

# LIMITE DE UMIDADE TRANSPORTÁVEL DE MINÉRIOS DE FERRO: ASPECTOS REGULATÓRIOS E TÉCNICOS

Rodrigo Fina Ferreira <sup>1</sup>  
Dany Luiz Vieira Policarpo <sup>2</sup>  
Victor Pereira Padula <sup>2</sup>  
Marco Tulio Santiago Ferreira <sup>2</sup>

## Resumo

Materiais sólidos a granel, contendo umidade, podem estar sujeitos a rupturas, deslizamentos e liquefação. Cargas de minério transportadas em navios não estão isentas destes fenômenos, que colocam em risco as embarcações. Nos últimos 30 anos ocorreram pelo menos 24 acidentes marítimos tendo como causa atribuída a liquefação da carga, somando mais de 177 vítimas fatais. A Organização Marítima Internacional (IMO), braço da ONU que regulamenta o transporte marítimo, estabelece orientações e leis que visam garantir a segurança das operações. Para prevenir a liquefação e fenômenos relacionados, a IMO estabeleceu o Limite de Umidade Transportável (TML), e indicava três métodos para sua determinação: Proctor /Fagerberg, *Flow Table* e *Penetration*. Um amplo estudo apresentado à IMO em 2013 concluiu que estes métodos não são adequados para fins de minério de ferro, tendo sido desenvolvido um novo teste, o Proctor/Fagerberg Modificado. O presente trabalho apresenta aspectos regulatórios e técnicos do TML, e um comparativo entre o TML de 35 amostras obtidos pelos três métodos originais, mostrando diferenças significativas entre os resultados, uma evidência de sua inadequação.

**Palavras-chave:** Limite de Umidade Transportável; TML; Transporte marítimo; Minério de ferro.

## TRANSPORTABLE MOISTURE LIMIT OF IRON ORES: REGULATORY AND TECHNICAL ASPECTS

## Abstract

Bulk solid materials containing some amount of moisture may be susceptible to stockpile failure, sliding and liquefaction. Ore cargoes transported by ships are not free from these phenomena, which put the vessels at risk. At least 24 maritime accidents, which attributable cause is liquefaction, happened in the last 30 years, with more than 177 fatal victims. The International Maritime Organization, the United Nations section that regulates maritime transportation, sets guidance and laws that aim to guarantee the operations safety. To prevent liquefaction and related phenomena the IMO stated the Transportable Moisture Limit (TML), and indicated three test methods for its determination: Proctor/Fagerberg, Flow Table and Penetration. A vast study presented to the IMO in 2013 have concluded that these methods are not representative for iron ore fines, and a new test method have been developed, the Modified Proctor /Fagerberg. This paper presents regulatory and technical aspects of the TML, and a comparative evaluation between the TML of the three original test methods for 35 samples, showing significant differences between the results, an evidence of the inadequacy of these methods.

**Keywords:** Transportable Moisture Limit; TML; Maritime transportation; Iron ore.

<sup>1</sup>Vale, Mariana, MG, Brasil. E-mail: rodrigo.fina@vale.com

<sup>2</sup>Vale, Belo Horizonte, MG, Brasil.



## I INTRODUÇÃO

### I.1 Transporte Marítimo e Liquefação de Cargas a Granel

Anualmente milhões de toneladas de minério de ferro são transportadas por via marítima. Em 2014 o Brasil produziu 411,8 Mt de minério, e deste montante, 294 Mt foram exportadas. Os principais países de destino foram: China (52,0%), Japão (9,0%), Coréia do Sul e Países Baixos (5,0% cada) e Omã (3,0%) [1]. O aumento da demanda por minério de ferro vivenciado nos últimos anos levou a um conseqüente aquecimento do mercado de navegação. A Figura 1 apresenta o número de entregas de novos navios *bulk carriers* (graneleiros) ao longo dos anos, e mostra um *boom* a partir de 2009.

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 [3], decorrente da brusca aplicação de uma carga de origem estática ou dinâmica [4]. O material granular liquefeito passa a se comportar como um líquido viscoso [5]. Fagerberg e Stavang [6,7] explicam com detalhes a liquefação no âmbito das cargas a granel em navios, neste caso a movimentação do navio e a vibração dos motores exercem o papel das cargas dinâmicas. Uma vez liquefeita, a pilha perde a estabilidade e se movimenta livremente no porão, acompanhando a movimentação da embarcação, sendo que o material pode vir a se estabilizar novamente, porém acumulando-se em um dos lados do porão, tornando-se um fator de desequilíbrio para o navio, que pode adernar (inclinarse) ou até mesmo emborcar (virar com o casco para cima) repentinamente. Acidentes relacionados a liquefação de minérios em navios são documentados desde o início do século XX, e nos últimos anos um aumento expressivo na

taxa de ocorrência levou a um maior interesse pelo assunto. Nos últimos 30 anos ocorreram pelo menos 24 acidentes marítimos tendo como causa atribuída a liquefação da carga, somando mais de 177 vítimas fatais. O caso mais recente ocorreu em janeiro de 2015, com o graneleiro *MV Bulk Jupiter*, que partiu da Malásia carregando 46.400 t de bauxita, e afundou inesperadamente a 150 milhas náuticas da costa do Vietnã. Apenas um dos 19 tripulantes sobreviveu [8].

### I.2 O Limite de Umidade Transportável de Minérios de Ferro

O transporte marítimo de cargas a granel é regulamentado internacionalmente pela Organização Marítima Internacional (*International Maritime Organization – IMO*). Com objetivo de definir critérios para segurança das operações, a IMO estabeleceu em 1965 o Código Marítimo Internacional de Cargas Sólidas a Granel (*International Maritime Solid Bulk Cargoes Code – IMSBC Code*), revisado periodicamente pelo Sub-comitê de Cargas Perigosas, Cargas Sólidas e Contêineres (*DSC – Sub-committee on Dangerous Goods, Solid Cargoes and Containers*). O documento contém uma lista de fichas das cargas a granel transportadas por via marítima, sua classificação em termos de periculosidade, os riscos associados e procedimentos a serem adotados para que a segurança da operação seja garantida, além de testes para a determinação de algumas características das cargas, as quais são classificadas em três grupos: Grupo A – cargas que apresentam risco de liquefação; Grupo B – cargas que apresentam risco químico; Grupo C – cargas que não apresentam riscos. O Código tem efeito mandatório para os países membros da IMO, dentre os quais o Brasil.

Para as cargas do Grupo A o Código exige, dentre outras ações mitigadoras, a determinação do Limite de Umidade Transportável (*TML – Transportable Moisture Limit*),

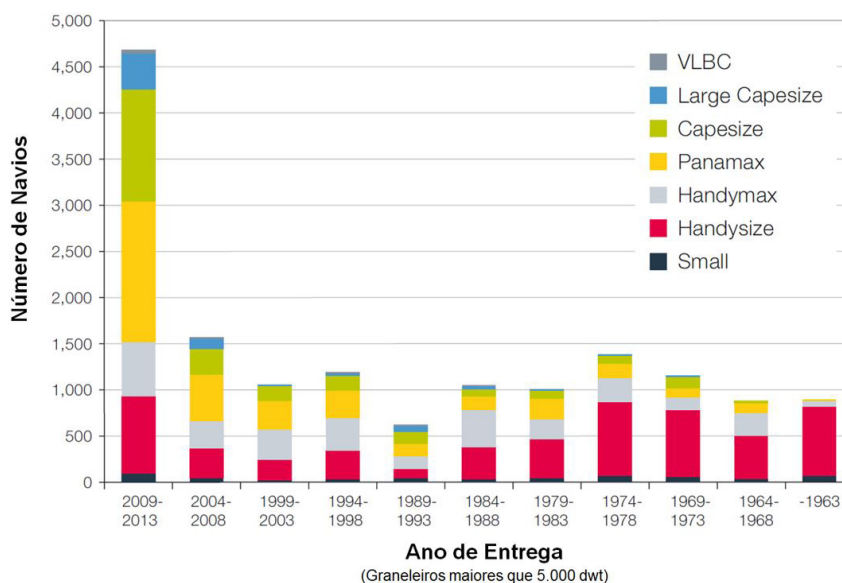


Figura 1. Entregas de navios graneleiros (*bulk carriers*) entre 1963 e 2013 [2].

conceito formalizado em 1965 pela IMO, e que consiste no limite máximo de umidade com a qual a carga pode ser transportada com segurança. O arcabouço regulatório da IMO exige que o TML e a umidade de uma carga do Grupo A sejam informados ao comandante do navio antes de iniciar o carregamento. Caso a carga esteja com umidade igual ou superior ao TML não deve ser embarcada, a não ser que o navio seja especialmente projetado para transporte de cargas liquefeitas. Para a determinação do TML o *IMSBC Code* [9] lista três métodos: *Proctor/Fagerberg Test* (PFT) [6,7], *Flow Table Test* (FTT) [10,11] e *Penetration Test* (PTT) [12]. O Limite de Umidade deve ser revisado a cada 6 meses ou quando há alterações na carga.

Concentrados de minério de ferro (*Iron Concentrates*), inclusos na ficha de Concentrados Minerais (*Mineral Concentrates*) no *IMSBC Code*, são classificados como carga do Grupo A. Há uma ficha para minérios de ferro (*Iron Ore*), que engloba os granulados, classificados no Grupo C. Porém o Código não abrange os finos de minério de ferro com especificações correspondentes aos *sinter feeds*. Após alguns acidentes envolvendo minério de ferro indiano, em outubro de 2011 a IMO emitiu uma circular [13] declarando que finos de minério de ferro apresentam risco de liquefação, categorizando o material como carga do Grupo A e exigindo a aplicação das ações consequentes, causando grande alvoroço. Através das autoridades representantes do Brasil (Diretoria de Portos e Costas da Marinha) e da Austrália na IMO, os embarcadores dos respectivos países questionaram a categorização desta carga sem a execução de um estudo científico apropriado.

Com base em pesquisa desenvolvida pela Vale, o Brasil submeteu à IMO em 2012 documentos indicando a inadequação dos métodos existentes no *IMSBC Code* para a determinação do TML de finos de minério de ferro [14], evidenciando a segurança do transporte de minério de ferro do Brasil ao longo de décadas de operações [15], além de propostas de novos testes de TML: o Critério Triaxial Cíclico [16] e o Proctor/Fagerberg Corrigido [17]. Os testes geotécnicos do estudo foram realizados em laboratórios do Reino Unido e Japão, e os testes de TML foram conduzidos pelo Centro de Pesquisas Tecnológicas (CPT) da Vale, em Mariana, primeiro laboratório no Brasil, e um dos primeiros no mundo, a ser capacitado para determinar o TML por todos os métodos do *IMSBC Code*. Após avaliar as submissões, a IMO solicitou a inclusão de minérios de outros países no estudo, e constituiu um grupo técnico de trabalho (*Iron Ore Technical Working Group - IOTWG*) coordenado pelo Japão e incluindo Brasil, Austrália, outros países e organizações, com participação da Vale, BHP Billiton e Rio Tinto, com a incumbência de avaliar o potencial de liquefação dos finos de minério de ferro, certificar se os três métodos de determinação de TML existentes seriam aplicáveis, e caso necessário desenvolver um método apropriado.

Foi realizada uma ampla gama de testes geotécnicos e de TML, testes piloto em modelos de porões, monitoramento de cargas durante o transporte com escaneamento a laser e medição de poro-pressão, modelamento matemático, etc. Com base em testes triaxiais cíclicos calibrados para

representar as condições às quais o minério é submetido no navio, o grupo concluiu que os finos de minério de ferro podem se liquefazer nestas condições caso o conteúdo de goethita seja inferior a 35%. A partir desta constatação, a pesquisa foi direcionada para a definição de um método para determinação do TML. Os estudos submetidos pelo Brasil já haviam comprovado que os três métodos existentes no *IMSBC Code* não são adequados para o material em questão, e estudos australianos corroboraram esta conclusão. O caminho tomado pelo IOTWG foi calibrar o método PFT, mesma abordagem adotada pelo Brasil no ano anterior, por ser um método sistemático, com aparato de baixo custo, e cujo resultado de TML é mais realista quando confrontado com os registros de décadas de transporte seguro de finos de minério de ferro [18-21].

Nos estudos de calibração, testes triaxiais cíclicos demonstraram que o risco de liquefação existe quando o grau de saturação do minério está acima do ponto de umidade ótima (*optimum moisture content - OMC*), o qual encontra-se acima de 90% de saturação para os finos de minério de ferro. Nos concentrados estudados por Fagerberg na década de 60, o valor do OMC era de 70 a 75%, de onde vem a referência do teste original. Adotando uma margem de segurança de pelo menos 10%, estabeleceu-se como TML no teste modificado a umidade na qual o minério encontra-se com grau de saturação de 80%. Medições de densidade a granel por meio de escaneamento de pilhas no interior de porões e testes de laboratório demonstraram que o nível de compactação no teste de Proctor/Fagerberg original era excessivo para finos de minério de ferro, sendo necessário calibrar a energia de compactação. Para tal, adotou-se um soquete com massa de 150 g e altura de queda de 150 mm, mantendo-se as 5 camadas de compactação e as 25 quedas por camada.

Em 2013 os resultados da pesquisa do IOTWG e a proposta do novo teste (Proctor/Fagerberg Modificado, ou Proctor/Fagerberg D80), foram submetidos à avaliação e aprovados por especialistas do *Imperial College* (Reino Unido), sendo aprovada posteriormente pela IMO. O teste será incluído no *IMSBC Code* em 2017, mas uma circular da IMO já autoriza seu uso [22]. Foi estabelecida uma ficha para *Iron Ore Fines*, que pela definição da IMO são minérios não concentrados com  $D_{10} \leq 1$  mm e  $D_{50} \leq 10$  mm com percentual de goethita inferior a 35% (cargas com maior teor de goethita são classificadas no Grupo C, pois não se liquefazem nas condições consideradas). No Brasil, para auxiliar os embarcadores neste novo cenário de exigências, foi publicada em 2014 a norma ABNT NBR 16317:2014 - Minérios de Ferro - Procedimentos para Controle de Umidade nos Portos do Brasil para Segurança no Transporte Marítimo de Carga [23], iniciativa do IBRAM-CONIM que especifica as melhores práticas a serem adotadas. Um resumo descritivo dos três testes de TML originais e do Proctor/Fagerberg Modificado é apresentado na Tabela 1.

O presente trabalho teve por objetivo apresentar aspectos regulatórios e técnicos do TML, compilar o histórico dos testes de determinação deste parâmetro, e apresentar testes comparativos que corroboram as conclusões do

**Tabela 1.** Descritivo dos métodos de determinação do limite de umidade transportável (TML)

Teste	Proctor/Fagerberg	Proctor/Fagerberg Modificado	Flow Table	Penetration
<b>Origem</b>	Desenvolvido na Suécia em 1963 [6, 7]. Adotado pela IMO para o antigo BC Code em 1992.	Desenvolvido pela Grupo Técnico de Trabalho formado pela IMO em 2013 [15-18]. Será incluído no IMSBC Code em 2017.	Originalmente desenvolvido para indústria cimenteira [10, 11]. Adaptado no Canadá para determinação de TML e inclusão na primeira versão do antigo BC Code em 1965.	Desenvolvido no Japão para determinar TML de carvão [12]. Adotado pela IMO para o antigo BC Code em 1992.
<b>Aplicabilidade</b>	Minérios e concentrados não porosos com limite de tamanho em 5 mm.	Finos de minério de ferro com percentual de goethita <30% e OMC > 90%.	Minérios e concentrados com limite de tamanho em 7 mm.	Minérios e concentrados com limite de tamanho em 25 mm.
<b>Aparato</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cilindro de compactação com 1000 cm<sup>3</sup>;</li> <li>- Soquete com 350 g, 5 cm de diâmetro e 20 cm de altura de queda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cilindro de compactação com 1000 cm<sup>3</sup>;</li> <li>- Soquete com 150 g, 5 cm de diâmetro e 15 cm de altura de queda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesa com 25,4 cm diam. e 1,25 cm de altura de queda;</li> <li>- Molde tronco-cônico com 296,6 cm<sup>3</sup>;</li> <li>- Soquete de mola com 3 cm de diâmetro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesa vibratória de 2 g rms;</li> <li>- Moldes cilíndricos com 1700 cm<sup>3</sup> ou 4700 cm<sup>3</sup>;</li> <li>- Bits de penetração;</li> <li>- Soquete de mola com 3 cm de diâmetro.</li> </ul>
<b>Resumo do Procedimento</b>	A partir de testes de compactação, identifica-se a relação entre índice de vazios e umidade. São realizados 5 a 10 testes de compactação com diferentes umidades, sendo o cilindro preenchido com 5 camadas de amostra, cada camada recebe 25 quedas do soquete.	A partir de testes de compactação, identifica-se a relação entre índice de vazios e umidade. São realizados 5 a 10 testes de compactação com diferentes umidades, sendo o cilindro preenchido com 5 camadas de amostra, cada camada recebe 25 quedas do soquete.	São realizados testes com diferentes umidades até que seja detectada visualmente uma deformação plástica no corpo de prova. O molde é preenchido com 3 camadas de amostra, sendo que a primeira camada recebe 35 compressões, a segunda 25 e a terceira 20. A pressão aplicada é calculada.	São realizados testes com diferentes umidades até que pelo menos um dos bits penetre 5 cm ou mais na amostra. O molde é preenchido com 3 camadas de amostra, sendo efetuada compactação até se obter uma superfície plana no corpo de prova.
<b>Definição do TML</b>	Umidade correspondente a 70% de saturação.	Umidade correspondente a 80% de saturação.	Umidade correspondente a 90% do flow moisture point.	Umidade correspondente a 90% do flow moisture point.
<b>Definição do Flow Moisture Point (FMP)</b>	Não se aplica.	Não se aplica.	Umidade na qual se observa deformação plástica na amostra após as quedas.	Umidade na qual se observa penetração de 5 cm ou mais no bit.
<b>Tempo para Determinação do TML</b>	1 a 2 dias	1 a 2 dias	1 a 2 dias	2 dias
<b>Pontos Positivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baseado em teste amplamente utilizado em geotecnia;</li> <li>- Aparato simples e de baixo custo;</li> <li>- Obtenção de parâmetros geotécnicos;</li> <li>- Não subjetivo;</li> <li>- Boa repetibilidade e reprodutibilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baseado em teste amplamente utilizado em geotecnia;</li> <li>- Aparato simples e de baixo custo;</li> <li>- Obtenção de parâmetros geotécnicos;</li> <li>- Não subjetivo;</li> <li>- Boa repetibilidade e reprodutibilidade;</li> <li>- Desenvolvido com base na mais ampla pesquisa realizada sobre o assunto até o momento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige menor quantidade de amostra;</li> <li>- Possibilita visualização de deformações.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ampla faixa de aplicação;</li> <li>- Possibilita a visualização de deformações e eventual liquefação;</li> <li>- Não subjetivo.</li> </ul>
<b>Pontos Negativos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não é possível observar deformações;</li> <li>- Aplicabilidade limitada, para testar minérios com partículas acima de 5 mm estudos devem ser realizados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não é possível observar deformações.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Extremamente subjetivo, pois a identificação do FMP depende do executante;</li> <li>- Exige operador experiente;</li> <li>- Aplicabilidade limitada;</li> <li>- Não há obtenção de parâmetros geotécnicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipamento complexo, caro e de difícil obtenção e calibração;</li> <li>- Exaustivo ergonomicamente;</li> <li>- Não há obtenção de parâmetros geotécnicos.</li> </ul>



IOTWG com relação à inaplicabilidade dos métodos originais (*Flow Table*, *Penetration* e *Proctor/Fagerberg*) para finos de minério de ferro. Salienta-se que o nome dado às cargas pela IMO nem sempre coincidem com os nomes consagrados na indústria, que geralmente considera como finos de minério de ferro os *sinter feeds* e *pellet feeds*. Neste trabalho, o nome “finos de minério de ferro” corresponde à definição da IMO, citada anteriormente.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para execução do estudo comparativo entre os três métodos originais propostos no *IMSBC Code* para determinação do TML foram coletadas 35 amostras de finos de minério de ferro nos portos de Tubarão, Ilha Guaíba e Ponta da Madeira, e em várias usinas do Brasil, além de amostras geradas em laboratório, com diferentes características granulométricas e mineralógicas. Todos os testes foram realizados em conformidade com o *IMSBC Code* [9]. A amostragem e preparação das amostras foi realizada conforme a norma NBR ISO 3082 [24]. Efetuou-se a determinação de umidade em todos os testes em conformidade com a norma NBR ISO 3087 [25].

Nos testes de PFT utilizou-se soquete de 350 g e cilindro de 1000 cm<sup>3</sup>, fabricados pela Solotest. Efetuou-se o escalpe das amostras em 5 mm, por meio de peneiramento a umidade natural. Determinou-se a densidade real dos sólidos por picnometria a Hélio conforme a norma ASTM D5550-14 [26]. O *IMSBC Code* solicita a secagem total da amostra antes do teste, para posterior ajuste de umidade, porém, na visão dos autores, esta etapa é desnecessária e pode inclusive comprometer os resultados, já que as propriedades do minério podem ser alteradas. Assim sendo realizou-se somente pré-secagem ao ar, quando necessário. As amostras foram divididas em até 10 alíquotas de aproximadamente 4 kg. Utilizou-se uma das alíquotas para determinação da umidade inicial. Realizaram-se de 8 a 10 testes de compactação por amostra, em umidades diferentes. Em cada teste efetuou-se o ajuste de umidade em uma bandeja, homogeneizando a amostra com a água por 5 minutos, e decorrido este tempo preencheu-se o cilindro com 5 camadas de amostra, cada uma compactada com 25 quedas do soquete. Após o nivelamento da última camada, a amostra foi removida do cilindro e determinou-se a umidade levando toda a massa à estufa a 105°C. O TML foi obtido por meio da curva de compactação, plotando-se o índice de vazios ( $e$ ) versus a razão volumétrica de água ( $e_v$ ), além de retas de grau de saturação. No gráfico identificou-se o valor de  $e_v$  no qual a curva de compactação intercepta a reta correspondente a 70% de saturação  $e$ , assim, calculou-se o TML.

Nos testes de FTT utilizou-se mesa fabricada pela Solotest, com motor controlado por inversor de frequência para ajuste das quedas. Para efeito de cálculo da pressão de compactação considerou-se profundidade máxima de carga de 12 m. A densidade a granel foi medida em ensaio

de laboratório. A pressão máxima atingida pelo soquete disponível é 250 kPa, sendo este valor utilizado para as amostras cuja pressão calculada fosse superior. Inicialmente posicionou-se o molde tronco-cônico no centro da mesa, preenchendo-o com três camadas de material. A primeira camada foi compactada com 35 compressões, a segunda com 25 compressões e a terceira com 20, sobre toda a área da amostra obtendo uma superfície plana e uniforme. Finalizada a compactação, removeu-se o molde metálico e efetuou-se 50 quedas da mesa, a uma taxa de 25 quedas por minuto. Este procedimento foi realizado para diversas umidades. O executor do teste registrou a ocorrência de deformação plástica (perfil côncavo ou convexo na amostra), sendo o FMP a média das umidades do ensaio no qual ocorreu tal deformação e aquele com umidade imediatamente inferior (com diferença de umidade sempre inferior a 0,5%). O TML corresponde a 90% do FMP.

Para os testes PTT utilizou-se mesa vibratória fabricada pela *Applied Vibration*, e o mesmo soquete de mola utilizado para o *flow table*, com os mesmos níveis de pressão. O preenchimento do cilindro foi realizado em 4 camadas de amostra. Após a adição de cada camada realizou-se a compactação por meio do soquete, com compressões aplicadas sobre toda a área da amostra até que se obtivesse uma superfície plana e uniforme. Finalizada esta etapa, colocou-se sobre a amostra os dois bits de penetração metálicos com massa de 177 g. Acionou-se a mesa vibratória, com frequência de 50 a 60 Hz e aceleração de 2 g rms  $\pm$  10% durante 6 minutos. Decorrido este tempo, desligou-se o equipamento e mediu-se a penetração dos bits: caso esta fosse igual ou superior a 50 mm para qualquer bit, a umidade do ensaio em questão estaria igual ou superior ao FMP, tomado como a média entre este ensaio e o ensaio com umidade imediatamente inferior, sendo que a diferença entre os valores de umidade não ultrapassou 0,5%. O TML corresponde a 90% do FMP. Quando a penetração dos bits foi inferior a 50 mm, realizou-se novo ensaio com maior umidade. Após medir a penetração, removeu-se a amostra do cilindro, levando toda a massa à estufa a 105°C para determinação de umidade.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta gráficos comparativos dos resultados obtidos pelos três métodos originais de determinação de TML. Cada gráfico correlaciona o TML de dois métodos e compara os pontos à reta de igualdade (em vermelho).

Destaca-se primeiramente a amplitude dos resultados de TML, que abrange uma faixa considerável de valores, refletindo as diferentes características presentes no grupo de amostras testadas e evidenciando a representatividade do estudo para os tipos de finos de minério de ferro produzidos no Brasil. Salienta-se também o uso de várias amostras compostas em laboratório para aumentar ainda

mais a variabilidade de características, complementando as correlações.

Constatou-se que, de uma maneira geral, os resultados obtidos pelos três métodos são coerentes entre si, ou seja, quando se obtém um TML mais elevado para uma amostra fazendo-se uso de um determinado método, obtém-se também um valor mais elevado através de qualquer um dos outros dois métodos. Tal constatação é evidenciada pela obtenção de regressões lineares com elevado coeficiente de determinação para os três comparativos avaliados. Porém, em todos os casos, a reta de regressão descola-se da reta de igualdade, o que indica que, apesar de fornecerem resultados coerentes entre si, o TML de uma mesma amostra obtido pelos diferentes métodos não é o mesmo. Cada método fornece um TML diferente.

Entre os métodos PTT e FTT, constatou-se diferença menor entre os resultados de TML, sendo que o FTT tende a fornecer resultados mais elevados. Comparando-se o FTT e o PFT verifica-se maior diferença entre os resultados, sendo que a reta de regressão encontra-se mais afastada da reta de igualdade. O teste de PFT tende a fornecer sempre maiores resultados, principalmente para amostras com TML mais baixo. Com relação ao comparativo entre PTT e PFT foram obtidas as maiores discrepâncias no TML, e, assim como ocorreu no comparativo entre FTT e PFT, as maiores diferenças ocorrem para amostras com menor Limite de Umidade.

A Tabela 2 apresenta alguns parâmetros referentes aos comparativos entre os métodos de obtenção do TML.

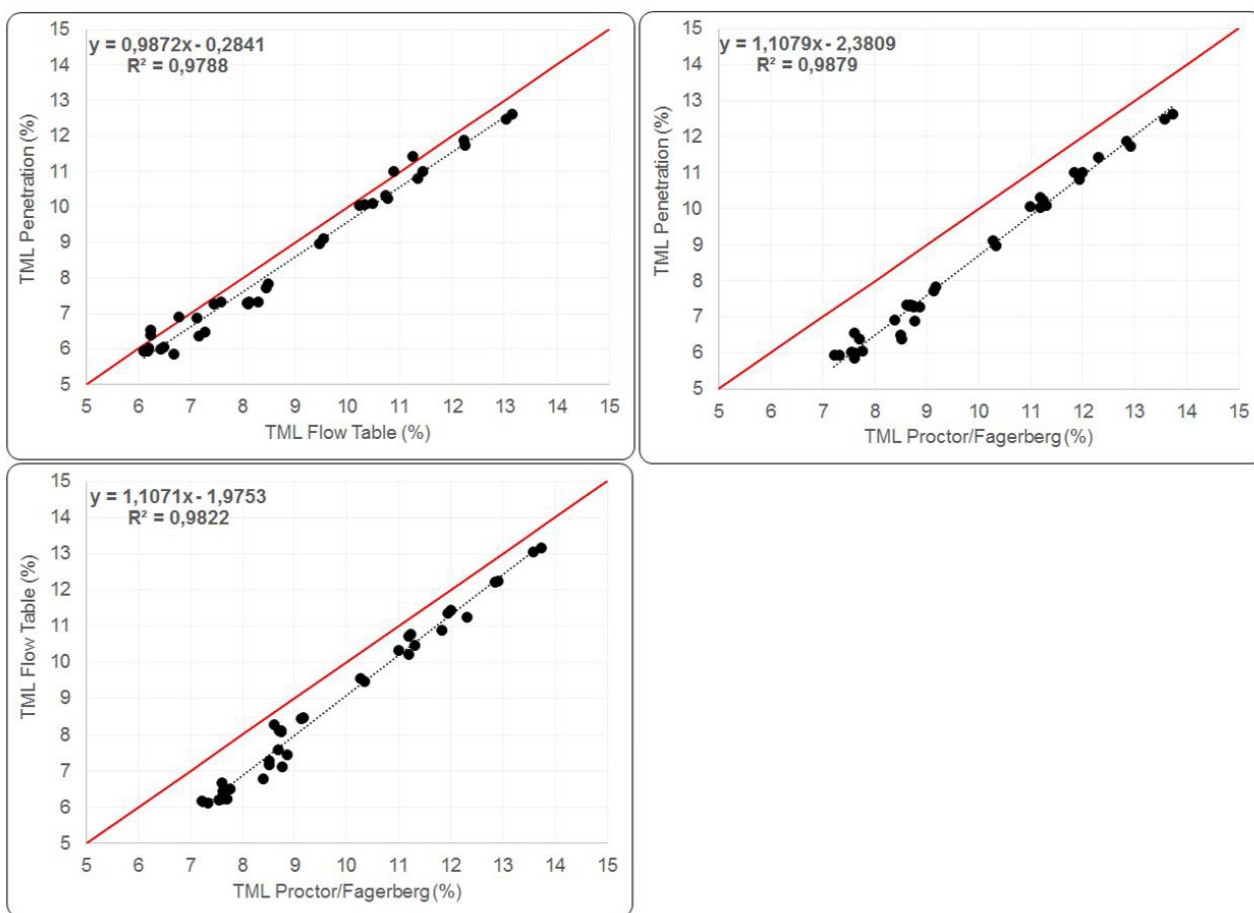


Figura 2. Comparativos entre o TML obtido pelos três métodos originais do IMSBC Code.

Tabela 2. Diferença absoluta entre os métodos

Parâmetro	Proctor/Fagerberg x Flow Table	Proctor/Fagerberg x Penetration	Flow Table x Penetration
Diferença Absoluta Média	0,93	1,32	0,45
Diferença Absoluta Mínima	0,33	0,82	0,13
Diferença Absoluta Máxima	1,65	2,14	0,96
Desvio Padrão	0,36	0,32	0,24

Considerando o universo de amostras testadas no presente estudo, em média, a diferença entre os métodos é de, no mínimo 0,45% (entre FTT e PTT), e no máximo 1,32% (entre PFT e PTT). Porém, a diferença absoluta entre o TML de dois métodos diferentes pode chegar a mais de 2%. São diferenças muito significativas em se tratando de umidade de minérios e de um limite de segurança que almeja garantir a estabilidade da carga durante o transporte.

Os resultados obtidos evidenciam que, considerando os três métodos originais contidos no *IMSBC Code*, não se teria um TML para fins de minério de ferro, mas três TMLs. Cada método fornece um resultado diferente, e as diferenças são significativas. Estas constatações corroboram as conclusões do IOTWG, segundo o qual um dos motivos que reforçaram a tese da inadequação dos testes PFT, FTT e PTT para fins de minério de ferro seriam as diferenças entre os resultados de TML, dentre outras razões, que motivaram o desenvolvimento do teste de Proctor/Fagerberg Modificado.

## 4 CONCLUSÃO

O Limite de Umidade Transportável (TML) de minérios de ferro é uma realidade regulatória que passou a vigorar no dia a dia das operações. Tanto o planejamento dos produtos quanto as operações de embarque devem levar em consideração o atendimento a este parâmetro de segurança. O IOTWG comprovou na IMO, em 2013, que os métodos originais indicados pela entidade para determinar o TML eram inadequados para fins de minério de ferro. Uma das razões que endossaram esta tese foram as diferenças no TML obtido pelos diferentes métodos. Os resultados obtidos no presente estudo corroboram este item, tendo-se constatado diferenças significativas no TML quando se compara os resultados dos testes de Proctor/Fagerberg, *Flow Table* e *Penetration*, para 35 amostras de fins de minério de ferro de diferentes características. A IMO aprovou um novo método, o Proctor/Fagerberg Modificado, que hoje vigora como teste oficial para determinação do TML deste tipo de carga. Para concentrados de minério de ferro, basicamente os *pellet feeds* no Brasil, continuam vigorando os três métodos originais do *IMSBC Code*.

## REFERÊNCIAS

- 1 Departamento Nacional da Produção Mineral. Sumário mineral. Brasília: DNPM; 2016. vol. 35.
- 2 Man Diesel & Turbo. Propulsion trends in bulk carriers: two-stroke engines. Copenhagen: Man Diesel & Turbo; 2014.
- 3 Tang XW, Zhang XW, Uzuoka R. Novel adaptive time stepping method and its application to soil seismic liquefaction analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015;71:100-113.
- 4 Pereira EL. Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático [dissertação de mestrado]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2005.
- 5 Ishihara K. Liquefaction of subsurface soils during earthquakes. *Journal of Disaster Research*. 2006;1(2)
- 6 Fagerberg B. Hazards of shipping granular ore concentrates. *Canadian Mining Journal*. 1965;856:53-57.
- 7 Fagerberg B, Stavang A. Determination of critical moisture contents in ore concentrates carried in cargo vessels. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Transport and Handling of Minerals*. 1971; Vancouver, Canadá. São Francisco: Miller Freeman Publications; 1971. p. 174-185.
- 8 GCaptain. Bulk jupiter sinking prompts bauxite liquefaction warnings [Acesso em 23 maio 2015]. <http://gcaptain.com/bulk-jupiter-sinking-prompts-bauxite-liquefaction-warnings>
- 9 International Maritime Organization. International maritime solid bulk cargoes code. London: IMO; 2012.
- 10 American Society for Testing and Materials. ASTM designation C230-standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. West Conshohocken: ASTM; 1952.
- 11 American Society for Testing and Materials. ASTM designation C124-method of test for flow of portland-cement concrete by use of the flow table. West Conshohocken: ASTM; 1971.
- 12 Tanaka M, Ura T. Development of the penetration method for mineral concentrates. London: International Maritime Organization; 1989. BC 30/5/12.
- 13 International Maritime Organization. DSC 1 /Circ. 66. Carriage of iron ore fines that may liquefy. London: IMO; 2011.
- 14 International Maritime Organization. Inadequacy of current IMSBC code methodologies to transportable moisture limit determination on Brazilian Iron Ore Fines, 17th Session, Agenda Item 4, DSC 17/INF.10. London: IMO; 2012.
- 15 International Maritime Organization. The safe carriage of Brazilian iron ore fines, 17th Session, Agenda Item 4, DSC 17/INF.11. London: IMO; 2012.

- 16 International Maritime Organization. The Cyclic Triaxial Criteria (CTC) as an adequate protocol to assess the safe carriage condition of iron ore fines in bulk, 17th Session, Agenda Item 4, DSC 17/4/23. London: IMO; 2012.
- 17 International Maritime Organization. The corrected Proctor/Fagerberg method as an adequate protocol to assess the Transportable Moisture Limit (TML) of iron ore fines in bulk, 17th Session, Agenda Item 4, DSC 17/4/24. London: IMO; 2012.
- 18 International Maritime Organization. DSC18/ INF.10. Report 1: terms of reference. The iron ore fines technical working group (Vale, Rio Tinto, BHP Billiton) facilitated by International Group of P&I Clubs (IG). London: IMO; 2013.
- 19 International Maritime Organization. DSC18/ INF.11. Report 2: marine report. the iron ore fines technical working group (Vale, Rio Tinto, BHP Billiton) facilitated by International Group of P&I Clubs (IG). London: IMO; 2013.
- 20 International Maritime Organization. DSC18/ INF.12. Report 3: iron ore Proctor/Fagerberg test. The iron ore fines technical working group (Vale, Rio Tinto, BHP Billiton) facilitated by International Group of P&I Clubs (IG). London: IMO; 2013.
- 21 International Maritime Organization. DSC18/ INF.13. Report 4: reference tests. the iron ore fines technical working group (Vale, Rio Tinto, BHP Billiton) facilitated by International Group of P&I Clubs (IG). London: IMO; 2013.
- 22 International Maritime Organization. DSC. 1 /Circ. 71. Early implementation of draft amendments to the IMSBC code related to the carriage and testing of iron ore fines, sub-committee for dangerous cargoes, solids and containers. London: IMO; 2013.
- 23 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16317:2014: Minérios de ferro - Procedimentos para controle de umidade nos portos do Brasil para segurança no transporte marítimo de cargas. Rio de Janeiro: ABNT; 2014.
- 24 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3082: Minérios de Ferro – procedimentos de amostragem e preparação de amostras. Rio de Janeiro: ABNT; 2011.
- 25 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3087: Minérios de Ferro – determinação do teor de umidade de um lote. Rio de Janeiro: ABNT; 2012.
- 26 American Society for Testing and Materials. ASTM D5550-14: Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer. West Conshohocken: ASTM; 2014

Recebido em: 25 Maio 2016

Aceito em: 31 Jul. 2016