

# Taxa de desgaste e usinagem econômica de rodeiros

Vinicius dos Santos Sanches<sup>1\*</sup>, Luiz Henrique Hungria<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Rumo S.A. – Engenharia de Desenvolvimento. Rua Emílio Bertolini, 100, 82920-030, Curitiba, PR, Brasil.

e-mail: [vinicius.sanches@rumolog.com](mailto:vinicius.sanches@rumolog.com); [hungria@rumolog.com](mailto:hungria@rumolog.com)

**Resumo:** Este artigo demonstrará a metodologia de cálculo para a taxa de desgaste de rodeiros ferroviários e um modelo para o cálculo dos parâmetros ótimos, com o objetivo de se maximizar a vida útil em serviço.

**Palavras-Chaves:** Rodeiro, desgaste, reperfilamento, economia.

## 1. INTRODUÇÃO

O propósito deste artigo é o de demonstrar um método para cálculo da taxa de desgaste de rodeiros ferroviários, tendo como base o desgaste natural do aro do rodeiro somado à usinagem do aro para reconstituição do perfil original, divididos pela distância percorrida em serviço. Através deste método, é possível prever o melhor momento para direcionar o rodeiro para reperfilamento de rodas, a fim de economizar material. Tendo como base esta teoria para o desgaste de rodeiros, apresenta-se um método para cálculo da economia de rodeiros, comparando um processo que direciona o rodeiro para reperfilamento somente no limite de condenação contra o método da mínima taxa de desgaste.

## 2. METODOLOGIA, CONSIDERAÇÕES E AVALIAÇÃO MATEMÁTICA

A Fig. 1 mostra diferentes perfis de uma mesma roda ferroviária, sobrepostos.

De cima para baixo, há o “perfil original” (1) que corresponde ao perfil de uma roda nova. Com o desgaste natural do rodeiro em serviço, entende-se que haverá um desgaste tanto do aro quanto da espessura de friso, representado pelo “perfil desgastado” (2). Entende-se que, se esta roda for enviada para reperfilamento, haverá um ponto em que a

superfície de rolamento será completamente renovada, com mínima remoção de material.

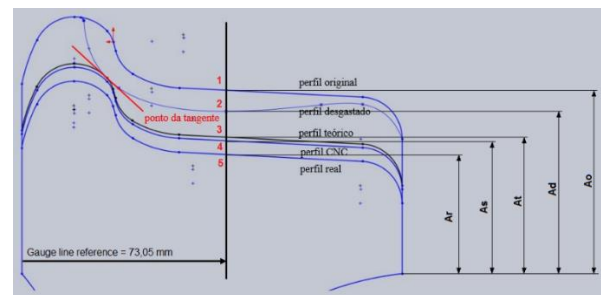


Fig. 1. Perfis das rodas: perfil original, perfil desgastado, perfil teórico, perfil máquina operatriz (CNC) e perfil real, onde os perfis “teórico”, “máquina operatriz (CNC)” e “real” correspondem a perfis usinados (reperfilados).

Este ponto (ponto da tangente) é tangente à superfície desgastada e à superfície mínima reperfilada, a qual é chamada de “perfil teórico” (3). Entende-se que o “perfil teórico” é utópico, ou seja, de reprodução impossível por qualquer máquina operatriz. Desta forma, entende-se que o perfil denominado “perfil máquina operatriz (CNC)” (4) está localizado a uma pequena distância em relação ao perfil teórico. Esta distância é definida pela “precisão de representação de perfil”, valor informado pelo fabricante da máquina operatriz. Mais abaixo, encontra-se o “perfil real” (5), obtido em processos de usinagem em que não há controle da espessura de aro a ser removida para reconstituição do perfil. Nestes

casos, o operador da máquina operatriz efetua a usinagem com profundidade de corte superior à mínima necessária para reconstituição do perfil, com base na experiência adquirida em serviço, com a finalidade de garantir a produtividade e evitar a necessidade de aplicar mais um passe de ferramenta ao rodeiro.

## 2.1 Taxa de desgaste de rodeiros

A taxa de desgaste de rodeiros ( $T_d$ ) é definida pela soma de duas parcelas:

- Taxa de desgaste de aro em serviço ( $T_{es}$ );
- Taxa de recomposição de perfil ou reperfilamento, durante torneamento ( $T_r$ ).

$$T_{d_i}(x) = T_{es}(x) + T_{r_i}(x) \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (1)$$

$f(x)$  = variáveis em função da distância

$i = t, s, r$

$t$  = teórica, calculada via software

$s$  = utilização de máquina operatriz CNC

$r$  = real, encontrada no processo atual

Será demonstrado, portanto que:

$$T_{d_t} < T_{d_s} < T_{d_r}$$

Por definição,  $T_{es}$  corresponde à diferença entre o aro original e o aro desgastado (segmento  $\overline{12}$ ), dividido pela distância percorrida. Logo, com auxílio da Fig. 1, define-se:

$$T_{es}(x) = \frac{\overline{12}}{x} = \frac{A_o - A_d(x)}{x} \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (2)$$

$\overline{12}$  = Segmento reta ponto 1 ponto 2 [mm]

$A_o$  = Aro do rodeiro original [mm]

$A_d$  = Aro do rodeiro desgastado [mm]

$x$  = distância percorrida rodeiro [ $10^5 \cdot km$ ]

Enquanto o valor de  $T_{es}$  é fixo para uma roda a uma dada distância percorrida, o valor de  $T_{r_i}$  poderá assumir três possibilidades distintas, ( $T_{r_t}$ ;  $T_{r_s}$  e  $T_{r_r}$ ).

Por definição,  $T_{r_t}$  corresponde à diferença entre o aro desgastado e o aro teórico, segmento  $\overline{23}$ , (após reperfilamento mínimo calculado via software), dividido pela distância percorrida. O aro teórico do perfil resultante é o de melhor aproveitamento possível, pois o perfil teórico é tangente ao perfil desgastado,

fato que garante a mínima remoção de material. Logo, com auxílio da Fig. 1, define-se:

$$T_{r_t}(x) = \frac{\overline{23}}{x} = \frac{A_d(x) - A_t(x)}{x} \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (3)$$

$\overline{23}$  = Segmento reta ponto 2 ponto 3 [mm]

$A_t$  = Aro do rodeiro com perfil teórico [mm]

Substituindo as equações (2) e (3) na equação (1), temos:

$$T_{d_t}(x) = T_{es}(x) + T_{r_t}(x)$$

$$T_{d_t}(x) = \frac{\overline{13}}{x} = \frac{A_o - A_t(x)}{x} \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (4)$$

Por definição,  $T_{r_s}$  corresponde à diferença entre o aro desgastado e o aro obtido em máquina operatriz CNC (segmento  $\overline{24}$ ), dividido pela distância percorrida. Logo, com auxílio da Fig. 1, define-se:

$$T_{r_s}(x) = \frac{\overline{24}}{x} = \frac{A_d(x) - A_s(x)}{x} \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (5)$$

$\overline{24}$  = Segmento reta ponto 2 ponto 4 [mm]

$A_s$  = Aro rodeiro pós usinagem CNC [mm]

Substituindo as equações (2) e (5) na equação (1), resulta em:

$$T_{d_s}(x) = T_{es}(x) + T_{r_s}(x)$$

$$T_{d_s}(x) = \frac{\overline{14}}{x} = \frac{A_o - A_s(x)}{x} \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (6)$$

Por definição,  $T_{r_r}$  corresponde à diferença entre o aro desgastado e o aro real obtido em máquina operatriz convencional (segmento  $\overline{25}$ ), conforme método aplicado atualmente (sem controle), dividido pela distância percorrida. Logo, com auxílio da Fig. 1, define-se:

$$T_{r_r}(x) = \frac{\overline{25}}{x} = \frac{A_d(x) - A_r(x)}{x} \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (7)$$

$\overline{25}$  = Segmento reta ponto 2 ponto 5 [mm]

$A_r$  = espessura aro pós usinagem real [mm]

Substituindo as equações (7) e (2) na equação (1), resulta em:

$$T_{d_r}(x) = T_{es}(x) + T_{r_r}(x)$$

$$T_{d_r}(x) = \frac{\overline{15}}{x} = \frac{A_o - A_r(x)}{x} \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (8)$$

## 2.2 Forma geral da equação da taxa de desgaste ( $T_{d_i}$ ) em função das espessuras dos aros.

Analisando os três métodos de taxa de desgaste calculados, define-se a forma geral da equação da taxa de desgaste da roda ferroviária como:

$$T_{d_i}(x) = \frac{A_o - A_t(x)}{x} \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (9)$$

$i = t, s, r$

$t =$  teórica, calculada via software

$s =$  utilização de torno de subsolo CNC

$r =$  real, encontrada no processo atual

## 2.3 Definições geométricas

Vamos agora definir algumas relações geométricas importantes para fazer com que as equações (4), (6), (8) e (9) possam ser aplicadas com maior facilidade.

As equações a seguir poderão ser deduzidas a partir da interpretação geométrica do perfil da roda ferroviária, conforme Fig. 1 anterior e Fig. 2 a seguir.

Definindo que o desgaste do aro corresponde à variação de altura dos frisos (medidos na mesma linha de referência – “gauge line”), temos:

$$A_o - A_d(x) = a_d(x) - a_o \quad [mm]$$

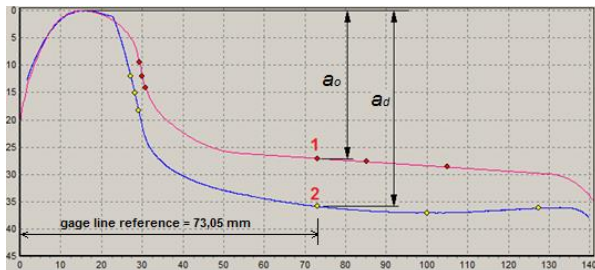


Fig. 2 Alturas de friso dos perfis original  $a_o$  e desgastado  $a_d$ .

$a_d =$  Altura friso roda desgastada [mm]

$a_o =$  Altura friso roda original [mm]

Isolando  $A_o$ , vem:

$$A_o = A_d(x) + a_d(x) - a_o \quad [mm] \quad (10)$$

Definindo que o aro do perfil teórico corresponde ao aro do perfil desgastado menos a espessura de aro removida via software ( $\overline{23}$ ), com auxílio da Fig. 1, temos:

$$A_t = A_d - \overline{23} = A_d - \Delta A_t \quad [mm]$$

$$\Delta A_t(x) = A_d(x) - A_t(x) \quad [mm] \quad (11)$$

$\Delta A_t =$  aro mínimo a remover (teórico) [mm]

De forma análoga, vamos definir as espessuras de aro removidas em máquina operatriz CNC e real, na ordem,  $\Delta A_s$  e  $\Delta A_r$ :

$$A_s = A_d - \overline{24} = A_d - \Delta A_s \quad [mm]$$

$$\Delta A_s(x) = A_d(x) - A_s(x) \quad [mm] \quad (12)$$

$$A_r = A_d - \overline{25} = A_d - \Delta A_r \quad [mm]$$

$$\Delta A_r(x) = A_d(x) - A_r(x) \quad [mm] \quad (13)$$

$\Delta A_s =$  espessura aro a remover CNC [mm]

$\Delta A_r =$  esp. aro a remover convencional [mm]

$$\Delta A_t(x) < \Delta A_s(x) < \Delta A_r(x) \quad [mm] \quad (14)$$

Onde a menor remoção de material possível é dada pelo reperfilamento teórico, seguida pelo reperfilamento em máquina operatriz CNC e pelo reperfilamento real (em equipamentos convencionais).

Definindo a precisão de representação do perfil para a máquina operatriz CNC através de informações fornecidas pelo fabricante, temos:

$$P_r = 0,2 \quad [mm] \quad (15)$$

$P_r =$  precisão de representação do perfil

$$\Delta A_s = \Delta A_t + P_r = \Delta A_t + 0,2 \quad [mm] \quad (16)$$

Para definir a variável  $\Delta A_r$ , de modo a termos uma equação utilizável no dia-a-dia, vamos utilizar o conceito de variação de TAPE [1].

$$1 \text{ TAPE} = \left(\frac{1}{8}\right)'' \text{ no comp. da circunf.} \quad (17)$$

$$\Delta R = \Delta A \cong 0,5 \quad [mm] \quad (18)$$

$\Delta A =$  variação aro linha de gauge line [mm]

$\Delta R =$  variação raio da circunferência [mm]

$\Delta c =$  variação comprimento circunf. [mm]

Leia-se que: “A variação de 1 TAPE corresponde à variação aproximada de 0,50 [mm] em espessura de aro da roda”.

Neste momento, podemos definir  $\Delta A_r$ :

$$\Delta A_r = 0,5 \cdot (t_d - t_r) \text{ [mm]} \quad (19)$$

$t_d$  = tape da roda desgastada  
 $t_r$  = tape da roda real padrão Rumo

O cálculo do tape a partir de um determinado valor de aro poderá ser efetuado pelas equações que definem o valor de tape de uma roda. Conforme AAR G [S-611] 71 [1], vem:

$$t_o = 8 \cdot (\pi \cdot D_o - 84) \quad (20)$$

$t_o$  = tape da roda original  
 $D_o$  = Diâmetro da roda original [polegadas]

Para um rodeiro com o aro desgastado, o valor para o tape poderá ser calculado pela seguinte relação:

$$t_d = 8 \left\{ \pi \left[ D_o - \frac{2(a_d - a_o)}{25,4} \right] - 84 \right\} \quad (21)$$

Para um rodeiro após reperfilamento com aro teórico, o valor para o tape poderá ser calculado pela seguinte relação:

$$t_t = 8 \left\{ \pi \left[ D_o - \frac{2(a_d - a_o + \Delta A_t)}{25,4} \right] - 84 \right\} \quad (22)$$

$t_t$  = tape teórico da roda reperfilada

Para um rodeiro após reperfilamento em máquina operatriz CNC o valor para o tape poderá ser calculado pela seguinte relação:

$$t_s = 8 \left\{ \pi \left[ D_o - \frac{2(a_d - a_o + \Delta A_t + 0,2)}{25,4} \right] - 84 \right\} \quad (23)$$

$t_s$  = tape da roda reperfilada em CNC

## 2.4 Equação da taxa de desgaste em serviço ( $T_{es}$ )

Vamos definir uma equação facilmente utilizável em programas de computador para a taxa de desgaste em serviço. Tomando a equação (10) e substituindo na equação (2), temos que:

$$T_{es}(x) = \frac{\overline{12}}{x} = \frac{A_o - A_d(x)}{x}$$

$$T_{es}(x) = \frac{[(A_d(x) + a_d(x) - a_o)] - A_d(x)}{x}$$

$$T_{es}(x) = \frac{a_d(x) - a_o}{x} \left[ \frac{\text{mm}}{10^5 \cdot \text{km}} \right] \quad (24)$$

## 2.5 Equação taxa de desgaste teórica ( $T_{dt}$ )

Vamos definir uma equação facilmente utilizável em programas de computador para a taxa de desgaste teórica. Tomando a equação (10) e substituindo na equação (4) temos que:

$$T_{dt}(x) = \frac{a_d(x) - a_o + [A_d(x) - A_t(x)]}{x} \quad (25)$$

Substituindo a equação (11), vem:

$$T_{dt}(x) = \frac{a_d(x) - a_o}{x} + \frac{\Delta A_t(x)}{x} \quad (26)$$

Ou ainda, substituindo a equação (24), vem:

$$T_{dt}(x) = T_{es}(x) + \frac{\Delta A_t(x)}{x} \left[ \frac{\text{mm}}{10^5 \cdot \text{km}} \right] \quad (27)$$

Onde é desejável o valor de  $\Delta A_t$  pois é obtido diretamente do perfilômetro a laser de rodas.

Ao fazer o acompanhamento de um material rodante, i.e. locomotiva ou vagão, poderá ser traçada a curva da taxa de desgaste versus a distância percorrida, na forma a seguir:

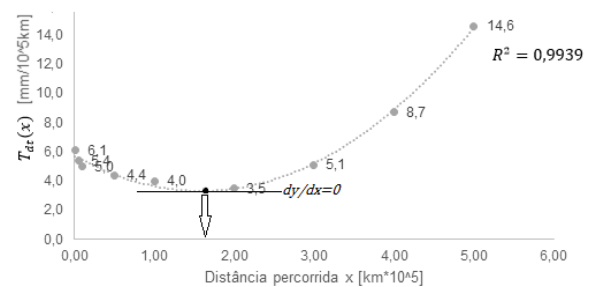


Fig. 3 Taxa de desgaste em função da distância percorrida (exemplo fictício).

O cálculo da menor taxa de desgaste poderá ser obtido através do cálculo da primeira derivada, igualando-se a zero.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dT_{dt}(x)}{dx} = 0 \quad (28)$$

Para determinar se o valor calculado é um ponto de mínimo, calcula-se a segunda derivada. Este valor deverá ser maior que zero.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d^2(T_{dt}(x))}{dx^2} > 0 \quad (29)$$

Determina-se, portanto, a distância de melhor rendimento  $x_\eta$  para o reperfilamento da roda tendo como base o valor da mínima taxa de desgaste teórica.

## 2.6 Equação da taxa de desgaste em máquina operatriz CNC ( $T_{d_s}$ )

Vamos definir uma equação facilmente utilizável em programas de computador para a taxa de desgaste durante reperfilamento em uma máquina operatriz CNC. Tomando a equação (10) e substituindo na equação (6), temos que:

$$T_{d_s}(x) = \frac{a_d(x) - a_o + [A_d(x) - A_s(x)]}{x} \quad (30)$$

Substituindo a equação (12), vem:

$$T_{d_s}(x) = \frac{a_d(x) - a_o}{x} + \frac{\Delta A_s(x)}{x} \quad (31)$$

Ou ainda, substituindo as equações (16) e (24), vem:

$$T_{d_s}(x) = T_{es}(x) + \frac{\Delta A_t(x) + 0,2}{x} \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (32)$$

Onde é desejável o valor de  $\Delta A_t$  pois é obtido diretamente do perfilômetro a laser de rodas.

## 2.7 Equação da taxa de desgaste real no processo Rumo ( $T_{d_r}$ )

Vamos definir uma equação facilmente utilizável em programas de computador para a taxa de desgaste real encontrada no processo Rumo. Tomando a equação (10) e substituindo na equação (8), temos que:

$$T_{d_r}(x) = \frac{a_d(x) - a_o + [A_d(x) - A_r(x)]}{x} \quad (33)$$

Substituindo a equação (13), vem:

$$T_{d_r}(x) = \frac{a_d(x) - a_o}{x} + \frac{\Delta A_r}{x} \quad (34)$$

Ou ainda, substituindo as equações (19) e (24), vem:

$$T_{d_r}(x) = T_{es}(x) + \frac{0,5 \cdot [(t_d(x) - t_r)]}{x} \left[ \frac{mm}{10^5 \cdot km} \right] \quad (35)$$

Onde são desejáveis os valores de  $t_d$  e  $t_r$  pois são obtidos diretamente a partir do processo de reperfilamento de rodas.

## 2.8 Equação economia de rodeiros com reperfilamento em máquina CNC ( $E_{r_s}$ )

A economia de rodeiros ferroviários com reperfilamento em máquina operatriz CNC ( $E_{r_s}$ ) poderá ser calculada comparando-se a taxa de desgaste do rodeiro atual ( $T_{d_r}$ ) com a taxa de desgaste do rodeiro calculada pela

usinagem em máquina operatriz CNC, ( $T_{d_s}$ ). Logo, temos que:

$$E_{r_s}(x) = \left[ \frac{T_{d_r}(x) - T_{d_s}(x)}{T_{d_r}(x)} \right] \quad (36)$$

Onde:

$E_{r_s}$  = Economia de rodeiros em máq. CNC

Substituindo as equações (6) e (8), vem:

$$E_{r_s} = \left[ \frac{\frac{A_o - A_r - \frac{A_o - A_s}{x}}{\frac{A_o - A_r}{x}}}{\frac{A_s - A_r}{A_o - A_r}} \right] \quad (37)$$

Substituindo as equações (10), (12) e (13), vem:

$$E_{r_s} = \left[ \frac{(A_d - \Delta A_s) - (A_d - \Delta A_r)}{(A_d + a_d - a_o) - (A_d - \Delta A_r)} \right]$$

Logo,

$$E_{r_s}(x) = \left[ \frac{\Delta A_r(x) - \Delta A_s(x)}{[\Delta A_r(x) + a_d(x) - a_o]} \right] \quad (38)$$

Podemos, agora, substituir as equações (16) e (19) para fazer com que a equação (38) anterior seja útil para aplicação em programas ou planilhas de cálculo. Logo, temos:

$$E_{r_s} = \left[ \frac{0,5 \cdot (t_d - t_r) - (\Delta A_t + 0,2)}{0,5 \cdot (t_d - t_r) + a_d - a_o} \right] \quad (39)$$

Que é a forma final para a equação da economia de rodeiros com reperfilamento em máquina operatriz CNC, ( $E_{r_s}$ ).

Esta metodologia de cálculo é particularmente útil para casas de rodas, onde deseja-se calcular a possível economia de material (rodeiros) que poderá ser atingida ao deixar de usar um rodeiro em uma máquina operatriz convencional em um processo de reperfilamento não controlado e utilizar uma máquina operatriz CNC, com a remoção mínima de aro para a reconstituição completa do perfil.

## 2.9 Equação da economia total de rodeiros ( $E_{t_r}$ ) com reperfilamento em máquina CNC e na distância de melhor rendimento ( $x_\eta$ )

No item 2.8 foi observado o cálculo da economia de rodeiros em máquina operatriz CNC ( $E_{r_s}$ ), comparado ao método atualmente utilizado na Rumo, executado em tornos convencionais. Poderá ser visto no Exemplo 2.

No Exemplo 4 será observado o cálculo de economia de rodeiros ( $E_{tr}$ ) ao definir-se que um rodeiro possui uma distância de melhor rendimento na qual deve ser retirado de serviço para reperfilamento; a esta distância corresponderá a uma taxa de desgaste mínima. Adicionalmente, será também considerado o efeito da usinagem mínima executada em máquina operatriz CNC.

A economia total de rodeiros ( $E_{tr}$ ) pode ser definida por uma reinterpretação da equação (36). Logo, temos que:

$$E_{tr} = \left[ \frac{\bar{T}_{drx_{m_i}} - \bar{T}_{dsx_{\eta_i}}}{\bar{T}_{drx_{m_i}}} \right] \quad (40)$$

$E_{tr}$  = Economia total de rodeiros, %  
 $\bar{T}_{drx_{m_i}}$  = Taxa de desgaste real méd. dist.  $x_{m_i}$   
 $\bar{T}_{dsx_{\eta_i}}$  = Taxa de desgaste méd. CNC em  $x_{\eta_i}$   
 $i$  = vida para a roda = 1, 2, ..., n

A definição da equação (40) corresponde ao cálculo da economia total de rodeiros onde se considera a mudança de uma cultura de reperfilamento corretivo em máquinas operatrizes convencionais no limite de condenação da roda, para uma cultura de reperfilamento preventivo em uma máquina operatriz CNC à distância percorrida de melhor rendimento do rodeiro ( $x_{\eta}$ ).

Desenvolvendo a equação, vem:

$$E_{tr} = \left[ \frac{\frac{A_{o_i} - A_{rx_{m_i}}}{x_{m_i}} - \frac{A_{o_i} - A_{sx_{\eta_i}}}{x_{\eta_i}}}{\frac{A_{o_i} - A_{rx_{m_i}}}{x_{m_i}}} \right] \quad (41)$$

$A_{o_i}$  = Aro original da roda na vida ( $i$ )  
 $A_{rx_{m_i}}$  = Aro em  $x_{m_i}$  pós usinagem real [mm]  
 $A_{sx_{\eta_i}}$  = Aro em  $x_{\eta_i}$  pós usinagem CNC [mm]

Que é inspirada nas equações (36) e (37). No entanto, nenhum termo pode ser simplificado. Esta é, portanto, a forma final para a equação da economia total de rodeiros.

Finalmente, manipulando a equação (41) para que seja possível trabalhar com uma nuvem de pontos de taxas de desgaste obtida através de dados coletados em campo em função da distância percorrida, temos:

$$E_{tr_i} = \left[ \frac{\left( \frac{\int_{x_{o_i}}^{x_{m_i}} T_{dt}(x) dx + 0,5 \left( t_{d_{x_{m_i}}} - t_{r_{x_{m_i}}} \right) - \Delta A_t x_{m_i}}{(x_{m_i} - x_{o_i})} \right) - \left( \frac{\int_{x_{o_i}}^{x_{\eta_i}} T_{dt}(x) dx + P_r}{(x_{\eta_i} - x_{o_i})} \right)}{\frac{\int_{x_{o_i}}^{x_{m_i}} T_{dt}(x) dx + 0,5 \left( t_{d_{x_{m_i}}} - t_{r_{x_{m_i}}} \right) - \Delta A_t x_{m_i}}{(x_{m_i} - x_{o_i})}} \right] \quad (42)$$

### 3. EXEMPLOS

#### 3.1 Exemplo 1

Um rodeiro de vagão CD29, inicialmente com aro ( $A_o$ ) 70 [mm], TAPE ( $t_o$ ) 63, diâmetro na linha de gauge ( $D_o$ ) de 29,25", altura de friso ( $a_o$ ) de 28,68 [mm] e espessura de friso ( $e_o$ ) de 31,02 [mm] foi aplicado em um vagão em 03/01/2013. Em 04/01/2018, este rodeiro foi retirado de serviço pois estava com friso fino. Medido com perfilômetro a laser na casa de rodas, acusou uma espessura de friso ( $e_d$ ) de 20,43 [mm]. A altura de friso encontrada ( $a_d$ ) foi de 35,44 [mm].

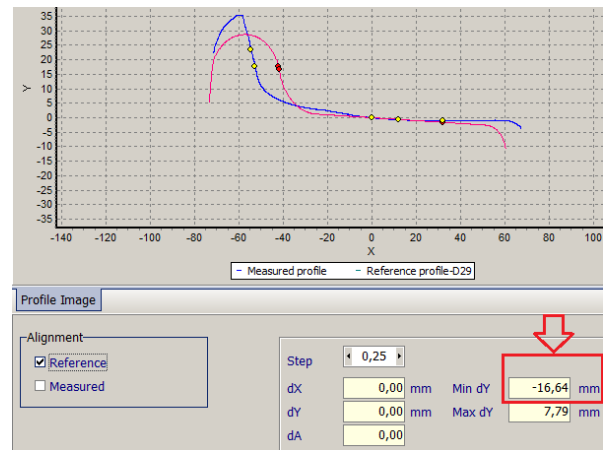


Fig. 4 Determinação da  $\Delta A_t$  via software, indicando o valor de 16,64 mm.

Neste período, o vagão rodou ( $x$ ) 453.000 [km]. O perfilômetro acusou uma espessura de remoção do aro para reperfilamento teórico ( $\Delta A_t$ ) de 16,64 [mm] via software.

Após o reperfilamento, retornou com as medidas originais de 31,02 [mm] de espessura de friso ( $e_r$ ) e 28,68 [mm] de altura de friso ( $a_r$ ), mas com TAPE 5 ( $t_r$ ).

Calcular:

- A espessura de aro desgastada ( $A_d$ );
- O tape do aro desgastado ( $t_d$ );
- A taxa de desgaste em serviço ( $T_{es}$ );
- A taxa de reperfilamento teórica ( $T_{rt}$ );
- A taxa de desgaste teórica ( $T_{dt}$ );
- A taxa de desgaste caso o rodeiro seja usinado em máquina CNC ( $T_{ds}$ );



- vii. A taxa de desgaste real ( $T_{d_r}$ );  
viii. A espessura de aro real ( $A_r$ ).

- i. Cálculo da espessura de aro desgastada ( $A_d$ ). Aplicando a equação (10):

$$A_o = A_d + a_d - a_o \text{ [mm]}$$

$$70 = A_d + 35,44 - 28,68 \text{ [mm]}$$

$$A_d = 70 - 35,44 + 28,68 = 63,24 \text{ [mm]}$$

- ii. Cálculo do tape do aro desgastado ( $t_d$ ). Aplicando a equação (21):

$$t_d = 8 \cdot \left\{ \pi \cdot \left[ D_o - \frac{2 \cdot (a_d - a_o)}{25,4} \right] - 84 \right\}$$

$$t_d = 8 \cdot \left\{ \pi \cdot \left[ 29,25 - \frac{2 \cdot (35,44 - 28,68)}{25,4} \right] - 84 \right\}$$

$$t_d \cong 50$$

- iii. Cálculo da taxa de desgaste em serviço ( $T_{es}$ ). Aplicando a equação (24):

$$T_{es} = \frac{a_d - a_o}{x} = \frac{35,44 - 28,68}{4,53} = 1,49 \left[ \frac{\text{mm}}{10^5 \cdot \text{km}} \right]$$

- iv. Cálculo da taxa de reperfilamento teórica ( $T_{r_t}$ ). Aplicando as equações (3) e (11):

$$T_{r_t} = \frac{\Delta A_t}{x} = \frac{16,64}{4,53} = 3,67 \left[ \frac{\text{mm}}{10^5 \cdot \text{km}} \right]$$

- v. Cálculo da taxa de desgaste teórica ( $T_{d_t}$ ). Aplicando a equação (27):

$$T_{d_t} = T_{es} + \frac{\Delta A_t}{x} = 1,49 + 3,67 = 5,16 \left[ \frac{\text{mm}}{10^5 \cdot \text{km}} \right]$$

- vi. Cálculo da taxa de desgaste em máquina CNC ( $T_{d_s}$ ). Aplicando a equação (32):

$$T_{d_s} = T_{es} + \frac{\Delta A_t + 0,2}{x} = T_{es} + \frac{16,64 + 0,2}{4,53}$$

$$T_{d_s} = 1,49 + 3,71 = 5,20 \left[ \frac{\text{mm}}{10^5 \cdot \text{km}} \right]$$

- vii. Cálculo da taxa de desgaste real ( $T_{d_r}$ ). Aplicando a equação (35):

$$T_{d_r} = T_{es} + \frac{0,5 \cdot (t_d - t_r)}{x}$$

$$T_{d_r} = 1,49 + \frac{0,5 \cdot (50 - 5)}{4,53} = 6,46 \left[ \frac{\text{mm}}{10^5 \cdot \text{km}} \right]$$

- viii. Cálculo da espessura de aro real ( $A_r$ ). Aplicando a equação (19):

$$\Delta A_r = 0,5 \cdot (t_d - t_r) \text{ [mm]}$$

$$\Delta A_r = 0,5 \cdot (50 - 5) = 22,5 \text{ [mm]}$$

Aplicando a equação (13):

$$\Delta A_r = A_d - A_r \text{ [mm]}$$

$$A_r = 63,24 - 22,5 = 40,74 \text{ [mm]}$$

Comentários:

- i. Conforme previsto,  $T_{es} < T_{r_t}$  ( $1,49 < 3,67$ ) pois trata-se de uma roda de vagão. No caso de vagões, haverá uma predominância do desgaste da espessura de friso e pouco desgaste de aro em serviço. Em locomotivas,  $T_{es}$  terá valor maior, pois o esforço trator nos rodeiros impõe um maior desgaste do aro.
- ii. Conforme previsto,  $T_{d_t} < T_{d_s} < T_{d_r}$  ou seja,  $5,16 < 5,20 < 6,46 \left[ \frac{\text{mm}}{10^5 \cdot \text{km}} \right]$

### 3.2 Exemplo 2

Calcule o valor da economia de rodeiros em máq. CNC ( $E_{r_s}$ ) para o rodeiro do Exemplo 1.

$$a_o = 28,68 \text{ [mm]}; \quad a_d = 35,44 \text{ [mm]}; \quad \Delta A_t = 16,64 \text{ [mm]}; \quad t_r = 5; \quad t_d \cong 50$$

- i. Cálculo da economia de rodeiros em máq. CNC, ( $E_{r_s}$ ). Equação (39):

$$E_{r_s} = \left[ \frac{0,5 \cdot (t_d - t_r) - (\Delta A_t + 0,2)}{0,5 \cdot (t_d - t_r) + a_d - a_o} \right]$$

$$E_{r_s} = \left[ \frac{0,5 \cdot (50 - 5) - (16,64 + 0,2)}{0,5 \cdot (50 - 5) + 35,44 - 28,68} \right]$$

$$E_{r_s} = \left[ \frac{22,5 - 16,84}{22,5 + 6,76} \right] = \frac{5,66}{29,26} = 0,193 \text{ ou } 19,3 \text{ [%]}$$

Comentários:

Existe um potencial de economia de material de 19,3% caso a roda do Exemplo 1 fosse usinada em uma máquina CNC, em comparação ao método de reperfilamento em torno convencional atualmente empregado.

### 3.3 Exemplo 3

Determine a distância de melhor rendimento ( $x_\eta$ ) para a curva da taxa de desgaste teórica dada pela Fig. 3, sabendo que a curva de tendência é dada pela equação abaixo.

$$y = T_{d_t}(x) = 0,9604 \cdot x^2 - 3,0545 \cdot x + 5,7285$$

Solução: Cálculo da primeira derivada.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{d(T_{dt}(x))}{dx} = 0 = 2 \cdot 0,9604 \cdot x - 3,0545$$

$$x \rightarrow x_{\eta}$$

$$x_{\eta} = \frac{3,0545}{2 \cdot 0,9604} = 1,590 \text{ [} 10^5 \cdot \text{km]}$$

Que corresponde à distância de melhor rendimento, sendo a distância ideal para a usinagem da roda ferroviária.

Cálculo da segunda derivada.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d^2(T_{dt}(x))}{dx^2} > 0$$

$$\frac{d^2(T_{dt}(x))}{dx^2} = 2 \cdot 0,9604 = 1,9208 > 0$$

Portanto, trata-se de um ponto de mínima taxa de desgaste.

### 3.4 Exemplo 4

Considere que o rodeiro descrito no Exemplo 1 e Exemplo 2 seja direcionado para reperfilamento à distância de melhor rendimento  $x_{\eta_1} = 1,85 \text{ [} 10^5 \cdot \text{km]}$  durante a primeira vida. Calcular a economia total durante a primeira vida, sabendo que este rodeiro após reperfilamento em máquina CNC estava com uma espessura de aro  $A_{Sx_{\eta_1}} = 61,0 \text{ [mm]}$ . Do Exemplo 1 e Exemplo 2, temos:

$$A_o = A_{o_1} = 70 \text{ [mm]; } A_r = A_{r_{x_{m_1}}} = 40,74 \text{ [mm]; } x = x_{m_1} = 4,53 \text{ [} 10^5 \cdot \text{km]}$$

Como dados hipotéticos considerados neste exemplo, temos:

$$x_{\eta_1} = 1,85 \text{ [} 10^5 \cdot \text{km]}$$

$$A_{Sx_{\eta_1}} = 61,0 \text{ [mm]}$$

i. Cálculo da economia total de rodeiros em máquina CNC à distância de melhor rendimento. Equação (41):

$$E_{t_r} = \left[ \frac{\frac{A_{o_i} - A_{r_{x_{m_i}}}}{x_{m_i}} - \frac{A_{o_i} - A_{Sx_{\eta_i}}}{x_{\eta_i}}}{\frac{A_{o_i} - A_{r_{x_{m_i}}}}{x_{m_i}}} \right] = \left[ \frac{\frac{70 - 40,74}{4,53} - \frac{70 - 61}{1,85}}{\frac{70 - 40,74}{4,53}} \right]$$

$$E_{t_r} = 24,7 \text{ [%]}$$

### 3.5 Exemplo 5

Considerando a equação da curva de tendência da taxa de desgaste dada pelo Exemplo 3, determine a economia de rodas

comparando o método atual de usinagem no momento da condenação em  $x_m = 383.000 \text{ [km]}$  contra o método da mínima taxa de desgaste, com usinagem em  $x_{\eta}$ , considerando que houve usinagem em máq. CNC, para uma roda de primeira vida.

$$x_{o_1} = 0,00 \text{ [} 10^5 \cdot \text{km]; } x_{\eta_1} = 1,59 \text{ [} 10^5 \cdot \text{km];}$$

$$x_{m_1} = 3,83 \text{ [} 10^5 \cdot \text{km]; } P_r = 0,2 \text{ [mm];}$$

$$t_{dx_{m_1}} = 219; \quad t_{rx_{m_1}} = 181 \quad \Delta A_{t_{x_{m_1}}} = 14,7 \text{ [mm]; } T_{dt}(x) = 0,9604 \cdot x^2 - 3,0545 \cdot x + 5,7285$$

Solução: Aplicação da eq. (42):

$$E_{t_{r1}} = \left[ \frac{\left( \frac{\int_0^{3,83} T_{dt}(x) dx + 0,5 \cdot (219 - 181) - 14,7}{(3,83 - 0)} \right) - \left( \frac{\int_0^{1,59} T_{dt}(x) dx + 0,2}{(1,59 - 0)} \right)}{\left( \frac{\int_0^{3,83} T_{dt}(x) dx + 0,5 \cdot (219 - 181) - 14,7}{(3,83 - 0)} \right)} \right]$$

$$E_{t_{r1}} = \left[ \frac{5,70 - 4,26}{5,70} \right] = 0,253 \text{ ou } 25,3 \text{ [%]}$$

Comentários:

É possível obter um valor significativo de economia de rodas caso seja conduzido um trabalho de se determinar o momento correto para o envio do rodeiro para reperfilamento e que a operação de usinagem seja executada com o máximo de precisão. Estes requisitos somente serão alcançados com o reperfilamento em uma máquina CNC no momento em que houver a mínima taxa de desgaste para o rodeiro. Desta forma, espera-se que este trabalho resulte em um incremento da vida útil das rodas, conforme Fig. 5.

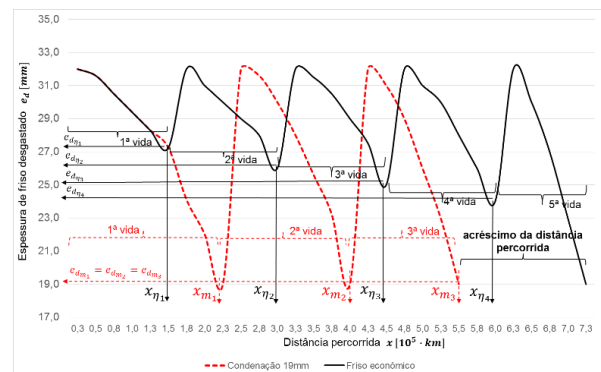


Fig. 5 Aumento da vida útil de rodas ferroviárias pela usinagem na mínima taxa de desgaste.

## 4. REFERÊNCIAS

[1] *Wheels – (TAPE) S-612 and S-613*. AAR - Association of American Railroads, Section [S-611], 2013.