

4º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

ANÁLISE ESTRUTURAL DE TRILHO PARA VALIDAÇÃO DO AUMENTO DO LIMITE
DE DESGASTE

INTRODUÇÃO

A Gerência de Manutenção do METRÔ (GMT) tem a sua preocupação voltada para os limites de desgaste lateral e vertical do trilho definidos em 12mm. O desgaste lateral é medido a 45° em relação à linha de centro do trilho. Este desgaste é evidente nos trilhos externos das curvas. O desgaste vertical, que aparece em decorrência do atrito de rolamento da banda de rodagem, localiza-se nos trilhos internos das curvas e nos trilhos das tangentes (retas). A taxa de desgaste vertical é menor, se comparada com a lateral que atinge, em média, a 1mm/ano nos trechos mais críticos (curvas com raios entre 300 e 500 metros), com trilho TR-57. A figura 1 traz os desgastes descritos. Objetiva-se com este Trabalho analisar a ampliação do limite máximo de desgaste do trilho, entre 3 e 6mm, gerando o menor custo

de manutenção possível, através da utilização máxima do trilho, sem comprometer a segurança do sistema.

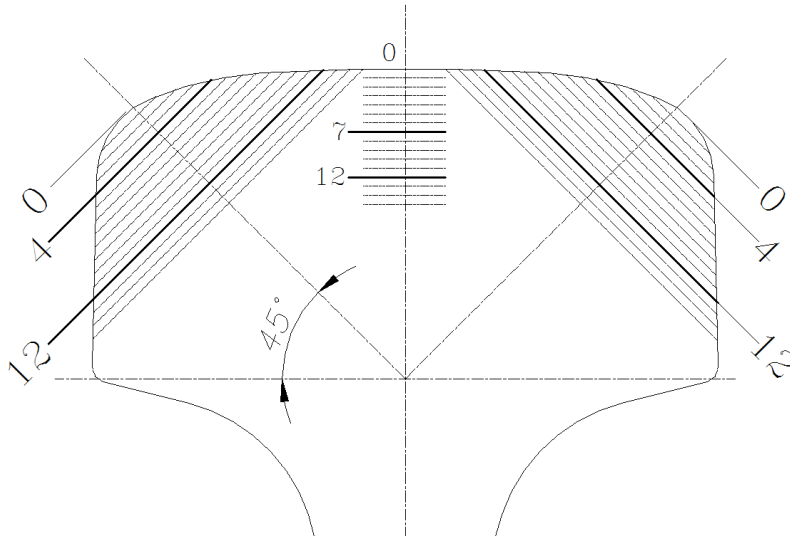


Figura 1 – Desgastes Lateral e Vertical do Trilho.

DIAGNÓSTICO

1 CONDICIONANTES QUE INTERFEREM NO LIMITE DE DESGASTE

1.1 CONSEQUÊNCIAS NO GABARITO DINÂMICO

O cálculo do gabarito dinâmico de livre passagem leva em consideração, entre outros fatores, erros máximos na superelevação que aumentam o tombamento do perfil do carro, em função do desnivelamento transversal da via, levando a um deslocamento geométrico lateral para um ou outro lado da curva. A caixa do carro e o truque sofrem este efeito. Desta forma, foram feitas análises para verificar se deverá ser limitado o valor de desgaste diferencial entre os dois trilhos em uma mesma seção.

1.1.1 Avaliação do Desgaste Vertical

O desgaste vertical simultâneo nos dois trilhos provoca uma variação no gabarito inferior do carro, enquanto que o desgaste vertical diferenciado provoca o tombamento no perfil do carro. Estas prerrogativas implicam em necessidade de análise. Foram feitas análises do gabarito dinâmico de livre passagem, através de software CAD em escala 1:1, tanto para os casos em tangente (superelevação = 0), quanto para região em curva com raio 300m (superelevação máxima = 170mm), utilizando o desgaste de 18mm em apenas um dos trilhos, neste caso, no trilho interno da curva. As figuras 2 e 3 trazem tais ilustrações.

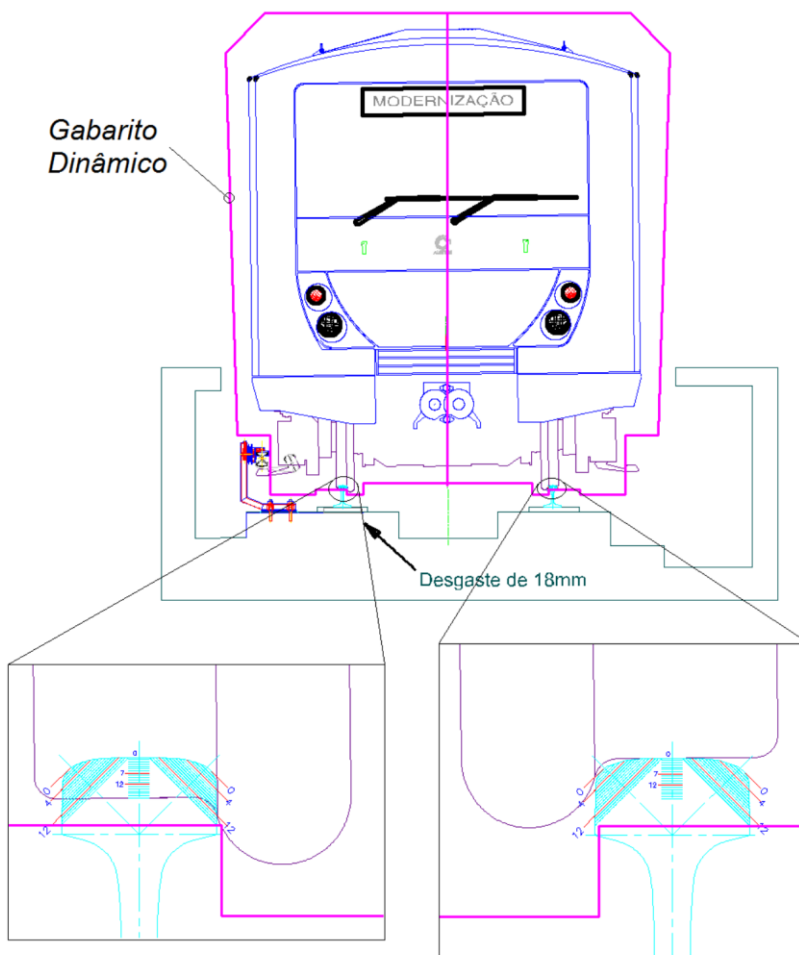


Figura 2 – Análise do Gabarito Dinâmico (superelevação = 0).

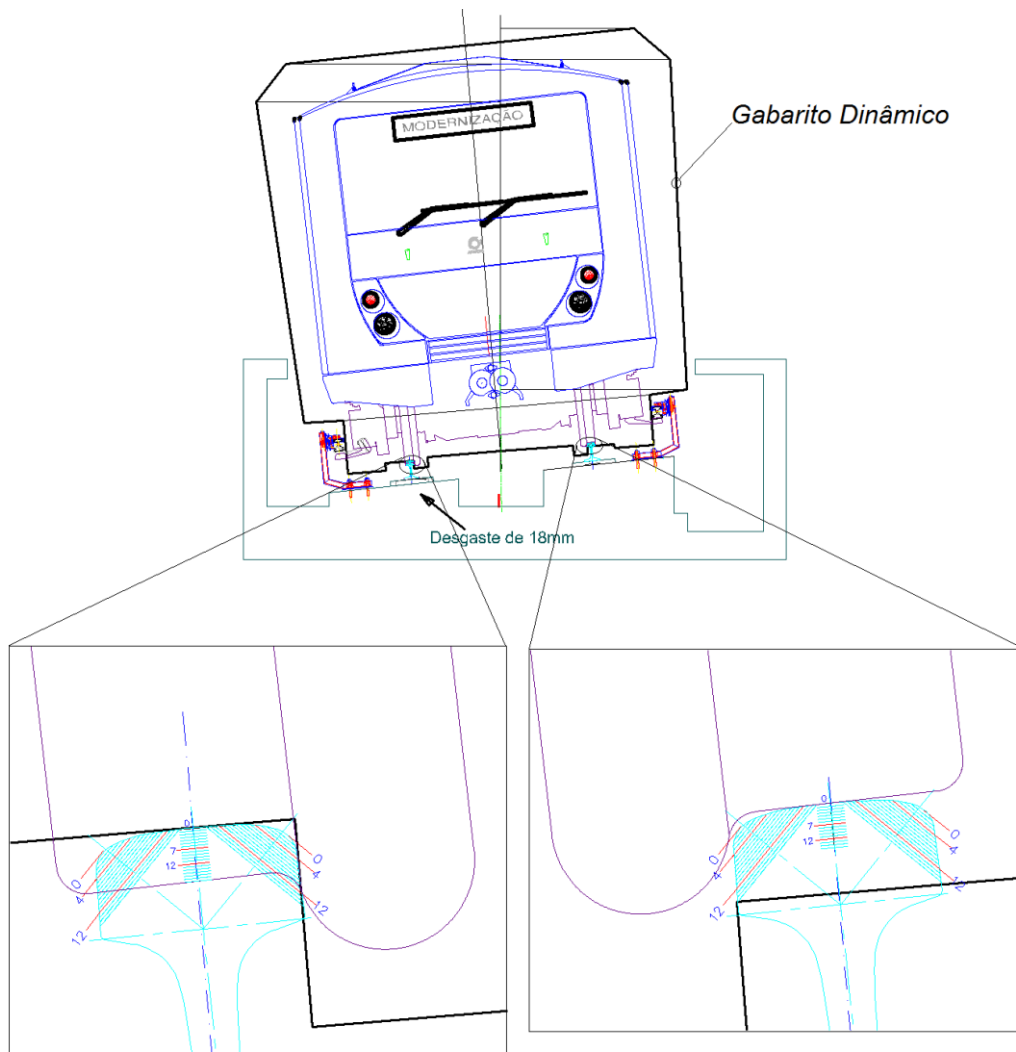


Figura 3 – Análise do Gabarito Dinâmico (superelevação = 170mm).

Observando as figuras 2 e 3, pode-se notar que, mesmo na pior condição (um trilho novo e o outro com desgaste de 18mm), o trem não invadirá o gabarito dinâmico de livre passagem, tanto para a condição de superelevação nula, quanto para a superelevação máxima e, por analogia, qualquer trilho com desgaste entre 12 e 18mm também não interferirá no gabarito dinâmico.

1.1.2 Avaliação do Desgaste Lateral

O desgaste lateral ocorre de forma diferenciada nos dois trilhos, provocando o tombamento no perfil do carro. Foram feitas análises do gabarito dinâmico de livre passagem, através de software CAD em escala 1:1, para região em curva com raio 300m (superelevação máxima = 170mm), utilizando o desgaste de 18mm em apenas um dos trilhos, neste caso, no trilho externo da curva. A figura 4 traz esta ilustração.

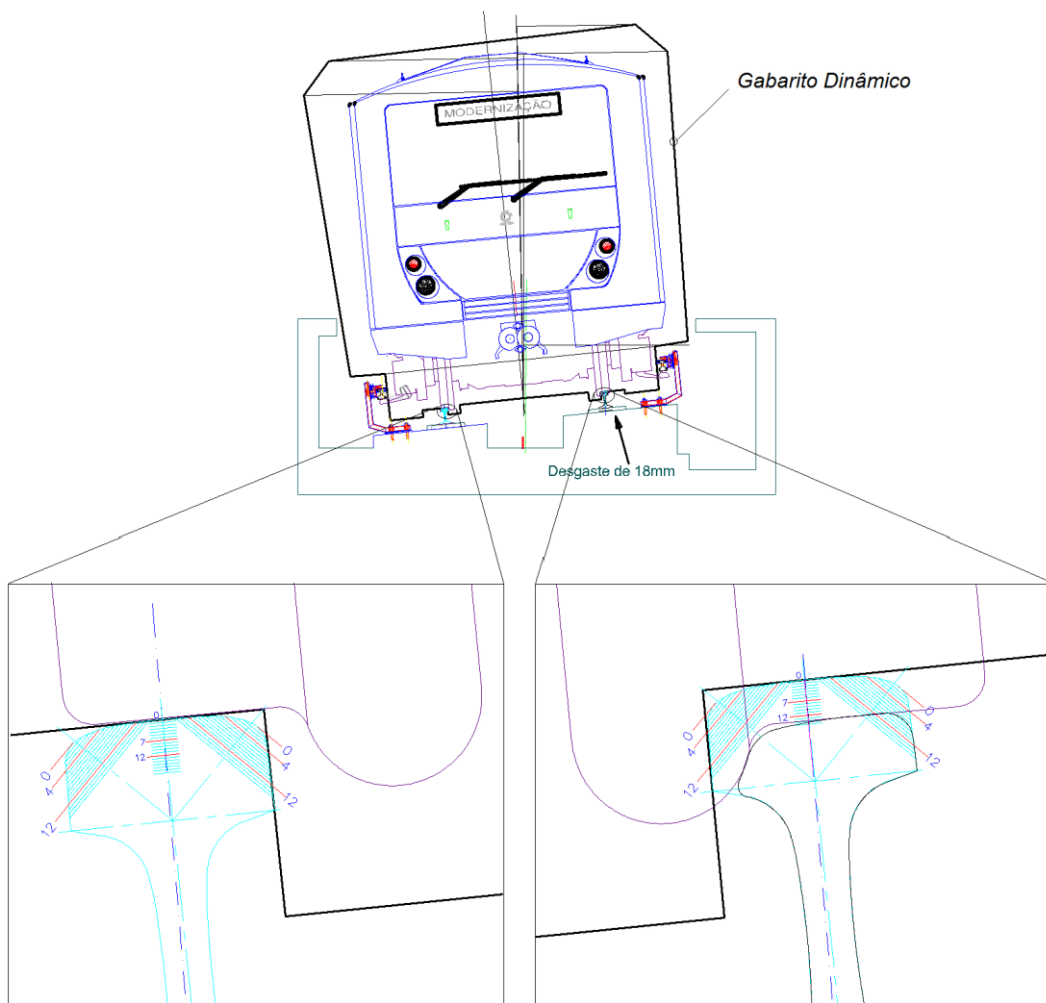


Figura 4 – Análise do Gabarito Dinâmico (superelevação = 170mm).

Observando a Fig. 4, pode-se notar que, mesmo na pior condição (um trilho novo e o outro com desgaste lateral de 18mm), o trem não invadirá o gabarito dinâmico de livre passagem, e, por analogia, qualquer trilho com desgaste entre 12 e 18mm também não interferirá no gabarito dinâmico.

1.2 CONSEQUÊNCIAS NA FORÇA LATERAL

Com a variação da superelevação, ocorre também aumento ou diminuição da aceleração centrípeta não compensada e, conseqüentemente, uma variação na força lateral no trilho externo. Tomando a pior situação que seria uma curva com raio 300m, superelevação 170mm e velocidade do trem de 80km/h, utilizando um trilho externo com desgaste de 18mm, foram feitos alguns equacionamentos para obter as forças centrípetas.

Calculando as Forças Centrípeta não Compensadas:

a) Superelevação de 170mm

$$a_{cpn} = \frac{v^2}{R} - g \frac{h}{B} \rightarrow a_{cpn} = \frac{22,2^2}{300} - 9,81 \frac{0,170}{1,6} \rightarrow a_{cpn} = 0,6005 \text{ m/s}^2$$

$$F_{cpn} = m \cdot a_{cpn} \rightarrow F_{cpn} = 17500 \cdot 0,6005 \rightarrow F_{cpn} = 10,5 \text{ kN}$$

(eq. 01)

b) Superelevação de 152mm (desgaste de 18mm)

$$a_{cpn} = \frac{v^2}{R} - g \frac{h}{B} \rightarrow \rightarrow a_{cpn} = \frac{22,2^2}{300} - 9,81 \frac{0,152}{1,6} \rightarrow \rightarrow a_{cpn} = 0,6809 \text{ m/s}^2$$

(eq. 02)

$$F_{cpn} = m \cdot a_{cpn} \rightarrow \rightarrow F_{cpn} = 17500 \cdot 0,6809 \rightarrow \rightarrow F_{cpn} = 11,9 \text{ kN}$$

Nota-se que, quando aplicado o desgaste de 18mm no trilho externo, diminuindo a superelevação de 170mm para 152mm, a força lateral no trilho externo aumenta 13%. Como força e tensão possuem uma relação linear, poderá ser analisada, no subitem 1.3 deste Artigo, a distribuição de tensão no trilho para este carregamento.

1.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS TRILHOS

Foram analisadas as tensões que os trilhos estão submetidos, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando licença temporária do software ANSYS, entre 16/maio/2017 e 13/junho/2017. O trilho analisado foi o AREMA-115-RE (TR-57) para as condições sem desgaste (trilho novo) e com desgastes de 12mm, 15mm e 18mm. O carregamento utilizado foi o de Projeto do METRÔ, ou seja, força vertical de 17,5ton/eixo (8,75ton/roda) e força lateral de 10,5kN, obtida através da aceleração centrípeta não compensada, calculada no subitem 1.2 deste Artigo. As seções de trilhos gastos foram obtidas através do MiniProf e projetadas para os desgastes propostos de 15mm e 18mm. A Fig. 5 mostra as seções extraídas do MiniProf e a Fig. 6 traz os perfis projetados.

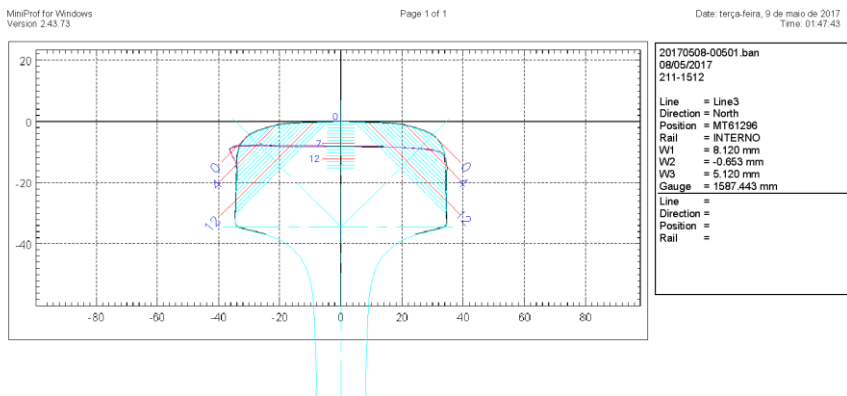
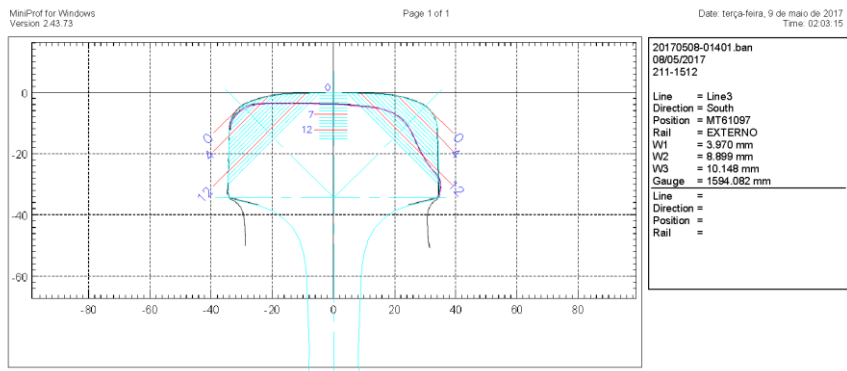


Figura 5 – Perfis de Trilhos com Desgaste (MiniProf).

Desg. 12mm

Desg. 15mm

Desg. 18mm

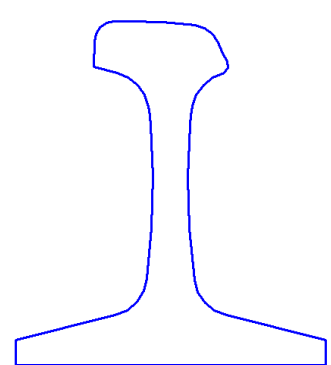
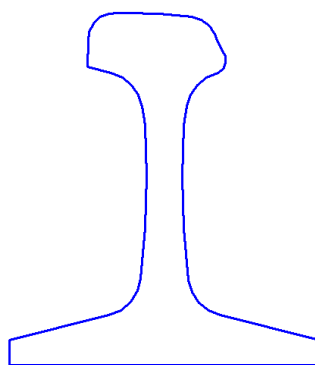
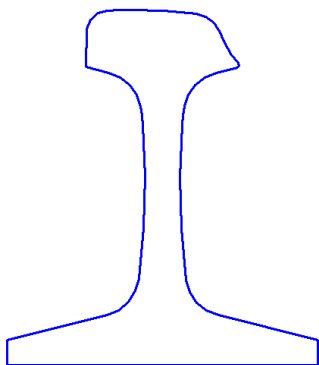


Figura 6 – Perfis de Trilhos com Desgastes Projetados.

Foram analisados os trilhos nas condições original sem desgaste e com os desgastes de 12, 15 e 18mm, utilizando como carregamento a força vertical de 87,5kN e lateral de 10,5kN. As figuras seguintes (7 a 12) trazem os resultados destas análises.

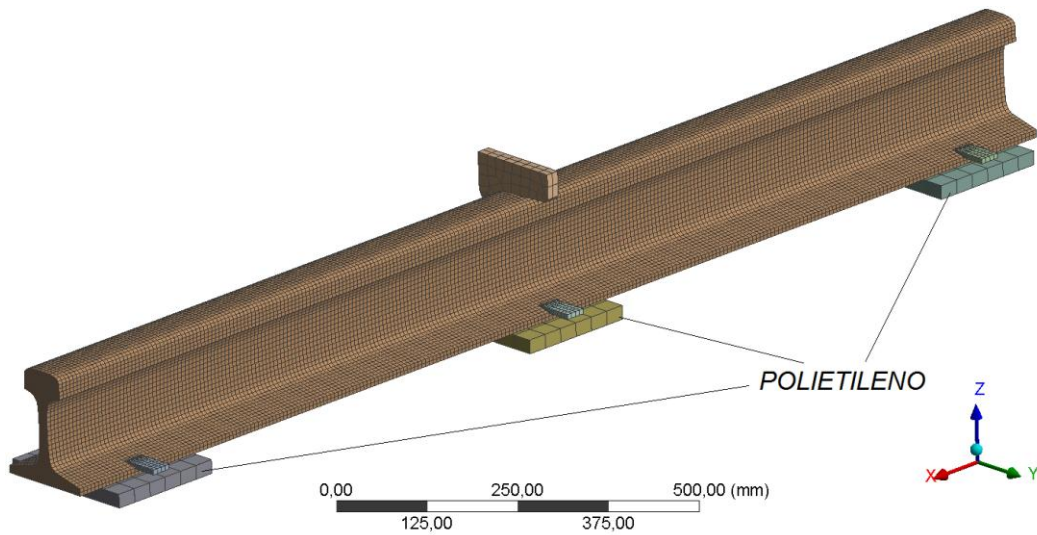


Figura 7 – Malha do Modelo de Elementos Finitos.

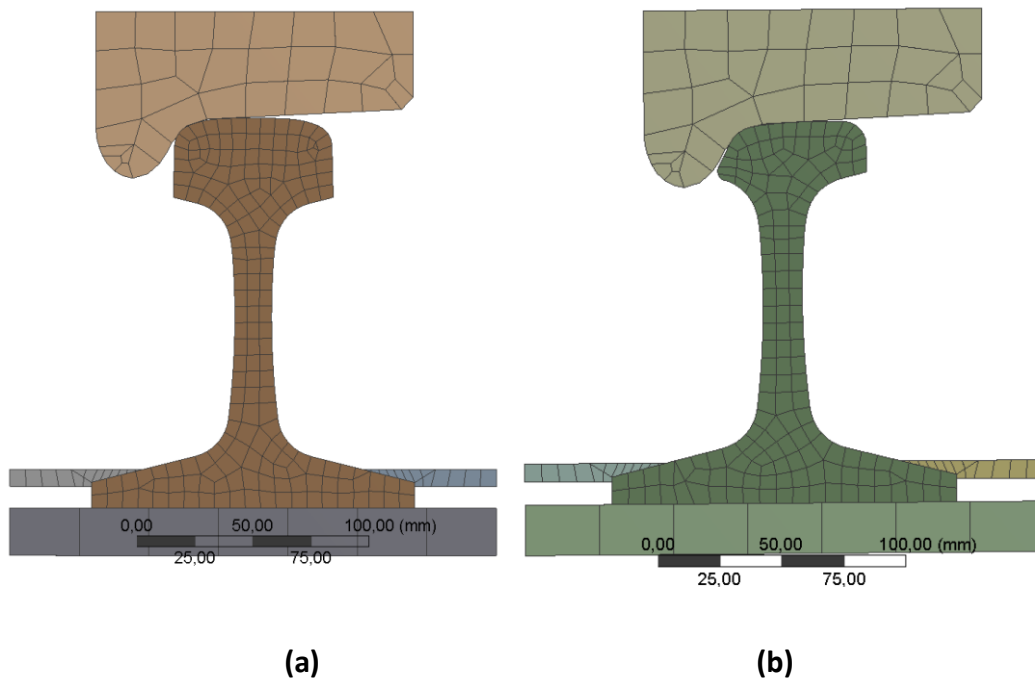
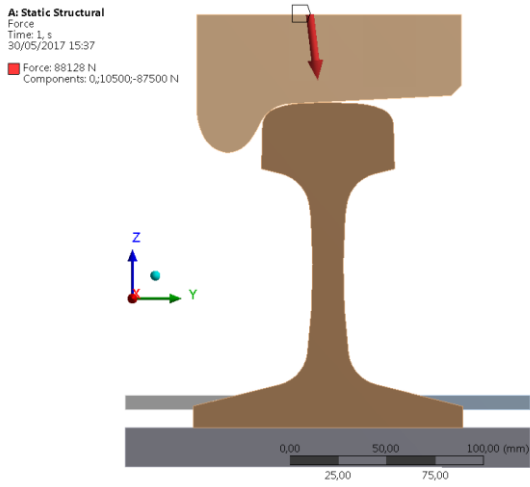
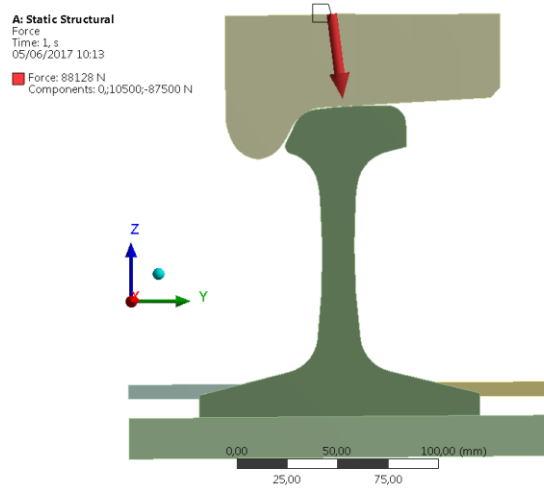


Figura 8 – (a) Malha do Trilho Novo; (b) Malha do Trilho com Desgaste de 18mm.

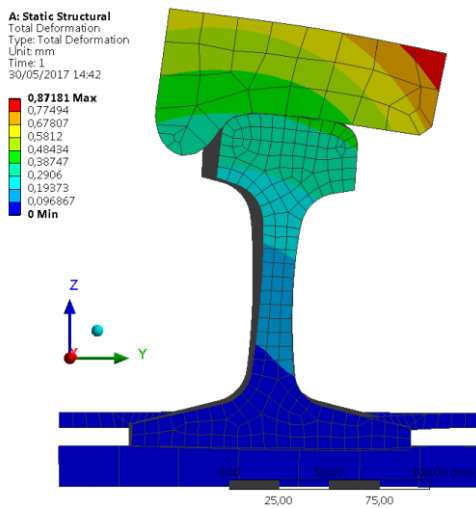


(a)

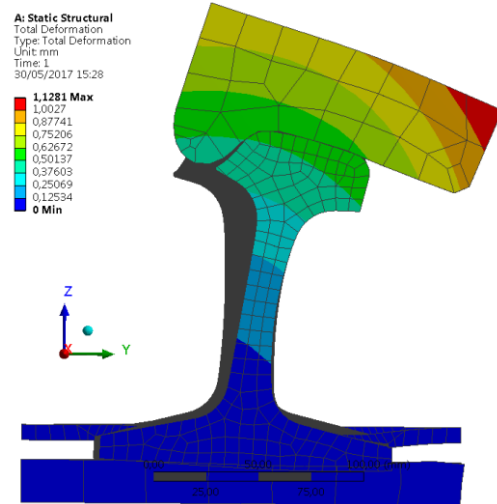


(b)

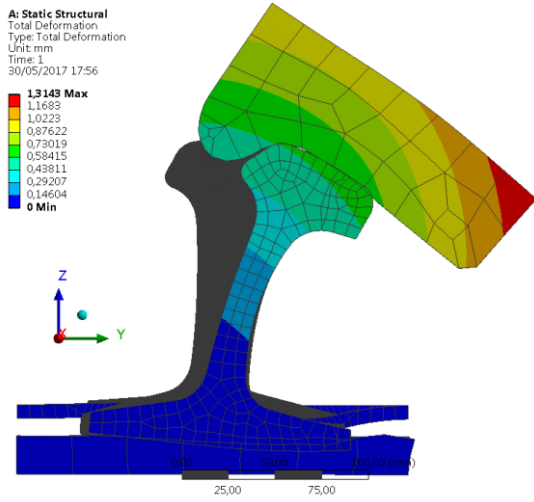
Figura 9 – (a) Carregamento no Trilho Novo; (b) Carregamento no Trilho com Desgaste de 18mm.



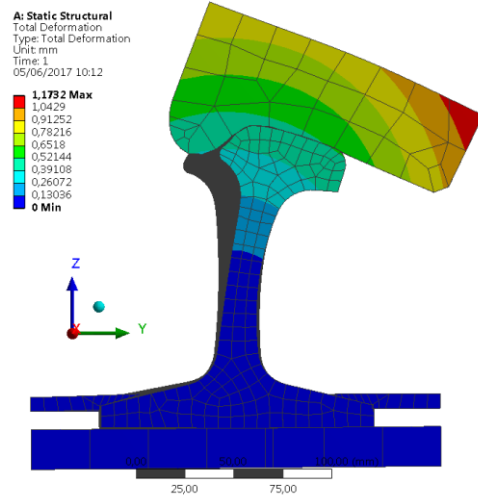
(a)



(b)

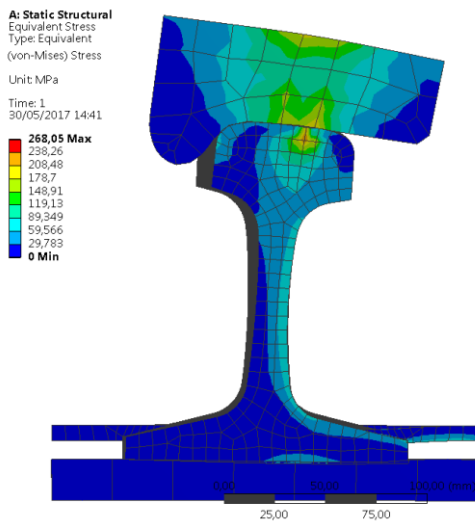


(c)

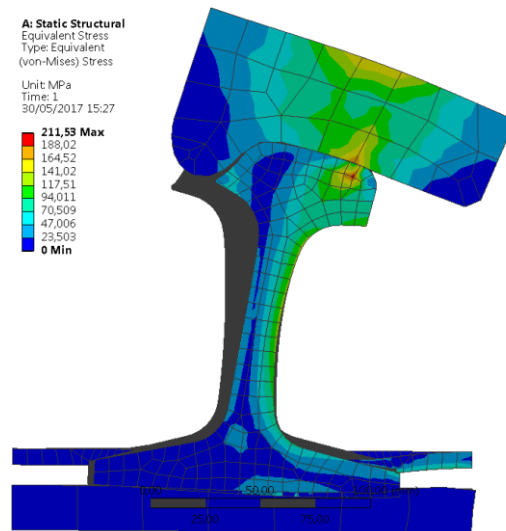


(d)

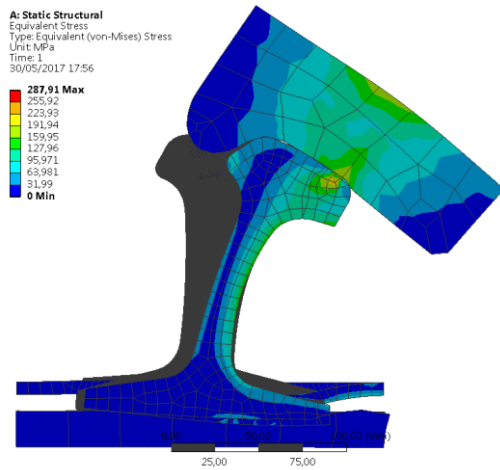
Figura 10 – Deformações (figuras com zoom entre 8x e 36x) - (a) Trilho Novo - zoom 8x; (b) Trilho com Desgaste de 12mm - zoom 20x; (c) Trilho com Desgaste de 15mm - zoom 36x; (d) Trilho com Desgaste de 18mm - zoom 20x.



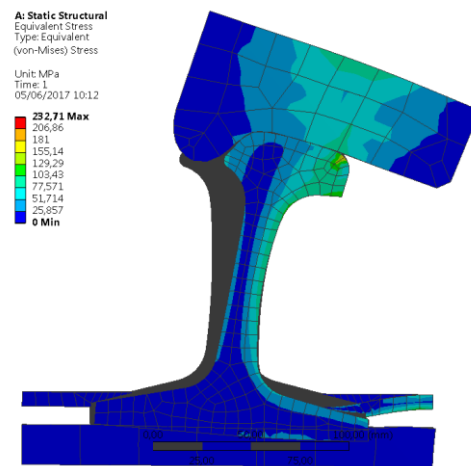
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11 – Distribuições das Tensões de von Mises (figuras com zoom entre 8x e 36x) - (a) Trilho Novo - zoom 8x; (b) Trilho com Desgaste de 12mm - zoom 20x; (c) Trilho com Desgaste de 15mm - zoom 36x; (d) Trilho com Desgaste de 18mm - zoom 20x.

Pode-se observar nas figuras que não há uma grande variação na distribuição das tensões médias de von Mises, tanto para um trilho novo, quanto para um trilho desgastado. Logo, o aumento do limite de desgaste do trilho não está limitado pela distribuição de tensão no mesmo. A Fig. 12 mostra em detalhe a distribuição de tensões de von Mises no boleto do trilho para o maior limite de desgaste proposto (18mm). Nota-se que a região de maior tensão é oriunda das forças de contato e não por deformação do trilho.

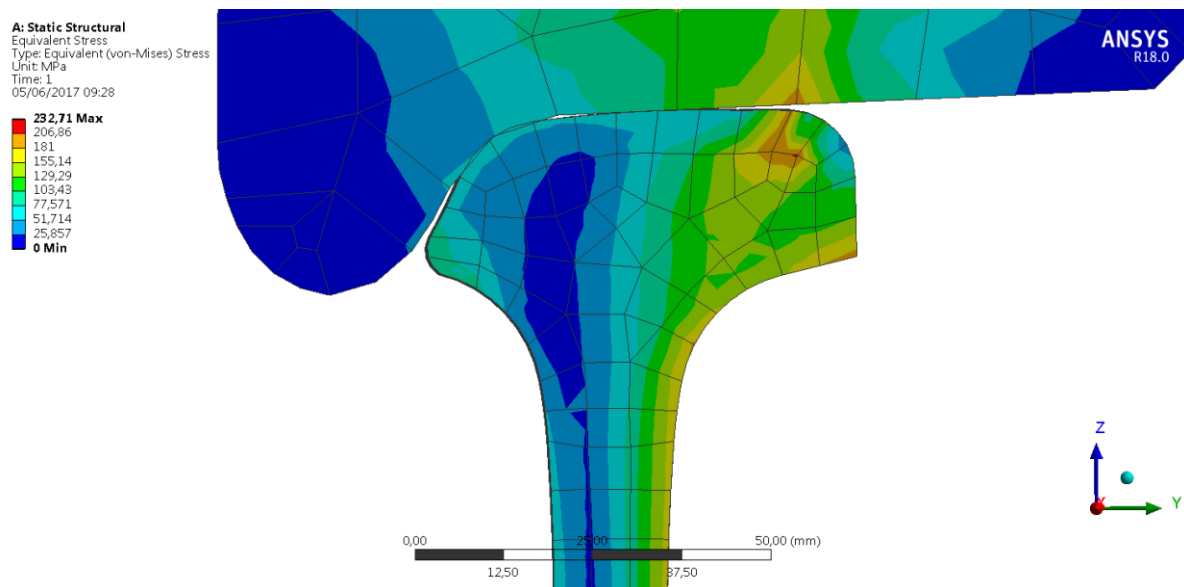


Figura 12 – Tensões de von Mises (trilho com desgaste de 18mm) - escala 1:1.

Como a tensão de escoamento mínima do trilho, pela Norma AREMA, capítulo 4, é de 74 ksi (510 MPa) e a tensão de ruptura mínima é de 142 ksi (979 MPa), pode-se verificar que o trilho, mesmo com desgaste de 18mm, resistirá ao carregamento, por apresentar uma tensão de 206MPa. Para o aumento de 13% no carregamento, mostrado nas equações 01 e 02 do subitem 1.2 deste Artigo, a tensão passará para 233MPa, que ainda está dentro do limite de escoamento do trilho.

1.4 AUMENTO DA RESISTÊNCIA ÔHMICA DO TRILHO

Os trilhos de rolamento, no METRÔ-SP, constituem parte integrante do sistema de alimentação elétrica dos trens, sendo os condutores de retorno, para a subestação, das correntes negativas de propulsão. Com a redução da seção transversal, a resistência ôhmica

deste condutor de retorno sofrerá um acréscimo do seu valor, pois esta resistência é inversamente proporcional à área da seção do condutor. Foram realizados os cálculos a seguir, considerando o pior cenário possível, sendo 4 trens no trecho relativo à subestação considerada e os 4 trilhos com o desgaste de apenas 15mm.

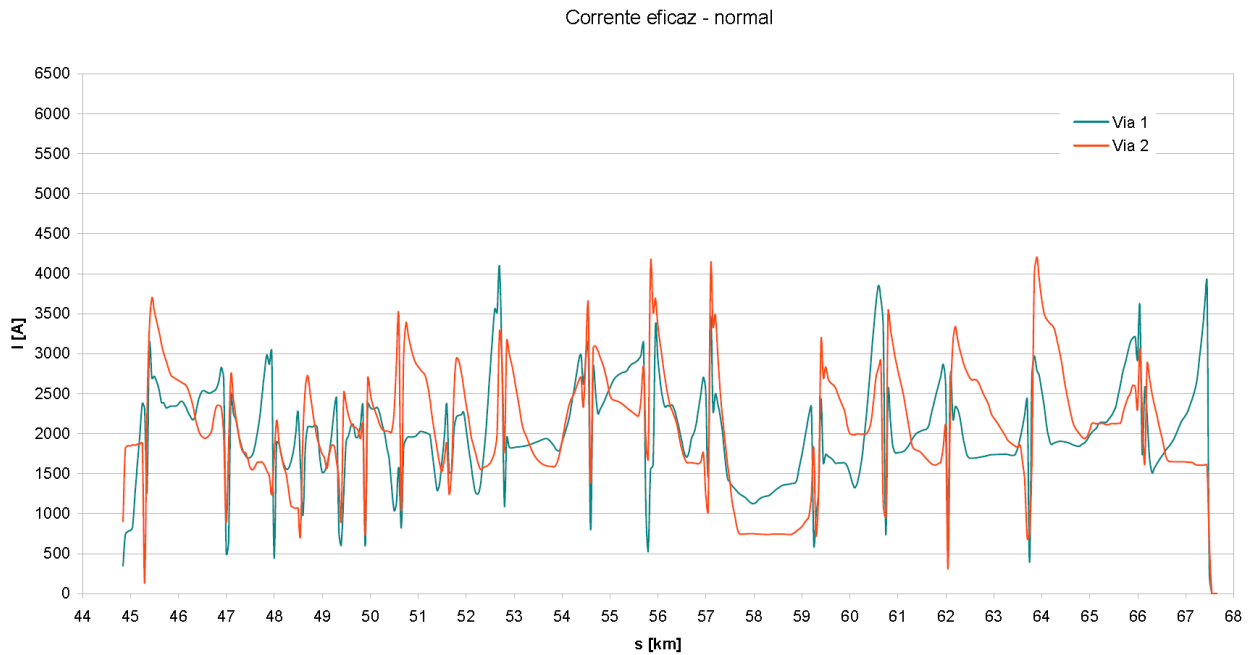


Figura 13 – Simulação da Corrente Utilizada para Alimentação Elétrica dos Trens

A Fig. 13 mostra a simulação realizada pela Gerência da Concepção de Sistemas do METRÔ (GCS) para projetar o sistema de alimentação elétrica dos trens para cada uma das vias de uma Linha qualquer, utilizando quatro trens entre duas subestações consecutivas.

Resistência por trilho:

$$R_{original} = \frac{\rho_{aço} \cdot L}{A} \rightarrow R = \frac{3 \times 10^{-7} \cdot 1}{0,0072075} \rightarrow R = 4,16 \times 10^{-5} \Omega / m$$

$$R_{desg. 12mm} = \frac{\rho_{aço} \cdot L}{A} \rightarrow R = \frac{3 \times 10^{-7} \cdot 1}{0,0065086} \rightarrow R = 4,61 \times 10^{-5} \Omega / m$$

$$R_{desg. 15mm} = \frac{\rho_{aço} \cdot L}{A} \rightarrow R = \frac{3 \times 10^{-7} \cdot 1}{0,0063212} \rightarrow R = 4,74 \times 10^{-5} \Omega / m$$

$$R_{desg. 18mm} = \frac{\rho_{aço} \cdot L}{A} \rightarrow R = \frac{3 \times 10^{-7} \cdot 1}{0,0060742} \rightarrow R = 4,94 \times 10^{-5} \Omega / m$$

(eq. 03)

Cálculo da diferença de Potência dissipada no trilho entre o desgaste atual de 12mm e o de 15mm: $\Delta R = R(\text{desg. 15mm}) - R(\text{desg. 12mm})$; corrente média em cada trilho (conforme gráfico simulado pela GCS): 1200 A.

$$P = \Delta R \times i^2 \rightarrow P = (4,74 \times 10^{-5} - 4,61 \times 10^{-5}) \cdot 1200^2 \rightarrow P = 1,44 W / m$$

(eq. 04)

Expandindo a diferença de potência dissipada no trilho, para as Linhas 1-Azul, 2-Verde e 3-Vermelha, tem-se:

Comprimento de trilhos da via comercial:

- Linha 1-Azul = 20.330m x 4 = 81.320 metros;
- Linha 2-Verde = 14.831m x 4 = 59.324 metros;
- Linha 3-Vermelha = 22.191m x 4 = 88.764 metros;
- Total = 229.408 metros

Assim, a diferença de potência dissipada no trilho para as 3 linhas pode ser calculada:

$$P_{Total} = 1,44 \frac{W}{m} \times 229.408 m \rightarrow \rightarrow P_{Total} = 330.348 W \quad (\text{eq. 05})$$

A energia gasta anualmente para dissipar esta potência nos trilhos, levando em consideração a Operação Comercial de 20 horas por dia, durante todo ano, pode ser calculada:

$$E = 330.348 \times 20 \times 365 \rightarrow \rightarrow E = 2.411.536.896 Wh \rightarrow \rightarrow E = 2.412 MWh \quad (\text{eq. 06})$$

O valor do MWh, contratado para 2017, é de R\$ 220,00 + R\$ 70,91. Dessa forma, o valor gasto em energia, por conta da diminuição da seção condutora do retorno negativo de corrente, está estimado em R\$ 701.674,92 anualmente, para as Linhas 1-Azul, 2-Verde e 3-Vermelha, quando o desgaste de todos os trilhos chegarem a 15mm. Ratificando que está sendo considerada a pior condição, que são quatro trens no circuito da subestação, todos os 4 trilhos com desgaste de 15mm. Não foi considerado o desgaste gradual do trilho entre 12 e 15mm, que é a condição real e que diminui a energia dissipada . Conseqüentemente, para trilhos com desgaste de 18mm, a potência dissipada no trilho será maior.

2 CONSUMO DE TRILHO E ECONOMIA PROPOSTA

O consumo médio de barras de trilhos nos últimos anos (AREMA 115-RE e UIC-60), obtido no sistema do METRÔ IMS-MK-42 da GMT/GLG (data base: 05/06/2017), está mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Consumo de Barras de Trilho

DESCRIÇÃO	CMMA 2	CMP	VALOR UNIT.
UIC-60 (24 m)	13	10	R\$ 8.487,86
UIC-60 (18m)	0	15	R\$ 4.916,28
TR-57 (24m)	24,6	58	R\$ 4.916,25

CMMA 2: Consumo Médio Mensal do ano 2016 ; CMP: Consumo Mensal Previsto

O desgaste médio de trilho TR-57, nas Linhas 1-Azul, 2-Verde e 3-Vermelha, é da ordem de 1mm/ano. Na Linha 5-Lilás é da ordem de 2mm/ano, em função dos excessivos raios entre 300 e 500m e da dureza inferior do trilho UIC-60. Para estes trilhos, cujo CMP é de 15 barras, anualmente seriam 180 barras, gerando um custo total de R\$885.000,00. Para os trilhos TR-57, cujo CMP é de 58 barras, anualmente seriam 696 barras, gerando um custo total de R\$3.422.000,00. Dessa forma, cada milímetro economizado de trilho, representa uma ausência de consumo anual da ordem de R\$4.307.000,00. Como a proposta inicial é de aumentar o limite de desgaste em 3mm, essa economia ao final de 3 anos seria da ordem de quase R\$ 13 milhões. A Fig. 14 mostra as economias pretendidas.

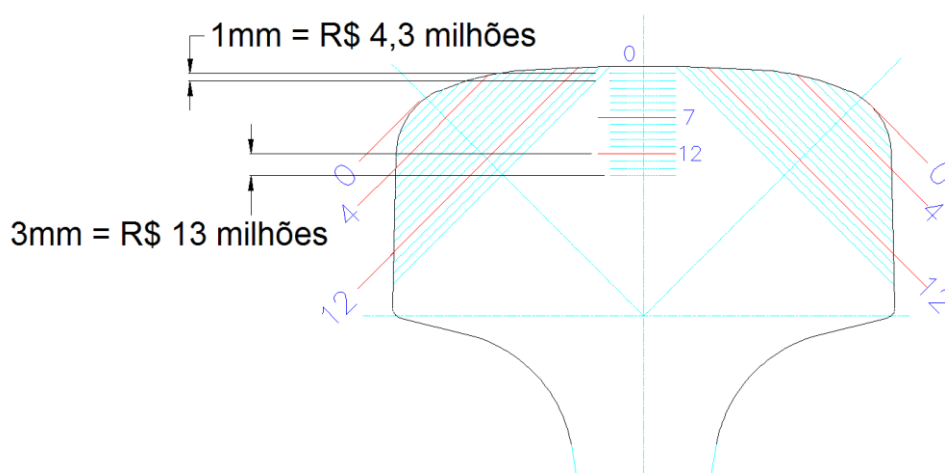


Figura 14 – Custo do Desgaste de Trilho

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste trabalho foi analisado o aumento do limite de desgaste de trilhos em via corrida em relação ao gabarito dinâmico, à geometria do contato roda-trilho, à resistência estrutural e ao aumento da resistividade ôhmica, com o conseqüente consumo de energia elétrica. Todos os itens analisados mostraram-se favoráveis à implantação do novo limite de desgaste de 15mm, inicialmente.

Mesmo na pior condição (um trilho novo e o outro com desgaste de 18mm), o trem não invadirá o gabarito dinâmico de livre passagem. Mesmo com desgaste de 18mm, o trilho resistirá ao carregamento, por apresentar uma tensões dentro do seu limite de escoamento. Quanto ao aumento do consumo de energia, em função da diminuição da seção transversal do condutor da corrente negativa de retorno, não foi significativo, apenas 8%, se comparado com a economia no consumo de trilhos, mesmo considerando as piores condições que são quatro trens no circuito de uma subestação e todos os trilhos no trecho com desgaste de 15mm.

CONCLUSÕES

Em função da necessidade de diminuição do custeio da Gerência de Manutenção do METRÔ-SP, foi proposto o aumento do limite de desgaste dos trilhos para 15mm, inicialmente, permitindo uma maior utilização deste item. Foram analisados os seguintes itens:

interferência com o gabarito dinâmico, aumento da força centrípeta nas curvas, resistência mecânica e aumento da resistividade ôhmica. Os itens analisados mostraram-se pouco interferentes no aumento de limite de desgaste do trilho.

Como não houve possibilidade de avaliar dinamicamente a passagem do rodeiro no trilho desgastado, conclui-se, inicialmente, que a ampliação do limite de desgaste para 15mm seja aplicada nas tangentes e trilhos internos das curvas.

Como recomendação para próximo trabalho, assim que for realizada a simulação computacional dinâmica, poder-se-á estender o desgaste de 15mm para os trilhos externos das curvas, além de analisar o aumento do limite de desgaste até 18mm, gerando, em 3 anos, mais R\$ 13 milhões de economia no custeio da Gerência de Manutenção do METRÔ-SP.

O estudo desenvolvido neste Artigo levou em consideração que as pistas de rolamento dos trilhos estejam em condições adequadas e isentas de defeitos e que estes trilhos sejam monitorados quanto a sua integridade através de ensaios não destrutivos. Caso não sejam removidos os defeitos superficiais de “headcheck” (micro trincas) e “pitching” (micro poros), este estudo não proverá o retorno financeiro mostrado, visto que os trilhos serão substituídos prematuramente por defeitos superficiais ou internos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PROFILIDIS, Vassilios A. - Railway Management and Engineering;

PORTO, Telmo Giolito - PTR 2501-Ferrovias - Apostila USP - Departamento de Engenharia de Transportes;

IRWIN, J. David - Circuitos Elétricos;

ANSYS Workbench - User's Guide and Tutorials.