



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



SARA CORRENT

**USO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE PARA ADEQUAÇÃO DA UMIDADE
MÁXIMA DE MINÉRIO DE FERRO DO TIPO *SINTER FEED* PARA TRANSPORTE
MARÍTIMO**

OURO PRETO

2017

SARA CORRENT

**USO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE PARA ADEQUAÇÃO DA UMIDADE
MÁXIMA DE MINÉRIO DE FERRO DO TIPO *SINTER FEED* PARA TRANSPORTE
MARÍTIMO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Lavra

Orientador: Prof.^a Dra. Christianne de Lyra Nogueira

OURO PRETO

2017

C824u

Corrent, Sara.

Uso de polímero superabsorvente para adequação da umidade máxima de minério de ferro do tipo sinter feed para transporte marítimo [manuscrito] / Sara Corrent. - 2017.

37f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Christianne de Lyra Nogueira.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Tratamento de minérios. 2. Sinterização. 3. Polímeros. I. Nogueira, Christianne de Lyra. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.781



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 21 dias do mês de março de 2017, às 14h30min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“USO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE PARA ADEQUAÇÃO DA UMIDADE MÁXIMA DE MINÉRIO DE FERRO DO TIPO SINTER FEED PARA TRANSPORTE MARÍTIMO”**, pela aluna **Sara Corrent**, sendo a comissão avaliadora formada por **Profª Drª. Christianne de Lyra Nogueira (Orientadora)**, **Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz** e **M.Sc. Rodrigo Fina Ferreira**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela **APROVAÇÃO**.... da candidata, com a nota **9,0**.... concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 21 de março de 2017.

Profª Drª. Christianne de Lyra Nogueira
Presidente da Comissão Avaliadora e Professora Orientadora

Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz
Membro da Comissão Avaliadora

M.Sc. Rodrigo Fina Ferreira
Membro da Comissão Avaliadora

Sara Corrent

Prof. Ms.C. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

Dedico o presente trabalho aos meus pais, por toda dedicação e por nunca medirem esforços para a realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu força, sabedoria e luz para que eu chegasse até aqui sem hesitar.

Agradeço imensamente aos meus pais, que sempre fizeram o possível e o impossível para que eu pudesse ser e conquistar tudo o que sou e o que tenho hoje, que me ensinaram que não é necessário ser o maior para ser o melhor, que sempre me ampararam e nunca me deixaram cair e que nos momentos certos, souberam me corrigir e me educar para que eu pudesse crescer e evoluir como ser humano. A vocês meus pais, Luiz e Madalena, minha eterna gratidão e o sentimento de que nada que vocês fizeram por mim deveria ser diferente.

Agradeço aos meus irmãos, que cuidaram de mim e me ensinaram a ser um pouco como cada um de vocês, a ser correta e disciplinada, a saber perdoar e dar mais valor ao próximo, a respeitar e amar a Deus e a família, de uma forma leve e divertida. Agradeço por todas as orações, empenho e atenção que vocês tiveram comigo durante toda a vida.

Agradeço a toda equipe da ArcelorMittal Mining & Mineral Processing Research Centre – Maizières lès Metz, principalmente Armando, Filipe e Marcela, que confiaram, acreditaram em mim e que permitiram que esse trabalho fosse realizado. Agradeço por todo o aprendizado e conhecimento adquiridos nesse período de trabalho.

Por fim, agradeço a todos os meus professores, que de alguma forma, deixaram a sua contribuição para a minha educação e meu crescimento pessoal e profissional, que compartilharam, além do tempo e dedicação, conhecimento e experiência. Em especial a Christianne de Lyra Nogueira, que além de me orientar durante esse trabalho, se tornou uma grande amiga e um grande exemplo de dedicação, competência e profissionalismo.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para esta conquista!

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.”

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

A maioria dos minérios transportados e em particular Iron Ore Fines (IOF), ou seja, os minérios de ferro mais finos (*sinter feed*) não são embarcados secos. Estes produtos possuem água em sua composição, ela é proveniente das etapas de beneficiamento do minério e/ou de chuvas e intempéries ocorridas durante o transporte e estocagem deste material. Durante o transporte marítimo, caso essa água preencha todos os vazios do material, saturando-o, a carga pode se tornar instável e se liquefazer, colocando em risco todo o navio. Neste contexto, o presente estudo foi desenvolvido com o intuito de introduzir um polímero superabsorvente inerte como alternativa de aumentar o limite de umidade transportável para o transporte marítimo (*Transportable Moisture Limit – TML*) de concentrados de minério de ferro do tipo *sinter feed* considerados seguros, evitando acidentes e percas. O *sinter feed* estudado foi caracterizado através de análise granulométrica por peneiramento a úmido e difratometria de raios X. Após a caracterização, foram seguidos os procedimentos da *International Maritime Organization* contidos no *International Maritime Solid Bulk Cargoes Code* para a realização do teste Proctor/Fagerberg modificado (PFT D80) e após a adequação dos teores de umidade do material, o polímero superabsorvente foi adicionado à mistura para a realização dos testes com diferentes dosagens de polímero, 0,5kg/t e 1,0kg/t. De acordo com a análise granulométrica, o minério possui d_{80} em torno de 9,2mm e o d_{10} em torno de 0,15mm. Esse minério é composto principalmente por hematita e pequenas frações de magnetita e goethita. Os resultados encontrados após a realização do PFT D80 mostram que a amostra padrão possui TML de 6,60%, a aplicação de 0,5kg/t de polímero geram um aumento de 40% no TML, que passa a ser 9,28%, enquanto a adição de 1,0kg/t de polímero gera um acréscimo de 57% no TML, passando a ser 10,42% em relação a amostra padrão. Tal aumento nos teores de umidade crítica seriam fator decisivo no momento de viabilizar uma carga para o embarque e transporte via navios à granel.

Palavras Chave: PFT D80. *Sinter feed*. Polímero superabsorvente.

ABSTRACT

Most ores transported, Iron Ore Fines (IOF) like sinter feed and pellet feed, they are not ship loaded dry. These ores have moisture (water) in their composition. This water is from beneficiation and concentration process and/or rains during stockpiling and transportation. When the water fill all voids of the material, saturating it, the vessel can become instable and liquefy, putting at risk the ship and staff. In this context, the present study introduces an inert superabsorbent polymer as an alternative of the increase the transportable moisture limit (TML) considered safe to shipping sinter feed, avoiding accidents and losses. The sinter feed used in this project was characterized for particle size distribution using wet screening and X ray diffractometer. After the characterization, it was used the sinter feed to essay Proctor/Fagerberg modified test (PFT D80) in an adequate moisture and mixing the superabsorbent polymer in 0,5kg/ton and 1,0kg/ton dosages, following the test procedures recommended by International Maritime Organization in the International Maritime Solid Bulk Cargoes Code. According the characterization, the sinter feed has d80 around 9,2mm and d10 around 0,15mm. It is composed mainly by hematite and it has small fractions of the magnetite and goethite. The PFT D80 results showed that the standard sample has TML equal to 6,60% and applying 0,5kg/ton of the superabsorbent polymer the TML increase 40%, going to 9,28% and with a dosage of the 1,0kg/ton TML increase 57% in relation to the standard sample, going to 10,42% moisture content. This increase in the TML values is decisive to enable a cargo with this material.

Keywords: PFT D80. Sinter Feed. Superabsorbent polymer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

QUADRO 1 - HISTÓRICO DE ACIDENTES MARÍTIMOS CAUSADOS POR LIQUEFAÇÃO DA CARGA DE MINÉRIO.	11
FIGURA 1 – LIQUEFAÇÃO COMO RESULTADO DA COMPACTAÇÃO DO MATERIAL	13
FIGURA 2 – MINÉRIO DE FERRO ANTES (ESQUERDA) E APÓS A LIQUEFAÇÃO (DIREITA).....	14
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DE UMA AMOSTRA DE MATERIAL E SUAS MASSAS E VOLUMES.	15
TABELA 1 - VARIAÇÃO DOS ENSAIOS PROCTOR-FAGERBERG.....	18
FIGURA 4 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO PRODUZIDAS PELOS DIFERENTES ENSAIOS DE FAGERBERG USANDO OS APARATOS DO ENSAIO PROCTOR.	19
FIGURA 5 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO DE CONCENTRADO MAGNETÍTIICO USANDO O MÉTODO C E O MÉTODO D, COMPARADAS COM AS MEDIDAS DOS NAVIOS POR FAGERBERG.	20
FIGURA 6 – DESCRITIVOS DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO TML.	21
FIGURA 7 - SOQUETES UTILIZADOS NOS TESTES PFT D70 (350G) E PFT D80 (150G).	22
FIGURA 9 - SAP DURANTE O PROCESSO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	26
FIGURA 10 - MOLDE CILÍNDRICO E SOQUETE UTILIZADOS NOS ENSAIOS DO PFT D80.	27
FIGURA 11 - TÍPICA CURVA DE COMPACTAÇÃO.	28
FIGURA 12 - TÍPICA CURVA DE COMPACTAÇÃO POR EXTRAPOLAÇÃO.	29
FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO <i>SINTER FEED</i> UTILIZADO NOS TESTES.	30
FIGURA 14 - DRX QUANTITATIVO DE CADA FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA.	31
TABELA 2 - RESULTADO DO PFT D80.	32
FIGURA 15 - GRÁFICO ILUSTRATIVO DOS RESULTADOS DO PFT D80 E OS AUMENTOS ALCANÇADOS COM O USO DO SAP.	32
FIGURA 16 - GRÁFICO ILUSTRATIVO DOS RESULTADOS DO PFT D80 E OS AUMENTOS ALCANÇADOS COM O USO DO SAP.	33

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VARIAÇÃO DOS ENSAIOS PROCTOR-FAGERBERG.....	18
TABELA 2 - RESULTADO DO PFT D80.	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1. DEFINIÇÕES.....	13
3.2. EVOLUÇÃO DO TESTE PFT D80	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	24
4.2. POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP).....	25
4.3. PROCTOR/FAGERBERG MODIFICADO (PFT D80).....	26
5. DISCUSSÃO E RESULTADOS	30
6. CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

O grande crescimento dos mercados de consumo observado nos últimos anos, principalmente do mercado asiático, provocou um aumento no transporte de minérios a granel. Esse tipo de carga a granel possui grande capacidade de transporte e é de vital importância para comércio intercontinental de minérios.

A maioria dos minérios transportados e em particular Iron Ore Fines (IOF), ou seja, os minérios de ferro mais finos (*sinter feed*) não são embarcados secos. Estes produtos possuem água em sua composição, proveniente das etapas de beneficiamento do minério e/ou de chuvas e intempéries ocorridas durante o transporte e estocagem deste material. Durante o transporte marítimo caso a água preencha todos os vazios do material, saturando-o, a carga pode se tornar instável e se liquefazer, colocando em risco todo o navio.

Os acidentes marítimos relacionados à liquefação de cargas nunca receberam muita relevância, mas hoje são tidos como uma das maiores causas de danos no transporte de minérios. De acordo com uma diretriz divulgada em 2015 pela empresa DNV GL, há duas peculiaridades relacionadas ao fenômeno de liquefação de cargas que o tornaram relevante aos especialistas: a primeira é a velocidade com que os acidentes ocorrem, há uma diferença de poucos minutos entre a detecção da liquefação até que comece a ocorrer um dano irreversível ao navio, sendo esse tempo muito curto para que seja tomada uma medida corretiva ou que seja possível salvar toda a tripulação; a segunda é relacionada à frequência dos acidentes, geralmente quando um acidente ocorre, ele é seguido por vários outros navios que foram carregados no mesmo terminal e com material semelhante. O Quadro 1 apresenta alguns acidentes ocorridos nos últimos anos e apresenta sequências de acidentes com as mesmas características.

Quadro 1 - Histórico de acidentes marítimos causados por liquefação da carga de minério.

Vessel	DWT	Built	Lives lost	When	Cargo type	Cargo origin
Asian Forest	14k	2007	0	Jul 17th 2009	Iron ore fines	India
Black Rose	39k	1977	1	Sep 9th 2009	Iron ore fines	India
Jian Fu Star	45k	1983	13	Oct 27th 2010	Nickel ore	Indonesia
Nasco Diamond	57k	2009	21	Nov 10th 2010	Nickel ore	Indonesia
Hong Wei	50k	2001	10	Dec 3rd 2010	Nickel ore	Indonesia
Vinalines Queen	56k	2005	22	Dec 25th 2011	Nickel ore	Philippines
Sun Spirits	11k	2007	0	Jan 22nd 2012	Iron ore fines	Philippines
Harita Bauxite	50k	1983	15	Feb 16th 2013	Nickel ore	Indonesia
Trans Summer	57k	2012	0	Aug 14th 2013	Nickel ore	Philippines

Fonte: DNV GL, Bulk Cargo Liquefaction 2015

A *International Maritime Organization* (IMO), braço da ONU responsável por regulamentar o transporte marítimo, vem desenvolvendo estudos para adequar as normas e deixar o transporte marítimo de cargas de minério a granel mais seguro, salvando vidas e evitando mais prejuízos ao setor. Baseado nesses esforços foi criado o *International Maritime Solid Bulk Cargoes Code* (IMSBC Code) que vem sendo seguido obrigatoriamente desde 2011.

O IMSBC Code, através da Resolução MSC.268(85), classifica as cargas de minério de ferro do tipo *sinter feed* como Grupo A: cargas que podem se liquefazer caso algumas condições ocorram. Uma condição crucial para liquefação é observada quando o teor de umidade do material excede o *Transportable Moisture Limit* (TML), definido como o teor de umidade máxima para transporte marítimo. O código então estabelece que cargas do Grupo A só podem ser carregadas com documento atestando que o teor de umidade da carga não excede o TML estabelecido para o material de acordo com os testes padrões descritos no IMSBC Code.

Neste contexto, o presente estudo foi desenvolvido com o intuito de introduzir um polímero superabsorvente inerte como alternativa de aumentar os valores de teores de umidade considerados seguros para o transporte marítimo de minério de ferro do tipo *sinter feed*, evitando acidentes e perdas.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o efeito do uso de um polímero superabsorvente nos valores de umidade máxima para transporte marítimo de um minério de ferro do tipo *sinter feed*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. DEFINIÇÕES

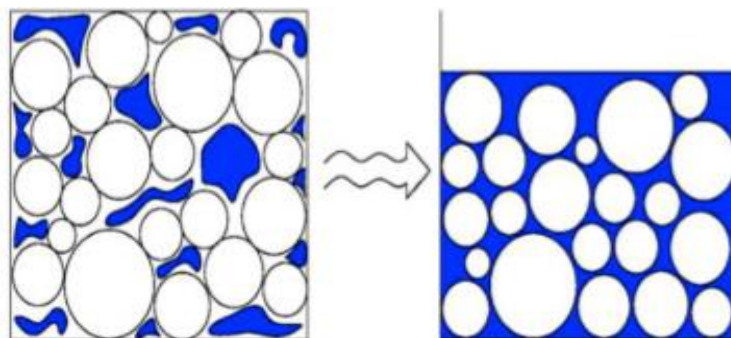
Baseado na Resolução MSC.268(85) do IMSBC Code, algumas definições devem ser enfatizadas durante o presente estudo. Sendo elas:

3.1.1. Liquefação

De um modo geral liquefação é o processo que ocorre quando um material passa do estado sólido ou gasoso para o estado líquido.

De acordo com o IMSBC Code, o fenômeno da liquefação pode ser observado quando os espaços entre as partículas (volume de vazios) são reduzidos com a compactação do material devido aos movimentos do navio. A redução no volume de vazios faz aumentar a poropressão que por sua vez reduz a fricção entre as partículas e conseqüentemente a parcela de resistência devido ao atrito. Sucintamente, liquefação ocorre em cargas a granel quando o material sólido começa a se comportar como um fluido viscoso, resultando no movimento dessa carga podendo desestabilizar o navio e causar algum dano (IMO, RESOLUTION MSC.268(85), 2008, Pg 33,34).

Figura 1 – Liquefação como resultado da compactação do material



Fonte: Adaptado de SATIR, 2014

3.1.2. *Transportable Moisture Limit (TML)*

O teor de umidade máximo para transporte marítimo (TML), de uma carga de minério que pode se liquefazer é definida pelo IMSBC Code como, o teor de umidade máxima considerado seguro para o transporte em navios que não se encaixam nas disposições especiais da subseção 7.3.2. da Resolução MSC.268(85).

Esse parâmetro é determinado por testes padrões e deve ser aprovado pela autoridade competente (IMO, RESOLUTION MSC.268(85), 2008, Pg 18).

3.1.3. Cargas sólidas a granel

Pode ser definida como sendo qualquer tipo de carga sólida granular, de composição geralmente uniforme que é carregada diretamente no navio sem nenhum tipo de contenção. (IMO, RESOLUTION MSC.268(85), 2008, Pg 17)

3.1.4. Cargas que podem se liquefazer

São cargas granulares úmidas e de textura fina. Essas cargas correm o risco de se liquefazer se o teor de umidade excederem o seu TML. Dentro desse conceito se inserem as cargas de concentrados de minério de ferro finos, concentrados de níquel e zinco e o carvão (IMO, RESOLUTION MSC.268(85), 2008, Pg 16).

Figura 2 – Minério de ferro antes (esquerda) e após a liquefação (direita).

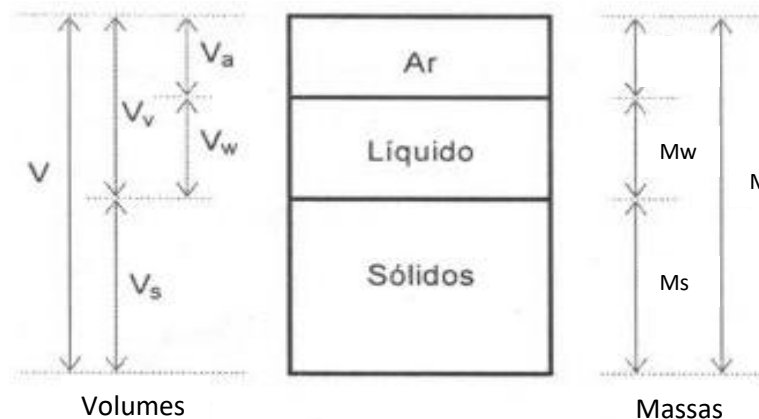


Fonte: Bell e Jonas, 2010

3.1.5. Cálculos utilizados na curva de compactação

A Figura 3 apresenta o esquema de distribuição das massas e volumes de um material granular, semelhante a um solo.

Figura 3 - Representação de uma amostra de material e suas massas e volumes.



Considerando um cilindro de volume V , preenchido com uma amostra de massa M (descontada a massa do cilindro), pode-se determinar a quantidade em massa de água M_w presente nesta amostra fazendo:

$$M_w = M - M_s \quad (1)$$

Onde M_s é a massa das partículas sólidas que coincide com a massa da amostra na condição seca.

O volume das partículas sólidas, V_s , é obtido através da utilização um picnômetro a hélio. Que por sua vez conhecendo-se a massa das partículas sólidas e o volume que elas ocupam pode-se então obter a densidade das partículas sólidas, ρ_s , fazendo:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

Da mesma forma, pode-se determinar a densidade da amostra na condição seca, ρ_d , fazendo:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (3)$$

O índice de vazios, e , é obtido fazendo:

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (4)$$

Considerando-se o volume da água presente na amostra como sendo V_w , o teor de umidade volumétrica, e_v , é definido como:

$$e_v = \frac{V_w}{V_s} \quad (5)$$

Ou ainda, considerando a densidade da água em unidade de grama por centímetro cúbico, $\rho_w = 1\text{g/cm}^3$, tem-se:

$$ev = \frac{M_w}{M_s} \rho_s \left(\frac{g}{\text{cm}^3} \right) \quad (6)$$

O teor de umidade gravimétrico, ou umidade na base seca, w , é dado por:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (7)$$

O teor de umidade na base úmida, w_1 , é obtido fazendo:

$$w_1 = \frac{M_w}{M} \quad (8)$$

O grau de saturação, S , é definido como:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (9)$$

E também pode ser obtido fazendo:

$$S = \frac{Gw}{e} \quad (10)$$

Ou ainda:

$$S = \frac{ev}{e} \quad (11)$$

Em que G é a densidade relativa dos grãos, definida como:

$$G = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (12)$$

3.1.6. Polímero superabsorvente

Os polímeros superabsorventes são compostos macromoleculares que possuem a capacidade de absorver grandes volumes de soluções aquosas. Uma aplicação de grande escala destes polímeros é na indústria de higiene pessoal, na produção de fraldas higiênicas. Pensando nas características destes polímeros, os superabsorventes vêm sendo testados por muitos setores industriais, dentre eles a mineração, sendo uma alternativa para reduzir os impactos da umidade nos minérios concentrados.

Roda, Bordado e Casquilho (2008, apud Chen e col., 1985) definem qualitativamente os polímeros superabsorventes como sendo:

“[...] um material que absorve espontaneamente quantidades de fluidos significativamente maiores do que podem absorver os feltros de fibras ou outros materiais convencionalmente absorventes [Chen e col., 1985]. Os superabsorventes hidrofílicos, quando imersos num excesso de água, expandem até ao seu volume de equilíbrio, absorvendo água, mas não se dissolvem. Em geral, apresentam estabilidade mecânica, podendo resistir a repetidos ciclos de absorção-dessorção.”

3.2. EVOLUÇÃO DO TESTE PFT D80

Durante o transporte marítimo de cargas a granel, o material carregado experimenta um processo de compactação imposto pelos movimentos e vibrações do navio. Devido a estes movimentos a carga passa por um processo de compactação, diminuindo os espaços entre as partículas, liberando água e ar que preenchiam estes vazios. Caso a permeabilidade do material seja baixa a ponto de não permitir a saída de água, a sua estabilidade pode ser comprometida e esse material pode vir a se liquefazer.

Os ensaios mais confiáveis utilizados para obtenção do TML se baseiam no ensaio de compactação usados na mecânica dos solos. No caso estudado, o ensaio indicado pelo órgão regulamentador, IMO, para fins de minério de ferro do tipo *sinter feed* é o Proctor/Fagerberg modificado (PFT D80 test), que é baseado no ensaio de compactação Proctor (Proctor, 1933).

A partir dos anos 1930 Ralph R. Proctor começou a desenvolver o ensaio de compactação, conhecido hoje em dia como Proctor normal devido às adaptações que vem sofrendo desde a sua criação. Esse ensaio determina o peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo do solo. O ensaio consiste em preencher um molde cilíndrico de 944 cm³ com um solo úmido (num teor de umidade conhecido), distribuindo-o em três camadas iguais. Cada camada é golpeada 25 vezes com um soquete de 2,5kg e uma altura de queda igual a 30,5cm. O processo é repetido várias vezes para cada valor de teor de umidade do solo. O procedimento detalhado deste teste pode ser encontrado na NBR-7182 da ABNT; D698-70 e D1557-70 da ASTM; T99-70 e T180-70 da AASHTO (DAS, 2007, pg.85).

Através da inserção de novas tecnologias e de novos equipamentos de compactação, como os rolos compactadores pesados, o ensaio Proctor normal teve que sofrer modificações para que pudesse transmitir a situação real de campo para

o teste laboratorial. O ensaio do Proctor modificado aumentou o número de camadas de solo de três para cinco camadas. Além disso, o soquete passou a ter uma massa de 4,54kg e 45,7cm, aumentando-se assim o esforço de compactação. Com isto, o peso específico seco máximo foi aumentado e o teor de umidade ótimo diminuído. O ensaio Proctor modificado tem seu procedimento padronizado pelas normas ASTM *Test Designation* D-1557, AASHTO *Test Designation* T-180 e ABNT NBR 7182/86 (DAS, 2007, pg.90 e ABNT NBR 7182, 1986).

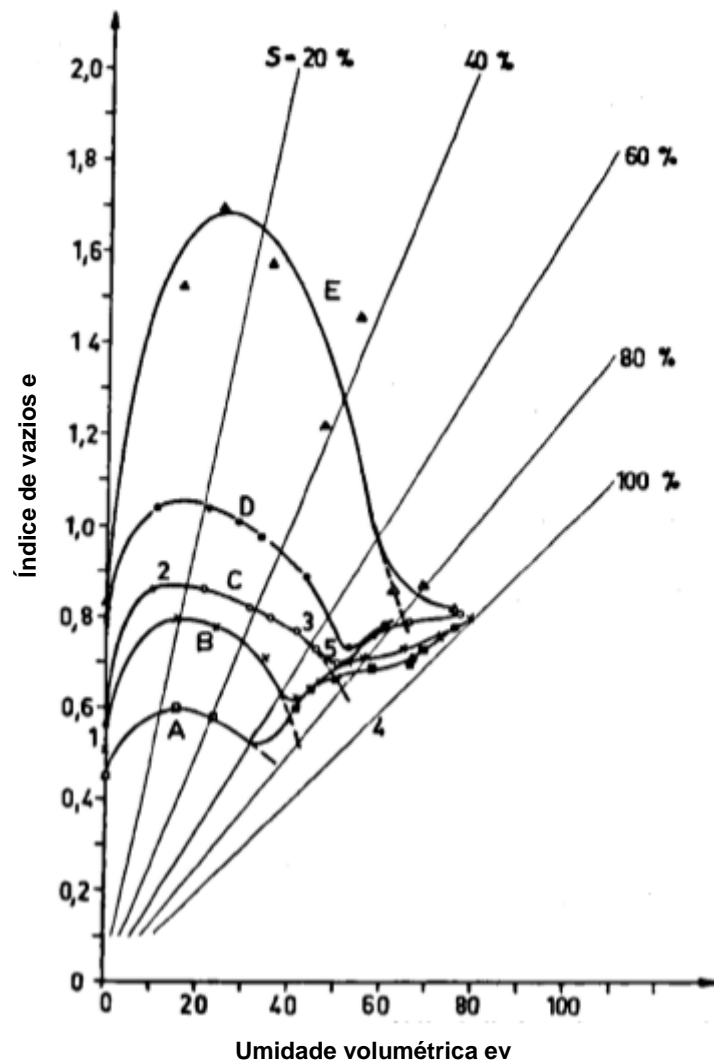
Em 1965 Bengt Fagerberg escreveu o artigo “*Hazards of shipping granular ore concentrates – part II*” onde ele estudava o ensaio Proctor com diferentes energias de compactação. Através de seus estudos, Fagerberg chegou à conclusão de que este ensaio poderia ser usado para determinar a estabilidade das cargas de minério a granel. Em seu estudo, Fagerberg realizou cinco ensaios diferentes baseados no Proctor modificado, variando as energias de compactação. Contextualizando para seu campo de trabalho, Fagerberg utilizou amostras de magnetita e estudou qual dos testes poderia representar melhor o comportamento dos minérios da Escandinávia (Fagerberg and Stavang, 1971 *apud* MUNRO e MOHAJERANI, 2016). Ele concluiu, claro, que diferentes energias de compactação produzem diferentes curvas de compactação num mesmo material. A Tabela 1 apresenta a descrição dos ensaios Proctor-Fagerberg e a Figura 4 apresenta as diferentes curvas de compactação (Iron Ore Technical Working Group Submission for Evaluation and Verification, 2013, pg 11).

Tabela 1 - Variação dos ensaios Proctor-Fagerberg.

Método	Peso do Soquete (g)	Altura de queda (cm)	Batidas por camada	Número de camadas	Energia de Compactação (kJ/m ³)
A	2498	30.5	25	5	934.0
B	1000	20	25	5	245.3
C	350	20	25	5	85.8
D	150	15	25	5	27.6
E	50	4	25	5	2.5

Fonte: Iron Ore Technical Working Group Submission for Evaluation and Verification, 2013

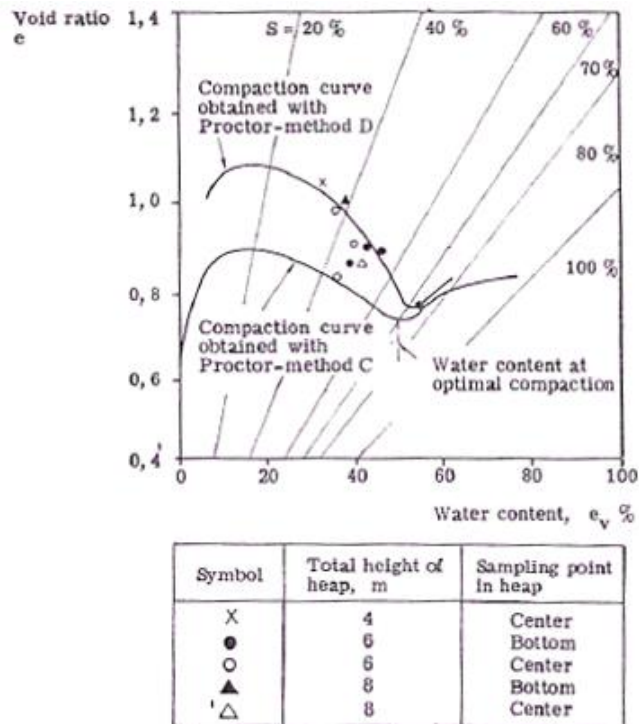
Figura 4 - Curvas de compactação produzidas pelos diferentes ensaios de Fagerberg usando os aparatos do ensaio Proctor.



Fonte: Iron Ore Technical Working Group Submission for Evaluation and Verification, 2013

Baseado nas curvas de compactação indicadas na Figura 4 e considerando diversas medidas de índice de vazios e teor de umidade para cargas de minério embarcado, cujo transporte foi conduzido com sucesso, Fagerberg decidiu utilizar o ensaio C (Figura 5), considerado o mais conservador e seguro, apresentando um menor índice de vazios (maior densidade) e um teor de umidade ótimo que corresponde à curva de saturação de 70% (Fagerberg and Stavang, 1971 *apud* MUNRO e MOHAJERANI, 2016). Desde então, o ensaio C é conhecido como teste Proctor/Fagerberg (PFT D70).

Figura 5 - Curvas de compactação de concentrado magnético usando o Método C e o Método D, comparadas com as medidas dos navios por Fagerberg.



Sojourn at sea 4-10 days. Varying weather conditions, sometimes with rough sea. No cargo shifting or water segregation were observed.

Fonte: Iron Ore Technical Working Group Submission for Evaluation and Verification, 2013

Em 2012, a IMO constituiu um grupo técnico de trabalho, o *Iron Ore Technical Working Group* (IOTWG), grupo coordenado pelo Japão, composto por empresas da área de mineração como a Vale, BHP Billiton e Rio Tinto. Além desses, o IOTWG ainda incluía o Brasil, Austrália e outras organizações e países. O IOTWG foi solicitado para avaliar todos os testes existentes de determinação de TML e adequá-los para que pudessem avaliar melhor os efeitos da liquefação nesse tipo de material, os minérios de ferro finos (FERREIRA, POLICARPO, PÁDULA E FERREIRA, 2016).

A Figura 6 apresenta todos os testes que foram avaliados pelo IOTWG, que antes eram utilizados para os cálculos de TML dos materiais em geral e eram citados pela IMO no IMSBC Code.

Figura 6 – Descritivos dos métodos de determinação do TML.



Teste	Proctor/Fagerberg	Proctor/Fagerberg Modificado	Flow Table	Penetration
Origem	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, 16, 17, 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.
Aplicabilidade	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.
Aparato	<ul style="list-style-type: none"> - Cilindro de compactação com 1000 cm³; - Soquete com 350 g, 5 cm de diâmetro e 20 cm de altura de queda. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cilindro de compactação com 1000 cm³; - Soquete com 150 g, 5 cm de diâmetro e 15 cm de altura de queda. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mesa com 25,4 cm diam. e 1,25 cm de altura de queda; - Molde tronco-cônico com 296,6 cm³; - Soquete de mola com 3 cm de diâmetro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mesa vibratória de 2 g rms; - Moldes cilíndricos com 1700 cm³ ou 4700 cm³; - Bits de penetração; - Soquete de mola com 3 cm de diâmetro.
Resumo do Procedimento	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.
Definição do TML	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.
Definição do Flow Moisture Point (FMP)	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.
Tempo para Determinação do TML	1 a 2 dias	1 a 2 dias	1 a 2 dias	2 dias
Pontos Positivos	<ul style="list-style-type: none"> - Baseado em teste amplamente utilizado em geotecnia; - Aparato simples e de baixo custo; - Obtenção de parâmetros geotécnicos; - Não subjetivo; - Boa repetibilidade e reprodutibilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baseado em teste amplamente utilizado em geotecnia; - Aparato simples e de baixo custo; - Obtenção de parâmetros geotécnicos; - Não subjetivo. - Boa repetibilidade e reprodutibilidade. - Desenvolvido com base na mais ampla pesquisa realizada sobre o assunto até o momento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige menor quantidade de amostra; - Possibilita visualização de deformações. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ampla faixa de aplicação; - Possibilita a visualização de deformações e eventual liquefação; - Não subjetivo.
Pontos Negativos	<ul style="list-style-type: none"> - Não é possível observar deformações; - Aplicabilidade limitada, para testar minérios com partículas acima de 5 mm estudos devem ser realizados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não é possível observar deformações. 	<ul style="list-style-type: none"> - Extremamente subjetivo, pois a identificação do FMP depende do executante; - Exige operador experiente; - Aplicabilidade limitada; - Não há obtenção de parâmetros geotécnicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipamento complexo, caro e de difícil obtenção e calibração; - Exaustivo ergonomicamente; - Não há obtenção de parâmetros geotécnicos.

Fonte: FERREIRA, POLICARPO, PÁDULA E FERREIRA, 2016.

O relatório apresentado à IMO pelo IOTWG, comprovou que o método adotado no ensaio D (Figura 5) apresentado por Fagerberg, que adotava uma energia de compactação menor, atendia a realidade dos minérios estudados em relação aos valores de índice de vazios (densidade seca) dos materiais embarcados

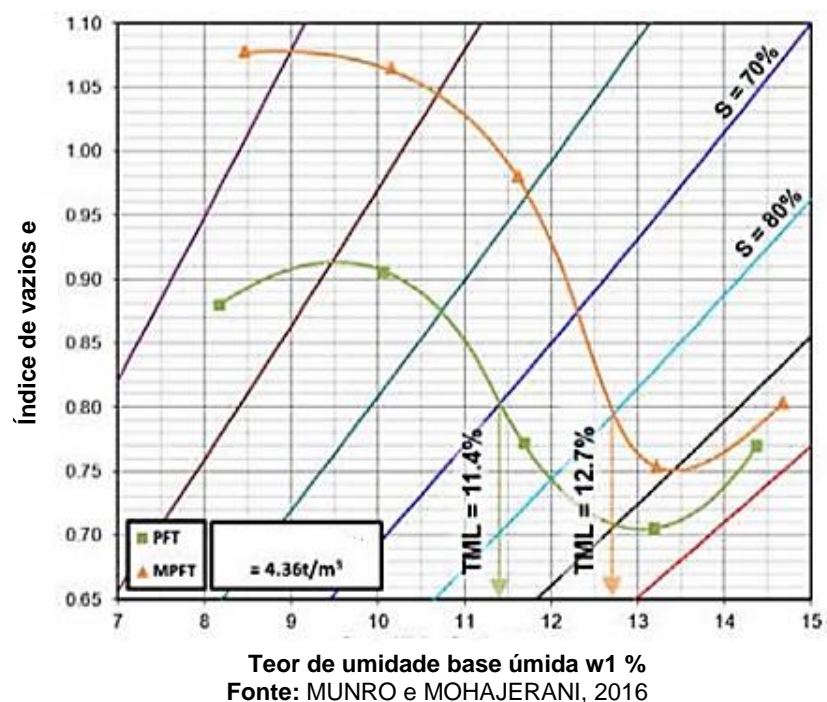
nos navios. As diferenças entre os soquetes e as curvas de compactação podem ser observadas nas Figuras 7 e 8, respectivamente (Iron Ore Technical Working Group Submission for Evaluation and Verification, 2013, pg 4).

Figura 7 - Soquetes utilizados nos testes PFT D70 (350g) e PFT D80 (150g).



Fonte: MUNRO e MOHAJERANI, 2016

Figura 8 - Curvas de compactação geradas pelos testes PFT D70 (Verde) e PFT D80 (Laranja).



De acordo com o IOTWG, o TML dos minérios escandinavos, usados por Fagerberg em seu estudo, era determinado quando o material chegava a 75% de saturação. Porém, para os IOF utilizados nos ensaios do tipo D, o TML era determinado a níveis de 95% de saturação da amostra. Adotou-se uma margem de segurança e o TML foi aferido em 80% de saturação da amostra (Iron Ore Technical Working Group Submission for Evaluation and Verification, 2013, pg 4).

De acordo com Das, 2007, além da energia de compactação, há outros fatores que afetam o comportamento dos materiais na compactação. O tipo do material, sua distribuição granulométrica, mineralogia, forma e tipo das partículas, afetam diretamente a compactação do material e conseqüentemente os valores de TML.

De acordo com um estudo feito pelo IOTWG, os finos de minérios de ferro que possuem em sua composição mais de 35% de goethita em massa, não necessitam de determinação dos valores de TML, pois as partículas são mais porosas e conseguem reter maiores quantidades de água. Assim, IOF que possuem mais de 35% de goethita em massa, perante ao IMSBC Code, deixam de ser uma carga do Grupo A (possibilidade de liquefação) e passam a ser do Grupo C, ou cargas que não se liquefazem (FERREIRA, POLICARPO, PÁDULA E FERREIRA, 2016).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Em torno de três toneladas do minério de ferro utilizado neste trabalho foram recebidos da sua mina de origem e devidamente homogeneizados e quarteados em alíquotas representativas, de em torno de 16 kg cada, por um divisor rotativo em um determinado centro de pesquisa.

Dez destas alíquotas foram utilizadas durante o presente trabalho. Essa quantidade de minério foi novamente homogeneizada e quarteada, sendo que uma pequena alíquota foi utilizada para a caracterização do material e a outra parcela da amostra foi utilizada para a realização dos testes de TML.

A caracterização do material foi feita através dos métodos de difratometria de raios X (DRX) e análise granulométrica por peneiramento a úmido.

Após a caracterização do minério, a amostra total foi quarteada para a execução dos vários testes PFT D80, utilizando-se de diferentes doses de polímero superabsorvente de cada série de testes.

O material será caracterizado através de análise granulométrica por peneiramento à úmido e posterior análise por difratometria de raios X de cada fração granulométrica.

O efeito do polímero superabsorvente será avaliado de acordo com os resultados do teste Proctor/Fagerberg modificado (PFT D80 test), baseado na circular DSC.1/Circ.71 Annex 3 de 15 de novembro de 2013. O PFT D80 test será inserido apenas na próxima edição do código em 2017.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

4.1.1. Difratometria de raios X

Uma amostra representativa do todo foi separada e enviada a um laboratório terceirizado para a realização da difratometria de raios X.

A difratometria de raios X segue os princípios da lei de Bragg, onde cada plano de retículo cristalino possui um ângulo de Bragg diferente (complementar ao ângulo de incidência), resultando em um padrão de difração dos raios X único e padronizado. O método mais utilizado é o método do pó, no qual a amostra a ser

caracterizada é reduzida a uma granulometria muito fina e quantidade utilizada por ser menor que um grama. É um método barato e eficiente de caracterização de substâncias inorgânicas, argilominerais e de planos cristalinos (Porphírio, Barbosa e Bertolino, 2010, Cap. 3 CETEM, pg. 73).

Um contador de radiação inserido no DRX recebe as interferências construtivas causadas pela difração do feixe monocromático de raios X na amostra ou no cristal. Estas interferências são traduzidas em sinal gráfico e a partir desta saída, pode se identificar a maioria das substâncias inorgânicas e planos cristalinos (Porphírio, Barbosa e Bertolino, 2010, Cap. 3 CETEM, pg. 73).

4.1.2. Peneiramento a úmido

Esse tipo de peneiramento é recomendado quando há grande quantidade de partículas finas, principalmente argilominerais (Sampaio e Silva, 2007).

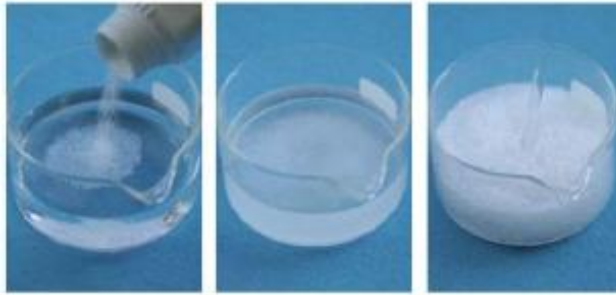
A amostra a ser ensaiada passou por um processo de empolpamento e dispersão em um condicionador de polpa. Após essa etapa, a polpa foi inserida em uma coluna de peneiras, de tamanhos previamente definidos, onde ficará sob a ação de um processo de vibração até que a água coletada na saída da peneira estivesse limpa e não houvesse mais partículas presentes. Um gráfico com as massas retidas foi plotado e a curva granulométrica do material foi gerada (Sampaio e Silva, 2007).

4.2. POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP)

O polímero superabsorvente utilizado durante os ensaios foi o FAVOR Z3050 da Evonik, produto utilizado nas linhas de fraldas e de outros absorventes.

O FAVOR Z3050 é basicamente um poliacrilato de sódio, que atrai as moléculas de água formando ligações com a água, se transformando em um hidrogel, de onde a água não consegue mais fluir. Esse SAP pode absorver de 200 à 500 vezes o seu peso em água, aumentando também o seu volume como é possível observar na Figura 9.

Figura 9 - SAP durante o processo de absorção de água.



O poliacrilato de sódio é um polímero inerte e que ao ser submetido a temperaturas acima de 200°C é degradado. Característica importante para o minério de ferro, que uma vez utilizado na fabricação do aço, não deve possuir contaminantes químicos que alterem as características do seu produto final.

4.3. PROCTOR/FAGERBERG MODIFICADO (PFT D80)

4.3.1. Picnometria a gás hélio

A cada ensaio, uma amostra representativa do material foi seca e pulverizada abaixo de 100 μ m. O picnômetro recebe uma massa de em torno de 14g para cada determinação de massa específica.

A picnometria a gás hélio foi utilizada em todos testes, fornecendo o volume das partículas sólidas para o cálculo das densidades reais (densidade seca) das amostras, esses valores são de suma importância para a determinação do TML nos testes do PFT D80.

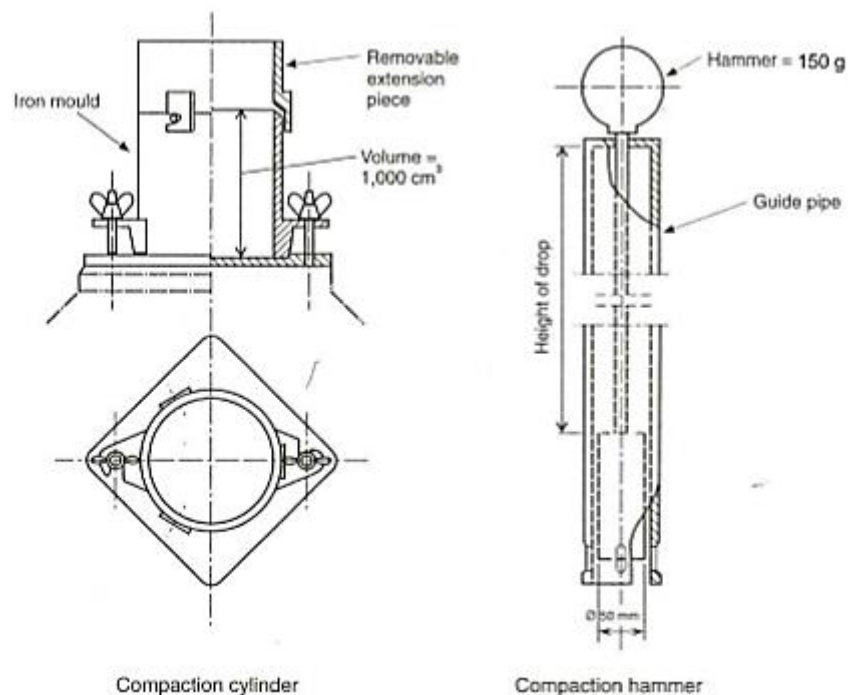
A picnometria consiste basicamente em medir o volume de um sólido (mesmo sendo poroso) a partir da variação de pressão de um gás numa câmara de volume conhecido (MOURA; FIGUEIREDO, 2002). De acordo com Moura e Figueiredo, 2002, o gás hélio é utilizado nesta técnica por, além de ser um gás inerte, possui átomos pequenos e que podem penetrar nos mais pequenos poros dos sólidos.

4.3.2. PFT D80

De acordo com a circular DSC.1/Circ.71 emitida pela IMO em 15 de novembro de 2013, anexos 1 e 3, o PFT D80 deve ser aplicado para a determinação do TML de minérios do tipo IOF, ou seja, que possuem mais de 10% de partículas menores que 1mm e mais de 50% de partículas menores que 10mm.

Uma amostra representativa do todo, com por volta de três vezes o volume requerido para preencher o molde utilizado no ensaio (Figura 10), deve ser, parcialmente seca em estufa à uma temperatura de em torno de 60°C. Em cada teste de compactação, água é adicionada e misturada à amostra de forma que, o nível de saturação varie de parcialmente seco até quase saturado, gerando assim a curva de compactação do ensaio. Cada ensaio varia de cinco a dez medidas de saturação diferentes.

Figura 10 - Molde cilíndrico e soquete utilizados nos ensaios do PFT D80.



Fonte: Circular DSC.1/Circ.71, 2013.

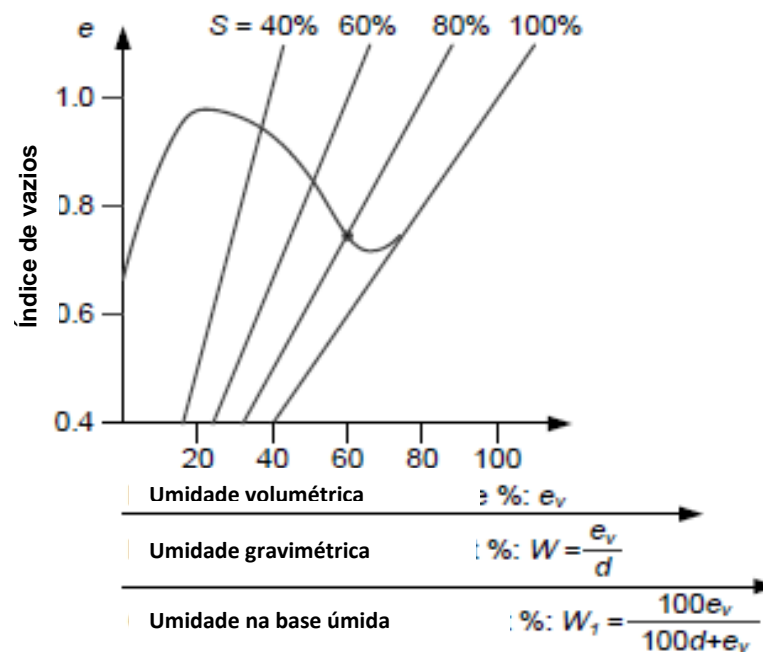
Após a amostra ser devidamente homogeneizada e apresentar o teor de umidade requerido para o teste de compactação, em torno de um quinto dela é colocada dentro no molde e nivelada, em seguida a camada é compactada com 25 golpes do soquete de 150g e 0,15cm. Esse processo é repetido em todas as cinco camadas, até que o molde esteja completamente cheio. Após isso, a extensão removível é retirada e a amostra é nivela pela borda do cilindro com o auxílio de uma régua metálica, removendo o excesso de amostra para que o molde seja pesado. Posteriormente, somente a amostra é pesada e seca para medidas de pesos e teores de umidade real de cada teste de compactação.

A partir destes dados e considerando as definições das Equações (1), (6), (7), (8) e (11) pode-se obter a curva de compactação indicada na Figura 11 e Figura 12.

No caso do presente trabalho, o polímero foi adicionado com a amostra já no teor de umidade requerido para o teste de compactação.

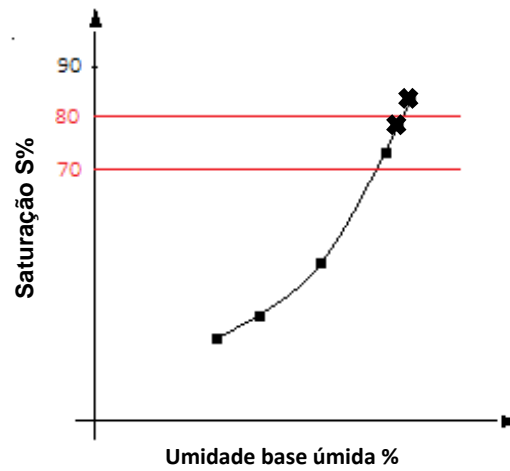
A Figura 11 ilustra o gráfico sugerido e citado pela IMO na circular DSC.1/Circ.71 de 2013 e a Figura 12 que ilustra o gráfico de extrapolação de dados. O método utilizado neste estudo foi o da Figura 12, de extrapolação de dados, por uma preferência da empresa. Os pontos representados por quadrados na Figura 12 são os pontos ensaiados e os pontos representados por xises representam os pontos extrapolados pela função do gráfico.

Figura 11 - Típica curva de compactação.



Fonte: Circular DSC.1/Circ.71, 2013.

Figura 12 - Típica curva de compactação por extrapolação.



Fonte: Extraído de relatório técnico confidencial.

Em ambos os gráficos o TML é representado pela umidade crítica contida na amostra, que é ilustrada pela interseção da curva de compactação com a curva de saturação de 80% na Figura 11 e pelo valor de saturação no eixo das ordenadas na Figura 12.

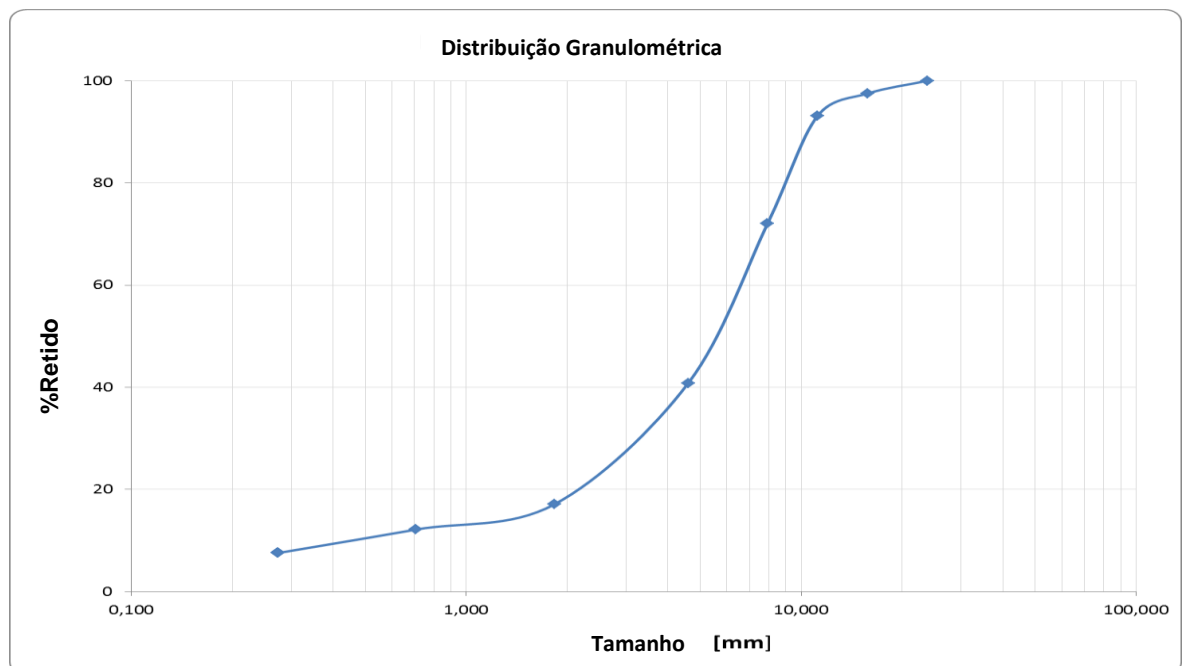
5. DISCUSSÃO E RESULTADOS

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Como já foi discutido nos capítulos anteriores, a caracterização da amostra é de suma importância para os cálculos do TML, para adequação do material nos grupos de classificação da IMO e para definir o teste mais indicado.

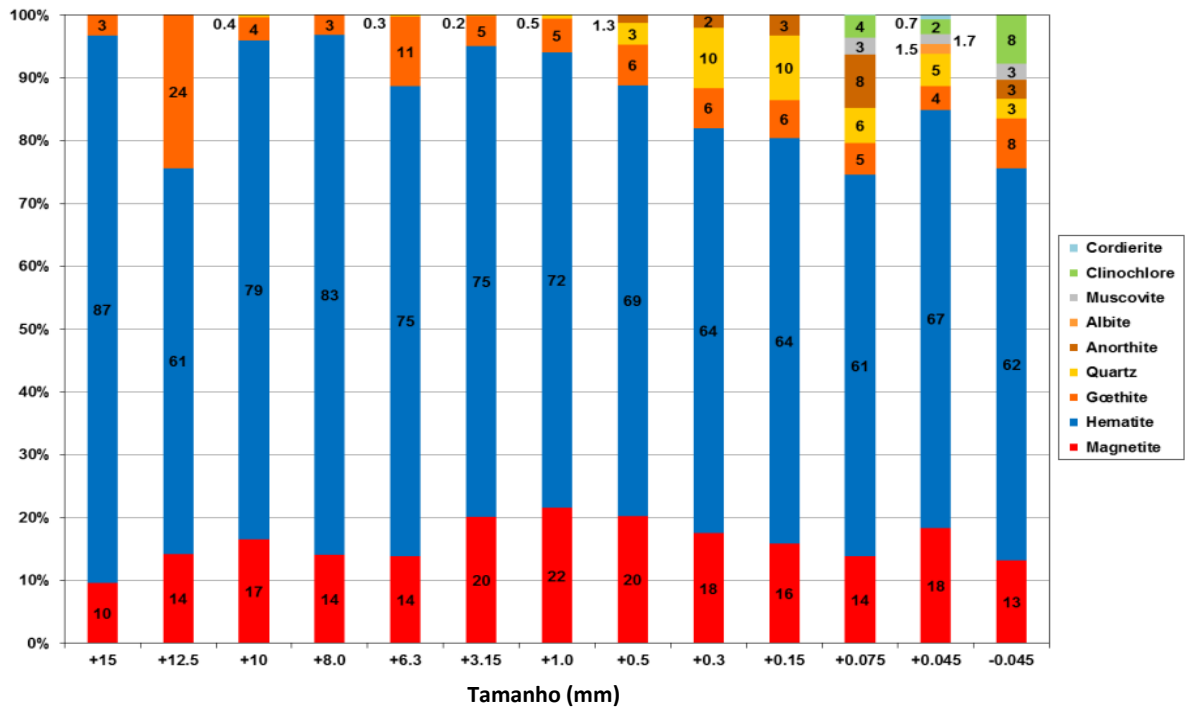
A Figura 13 apresenta a curva de distribuição granulométrica do *sinter feed* utilizado neste estudo. Ele se encaixa na categoria IOF, atribuída pela IMO aos concentrados de minério de ferro que possuem mais de 10% de partículas menores que 1mm e/ou mais de 50% das partículas menores que 10mm. O d_{80} do material é em torno de 9,2mm e o d_{10} em torno de 0,15mm.

Figura 13 - Distribuição granulométrica do *sinter feed* utilizado nos testes.



A Figura 14, por sua vez, apresenta o resultado da difratometria semi-quantitativa expresso em porcentagens de cada mineral presente em cada fração granulométrica do material. É possível observar que este minério é rico em hematita, além de possuir quantidade relevante de magnetita. A goethita está presente em menores quantidades, quantidades estas que não justificam que o teste de TML seja dispensado, uma vez que para que isso acontecesse, dentre outros fatores, a goethita deveria ser mais de 35% em massa da amostra total analisada.

Figura 14 - DRX quantitativo de cada fração granulométrica.



Uma outra análise que seria interessante em se fazer seria, a análise dos grãos presentes na amostra, se são porosos ou compactos. Mas para tal análise é requerido mais tempo e atenção, e tais fatores, ainda não explicam por si só os valores de umidade crítica encontrados para determinado material, mas complementarizam a caracterização da amostra.

5.2. PFT D80

Foram executados três testes, variando-se as dosagens do polímero superabsorvente. Os resultados do teor de umidade crítica encontrados nos testes com a adição de polímero foram comparados ao teste padrão, apenas o material, e o aumento dos valores foi calculado. Estes resultados estão apresentados na Tabela 2 e na Figura 15.

Pode-se observar que há uma mudança significativa dos valores TML ao se adicionar 0,5kg de polímero por tonelada de minério, essa mudança representa um aumento de 40% em relação ao material padrão analisado. Esse aumento significaria um ganho imenso para a empresa, uma vez que o seu minério não estaria tão preso à uma estreita faixa de teores de TML, e que as suas cargas a granel embarcadas em navios diminuiriam o risco de acidentes por liquefação consideravelmente.

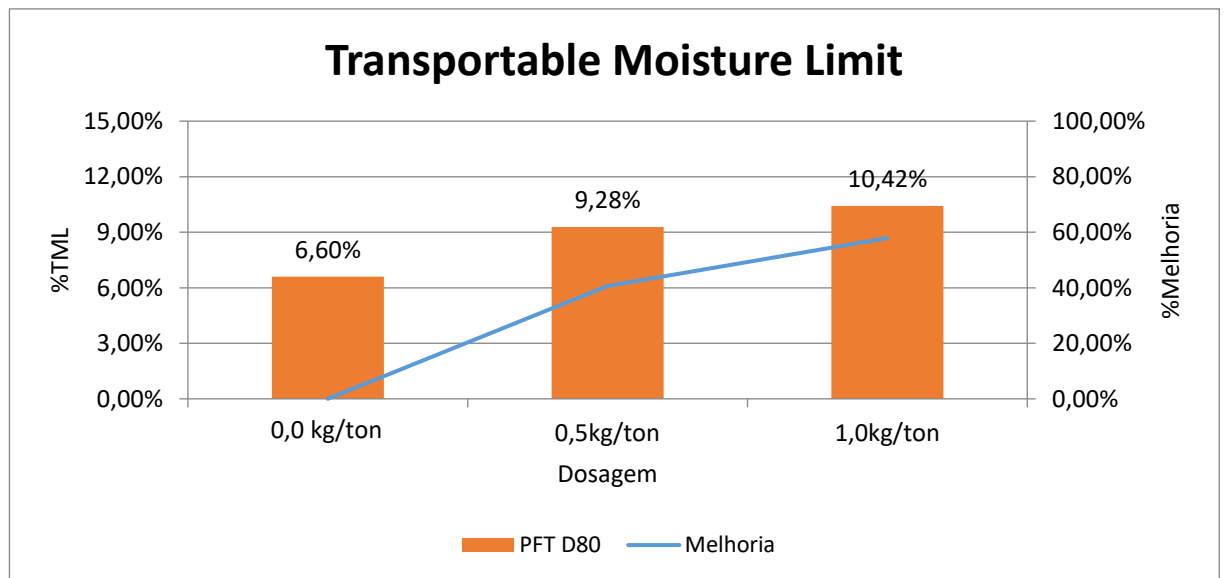
Com a adição de 1kg de SAP por tonelada de minério, o aumento no TML não é proporcional ao observado com 0,5kg por tonelada, porém, ainda é um aumento significativo em relação a amostra padrão.

Um estudo de viabilidade econômica deve ser feito, uma vez que o preço do polímero é insignificante perto dos valores pagos em multas e transtornos causados por cargas fora do padrão de embarque.

Tabela 2 - Resultado do PFT D80.

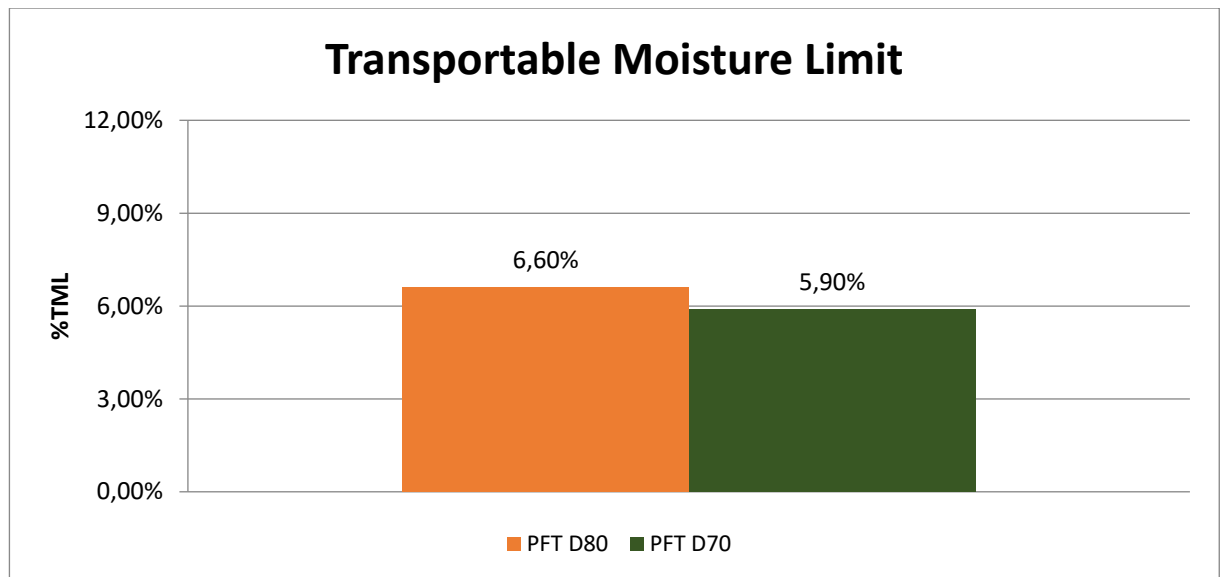
Dosagem	PFT D80	Melhoria
0,0kg/ton	6,60%	0,00%
0,5kg/ton	9,28%	40,62%
1,0kg/ton	10,42%	57,89%

Figura 15 - Gráfico ilustrativo dos resultados do PFT D80 e os aumentos alcançados com o uso do SAP.



O polímero FAVOR Z3050 da Evonik, custa em média 2,5 Euros por quilo. Utilizando-se a dosagem de 0,5kg/t o custo médio seria de 1,25 Euros mais os custos com a homogeneização do material com o polímero. Além disso, essa homogeneização poderia ser feita diretamente na esteira de carregamento do material no navio, barateando e diminuindo as operações relacionadas ao processo de adição do polímero e viabilizando o uso do mesmo.

Figura 16 - Gráfico ilustrativo dos resultados do PFT D80 e os aumentos alcançados com o uso do SAP.



A Figura 16 apresenta a comparação dos valores e TML obtidos nos diferentes testes, o PFT D80 e o PFT D70, sendo que o PFT D70 foi executado por uma empresa terceirizada e os resultados foram cedidos a este estudo para um único fim, o de comparação e para exemplificar a evolução do teste.

Na Figura 16 é possível observar que há uma diferença de 11% nos valores de TML obtidos nos diferentes testes, valor esse, muito significativo para os fatores operacionais da produção e embarque desse minério. Essa diferença nos mostra o quanto o PFT D70 é conservador em seus resultados, sendo que o PFT D80, traz uma margem maior de umidade crítica sem pecar na segurança.

6. CONCLUSÃO

Através do presente estudo é possível concluir que a adição de um polímero superabsorvente a um minério de ferro do tipo *sinter feed*, gera significativos acréscimos nos teores de TML, além disso, não causa alterações na redução e transformação desde concentrado em matéria prima para o aço, uma vez que em temperaturas acima de 200°C o polímero é totalmente degradado e não deixa resíduos.

Com uma dosagem de 0,5kg/t o acréscimo é de 40% em relação a amostra padrão e utilizando-se da dosagem de 1,0kg/t o acréscimo é de 57%. Tal aumento nos teores de umidade crítica seriam fator decisivo no momento de viabilizar uma carga para o embarque e transporte via navios.

Conclui-se também que a evolução do teste Proctor/Fagerberg modificado trouxe uma margem maior de valores de TML, um acréscimo de 11% foi atingido apenas alterando o método do teste. Sendo comprovado por inúmeros estudos que o PFT D80, apesar de aumentar os valores de TML é seguro e garante que o material, se dentro das normas, não irá se liquefazer.

Comprovado que o polímero possui resultados significativos nos valores de TML deste *sinter feed*, é importante que se faça um estudo de viabilidade econômica da aplicação deste aditivo na operação e transporte da mina. Além disso, é preciso comprovar que durante o período da carga em alto mar, esse polímero irá continuar estável e assegurar que a umidade que foi “aprisionada” pelo polímero não seja liberada.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986) – **Solo – Ensaio de Compactação**: NBR 7182.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2011) – **Informação e Documentação – Trabalhos Acadêmicos - Apresentação**: NBR 14782.

BRAJA, M. Das. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**; São Paulo: Thomson Learning, 2006.

FERREIRA, R. F.; POLICARPO, D. L. V.; PADULA, V. P.; FERREIRA, M. T. S. **Limite de Umidade Transportável de Minérios de Ferro: Aspectos Regulatórios e Técnicos**. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 16-23, jan./mar. 2017.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **IMSBC Code - International Maritime Solid Bulk Cargoes Code**. Annex 3 Resolution MSC.268(85), 2008.

IRON ORE TECHNICAL WORKING GROUP. Submission for evaluation and verification. **Iron ore fines Proctor-Fagerberg test**. 2013. Disponível em:

<http://ironorefines-twg.com/wp-content/uploads/2013/07/TWG_IOF_Proctor-Fagerberg_Test_Report_3_8May2013_FINALSubmission.pdf> Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

ISIACIK COLAK, C. T.; SATIR, T. **Cargo liquefaction and dangers to ships**. TransNav Conference, 2014. Disponível em: <<http://www.ifsma.org/resources/Cargo-Liquefaction.pdf>> Acesso em: 20 de dezembro de 2016.

JONAS, M.; BELL, B. **Liquefaction of unprocessed mineral ores - Iron ore fines and nickel ore.** Gard News 197. Liverpool, 2010. Disponível em: <<http://www.gard.no/Content/20651223/Cargo%20liquefaction%20February%202012.pdf>> Acesso em: 02 de abril de 2017.

MARITIME Bulk Cargo Liquefaction, **Guideline for design and operation of vessels with bulk cargo that may liquefy.** DNV GL AS. 10/2015.

MOHAJERANI, A.; MUNRO, M. C. **A review of the newly developed method used to prevent liquefaction of iron ore fines on bulk carriers.** Australian Geomechanics Journal. 2016

MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. **Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de E. globulus.** Silva Lusitana, Lisboa, v. 2, n. 10, p.207-216, jun. 2007.

ROSA, F.; BORDADO, J. M.; CASQUILHO, M. **Polímeros superabsorventes potencialidades e aplicações.** Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico, 2008.

SAMPAIO, J.A., SILVA, F.A.N.G. **Análise granulométrica por peneiramento. Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais,** p. 55-74, 2007.