

# APLICAÇÃO DE UM MODELO PARA ESTIMATIVA DO TML PFD80 DE FINOS DE MINÉRIO DE FERRO\*

Rodrigo Fina Ferreira<sup>1</sup>  
Rosa Malena Fernandes Lima<sup>2</sup>

## Resumo

Desde 2011 embarcadores de cargas minerais devem atender à legislação vinculada ao Código Marítimo Internacional para Cargas Sólidas a Granel (IMSBC), promulgado pela Organização Marítima Internacional. Algumas cargas minerais podem se liquefazer durante uma viagem marítima, em determinadas condições, caso estejam com umidade acima de um certo nível, e seu deslocamento no porão pode prejudicar a estabilidade da embarcação. Para cargas susceptíveis a este fenômeno, o Código IMSBC estabelece que a umidade deve ser inferior ao Limite de Umidade Transportável (TML) para que o transporte ocorra com segurança. O TML dos finos de minério de ferro pode ser obtido através do teste de Proctor/Fagerberg Modificado para Finos de Minério de Ferro. O conhecimento relacionado ao TML se tornou essencial para os embarcadores, e estudos relacionados ao parâmetro são cada vez mais frequentes. Porém, a produtividade média para obtenção do TML através deste método é de uma a duas amostras por dia por executante, exigindo em torno de 50 kg por amostra. O presente trabalho apresenta um exemplo de aplicação prática de um modelo de previsão do TML. O uso do modelo reduziu substancialmente o esforço laboratorial, assim como a quantidade de amostra requerida para obtenção de conclusões relacionadas ao TML.

**Palavras-chave:** TML; Finos de minério de ferro; Modelo de previsão.

## USING A MODEL FOR ESTIMATING THE PFD80 TML OF IRON ORE FINES

### Abstract

Since 2011 mineral cargo shippers shall comply with the Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC) Code regulatory framework, established by the International Maritime Organization. Some mineral cargoes may liquefy during passage, under certain conditions, if the moisture content is beyond a certain level, and the cargo shifting may jeopardize the stability of the vessel. For cargoes which are susceptible to this phenomenon the IMSBC Code establishes that the moisture content shall be below the Transportable Moisture Limit (TML) for safe transportation by sea. Iron ore fines TML can be determined through the Modified Proctor/Fagerberg Test for Iron Ore Fines. Knowledge related to the TML has become essential to shippers, and research works related to this parameter are increasingly frequent. However, the typical daily productivity for having a TML result through this method is one up to two samples per executant person, requiring approximately 50 kg per sample. This study presents a practical example of the application of a prediction model for estimating the TML. The model application reduced substantially the laboratory work and sample quantity requirement for obtaining conclusions related to the TML.

**Keywords:** TML; Iron ore fines; Prediction model.

<sup>1</sup> Engenheiro de minas, doutor, engenheiro master, Centro de Pesquisas Tecnológicas, Vale S/A, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira de minas, doutora, professor titular, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é a carga sólida a granel com maior tonelage movimentada globalmente. Em 2017 representou cerca de 47,8% do total de cargas secas a granel e cerca de 13,8% do transporte mundial de cargas por via marítima, totalizando 1,47 bilhões de toneladas transportadas, com origem principalmente na Austrália (56%) e no Brasil (26%), e tendo como principal destino a China (72%) [1]. O transporte marítimo é internacionalmente regulamentado pela Organização Marítima Internacional (IMO), uma agência especializada da ONU. Para o transporte de minérios e outras cargas sólidas a granel o principal instrumento regulatório da IMO é o Código Marítimo Internacional para Cargas Sólidas a Granel (IMSBC), cujo cumprimento é mandatório desde 2011.

O Código IMSBC contém fichas individuais para mais de 180 tipos de cargas sólidas a granel, listando suas características, recomendações e procedimentos a serem adotados quanto ao seu manuseio. O documento classifica as cargas em três grupos: Grupo A: cargas com risco de liquefação; Grupo B: cargas com risco químico; Grupo C: cargas que não apresentam risco de liquefação ou risco químico. Dentre as fichas individuais figuram algumas relacionadas à indústria do minério de ferro, como *Iron Ore* (minério de ferro), *Iron Concentrate* (concentrado de ferro), *Iron Ore Pellets* (pelotas) e *Iron Ore Fines* (finos de minério de ferro), sendo este último produto o foco do presente estudo. Esta carga é descrita pelo Código IMSBC como cargas de minério de ferro contendo simultaneamente 10% ou mais de partículas finas menores que 1 mm ( $D_{10} \leq 1 \text{ mm}$ ) e 50% ou mais de partículas menores que 10 mm ( $D_{50} \leq 10 \text{ mm}$ ) [2].

Os finos de minério de ferro são classificados pela IMO como cargas do Grupo A, ou seja, susceptíveis a liquefação, caso o conteúdo de goethita do minério seja inferior a 35%. Caso o percentual de goethita seja superior a este valor a carga é classificada como Grupo C (sem risco de liquefação ou químico). O Código IMSBC define liquefação como o fenômeno que ocorre quando uma carga susceptível contém um certo nível de umidade, e há uma redução do volume de espaços vazios entre as partículas durante a viagem marítima pela compactação do material devido à movimentação da embarcação. A redução dos espaços vazios causa um incremento na poropressão da água, que por sua vez reduz a tensão efetiva que existe entre as partículas sólidas da carga, resultando em uma redução da resistência ao cisalhamento do material. Em geotecnia, o termo liquefação tem sido utilizado para descrever um número de diferentes fenômenos, relacionados entre si, que envolvem a deformação do material particulado causada por carregamentos monotônicos ou cíclicos em condições não drenadas, tendo em comum a geração de excesso de poropressão [3].

Uma carga de minério sendo transportada no porão de uma embarcação, uma vez liquefeita, passa a se comportar como um fluido viscoso [4], e passa a constituir uma superfície livre que se move no porão do navio. A carga pode se deslocar para um dos lados do porão e não retornar completamente para o outro lado, ou se movimentar em diferença de fase com o navio, em ambos os casos causando instabilidade que pode culminar com o adernamento, emborcamento e naufrágio da embarcação [5].

Quarenta e oito navios graneleiros de porte superior a 10.000 dwt sofreram acidentes com perda total entre 2009 e 2018, resultando em 188 fatalidades. As três principais causas dos acidentes são encalhe, liquefação/deslocamento da carga e alagamento, nesta ordem. A liquefação/deslocamento da carga foi responsável pelo maior número de vítimas, totalizando 101 fatalidades dentre o total de 188. A maior parte dos acidentes envolvendo instabilidade da carga por umidade elevada ocorreu durante o transporte de minério de níquel [6]. Seis acidentes deste tipo ocorreram durante o transporte de finos de minério de ferro, envolvendo os navios M/V Chang Le Men [7], M/V Asian Forest [6; 7; 8], M/V Black Rose [6; 7; 8], M/V Bright Ruby [7; 9], M/V Sun Spirits [7; 10] e M/V Bingo [11; 12], resultando em 7 fatalidades.

Para mitigar o risco de liquefação da carga, a IMO estabeleceu na década de 1960 um parâmetro regulatório denominado Limite de Umidade Transportável (TML – *Transportable Moisture Limit*). Seu valor corresponde à umidade máxima de uma carga do Grupo A considerada segura para o transporte marítimo. O TML é determinado por testes de laboratório descritos no Código IMSBC: o teste Flow Table, o teste Penetration, o teste de Proctor/Fagerberg (PFC70), o teste de Proctor/Fagerberg Modificado para Finos de Minério de Ferro (PFD80) e o teste de Proctor/Fagerberg Modificado para Carvão. Cada teste é aplicável para tipos específicos de cargas, e cada um apresenta uma definição diferente para o TML. Conforme a legislação da IMO, antes de cada embarque de uma carga do Grupo A, a umidade da carga deve ser determinada e comparada ao TML do material. A carga só pode ser embarcada e transportada se a umidade estiver abaixo do TML, a menos que o navio seja especialmente construído para transporte de cargas liquefeitas. O TML de uma carga é válido por 6 meses, ou até que haja uma variação das características do produto [2].

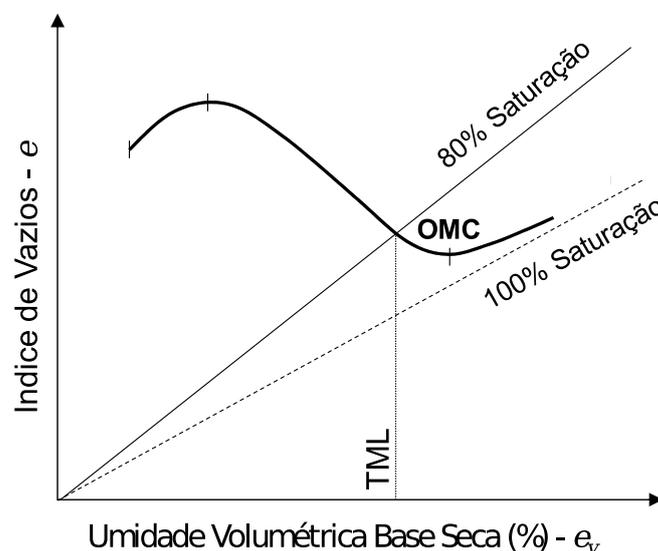
Conforme mencionado anteriormente, finos de minério de ferro com percentual de goethita inferior a 35% são classificados no Grupo A e, portanto, devem ter o TML determinado periodicamente. O Código IMSBC indica o teste PFD80 para determinação do TML desta carga, caso o grau de saturação na umidade ótima de compactação (OMC) do material seja igual ou maior que 90%. Caso este critério não seja atendido o teste não é aplicável e o embarcador deverá utilizar um dos seguintes métodos: Proctor/Fagerberg (PFC70), Flow Table ou Penetration, ou outro método aprovado pela autoridade marítima local.

O teste PFD80 é um teste de compactação dinâmica, baseado no clássico teste de Proctor, muito utilizado em mecânica dos solos [13, 14]. Consiste basicamente em se compactar amostras do minério em diferentes umidades, aplicando uma energia de compactação padronizada de 27,59 kJ/m<sup>3</sup>, e determinar a relação entre umidade e índice de vazios ( $e$  = razão entre volume de vazios e volume de sólidos) para cada ponto de compactação, plotando-se estas duas variáveis em um gráfico, gerando a curva de compactação do material (Fig. 1). O TML obtido por este método é definido como a umidade na qual o material atinge 80% de saturação, ou seja, corresponde à quantidade de água requerida para preencher 80% do volume de vazios naquele estado de compactação [15, 16, 17, 18, 19].

O Código IMSBC solicita 5 a 10 pontos de compactação para obtenção do TML pelo método PFD80. Para tal, o teste requer cerca de 50 kg de amostra, no mínimo. A produtividade típica para um executante é de uma a duas amostras por dia, sendo o

resultado obtido no dia seguinte, sendo que no primeiro dia se executa a compactação, colocando-se as amostras compactadas para secar, e no segundo dia são pesadas as alíquotas secas para cálculo dos parâmetros necessários para obtenção da curva de compactação e do TML.

Devido à importância do parâmetro, estudos de pesquisa relacionados ao TML são cada vez mais frequentes, visando se compreender quais características do minério influenciam em seu valor, por exemplo. Geralmente este tipo de estudo requer grande número de testes, e levando em consideração a produtividade e requerimento de amostras supramencionados, Assim sendo, estudos relacionados ao TML nos quais se faz necessário executar grande número de testes requerem considerável massa de amostras e grande esforço laboratorial. Neste âmbito, Ferreira *et al.* [20] desenvolveram um modelo de previsão do TML PFD80 baseado em um teste simplificado de compactação, executado em apenas uma umidade (9%) e utilizando o mesmo aparato do teste PFD80. O modelo permite testar até 10 amostras por dia, consumindo apenas 5 kg por amostra.



**Figura 1.** Curva de compactação de Proctor/Fagerberg para o teste PFD80.

O modelo foi desenvolvido com base na própria definição do TML: como, pelo método PFD80, o Limite de Umidade corresponde à umidade na qual o minério atinge 80% do volume de vazios preenchidos por água, deduz-se que quanto maior o volume de vazios, mais água o minério comporta para atingir 80% de ocupação volumétrica. Nos cálculos do TML o volume de vazios é representado pelo índice de vazios ( $e$ ). O TML deve, portanto, ser proporcional ao índice de vazios. Os autores correlacionaram o TML à massa específica dos sólidos ( $d$ ) e ao índice de vazios obtido em uma umidade fixa (9%) para um conjunto de 119 amostras de finos de minério de ferro, tendo obtido uma equação por regressão linear múltipla (Equação 1), que foi validada por meio da aplicação a um banco de dados composto por 58 outras amostras, incluindo resultados de outros autores.

$$TML = 43,74972 + 7,30231e_{9\%} - 0,45931e_{9\%}^2 - 16,12937d + 1,65751d^2 + 0,03984e_{9\%}d \quad (1)$$

O presente trabalho apresenta um exemplo de aplicação prática do modelo proposto por Ferreira *et al.* [20], em um estudo no qual buscou-se avaliar as variações do TML considerando misturas de três tipos diferentes de finos de minério de ferro, evidenciando a utilidade desta ferramenta para pesquisas relacionadas ao TML.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

Foram coletadas 3 amostras de finos de minério de ferro com diferentes características, sendo elas denominadas AM 1, AM 2 e AM 3. Cada amostra foi inicialmente dividida em divisor rotativo. A distribuição granulométrica foi determinada por peneiramento a úmido e difração a *laser* da fração passante em 0,045 mm utilizando o difratômetro Malvern® Mastersizer, e a composição mineralógica modal foi determinada por microscopia ótica de luz refletida.

Foram efetuadas 4 misturas entre as amostras AM 1 e AM 2, e 4 misturas entre as amostras AM 1 e AM 3, considerando as proporções listadas na Tabela 1, sendo que tanto as amostras individuais quanto as misturas foram submetidas à determinação de massa específica dos sólidos por picnometria a gás (He), conforme procedimentos descritos na norma ASTM D5550 [21].

**Tabela 1.** Proporções das misturas de amostras

Mistura	AM 1	AM 2	Mistura	AM 1	AM 3
	100%	0%		100%	0%
	90%	10%		90%	10%
AM 1	70%	30%	AM 1	70%	30%
+			+		
AM 2	50%	50%	AM 3	50%	50%
	30%	70%		30%	70%
	0%	100%		0%	100%

O procedimento para obtenção da estimativa de TML pelo modelo proposto por Ferreira *et al.* [20] consiste em se determinar a umidade inicial da amostra, adicionar água para se atingir 9% de umidade, e efetuar o teste de compactação utilizando-se o aparato do teste PFD80: um molde cilíndrico com aproximadamente 1.000 cm<sup>3</sup> de volume, e um soquete de 150 g, com diâmetro de 50 mm e altura de queda de 150 mm. A partir dos dados de massa e volume obtidos calcula-se o índice de vazios (volume de vazios dividido pelo volume de sólidos). O TML foi calculado pelo modelo de previsão do TML, conforme a Equação 1, tendo por dados de entrada o índice de vazios e a massa específica dos sólidos.

Para tratamento dos dados utilizou-se o *software* livre R [22].

## 2.2 Resultados e Discussão

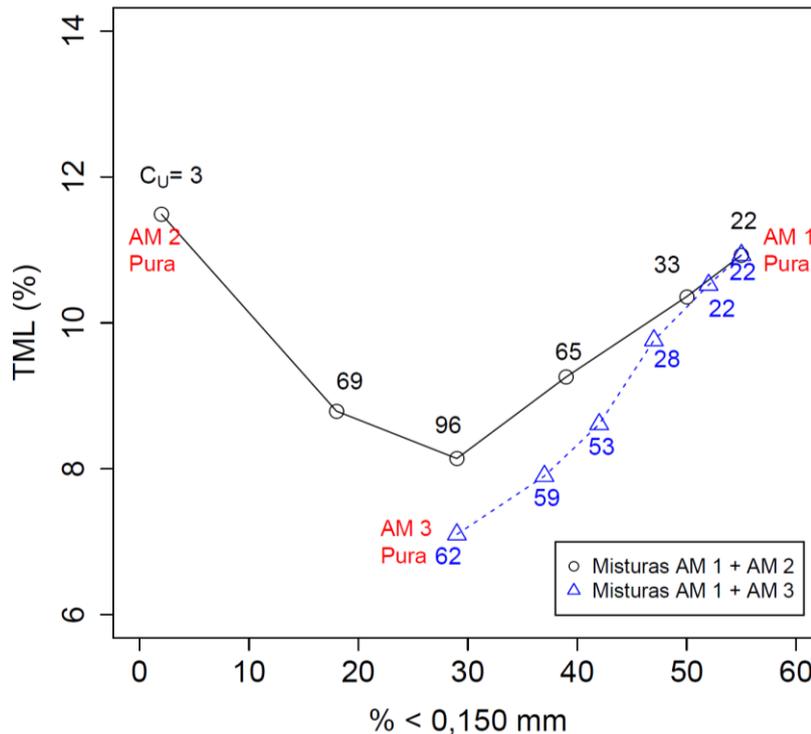
Algumas características gerais das amostras são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 2.** Características das amostras

Amostra	% +0,15 mm	% -0,15 mm	C <sub>u</sub>	d (g/cm <sup>3</sup> )	% Hematita	% Goethita	% Quartzo	% Outros
AM 1	45,0	55,0	22	4,51	58,4	19,2	10,2	12,2
AM 2	97,9	2,1	3	4,13	69,2	0,4	26,5	4,0
AM 3	71,0	29,0	22	4,51	88,8	0,9	7,6	2,7

As três amostras apresentam diferenças em termos de distribuição granulométrica e mineralógica. A amostra AM 1 é a mais fina, com 55% passante em 0,15 mm, tem por principal componente a hematita, mas com participação considerável de goethita. A amostra AM 2 é a mais grossa, com apenas 2% passante em 0,15 mm, sendo também a que apresenta distribuição granulométrica mais bitolada, com coeficiente de uniformidade igual a 3. Apresenta predominância de hematita, e a maior participação de quartzo dentre as três amostras, o que leva ao menor valor de massa específica. Já a amostra AM 3 se apresenta entre as duas anteriores em termos de participação de partículas finas, mas apesar disso possui o mesmo coeficiente de uniformidade da AM 1. Apresenta a composição mineralógica mais homogênea, com quase 90% de hematita e pouca participação de contaminantes.

A Figura 2 apresenta o TML de cada amostra e respectivas misturas, calculado pelo modelo de previsão proposto por Ferreira *et al.* [20], e plotado em relação ao percentual passante em 0,15 mm de cada condição testada. O gráfico contém, ainda, os valores do coeficiente de uniformidade de cada amostra e mistura.



**Figura 2.** Variação do TML com o percentual passante em 0,150 mm.

Avaliando inicialmente os resultados das misturas AM 1 + AM 2, observa-se que o TML das duas amostras testadas individualmente é elevado, da ordem de 11 a 12%. Partindo da AM 2, houve uma queda do TML com aumento da participação de AM 1 na mistura, até que um mínimo foi atingido, quando a mistura atingiu aproximadamente 30% < 0,15 mm. Neste primeiro trecho da curva o coeficiente de uniformidade aumenta até atingir um valor máximo, que coincide com o mínimo TML. Aumentando-se a participação de AM 1, o TML passou a aumentar até atingir o valor correspondente à AM 1 testada individualmente. Neste segundo trecho da curva o coeficiente de uniformidade diminui constantemente até atingir um mínimo, correspondente ao valor da AM 1.

Com relação às misturas entre AM 1 e AM 3, partindo da AM 3 testada isoladamente, observa-se que o TML aumenta continuamente até atingir o valor correspondente à AM 1. O coeficiente de uniformidade diminui continuamente. Salienta-se que a AM 3 apresenta percentual passante em 0,15 mm de 29%, e por isso a curva tem início na região central do gráfico. As variações de TML estão diretamente relacionadas com a variação do volume de vazios causada pelos efeitos estruturais inerentes às diferentes distribuições granulométricas das misturas entre os minérios, sendo estes listados e discutidos por Ferreira [23]. A amostra AM 2 é bitolada, com pouca participação de finos. Quando é misturada à AM 1, os finos desta ocupam os vazios entre as partículas grossas da AM 2, reduzindo o índice de vazios, e conseqüentemente o TML. Já a amostra AM 3 possui naturalmente uma certa quantidade de partículas finas.

Os resultados obtidos indicam que o coeficiente de uniformidade acompanha as variações de TML: quanto menor o coeficiente de uniformidade, maior o TML. O coeficiente de uniformidade reflete quão bitolada é a distribuição granulométrica do minério. Minérios com distribuição mais bitolada tendem a apresentar maior volume

de vazios, o qual, por sua vez, é proporcional ao TML. Esta relação explica a conexão entre TML e coeficiente de uniformidade.

Outra constatação importante: o TML é uma variável nem sempre aditiva. No caso das misturas entre AM 1 e AM 2, tem-se dois minérios com TMLs elevados, cujas misturas apresentam TMLs menores que as amostras individuais. Neste caso o TML não é aditivo. Porém, para as misturas entre AM 1 e AM 3 o TML sempre fica entre os valores das amostras individuais, sendo o valor próximo da ponderada entre os TMLs originais.

Para realizar um estudo como este executando-se os testes PFD80 completos para cada amostra e para cada mistura, um executante levaria cerca de 11 dias, sem considerar a preparação das amostras, consumindo um total de 340 kg da amostra AM 1 e 130 kg da AM 2 e da AM 3. Fazendo-se uso do modelo de previsão do TML proposto por Ferreira *et al.* [20], o estudo foi realizado em 2 dias, consumindo cerca de 35 kg da AM 1 e 15 kg das amostras AM 2 e AM 3. Uma redução substancial de esforço laboratorial (82%) e de quantidade de amostra requerida (cerca de 90%).

### 3 CONCLUSÃO

O presente trabalho exemplificou a utilidade do modelo de previsão do TML proposto por Ferreira *et al.* [20], utilizando o índice de vazios obtido em um teste de compactação na umidade de 9% e a massa específica dos sólidos como variáveis regressoras, e demonstrou como a aplicação deste modelo pode reduzir substancialmente o esforço laboratorial e a quantidade de amostra requerida para estudos de pesquisa relacionados ao TML. No caso do estudo aqui apresentado, o uso do modelo reduziu 82% o tempo de execução dos testes, e cerca de 90% a massa necessária para cada amostra. Estudos relacionados ao TML têm sido cada vez mais frequentes, e o modelo é uma ferramenta útil para tal. Salienta-se que o mesmo deve ser utilizado apenas para pesquisa, e não deve ser aplicado para fins de certificação de cargas para embarque, o que deve ser feito executando-se o teste PFD80, conforme orientações do Código IMSBC da IMO.

Os resultados obtidos no estudo demonstraram que o TML nem sempre é uma variável aditiva, ou seja, a mistura de minérios com TML elevado pode resultar em um produto com TML inferior aos dois iniciais, dependendo das características granulométricas do material. Além disso, demonstrou-se que o coeficiente de uniformidade ( $D_{60} / D_{10}$ ) é um parâmetro granulométrico correlacionável ao TML, e pode ser utilizado na elaboração de modelos de previsão do parâmetro com base na granulometria.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale S/A, CAPES, CNPq e FAPEMIG por todo o suporte ao trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Review on Maritime Transport 2018. United Nations Conference on Trade and Development - UNCTAD; 2018.
- 2 International Maritime Solid Bulk Cargoes Code. Londres: International Maritime Organization - IMO; 2018.
- 3 Kramer SL. Geotechnical earthquake engineering. 1ª ed. New Jersey: Prentice Hall; 1996.
- 4 Ishihara K. Liquefaction of subsurface soils during earthquakes. J Disaster Res. 2006;1(2):245–61.
- 5 Maritime bulk cargo liquefaction: guideline for design and operation of vessels with bulk cargo that may liquefy. DNV GL; 2015.
- 6 Bulk carrier casualty report: years 2009 to 2018 and the trends. International Association of Dry Cargo Shipowners – INTERCARGO; 2019.
- 7 GISIS/IMO - Global integrated shipping information system, Marine casualties and incidents [página na internet]. Londres: IMO; 2019 [acesso em 23 mar. 2019]. Disponível em: <https://gisis.imo.org/Public/Default.aspx>
- 8 Report and recommendations of the committee on the existing practices of loading of iron ore at different ports of India & cause of sinking of MV Black Rose and MV Asian Forest off Indian coast. India Directorate General of Shipping; 2010.
- 9 Investigation report of the capsizing of the bulk cargo vessel Bright Ruby. Korean Maritime Safety Tribunal; 201-.
- 10 Terminal report on capsized cargo vessel M/V Sun Spirit. National Disaster Risk Reduction and Management Council; 2012.
- 11 Search and Rescue 'MV Bingo'. Indian Coast Guard, Safe Waters 2014;XIV(1): 6.
- 12 Hancock P. Bingo foundered [página na internet]. [acesso em 23 mar. 2019]. Disponível em: <https://www.shipwrecklog.com/log/2013/10/bingo-foundered/>
- 13 Proctor R. Description of field and laboratory methods. Eng News Rec. 1933;3(10): 286–9.
- 14 Proctor R. Fundamental principles of soil compaction. Eng News Rec. 1933;3(9):245–8.
- 15 Submission for evaluation and verification: terms of reference. Iron Ore Fines Technical Working Group; 2013.
- 16 Submission for evaluation and verification: iron ore Proctor Fagerberg test. Iron Ore Fines Technical Working Group; 2013.
- 17 Submission for evaluation and verification: marine report. Iron Ore Fines Technical Working Group; 2013.
- 18 Submission for evaluation and verification: reference tests. Iron Ore Fines Technical Working Group; 2013.
- 19 Submission for evaluation and verification: research synopsis and recommendations. Iron Ore Fines Technical Working Group; 2013.
- 20 Ferreira RF, Pereira TM, Lima RMF. A model for estimating the PFD80 transportable moisture limit of iron ore fines. Powder Technology. 2019;345:329–37.
- 21 ASTM D5550-14, Standard test method for specific gravity of soil Solids by Gas Pycnometer. West Conshohocken: ASTM International; 2014.
- 22 R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing [acesso em 19 set. 2017]. Disponível em: <http://www.R-project.org/>
- 23 Ferreira RF. Modelos para Previsão do Limite de Umidade para Transporte Marítimo de Finos de Minério de Ferro [tese de doutorado]. Universidade Federal de Ouro Preto; 2019.