

ENTENDIMENTO SOBRE AS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NO TML*

Késsius Bortolan Menezes¹
José Francisco Cabello Russo²
Denílson Rodrigues de Araújo²
Henrique Dias Gatti Turre³
Alice Siqueira Sales⁴
Ângelo Alessandro Miranda⁵
Marcelo Nazaro Silva⁶

Resumo

Com o início das operações do sistema Minas-Rio da Anglo American, em Conceição do Mato Dentro, MG, em 2014, foi também implementada e certificada uma metodologia para a realização de ensaios visando a obtenção dos resultados de TML (*Transportable Moisture Limit* – Limite de Umidade Transportável). Tal parâmetro fornece o limite máximo de umidade contida no material que poderia ser transportado sem o risco do processo de liquefação da carga, o que poderia ocasionar incidentes como o adernamento de embarcações que transportam concentrado de minério de ferro à granel, em alto mar. Isto significa que, ao realizar um carregamento de um navio, a umidade do material a ser transportado não deverá possuir umidade superior ao valor de referência do TML, obtido em ensaio físico e, intrínseco ao material. Caso isto aconteça o carregamento pode ser rejeitado. A partir de 2014 observou-se uma tendência de queda para este parâmetro de referência no sistema Minas-Rio, com resultados se aproximando da umidade do produto filtrado, trazendo riscos para a operação do empreendimento. Desta forma, uma investigação das possíveis causas para entendimento desta tendência de queda foi requerida.

Palavras-chave: TML; *Transportable Moisture Limit*; Minério de ferro à granel; Liquefação de cargas.

UNDERSTANDING ON THE VARIABLES THAT INFLUENCE THE TML

Abstract

With the start-up of the Minas-Rio system, Anglo American, in Conceição do Mato Dentro, MG, in 2014, a methodology was also implemented and certified to perform the tests to obtain the results of TML (*Transportable Moisture Limit*). Such a parameter provides the maximum moisture content contained in the material that could be transported without the risk of the cargo liquefaction process, which could lead to incidents such as the tipping of ships carrying iron ore concentrate in bulk on the deep water. This means that when loading a ship, the moisture content of the material to be transported should not be higher than the TML reference value, obtained in a physical test and intrinsic to the material. Should this occur the charging may be rejected. From 2014 a downward trend was observed for this reference parameter in the Minas-Rio system, with results approaching the moisture of the filtered product, bringing risks to the operation of the project. In this way, an investigation of the possible causes for understanding this downward trend was required.

Keywords: TML; *Transportable Moisture Limit*; Bulk iron ore; Liquefaction.

¹ *Bacharel em Engenharia Metalúrgica UFOP, Engenheiro de Processos – Anglo American, Conceição do Mato Dentro, MG, Brasil.*

² *Gerente de Desenvolvimento de Processos - Anglo American, Conceição do Mato Dentro.*

³ *Doutor em Engenharia de Minas UFMG, Coordenador de Processos – Anglo American, Conceição do Mato Dentro, MG, Brasil.*

⁴ *Engenheira de Qualidade - Responsável Técnico Laboratório de Análises Físico-Químicas - Anglo American, Conceição do Mato Dentro.*

⁵ *Coordenador de Melhoria Contínua - Anglo American, Conceição do Mato Dentro.*

⁶ *Engenheiro Especialista de Processos- Anglo American, Conceição do Mato Dentro.*

1 INTRODUÇÃO

O TML é uma propriedade intrínseca do material e o requisito básico para que um material à granel possa ser transportado por rota marítima é ter a umidade inferior ao TML. Quando materiais sólidos à granel, contendo certa umidade, são submetidos a forças cíclicas, a pressão de água nos poros aumenta resultando em perda abrupta de resistência ao cisalhamento. Este fenômeno é denominado liquefação, e pode ocorrer durante o transporte de minérios e concentrados por via marítima e provocar o adernamento e ou o emborcamento da embarcação. O TML é um parâmetro utilizado como referência para definir o limite de umidade que um material pode conter para seu transporte em navios

Segundo FERREIRA et al. (2016), para a prevenção da liquefação e fenômenos relacionados a mesma, a IMO (Organização Marítima Internacional) estabeleceu o Limite de Umidade Transportável (TML) como parâmetro de controle da umidade dos materiais sólidos à granel, transportados por rotas marítimas. Para isso, em 1965, A IMO estipulou o Código Marítimo Internacional de Cargas Sólidas à Granel (IMSBC Code) o qual é constantemente revisado pelo subcomitê de Cargas Perigosas, Cargas Sólidas e Contêineres (DSC).

FERREIRA et al. (2016) cita ainda uma classificação de cargas, segundo a IMO, realizada em três grupos distintos, conforme respectivo grau de risco. As cargas que apresentam risco de se liquefazerem estariam inseridas no Grupo A. Dentre os diversos materiais dentro deste grupo, estão inseridos os concentrados de minério de ferro.

“Liquefação é uma descrição do efeito subsequente de uma carga estática ou dinâmica sendo aplicada a um material, geralmente uma areia fina ou silte, resultando no material agindo como um líquido”. (MUNRO e MOHAJERANI, 2015).

MUNRO e MOHAJERANI, 2015, definem como liquefação estática aquela cuja principal causa consiste no aumento da tensão de ruptura em um dado material, por meio da aplicação de uma carga denominada monotônica em um ponto do material, fazendo com que haja a liquefação neste ponto e que a mesma se propague rapidamente ao longo do material, provocando a liquefação total. Para a liquefação dinâmica ocorrer, MUNRO e MOHAJERANI, 2015, citam que deve haver a atuação de cargas cíclicas aplicadas a um determinado material fazendo com que ocorra alterações estruturais dentro do mesmo, provocando sua liquefação.

No caso de cargas constituídas por materiais sólidos à granel, a liquefação será devida ao aumento da poro-pressão da água e a redução da tensão efetiva inter-partículas, provocados por atuação de forças de carregamento de natureza estática e dinâmica. (FERREIRA et al., 2016).

A poro-pressão da água pode ser rapidamente aumentada simplesmente pela aplicação de uma carga dinâmica ou estática. Caso a tensão efetiva de um determinado material for reduzida a zero, a tensão de cisalhamento também será reduzida a zero e, portanto, o material terá um potencial grande em se liquefazer. (MUNRO e MOHAJERANI, 2015). Uma vez atingido o ponto de liquefação, poderá ocorrer, então, o adernamento e ou o emborcamento da embarcação.

O objetivo do trabalho proposto foi, portanto, o de desenvolver um entendimento mais aprofundado sobre possíveis variáveis que poderiam influenciar, diretamente, nos resultados obtidos a partir de ensaios físicos realizados, no sistema Minas-Rio, para determinação do TML.

2 DESENVOLVIMENTO

Um trabalho baseado na metodologia Lean Six Sigma, Figura 2, foi realizado para identificação das variáveis que poderiam influenciar nos resultados obtidos por meio dos ensaios físicos para o TML. Não é âmbito deste trabalho perpassar sobre as metodologias atualmente empregadas para determinação do TML, embora seja importante citar, apenas, o método utilizado para determinação do TML para minério de ferro na Anglo American Brasil.

Todos os ensaios físicos para determinação do TML para concentrado de minério de ferro na Anglo American Brasil, foram realizados utilizando o método de Proctor/Fagerberg em que, a partir de testes de compactação, identifica-se uma relação entre índice de vazios e umidade. São realizados entre 08 e 12 testes de compactação com diferentes umidades, sendo o cilindro preenchido com 05 camadas de amostra, cada camada recebe 25 quedas do soquete, divididas em 05 séries, conforme Figura 1 abaixo.

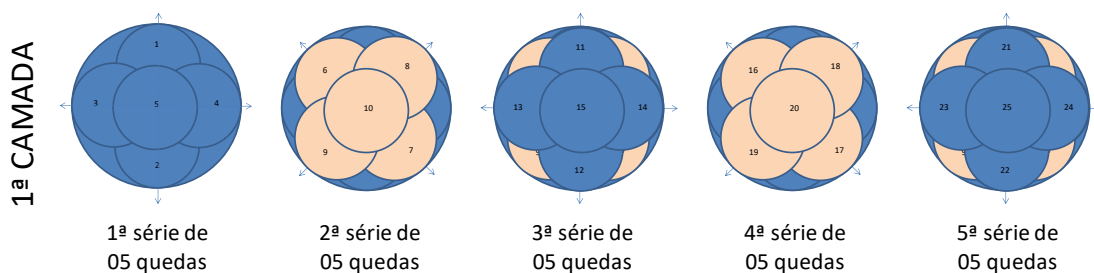


Figura 1 – Disposição de 01 (uma) camada no interior do cilindro e configuração das quedas realizadas

Inicialmente um mapeamento do processo que envolve toda a cadeia para se obter os resultados do TML foi realizado e por meio de um Brainstorming realizado por uma equipe multidisciplinar, foram levantadas todas as causas possíveis que poderiam influenciar no TML. A partir daí as causas mapeadas foram filtradas e condensadas por meio de uma matriz de relevância e uma matriz do tipo esforço x impacto. Variáveis como litologia do material, granulometria e excesso ou falta de partículas de ultrafinos foram aquelas mapeadas para serem investigadas neste estudo, durante a etapa “Analyze”.

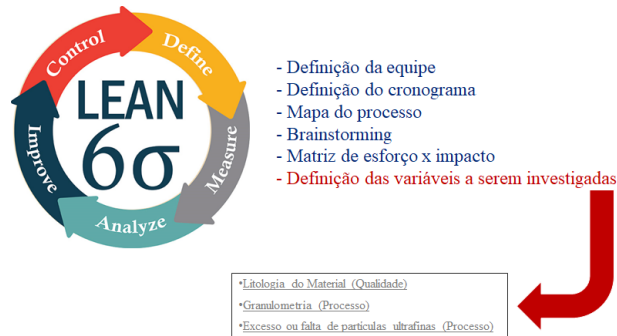


Figura 2 – Metodologia “Lean Six Sigma” e principais passos das etapas “Define e Measure”.

2.1 Litologia do Material

A litologia do minério alimentado na etapa de Britagem Primária foi considerada como um parâmetro que poderia estar associado às variações de TML no Porto. O percentual de Itabirito (IT) e de Itabirito Friável (IF), alimentados na Usina de Beneficiamento do Minas-Rio, de 2015 a 2018, poderiam influenciar diretamente na quantidade de partículas ultrafinas, associadas ao %P e %Al₂O₃, e estas partículas, por sua vez, influenciar nos resultados de TML.

Um exemplo contendo resultados de análise química típicos das litologias citadas acima são apresentados abaixo, na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1 - Resultados típicos esperados para as litologias de IT e IF da mina Serra do Sapo do sistema Minas-Rio

	%Fe	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%P
IF	40,00	2,00	40,00	0,036
IT	33,00	0,50	55,00	0,020

Observando-se estes resultados e tendo como base a caracterização destas litologias, constata-se que, para a litologia típica dos Itabiritos, há uma redução, em termos de composição química, do elemento fósforo e do óxido alumina.

Além disso, espera-se que os contaminantes associados ao fósforo e à alumina estejam presentes em maior quantidade nas frações mais finas para a litologia de itabiritos friáveis e que se apresentem em menor quantidade para os itabiritos.

Análises mineralógicas têm sido conduzidas em laboratório interno e externo. A análise abaixo presente nas Figura 3 Figura 4 exemplifica, de forma qualitativa, resultados obtidos para ambas litologias:



Ficha de Descrição Mineralógica
Projeto Minas-Rio

Técnico Responsável: Kátia		Data: 21/09/2018
Amostra: IF 124 (AGEOD 136)		
circuítos	Performace	
Britagem	↑	A amostra indica boa performance no circuito. O minerais apresentam contornos bem definidos e boa porosidade nas frações mais grossas.
Moagem	↑	Espera-se boa performance no circuito. Hematita com granulometria fina e contornos bem definidos e quartzo com granulometria intermediária.
Deslamagem	↑	A amostra indica boa performance no circuito. Contaminantes em maior quantidade nas frações mais finas.
Flotação	↑	Espera-se boa performance devido ao alto grau de liberação dos minerais de ganga e de ferro.
Remoagem	↓	Espera-se baixa performance da amostra. Hematita presente em sua forma monocristalina(monogranular), ausência de fratura e porosidade.

Figura 3 – Resumo descritivo mineralógico de um itabirito friável da Serra do Sapo do sistema Minas-Rio.



Ficha de Descrição Mineralógica
Projeto Minas-Rio

Técnico Responsável: Kátia		Data: 21/09/2018
Amostra: IC 795		
circuítos	Performace	
Britagem	↑	Espera-se boa performance da amostra no circuito. Hematita com granulometria fina e contornos bem definidos em sua maioria. Quartzo apresentando granulometria grossa e fina.
Moagem	→	Espera-se da amostra uma média performance neste circuito. Hematita com granulometria mais fina e quartzo com granulometria grossa e fina.
Deslamagem	↑	Indica boa performance. Contaminantes presente nas frações mais finas e em pouca quantidade.
Flotação	↑	Indica boa performance devido ao alto de liberação na malha de 0,150mm.
Remoagem	↓	Espera-se baixa performance devido aos minerais estarem na sua forma monocristalina(monogranular), sem fratura e porosidade.

Figura 4 – Resumo descritivo mineralógico de um itabirito da Serra do Sapo do sistema Minas-Rio.

A goethita, presente predominantemente para a litologia friável (embora possa ser encontrada para os itabiritos localizados próximos à superfície), também corrobora o fato de que materiais friáveis são portadores de partículas ultrafinas relacionadas à alumina e, portanto, poderiam influenciar nos resultados de TML (conforme análise do tópico seguinte). As Figura 5 e Figura 6, a seguir mostram a fotomicrografia de um Itabirito e de um Itabirito Friável, respectivamente, na fração passante em 0,044mm. Para o Itabirito Friável é indicada a presença de goethita.

<0,044mm



Figura 34: Fotomicrografia Visão geral, Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

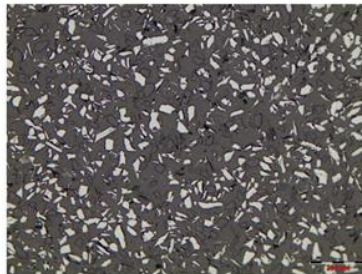


Figura 35: Fotomicrografia, Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 10X (200µm).

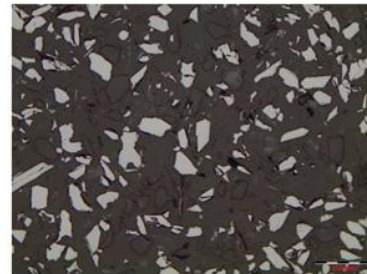


Figura 36: Fotomicrografia, Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 20X (100µm).

Figura 5 – Fotomicrografia IT (-0,044mm) de um itabirito da Serra do Sapo do sistema Minas-Rio.

0,044mm



Figura 37: Fotomicrografia Visão geral. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

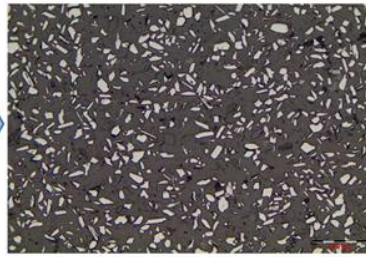


Figura 38: Fotomicrografia. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 10X (200µm).

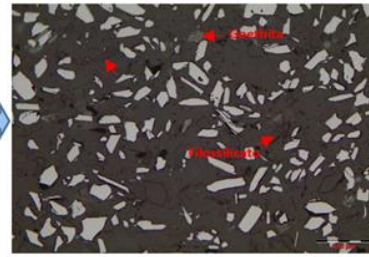


Figura 39: Fotomicrografia. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 20X (100µm).

Figura 6 – Fotomicrografia IF (-0,044mm) de um itabirito da Serra do Sapo do sistema Minas-Rio.

A Figura 7 abaixo mostra também o percentual de IT e de IF alimentados de 2015 a 2018 na Britagem Primária.

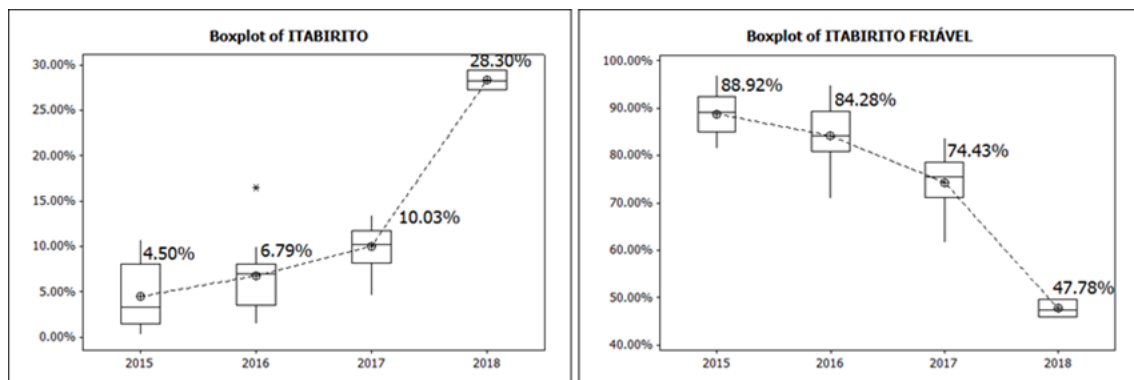


Figura 7 – %IT e %IF alimentados na Britagem Primária ao longo dos últimos anos no sistema Minas-Rio.

Os gráficos mostrados na Figura 7 acima mostram que o percentual de IT alimentado na Britagem Primária aumentou discretamente de 2015 a 2017 e saltou consideravelmente em 2018. O comportamento para o percentual de IF seguiu uma tendência contrária ao do IT. Já na Figura 8, abaixo, é mostrado o comportamento do %Al₂O₃, %P e %PPC, no ROM, respectivamente, ao longo dos anos no sistema Minas-Rio.

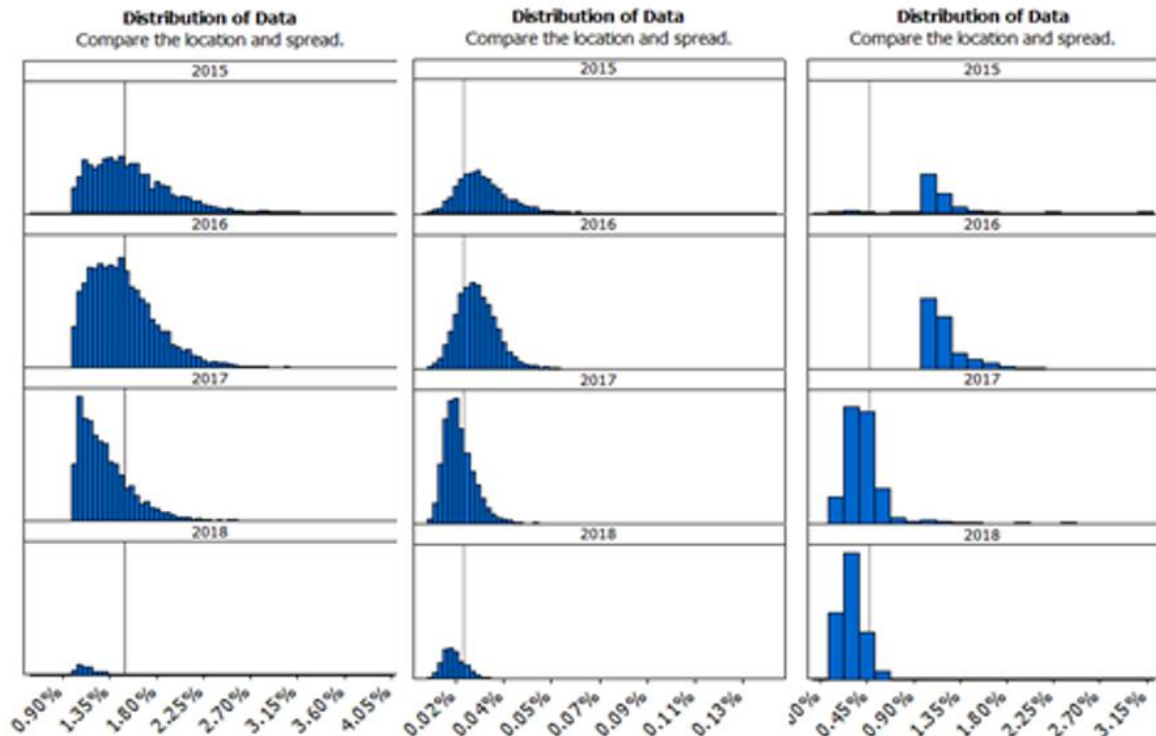


Figura 8 – Comportamento do %Al₂O₃, %P e %PPC, no ROM, respectivamente, ao longo dos anos no sistema Minas-Rio.

O comportamento dos resultados de TML também é exibido abaixo:

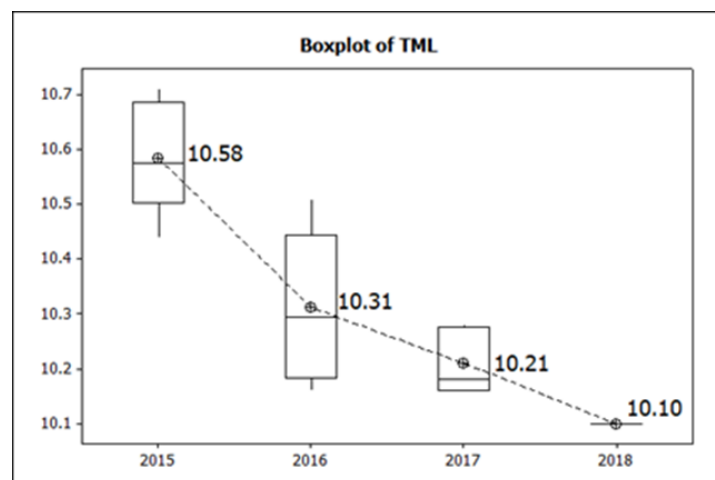


Figura 9 – Média dos resultados oficiais de TML obtidos ao longo dos últimos anos no sistema Minas-Rio.

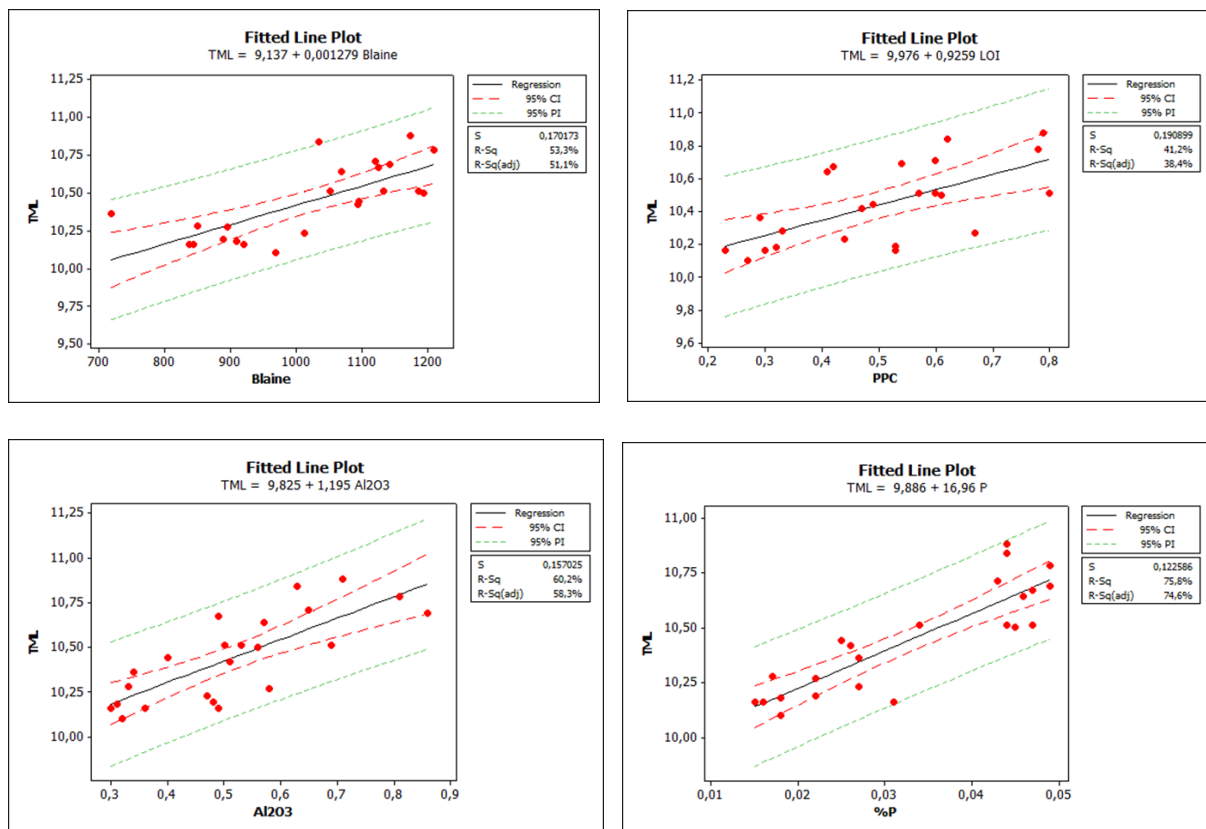
2.2 Excesso ou falta de partículas ultrafinas:

Devido às alterações litológicas do minério alimentado na etapa de Britagem Primária ao longo dos anos de operação do Minas-Rio, percebeu-se uma redução dos teores de P e Al₂O₃ associados a partículas finas e ultrafinas do Run of Mine. Foram levantados, então, os dados históricos dos resultados do TML, associados aos carregamentos no Porto, e a qualidade de cada um destes materiais embarcados. A Tabela 2 demonstra estes resultados históricos obtidos:

Tabela 2 - Dados carregamentos e resultados de TML.

Vessel	Al ₂ O ₃ (%)	P (%)	LOI (%)	Blaine (cm ² /g)	TML
KEY LIGHT	0,81	0,05	0,78	1210,00	10,78
NBA MONET	0,71	0,04	0,79	1173,00	10,88
UNITED OCEAN	0,63	0,04	0,62	1035,00	10,84
SEAFARER	0,65	0,04	0,60	1120,00	10,71
C PROSPERITY	0,56	0,05	0,61	1194,00	10,50
AQUAGENIE	0,53	0,04	0,60	1133,00	10,51
ANANGEL GRACE	0,50	0,05	0,57	1187,00	10,51
JUBILANT SUCESS	0,49	0,05	0,42	1125,00	10,67
VOGECARRIER	0,57	0,05	0,41	1069,00	10,64
HARVEST TIME	0,86	0,05	0,54	1142,00	10,69
TRUST AGILITY	0,40	0,03	0,49	1095,00	10,44
STAR PRINCESS	0,49	0,03	0,53	837,00	10,16
NAVIOS OBELIKS	0,34	0,03	0,29	718,00	10,36
OCEAN CLARION	0,47	0,03	0,44	1013,00	10,23
ZORBAS	0,51	0,03	0,47	1094,00	10,42
PACIFIC ARGOSY	0,69	0,03	0,80	1051,00	10,51
GRETA SELMER	0,48	0,02	0,53	889,00	10,19
MINERAL HAIKU	0,58	0,02	0,67	895,00	10,27
GENCO TITUS	0,33	0,02	0,33	850,00	10,28
AQUADONNA	0,30	0,02	0,23	843,00	10,16
EXCEL	0,31	0,02	0,32	909,00	10,18
LORDSHIP	0,36	0,02	0,30	920,00	10,16
GOLDEN FULHAM	0,32	0,02	0,27	968,00	10,10

Estes resultados foram em seguida plotados em gráficos de forma a se avaliar o grau de correlação entre eles, individualmente, assumindo distribuição normal dos dados, conforme Figura 10, abaixo.

Figura 10 – Regressão simples entre TML e as variáveis Blaine, %PPC, %Al₂O₃ e %P.

Também foi avaliado o coeficiente de correlação de Pearson que mede o grau da correlação (e a direção dessa correlação - se positiva ou negativa) entre duas variáveis de escala métrica. A Tabela 3 abaixo traz os resultados entre as correlações individuais para o TML e as outras variáveis:

0,900 para mais ou para menos indica uma correlação muito forte.
 0,700 a 0,900 positivo ou negativo indica uma correlação forte.
 0,500 a 0,700 positivo ou negativo indica uma correlação moderada.
 0,300 a 0,500 positivo ou negativo indica uma correlação fraca.
 0,000 a 0,300 positivo ou negativo indica uma correlação desprezível.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação de Pearson C. Química e Blaine.

Pearson correlation	Value
TML and Blaine	0,730
TML and LOI	0,642
TML and Al ₂ O ₃	0,776
TML and P	0,870

- TML x Blaine: Correlação Forte
- TML x PPC: Correlação Moderada
- TML x Al₂O₃: Correlação Forte
- TML x P: Correlação Forte

Fazendo-se ainda uma regressão multivariada, sendo a variável resposta o TML, tem-se:

Best Subsets Regression: TML versus P; LOI; Al ₂ O ₃ ; Blaine						
Response is TML						
						B
						A 1
						l a
						L 2 i
						O O n
						P I 3 e
Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows Cp	S	P	I 3 e
1	75,8	74,6	1,7	0,12259	X	
1	60,2	58,3	14,9	0,15702		X
2	78,5	76,3	1,3	0,11834	X	X
2	77,4	75,2	2,2	0,12117	X	X
3	78,9	75,5	3,0	0,12030	X	X X
3	78,5	75,1	3,3	0,12132	X	X X

Figura 11 – Regressão multivariada entre TML e as variáveis Blaine, %PPC, %Al₂O₃ e %P.

A análise de regressão multivariada confirma a melhor correlação entre TML e as variáveis com coeficiente de correlação de Pearson forte, ou seja, %P, %Al₂O₃ e Blaine sendo a variável %P aquela principal, que possui a maior correlação com o TML

2.3 Granulometria:

A granulometria final do pellet-feed, obtida após a etapa de remoagem na usina de beneficiamento, ainda em Conceição do Mato Dentro, também foi considerada um parâmetro importante a ser analisado neste trabalho.

De forma similar às análises anteriores, foram levantados os dados históricos dos resultados do TML, associados aos carregamentos no Porto, e a granulometria na fração acima de 0,15mm e abaixo de 0,044mm de cada um destes materiais embarcados. Uma análise granulométrica para as partículas finas e ultrafinas (fração abaixo de 0,038mm e abaixo de 0,010mm) não pôde ser realizada devido à, na atual prática, estas análises não serem realizadas. Já existe, apesar do considerado anteriormente, uma metodologia para que estas análises também possam ser realizadas na rotina. A Tabela 4 demonstra estes resultados históricos obtidos:

Tabela 4 - Base de dados para resultados de granulometria (+0,15mm e – 0,044mm).

VESSEL	<0,045	>0,149	TML
KEY LIGHT	86,33	0,03	10,78
NBA MONET	86,11	0,17	10,88
UNITED OCEAN	86,05	0,17	10,84
SEAFARER	77,98	0,33	10,71
C PROSPERITY	89,44	0,16	10,50
AQUAGENIE	87,01	0,12	10,51
ANANGEL GRACE	92,80	0,04	10,51
JUBILANT SUCESS	87,20	0,20	10,67
VOGECARRIER	84,20	0,18	10,64
HARVEST TIME	85,68	0,18	10,69
TRUST AGILITY	90,37	0,10	10,44
STAR PRINCESS	88,70	0,27	10,16
NAVIOS OBELIKS	86,31	0,22	10,36
OCEAN CLARION	86,78	0,34	10,23
ZORBAS	85,10	0,55	10,42
PACIFIC ARGOSY	86,68	0,35	10,51
GRETA SELMER	87,22	0,77	10,19
MINERAL HAIKU	86,19	0,44	10,27
GENCO TITUS	84,31	0,30	10,28
AQUADONNA	85,67	0,39	10,16
EXCEL	89,92	0,19	10,18
LORDSHIP	89,25	0,21	10,16
GOLDEN FULHAM	91,77	0,09	10,10

Estes resultados também foram plotados em gráficos de forma a se avaliar o grau de correlação entre eles, individualmente, assumindo distribuição normal dos dados.

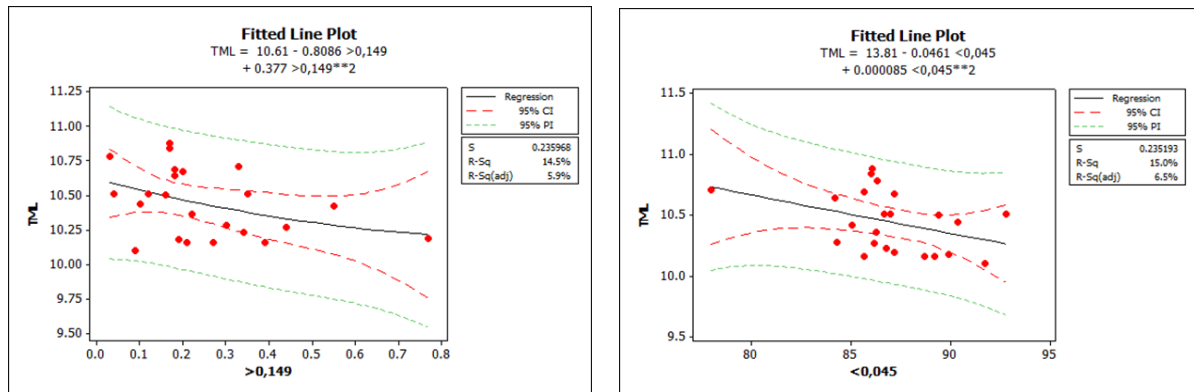


Figura 12 – Regressão simples entre TML e as variáveis %retido na malha 0,15mm (pellet-feed) e %passante na malha 0,044mm (pellet-feed), respectivamente.

Também foi avaliado o coeficiente de correlação de Pearson entre duas variáveis de escala métrica. A Tabela 5 abaixo traz os resultados entre as correlações individuais para o TML e as outras variáveis:

Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Pearson Granulometria.

Pearson correlation	Value
TML and +0,15mm	-0,375
TML and -0,044mm	-0,388

Tomando como referência a informações seguintes para avaliação tem-se:

- 0,900 para mais ou para menos indica uma correlação muito forte.
- 0,700 a 0,900 positivo ou negativo indica uma correlação forte.
- 0,500 a 0,700 positivo ou negativo indica uma correlação moderada.
- 0,300 a 0,500 positivo ou negativo indica uma correlação fraca.
- 0,000 a 0,300 positivo ou negativo indica uma correlação desprezível.

- TML x +0,15mm: Correlação Fraca
- TML x -0,044mm: Correlação Fraca

Desta forma, conclui-se que, em termos de granulometria e para as malhas avaliadas, existe uma correlação fraca entre esta variável e o TML.

3 CONCLUSÃO

Os materiais associados às partículas ultrafinas (%P, %Al₂O₃ e %PPC) diminuíram à medida que o percentual de IT aumentou e, os mesmos, influenciam nos resultados de TML. Além disso existe uma forte correlação entre TML e estes materiais associados às partículas ultrafinas. As análises de regressão simples e regressão multivariada confirmam esta afirmativa. A granulometria nas faixas consideradas possui fraca correlação com o TML, apesar de não haver dados suficientes para a condução de uma análise de granulometria, considerando o material passante em 0,038mm e em 0,010mm.

Os dados avaliados confirmam, portanto, a hipótese de proporcionalidade entre percentual de material ultrafino típico de litologia friável com os resultados de TML

REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 Munro, M.C. e Mohajerani, A. - Determination of the transportable moisture limit of iron ore fines for the prevention of liquefaction in bulk carriers. *Marine Structures*, 40, p.193-224, 2015.