

# Avaliação do desempenho de rebolos para o esmerilhamento de trilhos

Eric Pretti <sup>1\*</sup> Antônio Ernandes Macêdo Paiva <sup>1</sup> 

## Resumo

Os rebolos representam um percentual expressivo no custo operacional do esmerilhamento de trilhos. Assim, é importante conhecer o desempenho de diferentes modelos deste insumo para a melhor eficiência deste processo de manutenção. Foram testados cinco modelos de rebolo em uma esmerilhadora de trilhos de grande porte, em regime de manutenção da ferrovia. Verificou-se a capacidade de remoção de material, acabamento superficial e homogeneidade no corte. Obtendo-se o volume consumido do rebolo e o material removido do trilho por unidade de tempo, calculou-se o *G-Ratio*, índice utilizado para avaliação de desempenho de ferramentas abrasivas. Dentre as características de cada modelo de rebolo, foi utilizada a informação do tipo de grão abrasivo para correlacionar com o resultado do *G-Ratio*. Os rebolos que apresentaram o melhor resultado tem em sua composição grãos de alumina-zircônia com concentração de até 40% de  $ZrO_2$  e 2%  $TiO_2$ . Em contrapartida, o rebolo com o desempenho mais baixo possui grãos abrasivos com uma menor concentração de zircônia. Os valores encontrados do *G-Ratio* vão desde 10,0 até 17,4, sendo que quanto maior, melhor é a remoção de material por volume consumido do rebolo.

**Palavras-chave:** Rebolo; Esmerilhamento; Abrasivo; Ferrovia.

## Performance evaluation of grinding wheels for rail grinding

### Abstract

The grinding wheels represent an expressive percentage of rail grinding operational costs. Thus, it is important to know the performance of different models of this abrasive tool for the best efficiency of the maintenance process. Five models of grinding wheel were tested in a production rail grinder, in a railway maintenance regime. It was verified the material removal capacity, surface finish, and cut homogeneity. Obtaining the consumed volume of the grinding wheel and the material removed from the rail per unit of time, it was calculated the G-Ratio, index used to evaluate the performance of abrasive tools. Among the characteristics of each grinding wheel model, the type of abrasive grain was used to correlate with the G-Ratio results. The grinding wheels that presented the best results have in their composition alumina-zirconia grains with a concentration of up to 40%  $ZrO_2$  and 2%  $TiO_2$ . In contrast, the wheel with the lowest performance has abrasive grains with a lower zirconia concentration. The values found for the G-Ratio range from 10.0 to 17.4, and the higher the value, the better the material removal per grinding wheel volume consumed.

**Keywords:** Grinding wheel; Rail grinding; Abrasive; Railway.

## 1 Introdução

O esmerilhamento é o principal processo de manutenção nos trilhos instalados em uma ferrovia. Esta técnica consiste em remover uma camada superficial dos trilhos pela ação de ferramentas abrasivas, em formato de superfície de revolução, denominados rebolos [1]. Esta atividade é executada para remover os defeitos provocados pela fadiga de contato na banda de rodagem, conhecido como RCF (*Rolling Contact Fatigue*). Além disso, o esmerilhamento é utilizado para conformar um perfil adequado na superfície do trilho, a fim

de proporcionar melhor aderência e reduzir as tensões de contato com a roda [2].

Para esta atividade, são utilizados Equipamentos de Grande Porte (EGP), conhecidos como trem esmerilhador, compostos por motores elétricos que fornecem a força necessária para a rotação e pressão dos rebolos sobre o trilho. Existem, atualmente, três principais fabricantes de esmerilhadoras de trilho com presença global. Duas delas são de origem estadunidense e a outra, europeia [3].

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Materiais, PPGEM, Instituto Federal do Maranhão, IFMA, São Luís, MA, Brasil.

\*Autor correspondente: ericpretti@gmail.com



A respeito dos rebolos, cada fabricante possui o modelo específico para o seu equipamento e são os vendedores exclusivos deste componente. Por esta razão, informações sobre a composição, como o tipo de grão abrasivo utilizado e o desempenho do rebolo em campo são divulgadas de forma incipiente. São encontradas publicamente, apenas as informações de patentes registradas pelos pesquisadores vinculados aos fabricantes dos materiais abrasivos [4,5].

Desta forma, foi realizado um estudo comparativo com cinco modelos comerciais de rebolos de esmerilhamento, a fim de avaliar o desempenho na sua aplicação, correlacionando com os grãos abrasivos constituintes. Essas informações darão subsídios na escolha do melhor rebolo para o processo de esmerilhamento de trilhos, baseado em critérios técnicos. Além disso, são estabelecidos fundamentos para o desenvolvimento de novos produtos e fornecedores.

## 2 Parâmetros do processo de esmerilhamento de trilhos

A efetividade do esmerilhamento de trilhos depende dos recursos que o equipamento utilizado possui e dos parâmetros de operação. O primeiro critério a definir é a quantidade de motores de esmerilhamento e conseqüentemente, a quantidade de rebolos ( $n$ ), sendo esta proporcional à capacidade de remoção de material. Os demais critérios avaliados são a velocidade de avanço do equipamento ( $v_o$ ), rotação dos motores ( $v_r$ ), potência aplicada no motor de esmerilhamento ( $P_e$ ), assim como os ângulos de corte ( $\alpha_e$ ), a altura removida ( $h_e$ ) e a largura da faceta ( $l_e$ ) [6].

Os equipamentos atuais, de maior capacidade, operam com motores elétricos de 22,4 kW de potência a uma rotação de 3.600 rpm. Utilizando-se um rebolo com diâmetro padrão de 260 mm, a velocidade de rotação  $v_r$  é de 48,0 m/s. Porém, o que determina a velocidade de operação  $v_o$  é o avanço do equipamento. Para  $v_o = 18$  km/h, um rebolo aplica até 9 revoluções de corte por metro esmerilhado. Com  $v_o = 6$  km/h, há pelo menos 30 revoluções de corte por metro [7].

Assim como o ângulo de esmerilhamento, a potência do motor pode variar a depender do perfil que se deseja implantar no trilho. A área do contato entre o rebolo e o trilho é diferente para cada posição a ser esmerilhada. Da mesma forma, a potência aplicada leva em conta a posição, para que não haja remoção excessiva em uma determinada região, tentando manter o corte mais homogêneo.

A altura removida é um dos principais parâmetros para avaliação da capacidade de corte no processo de esmerilhamento.

Conforme relatório técnico elaborado por Sroba [8], tem-se os resultados de experimentos correlacionando a altura de remoção de material ( $h_e$ ) em função da velocidade de operação com  $P_e = 16$  kW (Figura 1) e em função potência do motor com  $v_o = 15$  km/h (Figura 2).

Dada a composição de diferentes arcos que compõem o perfil do boleto de um trilho, dependendo do ângulo de corte no esmerilhamento, a altura removida também sofrerá variações. A Figura 3 apresenta esta relação, considerando  $P_e = 16$  kW e  $v_o = 15$  km/h.

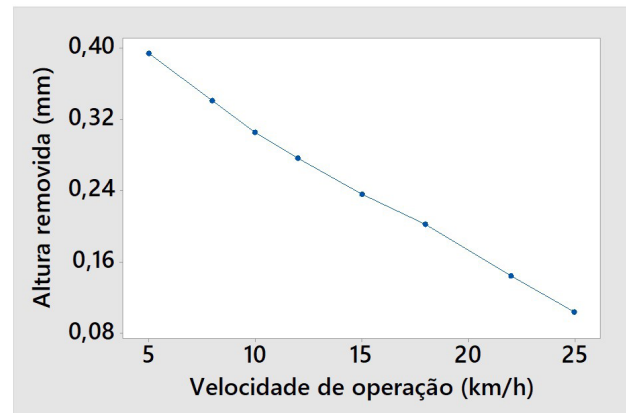


Figura 1. Gráfico de  $v_o$  versus  $h_e$ .

Fonte: Adaptado de Sroba [8]

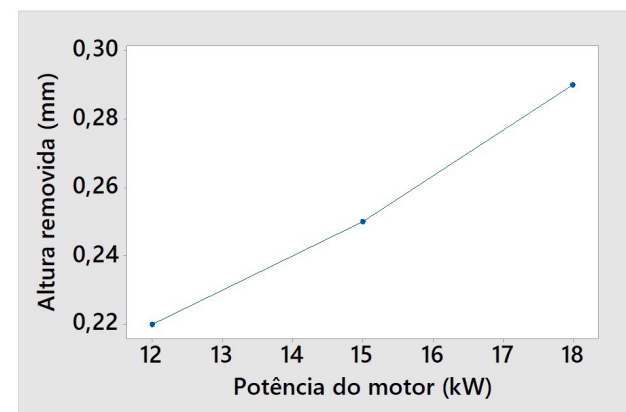


Figura 2. Gráfico de  $P_e$  versus  $h_e$ .

Fonte: Adaptado de Sroba [8]

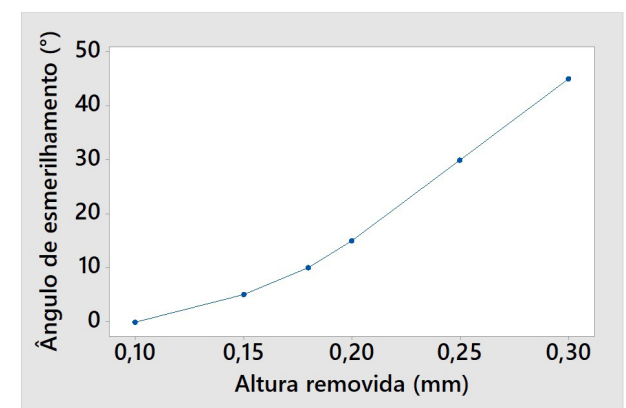


Figura 3. Gráfico de  $h_e$  versus  $\alpha_e$ .

Fonte: Pretti [9]

**Tabela 1.** Rebolos utilizados no teste

Modelo	Tipo do grão	Tamanho do grão	Tamanho máximo do grão (mm)	Tamanho médio do grão (mm)	Tamanho mínimo do grão (mm)	Origem
A	$Al_2O_3 / Al_2O_3 + ZrO_2 / SiC$	F14	2,36	1,40	1,00	Brasil
B	$Al_2O_3 / Al_2O_3 + ZrO_2$	F14	2,36	1,40	1,00	EUA
C	$Al_2O_3 / Al_2O_3 + ZrO_2$	F16	2,00	1,18	0,85	EUA
D	$Al_2O_3 / Al_2O_3 + ZrO_2$	F14	2,36	1,40	1,00	EUA
E	$Al_2O_3 + ZrO_2$	F14	2,36	1,40	1,00	Europa

### 3 Procedimento experimental

#### 3.1 Material utilizado

Os cinco rebolos utilizados estão discriminados na Tabela 1 abaixo, sendo identificados com as letras de “A” a “E” com o intuito de preservar a identificação do fabricante. As informações do tipo do grão abrasivo foram obtidas no estudo de caracterização das amostras [10], assim como o tamanho do grão, o qual foi classificado conforme a norma NBR ISO 8486-1 [11]. Em um primeiro momento, não foi considerada a variação na concentração e formulação dos tipos de grãos abrasivos.

As dimensões de cada modelo estão apresentadas na Tabela 2, com referência às dimensões descritas na Figura 4. Esta informação consta na referência de cada fornecedor e foi necessária para o cálculo do consumo dos rebolos em teste.

Todos os rebolos utilizados possuem o aglutinante constituído por resina fenólica. Parte das especificações dos modelos testados, tais como a dureza e estrutura, não foram informadas pelos seus fabricantes. Nem todos seguem a norma NBR ISO 525 [12] na codificação do seu produto. Por este motivo, estes dados não foram apresentados.

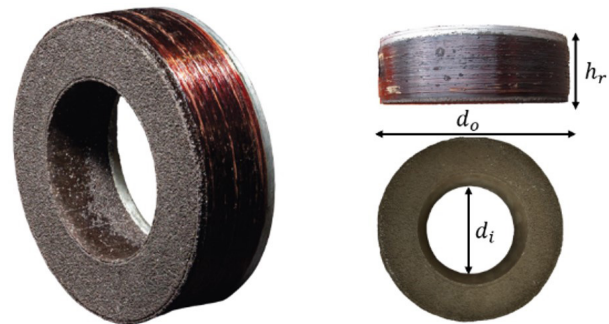
#### 3.2 Equipamento utilizado

Os testes em campo com os rebolos foram realizados na esmerilhadora de trilhos PGM-96 (Figura 5). Este equipamento possui 96 motores de esmerilhamento, sendo distribuídos em 3 carros com 32 motores cada. Considerando o trilho, são 48 rebolos para cada lado da ferrovia. Nos testes de avaliação dos rebolos, foi utilizado apenas o lado esquerdo do equipamento. Desta forma, foram utilizadas 48 unidades de reboło para cada modelo em teste, sendo instalados em momentos distintos. A Figura 6 apresenta um motor de esmerilhamento com o reboło instalado, apoiado sobre o trilho.

Pelas características do traçado da ferrovia em que foram realizados os testes (predominância de tangentes, proporção equilibrada de curvas para direita e esquerda, assim como grandes raios), não foi considerada a variação dos locais de teste para cada modelo de reboło. Os trilhos utilizados nesta ferrovia são todos fabricados em aço perlítico, com tratamento térmico para endurecimento do boleto e dureza maior que 350 HB – *Hardness Brinell*. Portanto,

**Tabela 2.** Dimensões dos rebolos de teste

Modelo	Diâmetro externo $d_o$ (mm)	Diâmetro interno $d_i$ (mm)	Altura $h_r$ (mm)
A	259,9	152,4	95,0
B	259,9	152,4	84,0
C	259,9	152,4	88,9
D	259,9	152,4	84,0
E	259,9	153,9	82,0

**Figura 4.** Reboło de esmerilhamento

os trilhos foram considerados como uma variável aleatória com distribuição equivalente, sem influência nos resultados.

Os parâmetros de operação durante a avaliação dos rebolos estão relacionados abaixo. Foram adotados os valores comumente utilizados durante a operação padrão da esmerilhadora:

- $n = 48$  rebolos (para cada modelo);
- $v_o = 15$  km / h;
- $v_r = 48$  m / s;
- $P_e = 15$  kW (min); 18,5 kW (max); 17,5 kW (med)
- $\alpha_e = +45^\circ$  a  $-11^\circ$ , variando para cada reboło.

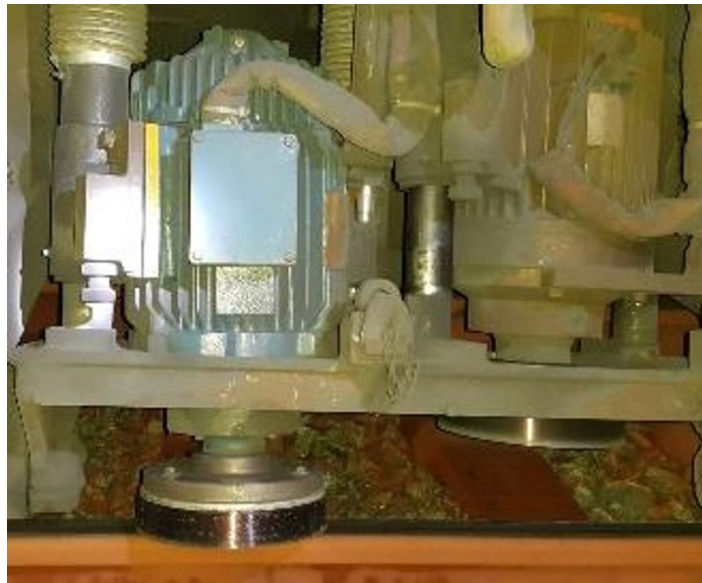
#### 3.3 Instrumentos de medida utilizados

Para a medição do material removido, foi utilizado um perfilômetro digital (Figura 7). Foram realizadas medidas





**Figura 5.** Esmerilhadora de trilhos PGM-96



**Figura 6.** Motores de esmerilhamento



**Figura 7.** Perfilômetro digital

da área da seção transversal do trilho na via em três pontos equidistantes de 50 metros. As medidas foram realizadas antes e depois do passe de esmerilhamento para comparação e obtenção da área removida.

As medições realizadas com o perfilômetro digital contém os registros dos desgastes vertical (W1), horizontal (W2) e diagonal (W3) conforme a Figura 8.

Ao longo dos testes, os rebolos foram monitorados com um gabarito para identificar o fim da vida útil (Figura 9). Quando a espessura atingisse a faixa vermelha do gabarito, o rebolo era removido para a conferência da sua espessura final com um paquímetro digital de 150 mm.

### 3.4 Metodologia para cálculo de vida útil

Foi anotado o tempo em serviço de cada rebolo, desde o início da operação até a sua remoção. Como os rebolos são removidos com alturas distintas, foi registrada a espessura final de cada rebolo para cada modelo. Sabendo que foi utilizado  $v_o = 15 \text{ km/h}$  para os testes e conhecendo as dimensões de cada um (Tabela 2), subtraiu-se a espessura do rebolo novo

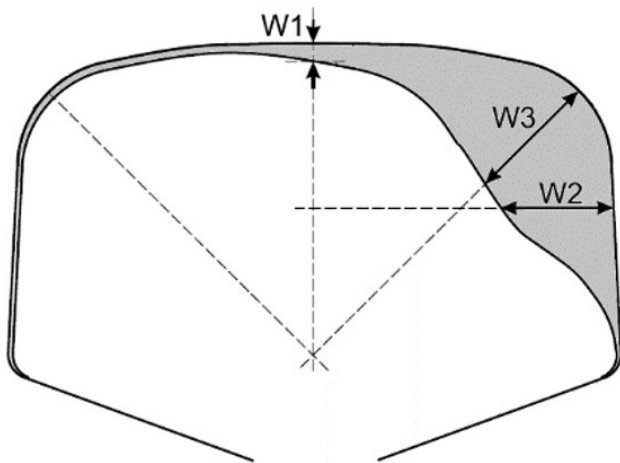


Figura 8. Referência das medições do trilho



Figura 9. Gabarito de rebolo (esquerda) e comparação entre novo e usado (direita)

pelo usado e multiplicou-se pela área do rebolo. O volume encontrado foi dividido pelo tempo em serviço do rebolo, obtendo-se o valor de consumo em  $\text{cm}^3/\text{h}$  para cada unidade.

Sabendo ainda a área removida do trilho obtida pelo perfilômetro digital e a velocidade de operação ( $v_o$ ) estabelecida como parâmetro constante, pode-se inferir a taxa de remoção de material e o volume total removido. Por fim, com base nesses dados, é possível calcular a razão de esmerilhamento (*Grinding Ratio*). Este indicador é amplamente utilizado na indústria para comparação da eficiência de ferramentas abrasivas. Para este trabalho, trata-se da razão entre o volume de material removido do trilho e o volume desgastado do rebolo.

## 4 Resultados do teste

### 4.1 Acabamento superficial

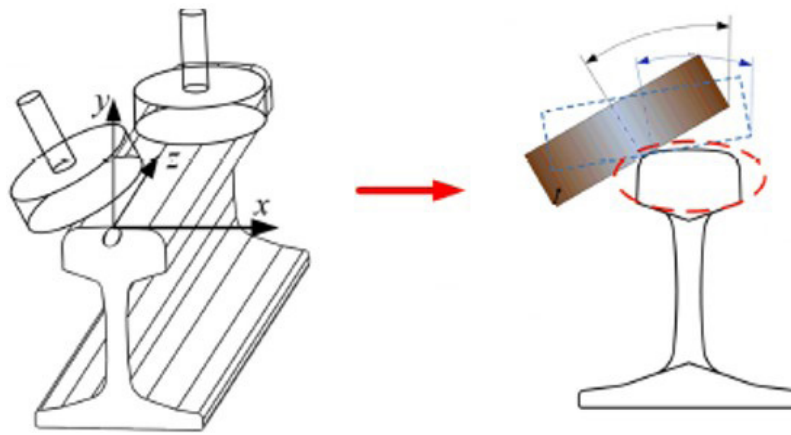
O primeiro critério avaliado foi o acabamento superficial no trilho, após um passe de esmerilhamento. Os 48 motores foram dispostos em ângulos distribuídos de  $-11^\circ$  (campo) até  $+45^\circ$  (bitola). A esmerilhadora PGM-96 tem a capacidade de comandar  $\alpha_e$  apenas para cada par de motor. A combinação de ângulos utilizada foi para o esmerilhamento de conformação de perfil com o ponto de contato centralizado. A Figura 10 ilustra a disposição dos rebolos sobre o trilho durante o esmerilhamento.

Foi escolhida uma região em tangente da ferrovia para esta parte do experimento. A avaliação de acabamento superficial foi feita por inspeção visual, com registro fotográfico para verificar a regularidade do corte e indícios de superaquecimento, evidenciado por marcas azuladas, conhecidas como *bluing* [14].

As Figuras de 11 a 15 apresentam o acabamento superficial dos testes com os rebolos A a E, respectivamente. Estão sendo apresentadas apenas uma seção da superfície do boleto esmerilhado. As imagens foram registradas com câmera digital imediatamente após o processo do esmerilhamento.







**Figura 10.** Ângulos de esmerilhamento.

Fonte: Adaptado de Xie et al. [13]



**Figura 11.** Acabamento superficial do rebole A



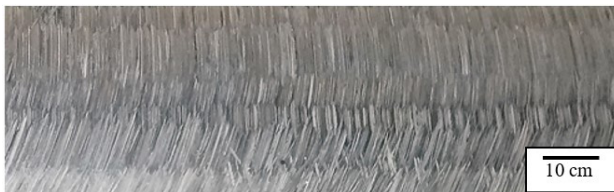
**Figura 12.** Acabamento superficial do rebole B



**Figura 13.** Acabamento superficial do rebole C



**Figura 14.** Acabamento superficial do rebole D



**Figura 15.** Acabamento superficial do rebole E

A partir das imagens registradas, nota-se pelo acabamento superficial que o rebole A foi o único que apresentou marcas azuladas de queima (indicado por seta na Figura 11), evidenciando superaquecimento no corte.

Como consequência, pode haver um aumento na formação de camada branca (WEL – *White Etching Layer*). Isto torna a superfície do trilho mais dura e frágil pela mudança de fase do aço perlítico, transformando-se em martensita.

Realizando uma comparação qualitativa, as demais figuras denotam uma regularidade nas facetas de esmerilhamento, apresentando uma rugosidade grosseira, comum ao corte realizado por este processo, principalmente em trilhos de alta dureza. Entretanto, o acabamento superficial realizado pelo rebole C (Figura 13), apresenta sulcos mais finos em comparação aos demais rebolos. Atribui-se esta diferença ao tamanho do grão do rebole C (F16 ~ 1,08 mm) em comparação aos demais rebolos (F14 ~ 1,29 mm).

#### 4.2 Remoção de material

Juntamente com a avaliação do acabamento superficial, foram realizadas as medições para o cálculo da taxa de remoção de material. As medições da seção transversal do trilho esmerilhado, obtidas com o uso do perfilômetro digital possibilitaram calcular a área removida para cada modelo de rebole, ao comparar os perfis antes e depois do esmerilhamento. Os valores da média das três medições estão apresentados na Tabela 3.

O material removido é consequência do trabalho dos 48 rebolos utilizados simultaneamente, cada um com uma inclinação pré-definida. A remoção de material para cada rebole não é exatamente a mesma. No entanto, considera-se que a área da seção transversal removida do boleto do trilho é uma média aritmética do corte de cada rebole. Os valores obtidos para cada modelo de rebole estão apresentados na Tabela 4.

Todos os rebolos obtiveram resultados próximos quanto à remoção de material. Apenas o rebole E teve um desempenho levemente inferior, seguido do rebole A.

Com este resultado, buscou-se a correlação dos tipos de grãos abrasivos utilizados em cada modelo de rebole testado.

Por parte dos fabricantes de rebolo, é divulgado apenas que o grão abrasivo utilizado é de alumina-zircônia, podendo haver misturas de outros tipos de grãos como alumina pura ou o carbetto de silício. Esta informação não é suficiente para buscar correspondência com a remoção de material pelo rebolo, pois para a mesma alumina-zircônia, existem tipos diferentes de grãos abrasivos comerciais [15-17].

Os rebolos testados foram então analisados em laboratório quanto à composição química dos seus grãos abrasivos. Foi realizada uma análise por MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura com EDS - Espectroscopia por Dispersão de Elétrons para a identificação dos elementos químicos dos grãos [10]. Dado que foi extraída apenas uma pequena amostra de cada modelo, foi elaborada uma tabela qualitativa indicando o tipo do grão abrasivo encontrado em cada rebolo (Tabela 5). O símbolo (+) na tabela representa a concentração do respectivo grão em cada rebolo.

**Tabela 3.** Medições realizadas com o perfilômetro

Modelo	W1 [mm]	W2 [mm]	W3 [mm]
A	0,138	0,011	0,052
B	0,152	0,053	0,216
C	0,184	0,000	0,186
D	0,187	0,004	0,415
E	0,096	0,000	0,345

**Tabela 4.** Área removida do boleto

Modelo	Área removida [mm <sup>2</sup> ]	Desv. pad. área removida [mm <sup>2</sup> ]	Área removida por rebolo [mm <sup>2</sup> ]
A	15,682	0,605	0,327
B	16,181	1,794	0,337
C	16,153	2,097	0,337
D	16,377	1,442	0,341
E	15,001	1,235	0,313

**Tabela 5.** Grãos abrasivos por rebolo

Modelo	I	II	III	IV	V
A	+	+++			++
B	+		+++	++	
C	+			+++++	
D	+	++		+++	
E		+	++	+++	

**Tabela 6.** Consumo médio do rebolo

Modelo	Média [cm <sup>3</sup> /h]	Desv. pad. [cm <sup>3</sup> /h]	Mínimo [cm <sup>3</sup> /h]	Máximo [cm <sup>3</sup> /h]
A	507,7	144,2	278,5	887,7
B	538,0	219,2	83,5	1131,3
C	293,5	69,0	184,5	570,9
D	383,2	110,8	160,1	678,8
E	437,9	159,2	217,0	1040,4

Os grãos abrasivos identificados foram numerados de I a V, sendo descritos abaixo, com o percentual estimado em massa:

- I - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- II - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (≤ 75%) + ZrO<sub>2</sub> (≤ 25%);
- III - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (≤ 60%) + ZrO<sub>2</sub> (≤ 40%);
- IV - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (≤ 60%) + ZrO<sub>2</sub> (≤ 40%) + TiO<sub>2</sub> (≤ 2%);
- V - SiC;

Com base na Tabela 5 e nos resultados de remoção de material, é possível correlacionar a ausência de grãos de alumina pura no rebolo E, sendo este um abrasivo mais duro, o desempenho inferior no corte deste modelo. O carbetto de silício encontrado no rebolo A, apesar de ser também um abrasivo de maior dureza, não proporcionou uma melhor capacidade de corte, comparado com os demais modelos que não possuem este tipo de grão.

### 4.3 Vida útil dos rebolos

Após os testes para a análise de acabamento superficial e remoção de material, os rebolos foram mantidos no equipamento para avaliação da vida útil. Todos eles foram submetidos ao regime de operação da esmerilhadora, sendo removidos até o limite de uso, monitorados por gabarito. Com a espessura final medida e os diâmetros interno, externo e a altura de cada modelo, calculou-se o volume total consumido por unidade. Juntamente com tempo total em serviço, calculou-se a taxa de consumo de cada modelo de rebolo em cm<sup>3</sup>/h (Tabela 6):

Dado o alto desvio padrão encontrado, foi realizada uma técnica estatística para a remoção dos valores discrepantes. Considerando que os testes foram realizados em uma esmerilhadora durante a atividade de manutenção na via, era esperado o registro de grandes variações nas medições.

Desta forma, utilizou-se o método de Tukey [18] para a remoção dos *outliers*.

Assim, foram calculados os quartis Q1, Q3 e a Faixa Interquartil (FIQ) para a obtenção dos valores de limite inferior e superior a serem considerados na análise. A partir disto, retiraram-se as medidas fora dos limites para cada modelo de rebolo. A Tabela 7 traz uma atualização da Tabela 6, com os valores discrepantes removidos.

Os valores corrigidos foram representados na Figura 16 através de um gráfico *boxplot* (diagrama de caixa). Tem-se as médias, máximos, mínimos e quartis das medições ajustadas para cada modelo de rebolo.

#### 4.4 Grinding ratio

Com as médias ajustadas da taxa de consumo dos rebolos (em  $cm^3/h$ ), sabendo da área removida para cada modelo (em  $mm^2$  - Tabela 4) e com  $v_o = 15 km/h$ , estimou-se o valor de *Grinding Ratio* (*G-Ratio*) para cada modelo. Os valores calculados para cada modelo de rebolo se encontram na Figura 17.

Tabela 7. Consumo médio do rebolo (ajustado)

Modelo	Quantidade de rebolos (n)	Média [ $cm^3/h$ ]	Desv. pad. [ $cm^3/h$ ]
A	44	491,5	120,6
B	41	502,4	145,7
C	46	289,8	55,6
D	40	360,6	70,1
E	45	409,0	113,7

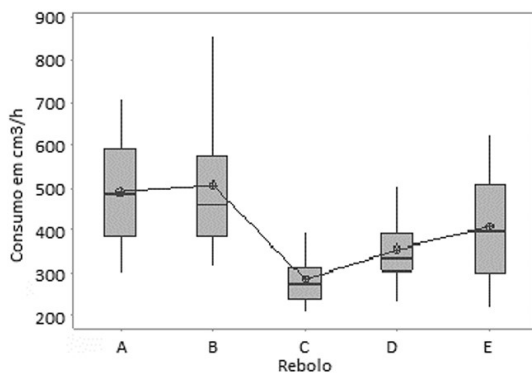


Figura 16. Boxplot do consumo de rebolos

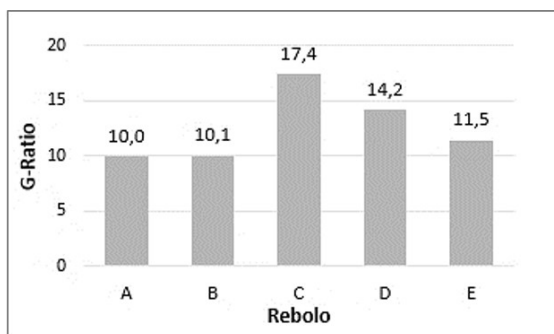


Figura 17. *G-Ratio* dos rebolos de teste

Analisando apenas a área de removida do boleto do trilho, apresentada na Tabela 4, vê-se que a diferença é sutil para cada modelo de rebolo. No entanto, a principal influência na variação dos resultados do *G-Ratio* é atribuída a diferença de consumo dos rebolos analisados. Vale ressaltar que a velocidade média de avanço, assim como os ângulos de corte e pressão dos motores foram mantidos constantes para cada modelo de rebolo em teste.

É interessante observar que os rebolos A e B possuem um *G-Ratio* similar, associados principalmente ao alto consumo destes dois modelos. A ausência de grãos abrasivos do tipo III e IV, os quais possuem uma maior concentração de zircônia e consequentemente, maior tenacidade à fratura, pode ter sido a causa preponderante para a menor vida útil do rebolo A. No caso do rebolo B, embora possua a maior concentração de grãos do tipo III, estima-se a influência de outras variáveis, tais como a concentração de poros e os elementos de carga ativa utilizados no aglutinante. Essas informações são importantes para estudos futuros sobre a caracterização de rebolos para esmerilhamento de trilhos.

Conforme a Tabela 5, os rebolos C, D e E são os que possuem uma maior quantidade do grão tipo IV. Este é considerado o abrasivo que possui melhor desempenho, pois além da concentração de até 40% de  $ZrO_2$ , a associação com  $TiO_2$  promove um aumento na resistência mecânica do grão abrasivo [19]. Desta forma, a sua vida útil é superior. Porém, o rebolo C se destaca com uma maior proporção do grão tipo IV e isso refletiu em um menor consumo em comparação aos demais modelos. Consequentemente, o rebolo C foi que o que apresentou o melhor desempenho, obtendo o valor mais alto de *G-Ratio*.

Pode-se considerar que o rebolo E teve um desempenho intermediário com relação ao seu valor do *G-Ratio*. Mesmo possuindo um consumo menor se comparado aos modelos A e B, o rebolo E foi o que teve a menor taxa de remoção de material. Atribui-se este resultado à ausência de grãos tipo I, pois a alumina pura possui maior dureza que o grão composto com zircônia (embora mais friável) e assim, promove uma maior capacidade de corte da ferramenta abrasiva.

#### 5 Conclusões

Os cinco modelos de rebolo testados trouxeram resultados importantes para melhor entendimento sobre o esmerilhamento de trilhos.

A escolha adequada do material abrasivo pode ser determinante para a eficiência deste processo de manutenção. Considerando as mesmas condições operacionais, a maior diferença de desempenho entre os rebolos testados foi superior a 70%.

Apesar do menor tamanho médio de grão abrasivo encontrado no rebolo C, este não apresentou um menor desempenho no corte. Em contrapartida, a menor granulometria promoveu um acabamento mais suave na superfície do trilho, com menores sulcos. A respeito das marcas de queima



apresentadas no esmerilhamento realizado com o rebolo A, não foi identificado o motivo.

Mesmo que este modelo de rebolo tenha sido o único com presença de grãos de carbeto de silício, o efeito ocorrido não é atribuído a este tipo de abrasivo. Acredita-se que a queima esteja relacionada com o aglutinante do rebolo, incluindo a influência dos poros.

A principal influência para a discrepância nos resultados de *G-Ratio* foi em função do consumo do

rebolo. Foi verificado que a maior concentração de grãos de alumina-zircônia com até 40% de  $ZrO_2$ , associado com até 2% de  $TiO_2$ , teve forte influência no aumento de vida útil do rebolo. Este tipo de abrasivo é considerado mais nobre que os demais e conseqüentemente, possui um maior valor comercial. O carbeto de silício encontrado no rebolo A não traduziu em uma característica distinta para este modelo. Possivelmente, o fabricante incluiu este tipo de grão abrasivo para a redução no custo de produção do rebolo.

## Referências

- 1 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15230: ferramentas abrasivas - uso, manuseio, segurança, classificação e padronização. Rio de Janeiro: ABNT; 2016.
- 2 Sroba P, Roney M. Rail grinding best practices. In: Annual Conference of the AREMA. Illinois: AREMA; 2003.
- 3 Burns A. Rail Grinders [Internet]. American Rails; 2022 [acesso em 25 Fev 2022]. Disponível em: <https://www.american-rails.com/grinders.html>
- 4 Gordon E, Hickory MJW. Grinding wheel abrasive composition. US Patent 5,061,295. 1991 Out. 22.
- 5 Rowse RA, Mass S, Watson GR. Zirconia-alumina abrasive grain and grinding tools. US Patent 3,891,408. 1975 Jun 24.
- 6 International Heavy Haul Association. Guidelines to best practices for heavy haul. International Heavy Haul Association. Virginia: IHHA; 2001. 484 p.
- 7 Zaremski A. Effectiveness of high speed rail grinding on metal removal and grinding productivity. New York: RT&S, Simmons-Boardman Publishing, 2012.
- 8 Sroba, P. PP-08-47 - preventive grinding on Estrada de Ferro Carajás. Pueblo: Transportation Technology Center; 2008. 28 p.
- 9 Pretti E. Esmerilhamento de trilhos na Estrada de Ferro Carajás. VALE: São Luís; 2016. 25 p.
- 10 Pretti E. Caracterização e desempenho de materiais cerâmicos abrasivos para o esmerilhamento de trilhos [dissertação]. São Luís: IFMA; 2022.
- 11 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 8486-1: abrasivos aglomerados - determinação e designação da distribuição da granulometria. Rio de Janeiro: ABNT; 2013.
- 12 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 525: produtos abrasivos aglomerados - requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT; 2013.
- 13 Xie H, Chen X, Zeng W, Qiu W, Ren T. A novel prediction method for rail grinding profile based on an interval segmentation approach and accurate area integral with cubic NURBS. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020;12(7):1-12.
- 14 Zhou K, Ding H, Steenbergen M, Wang W, Guo J, Liu Q. Temperature field and material response as a function of rail grinding parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;175:121366.
- 15 Saint-Gobain. Norzon NV - The sharpest Zirconia grain ever. Worcester: Saint-Gobain; 2011.
- 16 Saint-Gobain. ZF®/ZS® for Bonded Abrasives. Worcester: Saint-Gobain; 2016.
- 17 Saint-Gobain. AZ40 for bonded abrasives. Shanghai: Saint-Gobain; 2017.
- 18 Seo S. A review and comparison of methods for detecting outliers in univariate data sets. Pennsylvania: University of Pittsburgh; 2006.
- 19 Passos ER, Rodrigues JA. The influence of titanium and iron oxides on the coloring and friability of the blue fired aluminum oxide as an abrasive material. *Cerâmica*. 2016;62(361):38-44.

Recebido em: 30 Jul. 2022

Aceito em: 29 Maio 2023