (FTT) .....	33
3.2 TESTE PROCTOR FAGERBERG (PFT) E TESTE PROCTOR FAGERBERG MODIFICADO (MPFT)35	
3.3 TESTE DE CISALHAMENTO DIRETO (DST).....	39
3.4 TESTE DE MESA DE VIBRAÇÃO – SHAKE TABLE TESTE (STT).....	40
<b>3.4.1 Medição de parâmetros antes do STT .....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.2 Medição dos parâmetros após STT .....</b>	<b>44</b>
CAPÍTULO 4 .....	46
4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE PESQUISA.....	46
4.1 PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	47
<b>4.1.1 Determinação da massa específica do IOF .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.2 Determinação da distribuição granulométrica da amostra padrão .....</b>	<b>48</b>

<b>4.1.3</b>	<b>Curva de distribuição granulométrica das amostras do Artigo 1 .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Curva de distribuição granulométrica das amostras do Artigo 2 .....</b>	<b>50</b>
	<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1</b>	<b>ARTIGO 1: INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE FINOS DE MINÉRIO DE FERRO NA LIQUEFAÇÃO DURANTE O TRANSPORTE MARÍTIMO .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Resumo.....</b>	<b>52</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Relação entre distribuição de tamanho de partícula e resistência ao cisalhamento Teste de Cisalhamento Direto (DST).....</b>	<b>53</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Relação entre a distribuição granulométrica do IOF e o TML .....</b>	<b>58</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Metodologia para classificação do potencial de liquefação da amostra ...</b>	<b>60</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Conclusão do capítulo.....</b>	<b>61</b>
<b>5.2</b>	<b>ARTIGO 2: TESTE DE MESA DE AGITAÇÃO PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO DE FINOS DE MINÉRIO DE FERRO .....</b>	<b>63</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Resumo.....</b>	<b>63</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Resultados do MPF .....</b>	<b>64</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Resultados do STT .....</b>	<b>66</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Verificação dos resultados do STT.....</b>	<b>73</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Conclusão do capítulo.....</b>	<b>75</b>
	<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>77</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>77</b>
<b>6.1</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>77</b>
<b>6.2</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE A – INDETIFICADOR DAS AMOSTRAS DE TESTE .....</b>	<b>87</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Carga de finos de minério de ferro antes e depois da liquefação no porão do navio graneleiro. ....	2
Figura 1.2 - Stellar Daisy, afundou em 2017 após sair do Brasil. Suspeita de liquefação. ....	3
Figura 2.1 - Visão geral da estrutura regulatória. ....	7
Figura 2.2 - Cadeia integrada global da Vale. ....	11
Figura 2.3 - Cadeia de suprimento do minério de ferro. ....	12
Figura 2.4 - Valores típicos de umidade do minério de ferro Carajás (sínter feed). ....	13
Figura 2.5 - Incidentes com suspeita de liquefação cumulativos de 1988 a 2016. ....	14
Figura 2.6 - Incidentes com suspeita de liquefação. Asian Forest e Back Rose, respectivamente. ....	15
Figura 2.7 - Sequência geral do processo da liquefação. ....	17
Figura 2.8 - Liquefação devido ao carregamento estático ou dinâmico. ....	19
Figura 2.9 - Limites granulométricos de suscetibilidade à liquefação. ....	21
Figura 2.10 - Efeito preenchimento e efeito ocupação, respectivamente. ....	22
Figura 2.11 - Diagrama esquemático da variação do acréscimo de finos. O ponto B corresponde ao Conteúdo de Finos de Transição (TFC). ....	23
Figura 2.12 - Representação gráfica nos semicírculos de Mohr-Coulomb do ângulo de atrito interno e coesão. ....	25
Figura 2.13 - Os três tipos diferentes de deslocamento de carga que podem ocorrer dentro de um porão de carga. ....	26
Figura 2.14 - Carga a granel antes de sofrer a compactação e após a compactação. ....	30
Figura 3.1 - Aparelho típico do teste de mesa de fluxo (a) e (b) amostra e remoção do molde cônico. ....	33
Figura 3.2 - Amostra acima do FMP: (a), mostrando pequena deformação plástica e Amostra abaixo do FMP; (b), mostrando deformação plástica. ....	34
Figura 3.3 - Equipamento típico utilizado na execução do teste Proctor Fagerberg. ....	35
Figura 3.4 - Martelo compactador para o teste MPFT, peso do martelo 150g, com altura de queda de 15cm e martelo compactador para o teste PFT, peso do martelo 350g, tubo guia com altura de queda de 20cm, respectivamente. ....	37
Figura 3.5 - O TML no PFT é a resultante da interceptação da curva de compactação com a reta correspondente a 70% da saturação e o TML no MPFT é a resultante da interceptação da curva de compactação com a reta correspondente a 80% da saturação. ....	38
Figura 3.6 - Aparatos do ensaio de DST. (a) Equipamento de ensaio de cisalhamento direto com célula de carga e (b) caixa de metal bipartida. ....	39
Figura 3.7 - Teste de cisalhamento direto. Diagrama esquemático. ....	39
Figura 3.8 - Aparatos do STT: (a) mesa de agitação e molde cilíndrico; (b) finos de minério de ferro e broca de penetração; (c) dimensões da broca de penetração. ....	41
Figura 3.9 - Determinação de parâmetros do STT. ....	43
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas de organização desta tese. ....	46
Figura 4.2 - Picnômetro com minério de ferro e água. ....	47

Figura 4.3 - Limites liquefáveis de solos [27] e distribuição granulométrica do IOF testada para o artigo 1.....	50
Figura 4.4 - Limites liquefáveis de solos [27] e distribuição granulométrica do IOF testada para o artigo 2.....	51
Figura 5.1 - Envoltória de falha resultante para amostras com diferentes distribuições de tamanho de partícula e conteúdo de umidade 9% GWC.....	54
Figura 5.2 - Envoltória de falha resultante para amostras com diferentes distribuições de tamanho de partícula e conteúdo de umidade 10% GWC.....	54
Figura 5.3 - Envoltória de falha resultante para amostras com diferentes distribuições de tamanho de partícula e conteúdo de umidade 11% GWC.....	54
Figura 5.4 - Envoltória de falha resultante para amostras com diferentes distribuições de tamanho de partícula e conteúdo de umidade 12% GWC.....	55
Figura 5.5 - Ângulo de atrito interno para amostras com o mesmo conteúdo de umidade. ....	56
Figura 5.6 - Pico da tensão de cisalhamento para amostras com diferentes distribuições de tamanho de partícula e conteúdo de umidade.....	58
Figura 5.7 - Visualização do comportamento da distribuição granulométrica do IOF na liquefação após ensaio de FTT com a mesma umidade (12%). (a) 5,2% finos, (b) 15,6% finos, (c) 19,3% finos e (d) 22,6% finos.....	59
Figura 5.8 - Curvas de compactação e TML produzidas pelo PFT.....	60
Figura 5.9 - Curva de compactação e TML produzida pelo MPFT. ....	65
Figura 5.10 - Influência do teor de finos no TML.....	65
Figura 5.11 - Resultados do parâmetro SWC e indicador ISWC após STT.....	67
Figura 5.12 - Recalque total após STT.....	69
Figura 5.13 - Profundidade de penetração do bit. (a) Amostra 00STT09 e (b) Amostra 00STT12.....	70
Figura 5.14 - Profundidade de penetração do bit em percentual da altura final da amostra. ....	71
Figura 5.15 - Curva do indicador $I_p$ . ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação de produto de minério de ferro no Brasil. ....	10
Tabela 2.2 - Incidentes ocorridos entre os anos de 1988 a 2016 relacionados ao tipo de carga e número de vítimas fatais. ....	14
Tabela 3.1 - Tabela de diferenças entre os testes Proctor Fagerberg e Proctor Fagerberg Modificado .....	36
Tabela 4.1 - Propriedades físicas e distribuição granulométrica da amostra original (5,2% finos) usada no estudo.....	48
Tabela 4.2 - Composição das amostras de ensaio desta tese. ....	49
Tabela 4.3 - Composição das amostras de ensaio desta tese. ....	50
Tabela 5.1 - Resultados e condições produzidos pelo DST. ....	53
Tabela 5.2 - Resultados do FTT. ....	58
Tabela 5.3 - Classificação do potencial de liquefação das amostras de IOF.....	61
Tabela 5.4 - Resultados do MPFT. ....	64
Tabela 5.5 - Resultados da migração de umidade para a superfície da amostra produzida pelo STT. ....	66
Tabela 5.6 - Parâmetros de compactação de amostra antes e depois de STT.....	68
Tabela 5.7 - Resultado da penetração do bit produzidos pelo STT.....	70
Tabela 5.8 - Comparação dos parâmetros das amostras submetidas ao STT e MPFT...	74

## LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

<b>ASTM</b>	Sociedade Americana de Testes e Materiais <i>American (Society for Testing and Materials)</i>
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$\rho$	Massa específica aparente seca [g/cm <sup>3</sup> ou kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_d$	Massa específica aparente seca [g/cm <sup>3</sup> ou kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Tensão normal [kPa]
$\tau$	Tensão cisalhante [kPa]
$\varphi$	Ângulo de atrito [°]
<b>Cc</b>	Coefficiente de curvatura [adimensional]
<b>Cu</b>	Coefficiente de uniformidade [adimensional]
$D_{10}$	Tamanho efetivo [mm]
$D_{30}$	Malha granulométrica na qual passam 30% em massa do material [mm]
$D_{60}$	Malha granulométrica na qual passam 60% em massa do material [mm]
<b>DNPM</b>	Departamento Nacional de Produção Mineral
<b>E</b>	Energia de compactação [kJ/m <sup>3</sup> ]
$e$	Índice de vazios [adimensional]
$e_v$	Umidade volumétrica base seca [%]
<b>FC</b>	Conteúdo de finos ( <i>finer content</i> ) [%]
<b>FMP</b>	Umidade na qual ocorre estado de fluxo ( <i>Flow moisture point</i> ) [%]
<b>GWC</b>	Conteúdo de água bruta [%] ( <i>Gross Water Content</i> )
<b>NBR</b>	NORMA BRASILEIRA
<b>S</b>	Grau de saturação [%]
<b>TFC</b>	Conteúdo de finos de transição ( <i>transitional finer content</i> ) [%]
<b>TML</b>	Limite de umidade transportável ( <i>Transportable moisture Limit</i> ) [%]
<b>IMSBC</b>	Código Marítimo Internacional de Cargas Sólidas a Granel ( <i>International Maritime Solid Bulk Cargoes Code</i> )
<b>IMO</b>	Organização Marítima Internacional ( <i>International Maritime Organization</i> )
<b>IOF</b>	Fino de Minério de Ferro ( <i>Iron Ore Fine</i> )
<b>MPFT</b>	Teste Proctor Fagerberg Modificado ( <i>Modified Proctor Fagerberg Test</i> )
<b>PFT</b>	Teste Proctor Fagerberg ( <i>Proctor Fagerberg Test</i> )
<b>FTT</b>	Teste de Mesa de Fluxo ( <i>Flow Table Test</i> )

<b>STT</b>	Teste de mesa de Vibração (Shake Table Test)
<b>SWC</b>	Conteúdo de água superficial (Surface Water Content)
<b>UNCTAD</b>	Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento ( <i>United Nations Conference on Trade and Development</i> )
<b>CSL</b>	Linha de estado crítico ( <i>Critical State Lime</i> )
<b>MA</b>	Maranhão
<b>ES</b>	Espírito Santo
<b>RJ</b>	Rio de Janeiro
<b>MS</b>	Mato Grosso do Sul

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

De acordo com a United Nations Conference on Trade and Development – UNCTAD [1], em 2021, estima-se que mais de 2,6 bilhões de toneladas de minério de ferro foram produzidas em todo o mundo. Como 98% desse total é usado na fabricação de aço, esse produto é considerado o mais importante para a economia global. Em 2021, os cinco principais países produtores de minério de ferro do mundo - Austrália, Brasil, Índia, China e Rússia - foram responsáveis pela produção de mais de 85% do minério de ferro global (UNCTAD [1]).

Ainda segundo a UNCTAD [1], o Brasil exporta anualmente, 542 milhões de toneladas de minério de ferro, sendo considerado o segundo maior exportador em nível global, ficando atrás apenas da Austrália, que tem uma produção anual de 1,35 bilhões de toneladas. Vale ressaltar que a mineradora Vale S.A., detentora da maior parte das reservas de minério de ferro do Brasil, é a segunda maior produtora de minério de ferro do mundo. Acredita-se que as minas da empresa, localizada no município de Carajás, estado do Pará, possuam o maior teor de minério de ferro do planeta (VALE [2]).

No ano de 2021 o transporte marítimo em navios correspondia a mais de 80% do comércio global em volume, sendo o minério de ferro o responsável pela maior quantidade de negócios de cargas sólidas por ano. Segundo a UNCTAD [1], são transportadas pelo mar 1,4 bilhão de toneladas desse minério oriundas, principalmente, da Austrália (58%) e do Brasil (23%) com destino à China (76%). A Vale S.A. exporta mais de 90% de sua produção através de quatro terminais portuários localizados no país, especificamente nos municípios de: Ponta da Madeira (MA), Tubarão (ES), Ilha de Guaíba e Itajaí (RJ) e porto fluvial de Gregório Curvo (MS), (VALE) [2].

De acordo com a Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM [3], em 2020, o Brasil encerrou o ano com uma produção de 300,4 Mt de minério de ferro, com expectativa de atingir 350 Mt de capacidade no ano de 2021. Grande parte desta produção (90%) foi exportada como fino de minério de ferro (Iron Ore Fine – IOF), que pela definição do Código Marítimo de Cargas Sólidas a Granel (International Maritime Solid Bulk Cargoes – IMSBC [4]), são minérios não concentrados, com 10% ou mais de

partículas finas menores que 1 mm ( $D_{10} \leq 1$  mm) e 50% ou mais de partículas finas menores que 10 mm ( $D_{50} \leq 10$  mm), contendo menos de 35% de goethita, em massa. A goethita é um óxido de ferro hidratado formado a partir da dissolução da ferrihidrita que dá origem a cristais fibrosos e tende a absorver água livre nos poros da carga (MUNRO e MOHAJERANI [5]).

De acordo com o critério mineralógico descrito pela IMO, as cargas de minério de ferro e fino de minério de ferro se diferem principalmente pelo percentual de goethita contido na carga a ser transportada, na qual cargas de minério com percentual de goethita igual ou superior a 35% não são suscetíveis à liquefação quando submetidos aos níveis máximos de carregamento ao longo de uma viagem marítima (International Maritime Organization - IMO [4]).

Existem muitos riscos envolvidos no transporte de carga mineral a granel, como, por exemplo, a liquefação. Este fenômeno consiste na transformação de um material granular do estado sólido para o fluido, conforme observado na Figura 1.1, causada por mudanças na pressão dos poros dentro do material (MUNRO e MOHAJERANI [6]). Como resultado, há perda de tensão efetiva quando submetido a carga monotônica, cíclica ou por choque.



**Figura 1.1** - Carga de finos de minério de ferro antes e depois da liquefação no porão do navio graneleiro.

Fonte: JONAS, 2010 [7].

O fenômeno da liquefação, que ocorre comumente em certos tipos de solos granulares durante terremotos, é objeto de estudo da geotecnia devido aos graves danos

causados em estruturas civis. No entanto, a aplicação do deste conceito em cargas durante o transporte marítimo é pouco conhecida ou explorada.

A natureza catastrófica desse tipo de falha atraiu a atenção de pesquisadores, principalmente no que diz respeito à avaliação da suscetibilidade à liquefação após um aumento abrupto na taxa de ocorrência de acidentes graves envolvendo navios transportando minérios de níquel, ferro, bauxita, com perda de vidas e embarcações. Estes sinistros, em sua maioria atribuídos à liquefação da carga ou fenômenos de instabilidade relacionados à elevada umidade do minério.

Durante o transporte marítimo, determinadas combinações de finos, umidade e mudanças na pressão dos poros dentro da carga sólida a granel resultam em uma massa agindo como um líquido. Isso causa alterações abruptas do centro de gravidade da embarcação e podem resultar na emborcação do navio. A Figura 1.2 demonstra o navio Stellar Daisy, que afundou em 2017 após sair do Brasil. Suspeita-se que nos últimos oito anos, a liquefação de IOF, seja a causa de pelo menos dez acidentes em navios graneleiros, sendo registrado em oito desses acidentes perda total da embarcação e vidas (MUNRO e MOHAJERANI [8]).



**Figura 1.2** - Stellar Daisy, afundou em 2017 após sair do Brasil. Suspeita de liquefação.

Fonte: JORNAL DE MINERAÇÃO [9].

Para minimizar o risco de liquefação durante o transporte marítimo de minérios e outras cargas, em 2008, a IMO - Órgão regulamentador em âmbito internacional, através da resolução MSC.268(85) [10] – adotou um Código IMSBC, que diz respeito às práticas de segurança para o transporte de cargas sólidas a granel. Esse código descreve métodos de teste para determinação do Limite de Umidade Transportável

(Transportable Moisture Limit – TML) de cargas liquefáveis como, por exemplo, o fino de minério de ferro.

O TML é inferido pelo código IMSBC [4] como sendo o teor máximo de água que uma carga pode conter sem o risco de liquefação durante o transporte marítimo. Atualmente, ele é o único parâmetro usado para determinar o potencial de liquefação de uma mineral para transporte em navios graneleiros.

Mesmo após a implantação obrigatória do Código IMSBC, em 2011, e a obrigatoriedade da determinação do TML para cargas liquefáveis, ainda ocorreram incidentes com suspeita de liquefação de IOF durante o transporte marítimo. É por esse motivo que nas últimas décadas, o fenômeno de liquefação de cargas sólidas a graneis vem sendo estudado intensivamente.

Nesse contexto, afirma-se que o Brasil é um dos maiores exportadores de finos de minério de ferro no mundo, portanto, tornam-se necessários mais estudos para compreender as condições e parâmetros sob as quais os finos de minério de ferro podem liquefazer, para atuar de forma preventiva na estabilidade da carga durante o transporte marítimo. Pesquisas sobre a relação do potencial de liquefação com a distribuição granulométrica de finos de minério de ferro (IOF) são relevantes para as empresas transportadoras de minério, pois possuem uma variedade de tamanhos de finos que podem ser misturados para minimizar o potencial de liquefação.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo foi investigar a influência da distribuição granulométrica de finos de minério de ferro (IOF) no potencial de liquefação de cargas sólidas a granel durante o transporte marítimo.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar, por meio do teste de cisalhamento direto, a relação entre a distribuição granulométrica do IOF e a resistência ao cisalhamento e sua influência no potencial de liquefação, com diferentes graduações granulométricas.

- Verificar a relação entre a distribuição granulométrica do IOF e TML e sua influência no potencial de liquefação, com diferentes graduações granulométricas, através do teste Proctor Fagerberg Modificado (Modified Proctor Fagerberg Test – MPFT) e o teste de mesa de agitação (Shake Table Test – STT).
- Propor uma metodologia para classificação do potencial de liquefação de IOF considerando o TML e o fator coesão Coulomb.
- Propor um método de análise quantitativa do potencial de liquefação de IOF através de indicadores, usando ensaio de mesa de vibração (Shake Table Test – STT).

## 1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Buscou-se propor duas novas propostas metodológicas para análise da suscetibilidade à liquefação do IOF. A primeira baseada na classificação do potencial de liquefação de IOF considerando o TML e a resistência ao cisalhamento e a segunda pautada no ensaio de vibração (Shaker Table Test – STT) para análise quantitativa do potencial de liquefação de IOF, com a proposição de novos indicadores. Demonstra-se, assim, que as metodologias propostas fornecem parâmetros úteis para empresas de transporte marítimo que almejam determinar misturas de tamanhos de IOF.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Neste capítulo enfatizaram-se as motivações que justificaram o estudo sobre influência da distribuição granulométrica dos finos de minério de ferro na liquefação durante o transporte marítimo. Apresentaram-se ainda os objetivos, as principais contribuições e a forma de organização do trabalho pretendidos na presente tese.

No capítulo seguinte, realizou-se a revisão dos conceitos fundamentais acerca do transporte marítimo de minério de ferro e sua relevância no cenário mundial no transporte de sólidos a graneis, bem como seus aspectos regulatórios. Revisaram-se, ainda, as discussões teóricas em torno do fenômeno da liquefação em cargas a graneis de finos de minério de ferro, abordando, principalmente, os mecanismos que desencadeiam a liquefação durante o transporte marítimo e seus acidentes. São apresentadas pesquisas recentes relacionadas à problemática do fenômeno da liquefação de cargas sólidas a granel, por diferentes abordagens metodológicas.

O Capítulo 3 delinea-se em torno das metodologias experimentais utilizadas para a obtenção dos parâmetros do TML, resistência ao cisalhamento do IOF e potencial de liquefação através do ensaio de mesa de vibração. Os testes experimentais demonstrados estão descritos pelo código IMSBC, sendo denominados de: Proctor Fagerberg Test e Modified Proctor Fagerberg Test (PFT e MPFT); Flow Table Test (FTT), assim como os descritos e aceitos em normas nacionais e internacionais; além do ensaio de cisalhamento direto e do teste de mesa de vibração.

O Capítulo 4 trata da caracterização dos finos de minério de ferro – IOF, suas propriedades físicas, massa específica e distribuição granulométrica. Nesta seção demonstra-se também a composição das amostras com diferentes teores de finos e conteúdo de umidade utilizadas em todos os testes.

No Capítulo 5 apresentam-se as análises dos resultados e suas discussões. Isso ocorre por meio dos resumos dos artigos oriundos desta tese sobre a influência da relação entre a distribuição de tamanho de partícula de IOF e a resistência ao cisalhamento, publicado na Revista Powder Technology em agosto de 2020. Demonstram-se ainda as análises dos resultados e discussões da relação entre a distribuição de tamanho de partícula IOF e o TML no potencial de liquefação de amostras de finos de minério de ferro através do ensaio de vibração (STT). As análises sobre esse último estudo estão em fase de submissão em periódico.

Por fim, no Capítulo 6 mencionam-se as conclusões e sugestões para a continuação deste estudo através de trabalhos futuros, no que diz respeito à influência da relação entre a distribuição granulométrica do IOF na resistência ao cisalhamento e no TML.

## CAPÍTULO 2

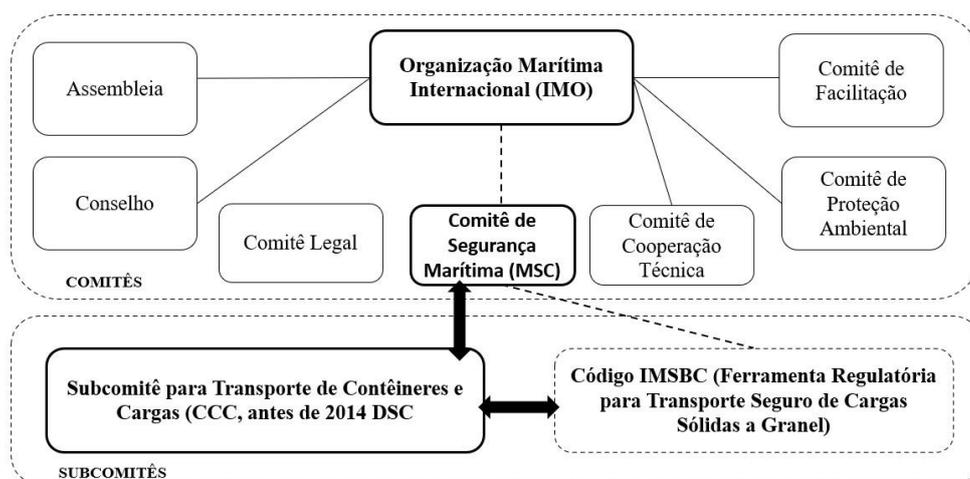
### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 ASPECTOS REGULATÓRIOS DO TRANSPORTE MARÍTIMO DE CARGAS SÓLIDAS A GRANEL

##### 2.1.1 Organização Marítimo Internacional – IMO

A Organização Marítima Internacional (IMO) [4] foi criada, em 1948, numa Convenção de Genebra, e entrou em vigor em 1958. A IMO tem como principal objetivo fornecer mecanismos para cooperação entre Governos no campo da regulamentação e das práticas relacionadas a questões técnicas que afetam o transporte marítimo envolvido no comércio internacional e facilitar a adoção geral de elevados padrões praticáveis em questões relativas à segurança marítima, eficiência da navegação, prevenção e controle da poluição marinha ocasionada por navios.

A IMO [4] é uma agência marítima das Nações Unidas que supervisiona a regulamentação marítima internacional. A principal ferramenta regulatória da IMO para cargas sólidas a granel é o Código IMSBC, o principal instrumento na mitigação do risco de liquefação de cargas. Uma visão geral da estrutura regulatória é mostrada na Figura 2.1.



**Figura 2.1** - Visão geral da estrutura regulatória.

Fonte: ROSE [11].

O Código IMSBC [4] incorpora uma série de controles que visam garantir que as cargas em risco sejam carregadas nos navios graneleiros com um teor de umidade abaixo do necessário para evitar o risco de liquefação, denominado “Limite de Umidade Transportável” (TML).

Outro importante grupo composto pela IMO é o Grupo Técnico de Trabalho em Finos de Minério de Ferro (*Iron Ore Fines Technical Working Group – TWG*). Ele foi estabelecido pela Organização Marítima Internacional (IMO), no final de 2012, para "conduzir pesquisas e coordenar recomendações e conclusões sobre o transporte de IOF" (TWG [12,13]).

O TWG foi constituído não apenas para desenvolver uma programação individual para finos de minério de ferro, mas considerar a adequação dos métodos atuais para determinar o limite de umidade transportável para finos de minério de ferro e estabelecer métodos novos e/ou corrigidos existentes a serem incluídos no Código IMSBC (MUNRO e MOHAJERANI [14]).

### **2.1.2 Código Marítimo de Cargas Sólidas a Granel – Código IMSBC**

O Código Marítimo Internacional de Cargas Sólidas a Granel (Código IMSBC) foi disponibilizado para uso voluntário em 1 de janeiro de 2009 e tem sido implementado de forma obrigatória desde 1 de janeiro de 2011 (IMO [4]). Nele constam informações relacionadas às cargas minerais a granel referenciadas neste estudo, incluindo aquelas para IOF.

Há recomendações sobre as precauções gerais (carregamento, transporte e descarga) e informações sobre cargas que podem se liquefazer, incluindo os procedimentos de teste para essas cargas e suas propriedades individuais. Quanto ao risco associado ao manuseio e transporte, o Código IMSBC classifica os granéis sólidos em três grupos:

- O “Grupo A” compreende aqueles que podem se liquefazer se enviados com um teor de umidade superior ao seu Limite de Umidade Transportável (TML);
- O “Grupo B” são aqueles que possuem um risco químico que pode dar origem a uma situação perigosa em um navio;

- O “Grupo C” são aqueles que não são susceptíveis de liquefazer ('Grupo A') nem possuem um risco químico ('Grupo B').

A designação de grupo está relacionada a regulamentos e procedimentos específicos que precisam ser cumpridos para carregar, transportar e desembarcar a carga com segurança. O IOF utilizado neste estudo é classificado como uma carga do “Grupo

A” e o manuseio deve, portanto, seguir os regulamentos e procedimentos para um material liquefeito.

### **2.1.3 O TML e os testes para o controle da liquefação de cargas**

Um regulamento importante descrito no Código IMSBC é a exigência que todas as cargas de minerais a granel classificadas como “Grupo A” sejam submetidos a testes TML.

Antes de embarcar uma carga do 'Grupo A', a documentação adequada sobre o TML e o teor de umidade real devem ser disponibilizados. Sob nenhuma circunstância uma carga do 'Grupo A' deve ser carregada com teor de umidade superior ao TML. Além disso, se o comandante do navio acreditar que o teor de umidade da carga está acima do TML, uma nova verificação dos certificados deve ser solicitada. O TML é determinado por testes experimentais descritos no Código IMSBC (IMO [4]).

Até o ano de 2013 o Código IMSBC utilizava apenas três métodos de teste para determinar o TML de cargas do 'Grupo A', que são aquelas potencialmente liquefáveis, incluindo IOF (IMO [16]). Os três métodos de teste são: Teste Proctor / Fagerberg (PFT), Teste da mesa de Fluxo (FTT), Teste de Penetração (PT).

Em 2013, o Teste Proctor Fagerberg Modificado (*Modified Proctor Fagerberg Test* – MPFT) foi introduzido, de forma voluntária, pela Organização Marítima Internacional na circular DSC.1 / Circ.71 [16]. O MPFT, às vezes referido como D80, é o único método de teste projetado especificamente para uso com IOF. A abreviatura D80 origina-se de pesquisa anterior realizada por Bengt Fagerberg e Arne Stavang, em 1971, onde o método de compactação foi realizado usando um martelo de 150 g caindo de 150 mm, em vez do martelo de 350 g caindo 200 mm, que é usado para o PFT, na pesquisa de Fagerberg e Stavang [17].

Durante o desenvolvimento do MPFT, a densidade aparente do IOF nos porões de vários graneleiros foi medida, antes e após o transporte, por meio de medições de altura, laser de varredura e teste de penetração do cone. Com a utilização desses dados, concluiu-se que a densidade produzida pela compactação durante o MPFT foi mais do que suficiente para replicar a densidade do IOF nos porões de um graneleiro após o transporte (TWG [18]). Portanto, para determinar o TML de IOF, o teste mais atual e apropriado ao material é denominado Teste Proctor Fagerberg Modificado (*Modified Proctor Fagerberg Test* – MPFT).

## 2.2 O FINO DE MINÉRIO DE FERRO (IOF) DO NO BRASIL

O Brasil tem se mantido entre os três maiores países produtores de minério de ferro junto com a China e a Austrália, que também são grandes produtoras apesar de seus minérios não apresentarem a mesma qualidade dos encontrados no território brasileiro.

No Brasil, a utilização do minério é feita normalmente de duas formas: minérios granulados e minérios aglomerados. Os granulados entre 25,0 mm e 6,00 mm são adicionados nos fornos de redução, enquanto os aglomerados são os minérios finos. Os principais processos de aglomeração são a sinterização e a pelotização indicados, respectivamente, para minérios de granulometria entre 6,00 mm e 0,150 mm (sínter feed) e menores que 0,150 mm (pellet feed), demonstrados na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** - Classificação de produto de minério de ferro no Brasil.

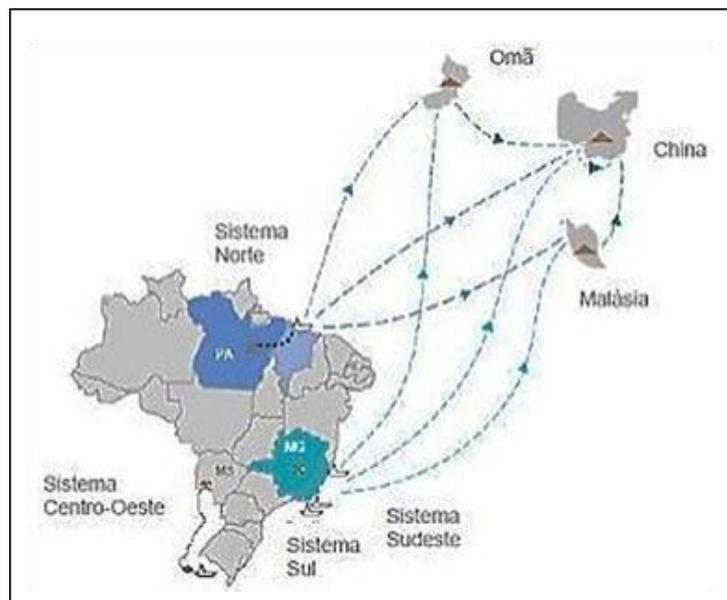
PRODUTO	TAMANHO DE PARTÍCULA
Granulado	(50mm - 6,3mm)
Sínter feed	(6,3 mm - 0,150mm)
Pellet feed	(< 0,150mm)

Fonte: FERREIRA [19].

De acordo Mohajerani et al. [20], a qualidade do minério de ferro está basicamente ligada a três características: química, que corresponde à própria composição (quanto maior o teor de ferro e menor teor de impurezas melhor); física, que se refere à granulometria, ou seja, ao tamanho das partículas e; metalúrgica, que diz

respeito a itens de desempenho que afetam a produtividade durante o processo siderúrgico.

No Brasil, os minérios são exportados por quatro sistemas integrados compostos por: mina, ferrovia, usina de pelletização e terminal marítimo. Na Figura 2.2 demonstra-se os mais importantes, o Sistemas Norte, Sul, sudeste e Centro-Oeste. Desse modo, destaca-se que o Sistema Norte possui a maior produção de minério de ferro, totalizando mais de 45% da produção nacional [3].



**Figura 2.2** - Cadeia integrada global da Vale.

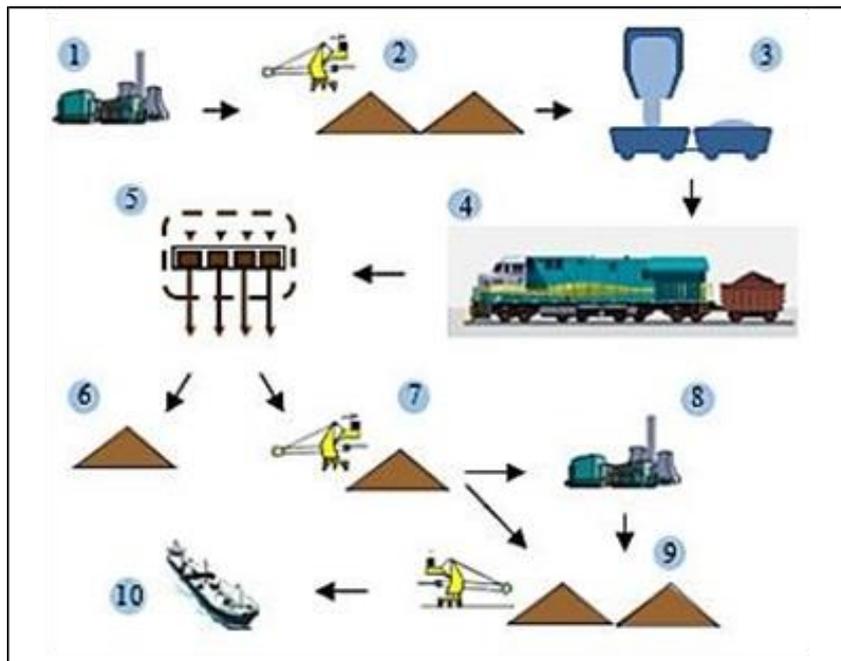
Fonte: VALE [2].

O trajeto entre a mina e o navio envolve diversas operações de manuseio, transporte e estocagem. O processo inicia nas minas, onde é feita a extração, beneficiamento e estocagem do minério. Em seguida, ele é levado até os silos de carregamento dos vagões de trem para serem transportado pela ferrovia. Quando chegam aos portos, os vagões passam pelos viradores, que são equipamentos utilizados para a descarga dos vagões que transportam o minério de ferro. Nestes equipamentos o minério é depositado em uma correia transportadora para o estoque do porto e/ou para o estoque das usinas de pelletização (MEIRELES [21]).

Além disso, após descarga no porto e antes do embarque, o minério é estocado e misturado em pilhas. Por fim, tem-se os píeres para carregamento de navios, onde o minério ou a pelota são transportados. Isso é feito através de um sistema de correias

transportadoras dos estoques do porto e das usinas para, em seguida, serem embarcadas em navios.

A Figura 2.3 apresenta todas as etapas da cadeia de suprimentos desde a extração até o embarque no navio graneleiro: 1) Produção nas minas; (2) Estoque nas minas; (3) Carregamento em vagões; (4) Transporte ferroviário; (5) Descarregamento de vagões; (6) Mercado interno; (7) Transporte para a usina e para o estoque do porto; (8) Pelotização; (9) Estoque no porto; (10) Embarque em navios.



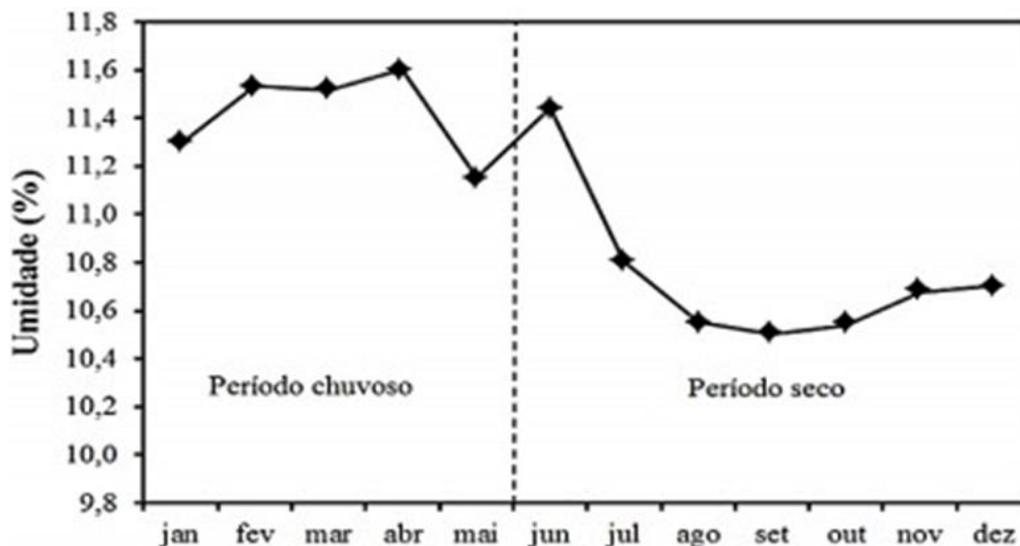
**Figura 2.3** - Cadeia de suprimento do minério de ferro.

Fonte: MEIRELES [21].

O grande problema gerado por toda essa cadeia de suprimentos de produtos de minério de ferro, não só no Brasil como em vários países produtores no mundo é o controle do teor de umidade. O minério de ferro, dependendo de suas propriedades físicas e químicas, pode conter diferentes teores de umidades, podendo ainda variar seus valores de umidade em função da estação do ano.

Nesse sentido, a extração, o refino e o armazenamento dos fins de minério de ferro contribuem para o aumento ou diminuição da umidade que o material contém quando é carregado em navios graneleiros. Por exemplo, o minério de ferro de Carajás, é conhecido por possuir altos teores de umidade e, aliado às condições climáticas no

norte do Brasil, podem chegar a valores de umidade máxima de 11,6%, conforme mostrado na Figura 2.4 (VALE [2]).



**Figura 2.4** - Valores típicos de umidade do minério de ferro Carajás (sínter feed).

Fonte: MEIRELES [21].

O aumento excessivo do teor de umidade do minério de ferro é um problema para o embarque no navio, uma vez que minérios de ferro com tendência a reter umidade são mais suscetíveis a liquefação. Outro grande problema é que o minério de ferro só pode ser embarcado com a umidade inferior ao valor limite de umidade transportável (TML), caso contrário, o minério deverá ficar estocado até que a umidade seja reduzida por drenagem da água livre e ou evaporação (MUNRO e MOHAJERANI [22]).

Esse problema gera custos elevados ao setor e ainda, se descumpridas as normas estabelecidos pelo código IMSBC, há possibilidade de ocorrência de sinistros resultantes em óbitos e/ou prejuízos às embarcações.

### 2.2.1 Acidentes com Suspeita de Liquefação

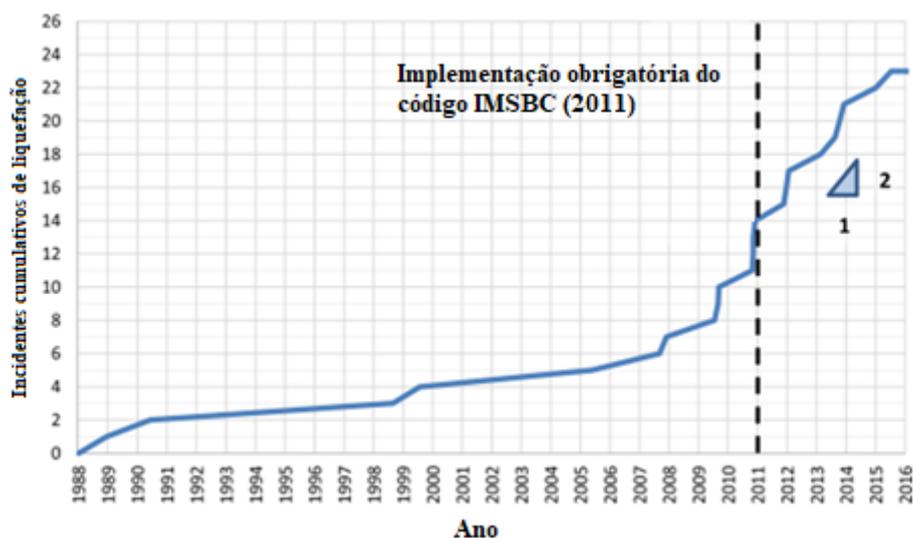
Durante os anos de 1988 a 2017, 26 (vinte e seis) incidentes foram relatados pela IMO, onde a liquefação foi mencionada como a possível causa. Nesses sinistros foi registrada a perda de 171 (cento e setenta e uma) vidas. Dentre os acidentes, 09 resultaram em 29 (vinte e nove) mortes, envolveram o transporte de IOF [23]. A Tabela 2.2 mostra um resumo dos incidentes suspeitos de liquefação a bordo dos graneliros juntamente com o número de vítimas fatais.

**Tabela 2.2** - Incidentes ocorridos entre os anos de 1988 a 2016 relacionados ao tipo de carga e número de vítimas fatais.

Carga sólida a Granel	Classificação da carga de acordo com o Código IMSBC	Incidentes	Vítimas
Bauxita	Grupo C	1	18
Fluorita	Grupo A e B	1	0
Finos de Minério de Ferro	Grupo A	9	29
Minério de Níquel	Grupo A	13	124
Outros Minérios	N/A	2	0

Fonte: IMO [4].

Os acidentes com minério de níquel e finos de minério de ferro estão envolvidos na maioria dos acidentes com suspeita de liquefação. Supõe-se que isso seja atribuído à crescente demanda por minerais originários do Sudeste Asiático da China e da Coreia do Sul (MUNRO e MOHAJERANI [14]). A Figura 2.5 demonstra que os incidentes suspeitos de liquefação a bordo de graneleiros continuam a ocorrer a uma taxa de quase 02 (dois) por ano, mesmo após o período obrigatório de implementação no ano de 2011 do Código IMSBC.



**Figura 2.5** - Incidentes com suspeita de liquefação cumulativos de 1988 a 2016.

Fonte: MUNRO E MOHAJERANI [22].

Munro e Mohajerani [22] evidenciam que fatores adicionais que podem contribuir para o alto número de incidentes incluem o clima tropical das regiões onde os respectivos graneleiros embarcam e desembarcam. Os locais dos portos onde as cargas são carregadas são mal equipadas para realizar os testes necessários para evitar a

liquefação da carga, conforme descritos pelo Código IMSBC. Além disso, ocorreram incidentes em regiões onde o clima pode introduzir umidade adicional na carga.

Green e Kirby [24] descreveram a liquefação de cargas sólidas a granel como um material granular relativamente seco se desenvolvendo em uma massa fluida instável. No entanto, o que mais chamava atenção era o potencial de causar instabilidade no navio. Muitas outras cargas minerais, como minério de níquel e bauxita, experimentaram falhas de liquefação durante o transporte marítimo (HEALEY [25]).

Em muitos casos os fatores que contribuem para o deslocamento de carga resultante são semelhantes, tais como: mar agitado e condições climáticas. Isso decorre provavelmente, em um aumento na amplitude e duração do carregamento dinâmico no navio, elevando, assim, o potencial de liquefação e produzindo ângulos de adernamento maiores e um conseqüente acréscimo na probabilidade de falha de declive.

Anos após o acidente do M.V. Bright Ruby em 21 de novembro de 2011, esses fatores foram indicados como contribuintes ao naufrágio, onde a embarcação virou após ser atingida por ondas e ventos fortes, levando à possível liquefação de sua carga IOF (GREEN e HUGHES [26]). A Figura 2.6 são de dois graneleiros (Asian Forest e Back Rose, respectivamente) que foram perdidos no ano de 2009 com suspeita de liquefação da carga do IOF.



**Figura 2.6** - Incidentes com suspeita de liquefação. Asian Forest e Back Rose, respectivamente.

Fonte: MUNRO E MOHAJERANI [14].

O acidente mais recente com suspeita de liquefação de carga foi com o navio Sul-Coreano Stellar Daisy, em 2017. Ele transportava mais de 260 mil toneladas de

fino de minério de ferro do Brasil para a China. O acidente resultou em 22 (vinte e duas) vítimas fatais e uma das hipóteses para o naufrágio é a liquefação.

Os primeiros relatos de socorro sugeriam que a Stellar Daisy perdeu sua estabilidade e, posteriormente, de forma repentina, afundou. Há indicações de reincidências de acidentes ocasionados pela alteração da umidade em determinados pontos da carga. Diversos estudos sobre liquefação de cargas já afirmam que embora uma carga possa parecer seca, a sua estrutura central pode conter umidade suficiente para causar a sua liquefação.

De acordo com Mohajerani et. al. [20] além dos fatores incontrolláveis, como clima, outros incidentes apresentavam documentação inadequada de teor de umidade, com carga carregada em condições que ultrapassaram o TML, sendo que dos 26 (vinte e seis) sinistros registrados, 05 (cinco) continham cargas carregadas acima do TML. Isso destaca que alguns dos incidentes poderiam ter sido evitados se os procedimentos descritos pelo Código IMSBC tivessem sido seguidos.

### 2.3 PRINCÍPIOS GERAIS DA LIQUEFAÇÃO

Neste estudo serão apresentados os princípios básicos da liquefação para entender os fatores aos quais o IOF pode liquefazer, assim como os conceitos de liquefação, relacionados aos dois tipos de carregamento, ou seja, tensões cíclicas (dinâmicas) ou monotônicas (estáticas). Estabelece-se, além disso, uma ênfase ao caso de liquefação de cargas sólidas a granel durante o transporte marítimo.

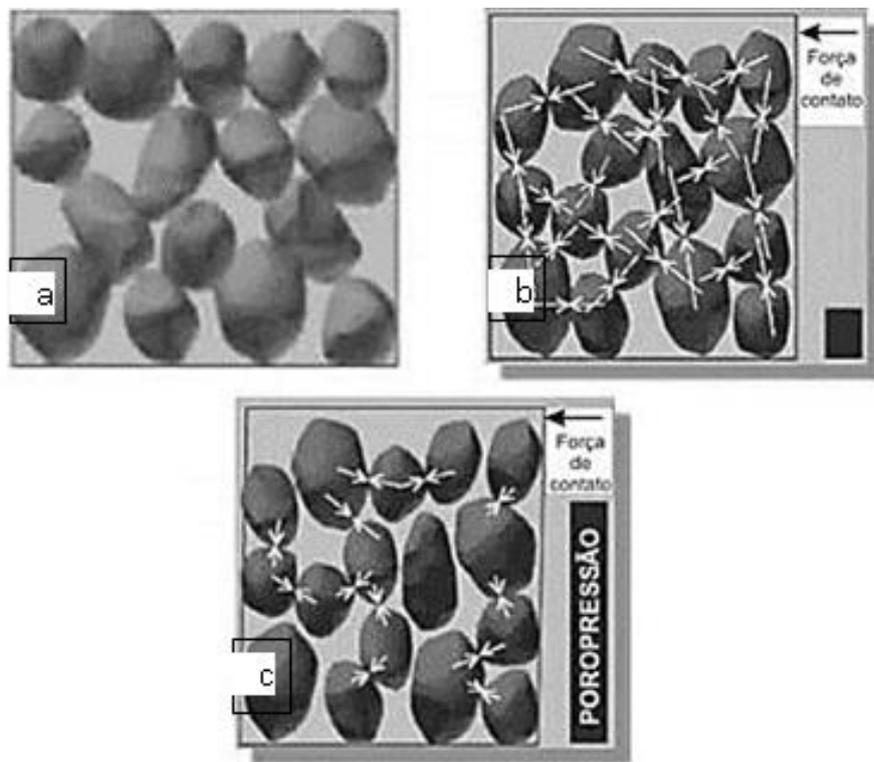
O termo liquefação e ou “liquefazes” foi descrito pela primeira vez no ano de 1920 por Hazen quando detalhava o rompimento da barragem de Cavatares em 1918. No entanto, o primeiro pesquisador a descrever o fenômeno da liquefação foi Terzaghi em seu livro “Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage” no ano de 1925 e, posteriormente, coube a Casagrande, em 1936, determinar uma base teórica para o problema.

Na geotecnia, o conceito de liquefação em solos é descrito como o fenômeno que consiste na transformação de um material granular do estado sólido ao estado fluido, em condições não drenadas, com aumento da poropressão, induzidas por carregamentos cíclicos (liquefação dinâmica) ou monotônicos (liquefação estática). Este comportamento induz a zero a tensão efetiva, com as partículas sólidas perdendo o

contato entre si, em estado de suspensão no solo, que se comporta como líquido viscoso. Este estado de fluidez é denominado liquefação (ISHIHARA [27]).

Uma sequência da descrição clássica do processo geral da liquefação, é apresentado na Figura 2.7, onde a perda crescente do atrito interpartículas durante o fenômeno é uma das causas primárias da perda da resistência ao cisalhamento dos materiais de natureza granular. Pereira [28] descreve o processo da perda da resistência ao cisalhamento dos materiais de natureza granular ligado ao atrito interpartículas pelas seguintes etapas:

A Figura 2.7a demonstra que o comportamento do solo granular e saturado, quando submetido à mudança brusca da estrutura sob carregamentos (estáticos ou dinâmicos), torna-se mais compacto entre as partículas.



**Figura 2.7** - Sequência geral do processo da liquefação.

Fonte: PEREIRA [28].

Na sequência, a Figura 2.7b demonstra que à medida que a água intersticial não é drenada, as partículas se tornam confinadas sob elevadas pressões, não permitindo, assim, a aproximação das partículas sólidas. Isso reduz as tensões de contato e, conseqüentemente, o atrito entre as partículas e a resistência do solo (Figura 2.7b).

Como consequência, as poropressões tornam-se tão elevadas que ocorre uma enorme perda do contato entre as partículas do solo tornando-se menos resistentes, passando a se comportar como um fluido viscoso, resultando no fenômeno da liquefação e na ruptura do solo (Figura 2.7c).

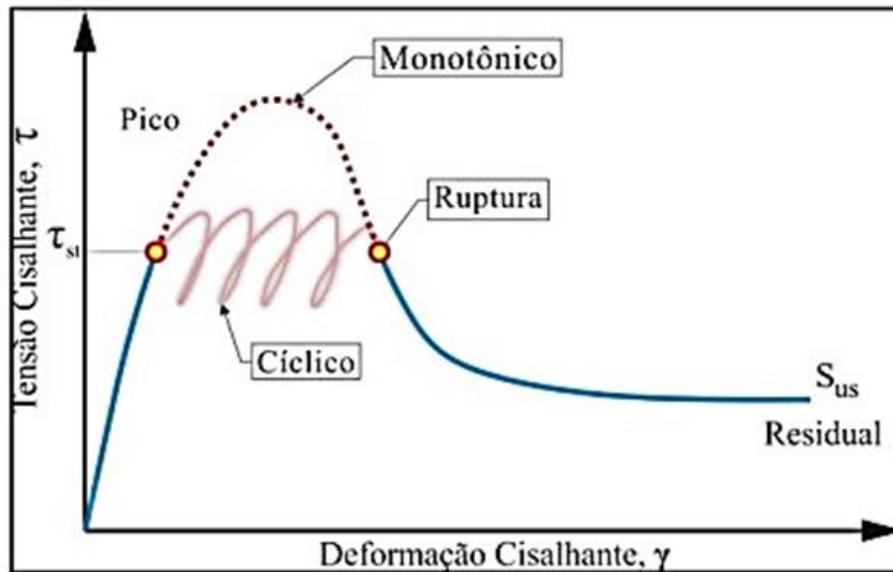
O estudo da liquefação de solos sempre foi amplamente pesquisado e discutido para melhor entender os mecanismos que induziram à ruptura de diversas estruturas civis sujeitas ao fenômeno. A maioria das pesquisas, entretanto, é direcionada à ocorrência do fenômeno sob condições dinâmicas, principalmente, em países com registros constantes de eventos sísmicos (ISHIHARA [27]).

No Brasil, estudos do fenômeno da liquefação em solos são desenvolvidos em função de diversos registros de ruptura em barragens de rejeitos, diques e depósitos de materiais granulares. No entanto, apesar do Brasil ser o segundo maior exportador de minério de ferro no mundo, poucos estudos envolvem o fenômeno da liquefação de cargas sólidas a granel durante o transporte marítimo.

### **2.3.1 Natureza do carregamento: liquefação estática e liquefação dinâmica**

A liquefação é um fenômeno característico de solos granulares e saturado que acontece quando as poropressões aumentam de maneira considerável e abrupta devido a um carregamento, vibração ou esforço solicitante onde o material passa a se comportar como um líquido denso (SEED e IDRIS [29]).

Ainda segundo [29], a liquefação ocorre quando a poropressão no meio se iguala à tensão total. A poropressão é denominada como a pressão que o fluido exerce no interior dos poros dos elementos porosos como os solos. Essas elevações das poropressões no solo são consequências do aumento nas tensões normais e/ou das tensões cisalhantes induzidas pelo carregamento, seja ele estático ou dinâmico, numa condição não drenada. A liquefação pode ser denominada pelos termos: liquefação estática ou liquefação dinâmica, a depender do tipo de evento causador da sua iniciação, como demonstrado na Figura 2.8 no ponto de tensão cisalhante ( $T_{st}$ ).



**Figura 2.8** - Liquefação devido ao carregamento estático ou dinâmico.

Fonte: DAVIES et al. [30].

A liquefação estática é causada pelo aumento da tensão de cisalhamento em um material, como demonstrado na Figura 2.8, geralmente pela aplicação de uma carga monotônica (estática), sob condições não-drenada, causando a geração de excessos de poropressão até um ponto do material em que se liquefaça e se propague rapidamente, a partir desse ponto, para produzir a liquefação total do material (DAVIES et al. [30]).

Ainda segundo Davies et al. [30], a liquefação estática pode estar associada a eventos tais como: sobrecarga, aumento repentino da superfície freática, elevada precipitação pluviométrica, movimentos de massa na área de influência dos depósitos de materiais granulares, dentre outros [30].

A liquefação dinâmica, também chamada de liquefação espontânea, está mais relacionada a carregamentos dinâmicos, ou eventos sísmicos, tais como terremotos. Dois aspectos são mais significativos para a análise da liquefação por indução sísmica: a condição de tensão ativadora e a consequência do fenômeno que, particularmente, depende da magnitude das deformações causadas pelo carregamento.

Neste sentido, a liquefação dinâmica pode propagar-se às camadas superiores, em função do desencadeamento inicial nas camadas inferiores, as quais estão submetidas a um carregamento de base. Nesse caso, o excesso de poropressão das camadas subjacentes apresentará uma tendência de dissipação no sentido ascendente,

fazendo com que o processo seja também propagado até as camadas mais superficiais (SEED e IDRIS [29]).

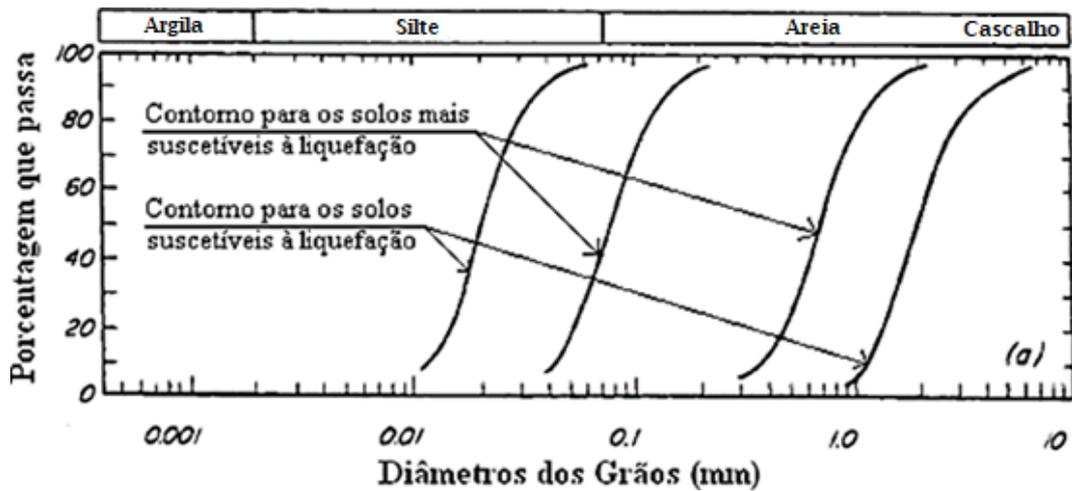
Tanto em condições dinâmicas, quanto em situações de carregamento estático, a chamada resistência liquefeita é basicamente a mesma, independentemente do tipo de carregamento, como demonstrado na Figura 2.8 no ponto de ruptura. Um material granular, submetido a um carregamento cíclico atinge o ponto de ruptura por liquefação, após um número variável de ciclos de carga, para a mesma superfície de colapso provocada por um carregamento estático, muito embora os históricos de carregamento sejam diferentes.

Segundo Poulos [31], a natureza do carregamento não tende a exercer influência no potencial de liquefação de um material granular, sendo função apenas das características do material e do seu estado de compactidade. No entanto, em se tratando de um carregamento cíclico, o número de ciclos está intimamente ligado à magnitude do carregamento. Quando um grande carregamento dinâmico é aplicado a uma massa de solo, gerando elevadas tensões efetivas, são necessárias várias solicitações cíclicas para que estas tensões sejam transferidas para os poros (ISHIHARA [27]).

### **2.3.2 Distribuição granulométrica e teor de finos**

A influência da distribuição granulométrica na susceptibilidade à liquefação dos solos é descrita por Terzaghi et al. [32]. Ele considera que depósitos de solos são susceptíveis à liquefação, se forem suficientemente sensíveis para serem contrativos e com uma permeabilidade tal que não apresente drenagem significativa quando submetidos agitação do solo. Essas características são atualmente utilizadas pela engenharia geotécnica para analisar a susceptibilidade a liquefação do solo pela sua composição através da: distribuição granulométrica e forma das partículas (TERZAGHI [32]).

Tsuchida [33], fundamentado em análise granulométrica em solos que sofreram e não sofreram liquefação, propôs as curvas de contorno da distribuição granulométrica apresentadas na Figura 2.9. O contorno inferior reflete a influência dos finos que reduzem a possibilidade das areias de contraírem durante o cisalhamento. A Figura 2.9 mostra que o solo com D<sub>50</sub> menor do que 0,02 mm ou maior do que 2 mm não são suscetíveis à liquefação.



**Figura 2.9** - Limites granulométricos de suscetibilidade à liquefação.

Fonte: TSUCHIDA [33].

Para Terzaghi et al. [32], em solos bem graduados, a influência da distribuição granulométrica, proporciona menor susceptibilidade à liquefação, pois o preenchimento dos vazios por partículas menores, resulta em uma menor variação volumétrica, sob condição drenada, e em menores valores para poropressão em condição não drenada.

Ishihara [34], atribui a grande resistência à liquefação de areias, contendo siltes plásticos, à coesão dos finos. Portanto, pode-se entender que o teor de finos influencia na suscetibilidade à liquefação pois sua presença reduz a permeabilidade do solo e contribui para a resistência ao cisalhamento, devido ao acréscimo de coesão.

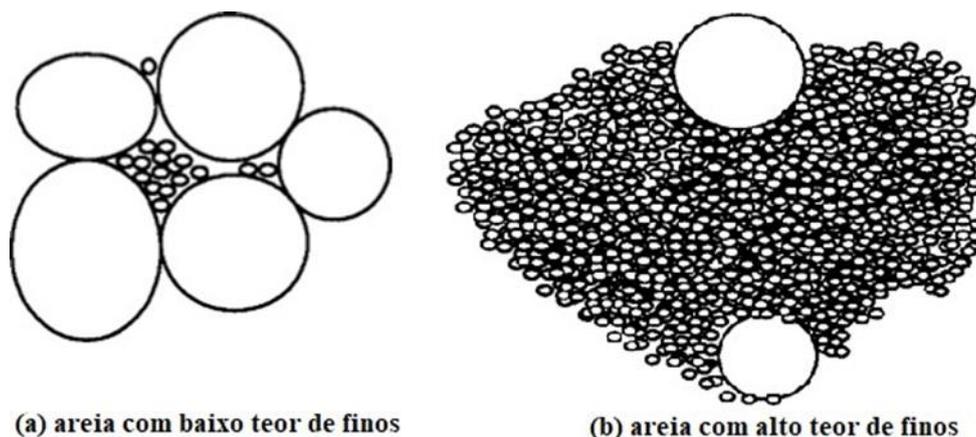
Jradi et al. [41] observaram que, para areias, um aumento de finos não plásticos leva a um aumento na resistência à liquefação. Akhila et al. [42] estudaram o comportamento das areias por simulação numérica em um modelo hipoplástico e descobriram que conforme o conteúdo de finos aumentava, a resistência à liquefação diminuía.

Os estudos de Phana et al. [43], Enomoto [44] e Xenaki e Athanasopoulos [45], descobriram que a resistência das areias à liquefação diminui à medida que o teor de finos não plásticos aumenta até um ponto de transição, após o qual há um aumento na resistência à liquefação com um aumento do teor de finos não plásticos. Finalmente, esses estudos mostraram que a resistência à liquefação da areia siltosa está mais intimamente relacionada à sua razão de vazios e densidade relativa do que ao seu conteúdo de areia.

Polito e Martin [46] realizaram testes triaxial cíclico em solos compostos de misturas areia-silte e concluíram que a resistência à liquefação do solo é controlada pela densidade relativa do solo e é independente do conteúdo de areia do solo. Bensoula et al. [47] observaram que a densidade relativa equivalente e os vazios intergranulares equivalentes definem o comportamento de liquefação do solo argila-arenoso para um limite de teor de finos.

A influência do conteúdo de finos é de grande interesse ao avaliar a resposta de resistência ao cisalhamento e ou resistência à liquefação de solos com misturas de areia-silte. No entanto, a literatura publicada revelou resultados contraditórios sobre o efeito do baixo conteúdo de finos plásticos na suscetibilidade de liquefação em depósitos de solo (PITMAN et al. [35] e YANG et al. [36]).

De acordo com Pitman et al. [35], em seu estudo com a adição de partículas finas de até 40% descobriu-se que as características granulométricas têm efeito significativo na geração do excesso de poropressão de amostras de mistura de areia-silte e de fato, o excesso de poropressão pode ser correlacionado às características de classificação granulométrica e tamanho das partículas. Yang et al. [36], evidenciam que a influência entre partículas com diferentes tamanhos gera alguns efeitos estruturais no material, como o efeito de preenchimento e o efeito ocupação como demonstrados na Figura 2.10.



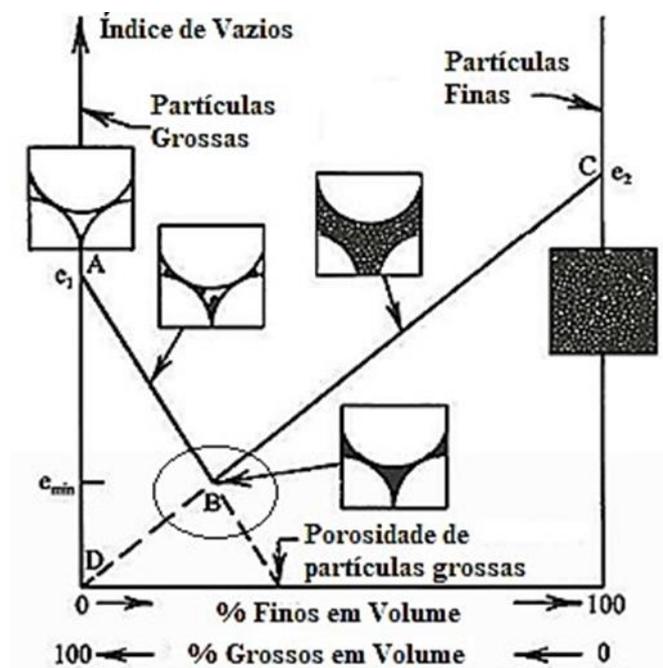
**Figura 2.10** - Efeito preenchimento e efeito ocupação, respectivamente.

Fonte: YANG [36].

Efeito de preenchimento (filling effect): partículas finas ocupam os vazios entre as partículas grossas, quando estas últimas são predominantes, Figura 2.10a.

Efeito de ocupação (occupying effect): partículas grossas geram um volume de sólidos no lugar do volume de vazios entre partículas finas, quando estas últimas são predominantes, Figura 2.10b.

Lade et al. [37] também utilizou o conceito de estado de grão para descrever a resistência estática e cíclica e o potencial de liquefação de solos argilosos. Ele concluiu que existe uma Transitional Fines Content (TFC), ou seja, um conteúdo de finos de transição onde o comportamento dominado por areia passa para um comportamento dominado por finos quando o teor de finos está além do TFC, como demonstrado na Figura 2.11.



**Figura 2.11** - Diagrama esquemático da variação do acréscimo de finos. O ponto B corresponde ao Conteúdo de Finos de Transição (TFC).

Fonte: LADE *et al.* [38].

No diagrama apresentado na Figura 2.11, observa-se que à medida que se aumenta a proporção de finos, o índice de vazios atinge um valor mínimo, indicado pelo ponto B, este denominado de TFC. A partir daí aumenta continuamente em decorrência da substituição de partículas grossas por um grupo de partículas finas.

Os solos contendo partículas finas ou sua presença num determinado material pode influenciar o comportamento do mesmo de duas formas diferentes: de acordo com a quantidade existente e plasticidade apresentada (DAVIES et al. [30]). A presença de

finos plásticos reduz a permeabilidade do solo, entretanto, contribui na resistência ao cisalhamento em função do acréscimo de coesão.

A coesão é conhecida por influenciar fortemente as propriedades de resistência e fluxo de materiais granulares, pois ela provém da atração química entre as partículas e é o parâmetro de resistência do solo independente da tensão normal aplicada. Embora os fenômenos capilares na interface entre dois corpos sólidos sejam bem compreendidos, é muito menos claro como uma amostra de grãos reage à presença de um líquido. O problema é basicamente o mesmo que em meios granulares sem coesão, onde a influência do atrito entre as partículas na resistência ao cisalhamento depende tanto das características da própria lei de atrito quanto da estrutura granular.

Os efeitos das forças interpartículas são que as partículas finas tendem a aderir umas às outras, e externamente parecem exibir coesão (ISHIHARA [34]). Assim, as partículas finas, dependendo de seus tamanhos, podem estar presentes entre e separar as partículas maiores de areia ou podem estar presentes nos espaços vazios entre as partículas maiores de areia. Isso fará a diferença no potencial de liquefação da areia siltosa fina. Na verdade, um menor nível de coesão leva a uma maior mobilidade das partículas.

Para Lambe e Withman [38], a maior parcela da resistência ao cisalhamento dos solos deve-se ao atrito entre as partículas, sendo este expresso pelo conhecido ângulo de atrito. O ângulo de atrito interno depende da força normal aplicada e constitui-se no máximo ângulo que a componente tangencial pode exercer em relação à força normal ao plano, sem que ocorra o deslizamento. A resistência ao cisalhamento de solos granulares está diretamente e quase que restritamente ligada ao atrito entre as partículas (ISHIHARA [27]).

Os parâmetros de resistência podem ser determinados através de ensaios de laboratório (cisalhamento direto e triaxiais). Os valores de ângulo de atrito interno e coesão são específicos para cada tipo de solo e, com a aplicação de um critério de ruptura pode-se avaliar as condições de ruptura do material.

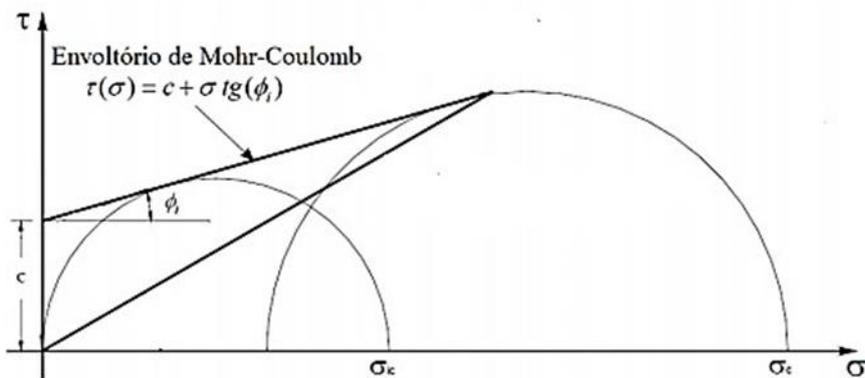
O comportamento dos solos é reconhecidamente bem definido através do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, onde a resistência ao cisalhamento é composta por duas parcelas, uma devido à coesão e outra devido ao atrito interno, conforme apresentado

pela Equação 2.1. Seguindo-se a teoria apresentada por Terzaghi [39], sempre que o solo estiver numa condição saturada, a resistência ao cisalhamento dependerá da tensão média intergranular, ou seja, da tensão efetiva atuante. Nestas condições, a Equação 2.1 deverá ser expressa:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (2.1)$$

onde  $\sigma$  é a tensão normal e  $\tau$  tensão cisalhante atuando em um plano, os parâmetros  $c$  e  $\phi$  são a coesão e o ângulo de atrito do material, respetivamente.

De acordo com a Equação 1, o comportamento das tensões atuantes na superfície de resistência de Mohr-Coulomb é apresentado na Figura 2.12. A ruptura normalmente ocorre quando a tensão cisalhante atuante no plano de resistência alcança o valor da tensão cisalhante de resistência do material. A envoltória de Mohr-Coulomb é comumente uma curva, embora possa ser satisfatoriamente ajustada por uma reta no intervalo de tensões normais de interesse.



**Figura 2.12** - Representação gráfica nos semicírculos de Mohr-Coulomb do ângulo de atrito interno e coesão.

Fonte: TERZAGHI [39].

## 2.4 LIQUEFAÇÃO DE CARGAS SÓLIDAS A GRANEL

Segundo Jefferies e Been [40], em se tratando da ocorrência da liquefação de solos em estruturas civis, o tempo do fenômeno é curto, variando de alguns minutos a dezenas de minutos devido o fenômeno ocorrer sob condições dinâmicas. No entanto, no caso de estruturas como as dos navios graneleiros onde os carregamentos são impostos pelas ondas do mar, pode demorar horas para provocar tensões de

cisalhamento na carga transportada, e isso explicaria a complexidade de entender o fenômeno da liquefação de cargas durante o transporte marítimo

Apesar de se conhecer amplamente todas as características e propriedades de falhas em solos, os mecanismos que fazem com que uma determinada carga a granel se desloque dentro de um navio graneleiro, são complexos e pouco conhecidos. O deslocamento de uma carga a granel dentro de um porão de navio pode ocorrer por três modos de falha (mostrado na Figura 2.13) (ROSE [11]):



**Figura 2.13** - Os três tipos diferentes de deslocamento de carga que podem ocorrer dentro de um porão de carga.

Fonte: ROSE [11].

- Liquefação da carga;
- Falha de declive;
- Deslizamento de massa.

O termo 'liquefação de carga', no contexto desta tese, é usado para descrever o fenômeno pelo qual um aumento na poropressão contribui para uma perda de resistência ao cisalhamento, causando deslocamento da carga e em alguns casos óbitos e prejuízos às embarcações. Em geral, a carga é normalmente carregada apenas parcialmente saturada, e durante uma viagem, pode ocorrer migração de umidade. Além disso, as tensões cíclicas das vibrações de um navio e das ondas do mar causam rearranjo de partículas e compactação da massa (MOHAJERANI et al. [20]).

Essa compactação da carga resulta em uma diminuição do volume vazio entre as partículas e migração de água dentro dos poros e/ou liberação ou compressão do ar

intersticial que levaria a níveis aumentados de saturação em algumas partes da carga. Isso pode levar à transferência de tensão da carga para a água dos poros, acompanhada por perda de tensão efetiva e uma redução significativa da resistência ao cisalhamento, tornando a carga suscetível ao deslocamento. Diz-se então que o material foi liquefeito, comportando-se fluido denso (ROSE [11]).

A falha de declive ocorre quando as forças de cisalhamento aplicadas a partir dos movimentos do navio superam as forças de atrito e de coesão que fornecem resistência estática a pilha de minério de ferro. Ao contrário da liquefação, isso pode ocorrer em cargas úmidas ou secas. As forças que causam a instabilidade por falha de declive estão, principalmente, associadas à gravidade e a migração de umidade, enquanto a resistência à ruptura é derivada, principalmente, de uma combinação da geometria do declive e da resistência ao cisalhamento do material granular (ROSE [11]).

O deslizamento de massa ocorre devido à perda de resistência ao cisalhamento entre as partículas dentro da carga granular (na 'interface intergranular'), ou seja, o deslizamento de massa ocorre pela falta de resistência ao cisalhamento entre as partículas da carga granular e o convés de aço do porão (interface aço-carga) e resulta em uma mudança significativa e rápida no centro do navio. O atrito entre esta interface (que pode ser expresso em termos do ângulo de atrito) dependerá das características da superfície do aço e da interface do material de carga (ROSE [11]).

Ainda segundo Rose [11] dependendo da intensidade podem ser prejudiciais à estabilidade do navio, entretanto, a falha de declive e o deslizamento de massa, ao contrário da liquefação, basicamente não envolvem a geração de excesso de poropressão, e podem ocorrer mesmo com material a granel seco. O autor destaca ainda que os três modos de falha descritos acima podem ocorrer sequencialmente, ou simultaneamente, durante uma viagem.

Para Munro e Mohajerani [22] certas combinações de finos, umidade e mudanças na pressão dos poros dentro das cargas a granel sólidas durante o transporte marítimo resultam em uma massa agindo como um líquido (MUNRO e MOHAJERANI [22]), causando mudanças rápidas no centro de gravidade da embarcação e, possivelmente, fazendo com que o navio vire.

Mohajerani et al. [20], descrevem que os vários mecanismos de modos de falha geralmente ocorrem em estágios específicos da viagem, quando as condições de cada tipo de material são alcançadas, muitos desses relacionados à distribuição granulométrica e ao conteúdo de umidade. Ainda segundo Mohajerani et al. [20], os fatores que são determinantes para induzir a liquefação dentro de um navio carregado de sólido a granel são: os movimentos do navio, a compactação da carga e a migração de umidade. Zhou et al. [57] realizaram testes de compressão uniaxial e cisalhamento direto (DSTs) em amostras de IOF em uma ampla faixa de teor de umidade e misturas com diversas granulometrias para estudar as propriedades mecânicas da camada aderente das partículas de minério de ferro, sem tendência clara entre o teor de umidade e o ângulo de atrito interno.

Wang et al. [58] realizaram testes de cisalhamento triaxial cíclico em amostras de IOF e solos arenosos e encontraram comportamento de mobilidade cíclica semelhante para amostras densas e amostras soltas por liquefação. Wang et al. [56] também realizaram testes de laboratório para análise de infiltração e resposta dinâmica de células IOF. O estudo encontrou uma envoltória que indica o nível máximo de água para um determinado grau inicial de saturação, independentemente da densidade do IOF.

Wei et al. [59] estudaram os efeitos das propriedades das partículas no ângulo de repouso e distribuição da porosidade da pilha de minério de ferro, observando que tanto o ângulo de repouso quanto a porosidade são afetados pelo formato da partícula.

Ferreira et al. [19] apresentaram um modelo de regressão empírico que permite estimar o IOF TML a partir da densidade e razão de vazios obtidas em um único ponto da curva de compactação Proctor-Fagerberg, realizada a 9% de umidade. O modelo foi validado com 62 amostras de IOF e mostrou um bom ajuste entre o TML observado e o previsto.

Diversos estudos para diferentes variações de minério de ferro, são encontrados na literatura relacionados à distribuição granulométrica (LISTER e WATERS; NYEMBWE et al. [48- 50]), cinética de absorção de água (LV et al. [51]), propriedades geotécnicas (CHEN et al.; CAVALCANTI e TAVARES [52,53]), estabilidade durante o transporte marítimo (CHEN et al. [54]) e caracterização do material (GUSTAFSSON

et al. [55]). No entanto, eles não contemplam, completamente, as complexas interações entre partículas para diferentes faixas granulométricas e conteúdo de IOF.

Atualmente, ainda são necessários estudos que possibilitem o entendimento das condições e parâmetros sob os quais o IOF pode se liquefazer, para atuar preventivamente no que diz respeito à estabilidade da carga durante o transporte marítimo. A correlação do potencial de liquefação com a distribuição granulométrica do IOF é de grande interesse para as empresas de transporte de minério, pois elas possuem uma variedade de IOF com diferentes tamanhos de partículas que podem ser misturados para minimizar o potencial de liquefação cargas sólidas a granel durante o transporte marítimo.

Poucos estudos foram realizados sobre a influência da distribuição de tamanho de partícula IOF no potencial de liquefação. Kwa e Airey [64] estudaram o comportamento de liquefação do carregamento cíclico e o efeito do conteúdo de finos na localização da linha de estado crítico (Critical State Lime - CSL), que é a linha limite que separa os estados do solo liquefável e não liquefável (JU et al. [61]).

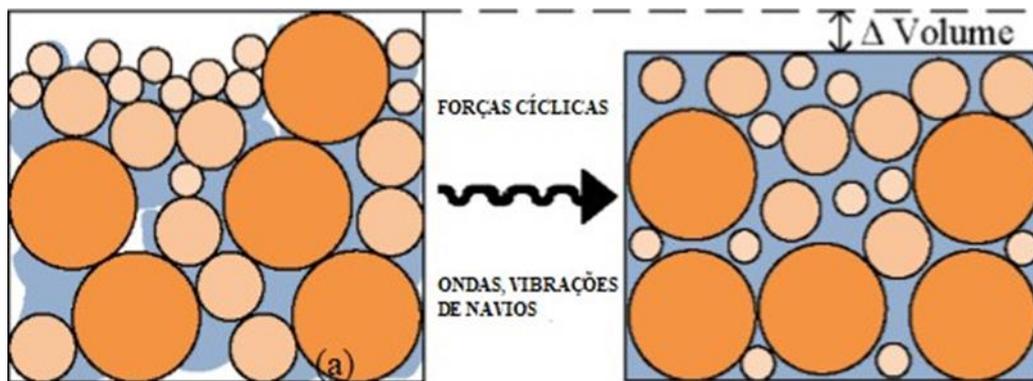
Ju et al. [61] concluíram que o uso de CSL fornece uma escolha conservadora ao avaliar o potencial de liquefação, que amostras mais densas resistem a ciclos mais longos quando têm o mesmo teor de finos e que amostras com a mesma densidade são mais resistentes à falha cíclica se contiverem maior teor de finos.

Os estudos recentes de Kwa e Airey [65] sobre os efeitos do grau de saturação e do conteúdo de finos no comportamento de liquefação cíclica em materiais insaturados foram realizados usando testes triaxiais cíclicos insaturados. Um método foi desenvolvido para estimar o número de ciclos de amostras com diferentes graus de saturação e conteúdo de finos são capazes de suportar.

Os IOF apresentam um comportamento complexo quando sofrem liquefação que é diferente daquele típico comportamento dos solos, devido ao fato de serem transportados em navios graneleiros. A energia transmitida das ondas e do motor da embarcação varia da energia produzida a partir de causas mais comuns de liquefação, como terremotos. Esse fator pode levar o IOF à combinação pouco conhecida de liquefação estática e dinâmica. Essa energia consolida o IOF, à medida que vai sendo

transportado, reduz a razão de vazios do material mais próximo ao fundo do porão e aumenta seu grau de saturação [20].

Uma carga sólida a granel estável, parcialmente saturada, (Figura 2.14a) pode compactar devido a forças cíclicas transmitidas pelas ondas do mar. Esta compactação causa o movimento da água dentro dos vazios, resultando em um aumento na pressão da água dos poros e perda de resistência ao cisalhamento da carga entre os contatos intergranulares (Figura 2.14b) [10].



**Figura 2.14** - Carga a granel antes de sofrer a compactação e após a compactação.

Fonte: ROSE [11].

O fenômeno da liquefação pode ser observado quando os espaços entre as partículas (volume de vazios) são reduzidos com a compactação do material devido aos movimentos do navio. A redução no volume de vazios aumenta a poropressão que, por sua vez, reduz a fricção entre as partículas e, conseqüentemente, a parcela de resistência devido ao atrito (MUNRO e MOHAJERANI [5]).

Durante o transporte marítimo, as cargas se reorganizam devido a vibração e compactação, podendo ocasionar na perda da capacidade de retenção de água, aumento do poropressão e diminuição da resistência ao cisalhamento entre as partículas. Nessas condições a água eleva-se até o topo da superfície livre e o movimento do navio pode fazer com que as cargas liquefeitas se desloquem de modo que o navio vire (DAOUD et al. [63]).

Pesquisas recentes relacionadas à liquefação cíclica de cargas sólidas a granel durante o transporte marítimo foram realizadas usando modelos em escala (MUNRO e MOHAJERANI [23,8]) e microescala, análise numérica por simulação (WEI et al.; JU et al. [59-63]), teste triaxial (KWA e AIREY; CHEN et al. [64-66]), sistema de

drenagem oscilatória experimental (LISTER e WATERS [48]) e teste de mesa de vibração (KOROMILA et al.; KWA et al. [67-68]).

O teste de mesa de vibração (STT) é um procedimento experimental relativamente simples que tem sido usado para modelar o comportamento de solos e areias quando submetidas às condições de carregamento sísmico. Estudos recentes, usaram a shake table para investigar o comportamento da liquefação de diferentes areias reforçadas por colunas de pedra (BAYATIA e BAGHERIPOUR [69]) e características de resposta sísmica de camadas de solo liquefáveis (ADAMPIRA et al. [70]).

Nesses estudos, foi observada uma melhora na resistência à liquefação com o aumento da densidade do solo e ainda foram observados excesso de poropressão e recalques significativos nos solos liquefeitos. No entanto, a liquefação de cargas de minério durante o transporte marítimo ainda é um problema em aberto. Poucos trabalhos de pesquisa usando o teste da mesa de vibração (STT) foram relatados com amostras de finos de minério de ferro (OF).

Estudos atuais utilizaram teste triaxial [58,73], teste de cisalhamento direto [74] e teste de centrifugação [75] para compreender e avaliar o potencial de liquefação de IOF. Nestes tipos de testes, as condições de tensão e deformação são significativamente afetadas pelas condições de contorno, e as condições de carregamento buscam representar as condições reais, inclusive relacionada ao movimento do navio graneleiro. Assim, há indicação que comportamento do IOF, incluindo liquefação, sob as condições do transporte marítimo, podem ser observados usando STT.

Em Munro e Mohajerani [22] foi utilizada mesa de vibração no estudo da variabilidade das propriedades geotécnicas de IOF em diferentes teores de umidade, observou-se que o potencial de liquefação do IOF é em função do tempo de carregamento cíclico e do teor de umidade inicial. Neste estudo [22] foi desenvolvido um aparato chamado IOF Plunger para observar a resistência ao cisalhamento aparente de uma amostra de IOF sob carregamento cíclico usando mesa de vibração, verificou-se indicações de liquefação nas amostras de IOF em teores de umidade menores que o TML obtido pelo MPFT.

O estudo mais recente é de Kwa et al. [68] em que foi usado STT para compreender o comportamento de liquefação cíclica de materiais bem classificados com

distribuição de tamanho de partícula e densidade semelhantes ao IOF, sob condições similares de carregamento do transporte marítimo de carga a granel. Em todos esses estudos não são propostos controles quantitativos para o potencial de liquefação de IOF.

## CAPÍTULO 3

### 3 TESTES EXPERIMENTAIS

#### 3.1 TESTE DE MESA DE FLUXO (FTT)

O FTT foi realizado conforme proposto no Apêndice 2 do Código IMSBC [4]. Para o procedimento são necessários os aparatos demonstrados na Figura 3.1a e Figura 3.1b, dentre os quais: mesa de fluxo padrão e molde cônico ASTM (C230-68) e tamper de pressão com 30 mm de diâmetro.



**Figura 3.1** - Aparelho típico do teste de mesa de fluxo (a) e (b) amostra e remoção do molde cônico.

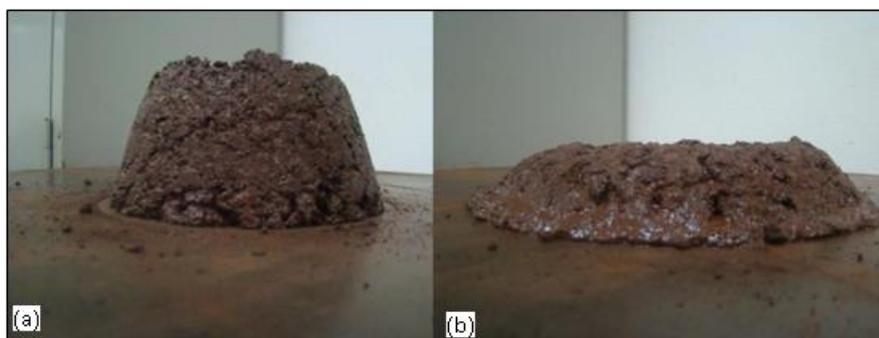
Para todos os ensaios desta tese foram utilizados, coluna graduada de vidro bureta com capacidades de 100-200 ml e 10 ml, balança com precisão com duas casas decimais, conforme a norma NBR ISO 3087 e estufa de secagem com um intervalo de temperatura controlado de 100°C no máximo 110°C, conforme a norma NBR ISO 3087, e outros equipamentos como: bandejas, espátulas, pincel e pá de acordo com a norma NBR ISO 3082.

Cada amostra foi compactada em três camadas em um molde cônico no centro da mesa de fluxo. A compactação foi realizada utilizando uma haste de compactação ajustada a uma pressão de, aproximadamente, 550 kPa com uma cabeça de martelo de 30 mm de diâmetro. A pressão de compactação ( $P$ ) foi determinada antes de realizar o FTT usando a Equação (3.1).

$$P = \rho \times d \times g \quad (3.1)$$

onde  $\rho$  é a densidade aparente ( $4.700 \text{ kg/m}^3$ ) obtida com a compactação padrão Proctor, conforme descrito na NBR ISO 3852 [76];  $d$  é a profundidade máxima de carga (12 m); e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Em cada compactação, o molde foi cuidadosamente removido e, em seguida, a mesa de fluxo foi levantada e baixada 50 vezes de uma altura de 12,5 mm a uma taxa de 25 vezes / min. Este procedimento foi repetido com diferentes teores de umidade até que a deformação plástica foi vista na amostra e foi confirmada com medidas de altura e largura. O ponto de mudança entre as amostras que apresentam deformação plástica e as que não apresentam deformação plástica é conhecido como Ponto de Umidade do Fluxo (FMP), conforme Figura 3.2a e Figura 3.2b.



**Figura 3.2** - Amostra acima do FMP; (a), mostrando pequena deformação plástica e Amostra abaixo do FMP; (b), mostrando deformação plástica.

Quando foi observado que a amostra excedeu o FMP, a amostra foi secada em estufa junto com a amostra de teor de umidade logo abaixo do FMP, para que o teor bruto de água (GWC) de cada um pudesse ser calculado. A média desses dois valores GWC é o FMP, que é calculado como:

$$FMP = \frac{\frac{m_1 - m_2}{m_1} + \frac{m_3 - m_4}{m_3}}{2} \times 100, \text{ em percentual} \quad (3.2)$$

Onde  $m_1$  é a massa da amostra logo acima do estado de fluxo;  $m_2$  é a massa da amostra logo acima do estado de fluxo após a secagem;  $m_3$  é a massa da amostra logo abaixo do estado de fluxo;  $m_4$  é a massa da amostra logo abaixo do estado de fluxo após a secagem.

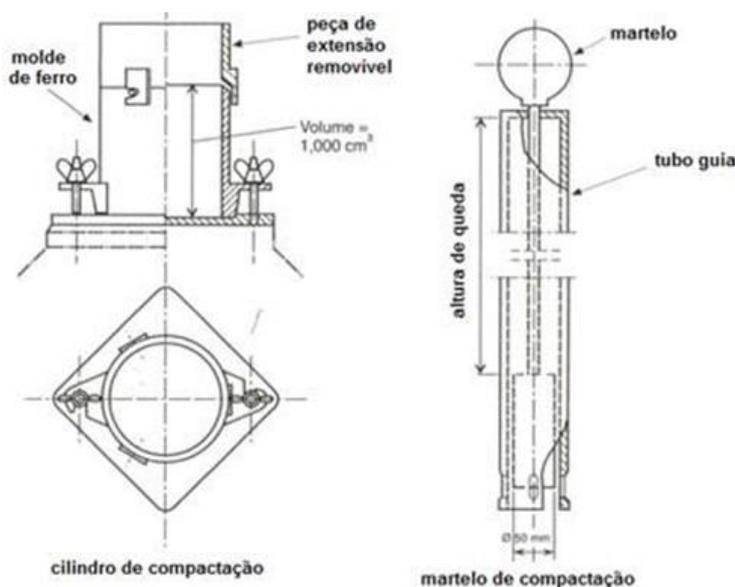
O TML será 90% do FMP, ou seja:

$$TML = FMP \times 0,9, \text{ em percentual} \quad (3.3)$$

### 3.2 TESTE PROCTOR FAGERBERG (PFT) E TESTE PROCTOR FAGERBERG MODIFICADO (MPFT)

Para os artigos 1 e 2, o TML foi obtido através do método de teste Proctor/Fagerberg e Proctor / Fagerberg Modificado respectivamente, seguindo os procedimentos do Código IMSBC [4]. O método de teste é baseado no uso do aparelho Proctor desenvolvido, em 1933, na área de mecânica do solo pelo engenheiro Ralph Proctor, e foi adotado pela Organização Marítima Internacional, para uso no Código entre os 1991 e 1998. O teor de umidade crítica no teste Proctor / Fagerberg e do teste Proctor/ Fagerberg Modificado foi adaptado e hoje também é conhecido como TML.

O aparelho Proctor, Figura 3.3, consiste em um molde cilíndrico de ferro com aproximadamente 1.000 cm<sup>3</sup> de volume com uma peça de extensão removível (mesmo molde da norma ABNT NBR 7182:2020 e uma ferramenta de compactação guiada por um tubo aberto na parte inferior (o martelo de compactação) com peso de 350g para o PFT e 150g para o MPFT.



**Figura 3.3** - Equipamento típico utilizado na execução do teste Proctor Fagerberg.

Fonte: Apêndice 2 do Código IMSBC [4].

Para determinar a densidade relativa do material sólido de acordo com um padrão reconhecido nacional ou internacionalmente foi utilizado um picnômetro a água. Este procedimento foi descrito no capítulo 4 desta tese.

O PFT e MPFT envolve a compressão de uma amostra em um cilindro padrão com teor de umidade variável para produzir uma curva de compactação e determinação do TML. Para a determinação do TML por meio do PFT e MPFT foi necessário primeiro secar a amostra em uma estufa de secagem com intervalo de temperatura controlado de 100°C a no máximo 105°C.

O código IMSBC estabelece que a quantidade total do material de teste deve ser pelo menos três vezes maior que a necessária para toda a sequência de teste. Os testes de compactação são executados para cinco a dez diferentes conteúdos de umidade. As amostras são ajustadas para obter amostras parcialmente secas a quase saturadas.

Em cada teste de compactação, uma quantidade adequada de água é adicionada à amostra do material de teste e o material da amostra é suavemente misturado. Aproximadamente um quinto do molde é preenchido com a amostra e, em seguida, o incremento é compactado uniformemente sobre a superfície do incremento. A compactação é executada soltando o martelo de compactação 25 vezes através do tubo guia.

Uma das diferenças dos testes Proctor Fagerberg para o Proctor Fagerberg Modificado consiste no peso do martelo compactador e na altura de queda através do tubo guiado. Para o teste Proctor Fagerberg as camadas são compactadas por um martelo com peso 350g a uma altura de queda de 20 cm. Porém para o teste do Proctor Fagerberg modificado o peso do martelo diminui para 150g e sua altura de queda para 15 cm, como apresentado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** - Tabela de diferenças entre os testes Proctor Fagerberg e Proctor Fagerberg Modificado

	Proctor Fagerberg Modificado (MPFT)	Proctor Fagerberg (PFT)
Peso do martelo	150g	350g
Altura de queda	15 cm	20 cm

É importante ressaltar que a diferença do PFT e MPFT decorreram dos estudos desenvolvidos pelo Grupo de Trabalho Técnico – TWG (2013), concluíram que o MPFT é o teste mais indicado e o único teste específico para fins de minério de ferro

na determinação do TML. A Figura 3.4, são mostrados os dois soquetes de compactação do MPFT e PFT, respectivamente.



**Figura 3.4** - Martelo compactador para o teste MPFT, peso do martelo 150g, com altura de queda de 15cm e martelo compactador para o teste PFT, peso do martelo 350g, tubo guia com altura de queda de 20cm, respectivamente.

Fonte: Adaptado do apêndice 2 do Código IMSBC [4].

O desempenho é repetido para todas as cinco camadas. Quando a última camada é compactada, a peça de extensão é removida e a amostra é nivelada ao longo da borda do molde com cuidado. Quando o peso do cilindro com a amostra compactada é determinado, o cilindro é esvaziado, a amostra é secada a 105°C e o seu peso é determinado. O teste é então repetido para as outras amostras com diferentes teores de umidade.

Para a obtenção de uma curva de compactação completa, foram realizados cinco ensaios, com diferentes teores de umidade e sem reaproveitamento da amostra. Usando a densidade de sólidos medida ( $d$ ), os parâmetros de conteúdo de água em volume ( $e_v$ ), razão de vazios ( $e$ ) e grau de saturação ( $S$ ) foram calculados usando a Equação (3.4), (3.5) e (3.6), respectivamente.

$$e_v = \frac{\text{Volume Água (cm}^3\text{)}}{\text{Volume Sólido (cm}^3\text{)}} \times 100 \quad (3.4)$$

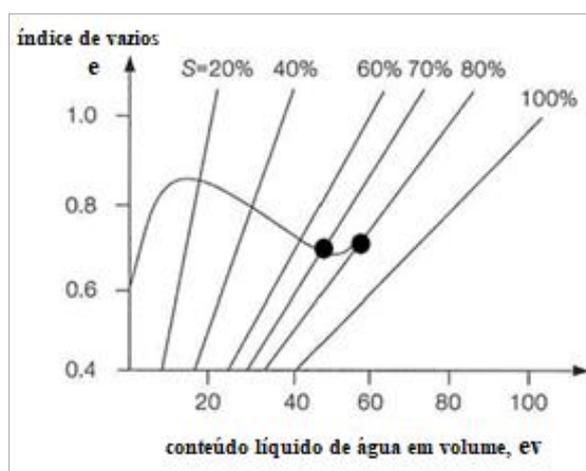
$$e = \frac{\text{Volume Vazio}(\text{cm}^3)}{\text{Volume Sólido}(\text{cm}^3)} \times 100 \quad (3.5)$$

$$S = \frac{e_v}{e} \quad (3.6)$$

A apresentação dos testes de compactação é representada através de uma curva de compactação específica com diferentes teores de umidades. O valor calculado da relação de vazios ( $e$ ) é plotado como ordenada em um diagrama com conteúdo líquido de água ( $e_v$ ) e grau de saturação ( $S$ ) como os respectivos parâmetros de abscissa, apresentada em Figura 3.5.

Vale ressaltar novamente a diferença na apresentação dos testes PFT e MPFT, onde o valor do TML para o PFT é a resultante da interceptação da curva de compactação com a reta correspondente a 70% da saturação e o TML no MPFT é a resultante da interceptação da curva de compactação com a reta correspondente a 80% da saturação, como demonstrado na Figura 3.5. O TML é calculado usando a Equação (3.7), expresso como GWC por porcentagem de massa.

$$\text{TML} = \frac{100e_v}{100d + e_v} \quad (3.7)$$



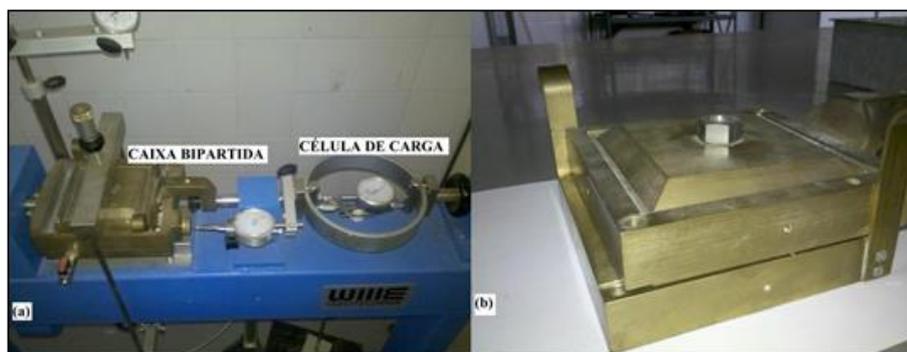
**Figura 3.5** - O TML no PFT é a resultante da interceptação da curva de compactação com a reta correspondente a 70% da saturação e o TML no MPFT é a resultante da interceptação da curva de compactação com a reta correspondente a 80% da saturação.

Fonte: Apêndice 2 do Código IMSBC [4].

### 3.3 TESTE DE CISALHAMENTO DIRETO (DST)

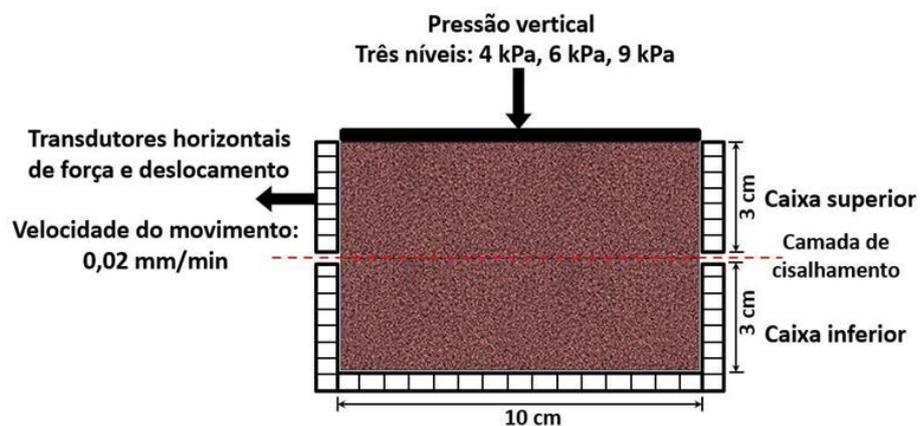
Para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras de IOF utilizou-se o ensaio de cisalhamento direto (Direct Shear Test – DST) descrito pela ASTM D3080/D3080M-11 [77].

Os aparatos utilizados no ensaio do DST consistem em: caixa bipartida de seção transversal quadrada de  $10 \times 10 \times 6$  cm, célula de carga, motor de deslocamento, pesos, demonstrados na Figura 3.6. Também foram utilizados balança com precisão de 0,05%, bandejas, espátulas, pincel e pá conforme a norma NBR ISO 3082.



**Figura 3.6** - Aparatos do ensaio de DST. (a) Equipamento de ensaio de cisalhamento direto com célula de carga e (b) caixa de metal bipartida.

As amostras IOF foram moldadas na caixa de metal de seção transversal quadrada de  $10 \times 10 \times 6$  cm. A configuração do teste utilizado nesta tese é mostrada na Figura 3.7. Os ensaios foram realizados em três etapas, utilizando um aparelho de cisalhamento direto e para permitir a drenagem de água intersticial livre durante o teste, duas pedras porosas foram inseridas na parte superior e inferior da amostra.



**Figura 3.7** - Teste de cisalhamento direto. Diagrama esquemático.

Na primeira etapa, a amostra foi submetida a uma tensão de confinamento de 11 kPa, que não produziu deformações significativas na amostra.

Na segunda etapa, a tensão de confinamento foi removida e uma carga vertical constante foi aplicada à amostra compactada, e para cada conjunto de amostras (mesmo teor de umidade e finos) foram aplicadas cargas normais com 4 kPa, 6 kPa e 9 kPa.

No terceiro estágio, uma carga de cisalhamento com uma velocidade de deslocamento horizontal constante de 0,4 mm / min foi aplicada à metade superior da caixa de metal fendido até aparecer uma deformação horizontal de 6 mm. A velocidade adotada no teste foi determinada previamente para garantir a dissipação do excesso de pressão dos poros. A falha foi determinada quando a força de cisalhamento medida começou a diminuir após atingir o máximo.

A força lateral foi medida pela célula de carga e os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão de Coulomb e ângulo de atrito interno) foram determinados usando o modelo de Mohr-Coulomb. A tensão de cisalhamento foi plotada como uma função da tensão normal no diagrama  $\tau - \sigma$ . Dentro da precisão experimental, os dados foram ajustados em linha reta de acordo com o modelo de Mohr-Coulomb, onde a resistência ao cisalhamento é dada por:

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tg } \phi \quad (3.8)$$

Onde:  $\phi$  é o ângulo de atrito interno; e  $c$  é a coesão de Coulomb.

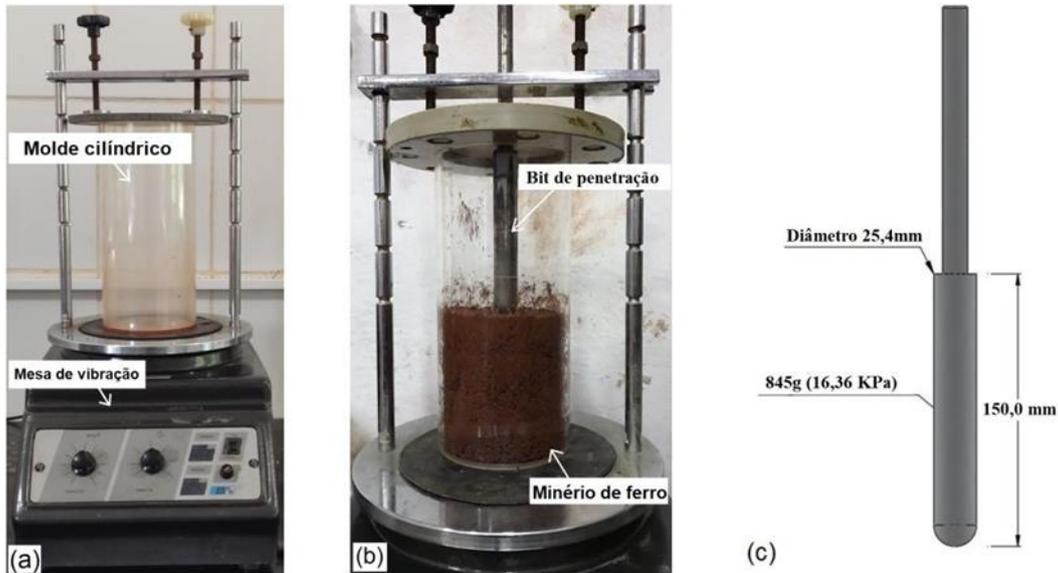
Todos os testes foram realizados pelo mesmo operador para obter resultados reproduzíveis e consistentes, e o teste foi repetido três vezes para cada conjunto de amostra.

#### 3.4 TESTE DE MESA DE VIBRAÇÃO – SHAKE TABLE TESTE (STT)

Nesta etapa foi desenvolvida uma metodologia experimental utilizando a mesa de vibração para investigar quantitativamente o potencial de liquefação do IOF sob carga cíclica. A mesa de vibração utilizada neste estudo é normalmente usada para determinação da densidade máxima seca de acordo com a norma ASTM D4253-00 [78].

A Figura 3.8 apresenta o aparelho de mesa de vibração, o molde cilíndrico com o bit de penetração em uma amostra de IOF e as dimensões do bit de penetração. O bit

de penetração utilizado neste estudo foi desenvolvido por Munro e Mohajerani [22] para observar a resistência ao cisalhamento aparente da amostra de IOF sob carregamento cíclico. O aparelho corresponde a um êmbolo flutuante com pressão de contato de 16,36 kPa e diâmetro de 25,4 mm, como visto na Figura 3.8c.



**Figura 3.8** - Aparatos do STT: (a) mesa de agitação e molde cilíndrico; (b) finos de minério de ferro e broca de penetração; (c) dimensões da broca de penetração.

Neste estudo, o STT consiste em vibrar verticalmente um molde cilíndrico contendo IOF compactado, através de uma plataforma de vibração, a uma amplitude de deslocamento (pico a pico) de  $0,33 \pm 0,05$  mm a uma frequência de 60 Hz por 12 min. Esta frequência e amplitude seguem os padrões de ensaios estabelecidos na norma ASTM D4253-00 [78] e tempo total do teste foi suficiente para produzir a densidade máxima.

Os parâmetros deste ensaio foram considerados para obter uma compactação da amostra de IOF, em um tempo reduzido, que fosse semelhante a compactação de IOF durante um transporte típico de um graneleiro do Brasil para a China, que leva, aproximadamente, 40 dias e experimenta uma aceleração máxima de 1g com uma frequência média de 0,1 Hz (MUNRO e MOHAJERANI [73]).

Todos os testes foram realizados pelo mesmo operador para obter resultados reproduzíveis e consistentes, e o teste foi repetido três vezes para cada conjunto de amostra. Os testes de vibração foram realizados na condição não drenada, devido não

haver mais do que 1% de redução no teor de umidade durante o transporte marítimo de uma carga de IOF (MUNRO e MOHAJERANI [73]).

Para cada ensaio, foi utilizada uma amostra de 4kg de IOF em um molde cilíndrico com 120 mm de diâmetro e 285 mm de altura. De forma semelhante a compactação do teste de mesa de fluxo descrito no IMSBC Code [4], a compactação do STT foi utilizando um soquete de compactação ajustada para uma pressão de aproximadamente 550 kPa com uma cabeça de compactação de 30 mm de diâmetro. A pressão de compactação depende das propriedades da amostra que está sendo testada. A tamping de pressão (P) foi determinada antes da realização do STT usando a Equação (3.9).

$$P = \rho \times d \times g \quad (3.9)$$

Onde:

- $\rho$  é a densidade aparente (4.700 kg / m<sup>3</sup>) obtida com a compactação padrão Proctor, conforme descrito na NBR ISO 3852 [76];
- $d$  é a profundidade máxima de carga (12 m); e  $g$  é a aceleração da gravidade (9,81 m / s<sup>2</sup>).

O preenchimento do molde cilíndrico foi realizado em quatro camadas de amostras. Após a adição de cada camada, realizou-se a compactação com socador de compactação com compressões aplicadas sobre toda a área da amostra até que se obtivesse uma superfície plana e uniforme. Após essa etapa, um bit de penetração metálico apropriado para IOF [22], com dimensões mostradas na Figura 38, foi colocado na superfície da amostra para avaliação da profundidade de penetração, ao final do STT. De acordo com Jian et al. [75], os critérios de iniciação de liquefação de solo saturado não podem ser usados para determinar a liquefação do IOF devido ao estado insaturado nos modelos de testes.

Pesquisas recentes observaram um fluxo ascendente de água ao longo da coluna de solo em direção à superfície uma vez que a liquefação ocorreu (KWA et al. [68]) e que o IOF da camada superior exibia comportamento de fluxo quando os níveis d'água se aproximavam da superfície do recipiente (JIAN et al [75]). Dessa forma, foi

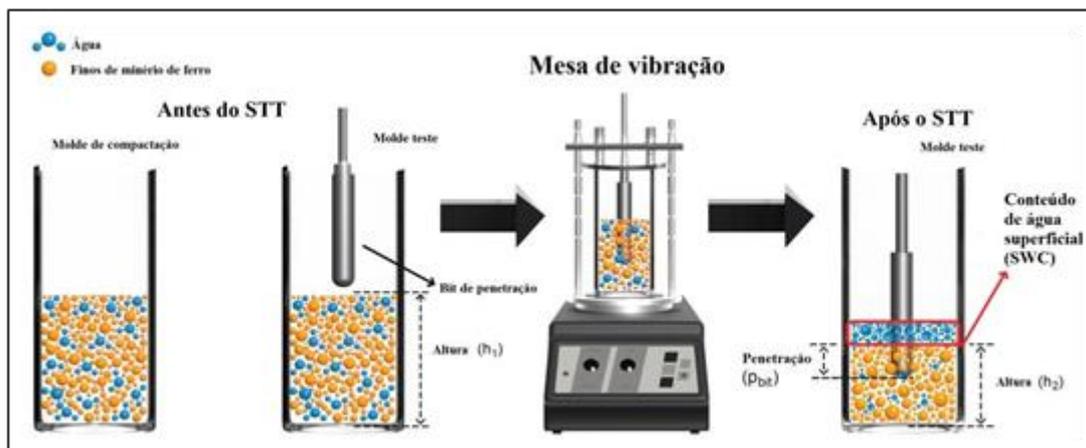
considerado que ocorreu liquefação da amostra de IOF no STT quando houve mensuração de volume de água livre na superfície do recipiente.

### 3.4.1 Medição de parâmetros antes do STT

Para realização da análise comparativa de parâmetros relacionados ao potencial de liquefação, foi necessário que antes do STT, houvesse a compactação do IOF com o martelo de compactação em dois moldes cilíndricos, conforme mostrado na Figura 3.9.

O molde cilindro que chamamos de “Molde de Compactação” não foi instalado na shake table e foi utilizado para extração de uma amostra para determinação do índice de vazios ( $e$ ) e conteúdo líquido de água em volume ( $ev$ ), grau de saturação ( $S$ ) e conteúdo de água bruta (GWC), utilizando a Equação (3.4), (3.5), (3.6) e (3.7), respectivamente. Destaca-se que não houve reuso de amostra de IOF.

No outro molde cilíndrico que chamamos de “Molde de teste”, foi realizada a medição da altura ( $h_1$ ) e peso ( $m_1$ ) da amostra compactada, após as medições foi instalado no aparelho de mesa de vibração.



**Figura 3.9** - Determinação de parâmetros do STT.

Ressalta-se que os parâmetros de índice de vazios, conteúdo de água bruta e grau de saturação das amostras do “Molde compactação” possuem a mesma energia de compactação, conteúdo de finos e umidade que suas respectivas amostras do “Molde teste”. Dessa forma, considera-se aceitável realizar comparações entre esses parâmetros antes e depois do STT.

### 3.4.2 Medição dos parâmetros após STT

Como mostrado na Figura 3.10, logo após o STT, foram medidas as profundidades de penetração do bit ( $p_{bit}$ ) e retirado com seringa graduada o conteúdo de água superficial (SWC) que recobria a amostra e finalizando com a medição da altura da amostra após o teste ( $h_2$ ).

Após a retirada do bit de penetração do molde cilindro “Molde teste”, foi realizada a extração de uma amostra para determinação do índice de vazios ( $e$ ) e conteúdo líquido de água em volume ( $ev$ ), grau de saturação ( $S$ ) e conteúdo de água bruta (GWC) utilizando as Equações (3.4), (3.5), (3.6) e (3.7), respectivamente, para análise do comportamento desses parâmetros quando submetidos a carga cíclica.

Neste estudo, são propostos os indicadores  $I_{SWC}$ ,  $I_p$ , para avaliação do potencial de liquefação representados pelas Equação (3.10) e (3.11), respectivamente.

$$I_p = \frac{p_{bit}}{\frac{m_1}{\pi r^2 h_1}} \quad (3.10)$$

$$I_p = \frac{p_{bit}}{\frac{m_1}{\pi r^2 h_1}} \quad (3.11)$$

Onde:

$p_{bit}$  corresponde a profundidade de penetração do bit em cm e a expressão  $m_1/\pi r^2 h_1$  representa a densidade da amostra úmida antes do STT dada em  $g/cm^3$ .

Onde:

- SWC corresponde ao volume de água na superfície da amostra após o STT em  $cm^3$  e a expressão  $\pi r^2 h_2$  representa o volume da amostra após o STT dada em  $cm^3$ .

O indicador  $I_p$  corresponde à relação entre a profundidade de penetração do bit e a densidade da amostra antes do STT. Considerou-se que quanto maior a penetração do bit, menor é a força de cisalhamento aparente da amostra de IOF, conseqüentemente,

maior o potencial de liquefação. Dessa forma, houve a necessidade de ponderar o indicador  $I_p$  através da densidade da amostra úmida para possibilitar a comparação com outras amostras de IOF com diferentes teores de umidade e tamanhos de partículas.

O indicador  $I_{SWC}$  representa a relação entre o volume de água na superfície da amostra e o volume da amostra após o STT. Considerou-se que a migração de umidade é uma indicação de liquefação devido à perda aparente de resistência ao cisalhamento, resultado da mudança da sucção matricial ou pressões dos poros dentro da amostra. Assim, avalia-se que se a tensão efetiva for reduzida a quase zero pela alteração das pressões dos poros, a resistência ao cisalhamento também será reduzida e a amostra poderá se liquefazer.

Essa consideração tem base teórica a partir da Equação (3.11) amplamente aceita e usada para determinar a resistência ao cisalhamento de um solo, comumente referida como o critério de falha de Mohr-Coulomb. A equação (3.12) expressa que a resistência ao cisalhamento,  $\tau$ , de um material granular é uma função de seu ângulo de atrito interno,  $\phi'$ , e coesão Coulomb,  $c'$ , junto com a estresse efetivo aplicada,  $\sigma'$ .

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (3.12)$$

O estresse efetivo aplicada,  $\sigma'$ , da Equação (3.12) pode ser obtida pela equação de Bishop's, Equação (3.13), usada para solos insaturados. A Equação (3.13) apresenta as variáveis de pressão de ar dos poros,  $u_a$ , pressão da água dos poros,  $u_w$ , e a estresse normal,  $\sigma$ , junto com o parâmetro,  $\chi$ , que é um valor entre 0 e 1 relacionado ao grau de saturação, onde 1 é totalmente saturado.

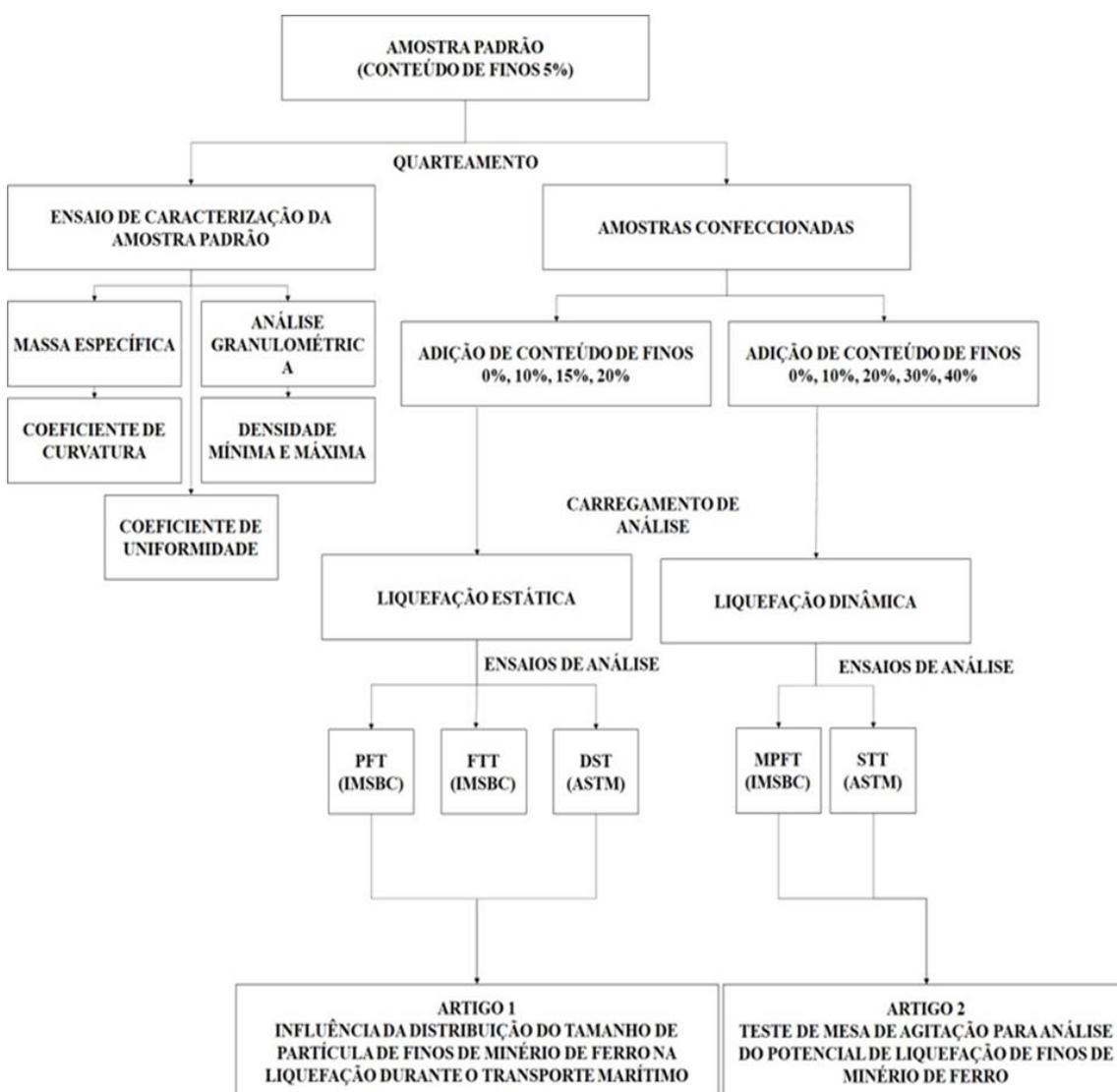
$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (3.13)$$

De acordo com a Equação (3.13), em solos totalmente saturados (quando  $\chi = 1$ ), a redução na tensão efetiva está diretamente relacionada à pressão da água dos poros ( $\sigma' = \sigma - u_w$ ). Em solos insaturados, quando o grau de saturação é baixo, a sucção do solo ou pressão negativa da água dos poros ocorre dentro dos poros. Conforme a saturação é aumentada, a sucção é reduzida e permite que a migração de umidade ocorra [23].

## CAPÍTULO 4

### 4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE PESQUISA

Neste capítulo são apresentadas as metodologias de ensaio de caracterização das propriedades físicas, da amostra padrão utilizada em todos os estudos desenvolvidos nesta tese e nos artigos 1 e 2. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Fluidos e Particulados do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (FLUIDAR/NDAE/UFPa) e no Laboratório da Faculdade de Engenharia Civil (FEC/CAMTUC/UFPa), ambos da Universidade Federal do Pará, campus Tucuruí. O fluxograma esquemático descrito na Figura 4.1 contém as duas etapas desta tese.



**Figura 4.1** - Fluxograma das etapas de organização desta tese.

## 4.1 PROPRIEDADES DO MATERIAL

### 4.1.1 Determinação da massa específica do IOF

Para a determinação do TML nos testes de compactação MPFT e PFT é necessário conhecer o parâmetro de massa específica do sólido ( $\rho$ ), e o Código IMSBC sugere a aplicação de uma norma nacional ou internacional para a obtenção deste parâmetro.

O ensaio utilizado em todos os estudos desenvolvidos nesta tese e nos artigos 1 e 2 para medir a massa específica de sólidos é o descrito na NBR ISO 6508 [80]. Este método prescreve a determinação da massa específica dos grãos de solo que passaram na peneira de 4,8mm, por meio do picnômetro, através da realização de pelo menos dois ensaios.

Um picnômetro consiste, basicamente, num balão de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar, conforme ilustrado na Figura 4.6. O volume do picnômetro utilizado neste estudo foi de 25 ml, comumente utilizado para determinar densidade relativa dos sólidos, em particular, de minérios ou minerais.



**Figura 4.2** - Picnômetro com minério de ferro e água.

O resultado foi considerado satisfatório quando entre três ensaios o resultado não diferiu de mais que 0,02 g/cm<sup>3</sup>. Toda a preparação das amostras para o ensaio seguiu os padrões da NBR 3082 [81]. Os resultados dos ensaios são apresentados nas Tabelas 4.1.

#### 4.1.2 Determinação da distribuição granulométrica da amostra padrão

A análise granulométrica do minério de ferro seguiu todos os procedimentos descritos na NBR 7181 [79] de laboratórios de solo. Os procedimentos para a análise granulométrica do minério de ferro utilizada nesta tese e descrita nos artigos 1 e artigo 2, foram realizados por peneiramento a seco, utilizando a série de peneiras normais com aberturas de malhas em ordem decrescente de 9,5 mm, 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm.

A pilha da amostra original possuía tamanhos de partículas de 9,5 mm a 25  $\mu\text{m}$  com conteúdo e finos em torno de 5,2%, onde neste estudo, os finos foram definidos como partículas que passaram pela peneira n° 100 com abertura de malha de 150  $\mu\text{m}$ .

As propriedades físicas e distribuição granulométrica da amostra original utilizadas durante todo o desenvolvimento deste estudo e dos artigos 1 e 2, bem como os padrões para os quais os dados são obtidos, estão listados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Propriedades físicas e distribuição granulométrica da amostra original (5,2% finos) usada no estudo.

Propriedades	Normas	Resultados
Massa específica do IOF, $G_s$ ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	NBR ISO 3852 [76]	4,7 $\text{t}/\text{m}^3$
Densidade seca mínima ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	NBR ISO 3852 [76]	2,75 $\text{t}/\text{m}^3$
Densidade seca máxima ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	NBR ISO 3852 [76]	3,03 $\text{t}/\text{m}^3$
<sup>a</sup> Distribuição granulométrica		
Cascalho (4,75 – 75 mm)	ASTM D2487-06 [89]	15,1%
Areia (0,075 – 4,75 mm)	ASTM D2487-06 [89]	82,2%
Silte (< 75 $\mu\text{m}$ )	ASTM D2487-06 [89]	2,7%
Classificação	ASTM D2487-06 [89]	Areia mal graduada com cascalho (SP)
<sup>b</sup> Coeficiente de curvatura (Cc) ( $D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60})$ )	ASTM D2487-06 [89]	0,95
<sup>b</sup> Coeficiente de uniformidade (Cu) ( $D_{60}/D_{10}$ )	ASTM D2487-06 [89]	3,81

<sup>a</sup> Distribuição granulométrica para a amostra de IOF pode ser vista na Figura 4.2 e Figura 4.3.

<sup>b</sup>  $D_{60}$ ,  $D_{30}$ , e  $D_{10}$  são respectivamente os tamanhos de partícula correspondentes a 60, 30 e 10% mais finos na curva de distribuição granulométrica cumulativa.

A amostra de IOF testadas durante todo o desenvolvimento desta tese e contidas nos artigos 1 e artigo 2, foram obtidas na indústria de mineração brasileira e escolhidas

por serem representativas em relação às cargas de IOF que saem do Brasil por navios graneleiros.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 são apresentadas as curvas granulométricas das amostras confeccionadas a partir da amostra original demonstrada na Tabela 9 para os ensaios desta tese e contidas nos artigos 1 e 2, respectivamente.

#### 4.1.3 Curva de distribuição granulométrica das amostras do Artigo 1

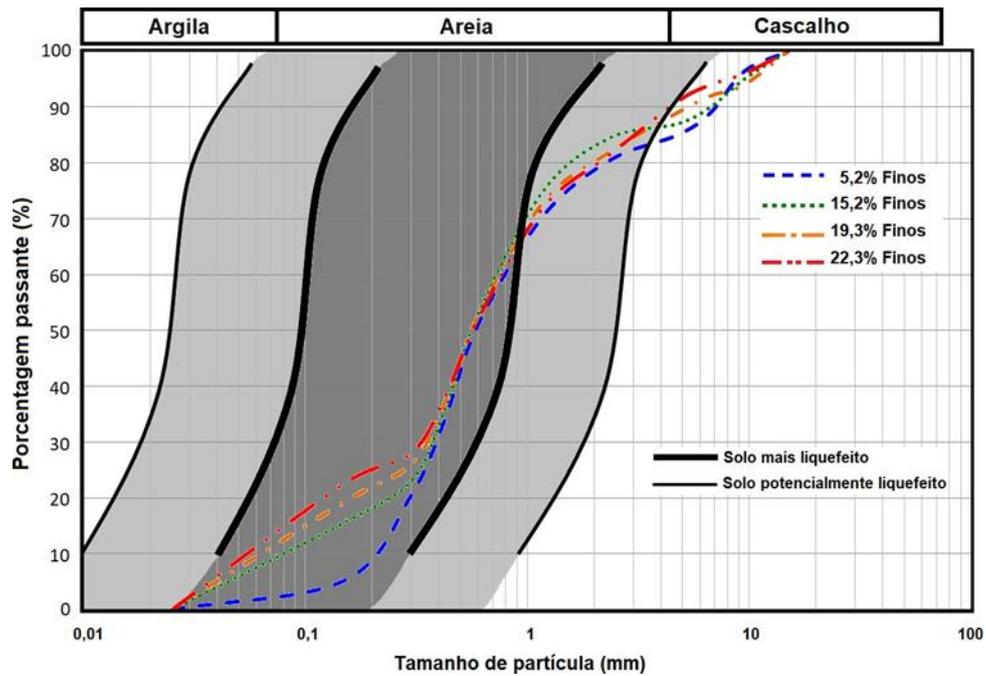
A partir da amostra original de IOF (5,2% finos), mais três amostras foram preparadas adicionando finos na proporção de 10%, 15% e 20%. As três pilhas de amostra, agora com 15,6%, 19,3% e 22,6% de finos. Para este estudo, cada amostra continha em média 5 kg, 2 kg e 1 kg para os ensaios do FTT, PFT e DST, respectivamente como demonstrado na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** - Composição das amostras de ensaio desta tese.

Conteúdo de finos (%) das amostras deste estudo			
ID	Tipo de amostra	*Partícula de IOF (%)	Conteúdo de água bruta (%)
Amostra 1	original	5,2%	9%, 10%,11% e 12%
Amostra 2	Adição	10%	9%, 10%,11% e 12%
Amostra 3	Adição	15%	9%, 10%,11% e 12%
Amostra 4	Adição	20%	9%, 10%,11% e 12%

\*Tamanho de partícula < 150 µm

As curvas de distribuição granulométrica das quatro pilhas de amostra são mostradas na Figura 4.2. Os limites de alta e baixa susceptibilidade à liquefação do solo mencionados em [27] são mostrados na Figura 4.3 e foram usados para auxiliar a discussão da susceptibilidade à liquefação do solo das amostras IOF.



**Figura 4.3** - Limites liquefáveis de solos [27] e distribuição granulométrica do IOF testada para o artigo 1.

#### 4.1.4 Curva de distribuição granulométrica das amostras do Artigo 2

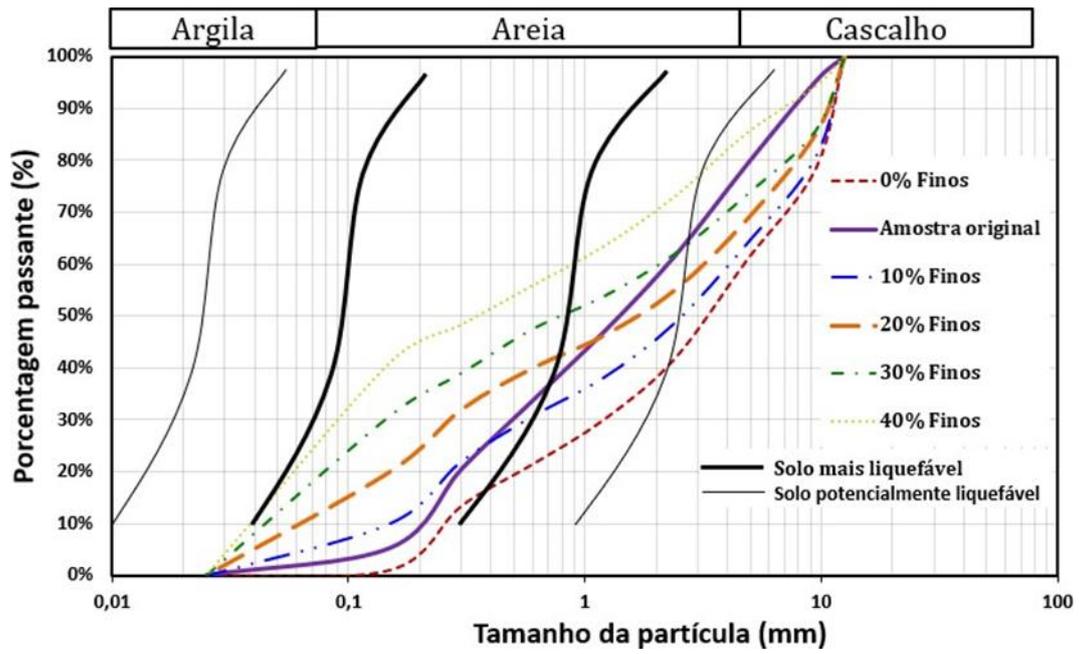
A partir da amostra original de IOF (5,2% finos), foram preparadas cinco diferentes distribuições granulométricas com graduações de finos ( $< 150 \mu\text{m}$ ) de 0%, 10%, 20%, 30% e 40%, como apresentado na Tabela 4.3. Para este estudo, cada amostra continha em média 4 kg para cada um dos ensaios do MPFT e STT.

**Tabela 4.3** - Composição das amostras de ensaio desta tese.

Conteúdo de finos (%) das amostras deste estudo				
ID	Tipo de amostra	*Partícula de IOF (%)	Conteúdo de água bruta (%)	
Amostra 1	Original	5,2%	9%, 10%, 11% e 12%	
Amostra 2	Adição	10%	9%, 10%, 11% e 12%	
Amostra 3	Adição	20%	9%, 10%, 11% e 12%	
Amostra 4	Adição	30%	9%, 10%, 11% e 12%	
Amostra 5	Adição	40%	9%, 10%, 11% e 12%	

\*Tamanho de partícula  $< 150 \mu\text{m}$

As curvas de distribuição granulométrica das amostras de IOF para os cinco conteúdos de finos são mostradas na Figura 4.3. As propriedades físicas e a distribuição granulométrica da amostra original (5,2% finos) utilizadas no estudo são apresentados na Tabela 4.1.



**Figura 4.4** - Limites liquefáveis de solos [27] e distribuição granulométrica do IOF testada para o artigo 2.

## CAPÍTULO 5

### 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1 ARTIGO 1: INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE FINOS DE MINÉRIO DE FERRO NA LIQUEFAÇÃO DURANTE O TRANSPORTE MARÍTIMO

##### 5.1.1 Resumo

Nesta seção serão apresentados e discutidos a primeira parte dos resultados desta tese, publicados no artigo “Influence of particle size distribution of iron ore fines on liquefaction during marine transportation,” na revista Powder Technology, volume 373, agosto 2020 (Apêndice B).

Este estudo foi motivado pelos vários incidentes com graneleiros, incluindo perda de vidas e navios, que ocorreram devido à liquefação de granéis sólidos. Dessa forma, este estudo teve como objetivo investigar a influência da distribuição granulométrica de IOF sobre o potencial de liquefação de granéis para transporte marítimo. A correlação do potencial de liquefação com a distribuição granulométrica do IOF é de grande interesse para as empresas de transporte de minério, pois elas possuem uma variedade de IOF com diferentes granulometrias que podem ser misturados para melhorar o potencial de liquefação.

O efeito da distribuição granulométrica do IOF no TML foi investigado usando o teste de mesa de fluxo e o Proctor-Fagerberg test, e o comportamento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento foi estudado realizando um teste de cisalhamento direto para diferentes conteúdos de finos. As amostras foram preparadas contendo tamanhos de partículas de 9,5 mm a 25  $\mu\text{m}$  com teores de finos ( $<150 \mu\text{m}$ ) de 5,2%, 15,6%, 19,3% e 22,6%.

Ainda neste estudo, foi proposta uma metodologia para classificar o potencial de liquefação de amostras de IOF, com o objetivo de auxiliar as transportadoras a definirem os mixes de IOF. A concordância entre os dados experimentais e teóricos é observada e discutida.

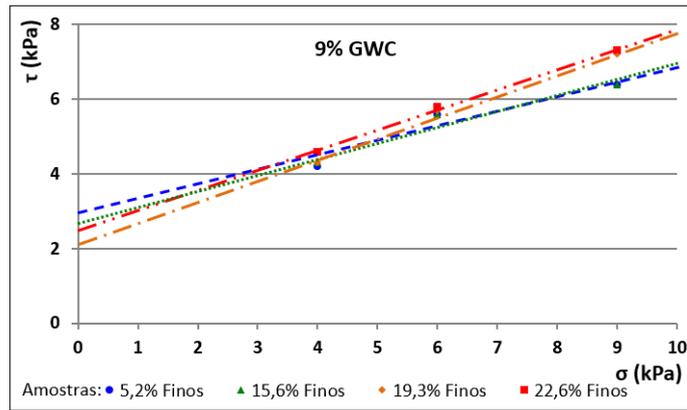
### 5.1.2 Relação entre distribuição de tamanho de partícula e resistência ao cisalhamento Teste de Cisalhamento Direto (DST)

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros de resistência ao cisalhamento resultantes produzidos a partir do DST para cada amostra de IOF. Além disso, as envoltórias de falha em termos de tensões efetivas aglomeradas por amostras da mesma unidade são mostradas nas Figura 5.1 a 5.4.

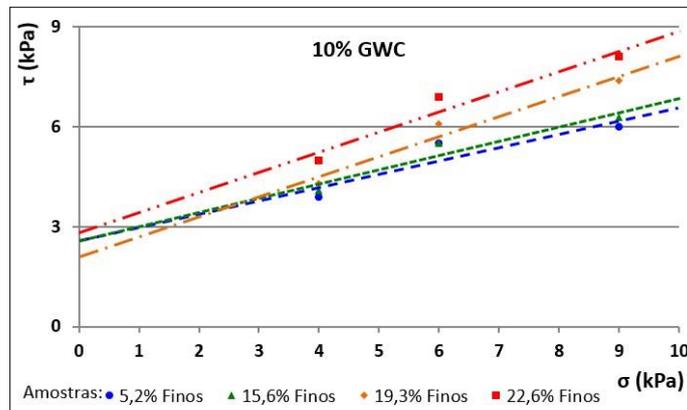
Faixas de fator de coesão de 2,1–3,0, 2,1–2,9, 2,4–3,6 e 1,9–4,3 são observadas para valores de GWC de 9%, 10%, 11% e 12%, respectivamente, e intervalos de ângulo de atrito interno de 21,3-29,8, 21,8-31,2, 23,7-35,6 e 23,6-39,5 são observados para os mesmos valores de GWC de 9%, 10%, 11% e 12%, respectivamente.

**Tabela 5.1** - Resultados e condições produzidos pelo DST.

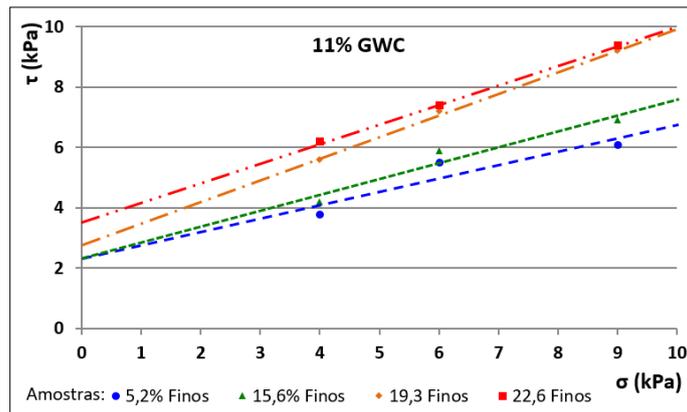
ID	Teste 1		Teste 2		Teste 3		Resultados dos Parâmetros de resistência ao cisalhamento	
	Pressão vertical (kPa)	Pico cisalhamento (kPa)	Pressão vertical (kPa)	Pico cisalhamento (kPa)	Pressão vertical (kPa)	Pico cisalhamento (kPa)	Ângulo de atrito interno (°)	Coesão (kPa)
DST1.1	4,0 ± 0,1	4,2 ± 0,1	6,0 ± 0,1	5,6 ± 0,2	9,0 ± 0,1	6,4 ± 0,2	21,3 ± 0,3	3,0 ± 0,1
DST2.1	4,0 ± 0,1	4,3 ± 0,1	6,0 ± 0,1	5,6 ± 0,2	9,0 ± 0,1	6,4 ± 0,2	23,1 ± 0,3	2,7 ± 0,1
DST3.1	4,0 ± 0,1	4,3 ± 0,1	6,0 ± 0,1	5,7 ± 0,2	9,0 ± 0,1	7,2 ± 0,2	29,8 ± 0,3	2,1 ± 0,1
DST4.1	4,0 ± 0,1	4,6 ± 0,1	6,0 ± 0,1	5,8 ± 0,2	9,0 ± 0,1	7,3 ± 0,2	28,2 ± 0,3	2,5 ± 0,1
DST1.2	4,0 ± 0,1	3,9 ± 0,1	6,0 ± 0,1	5,5 ± 0,1	9,0 ± 0,1	6,0 ± 0,2	21,8 ± 0,3	2,6 ± 0,1
DST2.2	4,0 ± 0,1	4,1 ± 0,1	6,0 ± 0,1	5,5 ± 0,1	9,0 ± 0,1	6,3 ± 0,2	23,1 ± 0,3	2,6 ± 0,1
DST3.2	4,0 ± 0,1	4,3 ± 0,1	6,0 ± 0,1	6,1 ± 0,2	9,0 ± 0,1	7,4 ± 0,2	31,2 ± 0,4	2,1 ± 0,1
DST4.2	4,0 ± 0,1	5,0 ± 0,2	6,0 ± 0,1	6,9 ± 0,2	9,0 ± 0,1	8,1 ± 0,3	31,1 ± 0,4	2,9 ± 0,1
DST1.3	4,0 ± 0,1	3,8 ± 0,1	6,0 ± 0,1	5,5 ± 0,1	9,0 ± 0,1	6,1 ± 0,2	23,7 ± 0,3	2,4 ± ,01
DST2.3	4,0 ± 0,1	4,2 ± 0,1	6,0 ± 0,1	5,9 ± 0,2	9,0 ± 0,1	6,9 ± 0,2	27,6 ± 0,3	2,4 ± ,01
DST3.3	4,0 ± 0,1	5,6 ± 0,2	6,0 ± 0,1	7,2 ± 0,2	9,0 ± 0,1	9,2 ± 0,2	35,6 ± 0,4	2,8 ± ,01
DST4.3	4,0 ± 0,1	6,2 ± 0,2	6,0 ± 0,1	7,4 ± 0,2	9,0 ± 0,1	9,4 ± 0,3	32,7 ± 0,4	3,6 ± 0,1
DST1.4	4,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	6,0 ± 0,1	5,0 ± 0,1	9,0 ± 0,1	6,2 ± 0,2	23,6 ± 0,3	2,3 ± 0,1
DST2.4	4,0 ± 0,1	4,2 ± 0,1	6,0 ± 0,1	6,2 ± 0,2	9,0 ± 0,1	7,5 ± 0,2	32,7 ± 0,4	1,9 ± 0,1
DST3.4	4,0 ± 0,1	6,2 ± 0,2	6,0 ± 0,1	7,5 ± 0,2	9,0 ± 0,1	9,5 ± 0,3	33,4 ± 0,4	3,6 ± 0,1
DST4.4	4,0 ± 0,1	7,3 ± 0,2	6,0 ± 0,1	9,6 ± 0,3	9,0 ± 0,1	11,5 ± 0,3	39,5 ± 0,4	4,3 ± 0,1



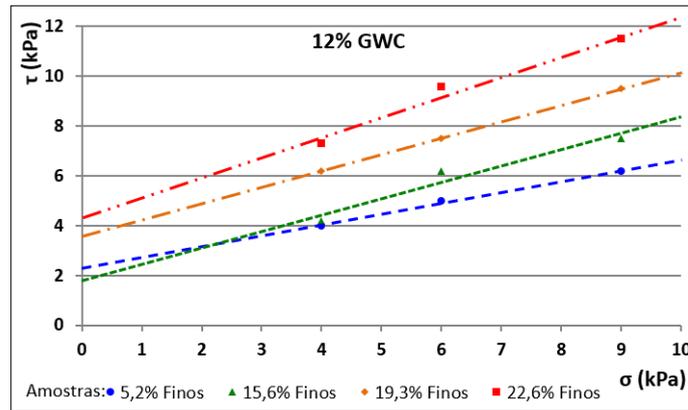
**Figura 5.1** - Envoltória de falha resultante para amostras com diferentes distribuições de tamanho de partícula e conteúdo de umidade 9% GWC.



**Figura 5.2** - Envoltória de falha resultante para amostras com diferentes distribuições de tamanho de partícula e conteúdo de umidade 10% GWC.



**Figura 5.3** - Envoltória de falha resultante para amostras com diferentes distribuições de tamanho de partícula e conteúdo de umidade 11% GWC.



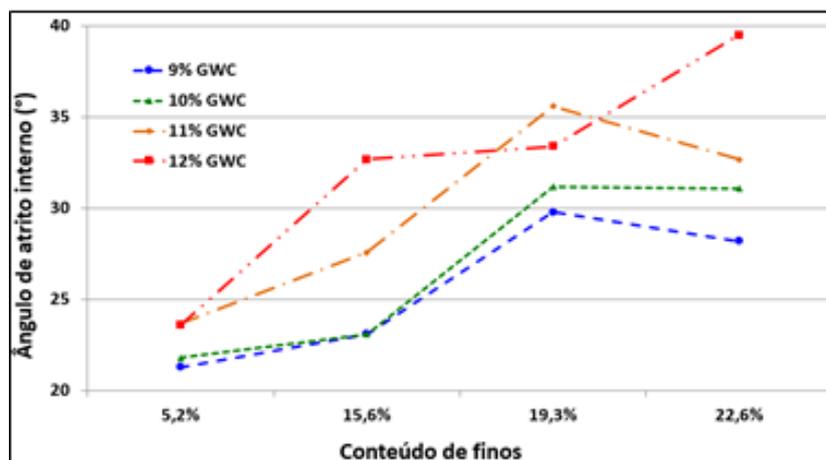
**Figura 5.4** - Envoltória de falha resultante para amostras com diferentes distribuições de tamanho de partícula e conteúdo de umidade 12% GWC.

Considerando como referência os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos em (ZHOU et al. [82]), onde as amostras foram preparadas com uma composição baseada em um modelo de granulação balanceada por população, incluindo dois tipos de IOF brasileiros, e os testes foram realizados com valores de pressão vertical semelhantes, resultados próximos aos atingidos neste estudo.

Zhou et al. (ZHOU et al. [82]) obtiveram uma faixa de valor do fator de coesão de, aproximadamente, 1,4 – 2,8 kPa e um valor de ângulo de atrito interno médio de, aproximadamente, 32,6° para amostras com 10% de concentrado e sem adição de cal hidratada.

Os resultados listados na Tabela 5.1 indicam que para cada teor de umidade, a adição de finos IOF proporciona um aumento no ângulo de atrito interno até um determinado teor de finos (conhecido como Conteúdo de Finos Transicionais (TFC) (YANG et al. [36]). Após o TFC, um aumento adicional nos finos IOF produziu uma diminuição no ângulo de atrito interno, como pode ser visto na Figura 5.5.

Para 9%, 10% e 11% GWC, o TFC está na faixa de 15,6% e 22,6% de finos de IOF e para o GWC de 12% não foi encontrado TFC na faixa de 5,2% - 22,6% dos finos de IOF.



**Figura 5.5** - Ângulo de atrito interno para amostras com o mesmo conteúdo de umidade.

Observou-se que entre as amostras de diferentes graduações de IOF houve variação na coesão de Coulomb, sendo a variação mais significativa entre as amostras DST2.4 e DST4.4 (grupo de maior umidade), com diferença maior que 125% entre as coesões. Não parece haver conteúdo específico de muitas relacionadas ao TFC para o fator de coesão. Acredita-se que haja uma relação complexa entre a distribuição granulométrica do IOF e o fator de coesão e essa relação é dependente do teor de umidade, razão de vazios e finos na amostra.

Experimentos e simulações de elementos discretos, onde a coesão de Coulomb das esferas de areia e vidro estava no estado pendular, mostram que a coesão aumenta com o conteúdo de água e a saturação a um máximo que depende apenas da natureza do material (YANG et al. [36]).

No entanto, parte dos resultados do presente trabalho foi diferente devido às complexas interações dos componentes do IOF. Amostras com menor graduação de IOF (5,2% e 15,6%) mostraram uma diminuição no fator de coesão com o aumento do teor de umidade.

Este fenômeno é explicado qualitativamente pelo fato de que há menos contato das partículas, menos partículas para separar no plano de cisalhamento e mais acomodação de laminação do que para a deformação por cisalhamento. Nas amostras com maiores graduações de finos IOF (19,3% e 22,6%) o fator de coesão aumentou com

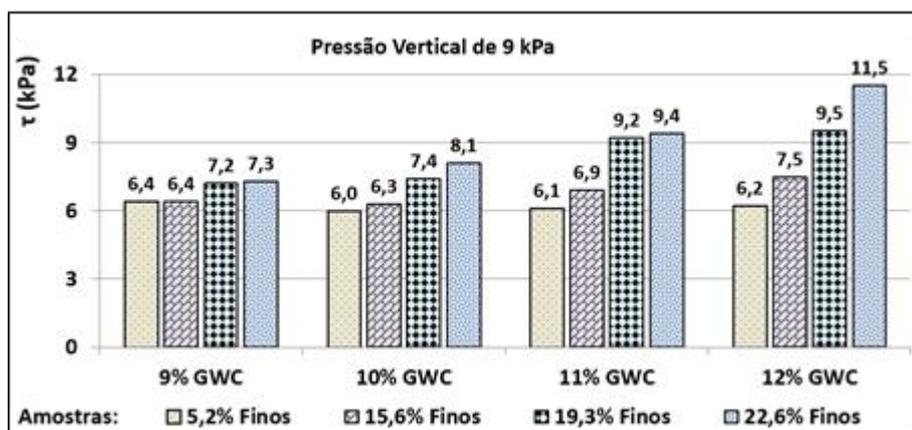
o teor de umidade, conforme verificado em (BAGHERZADEH-KHALKHALI e MIRGHASEMI et al. [83]).

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento estão relacionados à resistência à liquefação durante o transporte de IOF, pois a carga contém umidade e o navio está sujeito ao carregamento cíclico de suas próprias vibrações e efeitos das ondas do mar, com acelerações típicas de 0,1g (IMO [84]). A liquefação ocorre quando há uma redução na resistência ao cisalhamento (MUNRO E MOHAJERANI [85]).

Observou-se neste estudo que a distribuição granulométrica do IOF influencia os parâmetros de resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, a resistência à liquefação. Se os finos produzem coesão forte, a separação das partículas individuais é inibida quando o IOF está prestes a se liquefazer, exibindo, portanto, alta resistência à liquefação. Em contraste, se os finos consistirem em matéria livre de adesão, então ocorre a separação das partículas individuais, de modo que o IOF contendo esses finos exibe baixa resistência à liquefação.

Este estudo mostra que o aumento do teor de finos aumenta o ângulo de atrito interno até o TFC, proporcionando maior resistência ao escoamento. Devido às características do material granular, mais testes são necessários para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

Os resultados da Tabela 5.1 também mostram uma influência do conteúdo de finos IOF no pico de tensão de cisalhamento. A Figura 5.6 mostra que para o mesmo GWC, geralmente há um aumento no pico de tensão de cisalhamento com o aumento do teor de finos. O mesmo comportamento é observado para a pressão vertical de 4 kPa e 6 kPa. Em todos os GWC testados, a amostra IOF com o menor teor de finos apresentou o menor pico de tensão de cisalhamento, indicando que era a mais suscetível à liquefação.



**Figura 5.6** - Pico da tensão de cisalhamento para amostras com diferentes distribuições de tamanho de partícula e conteúdo de umidade.

O resultado deste estudo está de acordo com os achados de Taiba *et al.* [86], que realizou testes em dois tipos de misturas areia-silte e observou que o pico de resistência ao cisalhamento não drenado geralmente aumenta com o aumento de diferentes tamanhos de grão de 0% a 40%.

### 5.1.3 Relação entre a distribuição granulométrica do IOF e o TML

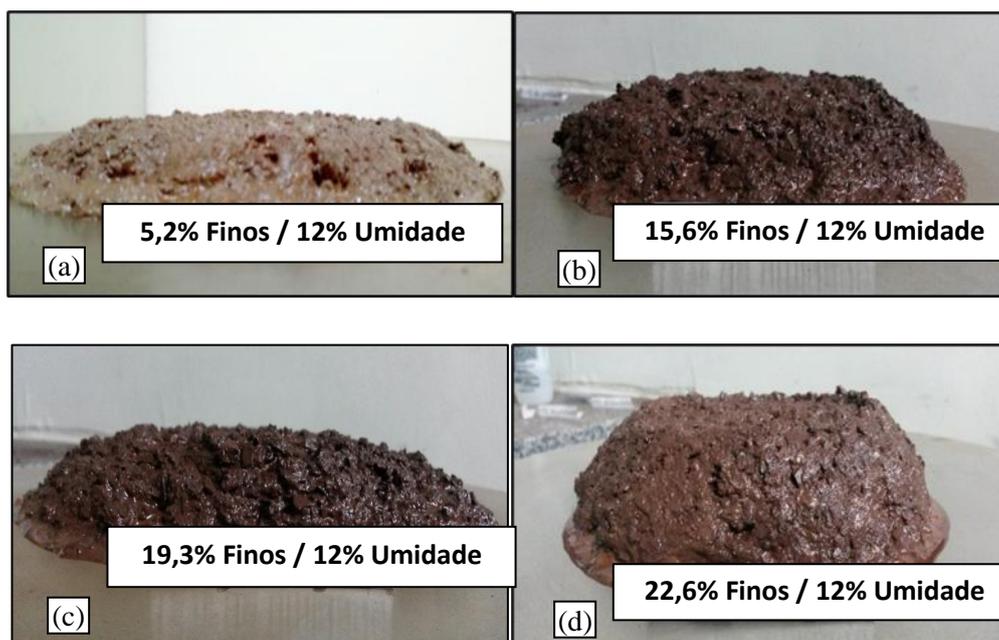
Os valores de TML determinados por FTT e PFT para cada distribuição granulométrica do IOF mostraram resultados semelhantes, com o maior desvio padrão (<3,0%) ocorrendo para a amostra de 22,6% de finos. A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos pelo FTT.

**Tabela 5.2** - Resultados do FTT.

ID	Massa antes da secagem (g)	Massa depois da secagem (g)	FMP (%)	TML (%)
FTT1.1	52,97 ± 0,21	48,66 ± 0,16	9,21 ± 0,08	8,29 ± 0,07
FTT1.2	53,20 ± 0,19	47,73 ± 0,18		
FTT2.1	53,17 ± 0,23	48,50 ± 0,22	9,40 ± 0,09	8,46 ± 0,08
FTT2.2	53,20 ± 0,17	47,87 ± 0,15		
FTT3.1	53,27 ± 0,22	48,50 ± 0,18	9,98 ± 0,11	8,98 ± 0,08
FTT3.2	52,50 ± 0,18	46,72 ± 0,19		
FTT4.1	53,22 ± 0,24	48,51 ± 0,24	10,46 ± 0,13	9,41 ± 0,09
FTT4.2	50,33 ± 0,21	44,26 ± 0,22		

O comportamento da distribuição granulométrica do IOF na liquefação pode ser visto na Figura 5.7. Observou-se altas deformações plásticas nas amostras com baixos teores de finos IOF (5%) e o mesmo teor de umidade (12%). Na Figura 5.7a, observa-se que a amostra se liquefaz após 50 quedas usando o teste de mesa de fluxo.

Na Figura 5.7d, a amostra sofreu deformação plástica, mas mantém uma grande quantidade de material após o FTT. Assim, confirmam-se os resultados obtidos na Tabela 5.2, onde um aumento do teor de finos IOF aumenta a resistência à liquefação.



**Figura 5.7** - Visualização do comportamento da distribuição granulométrica do IOF na liquefação após ensaio de FTT com a mesma umidade (12%). (a) 5,2% finos, (b) 15,6% finos, (c) 19,3% finos e (d) 22,6% finos.

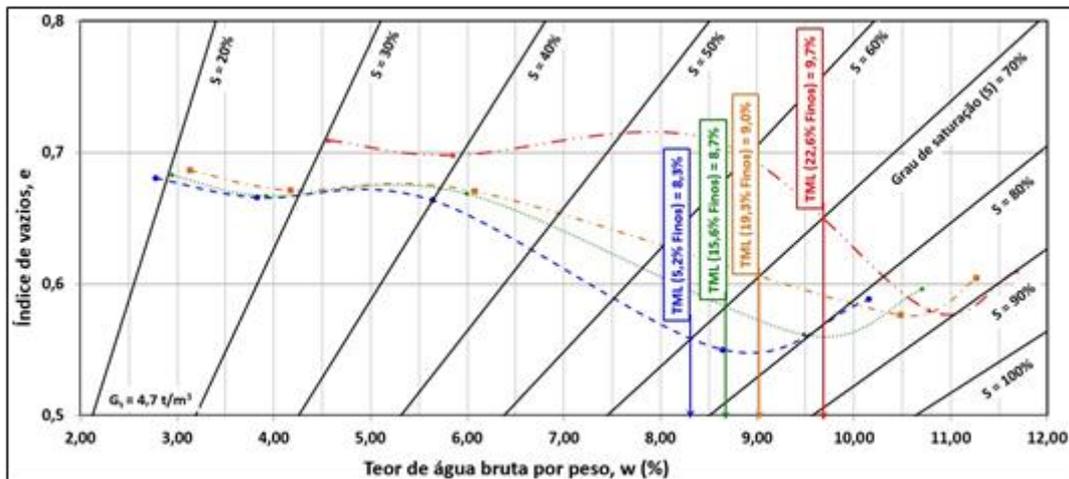
As quatro curvas de compactação produzidas pelo PFT são mostradas na Figura 5.8. Além disso, o TML, onde o grau de saturação equivalente é igual a 70%, cruza suas respectivas curvas. A Figura 5.8 mostra a relação entre a distribuição de tamanho de partícula IOF e o TML, onde um aumento no TML é observado com o aumento nos finos IOF.

Esse resultado pode ser explicado pelo efeito de ocupação, que corresponde à presença de partículas grossas imersas nas partículas finas predominantes, substituindo os vazios por massa sólida [87], ou seja, para o grau de saturação correspondente a 70%,

há um aumento no volume de vazios de partículas com o aumento do conteúdo de finos, e TML é proporcional ao volume de vazios [87].

TML não é um parâmetro de resistência à liquefação; entretanto, para materiais de baixa plasticidade, o TML segue a resistência à liquefação em relação à distribuição granulométrica [87]. Os resultados de FTT e PFT mostram que há um aumento no TML com o aumento dos finos IOF, indicando que a resistência à liquefação aumenta com o aumento dos finos.

No entanto, não está descartado que haja um TFC para o TML desta carga IOF, devido a estudos de comportamentos teóricos [88] e experimentais [36,86] de conteúdo de finos relacionados ao índice de vazios que mostram TFC para os tipos de areias e sedimentos testados.



**Figura 5.8** - Curvas de compactação e TML produzidas pelo PFT.

#### 5.1.4 Metodologia para classificação do potencial de liquefação da amostra

Verificou-se neste estudo que a liquefiabilidade do IOF se correlaciona com o teor de finos devido às características físicas dos próprios finos. Assim, foi proposta uma metodologia para classificar o potencial de liquefação das amostras de IOF utilizando o TML e o fator de coesão de Coulomb, a fim de contribuir para o desenvolvimento de estratégias para mitigar os danos causados durante o transporte marítimo devido aos fenômenos de liquefação.

A metodologia é baseada principalmente no valor de TML, e as amostras com o maior potencial de liquefação serão aquelas com o menor TML. Para valores muito

próximos ao TML, o fator de coesão de Coulomb é usado, e as amostras com o maior potencial de liquefação serão aquelas com o menor fator de coesão. Para um maior potencial de liquefação, a liquefação de cargas a granel torna-se mais suscetível durante o transporte marítimo.

O fator de coesão de Coulomb de cada amostra graduada foi calculado para um GWC equivalente ao TML médio obtido pelo FTT e PFT, conforme listado na Tabela 5.3. O cálculo do fator de coesão de Coulomb foi realizado por extrapolação linear, usando os dois dados mais próximos do respectivo grupo de amostra, conforme mostrado na Tabela 5.1.

A Tabela 5.3 lista a classificação do potencial de liquefação das amostras de IOF deste estudo usando a metodologia proposta. Neste caso, houve variações significativas de TML para amostras com diferentes gradações de finos, portanto, não foi necessário usar o fator de coesão de Coulomb para classificação de liquefação potencial das amostras IOF. A Tabela 5.3 mostra que o potencial de liquefação diminuiu com o aumento dos finos IOF.

**Tabela 5.3** - Classificação do potencial de liquefação das amostras de IOF.

*Amostra	**TML (%)	Coesão (kPa)	Classificação das amostras
5,2% Finos	8,3	3,3	Maior potencial de liquefação
15,6% Finos	8,6	2,7	Alto potencial de liquefação
19,3% Finos	9,0	2,1	Baixo potencial de liquefação
22,6% Finos	9,5	2,7	Menor potencial de liquefação

### 5.1.5 Conclusão do capítulo

Este estudo investigou a influência da distribuição do tamanho de partícula IOF no potencial de liquefação de cargas a granel durante o transporte marítimo. À luz das evidências experimentais, apresenta-se as seguintes conclusões:

1. Os resultados do DST demonstraram que os parâmetros de resistência ao cisalhamento são alterados pelo teor de finos IOF, com um Teor de Finos Transicionais (TFC) para o ângulo de atrito interno. Existe uma relação complexa entre a distribuição granulométrica do IOF e o fator de coesão de Coulomb, que é influenciado pelo teor de umidade, teor de finos e razão de vazios

2. Para o mesmo teor de umidade, o teor de finos adicionais aumentou a tensão de cisalhamento de pico, indicando que as amostras de IOF com menor teor de finos são mais suscetíveis à liquefação.

3. Os resultados de FTT e PFT mostraram que a adição de finos aumentou o TML, conseqüentemente diminuindo o potencial de liquefação. Os resultados deste estudo demonstram claramente que a adição de finos aumenta a resistência à liquefação; no entanto, como apenas quatro classificações diferentes de finos foram realizadas, um TFC para resistência à liquefação não está descartado.

Por fim, neste estudo, foi proposta uma metodologia para classificar o potencial de liquefação das amostras de IOF considerando o TML e o fator de coesão de Coulomb; a metodologia fornece parâmetros úteis para empresas de transporte marítimo que tentam determinar misturas de tamanhos de IOF. Assim, novos estudos relacionados à distribuição granulométrica do IOF sobre o potencial de liquefação de cargas a granel para transporte marítimo são incentivados.

## 5.2 ARTIGO 2: TESTE DE MESA DE AGITAÇÃO PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO DE FINOS DE MINÉRIO DE FERRO

### 5.2.1 Resumo

Nesta seção serão apresentados e discutidos a segunda parte dos resultados desta tese, submetidos para a Applied Ocean Research no dia 18 de março de 2022 (Apêndice C).

Atualmente, os regulamentos da IMO não estão sendo capazes de controlar o potencial de liquefação de cargas liquefáveis e reduzir os incidentes de deslocamento de carga. O único parâmetro, usado pela IMO, para minimizar o risco de liquefação de cargas do 'Grupo A' para transporte em navios graneleiros é o TML.

Dessa forma, esta pesquisa buscou desenvolver uma metodologia experimental utilizando o STT para análise do potencial de liquefação de IOF. A verificação dos resultados foi realizada utilizando o MPFT, que é o método específico para determinação de TML em IOF. Além disso, foram propostos indicadores para avaliação do potencial de liquefação baseados no conteúdo de água superficial e na profundidade da penetração do bit.

O STT e MPFT foram realizados em amostras com faixas granulométricas de 9,5 mm a 25  $\mu\text{m}$  e foram preparadas com conteúdo de finos ( $<150 \mu\text{m}$ ) de 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. As descobertas deste estudo são úteis para compreender o comportamento do potencial liquefação de IOF sob carregamento dinâmico e as propostas de indicadores para potencial de liquefação fornecem parâmetros úteis para empresas de transporte marítimo que buscam mitigar o risco de liquefação em amostras com diferentes conteúdos de finos e umidade.

Note-se que apenas pequenas alterações foram feitas nesta seção para sua inclusão nesta tese, essas diferenças são para criar uniformidade no documento atual. Além disso, a numeração da figura, tabela e equação pode diferir devido ao fato de serem contínuas ao longo deste documento. As exclusões feitas e não incluídas neste capítulo são para evitar a duplicação.

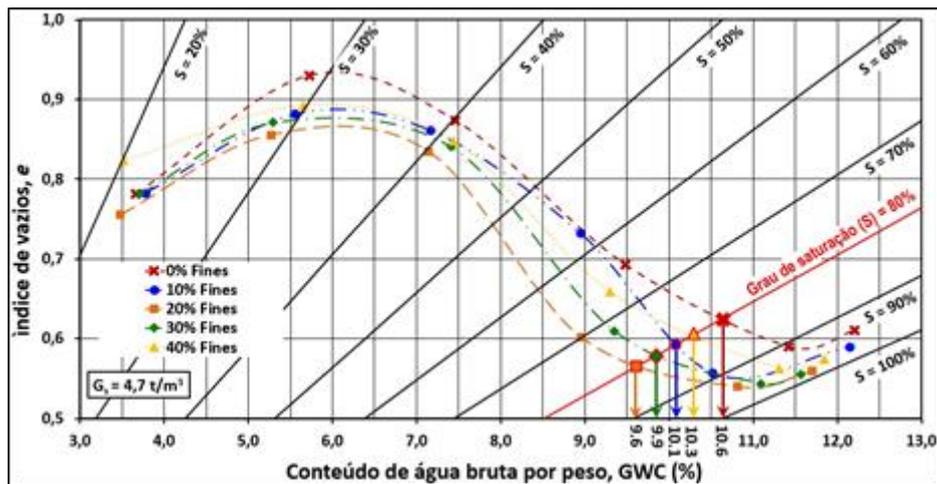
## 5.2.2 Resultados do MPF

Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados produzidos pelo MPFT. Para cada conteúdo de finos, as curvas de compactação e os TML são mostrados na Figura 5.9. Esses resultados mostram a relação entre o teor de água bruta e índice de vazios.

**Tabela 5.4 - Resultados do MPFT.**

ID	Void ratio ( <i>e</i> )	Gross water content (GWC) (%)	Degree of saturation ( <i>S</i> ) (%)	TML (%)
00MPFT01	0,78 ± 0,02	3,7 ± 0,0	22,0 ± 0,3	
00MPFT02	0,93 ± 0,03	5,7 ± 0,0	28,9 ± 0,5	
00MPFT03	0,87 ± 0,03	7,5 ± 0,0	40,1 ± 0,8	
00MPFT04	0,69 ± 0,02	9,5 ± 0,0	64,4 ± 1,1	10,6 ± 0,1
00MPFT05	0,59 ± 0,01	11,4 ± 0,0	91,6 ± 1,4	
00MPFT06	0,61 ± 0,01	12,2 ± 0,1	94,8 ± 1,6	
10MPFT01	0,78 ± 0,02	3,8 ± 0,0	22,7 ± 0,3	
10MPFT02	0,88 ± 0,03	5,6 ± 0,0	29,1 ± 0,5	
10MPFT03	0,86 ± 0,03	7,2 ± 0,0	39,1 ± 0,8	
10MPFT04	0,73 ± 0,02	8,9 ± 0,0	57,3 ± 1,0	10,1 ± 0,1
10MPFT05	0,56 ± 0,01	10,5 ± 0,0	88,7 ± 1,3	
10MPFT06	0,59 ± 0,01	12,1 ± 0,1	96,4 ± 1,6	
20MPFT01	0,76 ± 0,02	3,5 ± 0,0	21,7 ± 0,3	
20MPFT02	0,86 ± 0,03	5,3 ± 0,0	28,9 ± 0,5	
20MPFT03	0,83 ± 0,03	7,1 ± 0,0	40,3 ± 0,8	
20MPFT04	0,60 ± 0,01	9,0 ± 0,0	70,0 ± 1,2	9,6 ± 0,1
20MPFT05	0,54 ± 0,01	10,8 ± 0,0	94,1 ± 1,5	
20MPFT06	0,56 ± 0,01	11,7 ± 0,1	97,6 ± 1,6	
30MPFT01	0,78 ± 0,02	3,7 ± 0,0	22,4 ± 0,3	
30MPFT02	0,87 ± 0,03	5,3 ± 0,0	28,6 ± 0,5	
30MPFT03	0,84 ± 0,03	7,4 ± 0,0	41,4 ± 0,8	
30MPFT04	0,61 ± 0,01	9,4 ± 0,0	72,1 ± 1,2	9,9 ± 0,1
30MPFT05	0,54 ± 0,01	11,1 ± 0,0	95,9 ± 1,5	
30MPFT06	0,56 ± 0,01	11,6 ± 0,1	97,5 ± 1,6	
40MPFT01	0,82 ± 0,02	3,5 ± 0,0	20,1 ± 0,3	
40MPFT02	0,89 ± 0,03	5,7 ± 0,0	29,8 ± 0,5	
40MPFT03	0,85 ± 0,03	7,4 ± 0,0	41,2 ± 0,8	
40MPFT04	0,66 ± 0,01	9,3 ± 0,0	66,2 ± 1,0	10,3 ± 0,1
40MPFT05	0,56 ± 0,01	11,3 ± 0,0	94,3 ± 1,5	
40MPFT06	0,58 ± 0,01	11,8 ± 0,1	96,4 ± 1,6	

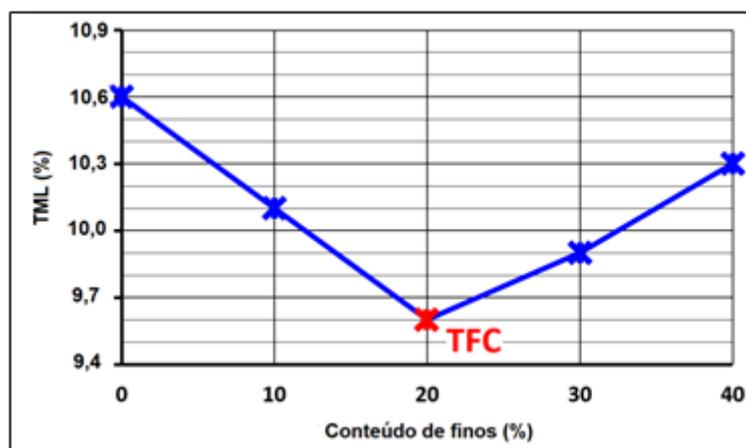
Os resultados listados na Tabela 5.4 indicam que para cada a adição de finos de IOF proporciona um aumento no TML até um determinado teor de finos (conhecido como transitional fines content (TFC) [37].



**Figura 5.9** - Curva de compactação e TML produzida pelo MPFT.

Na Figura 5.10 é mostrada a influência do conteúdo de finos no TML e indicado o TFC que corresponde ao menor percentual de finos. Observa-se na Figura 5.10 que a adição de finos em percentuais inferiores a 20% há um decaimento do TML, por decorrência da redução no índice de vazios, que atinge um mínimo próximo a este valor.

Neste trecho ocorre o efeito de preenchimento, com partículas finas ocupando vazios entre as partículas grossas. A partir do TFC, há elevação do TML com a adição de conteúdo de finos. Neste trecho da curva ocorre o efeito estrutural de ocupação, que corresponde à presença das partículas grossas imersas em meio às partículas finas, substituindo vazios por massa sólida [75].



**Figura 5.10** - Influência do teor de finos no TML.

### 5.2.3 Resultados do STT

Logo após o início do STT, as amostras de IOF sofreram compactação uma vez que foram observados recalques em todos os testes. Foi considerado que os totais recalques são as diferenças entre as alturas das amostras antes ( $h_1$ ) e depois ( $h_2$ ) do STT. Em diversos ensaios foram observados água na superfície da amostra, indicando que houve migração de umidade. A Tabela 5.5 apresenta os resultados de migração de umidade a superfície da amostra produzidos a partir do STT.

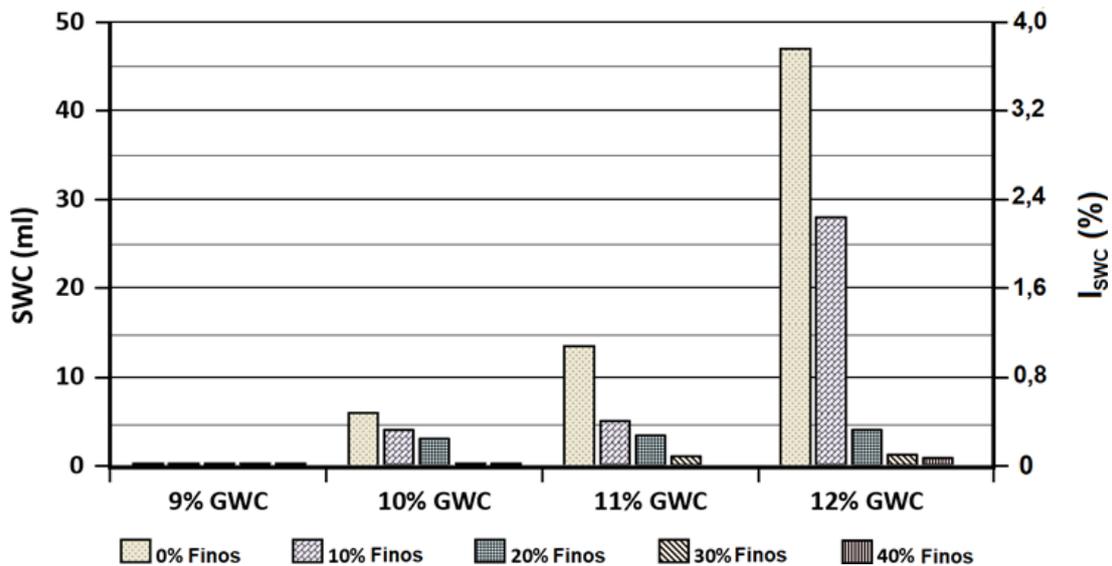
**Tabela 5.5** - Resultados da migração de umidade para a superfície da amostra produzida pelo STT.

ID	Conteúdo de água superficial (SWC) (cm <sup>3</sup> )	Volume da amostra após o STT (cm <sup>3</sup> )	$I_{SWC}$ (%)	Liquefação ?
00STT09	0,0 ± 0,0	1425,0 ± 9,3	0,00 ± 0,00	Não
00STT10	6,0 ± 0,2	1402,4 ± 9,1	0,43 ± 0,03	Sim
00STT11	13,5 ± 0,3	1368,5 ± 8,9	0,99 ± 0,05	Sim
00STT12	47,0 ± 0,6	1345,9 ± 8,8	3,49 ± 0,09	Sim
10STT09	0,0 ± 0,0	1413,7 ± 9,2	0,00 ± 0,00	Não
10STT10	4,0 ± 0,1	1402,4 ± 9,1	0,29 ± 0,01	Sim
10STT11	5,0 ± 0,1	1368,5 ± 8,9	0,37 ± 0,02	Sim
10STT12	28,0 ± 0,4	1334,5 ± 8,7	2,10 ± 0,07	Sim
20STT09	0,0 ± 0,0	1379,8 ± 8,9	0,00 ± 0,00	Não
20STT10	3,0 ± 0,1	1345,9 ± 8,8	0,22 ± 0,01	Sim
20STT11	3,4 ± 0,1	1345,9 ± 8,8	0,25 ± 0,01	Sim
20STT12	4,0 ± 0,1	1323,2 ± 8,7	0,30 ± 0,02	Sim
30STT09	0,0 ± 0,0	1391,1 ± 9,0	0,00 ± 0,00	Não
30STT10	0,0 ± 0,0	1345,9 ± 8,8	0,00 ± 0,00	Não
30STT11	1,0 ± 0,0	1334,5 ± 8,7	0,07 ± 0,01	Sim
30STT12	1,2 ± 0,0	1323,2 ± 8,7	0,09 ± 0,01	Sim
40STT09	0,0 ± 0,0	1413,7 ± 9,2	0,00 ± 0,00	Não
40STT10	0,0 ± 0,0	1391,1 ± 9,0	0,00 ± 0,00	Não
40STT11	0,0 ± 0,0	1357,2 ± 8,8	0,00 ± 0,00	Não
40STT12	0,8 ± 0,2	1311,9 ± 8,6	0,06 ± 0,01	Sim

Observa-se na Tabela 5.5 que a migração da umidade até superfície da amostra não ocorreu quando o GWC estava em 9% para todos os conteúdos de finos (amostras 00STT09, 10STT09, 20STT09, 30STT09 e 40STT09). Também não foi verificado água na superfície das amostras constituídas de 30% de finos com 10% de GWC (amostra 30STT10) e 40% de finos com 10% (amostra 40STT10) e 11% de GWC (amostra 40STT11).

Para essas amostras a camada superior do IOF não exibiu comportamento de fluxo caracterizando que não ocorreu liquefação. Nas demais amostras que houve aparecimento de água na superfície, uma camada de IOF livre caracterizou a liquefação da amostra. Uma melhor visualização desses resultados pode ser realizada através da Figura 5.11.

Ainda na Figura 5.11, observa-se que o indicador ISWC apresentou um comportamento semelhante ao SWC para uma mesma quantidade de finos, pelo fato do STT ter uma densificação das amostras com pouca variação de volume. Dessa forma, maiores valores de ISWC indica maior migração de umidade até a superfície da amostra e conseqüentemente que o potencial de liquefação do IOF é função do conteúdo de migração de umidade.



**Figura 5.11** - Resultados do parâmetro SWC e indicador ISWC após STT.

Os resultados do STT apresentaram que, para um mesmo GWC, houve uma diminuição do SWC de acordo com o aumento do conteúdo de finos. Observa-se que nas amostras com ausência de finos, houve um crescimento muito significativo de SWC e para as amostras com 40% de finos houve SWC apenas para 12% de GWC, indicando que para um mesmo conteúdo de finos de IOF, houve aumento do SWC de acordo com o crescimento do GWC. Presume-se que houve um rearranjo das partículas, principalmente do conteúdo de finos, que proporcionou uma menor condutividade hidráulica.

Essas observações são coerentes com os resultados apresentados na Tabela 5.6, onde verifica-se que o carregamento dinâmico aplicado no STT, ocasionou redução no índice de vazios, aumento do grau de saturação e densificação da amostra. A faixa de valores desses parâmetros está de acordo com estudo [8] que utiliza IOF com propriedades físicas semelhantes.

**Tabela 5.6** - Parâmetros de compactação de amostra antes e depois de STT.

ID	Antes STT					Depois STT				
	<sup>a</sup> Índice de vazios (e)	<sup>b</sup> Conteúdo de água bruta (GWC) (%)	<sup>a</sup> Grau de saturação (S) (%)	<sup>a</sup> Densidade da amostra úmida (g/cm <sup>3</sup> )	<sup>b</sup> Altura da amostra (h <sub>1</sub> ) (cm)	<sup>a</sup> Índice de vazios (e)	<sup>b</sup> Conteúdo de água bruta (GWC) (%)	<sup>a</sup> Grau de saturação (S) (%)	<sup>a</sup> Densidade da amostra úmida (g/cm <sup>3</sup> )	<sup>b</sup> Altura da amostra (h <sub>2</sub> ) (cm)
00STT09	0,78 ± 0,02	9,4 ± 0,0	62,5 ± 1,1	2,9 ± 0,0	12,9 ± 0,3	0,74 ± 0,02	9,4 ± 0,0	68,2 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,6 ± 0,3
00STT10	0,77 ± 0,02	10,8 ± 0,0	73,7 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,8 ± 0,3	0,71 ± 0,02	10,5 ± 0,0	77,1 ± 1,2	3,1 ± 0,0	12,4 ± 0,2
00STT11	0,76 ± 0,02	11,4 ± 0,0	78,9 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,6 ± 0,3	0,70 ± 0,02	10,9 ± 0,0	82,3 ± 1,3	3,1 ± 0,0	12,1 ± 0,2
00STT12	0,75 ± 0,02	12,7 ± 0,1	90,9 ± 1,4	3,1 ± 0,0	12,7 ± 0,3	0,64 ± 0,01	11,3 ± 0,0	93,9 ± 1,5	3,2 ± 0,0	11,9 ± 0,2
10STT09	0,78 ± 0,02	9,2 ± 0,0	61,1 ± 1,1	2,9 ± 0,0	12,8 ± 0,3	0,75 ± 0,02	9,2 ± 0,0	65,1 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,5 ± 0,2
10STT10	0,78 ± 0,02	10,4 ± 0,0	69,8 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,8 ± 0,3	0,72 ± 0,02	9,8 ± 0,0	71,4 ± 1,2	3,1 ± 0,0	12,4 ± 0,2
10STT11	0,77 ± 0,02	11,3 ± 0,0	78,2 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,7 ± 0,3	0,68 ± 0,02	10,7 ± 0,0	83,0 ± 1,3	3,1 ± 0,0	12,1 ± 0,2
10STT12	0,74 ± 0,02	12,4 ± 0,1	90,0 ± 1,4	3,1 ± 0,0	12,3 ± 0,2	0,68 ± 0,02	11,2 ± 0,0	94,5 ± 1,5	3,2 ± 0,0	11,8 ± 0,2
20STT09	0,78 ± 0,02	9,4 ± 0,0	62,3 ± 1,1	2,9 ± 0,0	12,9 ± 0,3	0,67 ± 0,02	9,3 ± 0,0	64,0 ± 1,2	3,1 ± 0,0	12,2 ± 0,2
20STT10	0,76 ± 0,02	10,0 ± 0,0	68,7 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,6 ± 0,3	0,66 ± 0,02	9,7 ± 0,0	77,1 ± 1,2	3,1 ± 0,0	11,9 ± 0,2
20STT11	0,75 ± 0,02	11,0 ± 0,0	78,5 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,5 ± 0,2	0,65 ± 0,02	10,7 ± 0,0	83,0 ± 1,3	3,2 ± 0,0	11,9 ± 0,2
20STT12	0,73 ± 0,02	12,7 ± 0,1	93,5 ± 1,5	3,1 ± 0,0	12,2 ± 0,2	0,64 ± 0,01	12,1 ± 0,1	96,1 ± 1,5	3,2 ± 0,0	11,7 ± 0,2
30STT09	0,76 ± 0,02	9,1 ± 0,0	61,7 ± 1,1	2,9 ± 0,0	12,9 ± 0,3	0,68 ± 0,02	9,1 ± 0,0	69,2 ± 1,2	3,1 ± 0,0	12,3 ± 0,2
30STT10	0,76 ± 0,02	10,5 ± 0,0	72,9 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,5 ± 0,2	0,66 ± 0,02	10,5 ± 0,0	75,7 ± 1,2	3,1 ± 0,0	11,9 ± 0,2
30STT11	0,75 ± 0,02	11,4 ± 0,0	81,5 ± 1,3	3,0 ± 0,0	12,4 ± 0,2	0,66 ± 0,02	11,2 ± 0,0	89,9 ± 1,4	3,2 ± 0,0	11,8 ± 0,2
30STT12	0,73 ± 0,02	12,6 ± 0,1	92,2 ± 1,4	3,1 ± 0,0	12,1 ± 0,2	0,66 ± 0,02	12,4 ± 0,1	92,8 ± 1,4	3,2 ± 0,0	11,7 ± 0,2
40STT09	0,82 ± 0,03	9,0 ± 0,0	57,3 ± 1,0	2,9 ± 0,0	13,0 ± 0,3	0,75 ± 0,02	9,0 ± 0,0	62,6 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,5 ± 0,2
40STT10	0,79 ± 0,02	10,4 ± 0,0	69,3 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,9 ± 0,3	0,71 ± 0,02	10,4 ± 0,0	77,2 ± 1,2	3,1 ± 0,0	12,3 ± 0,2
40STT11	0,75 ± 0,02	11,0 ± 0,0	77,2 ± 1,2	3,0 ± 0,0	12,5 ± 0,2	0,68 ± 0,02	10,9 ± 0,0	86,4 ± 1,2	3,1 ± 0,0	12,0 ± 0,2

	0,02	0,0	1,2	0,0	0,2	0,02	0,0	1,3	0,0	0,2
40STT12	0,73 ±	12,6 ±	93,5 ±	3,1 ±	12,2 ±	0,67 ±	12,5 ±	94,3 ±	3,2 ±	11,6 ±
	0,02	0,1	1,5	0,0	0,2	0,02	0,1	1,5	0,0	0,2

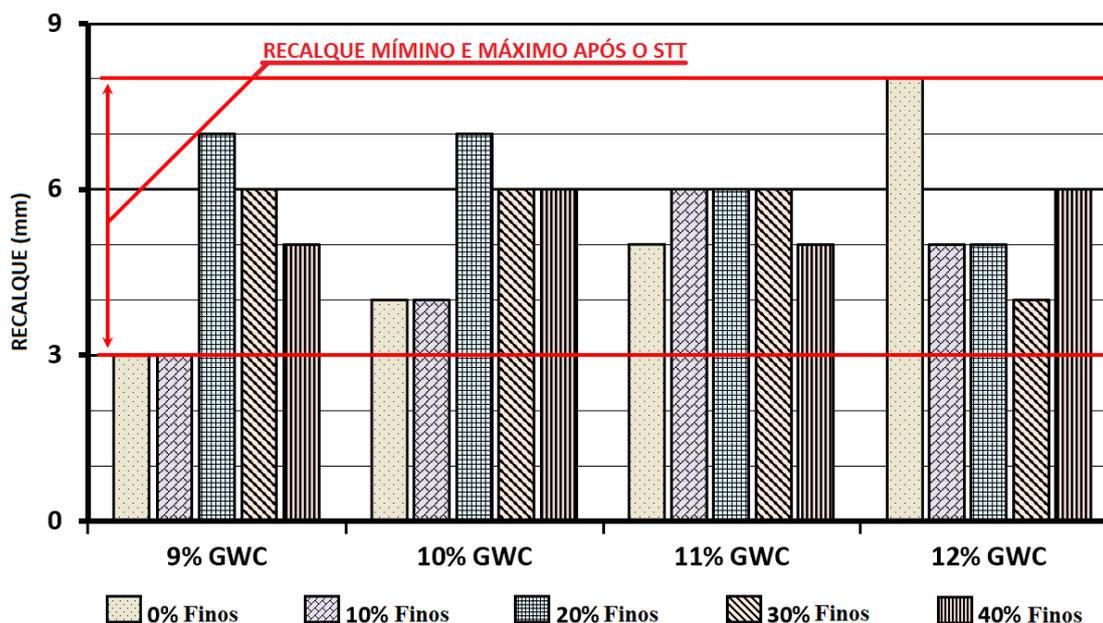
a

Molde de compactação.

b

Molde de teste.

Os recalques totais estão na faixa de 3 mm a 8 mm, conforme mostrados na Figura 5.12. Esses valores são menores que os obtidos no estudo [84] que utilizou STT em materiais bem graduados conteúdo de finos de 18% e 28%. A divergência entre os resultados é devida as diferenças de dimensões dos moldes cilíndricos, quantidade de material utilizado e a energia de compactação das amostras.



**Figura 5.12** – Recalque total após STT.

Os resultados apresentados na Tabela 5.6 foram obtidos antes e após o STT, portanto, o processo de migração de umidade durante o STT não foi averiguado/estudado. Investigações mais aprofundadas com medições de poros pressões e umidade durante o teste são incentivadas para melhor compreender processo de migração de umidade.

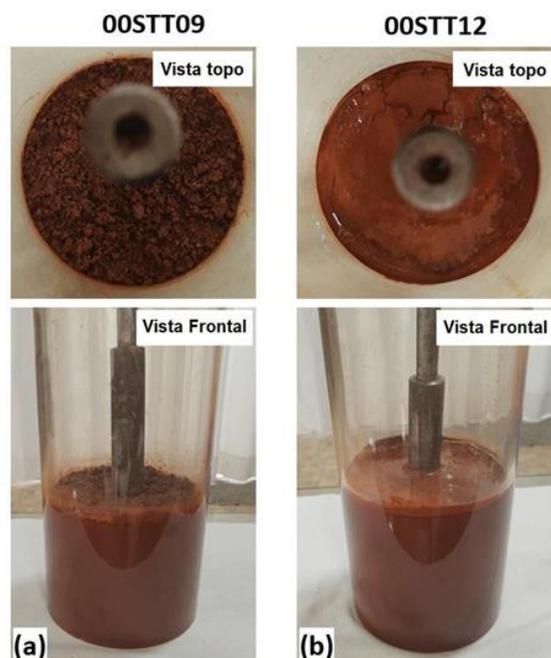
Os resultados apresentados na Tabela 5.7 indicam que o conteúdo de finos e umidade das amostras possuem influência no processo de liquefação de IOF quando submetido a carregamento dinâmico. Observou-se que para as amostras que sofreram liquefação o bit de penetração atingiu o fundo do molde cilíndrico e nas amostras que

não sofreram liquefação houve significativa redução na penetração do bit, conforme caso das amostras 00STT09 e 00STT12, respectivamente, mostrado na Figura 5.13.

**Tabela 5.7** - Resultado da penetração do bit produzidos pelo STT.

ID	Profundidade de penetração do bit (cm)	Densidade da amostra antes do STT (g/cm <sup>3</sup> )	$I_p$ (cm <sup>4</sup> /g)	<sup>a</sup> Liquefaction?
00STT09	10,6 ± 0,2	2,9 ± 0,0	3,66 ± 0,04	Não
00STT10	12,4 ± 0,3	3,0 ± 0,0	4,13 ± 0,05	Sim
00STT11	12,1 ± 0,3	3,0 ± 0,0	4,03 ± 0,05	Sim
00STT12	11,9 ± 0,2	3,1 ± 0,0	3,84 ± 0,04	Sim
10STT09	10,4 ± 0,2	2,9 ± 0,0	3,59 ± 0,04	Não
10STT10	12,4 ± 0,3	3,0 ± 0,0	4,13 ± 0,05	Sim
10STT11	12,1 ± 0,3	3,0 ± 0,0	4,03 ± 0,05	Sim
10STT12	11,8 ± 0,2	3,1 ± 0,0	3,81 ± 0,04	Sim
20STT09	10,1 ± 0,2	2,9 ± 0,0	3,48 ± 0,03	Não
20STT10	11,9 ± 0,2	3,0 ± 0,0	3,97 ± 0,04	Sim
20STT11	11,9 ± 0,2	3,0 ± 0,0	3,97 ± 0,05	Sim
20STT12	11,7 ± 0,2	3,1 ± 0,0	3,77 ± 0,04	Sim
30STT09	9,8 ± 0,2	2,9 ± 0,0	3,38 ± 0,03	Não
30STT10	10,6 ± 0,2	3,0 ± 0,0	3,53 ± 0,03	Não
30STT11	11,8 ± 0,2	3,0 ± 0,0	3,93 ± 0,04	Sim
30STT12	11,7 ± 0,2	3,1 ± 0,0	3,77 ± 0,04	Sim
40STT09	9,6 ± 0,2	2,9 ± 0,0	3,31 ± 0,03	Não
40STT10	10,1 ± 0,2	3,0 ± 0,0	3,37 ± 0,03	Não
40STT11	10,4 ± 0,2	3,0 ± 0,0	3,47 ± 0,03	Não
40STT12	11,6 ± 0,2	3,1 ± 0,0	3,74 ± 0,04	Sim

<sup>a</sup> Resultado de liquefação extraído da Tabela 5.4.

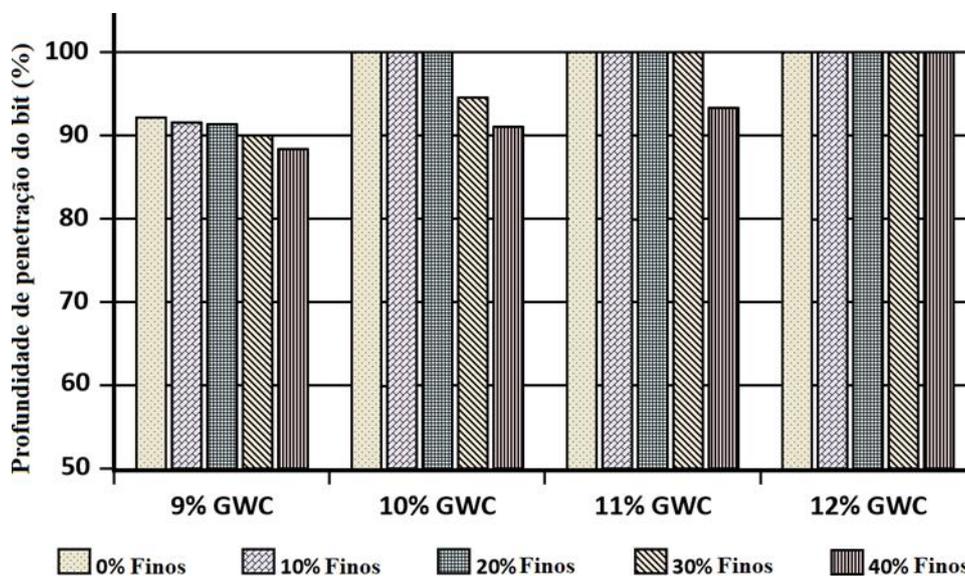


**Figura 5.13** - Profundidade de penetração do bit. (a) Amostra 00STT09 e (b) Amostra 00STT12.

Observa-se na Figura 5.13a que na amostra 00STT09 não houve o surgimento de SWC e não houve penetração do bit até o fundo do molde cilíndrico. Também foi observado que a amostra não atingiu estado de fluxo. Na Figura 5.13b verifica-se uma amostra liquefeita, com significativa SWC e penetração do bit até o fundo do molde cilíndrico.

Nas amostras que não sofreram liquefação, para 9% de GWC, verificou-se uma redução da profundidade de penetração do bit de acordo com o aumento do conteúdo de finos. Verificou-se ainda, nas amostras com 30% e 40% de finos que não sofreram liquefação, que para o mesmo conteúdo de finos, a profundidade de penetração do bit aumentou com o crescimento da umidade, resultados semelhantes foram observados em [8].

Na Figura 5.14 é mostrada a profundidade de penetração do bit em percentual da altura final (h2). Nas amostras que não tiveram o bit de penetração atingindo o fundo do molde cilíndrico o valor percentual de penetração é menor que 100%.



**Figura 5.14** - Profundidade de penetração do bit em percentual da altura final da amostra.

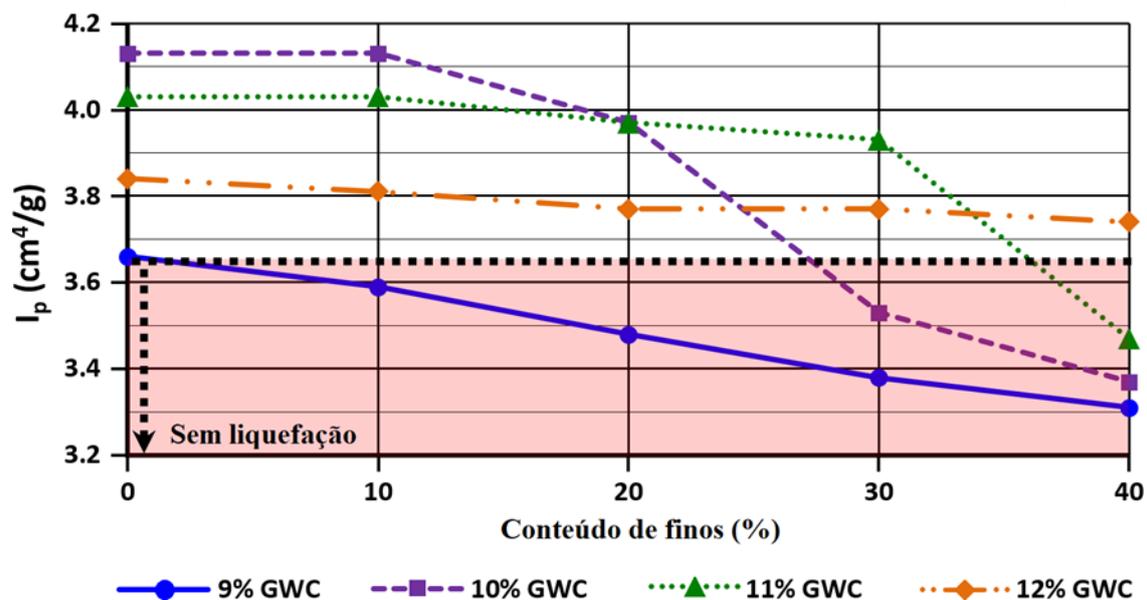
Os resultados encontrados nesse estudo que correlacionam densidade e conteúdo de finos com potencial de liquefação são coerentes com os resultados observados no

estudo [33], em que as amostras com as mesmas densidades foram mais resistentes à falha cíclica quando possuíam maiores teores de finos.

As amostras que não sofreram liquefação e possuem mesma densidade da amostra úmida antes do STT apresentam redução da profundidade de penetração do bit com crescimento do conteúdo de finos e para as amostras que sofreram liquefação com a mesma densidade de amostra úmida antes do STT observou-se redução do SWC de acordo com aumento do conteúdo de finos.

O indicador  $I_p$  apresentou um comportamento semelhante ao da profundidade de penetração do bit para as amostras que não sofreram liquefação, devido as densidades das amostras variarem pouco, conforme mostrado na área destacada na Figura 5.15. Portanto, para as amostras que não sofreram liquefação, menores valores de  $I_p$  indica menor potencial de liquefação.

Os resultados da Figura 5.15 mostram que as amostras com valores de  $I_p$  menores que 3,63 não sofreram liquefação, dessa forma, este indicador pode ser aplicado para classificação de potencial de liquefação. Não é pertinente a análise do indicador  $I_p$  para as amostras que sofreram liquefação, pois a penetração do bit foi limitada pelo fundo do molde cilíndrico.



**Figura 5.15** - Curva do indicador  $I_p$ .

Com base nos testes realizados, observa-se que a profundidade de penetração do bit é uma função do tempo e amplitude do carregamento dinâmico, dessa forma, uma

investigação mais aprofundada é necessária para determinar a importância desses parâmetros na profundidade de penetração do bit, conseqüentemente, no potencial de liquefação.

#### **5.2.4 Verificação dos resultados do STT**

Para verificação dos resultados do STT foram utilizados os parâmetros relacionados a liquefação, com destaque ao TML produzido pelo MPFT. De acordo com FERREIRA [87], o TML não é um parâmetro de resistência à liquefação, mas sim um valor de umidade máxima que corresponde a um grau de saturação baixo o suficiente para que não ocorra liquefação ou instabilidade da pilha nas condições de carregamento cíclico às quais a carga é submetida no transporte marítimo.

Observa-se na Figura 5.10 que o menor TML obtido foi de 9,6% para a amostra com conteúdo de finos de 20%. Esse resultado produzido pelo MPFT é coerente com os resultados produzidos pelo STT mostrado na Tabela 5.5, em que as amostras com GWC antes do STT em torno de 9% (00STT09, 10STT09, 20STT09, 30STT09 e 40STT09) não sofreram liquefação. Estes resultados indicam que para uma umidade abaixo de aproximadamente 9%, não ocorreria liquefação durante o transporte marítimo com uma carga deste tipo de IOF.

Verifica-se na Figura 5.10 um TML de 10,6%, 10,1% e 9,6% para as amostras com conteúdo de finos de 0%, 10% e 20%, respectivamente. Houve liquefação nas amostras 00STT10, 10STT10 e 20STT10 que possuíam GWC antes do STT de 10,8%, 10,4% e 10,0%, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 5.6. Portanto, os resultados de liquefação produzidos pelo STT, correspondem aos resultados de TML produzidos pelo MPFT, uma vez que o GWC de cada amostra estava acima do seu respectivo TML.

A Figura 5.10 mostra que o maior TML obtido foi de 10,6% para as amostras sem conteúdo de finos. Foi observado liquefação nas amostras 00STT11, 10STT11, 20STT11 e 30STT11 que possuíam GWC antes do STT em torno de 11%, conforme mostrado na Tabela 5.6. Estes resultados de liquefação obtidos pelo STT estão coerentes com seus respectivos TML produzidos pelo MPFT.

De acordo com os resultados de TML produzidos pelo MPFT, as amostras 30STT10, 40STT10 e 40STT11 que estavam com GWC antes do STT de 10,5%, 10,4%

e 11,0%, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 5.6, deveriam ter apresentado liquefação, pois essas unidades estão acima do TML de suas respectivas amostras; entretanto, não foi observado SWC e estado de fluxo nas amostras. Presume-se que valores de GWC muito próximos ao TML, podem causar essa discordância devido o tempo e amplitude da vibração aplicados no STT, previsto na norma ASTM D4253-00 [78], não ser específica para IOF.

Observa-se na Tabela 5.8 que amostras submetidas ao STT e MPFT com GWC próximos (maior erro igual a 3,6%), possuem maior erro para índice de vazios de 20,6% para amostra de 20% de finos com GWC em torno de 11%, maior erro para grau de saturação de 12,0% para amostra de 10% de finos com GWC em torno de 9% e maior erro para densidade da amostra úmida de 6,3% para amostra de 40% de finos com GWC em torno de 11%. Esses resultados indicam que a metodologia experimental que foi desenvolvida usando mesa de vibração, produz uma densificação em amostras de IOF equivalente a

**Tabela 5.8** - Comparação dos parâmetros das amostras submetidas ao STT e MPFT.

ID	Conteúdo de água bruta (GWC) (%)	Diferença do GWC (%)	Índice de vazios (e)	Diferença do e (%)	Grau de saturação (S) (%)	Diferença da S (%)	Densidade da amostra úmida (g/cm <sup>3</sup> )	Diferença da Densidade da amostra (%)
00STT09	9,4 ± 0,0	1,1 ± 0,0	0,74 ± 0,02	6,8 ± 5,4	68,2 ± 1,2	5,6 ± 3,4	3,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
00MPFT04	9,5 ± 0,0		0,69 ± 0,02		64,4 ± 1,1		3,0 ± 0,0	
00STT12	11,3 ± 0,0	0,9 ± 0,0	0,64 ± 0,01	7,8 ± 3,1	93,9 ± 1,5	2,4 ± 3,1	3,2 ± 0,0	3,0 ± 0,0
00MPFT05	11,4 ± 0,0		0,59 ± 0,01		91,6 ± 1,4		3,3 ± 0,0	
10STT09	9,2 ± 0,0	3,3 ± 0,0	0,75 ± 0,02	2,7 ± 5,3	65,1 ± 1,2	12,0 ± 3,4	3,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
10MPFT04	8,9 ± 0,0		0,73 ± 0,02		57,3 ± 1,0		3,0 ± 0,0	
10STT11	10,7 ± 0,0	1,9 ± 0,0	0,68 ± 0,02	17,6 ± 4,4	83,0 ± 1,3	6,4 ± 2,9	3,1 ± 0,0	6,1 ± 0,0
10MPFT05	10,5 ± 0,0		0,56 ± 0,01		88,7 ± 1,3		3,3 ± 0,0	
20STT09	9,3 ± 0,0	3,2 ± 0,0	0,67 ± 0,02	10,4 ± 4,5	64,0 ± 1,2	8,6 ± 3,4	3,1 ± 0,0	3,1 ± 0,0
20MPFT04	9,0 ± 0,0		0,60 ± 0,01		70,0 ± 1,2		3,2 ± 0,0	
20STT11	10,7 ± 0,0	0,9 ± 0,0	0,65 ± 0,02	16,9 ± 4,6	83,0 ± 1,3	11,8 ± 3,0	3,2 ± 0,0	5,9 ± 0,0
20MPFT05	10,8 ± 0,0		0,54 ± 0,01		94,1 ± 1,5		3,4 ± 0,0	
30STT09	9,1 ± 0,0	3,2 ± 0,0	0,68 ± 0,02	10,3 ± 4,4	69,2 ± 1,2	4,0 ± 3,3	3,1 ± 0,0	3,1 ± 0,0
30MPFT04	9,4 ± 0,0		0,61 ± 0,01		72,1 ± 1,2		3,2 ± 0,0	
30STT11	11,2 ± 0,0	0,9 ± 0,0	0,66 ± 0,02	18,2 ± 4,5	89,9 ± 1,4	6,2 ± 3,0	3,2 ± 0,0	5,9 ± 0,0
30MPFT05	11,1 ± 0,0		0,54 ± 0,01		95,8 ± 1,5		3,4 ± 0,0	
40STT09	9,0 ± 0,0	3,2 ± 0,0	0,75 ± 0,02	12,0 ± 4,0	62,6 ± 1,2	5,4 ± 3,3	3,0 ± 0,0	3,2 ± 0,0
40MPFT04	9,3 ± 0,0		0,66 ± 0,01		66,2 ± 1,0		3,1 ± 0,0	
40STT11	10,9 ± 0,0	3,5 ± 0,0	0,68 ± 0,02	17,6 ± 4,4	86,4 ± 1,3	8,4 ± 3,0	3,1 ± 0,0	8,8 ± 0,0
40MPFT05	11,3 ± 0,0		0,56 ± 0,01		94,3 ± 1,5		3,4 ± 0,0	

<sup>a</sup> Tamanho da partícula < 150 µm.

Finalizando, como esperado houve liquefação em todas as amostras com GWC em torno de 12%, pelo fato do maior TML ser de 10,6% para amostra sem conteúdo de finos. De forma geral, verifica-se que o estado de liquefação produzido pelo STT possui correspondência com o TML produzido pelo MPFT.

Neste estudo, a amplitude de deslocamento, frequência de vibração e tempo total aplicados no STT produziram nas amostras de IOF valores de índice de vazios, grau de saturação e densidade de amostra úmida que foram comparados com os valores produzidos pelo MPFT.

### **5.2.5 Conclusão do capítulo**

Este estudo, usando STT e MPFT, investigou a resposta de liquefação do IOF para uma ampla gama de finos e teores de umidade comumente transportados via graneleiros. Uma metodologia experimental foi desenvolvida utilizando uma mesa de agitação para investigar os parâmetros que influenciam o potencial de liquefação de cargas a granel sob carregamento cíclico. A partir dos resultados experimentais, apresenta-se as seguintes conclusões:

1. Os resultados do MPFT mostram que o teor de finos do minério de ferro influencia significativamente o TML. Em particular, o TML diminuiu até o teor de finos de transição (TFC), após o qual passou a aumentar.
2. Em geral, os resultados de liquefação obtidos com a metodologia proposta com STT foram consistentes com o TML produzido pelo MPFT. Não houve liquefação nas amostras onde GWC foi menor que TML e houve liquefação na maioria das amostras onde GWC foi maior que TML.
3. O potencial de liquefação do IOF correlaciona-se com a migração de umidade para a superfície, e esses fenômenos dependem dos finos e teores de umidade. Para o mesmo teor de finos, o SWC aumenta com o aumento do GWC, e para o mesmo teor de umidade, o SWC diminui com o aumento do teor de finos.
4. A aplicação da metodologia experimental desenvolvida usando STT causou uma redução na razão de vazios nas amostras de IOF, um aumento no grau de saturação e uma redução na densidade da amostra úmida, com valores comparáveis aos da metodologia de compactação MPFT.

5. Para as amostras com a mesma densidade de amostra úmida antes do STT, o potencial de liquefação do IOF apresentou relação inversa com o teor de finos. Nas amostras que não sofreram liquefação, para a mesma densidade, houve redução na profundidade de penetração da broca com o aumento do teor de finos. Nas amostras que sofreram liquefação, para a mesma densidade, houve redução do SWC com o aumento do teor de finos.

6. Os indicadores propostos,  $I_p$  e ISWC, são parâmetros úteis para avaliar o potencial de liquefação do IOF em amostras com diferentes teores de finos e teores de umidade; para o IOF testado, um  $I_p \leq 3,66$  indica que não deve haver liquefação e um  $ISWC > 0$  indica liquefação potencial.

Este artigo relata dados e descobertas que são úteis para entender o comportamento da liquefação potencial de IOF sob carregamento dinâmico. Os indicadores e a metodologia experimental propostos para a análise do potencial de liquefação fornecem parâmetros úteis para as empresas de navegação que desejam mitigar o risco de liquefação de granéis sólidos, além do MPFT.

Finalmente, estudos adicionais visando otimizar a amplitude de deslocamento, frequência de vibração e tempo total do STT para reduzir erros na razão de vazios, grau de saturação e densidade em relação ao MPFT são fortemente encorajados.

## CAPÍTULO 6

### 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Nesta tese foi usada uma abordagem experimental para investigar o efeito da distribuição granulométrica de IOF na liquefação estática e dinâmica. Foram propostos novos métodos que proporcionaram uma análise para compreender os parâmetros que influenciam no potencial de liquefação de cargas sólidas a granel durante o transporte marítimo.

Em conformidade com a revisão bibliográfica realizada, não foram encontrados estudos que correlacionem o efeito da distribuição granulométrica de IOF no TML para investigar o potencial de liquefação de cargas de graneleiros durante o transporte marítimo. Neste sentido, esta tese desenvolveu metodologia para classificar e indicadores para quantificar o potencial de liquefação de IOF.

A metodologia para classificação do potencial de IOF utilizou parâmetros obtidos por testes convencionais, como fator de coesão Coulomb produzido pelo DST e o TML obtido pelo PFT. Os indicadores  $I_p$  e ISWC, propostos para quantificar o potencial de liquefação de IOF, utilizaram parâmetros de simples medição, como profundidade de penetração do bit e volume de água superficial. Assim, as contribuições científicas desenvolvidas e propostas nesta tese forneceram parâmetros úteis e de simples obtenção para as empresas de transporte marítimo mitigar os riscos de liquefação de IOF. Ainda, estes estudos têm potencial aplicação para análise de suscetibilidade a liquefação de outros tipos de cargas liquefáveis.

Nesta pesquisa foram realizados DST, FTT e PFT para análises do potencial de liquefação estática de amostras reconstituídas de minério de ferro variando o conteúdo de finos e umidade. Observou-se que a variação granulométrica do IOF possui influência no TML, o acréscimo do conteúdo de finos aumentou o TML, indicando aumento da resistência a liquefação estática, entretanto, não foi descartada a hipótese de ter um conteúdo de finos de transição. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito interno e fator de coesão Coulomb, foram alterados pelo conteúdo de

finos, sendo observado um TFC para o ângulo de atrito interno e uma correlação do fator de coesão de Coulomb com o teor de umidade e índice de vazios.

Para análises do potencial de liquefação dinâmica foi desenvolvida uma metodologia experimental usando o STT com uma ampla faixa de conteúdo de finos. Os resultados do SST mostraram uma compactação semelhante a produzida pelo MPFT. Recalques na faixa de faixa de 3- 8 mm foram encontrados nas amostras após o STT. Também foi observado redução do índice de vazios e aumento do grau de saturação, consequentemente, redução da densidade da amostra úmida.

A metodologia experimental usando STT apresentou resultados de liquefação coerentes com os resultados de TML produzidos pelo MPFT. As amostras que não apresentaram liquefação, mesmo havendo um GWC maior que o TML, indicam que a duração e amplitude de vibração do STT pode ser ajustado para que a metodologia experimental seja específica para IOF.

Duas relevantes contribuições científicas foram apresentadas nesta tese. A primeira foi proveniente da metodologia proposta usando o STT, em que foi verificada uma correlação da migração de umidade até a superfície da amostra de IOF com o potencial de liquefação. Nesta pesquisa foi verificado que as amostras de IOF que apresentaram volume de água livre na superfície do recipiente exibiram comportamento de fluxo. Assim, o SWC pode ser um parâmetro para indicar liquefação quando obtido por STT.

A segunda contribuição foi oriunda do MPFT, em que foi observado um TFC para o TML. Dessa forma, para cada minério de ferro haverá um TFC que produzirá o menor TML, informação importante para as empresas de transporte marítimo que para redução do risco de liquefação deve buscar um carregamento de IOF com maior TML possível.

As conclusões desta pesquisa são pautadas nos resultados dos testes de amostras limitadas de IOF, obtidas de indústria de mineração brasileira, equivalentes às cargas de IOF que saem do Brasil por navios graneleiros. Entretanto, as metodologias, indicadores e análises do potencial de liquefação de IOF ajudarão as empresas de transporte marítimo a reduzir o risco de liquefação das cargas sólidas a granel. Assim,

incentivamos mais estudos relacionados à distribuição do tamanho de partícula de IOF no potencial de liquefação de cargas de graneleiros para o transporte marítimo.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta tese de doutorado foi realizada uma abordagem experimental para investigar o efeito da distribuição granulométrica dos finos de minério de ferro (IOF) na resposta a liquefação estática e dinâmica de cargas sólidas a granel. Dessa forma, incentivamos a realização de estudos para ampliar e parametrizar o ensaio de mesa de vibração (STT), para extração de outros dados que auxiliem na análise de suscetibilidade a liquefação dos finos de minério de ferro.

Também são incentivadas pesquisas sobre o potencial de liquefação utilizando as metodologias propostas nesta tese, com outros minérios em diferentes graduações granulométricas e conteúdo de umidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UNCTAD Secretariat. (2019). “Review of maritime transport.” United Nations Conf. on trade and Development, Geneva.
- [2] VALE - Produção e vendas da Vale no 4T17, (2019). Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/4q17-production-report.aspx>>. Acesso em: 25 nov. 2021.
- [3] DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral, Economia Mineral do Brasil, Diretoria de Desenvolvimento e Economia Mineral (Ed.), Mineração de Metais Ferrosos, DNP, Brasília, DF, 2020, 100–101.
- [4] IMO - International Maritime Organization. International Maritime Solid Bulk Cargoes Code. Londres: IMO, 2018.
- [5] MUNRO M.C., A. MOHAJERANI, Determination of the transportable moisture limit of iron ore fines for the prevention of liquefaction in bulk carriers, *Mar. Struct.* 40 (2015) 193–224.
- [6] MUNRO M.C., A. MOHAJERANI, Moisture content limits of iron ore fines to prevent liquefaction during transport: review and experimental study, *Int. J. Miner. Process.* 148 (2016) 137– 146.
- [7] JONAS, M. Liquefaction of unprocessed mineral ores - Iron ore fines and nickel ore. Brooks Bell. GARD News No. 197. United Kingdom: Liverpool, (2010).
- [8] MUNRO M.C., A. MOHAJERANI, Cyclic behavior of iron ore fines on board bulk carriers: scale model analysis, *J. Mater. Civ. Eng.* 29 (7) (2017) 1–17.
- [9] TÉCNICO EM MINERAÇÃO - O Portal do profissional. Carvão mineral no Brasil e no mundo, (2017). Disponível em: <https://tecnicoemineracao.com.br/carvao-mineral-no-brasil-e-no-mundo>. Acessado: 08/11/2017.
- [10] IMO - International Maritime Organization, Adoption of the International Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC) Code—Resolution MSC.268(85). London, 2008.
- [11] ROSE, T. P. Solid Bulk Shipping: Cargo Shift, Liquefaction and the Transportable Moisture Limit. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Oxford, Oxford, 2014.
- [12] IRON ORE TECHNICAL WORKING GROUP, Iron ore fines Proctor-Fagerberg test— Submission for evaluation and verification. 2013.
- [13] IRON ORE TECHNICAL WORKING GROUP, Research Synopsis and Recommendations - Submission for Verification. 2013.

- [14] MUNRO M.C., A. MOHAJERANI, “Liquefaction incidents of mineral cargoes on board bulk carriers”, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2016) 1–20.
- [15] IMO - International Maritime Organization. Guidelines for Developing and Approving Procedures for Sampling, Testing and Controlling the Moisture Content for Solid Bulk Cargoes Which May Liquefy. MSC.1/Circ.1454/Rev.1, 2015a.
- [16] IMO - International Maritime Organization. Early implementation of draft amendments to the IMSBC code related to the carriage and testing of iron ore fines, sub-committee for dangerous cargoes, solids and containers. DSC. 1 /Circ. 71, 2013.
- [17] FAGERBERG, B, STAVANG, A. Determination of critical moisture contents in ore concentrates carried in cargo vessels. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TRANSPORT AND HANDLING OF MINERALS, 1., 1971, Vancouver. Proceedings of the First International Symposium on Transport and Handling of Minerals. São Francisco: Miller Freeman, 1971. p. 174- 185.
- [18] IRON ORE TECHNICAL WORKING GROUP. Reference Tests - Submission for Evaluation and Verification. 2013.
- [19] FERREIRA R.F., T.M. PEREIRA, R.M.F. LIMA, A model for estimating the PFD80 transportable moisture limit of iron ore fines, *Powder Technol.* 345 (2019) 329–337.
- [20] MOHAJERANI A., J. DEAN, M.C. MUNRO, An overview of the behaviour of iron ore fines cargoes, and some recommended solutions for the reduction of shifting incidents during marine transportation, *Ocean Eng.* 182 (2019) 451–474.
- [21] MEIRELES, R. P. L. Modelagem e simulação de malha ferroviária em circuito fechado da Estrada de Ferro Vitória a Minas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. 2010.
- [22] MUNRO M.C., A. MOHAJERANI, Variation of the geotechnical properties of iron ore fines under cyclic loading, *Ocean Eng.* 126 (2016) 411–431.
- [23] MUNRO M.C., A. MOHAJERANI, Bulk cargo liquefaction incidents during marine transportation and possible causes, *Ocean Eng.* 141 (2017) 125–142.
- [24] GREEN, P.V., KIRBY, J.M. Behaviour of Damp Fine-grained Bulk Mineral Cargoes. *Trans. Int. Mar. E., The Institute of Marine Engineers*, 94 (19): 2-12., 1981.
- [25] HARDER, L. F., JR. Use of Penetration Tests to Determine the Cyclic Loading Resistance of Gravelly Soils During Earthquake Shaking. Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, CA, 1988.
- [26] GREEN, P.V., HUGHES, T.H. Stability of Bulk Mineral Cargoes. *Institution of Mining & Metallurgy-Trans, Sect A*, n. 86, p. A150-A158, outubro, 1977.

- [27] ISHIHARA, K. Liquefaction of subsurface soils during earthquakes. *Journal of Disaster Research*, v.1, n. 2, p. 245-261, 2006.
- [28] PEREIRA, E.L. Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. Ouro Preto: UFOP, 2001. 51 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- [29] SEED, H. B., & IDRIS, I. M. Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquakes, monograph series. Earthquake Engineering Research Institute. (1982).
- [30] DAVIES, M., MCROBERTS, E., & MARTIN, T. Static Liquefaction of Tailings – Fundamentals and Case Histories. AMEC Earth & Environmental. (2002).
- [31] POULOS, S.J. Liquefaction Related Phenomena, *Advance Dam Engineering for Design*, Van Nostrand Reinhold, pp.292-320. (1989).
- [32] TERZAGHI, K., PECK, R., & MESRI, G. *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3 ed.). New York: John Wiley & Sons. (1996).
- [33] TSUCHIDA H. Estimation of liquefaction potential of sandy soils, Proc. 3rd joint Meeting, US- Japan, UNJR. (1971).
- [34] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, (1993). 43(3), pp. 351-451.
- [35] PITMAN T.D, P.K. ROBERTSON, AND D.C. SEGO. Influence of de fines on the colapse of loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*.(1994). 35 (5): pp. 728-739.
- [36] YANG S., S. LACASSE, R. SANDVEN, Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines, *Geotech. Test. J.* 29 (2) (2006) 102–107.
- [37] LADE, P.V., LIGGIO JR., C.D., YAMAMURO, J.A. Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *Geotechnical Testing Journal*, v. 21, n. 4, p. 336-347, 1998.
- [38] LAMBE T., & WHITMAN, R. *Soil Mechanics*, SI Version: John Wiley & Sons. (1969).
- [39] TERZAGHI K. *Erdbaumechanik*. Franz Deuticke, Vienna. (1925).
- [40] JEFFERIES M., BEEN, K. *Soil Liquefaction: A Critical State Approach*. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [41] JRADI L., B.S.E. DINE, J.-C. DUPLA, J. Canou, Influence of non-plastic fines on the cyclic resistance of sands to liquefaction, *MATEC Web Conf.* 281 (2019).

- [42] AKHILA M., K.R. SWAMY, N. SANKAR, Liquefaction susceptibility of non-plastic silty sands using hypoplastic model simulations, *J. Geotech. Eng.* (2019) 1–11.
- [43] PHANA V.T.-A., D.-H. HSIAOB, P.T.-L. NGUYENC, Critical state line and state parameter of sand-fines mixtures, *Proc. Eng.* 142 (2016) 299–306.
- [44] ENOMOTO T., Liquefaction and post-liquefaction properties of sand-silt mixtures and undisturbed silty sands, *Soils Found.* (2019).
- [45] XENAKI V.C., G.A. ATHANASOPOULOS, Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 23 (3) (2013) 1–12.
- [46] POLITO C.P., J.R. MARIN II, Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 127 (5) (2001) 408–415.
- [47] BENSOUOLA M., H. MISSOUM, K. BENDANI, Liquefaction potential sand-silt mixtures under static loading, *Revista de La Construcción* 17 (2) (2018) 196–208.
- [48] LISTER J.D., A.G. WATERS, Kinetics of Iron ore sinter feed granulation, *Powder Technol.* 62 (2) (1990) 125–134.
- [49] LISTER J.D., A.G. Waters, Influence of the material properties of &on ore sinter feed on granulation effectiveness, *Powder Technol.* 55 (2) (1988) 125–134.
- [50] NYEMBWE A.M., R.D. CROMARTY, A.M. GARBERS-CRAIG, Prediction of the granule size distribution of iron ore sinter feeds that contain concentrate and micropellets, *Powder Technol.* 295 (2016) 7–15.
- [51] X. LV, C. BAI, G. QIU, M. HU, Kinetics of water absorption by the bed of iron ore particles during granulation, *Powder Technol.* 204 (1) (2010) 138–144.
- [52] W. CHEN, A. ROBERTS, K. WILLIAMS, J. MILLER, J. PLINKE, On uniaxial compression and Jenike direct shear testings of cohesive iron ore materials, *Powder Technol.* 312 (2017) 184–193.
- [53] P.P. CAVALCANTI, L.M. TAVARES, Statistical analysis of fracture characteristics of industrial iron ore pellets, *Powder Technol.* 325 (2018) 659–668.
- [54] CHEN W., A. ROBERTS, A. KATTERFELD, C. WHEELER, Modelling the stability of iron ore bulk cargoes during marine transport, *Powder Technol.* 326 (2018) 255–264.
- [55] G. GUSTAFSSON, H.-Å. HÄGGBLAD, P. JONSÉN, P. MARKLUND, Determination of bulk properties and fracture data for iron ore pellets using instrumented confined compression experiments, *Powder Technol.* 241 (2013) 19–27.
- [56] WANG H., J. KOSEKI, F. CAI, Numerical evaluation of liquefaction potential of heap of iron ore fines during maritime transportation, *Proceedings of 19th*

International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2017, pp. 1447–1450.

[57] ZHOU M., H. ZHOU, T. HONEYANDS, D.P. O'DEA, B.G. ELLIS, P. MA, Y. LI, Evaluation of compressive strength and shear strength of the adhering layer of granules in iron ore sintering, *Powder Technol.* 338 (2018) 599–607.

[58] WANG H., J. KOSEKI, T. SATO, G. CHIARO, J.T. TIAN, Effect of saturation on liquefaction resistance of iron ore fines and two sandy soils, *Soils Found.* 56 (4) (2016) 732–744.

[59] WEI H., X. TANG, Y. GE, M. LI, H. SAXÉN, Y. YU, Numerical and experimental studies of the effect of iron ore particle shape on repose angle and porosity of a heap, *Powder Technol.* 353 (2019) 526–534.

[60] JU L., D. VASSALOS, Q. WANG, Y. WANG, Y. LIU, Numerical investigation of solid bulk cargo liquefaction, *Ocean Eng.* 159 (2018) 333–347.

[61] JU L., D. VASSALOS, Q. WANG, Y. WANG, Y. LIU, Solid bulk cargo instability during marine transport. *Ocean Eng.* 186 (2019) ID 106089,

[62] SPANDONIDIS C.C., K.J. SPYROU, Micro-scale modeling of excited granular ship cargos: a numerical approach. *Ocean Eng.* 74 (2013) 22–36.

[63] DAOUD S., I. SAID, S. ENNOUR, M. BOUASSIDA, Numerical analysis of cargo liquefaction mechanism under the swell motion, *Mar. Struct.* 57 (2018) 52–71.

[64] K.A. KWA, D.W. AIREY, Effects of fines on liquefaction behaviour in well-graded materials, *Can. Geotech. J.* 54 (10) (2017) 1460–1471.

[65] K.A. KWA, D. AIREY, Effects of fines on the cyclic liquefaction behaviour in unsaturated, well- graded materials, *Soils Found.* 59 (4) (2019) 857–873.

[66] CHEN W., Z. WANG, C. WHEELER, A. ROBERTS, A. KATTERFELD, Experimental and numerical investigation on the load stability of coal cargoes during marine transport, *Granul. Matter* 23 (16) (2021) 1–16.

[67] KOROMILA I.A., C.C. SPANDONIDIS, K.J. SPYROU, Experimental investigation of cargo liquefaction and impact on the stability of a bulk – carrier, *International Ship Stability Workshop: Proc. 13th Int. Ship Stability Workshop*, 2013.

[68] KWA K.A., Y. HU, J. CHEN, Z. CHEN, D.W. AIREY, Column tests investigating the liquefaction of partially saturated loose non-plastic soils, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 139 (2020) ID 106386.

[69] BAYATIA H., M.H. BAGHERIPOUR, Shaking table study on liquefaction behaviour of different saturated sands reinforced by stone columns. *Mar. Georesources Geotechnol.* 37 (7) (2019) 801–815.

- [70] ADAMPIRA M., M. DERAKHSHANDI, A. GHALANDARZADEH, Experimental Study on Seismic Response Characteristics of Liquefiable Soil Layers. *J. Earthq. Eng.* 25 (7) (2021) 1287–1315.
- [71] IMO - International Maritime Organization, Carriage of iron ore fines that may liquefy (DSC.1/Circ66). London, 2011.
- [72] IMO - International Maritime Organization, International Maritime solid bulk cargoes code. London, 2013.
- [73] MUNRO M.C., A. MOHAJERANI, Slope stability evaluation of iron ore fines during marine transport in bulk carriers, *Can. Geotech. J.* 55 (2) (2018) 258–278.
- [74] MOREIRA, D.D.C, C.A.S. SANTOS, A.L.A. MESQUITA, D.C. MOREIRA, Influence of particle size distribution of iron ore fines on liquefaction during marine transportation, *Powder Technol.* 373 (2020) 301–309.
- [75] JIAN Q., H. WANG, J. ZHOU, W. MAO, H. ZHENG, Liquefaction potential evaluation for iron ore fines based on a correlation between moisture content and cyclic strength, *Appl. Ocean Res.* 103 (2020) ID 102327.
- [76] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 3852, Minérios de Ferro Como Insumo Para alto-Forno e Redução Direta - Determinação da Densidade a Granel, ABNT, São Paulo, SP, 2009.
- [77] ASTM - American Society for Testing and Materials, ASTM D3080/D3080M-11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Solids under Consolidated Drained Conditions Solids, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [78] ASTM - American Society for Testing and Materials, ASTM D4253-00, Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [79] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7181, Solo - Análise granulométrica, ABNT, São Paulo, SP, 2016.
- [80] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 6508, Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- [81] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3082, Minérios de Ferro - Procedimentos de Amostragem e Preparação de Amostras. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- [82] M. ZHOU, H. ZHOU, T. HONEYANDS, D.P. O'DEA, B.G. ELLIS, P. MA, Y. LI, Evaluation of compressive strength and shear strength of the adhering layer of granules in iron ore sintering, *Powder Technol.* 338 (2018) 599–607.

- [83] A. BAGHERZADEH-KHALKHALI, A.A. MIRGHASEMI, Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils, *Particuology* 7 (1) (2009) 83–91.
- [84] IMO - International Maritime Organization, Report on Research into the Behaviour of Bauxite during Shipping CCC 4/INF.10. London, 2017.
- [85] M.C. MUNRO, A. MOHAJERANI, Slope stability evaluation of iron ore fines during marine transport in bulk carriers, *Can. Geotech. J.* 55 (2) (2018) 258–278.
- [86] A.C. TAIBA, M. BELKHATIR, A. KADRI, Y. MAHMOUDI, T. SCHANZ, Insight into the effect of granulometric characteristics on the static liquefaction susceptibility of silty sand soils, *Geotech. Geol. Eng.* 34 (2016) 367–382.
- [87] R.F. FERREIRA, Doctoral Thesis: Modelos para Previsão do Limite de Umidade para Transporte Marítimo de Finos de Minério de Ferro – TML, Federal University of Ouro Preto, 2019.
- [88] P.V. LADE, Reply to the discussion by Jefferies, been and Olivera on evaluation of static liquefaction potential of silty sand slopes, *Can. Geotech. J.* 49 (6) (2012) 751–752.
- [89] ASTM - American Society for Testing and Materials, ASTM D2487-06, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

## APÊNDICE A – INDETIFICADOR DAS AMOSTRAS DE TESTE

Identificador das amostras do teste da mesa de fluxo - FTT

Tabela 0.1 - Identificação das amostras do FTT.

ID	Deformação plástica Após o teste	*Partícula IOF (%)
FTT1.1	Não	5,2 ± 0,1
FTT1.2	Sim	
FTT2.1	Não	15,6 ± 0,2
FTT2.2	Sim	
FTT3.1	Não	19,3 ± 0,2
FTT3.2	Sim	
FTT4.1	Não	22,6 ± 0,3
FTT4.2	Sim	

\*Tamanho da partícula < 150 µm.

Identificador das amostras do teste Proctor Fagerberg - PFT

Tabela 0.2 - Identificação das amostras do PFT, contidas no artigo 1.

ID	Conteúdo bruto de água por peso (GWC) (%)	Índice de vazios (e)	*Partícula IOF (%)
PFT1.1	2,78	0,68	5,2
PFT1.2	3,83	0,67	
PFT1.3	5,65	0,66	
PFT1.4	8,65	0,55	
PFT1.5	10,16	0,59	
PFT2.1	2,95	0,68	15,6
PFT2.2	3,92	0,67	
PFT2.3	5,99	0,67	
PFT2.4	9,48	0,56	
PFT2.5	10,71	0,60	
PFT3.1	3,14	0,69	19,3
PFT3.2	4,18	0,67	
PFT3.3	6,09	0,67	
PFT3.4	10,49	0,58	
PFT3.5	11,27	0,60	
PFT4.1	4,56	0,71	22,6
PFT4.2	5,85	0,70	
PFT4.3	8,55	0,71	
PFT4.4	10,78	0,58	
PFT4.5	11,68	0,61	

\*Tamanho da partícula < 150 µm.

Identificador das amostras do ensaio de cisalhamento direto – DST.

Tabela 0.3 - Identificação das amostras do DST.

ID	Conteúdo de água bruta por peso (GWC) (%)	*Partícula IOF (%)
DST1.1	9	
DST1.2	10	5,2 ± 0,1
DST1.3	11	
DST1.4	12	
DST2.1	9	
DST2.2	10	15,6 ± 0,1
DST2.3	11	
DST2.4	12	
DST3.1	9	
DST3.2	10	19,3 ± 0,1
DST3.3	11	
DST3.4	12	
DST4.1	9	
DST4.2	10	22,6 ± 0,1
DST4.3	11	
DST4.4	12	

\*Tamanho da partícula < 150 µm.

Identificador das amostras do teste Proctor Fagerberg modificado - MPFT

Tabela 0.4 - Identificação de amostras MPFT.

Teste de Compactação	<sup>a</sup> Conteúdo de Finos	ID				
		0,0 ± 0,0	10,0 ± 0,2	20,0 ± 0,2	30,0 ± 0,3	40,0 ± 0,3
1		00MPFT01	10MPFT01	20MPFT01	30MPFT01	40MPFT01
2		00MPFT02	10MPFT02	20MPFT02	30MPFT02	40MPFT02
3		00MPFT03	10MPFT03	20MPFT03	30MPFT03	40MPFT03
4		00MPFT04	10MPFT04	20MPFT04	30MPFT04	40MPFT04
5		00MPFT05	10MPFT05	20MPFT05	30MPFT05	40MPFT05
6		00MPFT06	10MPFT06	20MPFT06	30MPFT06	40MPFT06

<sup>a</sup> Tamanho da partícula < 150 µm.

Identificador das amostras do ensaio de mesa de vibração - STT

Tabela 0.5 - Identificação das amostras do STT.

ID	<sup>a</sup> IOF conteúdo de finos (%)	Conteúdo de água bruta por peso (GWC) (%)
00STT09	0	9
00STT10		10
00STT11		11
00STT12		12
10STT09	10	9
10STT10		10
10STT11		11
10STT12		12
20STT09	20	9
20STT10		10
20STT11		11
20STT12		12
30STT09	30	9
30STT10		10
30STT11		11
30STT12		12
40STT09	40	9
40STT10		10
40STT11		11
40STT12		12

<sup>a</sup> Tamanho de partícula < 150 µm.