

# ESTUDO DAS CAUSAS DO FENÔMENO DE AGREGAÇÃO DE MINÉRIO EM ROLOS DE MESAS CLASSIFICADORAS DO PELOTAMENTO\*

Artur Frederico Fonseca da Cruz<sup>1</sup>  
Jael Moutinho dos Santos<sup>2</sup>

## Resumo

O problema de agregação de minérios e desgaste prematuro em rolos classificadores nos pelotamento é recorrente. A importância da função "classificar" da mesa de rolos é fundamental, pois, em perfeito estado de conservação e funcionamento permite que seja garantida a melhoria no desempenho da fase mais onerosa na cadeia produtiva da pelotização, o processamento térmico. O objetivo do presente trabalho é a identificação de possíveis causas da agregação de minério em rolos classificadores e desenvolvimento de metodologia que permita avaliar e quantificar o mecanismo de adesão do minério de ferro na superfície dos rolos classificadores. Para tanto foram colhidos minérios e aditivos em quatro plantas de pelotização diferentes em termos de origem de minérios e fluxos de processo, escolhidos três tipos de rolos classificadores diferentes para testes quanto a resposta no tocante a energia adesiva na interface minério-rolo. Como resultados foi possível construir metodologias para avaliação da agregabilidade, observou-se a importância da definição e conhecimento da "umidade específica" sobre o aumento da energia adesiva, além de apresentar o melhor desempenho de rolos com revestimento em carbeto de tungstênio sobre os demais testados.

**Palavras-chave:** Classificação; Aderência; Agregabilidade; Aglomeração

## STUDY OF THE IRON ORE STICKING PHENOMENA CAUSES ON THE ROLLERS SCREENING SURFACE

### Abstract

The problem of iron ore sticking and premature wear on screening rolls on balling systems is recurrent. The importance of the "screening" function of the roller classifier is fundamental, since in perfect conservation state and operation it is possible to ensure the performance improvement of the most expensive phase in the pelletizing production chain, the thermal processing. The present works target is the identification of possible causes of iron ore adhesion in classifier rollers and develop a methodology to evaluate and quantify the iron ore sticking mechanism on the classifier surface. For this purpose, iron ore and additives were collected at four different pelletizing plants in terms of iron ore origins and process flows, three different rollers were chosen for testing around the adhesive energy at the iron ore mixture/rolls surface interface. As results, it was possible to construct methodologies to evaluate the aggregability, it was observed the importance of "specific moisture" definition and knowledge on the adhesive energy increase, besides presenting the better performance of rolls with tungsten carbide coating than other evaluated.

**Keywords:** Screening; Adhesion; Sticking; Agglomeration

<sup>1</sup> Engenheiro de Materiais, Especialista, Engenheiro de Processo Sênior, Unidade Técnica da Pelotização, Vale S.A., Vitória, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista e de Materiais, Engenharia de Manutenção e Confiabilidade da Pelotização, VALE S.A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A competitividade de qualquer processo produtivo está atrelada fortemente aos seus custos fixos e variáveis de produção. Mais especificamente dentro do processo de pelletização os impactos das condições físicas dos equipamentos sobre a estratégia de execução dos custos variáveis são diretos, e em muitos momentos este impacto no custo variável de produção supera em grandes cifras a eliminação de uma condição de física em campo.

Atuar na redução deste impacto através da eliminação de ineficiências dos processos e perdas funcionais dos equipamentos é estratégico em plantas de pelletização. Porém, em determinados casos conhecer o modo de falha funcional em sua origem para eliminação não é trivial, e quando se fala no processo de pelletização nem sempre a mesma solução aplica-se a todos os casos.

O fluxograma típico do processo de pelletização está ilustrado na Figura 1 e define os limites dos três macroprocessos do sistema produtivo. São eles: 1. Preparação da matéria prima; 2. Formação das pelotas verdes; 3. Processamento térmico das pelotas verdes [MEYER, 1980].

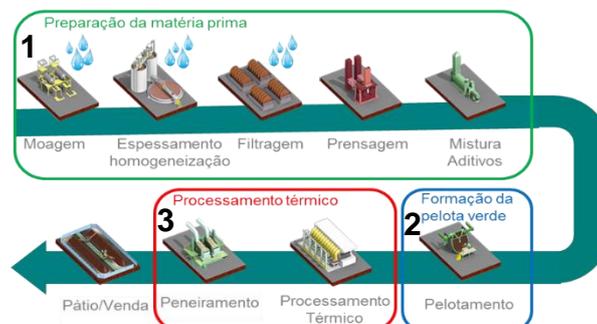
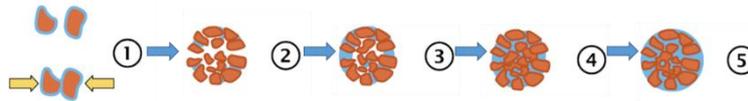


Figura 1 Fluxograma típico do processo de pelletização.

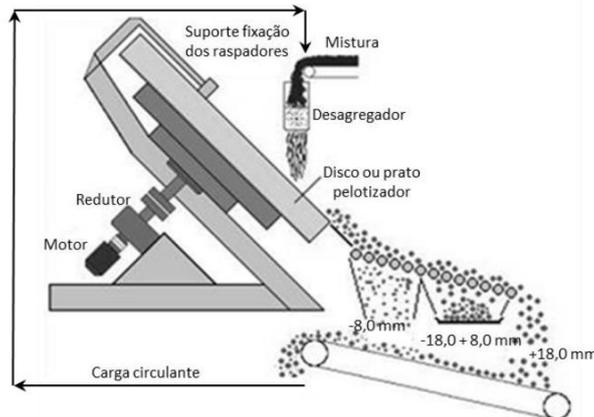
Os macroprocessos de preparação da matéria prima e formação da pelota verde consistem em adequar as características físicas dos grãos de minério por cominuição, o teor de umidade da polpa retida no processo de filtragem, a adição de aglomerantes, fundentes, combustível sólido, e aglomeração das partículas de minério de ferro com aditivos no pelotamento [CRUZ et al., 2018].

De maneira resumida, o processo de formação de pelotas verdes pode ser dividido em cinco fases descritas a seguir e ilustradas na figura 2: **1.** As partículas individuais de minério são recobertas por uma película de água e são formadas as primeiras pontes líquidas entre as partículas; **2.** Movimentos sucessivos de rolamento e a combinação de gotículas de água, contendo uma ou mais partículas minerais, levam à formação dos primeiros aglomerados; **3.** O número de pontes líquidas que unem as partículas aumenta e os aglomerados são adensados, com crescente preenchimento dos poros com água; **4.** O ponto ideal desta fase é atingido quando todos os poros internos estão preenchidos com água, porém o aglomerado não está recoberto externamente por uma película uniforme de água. **5.** O estágio ideal é superado quando a pelota crua é totalmente recoberta por uma película de água, a tensão superficial das gotículas de água torna-se totalmente ativa e ocorre diminuição drástica da força capilar que une as partículas, com tendência de formação de polpa [MEYER, 1980].



**Figura 2** Mecanismo de formação das pelotas [JESUS, 2018 adaptado de MEYER, 1980].

Neste trabalho, a operação unitária impactada pelos resultados da pesquisa é o pelletamento, dentro da fase de formação da pelota verde. De modo resumido, o sistema de formação e classificação de pelotas verdes consiste em um equipamento pelletizador (disco ou tambor) e equipamento classificador de pelotas (mesa de rolos classificadores), conforme ilustrado na figura 3.

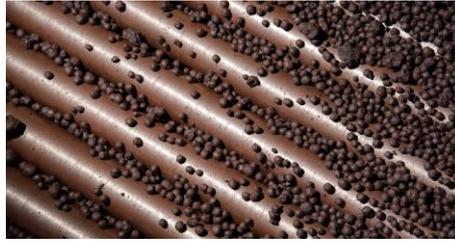


**Figura 3** Ilustração de um sistema de formação e classificação de pelotas [FONSECA, 2003 apud FONSECA e CAMPOS, 2018].

O propósito do pelletamento é obter pelotas dentro da faixa de tamanho desejado e resistência mecânica suficiente para que possam ser transportadas seguramente dos discos de pelletamento aos equipamentos de queima, e que se mantenham íntegras durante as etapas iniciais da queima.

No quesito faixa de tamanho, a importância da função “classificar” da mesa de rolos é fundamental, pois, em perfeito estado de conservação e funcionamento permite que seja garantido à fase subsequente (processamento térmico), a mais onerosa na cadeia produtiva da pelletização, a distribuição ideal para que haja o fluxo gasoso na melhor condição de escoamento dos gases, garantindo melhor performance da máquina térmica quanto ao atingimento da qualidade desejada, com menor custo e menor impacto ambiental.

O sistema denominado mesa de rolos classificadores é integrado por diversos rolos que giram, transferindo as pelotas por um percurso inclinado descendente. Em seu conceito fundamental, durante o transporte as pelotas são classificadas por tamanho, retornando ao circuito de pelletamento os aglomerados que não estiverem nos tamanhos adequados. A inclinação da peneira, o diâmetro dos rolos e o espaçamento entre eles estão especificamente relacionados ao diâmetro médio das pelotas como produto fim da fase de pelletamento, e esta afirmação é verdadeira quando o sistema de classificação está em perfeito estado de conservação (figura 4).



**Figura 4** Exemplo de rolos em perfeito estado para classificação.

Quando se destaca a necessidade de funcionamento em perfeito estado de conservação da mesa classificadora, remete-se à necessidade de que os rolos estejam íntegros quanto a desgaste irregular e agregação de minérios em sua superfície, pois estas condições inevitavelmente interferirão no desempenho da fase de formação e classificação das pelotas verdes, quer seja por uma ineficiência de classificação ou pela degradação das pelotas formadas, como ilustrado na figura 5.



**Figura 5** Exemplo de rolos agregados promovendo o fechamento dos gaps e aprisionamento/quebra de pelotas verdes.

A motivação do trabalho nasce da necessidade de conhecimento do fenômeno de agregação de minério em rolos classificadores para eliminação de um dos maiores problemas no circuito de pelotamento em algumas usinas, principalmente quando considera-se a estratégia de gestão de desempenho global deste ativo, contemplando a visão de atendimento à condição ideal para todas as disciplinas (manutenção, operação, meio ambiente, qualidade e custos fixos e variáveis).

O desgaste dos rolos classificadores é um dos principais problemas encontrados, pois provoca alterações dimensionais ao longo do rolo, e esta ocorrência de desgaste prematuro e irregular pode ocasionar maior número de paradas do equipamento para as correções, elevando sobremaneira os custos de manutenção e as perdas de produção. A possibilidade de se recuperar esse componente, ou prepará-lo para suportar melhor as condições de desgaste, é constantemente estudada, e novos materiais são propostos, sempre com o intuito de aumentar a vida útil e reduzir custos operacionais. O desgaste apresenta, portanto, considerável significado econômico.

Dentro dos principais fatores de desgaste irregular e prematuro está a agregação de material (minério) aos rolos que, com o avançar do tempo os pontos de agregação atuam como “retíficas” que acentuam o desgaste localizado nos rolos adjacentes ao rolo agregado. Além da influência da agregação quanto ao desgaste do rolo e impacto no retorno pela abertura excessiva ou fechamento dos gaps (afastamentos ajustados entre os rolos para seleção das pelotas formadas no equipamento pelotizador), existe também o fator quebra de pelotas pelo efeito de prensagem destas entre os rolos com diâmetros e perfis diferentes, que implicam em

velocidades periféricas diferentes e/ou condição de aprisionamento, conforme já visto anteriormente na figura 4.

Uma das principais hipóteses investigadas está baseada no fato de existir um ponto ótimo no qual a força capilar é máxima e que coincide com o estágio 4 da figura 2, a partir de onde o excesso de água pode diminuir a coesão entre partículas da pelota (estágio 5 da figura 2) e, conseqüentemente, eventualmente favorecer o mecanismo de adesão do minério no material do rolo classificador.

Baseado em outros problemas encontrados na literatura (TONG, et al, 1994 & PLINKE et al., 2016) em relação à interação entre materiais pegajosos e a superfície de contato, foram analisadas também, além da umidade da mistura de minério, as hipóteses de temperatura da superfície, efeito da microestrutura dos materiais, rugosidade e molhabilidade da superficial.

O objetivo do presente trabalho é a identificação de possíveis causas da agregação de minério em rolos classificadores sob o ponto de vista de avaliar e quantificar o mecanismo de adesão do minério de ferro na superfície dos rolos classificadores através da avaliação de parâmetros como origem do minério com seus aditivos e umidade da mistura. Além disso, foram avaliados parâmetros de rugosidade, dureza, resistência ao desgaste, ângulo de contato, temperatura e contaminação superficial dos rolos classificadores, bem como sua microestrutura.

## 2 DESENVOLVIMENTO

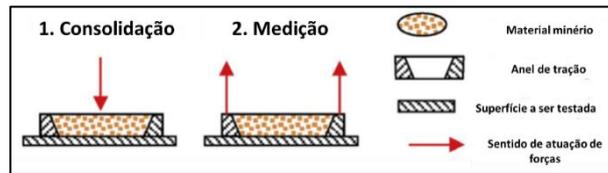
Para realização dos experimentos que permitam a quantificação e identificação de possíveis causas para agregação de minério em rolos classificadores, o trabalho se divide em três etapas:

1. Caracterização dos diferentes tipos de rolo classificador por meio de análise química via espectrometria de emissão óptica por centelhamento, dureza, micro dureza, micrografia óptica e ensaios de desgaste. Além dos ensaios de rugosidade superficial e medidas de ângulo de contato (molhabilidade);
2. Caracterização dos minérios utilizados nos ensaios através de técnicas como EDX, determinação de superfície específica pelos métodos de Blaine e B.E.T.. Ensaios de tensão adesiva, variando-se parâmetros de umidade, rugosidade e contaminação superficial;
3. Análises via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos quatro minérios de usinas diferentes, ensaios de tensão adesiva, variando-se o parâmetro de temperatura do rolo. Ensaios de tensão coesiva, variando-se o parâmetro de umidade.

Os ensaios de quantificação da agregabilidade da mistura de minério ao rolo foram realizados em dispositivo desenvolvido especificamente para simular particularidade do processo de classificação de pelotas cruas, adaptados a partir do trabalho de PLINKE et al., 2016, para desenvolvimento de métodos de análise para caracterização e classificação de minérios úmidos pegajosos.

Baseado em PLINKE et al., portanto, ficou definido que a quantificação da agregação dar-se-ia pela medição da tensão adesiva e para caracterização das possíveis influências, levando em conta algumas das condições mais próximas da realidade possível de simulação em bancada, variaram-se os parâmetros de minério (origem, umidade e pressão de consolidação) e dos rolos (material dos rolos, rugosidade, contaminação superficial e temperatura). A figura 6 representa

esquemáticamente a metodologia original de medição da tensão adesiva entre minério e superfície.



**Figura 6** Método de medição original para medição da tensão adesiva entre minério e superfície [adaptado de PLINKE et al. 2016].

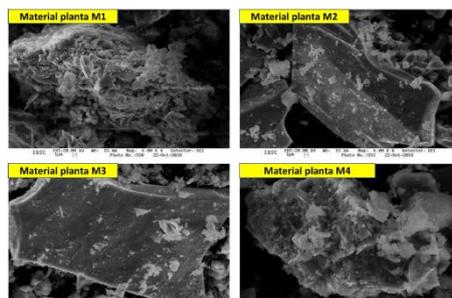
## 2.1 Caracterização dos minérios

As amostras de minério foram coletadas, como polpa retida em usinas sem prensa de rolos em seu fluxo ou prensada em usinas com prensa de rolos em seu fluxo, em quatro unidades pelletizadoras distintas, com fluxos de operação diferentes, minérios de origem diferentes, diretamente do fluxo do processo, sem tratamento. Os resultados da caracterização básica destes minérios estão dispostos na tabela 1. O objetivo é representar o material como fornecido à etapa de pelotamento

Planta	Sílica (%)	Umidade típica de trabalho (%)	Passante 0,045mm (%)	Sup. Esp. Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Sup. Esp. B.E.T. (m <sup>2</sup> /g)	Umidade Específica (%H <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> /g)	Hematita (%)	Magnetita (%)	Martita (%)	Goethita (%)	Goethita Terrosa (%)	Quartzo (%)
M1	2,38	9,5±0,2	82,53	1.963	4,67	2,03	70,08	1,42	11,20	7,65	9,05	0,60
M2	1,99	8,5±0,3	86,60	1.940	1,53	5,62	77,45	0,41	1,15	3,85	17,04	0,10
M3	1,84	7,8±0,3	77,16	1.836	1,61	4,93	82,10	0,33	1,38	3,29	12,27	0,64
M4	5,30	10,97±0,2	84,48	1.860	3,75	2,92	73,96	0,72	2,68	4,51	17,29	0,83

**Tabela 1.** Caracterização básica dos minérios ensaiados

É possível notar as diferenças mais expressivas no percentual de sílica das amostras M1 e M4 em relação às demais, além da superfície específica média obtida via B.E.T. das plantas M1 e M4 com resultados entre 2,5 e 3 vezes maior do que as plantas M2 e M3, aproximadamente. Importante ressaltar que as umidades típicas de trabalho em todas as usinas, apesar de diferirem, são teores de umidade nos quais a performance no pelotamento são equivalentes quanto ao aspecto de umidade e dinâmica de formação das pelotas verdes. Tal característica pode ser atrelada à morfologia dos grãos de minério, como pode ser observado na figura 7 extraída da análise de MEV, que evidencia a presença de grãos de minérios mais porosos em relação às amostras M2 e M4. As observações em campo associadas a estes fatores de umidade, superfície específica B.E.T. e morfologia predominante dos grãos de minério condizem com a realidade observada no pelotamento nestas plantas.



**Figura 7** Imagens via MEV dos minérios M1, M2, M3 e M4, ampliação 6000x

A informação que correlaciona a umidade típica de trabalho e a superfície específica medida pelo método B.E.T mostra que na prática o teor de água ideal de aglomeração para cada um dos minérios é diferente. Ou seja, minérios mais porosos requerem um teor de umidade mais alto para resultar numa mesma espessura de filme de água e de fato, os minérios M1 e M4 são os que apresentam maior especificação de teor de umidade. Entretanto, ao analisar a umidade específica (teor de umidade dividido pela área superficial de minério) observa-se que as amostras M2 e M3 apresentam os maiores valores, indicando uma relação de umidade maior ao redor das partículas de minério em relação aos minérios M1 e M4.

## 2.2 Caracterização dos rolos classificadores

As amostras de rolos utilizados no trabalho foram extraídas do inventário de rolos classificadores utilizados na produção. Os ensaios foram realizados com os rolos de utilização padrão metálico, o AISI 297 HH modificado, rolo AISI 297 HH modificado termicamente tratado em sua superfície (TIG), rolo metálico revestido em carvão de tungstênio e rolos revestidos em poliuretano com diâmetro de aproximadamente 94mm os metálicos e 75mm o de poliuretano, respectivamente. A tabela 2 mostra os resultados de composição química do rolo HH novo, e do material base do rolo revestido, além de suas especificações para comparativo nas linhas azuis.

Amostra	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	Ti	Cu	Fe
Rolo HH novo	0,25	1,42	1,21	0,036	0,016	24,9	14,6	0,40	NA	0,07	0,16	0,02	0,13	Bal
Especificado ASTM A297-HH modificado	0,25- 0,45	2,00 max	2,00 max	0,04 max	0,04 max	24,0- 27,0	11,0- 14,0	0,30- 0,50	1,00 - 1,50	NE	NE	NE	NE	Bal
Rolo revestido	0,07	0,46	0,54	0,022	0,004	13,5	4,16	0,58	NA	0,03		0,02	0,16	Bal
AISI 410	0,15 max	1,00 max	1,00 max	0,04 max	0,03 max	11,5- 13,5	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE

NE - não especificado, NA - não analisado

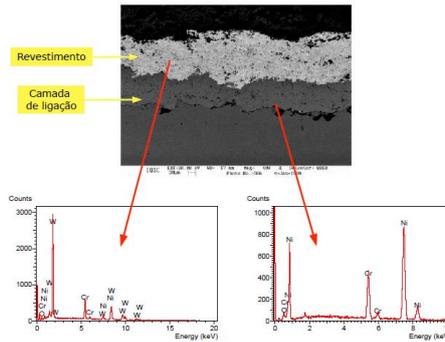
**Tabela 2.** Composição química dos rolos metálicos utilizados no trabalho

A tabela 3 apresenta o resultado de análise química por EDX realizada na camada do rolo revestido e a figura 8 indica os pontos analisados na amostra. Fica evidente que a camada depositada tem alto teor de C e W, indicando que o reforço principal é de WC. É possível observar a presença de uma camada de ligação que consiste de uma liga de base Ni-Cr que faz a interface com o material base.

Amostra	Local	C	Cr	Ni	O	W
Rolo revestido	Camada principal	12,6	12,4	5,2	0,8	Bal
	Camada de ligação	NA	19,0	Bal	0,4	-

ND - Não detectado, NA - Não analisado

**Tabela 3.** Composição química da camada de revestimento



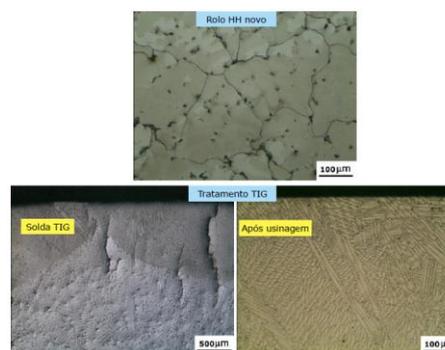
**Figura 8** Análises via EDX no revestimento da amostra do rolo revestido.

Os dados de dureza dos rolos metálicos são apresentados na tabela 4 e é possível observar que os rolos de aço tipo HH (convencional e tratado por TIG) são os que apresentam menores durezas. Por outro lado, o material base do rolo revestido possui média dureza, enquanto sua camada apresenta alto valor de dureza devido à grande quantidade de partículas de WC presentes.

Amostra	Tipo	Região	Medidas					Média	Média HBW
			1º	2º	3º	4º	5º		
Rolo HH novo	HRB	Núcleo	84	85	84	83	85	<b>84,2</b>	<b>162</b>
		Material base	32	32	32	32	32	<b>32,0</b>	<b>301</b>
Rolo revestido	HV	Camada principal	838,7	934,5	802,1	601,9	949,5	<b>825,3</b>	<b>735</b>
		Camada de ligação	192,0	206,6	211,3	192,0	178,9	<b>196,2</b>	<b>196</b>
		Núcleo	211,0	199,1	200,2	215,6	198,1	<b>204,8</b>	<b>205</b>
Rolo tratado com TIG	HV	Núcleo	193,1	195,1	194,1	197,1	193,1	<b>194,5</b>	<b>194</b>
		Superfície	193,1	195,1	194,1	197,1	193,1	<b>194,5</b>	<b>194</b>

**Tabela 3.** Ensaios de dureza realizados nos rolos metálicos

Na análise microestrutural dos rolos metálicos é possível observar que rolo de HH convencional novo apresenta uma microestrutura de carbonetos de cromo em contorno de grão austenítico. Observa-se que o tamanho de grão é bastante grosseiro e esta característica facilita a escavação da matriz pelas partículas de minério, aumentando a taxa de desgaste. Numa tentativa de minimizar este aspecto, procedeu-se a um tratamento de superfície por meio de aplicação de um passe de solda TIG na superfície do rolo, figura 9.



**Figura 9** Análise micrográfica óptica do rolo de HH novo e tratado termicamente na superfície com TIG.

A intenção era de provocar um refino microestrutural, por meio de solidificação ultra-rápida. De fato, conforme observa-se na figura 9 (Tratamento TIG), um tamanho de grão extremamente refinado foi obtido pelo processo. O objetivo neste estudo é verificar se o tamanho de grão e consequentemente a distância interpartículas afeta as propriedades de adesão de minério na superfície do rolo.

Ensaio de resistência desgaste pino sobre tambor foram realizados para os rolos metálicos HH convencional e HH tratado termicamente via TIG para comparativo quanto ao comportamento de desgaste quando comparadas as microestruturas (figura 10). É possível perceber a redução da resistência ao desgaste da amostra tratada termicamente por TIG e este fenômeno pode estar associado ao processo de refusão ocorrido durante o tratamento com a dissolução dos carbonetos da estrutura.

Amostra	Perda de massa (mg)	Perda de massa - Média (mg)	Perda de volume - Média (mm³)
Rolo HH	591,6	657,7	84,3
	637,5		
	713,7		
	688,0		
Rolo tratado com TIG	826,9	779,8	100,0
	756,8		
	755,7		

**Tabela 4.** Ensaio de resistência ao desgaste das amostras de rolos metálicos

Para a caracterização do rolo em PU, foram utilizadas as análises químicas via TG, DSC e FT-IR e com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que a curva termogravimétrica da amostra apresenta decomposição em duas etapas, condizente com o descrito na literatura (Claro-Neto, 1997) para resinas poliuretanas. A curva DSC não apresentou picos endo ou exotérmicos consequentes de processos com variação de energia, apenas uma transição de linha base em -20,5 °C. Além disso, o espectro na região do infravermelho da amostra apresentou uma série de bandas coincidentes com aquelas observadas no espectro de uma resina poliuretana referentes às vibrações das ligações éster (C=O) e uretano (N-H), respectivamente. Assim, pode-se inferir que a amostra PU nova se trata de uma resina poliuretana, com corante.

A tabela 5 mostra os resultados de dureza Shore obtidos na superfície dos rolos poliméricos novo e usado. Não há diferença aparente de dureza entre a condição nova e usada.

Amostra	Tipo	Medidas					Média
		1º	2º	3º	4º	5º	
PU usado	Shore D	51,2	48,1	49,4	49,9	51,6	50,0
PU novo		49,8	51,7	49,4	49,3	50,8	50,2

**Tabela 5.** Ensaio de dureza Shore nas amostras de PU.

No que diz respeito aos resultados dos ensaios de resistência ao desgaste para as amostras em PU novo e usado apresentados na tabela 6, observa-se que o rolo usado possui uma resistência ao desgaste maior do que o rolo novo.

Amostra	Densidade (g/cm³)	Perda de volume relativo (mm³)	Média (mm³)
PU novo	1,121	47	46
		47	
		43	
PU usado	1,117	62	59
		62	
		53	

**Tabela 6.** Ensaio de resistência ao desgaste das amostras de rolos metálicos

### 2.3 Análise de rugosidade e ângulo de contato da superfície dos rolos

Para as análises de rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil, a fim de correlacionar os resultados com as propriedades de adesão estudadas. Já as medidas de ângulo de contato foram realizadas a fim de avaliar de que forma a natureza físico-química das diferentes superfícies afetam na adesão do minério na superfície do rolo classificador.

As medidas foram realizadas nos rolos de HH novo e usado, no rolo revestido com WC, no rolo tratado termicamente com TIG e nos rolos poliméricos de PU novo e usado. Para o rolo de HH, a superfície foi lixada com lixas de diferentes granulações, e também contaminadas com poeira de minério de Fe e solução salina. Os resultados dos parâmetros de Ra e Rz bem como os ângulos de contato obtidos para cada amostra estão apresentados na tabela 7.

Amostra	Rugosidade superficial		Ângulo de contato (°)	
	Ra	Rz	Média geral	Mínimo
Rolo PU novo	0,49	3,60	89,3	87,2
Rolo PU usado	0,26	1,33	94,8	89,7
Rolo HH - lixa 120	0,70	5,26	97,0	95,7
Rolo HH - lixa 240	0,57	4,39	96,9	96,3
Rolo HH - lixa 600	0,13	1,15	97,1	95,7
Rolo HH - lixa 1200	0,10	0,90	92,7	91,9
Rolo HH usado	0,95	4,87	98,8	95,6
Rolo revestido	0,34	5,49	106,0	103,1
Rolo tratado com TIG	0,32	2,52	92,0	90,6
Rolo HH sem contaminação	0,95	4,87	91,8	90,9
Rolo HH contaminado com poeira de minério de Fe	-	-	59,8	55,0
Rolo HH contaminado com solução salina	-	-	36,5	35,7

**Tabela 7.** Análise de rugosidade e ângulo de contato

A figura 10 mostra graficamente um comparativo dos ângulos de contato entre os diferentes materiais. É possível observar que a amostra com maior ângulo de contato é a do rolo revestido em WC, indicando uma maior hidrofobicidade, ou seja, menor afinidade pela água. Resultados da literatura (TONG, et al, 1994) indicam que quanto maior o ângulo de contato menor a tensão de adesão. Outra observação interessante é que as amostras de rolo de HH não possuem variação significativa de ângulo de contato entre as condições novo, usado e lixado, exceto pela condição lixado com lixa 1200, a qual mostrou uma redução do ângulo de contato. A amostra de HH submetida ao tratamento de TIG indicou o menor ângulo de contato entre todos os rolos metálicos e não contaminados, seguido dos rolos de PU. Adicionalmente, é possível observar que as amostras de HH contaminadas com poeira de minério de Fe e solução salina indicam os menores valores de ângulo de contato de todos os materiais analisados, com redução significativa quando comparadas com o rolo de HH sem contaminação. Isto sugere que estas situações de contaminação superficial apresentem maior afinidade pela água e, conseqüentemente, maior energia adesiva.

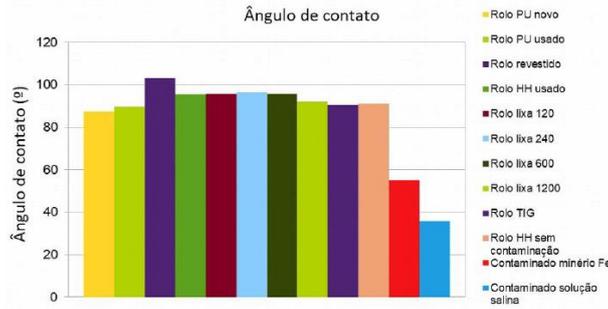


Figura 10 Ângulo de contato dos diferentes tipos de rolos e em diferentes condições

A figura 11 apresenta as matrizes de cada parâmetro estudado nos ensaios de tensão adesiva para cada tipo de rolo classificador.

UMIDADE					CONTAMINAÇÃO SUPERFICIAL														
Matriz de ensaios		Minério				Matriz de ensaios		Minério											
		M1	M2	M3	M4			M1	M2	M3	M4								
Rolo	HH	U <sub>1</sub> =9,5 %	U <sub>1</sub> =8,5 %	U <sub>1</sub> =7,8 %	U <sub>1</sub> =11,0 %	Rolo	HH	U <sub>1</sub> =9,5 %	U <sub>1</sub> =9,5 %	U <sub>1</sub> =9,5 %	U <sub>1</sub> =9,5 %								
	RV	U <sub>2</sub> =13,0 %	U <sub>2</sub> =9,5 %	U <sub>2</sub> =9,0 %	U <sub>2</sub> =13,0 %			U <sub>2</sub> =13,0 %	U <sub>2</sub> =13,0 %	U <sub>2</sub> =13,0 %	U <sub>2</sub> =13,0 %	U <sub>2</sub> =13,0 %							
	TIG	U <sub>3</sub> =14,0 %	U <sub>3</sub> =11,5 %	U <sub>3</sub> =10,7 %	U <sub>3</sub> =15,0 %			U <sub>3</sub> =14,0 %	U <sub>3</sub> =14,0 %	U <sub>3</sub> =14,0 %	U <sub>3</sub> =14,0 %	U <sub>3</sub> =14,0 %							
	PU																		
Para os ensaios de variação de umidade foram utilizados:					P = 50kg v = 6mm/min T = 23°C Rugosidade = padrão de cada rolo (como recebido)					Para os ensaios de contaminação superficial foram utilizados:					C <sub>1</sub> = Depósito de minério de Fe C <sub>2</sub> = Depósito de sal P = 50 kg v = 6 mm/min T = 23°C				

RUGOSIDADE					
Matriz de ensaios		Minério			
		M1	M2	M3	M4
Rolo	HH	R <sub>1</sub> = R <sub>a</sub> (0,9) R <sub>2</sub> = R <sub>a</sub> (2,5)			
Para os ensaios de variação de rugosidade foram utilizados:					U = padrão de cada minério (%) P = 50 kg v = 6 mm/min T = 23°C

Figura 11 Matrizes para os ensaios de tensão adesiva por parâmetro de variação

## 2.4 Quantificação da agregabilidade do minério na superfície dos rolos

Para efeito de quantificação da agregabilidade de minério aos rolos ficou definida a energia adesiva, como sendo o produto da força necessária para destacamento do minério da superfície do rolo pelo deslocamento, como ilustrado na figura 12, extraída de um gráfico real dos ensaios.

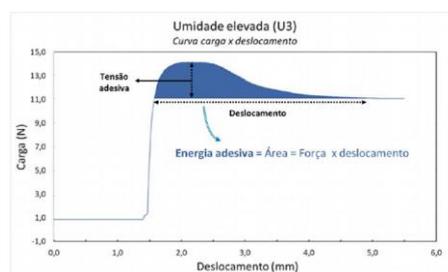


Figura 12 Curvas carga-deslocamento obtida na umidade elevada (U3) para o minério da M2

A figura 13 apresenta os gráficos de energia adesiva em função do teor de umidade mostrando o efeito do tipo de rolo, para todos os minérios. É possível observar que, inicialmente, ocorre um aumento linear da energia adesiva com o aumento do valor de umidade em todos os casos. Aproximadamente no nível U2 de umidade, observa-se uma inflexão na curva e a energia de adesão aumenta expressivamente, resultando em um comportamento bi-linear para todas as condições rolo-minério analisadas.

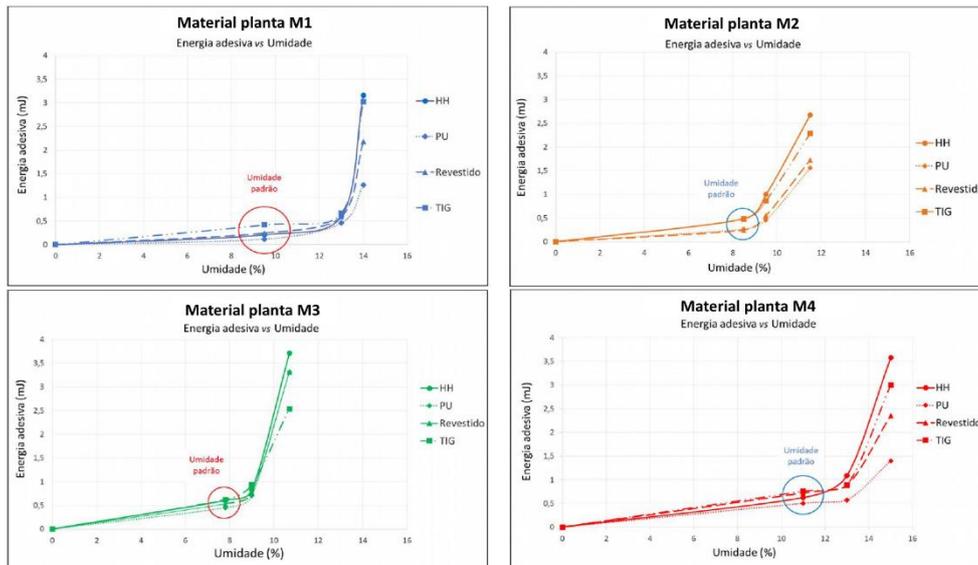


Figura 13 Energia adesiva em função do teor de umidade para todos minérios e rolos testados

É importante notar que sob condições padrões de umidade (U1), as diferenças de energia entre os diferentes tipos de materiais são pequenas, ou seja, sob condições ideais de operação, a chance de adesão é baixa, independente da natureza de material. Porém, sob uma condição de desequilíbrio de umidade, as diferenças de energia adesiva entre os rolos se acentuam expressivamente, resultando em mudanças de comportamento em campo.

Para todos os rolos analisados os minérios das Usinas M2 e M3 apresentam uma inflexão da curva em teores de umidade significativamente menor que os minérios das usinas M1 e M4. Isto pode ser explicado conforme já descrito no item 2.1, pela menor superfície específica dos minérios M2 e M3, que requerem uma quantidade de água menor para atingir o ponto de umidade ideal.

Como já observado anteriormente no item 2.3, existe uma baixa correlação entre rugosidade e ângulo de contato. Isto sugere que do ponto de vista de agregação de minério, a natureza química do rolo ou de sua superfície é mais importante do que o acabamento superficial. De fato, a análise do efeito de rugosidade superficial (figura 14) mostra que mesmo para uma alta rugosidade ( $R_a = 2,5$ ) não há uma variação significativa da energia de adesão.

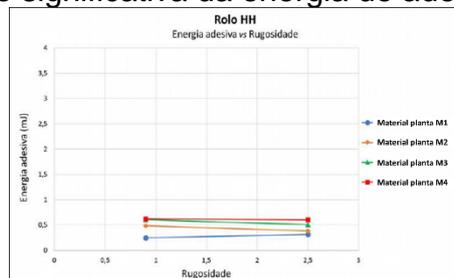


Figura 14 Energia adesiva em função rugosidade para todos minérios e rolos HH

Foram avaliados os efeitos de depósito de minério e de depósito de sal sobre a superfície do rolo, nas umidades U1, U2 e U3. Os resultados de energia adesiva foram comparados com o rolo de HH limpo e está apresentado na figura 15. O minério usado para esta análise foi o da Usina M2.

É possível perceber que em condições de distúrbios de processo, com descontrole da umidade, a presença de contaminantes nos rolos favorece muito

mais a agregação de minério nos rolos, visto que quando comparada a energia adesiva

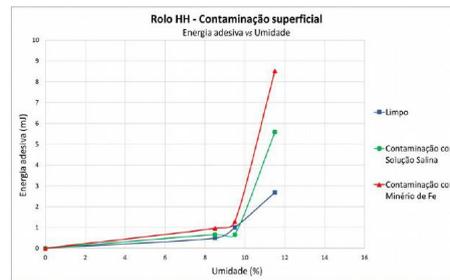


Figura 15 Energia adesiva em função da umidade e contaminação superficial do rolo HH

### 3 CONCLUSÃO

A trajetória de entendimento do fenômeno de agregação e desgaste prematuro em rolos classificadores é longa e as hipóteses/soluções até este trabalho sempre ficaram no campo do empirismo. A partir deste trabalho inicia-se a possibilidade da quantificação de um fenômeno que permite o desenvolvimento prévio e avaliação de materiais e/ou modos de operação/processo que eliminem esta condição crítica para a classificação de pelotas verdes.

Dentre os avanços na compreensão do problema destaca-se a importância da relação direta entre umidade específica e a energia adesiva, a ausência de correlação forte da rugosidade na superfície dos rolos e energia adesiva, o entendimento sobre a propriedade de molhabilidade da superfície dos rolos como fenômeno de agregação e a possibilidade de conhecimento do ponto de operação em relação da planta em relação ao ponto crítico para a ocorrência da agregação.

A análise da umidade específica mostrou que os minérios com superfície específica medida pelo método B.E.T. menor (Usina M2 e Usina M3) possuem mais água disponível entre partículas na condição de umidade padrão de operação e, portanto, necessitam de menos água para atingir o ponto de inflexão da energia adesiva. No entanto, de um modo geral, quanto maior a umidade, maior a energia adesiva, para qualquer dos rolos ou minérios esta correlação é positiva, e para rolos revestidos em carbetos de tungstênio a energia adesiva é menor em condições de maiores umidades.

O trabalho refere-se a apenas algumas das prováveis causas da agregação de minério em rolos classificadores. Como trabalhos futuros sugere-se a investigação de outros fatores/variáveis do processo de produção de pelotas e dos rolos classificadores que possam influenciar na ocorrência e solução do problema de agregação.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale pela oportunidade de aperfeiçoamento profissional para embasamento técnico na condução de projetos com foco na melhoria do desempenho dos ativos. Agradecimento também à Gerência Executiva de Engenharia de Manutenção e Processos da Pelotização e Gerência Executiva de Operação da Pelotização Tubarão e Utilidades por viabilizarem a execução do trabalho de pesquisa. Agradecimentos ao corpo profissional do Materials Institute of Brazil pela disposição e parceria na execução e condução do projeto.

## REFERÊNCIAS

- 1 Meyer K. Pelletizing of Iron Ores. Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- 2 Cruz AFF, Haagensen EB, Zanon LR, Regattieri WWD, Machado MM, Aumento da eficiência energética em fornos de pelotização, ABM WEEK, 2018.
- 3 Fonseca VO, Campos AR. Capítulo 15 – Aglomeração - Tratamento de Minérios – 6ª Edição, CETEM, 2018.
- 4 Plinke J; Prigge J; Willians KC. Development of new analysis methods for the characterization and classification of wet sticky ores. Powder Technology, v.294, p. 252-258, 2016.
- 5 Claro Neto, S. Caracterização físico-química de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseo. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos Brasil (1997)
- 6 Tong, J., Ren, L.; Chen, B.; Quairant, A.R. Characteristics of adhesion between soil and solid surfaces. Journal of Terramechanics, v. 31 (2), p. 93-105, 1994.
- 7 Relatório interno de pesquisa Vale, Rolo classificador: Estudo do efeito de adesão do minério de ferro, 2018.