

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LUCAS LISOT

ESTUDO DA LIQUEFAÇÃO DE CARGA A GRANEL SÓLIDO COM EVENTUAL  
COMPROMETIMENTO DA ESTABILIDADE DE NAVIOS

Joinville  
2019

LUCAS LISOT

ESTUDO DA LIQUEFAÇÃO DE CARGA A GRANEL SÓLIDO COM EVENTUAL  
COMPROMETIMENTO DA ESTABILIDADE DE NAVIOS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Ricardo Aurélio Quinhões  
Pinto

Joinville

2019

LUCAS LISOT

ESTUDO DA LIQUEFAÇÃO DE CARGA A GRANEL SÓLIDO COM EVENTUAL  
COMPROMETIMENTO DA ESTABILIDADE DE NAVIOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto  
Orientador/Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Thiago Pontin Tancredi  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Luiz Eduardo Bueno Minioli  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico esse trabalho à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família por ter me dado a oportunidade de cursar essa faculdade e ter me dado todo o apoio necessário para a realização deste trabalho.

Agradeço a todo o corpo docente da UFSC e seus servidores por terem me dado a estrutura e os conhecimentos para a conclusão deste trabalho e do curso de Engenharia Naval, em especial ao meu orientador Ricardo.

Agradeço à minha namorada Flavia, por me auxiliar e motivar sempre que foi preciso.

Sou muito grato a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

“A persistência é o caminho do êxito”

**Charles Chaplin**

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo a respeito da liquefação de carga granel sólida que pode comprometer a estabilidade de navios por meio do efeito de superfície livre. Acidentes recentes fazem com que o estudo do tema seja de extrema relevância, a fim de se possibilitar a minimização desta problemática. Este trabalho tem o objetivo de compreender os motivos pelos quais isso acontece e, também, as maneiras de se diminuir o efeito de superfície livre causado pela liquefação da carga. Através de levantamento bibliográfico, reunião de conhecimento, informações aprendidas durante o curso e materiais de diferentes áreas da engenharia naval, foi possível realizar todas as colocações aventadas nessa pesquisa. Ao final do presente estudo, verificou-se que, não obstante a existência de métodos que possibilitam a redução da liquefação da carga granel sólida e o grande número de normas internacionais regulamentárias, a precária fiscalização e a pouca relevância dada ao tema ainda são entraves para a atenuação dos acidentes relacionados à perda de estabilidade.

**Palavras-chave:** Estabilidade de embarcações. Efeito de superfície livre. Liquefação de granel sólido.

## **ABSTRACT**

This work presents a study on the liquefaction of solid bulk cargoes that can compromise the stability of ships through the free surface effect. Recent accidents make the study of the subject extremely relevant in order to make possible the minimization of this problem. This work aims to understand the reasons why this happens and also the ways to reduce the free surface effect caused by the liquefaction of the load. Through a bibliographical survey, knowledge gathering, information learned during the course and materials from different areas of naval engineering, it was possible to carry out all the suggestions put forward in this report. At the end of the present study, it was found that, despite the existence of methods to reduce the liquefaction of solid bulk cargoes and the large number of international regulatory standards, the poor inspection and lack of relevance to the subject are still obstacles to the attenuation of the accidents related to the loss of stability.

**Key words:** Ship stability. Free surface effect. Liquefaction of solid bulk.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa com os Locais dos acidentes.....	19
Figura 2 - Minério de ferro antes e depois da liquefação.....	20
Figura 3 - Processo físico da liquefação.....	23
Figura 4 - Comportamento do líquido.....	23
Figura 5 - Perda de Estabilidade.....	24
Figura 6 – Diferença entre o TML e o FMP.....	25
Figura 7 – Fluxograma para realizar o carreamento.....	27
Figura 8 – Teste FFT.....	29
Figura 9 – Exemplo de amostra que sofre liquefação no FFT.....	30
Figura 10 – Teste PFT.....	30
Figura 11 – Teste PT.....	31
Figura 12 – Exemplo de amostra que sofre liquefação no PT.....	32
Figura 13 – Pontos M, G, B e K .....	33
Figura 14 – GM Negativo.....	34
Figura 15 – Tanque preenchido com líquido incompleto.....	36
Figura 16 – Carga deslocada que não volta a posição original.....	41
Figura 17 – Carga concentrada em um lado do porão.....	42
Figura 18 – CEE para liquefação de carga de densidade 1.6 t/m <sup>3</sup> .....	44
Figura 19 – CEE para a liquefação de carga de densidade 3.6t/m <sup>3</sup> .....	44
Figura 20 – Curva CEE para liquefação de cargas leves.....	45
Figura 21 – CEE para a carga em estado sólido do segundo caso.....	47
Figura 22 – Curva CEE para a carga liquefeita.....	48
Figura 23 – Teste de Lata.....	53
Figura 24 – Amostra brilhosa.....	54
Figura 25 – Design seguro de graneleiro.....	54
Figura 26 – SID não disparados.....	55
Figura 27 – SID já disparados e inflados.....	55
Figura 28 – Polímero Superabsorventes.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de perdas totais e de vidas.....	17
Tabela 2 - Embarcações que sofreram acidentes devido a liquefação de carga.....	18
Tabela 3 - Grupo A da IMO.....	22
Tabela 4 - Parâmetros dos testes para TML.....	28
Tabela 5 - Tabela para encontrar o valor de k.....	38
Tabela 6 - Dimensões da embarcação teste.....	43
Tabela 7 - Dimensões da embarcação segundo caso.....	46
Tabela 8 - Propriedades Hidrostáticas enquanto a carga estava sólida.....	46
Tabela 9 - Critérios da IMO obedecidos.....	47
Tabela 10 - Propriedades hidrostáticas para a carga liquefeita.....	48
Tabela 11 - Critérios IMO depois da liquefação da carga.....	49

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

INTERCARGO - International Organization of Dry Cargo Shipowners

IMO - International Maritime Organization

IMSBC - International Maritime Solid Bulk Cargoes Code

SOLAS - International Convention for the Safety of Life at Sea

TML - Transportable Moisture Limit

FMP - Flow Moisture Point

MC - Moisture Content

FTT - Flow Table Test

PFT - Proctor / Fagerberg Test

PTT - Penetration Test

G - Centro de Gravidade do Corpo

B - Centro de Flutuação

K - Ponto de Linha Base

M - Metacentro Inicial

GZ - Braço de Endireitamento

GM - Altura Metacêntrica

CEE - Curva de Estabilidade Estática

MSL - Momento de Superfície Livre

SCCS - Specially Constructed Cargo Ships

BCSN - Bulk Cargo Shipping Name

CT - Can Test

SID - Safety Inflated Devices

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	14
1.1.1 Objetivo Geral.....	14
1.1.2 Objetivos Específicos .....	15
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 LIQUEFAÇÃO DO GRANEL SÓLIDO .....	16
2.1.1 Estatísticas de Acidentes de Navios Graneleiros.....	16
2.1.2 O Processo de Liquefação do Granel Sólido .....	19
2.1.3 Classificação do Granel Sólido .....	21
2.1.4 O Processo Físico/químico da Liquefação de Granel Sólido .....	22
2.1.5 Regulamento de Controle para a Liquefação de Carga.....	25
2.1.6 Testes de Controle do TML e MC do Granel.....	27
2.2 ESTABILIDADE DE NAVIOS .....	32
2.2.1 Estabilidade Inicial Transversal de Embarcações.....	32
2.2.2 Estabilidade Intacta para Embarcações.....	34
2.3 EFEITO DE SUPERFÍCIE LIVRE .....	35
2.3.1 Cálculo do Momento de Superfície Livre.....	37
2.3.2 Cálculo da Altura Metacêntrica Corrigida .....	39
2.3.3 Cálculo dos Braços de Endireitamentos Corrigidos.....	39
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
<b>4 ESTABILIDADE E EFEITO DE SUPERFÍCIE LIVRE PARA O GRUPO A .....</b>	<b>41</b>
4.1 ESTUDO DE CASO DA MODIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE.....	43
4.1.1 Primeiro Caso .....	43
4.1.2 Segundo Caso .....	45
4.2 EMBARCAÇÕES PREPARADAS PARA TRANSPORTAR CARGA DO GRUPO A .	49
<b>5. MOTIVOS PELOS QUAIS OS ACIDENTES ACONTECEM.....</b>	<b>51</b>
<b>6. PREVENÇÕES PARA EVITAR OS ACIDENTES .....</b>	<b>53</b>
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE A - GRUPO A DA IMO COMPLETO .....</b>	<b>61</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A segurança para a navegação de uma embarcação parte de vários princípios, dentre os quais destacam-se a estabilidade longitudinal e a transversal, que têm forte influência tanto para projeto quanto para operação. Esses quesitos devem estar ajustados ao ideal e todas as possibilidades de eventuais alterações na estabilidade que possam acontecer devem ser antevistas e verificadas para que não haja nenhum imprevisto que possa vir a interferir na vida útil do navio ou em sua condição de navegação.

Os problemas relacionados à estabilidade são graves, uma vez considerando que grande parte dos acidentes tangentes a esse revés levam a embarcação ao naufrágio e colocam em risco as vidas de toda a tripulação.

É notável que a engenharia naval, à semelhança de todas as engenharias, tende a se desenvolver e se aprimorar muitas vezes tendo por base acidentes desastrosos. Em virtude da enorme gama de variáveis de projeto, dificilmente todas podem ser previstas. Muitas vezes algumas variáveis de projeto se mostram relevantes apenas sob condições isoladas, e a partir de seu acontecimento, justificativas e estudos são elaborados para se evitar que elas se repitam.

Por esses trilhos, o presente estudo possui como escopo a análise de uma problemática que vem acontecendo nos últimos anos em que diversos navios transportadores de granel sólido, que segundo Minculescu (2013) é todo sólido fragmentado ou grão vegetal transportado diretamente nos porões do navio, sem embalagem e em grandes quantidades, têm ficado com a estabilidade comprometida quando alguns tipos de granel sólido, geralmente sólidos bifásicos que tem a presença de água (ANDREI e HANZU PAZARA, 2013) , por motivos de umidade, pressão e atrito se liquefazem gerando um efeito muito conhecido no ramo de engenharia naval, o efeito de superfície livre, causando enorme insegurança na área mercante ao redor do mundo.

Para o transporte de granel líquido, os navios tanque têm toda uma preparação e variáveis de projeto diferentes dos que transportam granel sólido, dado que são inúmeros os fatores que devem ser levados em consideração para garantir que a embarcação seja estável e possua uma navegação suave e segura, tendo também diferentes técnicas para minimizar o efeito de superfície livre que tem grande peso quando se diz respeito à estabilidade.

Já para os navios de granel sólido todo seu arranjo faz com que ele esteja preparado para transportar apenas carga sólida com segurança. A transformação do estado da matéria faz com que a embarcação não esteja mais segura no ponto de vista de estabilidade para o transporte

da carga. A título de exemplo pode-se citar o caso do navio Stellar Daisy, que em março de 2017 naufragou enquanto transportava cerca de 260 mil toneladas de minério de ferro do Brasil para a China (ROMANZOTI, 2018), destacando que o minério de ferro é uma das principais cargas de granel sólido que pode sofrer o processo de liquefação dentro dos porões de um navio.

Para evitar que essa problemática se agrave e não se estenda, essa pesquisa tem como propósito buscar informações para caracterizar a liquefação da carga a granel sólida e compreender o processo para poder minimizar e listar possíveis soluções para contornar essa adversidade, e que a engenharia naval como um todo esteja cada vez mais capacitada para lidar com a precaução de situações que envolvam perigo ou mau funcionamento de qualquer elemento pertencente a área.

A pesquisa é resultado de uma revisão bibliográfica das implicações do efeito de superfície livre aplicada à estabilidade das embarcações. Faz-se necessário a introdução de conceitos gerais sobre os temas para apresentar e esclarecer aspectos sobre o efeito de superfície livre e a estabilidade, relacionando-os. Considera-se pesquisa bibliográfica aquela desenvolvida com base em material publicado em livros, revistas, jornais, redes eletrônicas, isto é, material acessível ao público em geral.

As três principais vertentes para a realização da pesquisa são os estudos em cima de liquefação de carga a granel, o efeito de superfície livre e estabilidade de embarcações. Levantando informações o suficiente para entender e explicar os motivos pelos quais acidentes como o citado acima estão a acontecer. Não se pretende realizar uma confirmação empírica na pesquisa apresentada.

## 1.1 OBJETIVOS

Para entender a problemática da perda de estabilidade dos navios devido a liquefação da carga a granel sólida, propõe-se neste trabalho os objetivos a seguir explanados.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo para compreender a liquefação de carga sólida a granel e estudar soluções de modo a evitar e minimizar a perda de estabilidade em embarcações graneleiras cuja a carga tem propensão a liquefazer.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar quais as cargas sólidas propensas à liquefação;
- Investigar o motivo de as cargas sofrerem o processo de liquefação;
- Estudar como o efeito de liquefação pode ser minimizado;
- Comparar a influência da liquefação com o efeito de superfície livre;
- Discutir maneiras de minimizar o efeito de superfície livre em embarcações de granel sólido;
- Analisar o quanto o efeito de superfície livre irá afetar a estabilidade das embarcações.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo, por meio de uma revisão bibliográfica, expor conceitos a respeito das três vertentes do estudo deste trabalho: compreender os motivos pelos quais cargas a granel sólido podem se tornar líquidas, compreender o processo de liquefação e obter um melhor entendimento do efeito de superfície livre e como ele pode influenciar na estabilidade das embarcações.

### 2.1 LIQUEFAÇÃO DO GRANEL SÓLIDO

Com a quantidade de acidentes tangentes a essa problemática, faz-se necessário o entendimento completo a respeito da liquefação da carga granel sólido. Em consonância com as estatísticas que serão exploradas no tópico seguinte, a problemática ora em evidência possui importante relevância para os navios graneleiros.

Em razão do número de acidentes envolvendo a liquefação da carga a granel, cada vez mais tem se regulamentado a operação com este tipo de carga. As cargas propensas à liquefação devem sempre ser testadas de modo a comprovar a estabilidade e a segurança do seu comportamento durante a viagem.

Conquanto o aumento da normatização e dos estudos tendentes à redução expressiva das chances de acidentes, em decorrência do não cumprimento dos regramentos existentes, da precariedade da fiscalização e da falta de conhecimento sobre os assuntos, tragédias ainda acontecem.

#### 2.1.1 Estatísticas de Acidentes de Navios Graneleiros

Um relatório de acidentes de navios graneleiros foi desenvolvido com a intenção de classificar e rastrear os motivos pelos quais a referida problemática está acontecendo. Investigou-se o máximo de informações nos registros ao redor do mundo, com o intuito de detalhar os motivos dos desastres e, principalmente, fazer a sua prevenção.

O relatório utilizado na presente pesquisa foi o *Bulk Carrier Casualty Report*, desenvolvido pela *International Organization of Dry Cargo Shipowners* (INTERCARGO - Associação Internacional dos armadores de granel sólido). O documento traz informações de um período de 10 anos, de 2008 a 2017.



De acordo com o relatório, cerca de 53 navios de granel sólido tiveram perda total neste período, causando a morte de 202 pessoas.

Tabela 1 - Número de perdas totais e de vidas.

Reported cause	Losses of life	Losses of ships	Likely root cause	Losses of ships
<b>Cargo shift/liquefaction</b>	101	9	<b>Cargo failure</b>	9
<b>Collision</b>	0	4	<b>Machinery failure</b>	1
			<b>Unknown</b>	3
<b>Fire/explosion</b>	16	3	<b>Unknown</b>	3
<b>Flooding</b>	14	8	<b>Unknown</b>	5
			<b>Collision</b>	0
			<b>Machinery failure</b>	1
			<b>Weather</b>	1
			<b>Structural</b>	1
<b>Grounding</b>	10	22	<b>Machinery failure</b>	5
			<b>Navigation</b>	6
			<b>Unknown</b>	9
			<b>Weather</b>	2
<b>Structural</b>	0	1	<b>Unknown</b>	0
			<b>Collision</b>	1
<b>Unknown</b>	61	6	<b>Unknown</b>	5
			<b>Weather</b>	0
			<b>Machinery failure</b>	1
<b>TOTAL</b>	202	53		53

Fonte: INTERCARGO (2018)

Como pode ser observado na Tabela 1, o principal motivo das mortes de tripulantes é a liquefação de carga e o deslocamento de carga (podendo ser agravado pela liquefação), resultando em 101 fatalidades, o que representa 50% do total de mortes avaliadas no período. Nessa toada, há de se destacar, ainda, que alguns dos acidentes que foram classificados como origem não descoberta pelo relatório, podem ter sido causados por liquefação de carga.

A tabela a seguir mostra informações a respeito de todos os navios que se acidentaram devido a liquefação de carga no período da avaliação do relatório da INTERCARGO.

Tabela 2 - Embarcações que sofreram acidentes devido a liquefação de carga.

Name	IMO No.	Incident Date	Deadweight	Built	Flag	Class	Loss of life
Black Rose	7602455	09-Sep-09	37657	1977	Mongolia	unknown	1
	<b>Reported cause:</b> <u>Cargo shift/liquefaction</u> (Likely root cause: <u>Cargo shift/liquefaction</u> ) - Carrying Indian Iron Ore Fines (laterite/clay ore).						
	Investigation report on IMO GISIS: No						
Jian Fu Star	8106379	27-Oct-10	45108	1983	Panama	ABS	13
	<b>Reported cause:</b> <u>Cargo shift/liquefaction</u> (Likely root cause: <u>Cargo shift/liquefaction</u> ) - Nickel Ore liquefaction loaded from Indonesia.						
	Investigation report on IMO GISIS: <b>available on 2014.5.13 (31 months from incident date)</b>						
Nasco Diamond	9467861	10-Nov-10	56893	2009	Panama	CCS	22
	<b>Reported cause:</b> <u>Cargo shift/liquefaction</u> (Likely root cause: <u>Cargo shift/liquefaction</u> ) - Nickel Ore liquefaction loaded from Indonesia.						
	Investigation report on IMO GISIS: <b>available on 2013.5.13 (30 months from incident date)</b>						
Hong Wei	9230139	03-Dec-10	50149	2001	Panama	NK	10
	<b>Reported cause:</b> <u>Cargo shift/liquefaction</u> (Likely root cause: <u>Cargo shift/liquefaction</u> ) - Nickel Ore liquefaction loaded from Indonesia.						
	Investigation report on IMO GISIS: <b>available on 2013.5.13. (29 months from incident date)</b>						
Vinalines Queen	9290907	25-Dec-11	56040	2005	Vietnam	NK	22
	<b>Reported cause:</b> <u>Cargo shift/liquefaction</u> (Likely root cause: <u>Cargo shift/liquefaction</u> ) - Nickel Ore liquefaction carrying 54,400 tons of Nickel ore from Indonesia's Morowali.						
	Investigation report on IMO GISIS: No						
Harita Bauxite	8103664	17-Feb-13	48891	1983	Panama	RINA	15
	<b>Reported cause:</b> <u>Cargo shift/liquefaction</u> (Likely root cause: <u>Cargo shift/liquefaction</u> ) - Nickel Ore liquefaction from Indonesia with 47,450 metric tons of nickel ore.						
	Investigation report on IMO GISIS: <b>available on 2015.08.17 (29 months from incident date)</b>						
Trans Summer	9615468	14-Aug-13	56824	2012	Hong Kong, China	BV	0
	<b>Reported cause:</b> <u>Cargo shift/liquefaction</u> (Likely root cause: <u>Cargo shift/liquefaction</u> ) - Due to Nickel Ore liquefaction, capsized and sank carrying 57,000 tons of nickel ore from Indonesia.						
	Investigation report on IMO GISIS: <b>available on 2015.11.30 (27 months)</b>						
Bulk Jupiter	9339947	02-Jan-15	56009	2006	Bahamas	NK	18
	<b>Reported cause:</b> <u>Cargo shift/liquefaction</u> (Likely root cause: <u>Cargo shift/liquefaction</u> ) - Ship sank and 18 crew lost with a cargo of 46,400 tons of bauxite on board loaded in Kuantan, Malaysia.						
	Investigation report on IMO GISIS: <b>Available on 2015.8.18 (7 months from incident date)</b>						
Asian Forest (It was categorised as General Cargo ship with Equasis)	9369112	17-Jul-09	14434	2007	Hong Kong, China	NK	0
	<b>Reported cause:</b> <u>Cargo shift/liquefaction</u> (Likely root cause: <u>Cargo shift/liquefaction</u> ) - loaded with 13,600 tons of Indian Iron Ore Fines (laterite/clay ore); it was rainy monsoon season in India at that time of the year.						
	Investigation report on IMO GISIS: No						

Fonte: INTERCARGO (2018)

As cargas transportadas pelos navios citados acima foram: minério de ferro fino, minério de níquel e bauxita. Estas cargas estão entre os maiores causadores de acidentes nos últimos 25 anos (INTERCARGO, 2017).

De acordo com a Figura 1, a maior parte dos acidentes envolvendo a perda de estabilidade pela liquefação do granel se concentra na Ásia, sendo o país de origem com maior número de casualidades a Indonésia.

Figura 1 - Mapa com os Locais dos acidentes.



Fonte: PAASSEN ET AL (2016)

As estatísticas avaliadas para este período mostram que a liquefação de carga é um motivo de grande preocupação quando se trata de transporte de granel sólido, causado quase 1 acidente por ano e inúmeras mortes.

Os acidentes que estão acontecendo poderiam ser reduzidos. Os motivos que induzem a liquefação de carga e alguns métodos de controle para se evitar a perda de estabilidade já foram descobertos, porém medidas mais rígidas não estão sendo tomadas para que se diminua o seu risco.

### 2.1.2 O Processo de Liquefação do Granel Sólido

O granel sólido tem como característica ser uma carga que se transporta em estado bruto, isto é, sem nenhum processo de industrialização ou embalagem fracionada, podendo ser denominado como uma matéria prima, sendo a sua contabilização feita pelo peso (ANDREI e HANZU PAZARA, 2013). Esta categoria de carga, se transportada de modo correto, sempre deveria estar em estado sólido, como o próprio nome a classifica.

Existem algumas condições especiais para um seletivo grupo de granéis sólidos que, quando são compactados no transporte e estão com uma quantidade de umidade acima do ideal, podem sofrer um processo de liquefação, isto é, transformam-se de sólido para um estado fluido, adquirindo características de um fluido denso e viscoso (GARD AS, 2014).

Em sua forma líquida, seu comportamento enquanto estiver nos tanques do navio pode ser indesejado. Enquanto cargas sólidas normalmente não se movem tanto enquanto estão sendo transportadas, a líquida move-se de uma maneira mais intensa e instantânea, que pode inclusive comprometer a estabilidade da embarcação.

O fenômeno da liquefação de materiais granulares consiste na transformação do estado sólido ao estado liquefeito devido a um aumento de poro-pressão da água e redução da tensão efetiva entre as partículas sólidas. (Ferreira et al, 2016, p. 2)

Desta forma, o sólido obtém um comportamento líquido, apesar de não mudar de estado físico da matéria. Este novo comportamento do granel tem um aspecto viscoso, podendo se assemelhar à argila ou à lama, dependendo da quantidade de água presente na mistura, como mostra a Figura 2 (B).

Figura 2 - Minério de ferro antes e depois da liquefação.

(A)



(B)



Fonte: CAPTAIN TUGSAN ET AL (2014)

A Figura 2(A) mostra o minério de ferro, que é um exemplo de material que pode ter esse tipo de comportamento, inclusive tendo sido apontado como o causador do desastre do

navio *Stellar Daisy*, citado anteriormente. A hipótese de que o minério de ferro possa mudar de estado físico da matéria torna-se realmente improvável, pois possui temperatura de fusão muito elevada – em torno de 1535 °C a pressão atmosférica (FOGAÇA, 2018).

Existem dois pré-requisitos para a liquefação ocorrer. O primeiro é o granel ter pequenas partículas sólidas em sua composição, isto é, o tamanho dos grãos deve ter raio pequeno. Em segundo lugar, cita-se a necessidade da presença de uma quantidade mínima de umidade para que a liquefação se torne possível (DNV GL, 2015). Este tema será melhor explanado no item 2.1.4.

### **2.1.3 Classificação do Granel Sólido**

De acordo com Walton (2014), existem em torno de 300 tipos diferentes de granel sólido nos registros da *International Maritime Organization* (IMO - Organização Marítima Internacional). Para regulamentar todo este segmento, a IMO criou em 1965 o *International Maritime Solid Bulk Cargoes Code* (IMSBC - Código Marítimo Internacional para Cargas Sólidas à Granel).

De acordo com a Regra VI/1-2 da *International Convention for the Safety of Life at Sea* (SOLAS - Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar), o IMSBC passou a ser obrigatório mundialmente no dia 1º de janeiro de 2011. No código referenciado estão classificados todos os graneis sólidos e o modo de operação de cada um.

Os granéis estão separados por grupos, o grupo A para cargas que podem liquefazer, o grupo B para cargas que possuem perigo químico e o grupo C para cargas que não pertencem ao grupo A nem ao grupo B.

Para o interesse deste trabalho, será abordado com mais detalhes o grupo A do código. De acordo com estudos da própria IMO, os granéis sólidos classificados neste grupo têm propensão à liquefação quando as regras e parâmetros estipulados no regulamento para armazenamento e transporte do produto não são respeitados.

O grupo A estipulado pelo IMSBC é composto por inúmeros granéis que podem ser resumidos em conjuntos que estão listados na tabela abaixo. Todos os granéis presentes no grupo A estão dispostos no apêndice A.

Tabela 3 -Grupo A da IMO

<b>GRUPO A DA IMO</b>
<b>MINÉRIO NÃO PROCESSADO</b>
Minério de níquel
Mineria de ferro fino
Fluorecentes
Alguns tipos de Bauxita
<b>CONCENTRADO DE MINERAIS</b>
Concentrado de chumbo / residuo de minério
Concentrado de manganês
Concentrado de zinco / sinter / lodo

Fonte: LLOYD'S AGENCY.

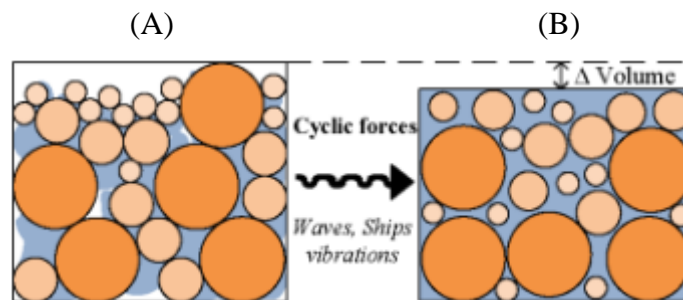
#### 2.1.4 O Processo Físico/Químico da Liquefação de Granel Sólido

Para tornar o entendimento a respeito da liquefação mais compreensível, faz-se necessário, primeiramente, o estudo deste processo fisicamente. Para os granéis do grupo A do IMSBC, o primeiro fator para a ocorrência da liquefação, é a compactação da carga presente nos tanques do navio.

A compactação se dá através da acomodação do granel dos tanques e das vibrações geradas principalmente pelos motores e movimentos periódicos de navegação. Isto faz com que o volume de espaços entre as partículas reduza. Com isso, a carga fica menos aerada, fazendo com que a umidade presente no granel sólido sofra aumento na pressão das partículas de água, uma vez que a quantidade de água fica maior do que os espaços entre as partículas. Este aumento da pressão da água reduz o atrito entre as partículas sólidas, tornando possível o deslizamento da carga com o efeito de gravidade (Walton, 2014), exemplificado na figura abaixo.

A Figura 3A mostra a o granel antes de sofrer a compactação e a Figura 3B após a compactação.

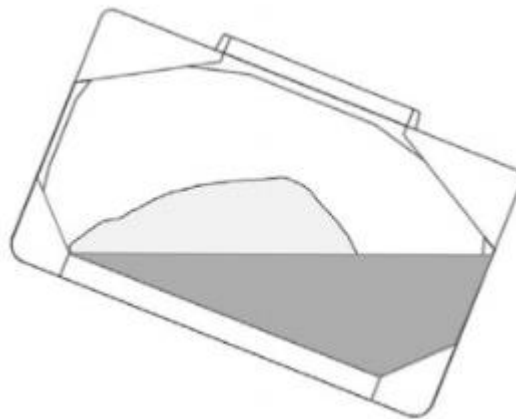
Figura 3A e 3B – Processo físico da liquefação.



Fonte: ROSE (2014)

Como observado na Figura 3B, as partículas do granel quando compactadas não tocam umas às outras, diminuindo as forças de atrito internas e facilitando, desta maneira, o deslizamento das partículas. Portanto, quando a embarcação adquire ângulo de banda o deslizamento da carga acontece de forma muito mais rápida e intensa como mostra a Figura 4, ficando paralela a linha d'água.

Figura 4 - Comportamento do líquido.



Fonte: DNV GL (2015).

As cargas que estão mais propensas a sofrer este processo são refinadas –partículas de tamanhos pequenos– e com permeabilidade baixa quando compactados, pois, desta maneira, os grãos ficam facilmente cercados de água, sem absorvê-la. Sob essas circunstâncias, o atrito entre as partículas se reduz. Entende-se que os agravantes para a liquefação da carga sejam o excesso de umidade, as cargas compactadas, partículas de tamanho pequeno e baixa permeabilidade.

Toda carga transportada como granel sólido tem presença de umidade. Quando a quantidade de água presente na carga for maior, essa situação requer mais atenção para transporte. Quando a quantidade de umidade for mais baixa, não há grandes preocupações quanto à liquefação.

Um fator que deve ser levado em consideração é a migração de umidade. Enquanto as cargas estão em transporte ou armazenadas, a carga capta a umidade do ar, chuva, absorção de água do ambiente, entre outros. O controle da umidade na carga é imprescindível, pois a verificação da umidade de maneira visual pode iludir o vistoriador. Muito embora por vezes a carga possa aparentar seca está com a umidade acima do permitido para o embarque. Testes devem ser realizados para obter convicção.

O código IMSBC em seu capítulo 7.1.1 diz

“Tais cargas podem parecer estar em um estado granular relativamente seco quando carregadas e ainda assim podem conter umidade suficiente para tornarem-se fluidas, sob o estímulo de compactação e vibração que ocorre durante a viagem” (IMSBC,2011, p. 75)

Portanto, com a compactação, a carga que parece estar seca em seu estado normal torna-se líquida. De acordo com o código a liquefação pode resultar em movimentação de carga de maneira diferente da esperada para partículas sólidas, esta movimentação é a pior agravante do efeito de superfície livre para a estabilidade transversal da embarcação, podendo levar uma embarcação ao naufrágio como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Perda de Estabilidade.



Fonte: WALTON (2014)

De acordo com o Código IMSBC em sua seção 7.2.2 a liquefação não irá ocorrer quando algumas condições forem satisfeitas:



- “.1 a carga contém partículas muito pequenas. Neste caso o movimento de partículas é restringido pela coesão e a pressão da água nos espaços entre as partículas da carga não aumenta;
- .2 a carga compõe-se de partículas grandes ou pedaços. A água passa pelos espaços entre as partículas e não há aumento na pressão da água. Cargas que se compõem inteiramente de partículas grandes não irão se liquefazer.
- .3 a carga contém uma alta porcentagem de ar e pouco conteúdo de umidade. Qualquer aumento na pressão da água é inibido. Cargas secas não são suscetíveis a se liquefazer. “ (IMSC, 2011, p. 37)

### 2.1.5 Regulamento de Controle para a Liquefação de Carga

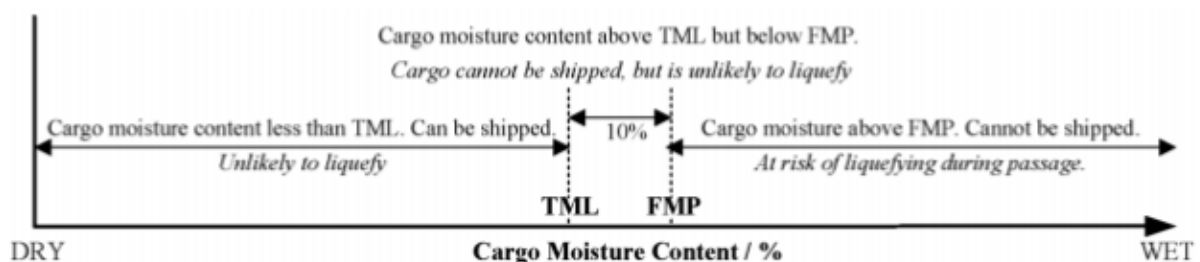
A IMO, órgão marítimo das nações unidas, com o código IMSBC incorpora uma série de controles que visam garantir que as cargas de risco sejam carregadas de forma segura. Para isto foi criado o valor de controle *Transportable Moisture Limit* (TML - Limite de umidade Transportável).

O TML de uma carga é o valor do conteúdo de umidade máximo que é considerado seguro para o seu transporte em navios graneleiros. Essa variável é determinada por procedimentos de testes, aprovados por uma autoridade competente (IMSBC, 2017).

O valor TML é derivado do *Flow Moisture Point* (FMP - Ponto de Umidade de Fluxo), o qual significa a porcentagem de conteúdo de umidade (base da massa úmida) em que um estado de fluxo (liquefação) se desenvolve sob o método prescrito de teste em uma amostra representativa do material (ZOGRAFAKIS, 2014).

A diferença entre os dois parâmetros é que TML leva em consideração uma margem de 10% mais baixo que o FMP, para obter um coeficiente de segurança. Isto foi feito para se minimizar qualquer erro gerado pelos testes e também pela captação de umidade do granel depois de o teste ser realizado.

Figura 6 – Diferença entre o TML e o FMP.



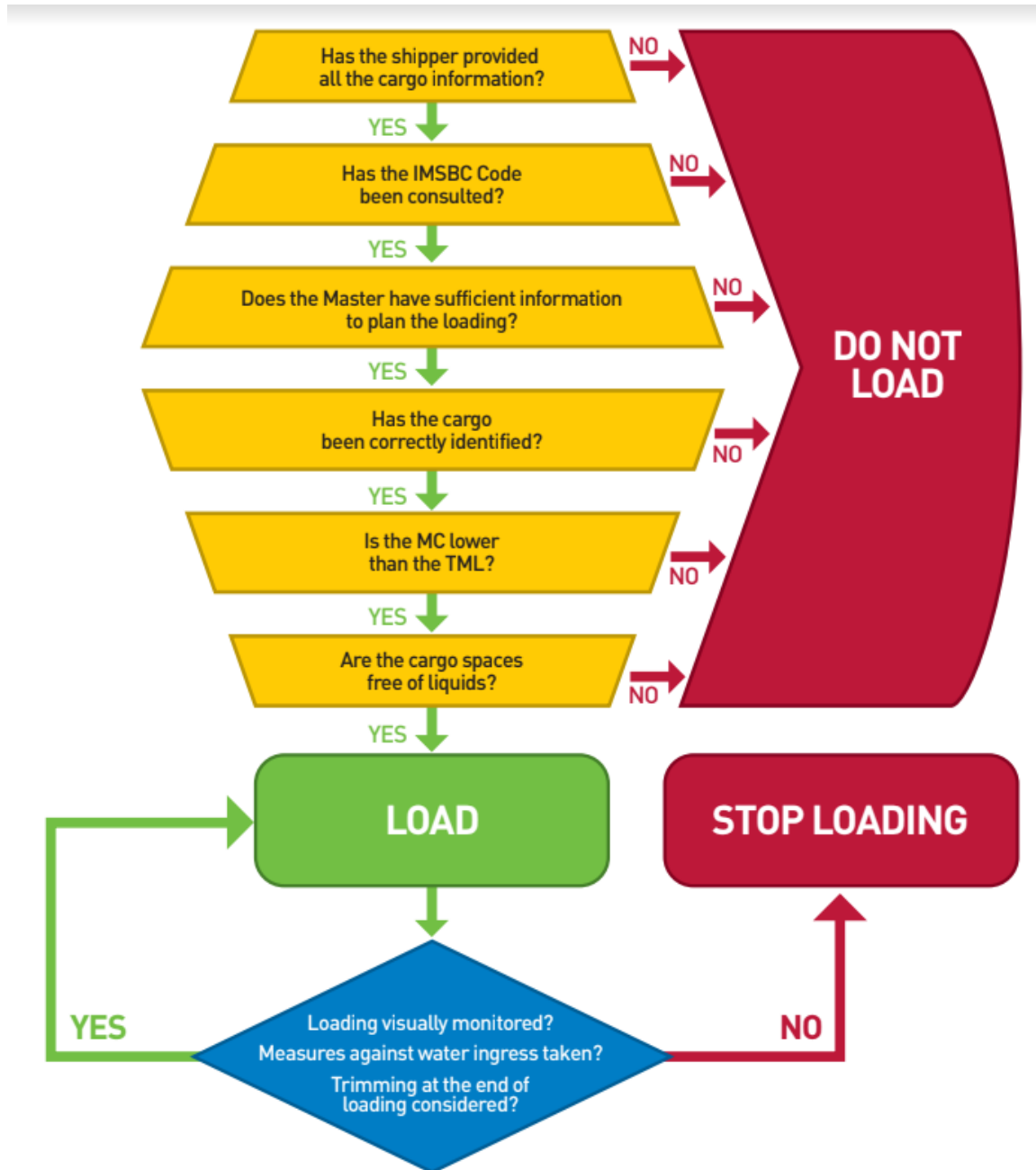
Fonte: ROSE (2014)

Qualquer carga do grupo A quando for transportada, o embarcador deverá fornecer ao comandante do navio ou ao seu representante um certificado de TML assinado e um certificado ou declaração de *Moisture Content* (MC - Conteúdo de Umidade), que é a quantidade de umidade presente na carga. O MC é calculado através de testes que devem ser feitos no máximo 7 dias antes do embarque.

Os TML para cada granel pertencente ao grupo A da IMO, são determinados através de testes feitos em laboratórios, portanto, cada granel tem um valor diferente de TML. Para garantir a segurança durante a navegação é obrigatório realizar os testes para que o granel tenha um valor de MC menor do que o valor TML. Se os testes realizados anteriores ao embarque não satisfizerem a regra acima, o embarque da carga não poderá ser feito.

Algumas sociedades classificadoras construíram um fluxograma para auxiliar o embarque seguro da carga sólida, mostrando todos os requisitos que devem ser seguidos para que a carga possa ser carregada.

Figura 7 - Fluxograma para realizar o carregamento.



Fonte: REDUCING THE RISK OF LIQUEFACTION (2017)

### 2.1.6 Testes de Controle do TML e MC do Granel

Um teste para determinar o TML de uma carga sólida a granel deve ser conduzido dentro de seis meses antes da data de carregamento. Não obstante essa exigência, quando a composição ou propriedades da carga forem variáveis por qualquer razão, um teste para determinar o TML deve ser conduzido novamente, após ter sido verificado que tal variação ocorreu.

Como citado anteriormente, testes também devem ser realizados para identificar a quantidade de umidade presente no granel (MC), estes testes devem ser feitos imediatamente antes do carregamento para não haver grandes alterações de umidade ao longo do tempo.

Portanto, após a realização dos testes, os valores obtidos devem ser comparados aos valores dos testes laboratoriais de TML. Se o valor de MC for menor que o TML a carga pode ser carregada e certifica de que não ocorrerá a liquefação durante a viagem.

No código IMSBC 2013, existem três métodos de testes usados para determinar o TML de cargas do grupo A. Os métodos de teste são o *Flow Table Test* (FTT - Teste de Mesa de Fluxo), o *Proctor / Fagerberg Test* (PFT - Teste Proctor / Fagerberg) e o *Penetration Test* (PTT - Teste de Penetração) (ZOGRAFAKIS, 2014).

Juntamente aos testes de determinação de TML, são feitos testes para determinação do MC de cada granel. O procedimento é mais simples, normalmente uma parcela da amostra dos testes FTT, PFT e PTT são separadas para este fim. Esta nova amostra reduzida é chamada de amostra A. Quando nominada dessa maneira, tem o objetivo de determinar o MC da amostra total.

A amostra A é pesada e logo em seguida é aquecida em um forno de secagem, fazendo com que toda a umidade seja retirada. Com isso, o peso da parcela da amostra diminui e a diferença de pesos é a quantidade de água que estava presente, de modo a propiciar o MC da amostra.

Para a realização mais precisa dos testes, alguns parâmetros devem ser seguidos para cada teste citado anteriormente.

Tabela 4 - Parâmetros dos testes para TML

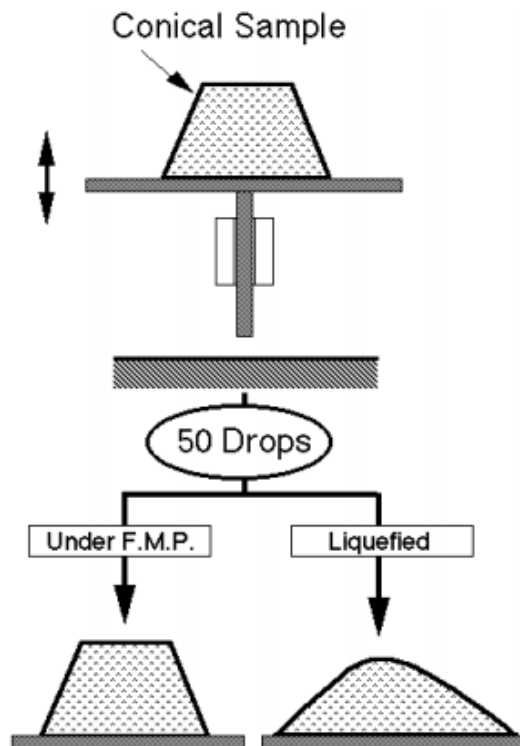
IMSBC TEST METHOD	RECOMMENDED PSD (TOPSIZE)	ALLOWED PSD (TOPSIZE)	SAMPLE PARAMETERS	ENERGY INPUT (COMPACTION) PARAMETERS	INDICATOR OF FLOW / TML
Flow Table (FTT)	0 - 1000 $\mu\text{m}$	0 - 7000 $\mu\text{m}$	Minimum starting mass = $3 \times 2.3 \text{ kg}$ Conical mould volume = 296.6 $\text{cm}^3$	Tamper head = 30mm; Tamper pressure = density $\times$ max cargo depth $\times$ g Table drop height = 12.5 mm Number of cycles = 50 Frequency = 25 Drops/minute (0.62 Hz)	FMP measured from observed plastic deformation of the cone (convex or concave cone profile) and/or measurements of cone expansion.
Proctor/ Fagerberg (PFT)	0 - 5000 $\mu\text{m}$	>5000 $\mu\text{m}$ if "extensive investigation for adoption and improvement is undergone"	Minimum starting mass = ~6 kg Proctor mould volume = 1000 $\text{cm}^3$	Tamper head = 50mm Drop height = 20cm Hammer mass = 350 g *No cyclic load	TML determined from intersection of the compaction curve with the 70% saturation line.
Penetration (PTT)	0 - 10 mm for small cylinder, 0-25 mm for large cylinder		1,700 $\text{cm}^3$ or 4,700 $\text{cm}^3$	Vertical vibration Frequency: 50 or 60 Hz Acceleration: 2g rms $\pm$ 10% Vibration Time: 6 min.	FMP measured penetration depth. >50 mm penetration is considered flow.

Fonte: ROSE (2014)

De acordo com a Tabela 4, para cada tipo de teste existem condições diferentes para que eles tenham maior precisão. Os tamanhos das partículas sólidas permitidas e recomendadas estão explicitados na Tabela, assim como as quantidades que devem ser retiradas para as amostras e a energia requisitada para a compactação.

O FTT é um teste realizado com 3 amostras. Uma amostra é a amostra A e as outras duas amostras são para o estudo do FMP. As amostras para determinação do FMP são compactadas independentemente, em formato cônico sobre uma mesa, a qual deve sofrer cerca de 50 quedas sobre uma superfície rígida, fazendo com que a amostra sofra uma compactação ainda maior.

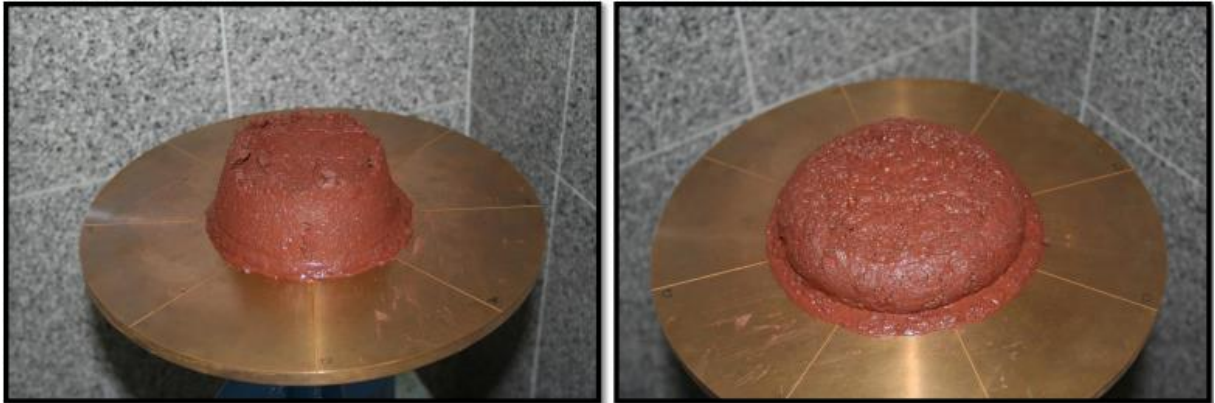
Figura 8 - Teste FFT.



Fonte: TAMAKI URA (2001)

De acordo com o formato que a amostra apresenta após as 50 quedas, pode-se determinar o FMP do granel. Deformações plásticas ou um incremento no diâmetro da amostra maior do que 3 mm pode significar que a carga irá liquefazer com o teor de umidade (MC) presente.

Figura 9 - Exemplo de amostra que sofre liquefação no FFT.



Fonte: LLOYD'S AGENCY.

O teste PFT é um método não muito utilizado atualmente e não abrange materiais como carvão e outros granéis sólidos porosos. O PFT, diferente do FFT e do PTT, não induz a liquefação da amostra para então determinar o MC em que ela ocorre. Este teste consiste em colocar toda a amostra para secagem, até que seu MC zere. Após, deve-se adicionar água para que se produzam diferentes amostras com uma diferença de 5% de MC por amostra. Posteriormente, cada uma é compactada dentro de um molde cilíndrico de ferro com um pistão de compactação, a fim de determinar a densidade de cada amostra.

Figura 10 - Teste PFT

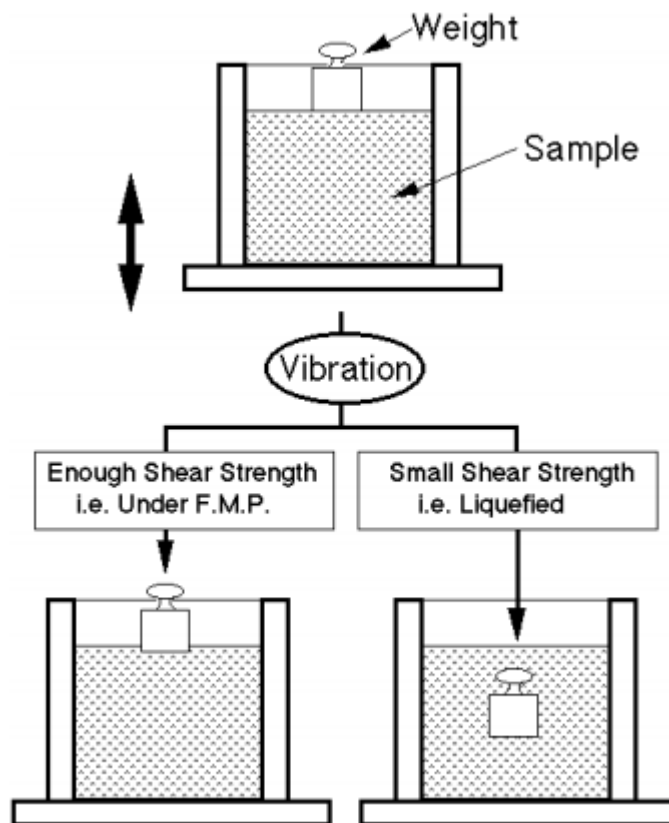


Fonte: LLOYD'S AGENCY.

Com os valores de MC e densidade, é possível fazer o cálculo do grau de saturação, ou seja, a porcentagem de espaços vazios entre as partículas sólidas que são ocupadas por água. O valor TML é, então, interpolado a partir desses resultados no momento em que a saturação atinge o valor de 70%. Isto significa que 70% dos espaços entre as partículas sólidas são preenchidos com água.

Para o PTT, uma amostra é colocada compactada dentro de um molde cilíndrico e é colocado um peso sobre a amostra. O cilindro sofre vibrações verticais de 50-60 Hz por cerca de 6 minutos para simular a compactação da carga que a embarcação causa.

Figura 11 - Teste PT.



Fonte: TAMAKI URA (2001).

Se o peso penetrar mais de 50mm na amostra, isso indica que o MC é maior que o FMP, causando a liquefação da amostra.

Figura 12 - Exemplo de amostra que sofre liquefação no PT.



Fonte: LLOYD'S AGENCY.

## 2.2 ESTABILIDADE DE NAVIOS

O deslizamento da carga tem principal influência na mudança do centro de gravidade da embarcação. O impacto que isso pode causar depende das características de estabilidade do navio graneleiro. Os riscos da situação variam por diferentes motivos: diferentes tipos de navios, o arranjo e as condições de carga. Não necessariamente o deslizamento de carga irá causar perigo se o navio possuir a estabilidade adequada.

### 2.2.1 Estabilidade Inicial Transversal de Embarcações

Para compreender a influência da liquefação da carga na estabilidade, primeiramente, deve-se entender em quais parâmetros haverá modificações com esse indesejado efeito e como a estabilidade irá ser influenciada com essas mudanças.

Como já muito estudado na Engenharia Naval, qualquer corpo flutuando desloca o peso próprio do líquido no qual está submerso. Este peso exerce uma força direcionada para baixo pelo centro de gravidade do corpo (G). O navio em situação de equilíbrio de forças, isto é, todas elas se anulando, tem como componentes a força de empuxo, que se equivale à intensidade do peso com força na direção contrária e ponto de ação no centro de flutuação (B), que pode ser considerado como o centro geométrico do volume de líquido que o navio desloca (DOKKUM ET AL, 2008).

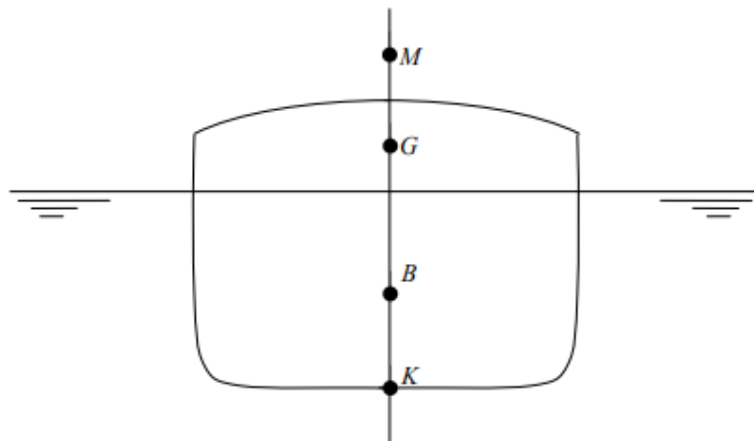
As forças exercidas sobre os pontos G e B (Figura 13) são sempre paralelas e em direção contrária. Elas estarão na mesma linha de atuação quando o navio estiver na posição de



equilíbrio de forças e quando for transversalmente estável. Conforme a embarcação aderna, a geometria do volume deslocado se altera, de modo a alterar o ponto B conforme o ângulo de banda da embarcação. Já o centro de gravidade, com o movimento da embarcação, não se altera. Apenas se houver mudança de pesos ou centros.

Outros pontos importantes para o entendimento de estabilidade inicial é o ponto (K) – que é ponto da linha base, também conhecido como ponto de quilha – e o (M) chamado de metacentro inicial, que é o ponto de cruzamento entre a reta vertical na posição de equilíbrio inicial e a reta perpendicular à superfície do corpo após a perturbação, perpendicular esta que coincidem com a linha de atuação da força normal após a perturbação (Martins, 2010), este ponto é fixo para pequenos ângulos de banda.

Figura 13 - Pontos M, G, B e K



Fonte: MARTINS (2010).

Para ser conferida a estabilidade inicial de uma embarcação, deve-se verificar se existe momento de endireitamento (momento que restaura a embarcação para a posição normal) ou momento de emborcamento (momento que faz a embarcação ter equilíbrio instável), o qual é gerado pelo binário de forças peso e empuxo multiplicado pela distância horizontal entre o centro de gravidade e o centro de carena. Essa distância é tratada como braço de endireitamento GZ.

Para verificar se o momento gerado é de restauração, deve-se checar a altura metacêntrica GM, que é a distância entre o ponto G e o ponto M. Essa distância deve ser maior do que 0 para que o navio tenha estabilidade inicial com braço de endireitamento. Se o GM for menor do que 0, o momento será de emborcamento, e se GM for igual a 0, a embarcação não terá momentos atuando a pequenos ângulos de inclinação, chamado de equilíbrio neutro.



como visto anteriormente, a liquefação de carga muda o centro de gravidade da embarcação, de modo a modificar, também, a CEE do navio graneleiro.

Segundo os critérios da IMO, a embarcação deve ser testada com quatro condições de carregamento:

- Tanques de carga, combustível, e água potável totalmente carregados;
- Tanques de carga totalmente carregados, com tanques de combustível com 10% de carregamento;
- Sem carga, com tanques de combustível, e água potável totalmente cheios;
- Sem carga, com tanques de combustível, e água potável com 10% de carregamento.

Para considerar a embarcação estável, os critérios da IMO de estabilidade intacta devem ser atendidos para cada condição de carregamento. Embarcações de passageiros ou de carga deverão atender aos seguintes critérios de estabilidade:

- A área sob a Curva de Estabilidade Estática compreendida entre os ângulos de inclinação de  $0^\circ$  e  $30^\circ$  não deverá ser inferior a 0.055 m.rad.
- A área sob a Curva de Estabilidade Estática compreendida entre os ângulos de inclinação de  $0^\circ$  e  $40^\circ$ , ou entre  $0^\circ$  e o ângulo de alagamento ( $\theta_f$ ), caso este seja menor do que  $40^\circ$ , não será inferior a 0.090 m.rad.
- A área sob a Curva de Estabilidade Estática compreendida entre os ângulos de inclinação de  $30^\circ$  e  $40^\circ$ , ou entre  $30^\circ$  e o ângulo de alagamento ( $\theta_f$ ), caso este seja menor do que  $40^\circ$ , não será inferior a 0.030 m.rad.
- O braço de endireitamento correspondente ao ângulo de inclinação de  $30^\circ$  não deverá ser menor do que 0.20 m.
- O braço de endireitamento máximo deverá ocorrer em um ângulo de inclinação maior ou igual a  $25^\circ$ .
- A altura metacêntrica inicial (GM) não deve ser menor do que 0.15 m.

### 2.3 EFEITO DE SUPERFÍCIE LIVRE

De acordo com a resolução da IMO MSC.75(69) 1998 "3.3.1, para todas as condições de carga a altura metacêntrica inicial e a curva de estabilidade estática devem ser corrigidas por conta do efeito de superfícies livres de líquidos em tanques."

O efeito de superfície livre sempre irá ocorrer quando houver um tanque preenchido com um líquido ou um sólido que se comporte como líquido não completando a capacidade inteira do tanque. Para tanques preenchidos com líquidos acima de 98% da sua capacidade, o



Como se pode observar na Figura 15, como o movimento do centro de gravidade é horizontal, uma pequena alteração impacta de maneira significativa a distância GM, que é uma medida vertical. Como o centro de gravidade é deslocado para os lados horizontalmente, o efeito de superfície livre faz com que as linhas de atuação de peso e empuxo fiquem mais próximas diminuindo o GZ e fazendo com que a embarcação tenha menos momento de restauração ou adquira momento de emborcamento. Com o deslizamento de carga, a embarcação passa a ter o braço de endireitamento  $GvZv$  ao invés do GZ que era maior e mais seguro, como mostra a Figura 15.

A correção da altura metacêntrica inicial e da curva de estabilidade estática estão estabelecidas na resolução da IMO MSC.75(69) 1998. Para a altura metacêntrica, os momentos transversos de inércia dos tanques devem ser calculados no ângulo 0 de inclinação, e devem ser feitos com a quantidade de líquido que se pretende transportar nesses tanques.

Os ajustes da curva de estabilidade estática podem ser feitos de duas maneiras: a primeira é a correção baseada no momento para o escoamento do fluido para cada ângulo de banda calculado e a segunda é uma correção baseada no momento de inércia calculado sem ângulo de banda, que é modificado para cada ângulo de banda que a embarcação adquire.

### 2.3.1 Cálculo do Momento de Superfície Livre

Para conseguir realizar os cálculos de Altura Metacêntrica Corrigida e de braço de endireitamento corrigido, é necessário primeiro calcular o momento que o efeito de superfície livre causa. O Momento de Superfície Livre deverá ser calculado por intermédio da seguinte expressão fornecida pelo IMO MSC.75(69):

$MSL = v * b * \gamma * k * \sqrt{\delta}$	(1)
--	-----

Onde:

$v$  = volume total do tanque, em m<sup>3</sup>;

$b$  = largura máxima do tanque, em m;

$\gamma$  = peso específico do líquido no tanque, em t/m<sup>3</sup>;

$\delta$  = é igual a  $v / (b * l * h)$  (coeficiente de bloco do tanque);

$l$  = comprimento máximo do tanque, em m;

$h$  = altura máxima do tanque, em m;

$k$  = coeficiente adimensional obtido na Tabela 5, ou através das seguintes expressões:

1. Quando  $\cot \theta \geq (b / h)$ :

$$k = [(\sin \theta) / 12] * [1 + ((\tan^2 \theta) / 2)] * (b / h) \quad (2)$$

2. Quando  $\cot \theta \leq (b / h)$ :

$$k = [(\cos \theta) / 8] * \{1 + [(\tan \theta) / (b / h)]\} - \{(\cos \theta) / [12 * (b / h)^2]\} * \{1 + [(\cot^2 \theta) / 2]\} \quad (3)$$

$\theta$  = ângulo de inclinação transversal

Tabela 5 - Tabela para encontrar o valor de k.

$k = \frac{\sin \theta}{12} \left(1 + \frac{\tan^2 \theta}{2}\right) \cdot \frac{b}{h}$ where $\cot \theta \geq \frac{b}{h}$														$k = \frac{\cos \theta}{8} \left(1 + \frac{\tan \theta}{b/h}\right) - \frac{\cos \theta}{12(b/h)^2} \left(1 + \frac{\cot^2 \theta}{2}\right)$ where $\cot \theta < \frac{b}{h}$													
$\theta$ $b/h$	5°	10°	15°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	$\theta$ $b/h$													
20	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.05	0.04	0.03	0.02	20													
10	0.07	0.11	0.12	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	10													
5	0.04	0.07	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	5													
3	0.02	0.04	0.07	0.09	0.11	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	3													
2	0.01	0.03	0.04	0.06	0.09	0.11	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	2													
1.5	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	1.5													
1	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	1													
0.75	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.05	0.09	0.16	0.18	0.21	0.16	0.75													
0.5	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.05	0.09	0.16	0.18	0.21	0.23	0.5													
0.3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.05	0.11	0.19	0.27	0.34	0.3													
0.2	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.07	0.13	0.27	0.45	0.2													
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.14	0.53	0.1													

Fonte: IMO MSC.75(69) (1998)

Os tanques que atendam a pelo menos uma das seguintes condições, não necessitam ser computados no cálculo do momento de superfície livre:

- Os tanques que estejam completamente cheios (os tanques que não estejam completamente cheios, apenas em função de margem de expansão do líquido, poderão ser considerados cheios para efeito de cálculo do momento de superfície livre);
- Os tanques que estejam vazios (os resíduos existentes nos tanques que não é possível se aspirar não necessitam ser considerados); e

- Pequenos tanques que atendam à seguinte condição:  $MSL < 0.01 \times \Delta_{min}$  (10) onde: MSL = Momento de Superfície Livre em qualquer inclinação, em t.m;  $\Delta_{min}$  = deslocamento mínimo da embarcação (peso leve), em t

### 2.3.2 Cálculo da Altura Metacêntrica Corrigida

Quando um tanque está parcialmente preenchido com um líquido, o navio sofre uma perda virtual na altura metacêntrica, que de acordo com Barrass e Derret pode ser calculado através da fórmula abaixo:

$GM_{real} = GM_{inicial} - (MSL/W) * (1/n^2)$	(4)
--	-----

MSL = Momento de Superfície Livre em qualquer inclinação, em t.m.

W = Deslocamento do Navio em toneladas.

n = Número de compartimentos longitudinais que o tanque é igualmente dividido

### 2.3.3 Cálculo dos Braços de Endireitamentos Corrigidos

Segundo PNA (1988), o efeito do líquido livre em um tanque fará o centro de gravidade do líquido mudar uma certa distância d, paralelamente a linha d'água. Se o peso do líquido é w e o deslocamento do navio W, o centro de gravidade do navio vai se mover paralelo à linha d'água inclinada por uma distância  $(d*w)/W$ , reduzindo o braço de endireitamento nesse valor.

$GZ_{real} = GZ_{inicial} - (d*w)/W$	(5)
--------------------------------------	-----

Para cada grau de inclinação deve ser calculado o centroide do líquido presente no tanque e avaliar a sua distância sobre a linha de ação da força de empuxo sobre o ponto B.

### **3 METODOLOGIA**

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo para melhor compreensão da liquefação de carga a granel sólido que pode causar o efeito de superfície livre e, conseqüentemente, comprometer a estabilidade transversal das embarcações. O estudo é feito por meio de uma análise exploratória.

Na busca por esse objetivo, a formulação da pesquisa consistiu em levantamento bibliográfico acerca dos principais conceitos e normas referente à temática, com vistas a relacioná-los para a melhor compreensão da influência de uns sobre os outros.

Por fim, objetiva-se a análise das técnicas disponíveis para a minimização dos três principais problemas identificados, quais sejam a liquefação da carga, o efeito de superfície livre e o seu efeito sobre a estabilidade da embarcação.



#### 4 ESTABILIDADE E EFEITO DE SUPERFÍCIE LIVRE PARA O GRUPO A

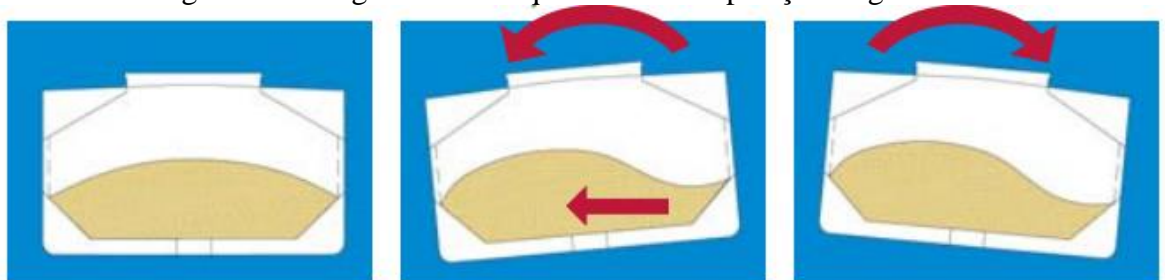
Quando o processo de liquefação acontece, o granel começa a ter um comportamento líquido e, com isso, ele tende a fazer o efeito de superfície livre. Desta maneira acontece a perda de tensão efetiva e uma significativa redução na força de cisalhamento das partículas do granel. Portanto esta carga fica suscetível ao deslocamento dentro dos porões.

A maioria das cargas que podem liquefazer ocupam uma pequena parte do volume dos porões. Combinado com o grande porte dos graneleiros em geral, isso deixa muito espaço para a carga liquefeita se movimentar e causar um alto risco de problemas relacionados à estabilidade.

Se a resistência ao cisalhamento for menor do que a tensão de cisalhamento causada pelo movimento do navio, principalmente pelo movimento de roll, pode-se dizer que o material realmente sofreu o processo de liquefação.

Se o comportamento do granel liquefeito tiver fluxo o suficiente para mover-se livremente nos porões, os parâmetros a respeito de superfície livre descritos nos tópicos acima podem ser seguidos para mensurar a influência deste efeito sobre a estabilidade. Mas como o granel por vezes é muito denso e o processo de liquefação é incompleto ou parcial, a carga pode ficar presa nas extremidades dos porões e não retornar a sua posição original.

Figura 16 - Carga deslocada que não volta a posição original



Fonte: REDUCING THE RISK OF LIQUEFACTION (2017)

Quando a carga possui uma baixa resistência ao cisalhamento, a tendência é que ocorra o deslocamento de carga com os movimentos de navegação. Essa perigosa situação pode fazer com que a carga fique fixa em um dos lados do porão (ROSE, 2014).

Como o material é muito mais denso do que um líquido, o movimento de superfície livre é diferente do que se espera para materiais realmente líquidos. Por vezes, o movimento de

roll da embarcação faz com que a carga fique acumulada nos lados dos porões e mesmo que a embarcação volte à posição normal, a carga continua acumula em um bordo. Podendo, assim, fazer com que a embarcação tenha banda fixa até o descarregamento da carga (Figuras 16 e 17).

Figura 17 - Carga concentrada em um lado do porão



Fonte: LLOYD'S AGENCY

Com a carga não voltando para a posição original, além de problemas relacionados a um novo calado que a embarcação pode adquirir, o novo ângulo de banda causado pelo acúmulo de carga, se não for corrigido, começa a ser o ponto com que a embarcação fará o movimento de roll. Isto normalmente está relacionado a um menor momento de restauração se a embarcação fizer movimentos de roll para o lado que a embarcação já está inclinada.

Com a banda, o ângulo para a imersão do deck será menor e a estabilidade também será reduzida. A banda fará com que o navio sofra cada vez maiores ângulos de adernamento, causando um efeito em dominó, também fazendo com que outras cargas e objetos se desloquem para o bordo que a gravidade os direciona.

## 4.1 ESTUDOS DE CASO DA MODIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE

### 4.1.1 Primeiro Caso

Para compreender o quanto a liquefação de carga pode influenciar na estabilidade da embarcação, alguns testes são feitos induzindo a liquefação da carga a granel e observando o quanto pode influenciar a curva de GZ x Ângulo de banda, conhecida como CEE.

De acordo com os testes feitos com Koromila et al 2013, a influência da liquefação de carga sobre a estabilidade pode ser muito grande. Para os testes, foi utilizado uma embarcação com as seguintes dimensões.

Tabela 6 - Dimensões da embarcação teste.

Ship's Main Dimensions	
Length Overall (L <sub>OA</sub> )	290.049m
Breadth Mld (B)	44.600m
Depth Mld (D)	25.700m
Design Draft (T)	18.000m
Deadweight (DWT)	172000t

Fonte: KOROMILA ET AL (2013).

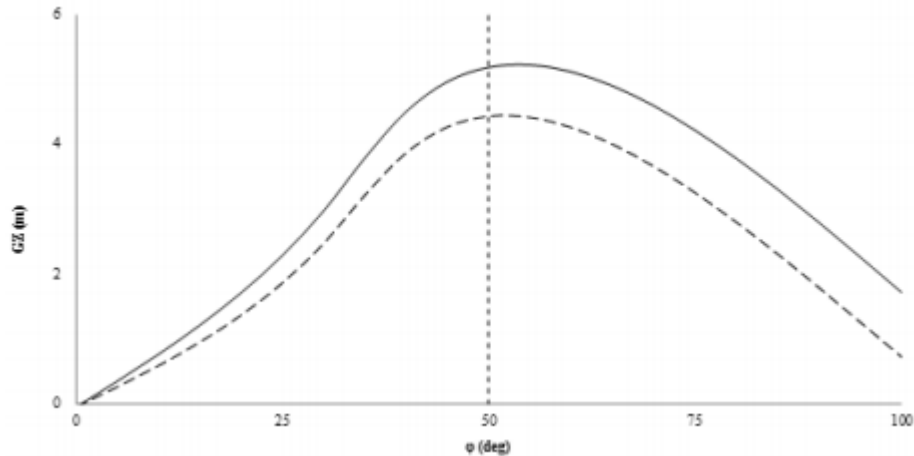
Os testes foram realizados comparando a curva GZ antes e depois da liquefação da carga, considerando diferentes tipos de granéis e variando principalmente a densidade do material.

O software AVEVA Marine foi utilizado para plotar os gráficos. Para as cargas consideradas pesadas, isto é, com densidade acima de 1.6 t/m<sup>3</sup>, foram consideradas os granéis minério de níquel, minério de ferro, areia e bauxita. Também foi considerado um carregamento ímpar, ou seja, foram intercalados tanques cheios e vazios.

Lembrando que o fator de estiva, que significa o quanto da porcentagem dos tanques será preenchido com carga, é um fator que leva em consideração a densidade da carga para estes casos, pois quanto mais densa a carga menor poderá ser o carregamento dos tanques para que não haja deslocamento excessivo.

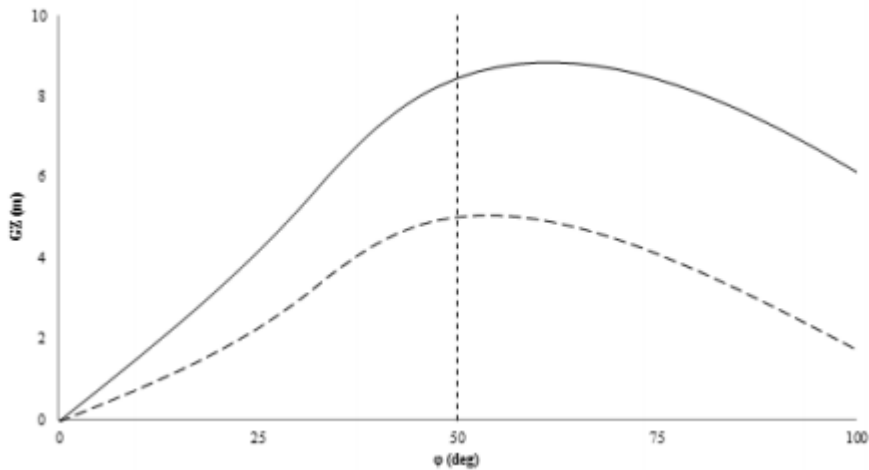
Para o carregamento de carga pesada com densidade de 1.6 e 3.6 t/m<sup>3</sup>, a diminuição da curva CEE é representada abaixo. A linha contínua representa a carga em estado sólido e a linha pontilhada a carga em estado líquido (Koromila et al apud IACS 1997).

Figura 18 - CEE para liquefação de carga de densidade 1.6 t/m<sup>3</sup>.



Fonte: KOROMILA ET AL (2013)

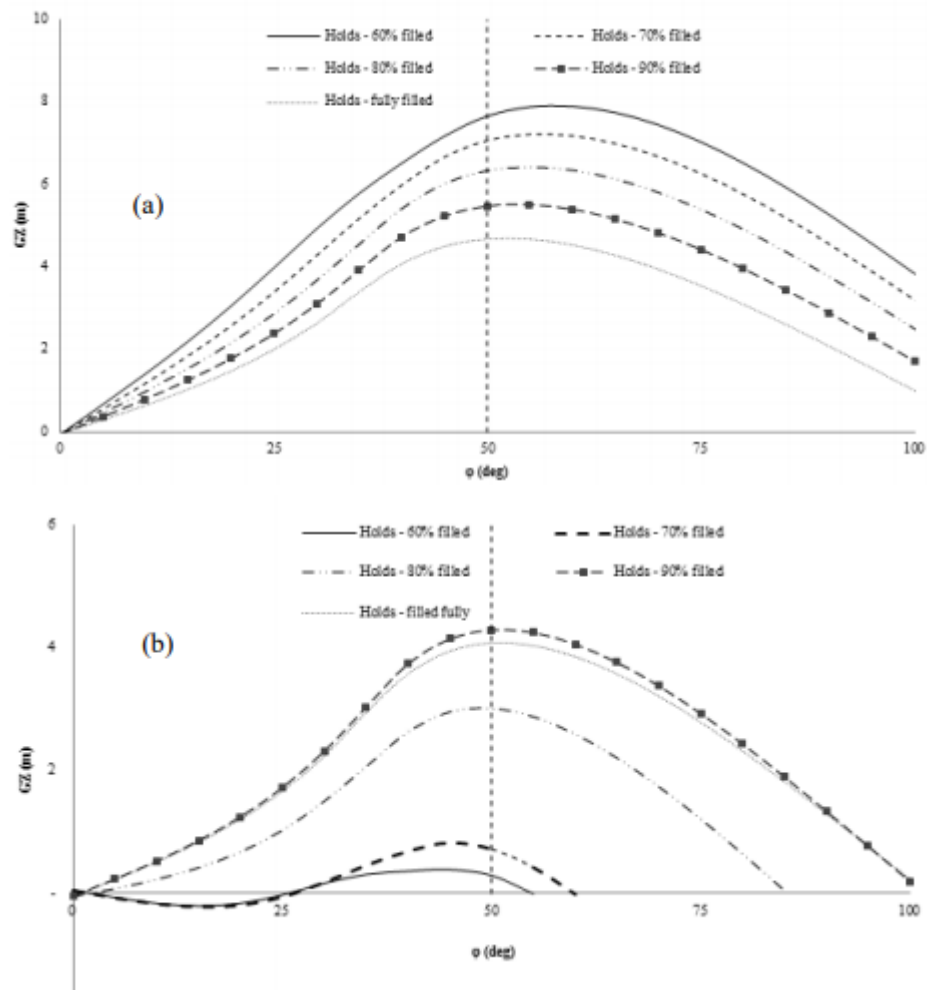
Figura 19 - CEE para a liquefação de carga de densidade 3.6t/m<sup>3</sup>.



Fonte: KOROMILA ET AL (2013)

Já para cargas consideradas leves – carvão, por exemplo –, o problema pode ser mais grave por todos os porões estarem carregados. A carga analisada possuía densidade de 0,77t/m<sup>3</sup>, porém a análise foi feita com aumento da quantidade de carga nos porões. Observa-se que com 60% dos porões cheios a estabilidade é mais afetada. A imagem (a) mostra a carga em estado sólido e a imagem (b) a carga após a liquefação.

Imagem 20 - Curva CEE para liquefação de cargas leves



Fonte: KOROMILA ET AL (2013)

Para os porões com 60% e 70% de sua capacidade completa, a embarcação até 25 graus de ângulo de banda tem braço de emborcamento, comprometendo completamente a estabilidade da embarcação.

#### 4.1.2 Segundo Caso

Para este teste realizado, foi considerado um graneleiro Handysize com as seguintes dimensões:

Tabela 7 - Dimensões da embarcação segundo caso

$L_{OA}$ (m)	173.630
$L_{BP}$ (m)	167.000
B (m)	29.0
T (m)	10.70
D	15.050
$C_B$	0.8190
$\Delta_r$ (t)	43661
LS (t)	7567

Fonte: ZOGRAFAKIS (2014)

Foi escolhido um granel com densidade 1.6t/m<sup>3</sup>, considerando que apenas 30% da carga sofreu liquefação e a nova densidade da carga liquefeita seria de 1.1 t/m<sup>3</sup>, causando, assim, o efeito de superfície livre. Para a análise do caso, os porões do navio estavam com 52% de sua capacidade preenchidos com granel.

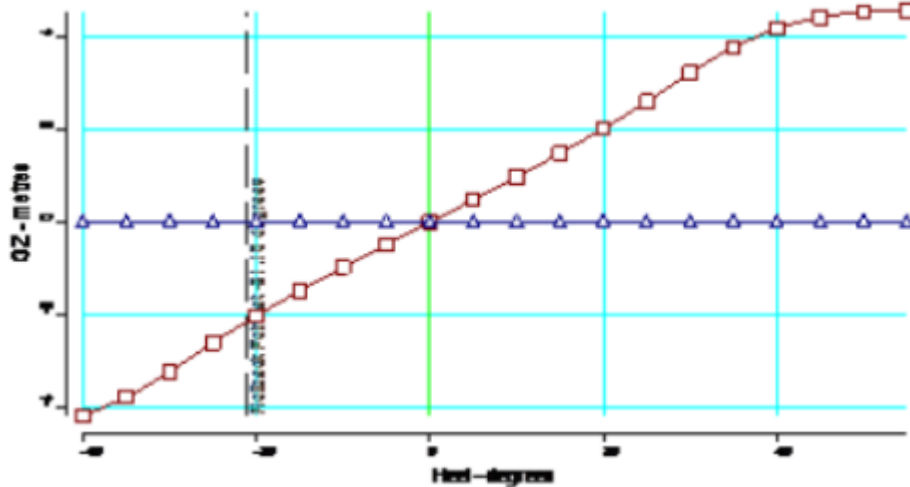
Tabela 8 - Propriedades Hidrostáticas enquanto a carga estava sólida

Trim by the bow	0.167 metres
KG	6.393 metres
FSC	0.037 metres
KGf	6.430 metres
GMt	5.548 metres
BMt	6.462 metres
Waterplane area	4385.16 sq.metres
LCG	87.447 metres
LCB	87.448 metres
LCF	81.173 metres
TCF	0.000 metres
TPC	45.123 tonnes/cm
MTC	538.970 tonnes-m/cm

Fonte: ZOGRAFAKIS (2014)

A curva CEE obtida para o navio enquanto a carga estava sólida foi a seguir demonstrada com a Figura 21:

Figura 21 - CEE para a carga em estado sólido do segundo caso.



Fonte: ZOGRAFAKIS (2014)

Nessas condições a embarcação estava obedecendo aos critérios da IMO para estabilidade intacta, como mostra a Tabela 9:

Tabela 9 - Critérios da IMO obedecidos.

Criterion	Actual	Critical		
		Value	Value	
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.801	0.055	ok
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.654	0.030	ok
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	1.456	0.090	ok
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	5.548	0.150	ok
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	4.564	0.200	ok
6	Max GZ to be at an angle > 30 degrees	53.262	30.000	ok
7	IMO Weather Criterion ( Maximum Initial Angle Of Heel )	0.155	16.000	ok
8	IMO Weather Criterion ( Areas )	5.574	1.000	ok

Fonte: Adaptada pelo autor, ZOGRAFAKIS (2014)

Ao mudar as propriedades da carga, considerando-a parcialmente como líquido e contabilizando o efeito de superfície livre, várias mudanças puderam ser notadas. As propriedades hidrostáticas, sofreram alteração com enfoque no novo valor de GM transversal, que teve uma diminuição notável, passou de 5,548m para 0,862m.

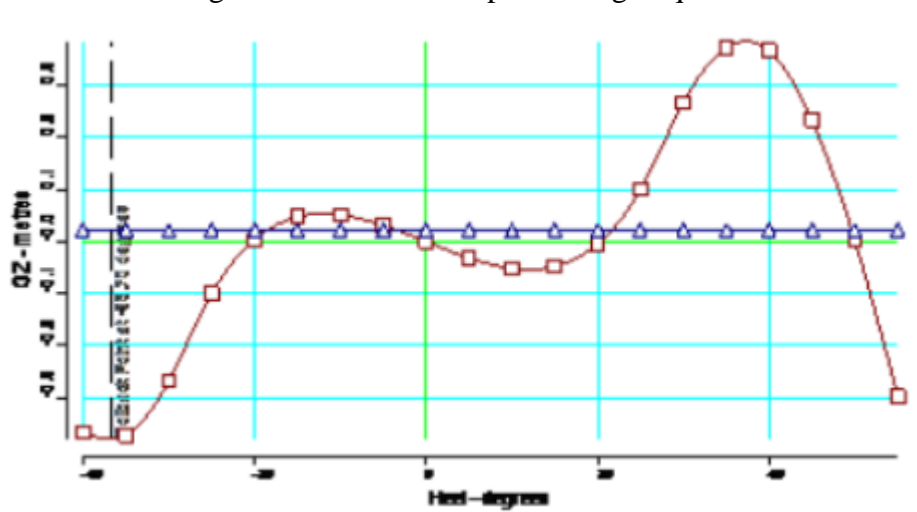
Tabela 10 - Propriedades hidrostáticas para a carga liquefeita.

Density of water	1.0290	tonnes/cu.m
Heel to starboard	20.27	degrees
Trim by the bow	0.494	metres
KG	6.301	metres
FSC	6.060	metres
GMt	0.862	metres
BMt	7.703	metres
BMI	212.503	metres
Waterplane area	4599.54	sq.metres
LCG	87.326	metres
LCB	87.345	metres
TCB	2.367	metres
LCF	82.761	metres
TCF	4.077	metres
TPC	47.329	tonnes/cm
MTC	552.573	tonnes-m/cm
Deadweight	35858	tonnes
Total Displacement	43425	tonnes

Fonte: ZOGRAFAKIS (2014)

Com a liquefação da carga, a nova curva CEE adquirida ficou com valores muito menores de braço GZ para vários ângulos de banda, inclusive com momentos de emborcamento para alguns ângulos de inclinação, entre 0 e 20 graus.

Figura 22 - Curva CEE para a carga liquefeita



Fonte: ZOGRAFAKIS (2014)

Dessa maneira, a embarcação deixou de respeitar alguns dos critérios da IMO de estabilidade intacta e, assim, deixa de ser segura para navegação, eis que a sua estabilidade está comprometida.



Tabela 11 – Critérios IMO depois da liquefação da carga.

Criterion	Actual	Critical		
		Value	Value	
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.020	0.055	não
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.062	0.030	ok
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	0.081	0.090	não
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	Not Appl..	0.150	não
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	0.385	0.200	ok
6	Max GZ to be at an angle > 30 degrees	37.193	30.000	ok
7	IMO Weather Criterion ( Maximum Initial Angle Of Heel )	-19.173	16.000	ok
8	IMO Weather Criterion ( Areas )	1.628	1.000	ok

Fonte: Adaptada pelo autor, ZOGRAFAKIS (2014)

#### 4.2 EMBARCAÇÕES PREPARADAS PARA TRANSPORTAR CARGA DO GRUPO A

Para que haja mais segurança no transporte das cargas pertencentes ao grupo A da IMO, existem alguns navios que tem uma preparação para suportar a liquefação da carga sem afetar a estabilidade de maneira severa; são chamados de *Specially Constructed Cargo Ships* (SCCS - navios de carga construídos especialmente).

Esse tipo de navio deve obedecer aos critérios da IMO de estabilidade intacta mesmo com toda a carga liquefeita. De acordo com o artigo 7.3.2.2 do IMSBC

“Navios de carga especialmente construídos deverão possuir divisórias estruturais permanentes, dispostas para confinar qualquer movimento de carga a um limite aceitável. O navio em questão deverá ter a bordo a evidência de aprovação pela Administração. “(IMSBC, 2011, p. 70)

Normalmente para este tipo especial de embarcação, são colocadas anteparas longitudinais para restringir o movimento de superfície livre.

O código exige que

“.1 O projeto e posicionamento de tais arranjos especiais deverão fornecer adequadamente, não só a restrição das imensas forças geradas pelo movimento da carga a granel de alta densidade fluida, mas também para a necessidade de reduzir, a um nível seguro aceitável, os movimentos potenciais de inclinação decorrentes de um movimento transversal da carga ao longo do espaço de carga. As divisórias fornecidas, para atender esta exigência, não deverão ser construídas de madeira.

.2 Os elementos estruturais do navio que limitam essa carga deverão ser reforçados, se necessário.

.3 O plano de arranjos especiais e detalhes das condições de estabilidade em que o projeto foi baseado deverão ser aprovados pela Administração. O navio envolvido deverá ter a bordo o documento de aprovação da Administração. “ (IMSBC, 2011, p. 72)

Para a aprovação do navio, uma série de documentos deverá ser apresentada à Administração, incluindo desenhos estruturais com seções longitudinais e transversais em escala, cálculos de estabilidade, levando em consideração os possíveis arranjos de carga e seus deslocamentos, de modo a demonstrar a distribuição de carga e a parcela que pode tornar-se líquida.

Esse tipo de navio não precisa ter a sua carga testada para verificar se o MC é menor que o TMP. Ele pode transportar qualquer tipo de granel se for comprovada a sua capacidade de suportar a liquefação sem alterar a sua estabilidade e esforços estruturais.

## 5. MOTIVOS PELOS QUAIS OS ACIDENTES ACONTECEM

Para que os acidentes aconteçam, deve existir uma sucessão de erros, pois praticamente todo o processo de carga e descarga está estabelecido no código IMSBC. Portanto, alguns levantamentos de práticas comuns foram feitos para compreender o porquê desses erros estarem acontecendo.

De acordo com a DNV GL, muitas vezes a carga é declarada com o nome errado. A carga a granel deve ser declarada de acordo com o *Bulk Cargo Shipping Name* (BCSN - Nome de transporte de carga a granel) estabelecido pelo IMSBC, porém, por vezes ela acaba sendo declarada com o nome comum. Com isso, as propriedades do granel podem possuir riscos que não foram detectados.

Ainda hoje existem cargas a granel sólido que não estão listadas no IMSBC ou estão classificadas de maneira errada, isto é, em outro grupo. Um exemplo de carga que pode liquefazer e não está listada no código como grupo A é a bauxita com MC alto.

Para cargas não listadas, o armador deveria fornecer às autoridades portuárias um documento com as características e propriedades da carga, para poder ser averiguado o transporte seguro deste granel.

Como explicado anteriormente, testes de TML devem ser feitos no mínimo 6 meses antes do transporte da carga. Para cargas de minério não processados, como minério de ferro, bauxita e minério de níquel, pode ser difícil realizar os testes de laboratório, uma vez que esse tipo de carga tem suas propriedades mudadas ao longo do transporte. Para o transporte dos materiais acima mencionados, os testes deveriam ser feitos a cada trecho do transporte.

A tarefa de determinar o TML da carga é uma atividade especializada. Pode-se dizer que ao redor do mundo não existem muitas pessoas com competência e laboratórios preparados para realizar esses testes.

Em alguns países exportadores de minérios, nem existe esse tipo de laboratório ou as minas de extração são muito remotas. Nesses casos, os procedimentos para testes podem ser feitos de maneira distintas do que o código IMSBC recomenda. Um exemplo do que pode acontecer é a parte da amostra que é coletada não representar o MC e o TML da carga total por ela não estar homogênea.

Para o teste de MC, o qual deve ser realizado em até 7 dias antes do embarque, em locais que existam monções ou muita chuva, pode alterar o valor de MC, deixando a carga com risco de liquefação. Esse tipo de carregamento deve ser vigiado e recomenda-se a verificação de um especialista de carga para que não haja riscos.

Por vezes a altura metacêntrica do navio pode ser excessiva, fazendo com que o navio tenha um período menor de roll e grandes acelerações, o que pode causar a compactação da carga de modo mais intenso e conseqüentemente a liquefação.

Por vezes, acontece de alguns laboratórios locais favorecerem os armadores para que o embarque da carga venha a acontecer, desta forma muito riscos são assumidos.

## 6. PREVENÇÕES PARA EVITAR OS ACIDENTES

Para evitar situações desastrosas, primeiramente, há de se fazer destaque à necessária observância dos itens descritos na seção 7. A fiscalização do cumprimento das normas deve ser feita de maneira estrita em todos os países que manipulam este tipo de carga.

As disposições trazidas pelo IMSBC, as quais constituem um conjunto de normas internacionais cujo objetivo circunda a redução de acidentes e desastres ecológicos, têm caráter obrigatório desde que foram estipuladas pela SOLAS.

Como medida provisória até que os países estejam completamente preparados a fiscalizar e testar as cargas com precisão e competência, algumas medidas podem ser adotadas a fim de minimizar o risco de a liquefação prejudicar a estabilidade das embarcações.

Dentre as possíveis medidas, cabe salientar a possibilidade de realização um teste de caráter preliminar, denominado de *Can Test* (CT – teste de lata), que verifica se a carga a ser carregada possui a propensão de sofrer liquefação.

No teste, coloca-se uma amostra do granel sólido dentro de uma lata de alumínio, batendo-a contra uma superfície rígida inúmeras vezes para que o seu conteúdo sofra compactação dentro do recipiente (Figura 23).

Figura 23 – Teste de Lata.



Fonte: REDUCING THE RISK OF LIQUEFACTION

Após o procedimento supra referenciado, realiza-se uma inspeção visual para verificar se a amostra obteve alguma condição fluida ou pastosa. Deve-se, então, desenformar a amostra e verificar com a luz do sol se ela está brilhosa, como mostra a Figura 24. O aspecto brilhoso ou a presença de fluidos é tido como um parâmetro demonstrativo da tendência de a matéria sofrer a liquefação.

Figura 24 – Amostra brilhosa.

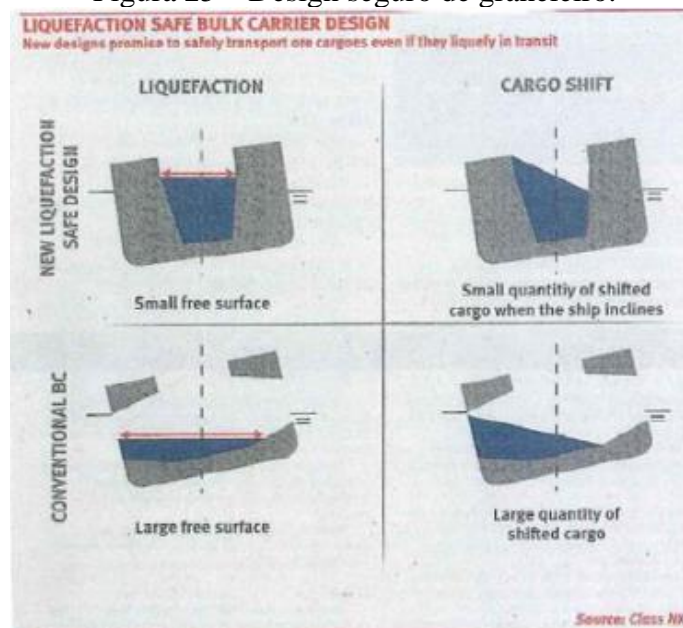


Fonte: REDUCING THE RISK OF LIQUEFACTION

Este teste deve ser feito frequentemente, fotografado e identificado os locais de onde a amostra foi coletada. Este teste não indica se a carga tem o MC abaixo do TML, mas pode-se ter uma ideia se a carga excede o valor de FMP.

Outra possibilidade é a exigência de as embarcações tornarem-se SCCS, podendo levar graneis do grupo A sem perder a estabilidade caso venham a se liquefazer. Porém, o custo para a construção deste tipo de navio é mais caro, já que anteparas longitudinais ou diferentes tipos de arranjos são requisitados, além de reforços estruturais para a carga com maior densidade e tensões dentro dos porões. Existem projetos de navios com arranjos inovadores que estão sendo desenvolvidos como mostra a Figura 25.

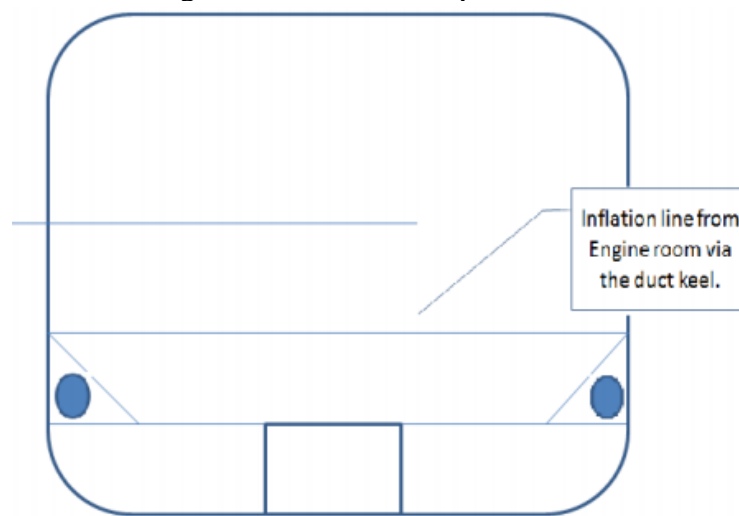
Figura 25 – Design seguro de graneleiro.



Fonte: ZOGRAFAKIS (2014)

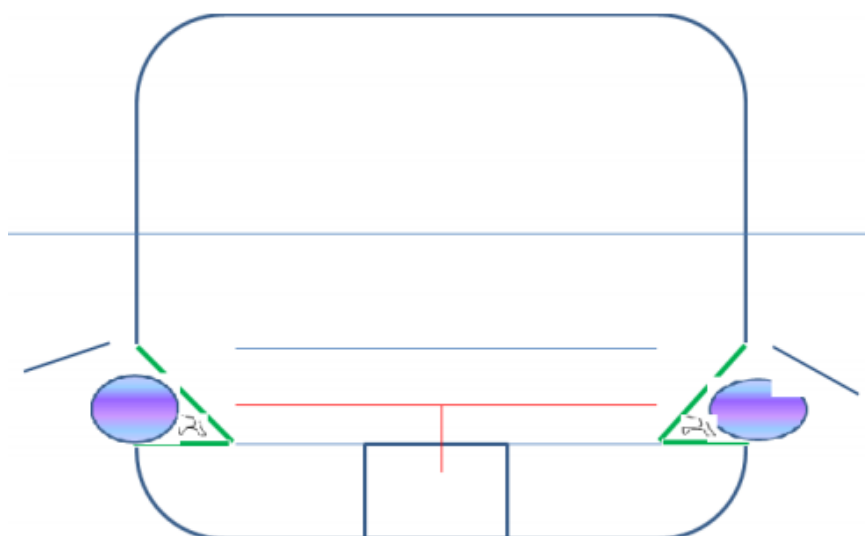
Outro projeto inovador que pode ser utilizado no futuro e já está sendo desenvolvido atualmente são os *Safety Inflated Devices* (SID – Dispositivos de Segurança Infláveis). No referido projeto, ao acontecer o escorregamento de carga devido à liquefação e a embarcação estiver à beira de perder a sua estabilidade, os dispositivos iram fornecer flutuabilidade adicional para evitar que a embarcação adquira ângulo de banda excessivo. O SID, ao obter uma resposta perigosa a respeito de estabilidade, dispara os cilindros enchendo os balões de ar e adicionando flutuabilidade para a embarcação.

Imagem 26 – SID não disparados.



Fonte: ZOGRAFAKIS (2014)

Imagem 27 – SID já disparados e inflados.



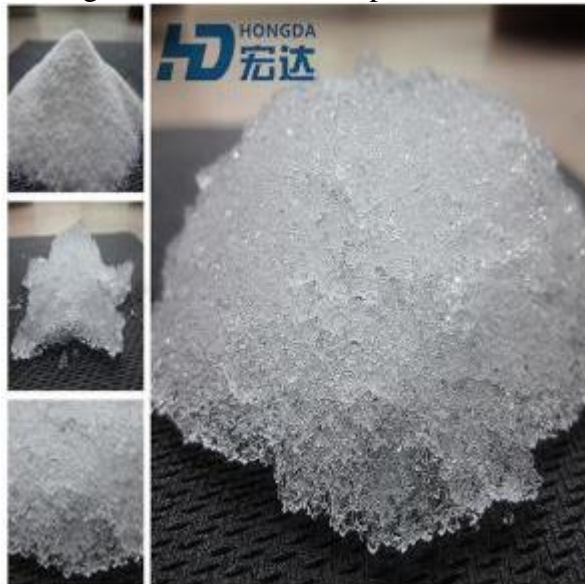
Fonte: ZOGRAFAKIS (2014)

Outra solução com um custo muito elevado seria a instalação de sistemas de posicionamento dinâmico para controlar a estabilidade.

Para o sucesso do sistema de posicionamento dinâmico, a estabilidade dinâmica é um dos requisitos básicos. Com este tipo de sistema, se o estado de equilíbrio do navio for alterado por forças externas ou deslizamentos da carga, o design do sistema de posicionamento dinâmico, composto por thrusters irá corrigir o navio para sua posição de equilíbrio fazendo com que os movimentos de roll sejam minimizados (PINKSTER, 1972).

Uma outra proposta que não havia registros anteriormente a este estudo, é a possibilidade de ser usado polímeros superabsorventes para evitar a liquefação da carga. Esse tipo de polímero é similar ao que se tem presente no interior de fraldas de crianças. Esse material, ao detectar presença de umidade, absorve a água e transmuda-se para o estado granular. Nesse sentido, as cargas que têm propensão à liquefação, tendem a diminuir o MC, pois o polímero absorve a água presente na carga e preserva o estado sólido granular do granel. Maior desenvolvimento desse projeto deveria ser feito para discutir formas de separar o polímero do granel.

Imagem 28 – Polímero Superabsorventes.



Fonte: HONGDA (2018).



## 7. CONCLUSÃO

Com a realização desse estudo, foi possível caracterizar a liquefação da carga a granel sólido, compreendendo a sua influência sobre o efeito de superfície livre e estabilidade de embarcações.

O histórico de acidentes revela a necessidade da tomada de medidas relacionadas a essa problemática, eis que mais de 100 tripulantes perderam as vidas nos últimos 10 anos. Portanto, estudos com cunho científico e exploratório são necessários para se ter mais entendimento a respeito desse assunto, visando minimizar esse tipo de situação.

A abordagem trouxe informações a respeito de como a liquefação acontece e quais os principais parâmetros que influenciam na liquefação, explicitando as principais normas regulatórias e a classificação a respeito dos graneis em questão. Os principais testes para controle e determinação de propriedades dos graneis foram descritos visando identificar a maneira correta de se testar as cargas baseada no código IMSBC.

Para ajudar a compreender quais os parâmetros a liquefação de carga podem afetar, foi feita uma análise em estabilidade inicial e estabilidade intacta, com enfoque nas variáveis que seriam influenciadas pelo processo em questão. Para adaptar os cálculos de estabilidade, algumas formulações foram apresentadas, visando mensurar o quanto a liquefação pode alterar os parâmetros de estabilidade de uma embarcação.

A mudança na estabilidade da embarcação pode ser drástica como mostram os estudos de caso 1 e 2 tratados no presente trabalho. Embarcações, dependendo da quantidade de volume de carga que sofre liquefação, podem perder totalmente sua estabilidade e adquirir momentos de emborcamento, causando danos irreversíveis.

Para compreender quais principais erros são cometidos para os desastres acontecerem, foi listado um levantamento de suas possíveis causas. Precauções podem ser tomadas a partir do conhecimento desses erros.

Além de se minimizar os problemas que já ocorrem, deve-se procurar soluções inovadoras como algumas que foram citadas no decorrer do trabalho. Muitas prevenções e soluções devem ser buscadas até que se minimize as casualidades a zero.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos, visando aprofundar as soluções que estão em desenvolvimento, como o SID e o polímero Superabsorvente entre outras. Também entender e realizar pesquisas de campo para assimilar como é feita a fiscalização nos portos, e como cada país deveria proceder para que se pudesse haver uma melhoria na averiguação da atividade.

## REFERÊNCIAS

- ANDREI, Cristian; PAZARA, Radu. **THE IMPACT OF BULK CARGOES LIQUEFACTION ON SHIP'S INTACT STABILITY**. 2013. 58 f. Tese (Doutorado) - Curso de Naval Engineering, U.p.b Sci. Bull, Varna, 2013. Cap. 75.
- BARRAS, Bryan; DERRETT, D.R. **Ship Stability: for Masters and Mates**. 6. ed. Jordan Hill: Elsevier, 2006. 534 p. v. 1.
- BRASIL. **Portaria num. 103, de 28 de março de 2018**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/normas>>. Acesso em: 13 fev. 2019.
- BRASIL. **Resolução MSC.268(85) Código Marítimo Internacional para Cargas Sólidas à Granel (IMSBC), de 01 de janeiro de 2011**. Disponível em: <[https://www.ccaimo.mar.mil.br/sites/default/files/imsbc\\_port.pdf](https://www.ccaimo.mar.mil.br/sites/default/files/imsbc_port.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2018.
- DNV GL. **Bulk Cargo Liquefaction: Guideline for design and operation of vessels with bulk cargo that may liquefy**. Disponível em: <<https://www.dnvgl.com/maritime/publications/bulk-cargo-liquefaction.html>>. Acesso em: 13 ago. 2018.
- EDWARD V. LEWIS (Usa). The Society Of Naval Architects And Marine Engineers (Ed.). **Principles os Naval Architecture: Volume 1 - Stability and Strength**. Jersey City, 1988. 316 p.
- FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. Ferro; Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/ferro.htm>>. Acesso em 26 de nov. de 2018.
- GARD AS (Usa). **Liquefaction os Solid Bulk Cargoes**. 2014. Disponível em: <<http://www.gard.no/Content/20651223/Cargo%20liquefaction%20January%202014.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2019.
- HIDROSTATICA e Estabilidade. São Paulo: EPUSP, 2010. Disponível em: <[http://www.ndf.poli.usp.br/~gassi/disciplinas/pnv2341/Martins\\_2010\\_Hidrostat%20e\\_Estabilidade\\_PNV2341.pdf](http://www.ndf.poli.usp.br/~gassi/disciplinas/pnv2341/Martins_2010_Hidrostat%20e_Estabilidade_PNV2341.pdf)>. Acesso em: 08 nov. 2018.
- INTERNACIONAL. **Resolution MSC.75(69), de 14 de maio de 1998**. Disponível em: <[http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MS.75\(69\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MS.75(69).pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2019
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF DRY CARGO SHIPOWNERS (London) (Comp.). **Bulk Carrier Casualty Report Years 2008 to 2017 and the trends**. England: Intercargo, 2017. 19 p. Disponível em: <<https://www.intercargo.org/wp-content/uploads/2018/05/bulk-carrier-casualty-report-2017.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2019.
- KOROMILA, I. A.; SPANDONIDIS, C.C.; SPYROU, K.j. **Experimental investigation of cargo liquefaction and impact on the stability of a bulk - carrier**. 2013. 7 f. Monografia (Especialização) - Curso de Marine Engineering, National Technical University Of Athens,, Athens, 2013.
- LLOYDS REGISTER. **Carrying solid bulk cargoes safely: Guidance for crews on the International Maritime Solid Bulk Cargoes Code**. 2016. Disponível em:

<<https://www.ukpandi.com/loss-prevention/article/carrying-solid-bulk-cargoes-safely-136281/>>. Acesso em: 27 nov. 2018.

MACAHIG, Dr. Rene Angelo. **Group A Cargoes that may liquefy**. [s.i.]: Lloyd's Agency, 2014. 54 slides, color.

MINCULESCU, Adrian. **CARRIAGE OF SOLID BULK CARGOES**. 2013. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Marine Engineering, Constantza Maritime University, Constantza, 2013.

MUNRO, M. C.; MOHAJERANI, A. **MOISTURE CONTENT LIMIT OF IRON ORE FINES FOR THE PREVENTION OF LIQUEFACTION IN BULK CARRIERS**. 2014. 9 f. Monografia (Especialização) - Curso de School Of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Rmit University, Melbourne, 2014.

MUNRO, Michal C.; MOHAJERANI, Abbas. **Determination of the transportable moisture limit of iron ore fines for the prevention of liquefaction in bulk carriers**. 2014. 223 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil, Environmental And Chemical Engineering, Rmit University, Melbourne, Victoria, 2013.

ROMANZOTTI, Natasha. O mistério dos navios que afundam todo ano quando sua carga se liquefaz de repente. **Hypescience**, 9 de setembro de 2018. Disponível em: <<https://hypescience.com/o-misterio-dos-navios-cargueiros-que-afundam-quando-sua-cargase-liquefaz/>>. Acesso em 21 de set. de 2018.

ROSE, Timothy Paul. **SOLID BULK SHIPPING: CARGO SHIFT, LIQUEFACTION AND THE TRANSPORTABLE MOISTURE LIMIT**. 2014. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Master Of Science, University Of Oxford, Oxford, 2014.

TAMAKI URA INSTITUTE OF INDUSTRIAL SCIENCE (Japão). Tamaki Ura Institute Of Industrial Science. **DETERMINATION OF TRANSPORTABLE MOISTURE LIMIT OF BULK CARGOES**. 2001. Disponível em: <<http://underwater.iis.u-tokyo.ac.jp/research/bulk/bulk-chp1-e.html>>. Acesso em: 12 mar. 2019.

THE LONDON P&I CLUB. Bureau Veritas. **REDUCING THE RISK OF LIQUEFACTION: Operational guidance for vessels that carry cargoes which may liquefy**. 2017. Disponível em: <<https://group.bureauveritas.com/reducing-risk-liquefaction-new-guidance>>. Acesso em: 23 jan. 2019.

TUGSAN, Captain; COLAK, Isiaik; TANZER. **CARGO LIQUEFACTION AND DANGERS TO SHIPS**. 2014. 89 f. Monografia (Especialização) - Curso de Faculty Of Maritime, Satir Istanbul Technical University, Tuzla, 2014.

TUPPER, E. C. **Introduction to Naval Architecture**. 4. ed. Burlington: Elsevier, 2004. 465 p.

VAN DOKKUM, Klaas et al. **Ship Stability**. Enkhuizen: Maritime Publishers Dokmar, 2008. 167 p.

VAN PAASSEN, Leon A.; VARDON, Philip J.; JEFFREY, Paul. **Cargo liquefaction in bulk carriers: a review**. 2016. 23 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geo-engineering, Delft University Of Technology, Lubeck, 2016.

ZOGRAFAKIS, Kimon. **The Problem of Cargo Liquefaction in the Maritime Industry**. 2013. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Marine Engineering, National Technical University Of Athens, Athens, 2013.

## APÊNDICE A - GRUPO A DA IMO COMPLETO

Aluminium fluoride*	Ilmenite (upgraded)
Alumina hydrate (can also be B)	Iron and steel slag and its mixture*
Aluminium smelting/remelting by-products, processed (can also be B)	Iron concentrate
Blende (zinc sulphide)	Iron concentrate (pellet feed)
Calcined pyrites (can also be B)	Iron concentrate (sinter feed)
Cement copper	Iron ore (concentrate, pellet feed, sinter feed)
Chalcopyrite	Iron ore fines*
Chemical gypsum*	Iron oxide technical*
Clinker ash, wet (can be also B)	Lead and zinc calcines (mixed)
Coal (can be also B)	Lead and zinc middlings
Coal slurry	Lead concentrate
Coke breeze	Lead ore concentrate
Copper concentrate	Lead ore residue
Copper nickel	Lead silver concentrate
Copper ore concentrate	Lead silver ore
Copper precipitate	Lead sulphite
Copper slag*	Lead sulphite (galena)
Fish (in bulk)	Manganese concentrate
Fluorspar (can be also B)	Manganese ore fines*
Fly ash, wet	Metal sulphide concentrates (can be also B)
Galena (lead sulphide)	Mineral concentrates
Ilmenite clay	Nefeline syenite (mineral)
Ilmenite sand (can be also C)	

Nickel concentrate	Slig (iron ore)
Nickel ore	Spodumene (upgraded)*
Nickel ore concentrate	Zinc and lead calcines (mixed)
Peat moss (can be also B)	Zinc and lead middlings
Pentahydrate crude	Zinc concentrate
Pyrites calcined (can be B)	Zinc ore, burnt
Pyrites	Zinc ore, calamine
Pyrites (cupreous, fine, flotation or sulphur)	Zinc ore, concentrates
Pyritic ash (can be B)	Zinc ore, crude
Pyritic ashes (iron)	Zinc sinter
Pyritic cinders	Zinc slag*
Sand, heavy mineral	Zinc sludge
Scale generated from the iron and steel making process*	Zinc sulphide
Silver lead concentrate	Zinc sulphide (blende)
Silver lead ore concentrate	Zircon kyanite concentrate*